共同研究報告書
整理番号第265号

植生の耐侵食機能を活用した侵食防止シートの開発に関する共同研究報告書

－シートの性能試験・評価法および施工・維持管理法に関する研究－

平成13年3月

国土交通省土木研究所河川部河川研究室
旭化成㈱
太陽工業㈱
㈱田中
東洋紡績㈱
東レ㈱
前田工繊㈱
三井化学産資㈱
三菱化学産資㈱
三菱樹脂㈱
ユニチカファイバー㈱

Copyright © (2001) by P.W.R.I
All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.
この報告書は，土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって，本報告書の全部又は一部の転載，複製は，土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

建設省は，平成13年１月６日付けで国土交通省に再編

共同研究報告書

整理番号第265号　2001年3月

植生の耐侵食機能を活用した侵食防止シートの開発に関する共同研究報告書

－シートの性能試験・評価法および施工・維持管理法に関する研究－

国土交通省土木研究所　河川部　河川研究室
室長　望月達也[1)]
室長　藤田光一[2)]
室長　末次忠司
主任研究員　服部敦

要　旨：

一様に繁茂した草本植物は高い耐侵食力を有するものの，モグラ孔や繁茂密度が小さい部分のような侵食されやすい弱点箇所が形成されて不均一になると，耐侵食力が著しく低下する。植物を堤防や河岸の侵食防止に利用する際の本質的課題は，コンクリートブロックや石材のように空間的に均一かつ時間的にも一定した耐侵食力を維持するのが困難なことである。国土交通省土木研究所と民間企業10社は，この本質的課題を解消し，草本植物のより積極的な活用を可能とすることを目的とした共同研究「侵食防止および植生繁茂制御の機能を有するシート材に関する研究」を実施して，侵食防止シートとそれを用いた侵食防止工の開発を行った。本報告書は，シート工法を正しく理解するため，また今後更なる改良を行う際の資料とすることを期待して，シートと各種手法の開発にあたって立脚した考え方(コンセプト・適用範囲・開発目標・要求性能)や根拠となる実験結果(侵食防止効果・強度・耐久性・安全性など)をとりまとめたものである。

キーワード：侵食防止シート，堤防・河岸防御工，コンセプト，要求性能，試験法，施工，維持管理

1）現　九州地方整備局河川部長
2）現　中部地方整備局三重工事事務所長

まえがき

植物には，条件によっては洪水時に堤防や河岸が侵食されるのを防止できるだけの耐侵食力があることが知られている。近年，草本植物の耐侵食力を評価できる手法が開発され，これらの手法を活用して侵食防止の可否をある程度見積もれるようになった。それによるとシバやチガヤの場合，高い密度で均一に繁茂していれば護岸と比べても見劣りがない耐侵食力がある。しかしゴルフ場のように非常にきめの細かい手入れをしていない堤防などでは，モグラ孔や繁茂密度が小さい場所などがある不均一な繁茂状況となるのが一般的である。そのような場合，不均一な箇所が侵食の生じやすい弱点箇所となるので，耐侵食力が非常に小さくなってしまう。植物を利用して侵食防止しようとした場合，護岸の材料として使用されるコンクリートブロックや石材のように均一さが無いこと，また時間的にも一定した耐侵食力（つまり良好な繁茂状況）を維持するのが困難なことが本質的課題となっている。しかし見方を変えれば，弱点箇所さえ補強できれば，植物がそもそも潜在的に備えている高い耐侵食力を発揮する能力を引き出すことができる。そこにヒントを得て開発したのが侵食防止シートである。

しかしながら侵食防止シートの耐侵食力は，植物よりは大きいものの，コンクリート護岸のようなガッチリした侵食防止工よりは小さい。このような中間的な耐侵食力を有するとともに，コストと環境保全の面でもより優れた工法であれば，ガッチリとした護岸が必要ないと判断がなされた河道区間（つまり良好な環境を保全できる候補地），特に河岸に比較して侵食外力が一般的に小さい堤防に適用することで，洪水に対する安全性の早期向上とコスト縮減について大きな効果を期待できる。侵食防止シートが，そのような侵食防止工の効果的な「使い分け」（植物のみ，つまり侵食防止工なしの場合も含めて）を促すきっかけになるのでは，と考えたことも開発に踏み切った理由の一つである。

侵食防止シートと似たような工法はあったが，いずれも開発途上の完成度の低いものであったため，かなり初歩的なところから開発を始めなければならなかった。そのため，例えば堤防など現場に施工して出水を経験しながら改良していくという開発を行えるほどの知見もシート試作品も無かった。本研究によって，特に耐久性の観点で，ようやく現場でたたき上げていけるだけの性能を有するシートが得られた。しかし耐久性を除いたシートに要求される他の項目（侵食防止効果，強度，施工性など）については，できるだけ現場に近い実大規模の実験を行い，その結果について力学的な解釈を加えることを積み上げて開発することで，完成度をできる限り高める努力を惜しまなかった。

本報告書は，そのような開発の経緯を記録することでシート工法を正確に理解してもらうとともに，また今後更なる改良を行う際の資料として活用されることを期待して，シートと施工・維持管理法の開発にあたって立脚した考え方（コンセプト・適用範囲・開発目標・要求性能）や根拠となる実験結果（侵食防止効果・強度・耐久性・安全性など）をとりまとめたものである。なお，シートの製造または施工・維持管理といった実務への上記成果の応用を手助けするために，別冊として手引きを作成しているので，実務関係者にはそちらも参照していただきたい。

共同研究担当者名簿

旭化成㈱			
	建材製造所ジオ技術開発部	部長	大和真一
		研究員	三浦信隆
太陽工業㈱			
	土木技術部	部長	法貴貫志郎
	土木技術部東京技術課	課長	桝尾孝之
		課長代理	杉山孝信
㈱田中			
	技術部	部長	中井清和
		課長補佐	村上豊
		主任	山中智央
	営業開発部	部長	宮崎興介
	営業部	課長補佐	品川隆宣
東洋紡績㈱			
	繊維開発センター	部長	伴薫
	SB事業部	主席部員	山田和正
	産業資材部	課長代理	西田孝
	繊維開発センター	部員	倉本隆宏
	堅田繊維開発センター	室員	森脇敦史
東レ㈱			
	資材開発室	室長	戸田和宏
	産資開発センター	部員	高砂武彦
		部員	山本英行
	生産技術第1部	主任	青木正博
前田工繊㈱			
	開発技術本部河川プロジェクト	課長	岡本敏雄
		課長	南本政司
			前田英史

三井化学産資㈱

商品研究所加工技術グループ	リーダー	福田諭吉
	研究員	鈴木　実
土木資材事業部ジオグリッドグループ	リーダー	西村　淳

三菱化学産資㈱

土木資材事業部技術開発グループ	理事部長	新谷秀人
	次長	吉川　進
	主任	間　昭徳
	主任	明永卓也
商品研究所	主任研究員	稲田克彦

三菱樹脂㈱

新規事業推進部	主査	吉田宏彦
	担当部長	小菅理宏
技術開発センター　プロジェクトマネージャー		三荒直也
		鈴木展康
		河野正彦

ユニチカファイバー㈱

開発部	部長代理	辻本啓三
	主管	石田善一
	部員	迫部唯行

目　　次

まえがき

第1章　シートを用いた侵食防止工のコンセプトと適用条件 …… 1
1.1　開発の背景　－侵食防止工に関わる考え方の進展－ …… 1
1.2　堤防に繁茂する植生の侵食防止効果と新工法のコンセプト …… 2
1.2.1　植生の侵食防止効果 …… 3
1.2.2　新工法の必要性とコンセプト …… 5
1.3　実用化のためのアイデア　－植生の耐侵食力の発揮機構を参考にして－ …… 6
1.3.1　耐侵食力を補強するための本質的課題 …… 6
1.3.2　耐侵食力補強に関するアイデア …… 7
1.4　シートを用いた侵食防止工の特徴 …… 11
1.4.1　シートの構成・素材・使用形態 …… 11
1.4.2　シートの侵食防止効果の発揮機構 …… 13
1.4.3　適用範囲と留意事項 …… 14
参考文献 …… 16

第2章　シートの開発目標と要求性能 …… 18
2.1　シートの開発目標 …… 18
2.1.1　堤防整備の現状と開発目標 …… 18
2.1.2　シートの目標単価　－コストと耐用年数の観点での優位性－ …… 20
2.2　シートの要求性能と本研究での目標および方針 …… 21
2.2.1　要求性能とその目的,基本方針 …… 21
2.2.2　検討項目とその試験・評価法の概要 …… 27
2.3　実験に用いたプロトタイプシート …… 28
参考文献 …… 28

第3章　シートの侵食防止効果 …… 37
3.1　評価法の基本的考え方と枠組み …… 37
3.1.1　シート敷設状況の想定とその評価法での位置づけ …… 37
3.1.2　評価対象とする侵食防止効果の定義(シート厚さを決める考え方) …… 38
3.1.3　侵食防止効果を表す指標と充填土砂の耐侵食力の評価 …… 38
3.1.4　侵食実験と流れ場の予測モデルを併用した評価手法の枠組み …… 39
3.1.5　限界掃流力の設定(組織的渦による吸い出し現象) …… 40
3.1.6　限界流速の評価法のまとめ …… 41

3.2　シート内外の流れ場のモデル …… 41
3.2.1　既往研究の概要と本研究の特徴 …… 41
3.2.2　シート内外の流れのモデル …… 43
3.2.3　混合距離モデルおよび固定床近傍での近似的取り扱いの
妥当性(透過係数が一定の場合) …… 46
3.3　シートの透過係数およびそれを用いた流れ場のモデル …… 50
3.3.1　シートの透過係数の変化特性とそのモデル …… 50
3.3.2　混合距離モデルおよび固定床近傍での近似的取り扱いの
妥当性(透過係数が変化する場合) …… 61
3.3.3　シートの限界流速評価への適用性 …… 79
3.4　シートに被覆された地表面の侵食特性と侵食限界の設定 …… 81
3.4.1　侵食実験の概要 …… 81
3.4.2　シートの侵食防止特性と限界流速の評価に用いるシート厚さ …… 82
3.4.3　限界掃流力の評価 …… 93
3.5　限界流速の評価法 …… 97
3.5.1　透過係数Kとレイノルズ数R_eの関係を求める
－管水路による抵抗測定実験－ …… 97
3.5.2　流れ場モデルの適用性の確認とカルマン定数κの調整
－可変勾配水路による流速測定実験－ …… 97
3.5.3　無次元限界掃流力τ_{*c}と厚さ割引率Rの設定
－矩形管水路による侵食実験－ …… 98
3.5.4　モデルによる評価の妥当性の確認
－侵食実験とモデルによって求めた限界流速の比較－ …… 98
3.5.5　限界流速の評価　－粘着力を有する充填土砂の耐侵食力を考慮して－ …… 99
参考文献 …… 101

第4章　根茎・ピンによるシートの固定性とシート重ね部・切断部・轍部・礫積載部での
侵食防止 …… 103
4.1　シート上での植生繁茂と根茎によるシート固定 …… 103
4.1.1　空隙径が根茎の伸長に与える影響 …… 103
4.1.2　シートに対する通根性 …… 115
4.1.3　根茎によるシートの固定 …… 120
4.1.4　まとめ …… 126
4.2　シート重ね部および打設したピン周辺での侵食特性 …… 132
4.2.1　実験の概要 …… 132
4.2.2　重ね部やピンが無い理想的状況での侵食状況
－侵食深の評価基準の設定－　(ケースⅠの実験結果) …… 142

4.2.3　ピン周辺の局所洗掘状況　（ケースⅡの実験結果）……142
4.2.4　流向に直交する重ね部周辺での侵食状況　（ケースⅢの実験結果）……142
4.2.5　流向に沿った重ね部周辺での侵食状況　（ケースⅣの実験結果）……148
4.2.6　3枚のシートの重ね部での侵食状況　（ケースⅤの実験結果）……151
4.2.7　まとめ……153
4.3　シートの切断,轍形成に伴う変形およびシート上に礫が設置された場合での侵食防止効果……153
4.3.1　実験の概要……153
4.3.2　シート切断と礫設置の実験結果……155
4.3.3　轍部の実験結果……155
4.3.4　まとめ……167
参考文献……168

第5章　シートへの土砂充填工法の開発と土砂充填が可能なシート諸元……169
5.1　土砂充填工法の開発……169
5.1.1　充填工法案とそれらの比較……169
5.1.2　開発した充填工法のまとめ……181
5.2　土砂充填が可能なシート諸元……182
5.2.1　土砂充填性実験の概要……182
5.2.2　代表空隙径と充填深の関係……183
5.2.3　シート下面と地面との隙間への土砂充填性……188
5.3　まとめ……189

第6章　シートの強度・加工性に関する要求性能と試験法……190
6.1　損傷・不具合発生状況とそれに関連する強度特性……190
6.1.1　損傷・不具合発生状況……190
6.1.2　要求性能の整理と試験方法の選定方針……200
6.2　供用時に損傷が発生する条件とその強度設定における取り扱い……202
6.2.1　実験概要……203
6.2.2　草刈り機の走行に対する損傷……203
6.2.3　自動車および重機の走行に対する損傷……209
6.2.4　強度設定での取り扱い……209
6.3　施工・撤去実験に基づく強度・加工性の試験法の提案……209
6.3.1　引っ張り力に対する損傷防止に必要な強度……209
6.3.2　引っ張りに伴う変形の回復……216
6.3.3　衝撃力に対する破断防止に必要な強度……219
6.3.4　圧縮による変形の回復……222

6.3.5　施工・維持修繕の作業性確保のための強度・加工性 ……223
参考文献 ……229

第7章　シートの耐久性 ……230
7.1. 試験項目の選定と試験・評価法……230
7.1.1　既往の土木資材の試験項目を参考にしての選定 ……230
7.1.2　シートに特有な環境条件を想定しての選定 ……232
7.2　試験・評価法の整理とシートへの適用に関する留意事項……235
7.2.1　促進暴露および屋外暴露試験 ……236
7.2.2　耐薬品性試験 ……241
7.2.3　耐熱・耐寒性試験 ……243
7.2.4　凍結～融解試験 ……246
7.2.5　耐土壌性試験 ……248
7.2.6　各試験結果に基づく評価方法 ……248

第8章　シートの安全性 ……252
8.1　解れ易さの評価と解れ防止法……252
8.1.1　解れ易さの評価 ……252
8.1.2　施工時における解れ防止 ……252
8.1.3　シート製造時での解れ防止加工 ……252
8.2　耐燃焼性の試験方法と評価……253
8.2.1　シートの燃焼性と土砂充填による燃焼防止効果 ……253
8.2.2　試験方法の検討 ……258
8.2.3　耐燃焼性の評価 ……260
8.3　人体および生態系に対する安全性に関する事前調査法……260
8.3.1　燃焼時に発生するガスの成分試験法と有害性の評価 ……261
8.3.2　環境ホルモンと疑われる化学物質の含有量および
水への溶出量に関する試験法 ……267
参考文献 ……288

巻末資料1　シートの施工法……289
巻末資料2　損傷部の修繕方法……297

あとがき

第１章　シートを用いた侵食防止工のコンセプトと適用条件

1.1　開発の背景　―侵食防止工に関わる考え方の進展―

平成９年６月に一部改正となった河川法，より実務的には平成８年度に策定された第９次治水事業５箇年計画(コンクリート護岸のない(見えない，使わない)「自然を生かした川」を目指した川づくり)に，河川特有の自然環境や景観に配慮した川づくりの理念・方針が示された。また，河道の基本的な計画，設計に関わる河川砂防技術基準(調査編，計画編，設計編：平成９年)[1,2,3,4]および河川管理施設等構造令(平成12年)[5]が改訂されるとともに，さらに災害復旧についても美しい山河を守る災害復旧基本方針(平成11年)[6]が発刊され，新しい理念・方針に基づく川づくりを実践する際のベースとなる技術的指針が示された。さらに具体的な技術開発や研究の成果についても，水理公式集(平成11年度版)[7]や多自然型川づくりに関する技術書[8,9]などに代表されるように，各種専門書がとりまとめられつつある。以上に示した状況は,「自然環境に配慮した川づくりの基本理念･方針に基づいた新旧技術の体系的な整理」が行われつつあることを端的に表す一例である。その真っ直中で実施された本研究(平成９～12年度)では，堤防被災・氾濫などの一因となる侵食を防止するための各種構造物(以下，侵食防止工と呼ぶ)について以下に示すように体系的な整理が進められていることを念頭に置いて，研究の焦点(植生の有する耐侵食力を補強すること)を絞っていった。

河川の水際周辺部(河岸～堤防)は，生物にとって多様性に富んだ生息空間であるとともに，侵食防止工を設置する場でもあることから，川づくりにおいて非常に重要な場として認識されている。そのため多自然型川づくりの創生期から侵食防止工と水際周辺部の処理について様々な工夫，主なところでは１）地表土や植物繁茂状況，河岸の微地形などで構成される施工前の生物生息空間(ハビタット)を施工後にもできる限り復元できるようにすること，2)最低限の条件として，水際周辺部表面の主構成材が施工前と同じような(生物の生息に適した)土砂とし，例えばコンクリートのような乾燥した隙間がない(または作れない)のっぺりとした一枚板のような状況にはしないといったことがなされてきている。侵食防止工の表面に土砂を組み込む構造については，伝統工法の見直し，欧米の技術・事例の輸入や，護岸ブロック形状の変更などといった様々な手段で改良が重ねられていった。そのような侵食防止工に求められる機能としては，１)侵食防止工上の土砂と植物が多少の出水では流失しない(または再度，堆積および繁茂できる)こと(例えば，隣り合う石やブロックの隙間に土があり，そこから植物が繁茂できるようにするなど)と，2)上記のような工夫を施した構造物自体が設計対象とした侵食外力まで侵食防止機能を発揮することが挙げられる。これら機能を満たす侵食防止工として，出水によって図らずも被災または土壌・植物の流失が生じた事例を分析して，完成度がより高められていった。それと同時に，各工法ごとに上記の必要機能の観点から適用可能な限界外力が提示されている（例えば，宇多，藤田，平林ほか[10]，(財）国土開発技術研究センター編[11])。今後は各種の侵食防止工の適用限界を評価して，設置対象とした場所の設計外力を上回る耐力を有する多種の工法のなかから，設置対象箇所の環境保全が適切に行えるものを選択することになる。

さらに，侵食防止工の選定を行う以前に，防災の観点から侵食防止工の設置が当面，不必要な（自然河岸を保全できる）河道区間を判別することが，ますます重要となる。コスト縮減という強い社会的要請を

受けて，より早期に高い安全度を得るためには，危険度(つまり設置必要性)の高い場所を明らかにしてそこから優先的に防御工を設置するようにしなければならない。これまでもそのような考え方に従って設置してきたと言えるが，今後はこれまでに比較して難易度が高くなると思われる。整備の初期頃には，例えば被災を繰り返している区間や高水敷がない水衝部となっている堤防区間などといった実状を経験的知見に照らし合わせば，災害発生の危険性(つまり侵食防御工設置の緊急性)が明らかに高い河道区間を明確に判別できた。そのような「自明な危険区間」への整備が概ね完成（必要に応じて防御工の補強があり得るものの）しているのが現状である。今後整備を行う区間にも，自明な危険区間と同様に甚大な災害に繋がる可能性がある河道区間もあろうが，その危険性が「自明」とできるほどはっきり評価しづらいのである（特に砂床河道)。さらに，そのように危険性が評価しづらい場所は，河川環境保全の観点からも侵食防止工を設置しないで，現状のまま保全できる候補地でもある。当然のことではあるが環境保全のための工夫を凝らした侵食防止工であっても，極力設置しないほうが保全上より好ましい。潜在する(自明ではない)危険性をあらかじめ評価すること，その結果に基づいて侵食防止工の必要区間を明確にすることが，防災上の安全性を確保しながらより低廉に良好な河川環境を保全することに資するであろう。

以上をまとめると，今後は①まず現況河道の出水に対する安全性を評価して，安全性向上のため防御工が必要な河道区間を明らかにし，②その区間の洪水外力（設計値）に応じて侵食防止工を選択，設計する（言うまでもなく多自然型）という技術体系となると言えよう。その先鞭を付けたのが，河岸防護ライン（①に相当）と美しい山河を守る災害復旧基本方針（②に相当，洪水外力（この場合，防御工近傍の流速）よる各種工法の使い分けが示されている）である。極端な表現であるが，多自然型川づくりが行われるようになる以前では「自明」な危険個所があって，そこをコンクリートや石などの硬い材料を用いたのり覆工，根固工または水制などで，いかに早期にしっかり防御するか(ブロックの大きさを調節するなどで)という技術体系が主流であったと言えよう。そのような「創世期の体系」から上記した新体系への移行は徐々には進んでいたであろうが，多自然型川づくりの実施をきっかけとして，急激に加速し，具体的な技術指針となるに至ったと言えよう。

1.2 堤防に繁茂する植生の侵食防止効果と新工法のコンセプト

新体系への移行に伴って，技術的には水際周辺部を構成する土砂や植生の耐侵食力の発揮機構および評価法の重要性が以前より増した。すなわち，侵食防止工の設置必要性を判断するにあたっての一つの検討事項として，土砂(粘着性を有する)や植物の耐侵食力を評価し，設計外力と比較することで侵食防止の可否を明らかにすることが行われる(例えば，堤防のり面の場合)。また，表面に土砂や植生を組み込んだ侵食防止工の構造を検討したり，その耐侵食力について評価するにあたっても，土砂や植物の耐侵食力の評価や発揮機構が必要とされるであろう。さらに一歩進んで，従前の侵食防止工と並んで堤防のり面などの侵食防止措置の一工種として植物群落を使い分けることが考えられるようになった。以上のような要請を受けて植物の耐侵食力の発揮機構とそれを考慮した評価手法（例えば，宇多ほか[12])）が提案され，新しい技術体系の一部として活用されつつある。

以下では，まず侵食防止シートの開発においてその主たる適用場所とした堤防のり面を例として，植生の耐侵食力を評価し，それと侵食外力との比較から植生による侵食防止が可能な（洪水流による侵食の防止という観点からは侵食防止工が不必要な)河道条件について検討した結果をまとめて示す(1.2.1参照)。

次に上記の結果に基づいて得たシートを用いた新工法の着想について説明する(1.2.2参照)

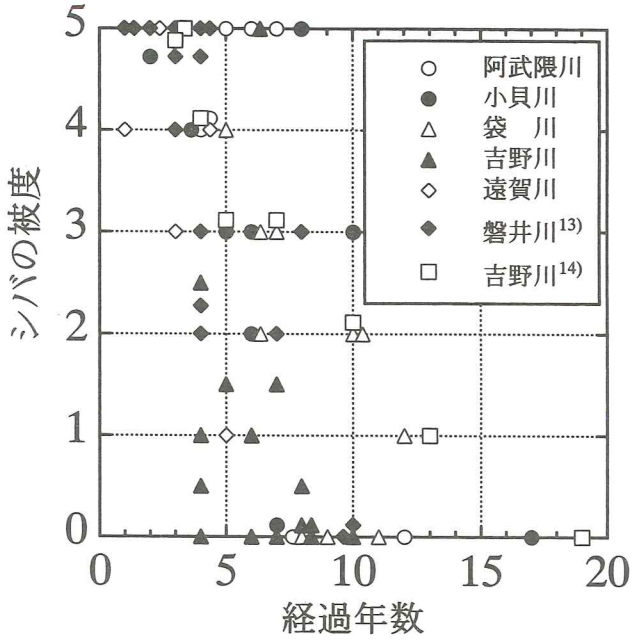
1.2.1 植生の侵食防止効果

まず，評価対象とする堤防のり面の植生繁茂状況を想定する。一般に堤防のり面での植生の繁茂状況は，草刈りなどによる維持管理が行われているものの，遷移が進行するため経年的に変化する。宇多ほか[12]は，その変化状況を明らかにすることを目的とした現地調査を行っている。表−1.1に調査対象河川名，調査区間において張り芝を実施した年から調査を行った1995年６～７月までの経過年数（以下，経過年数と呼ぶ），のり面構成材料の土質そして植生管理方法をまとめて示す。調査は，東北，関東，中部，中国，四国，九州の６地方から一河川づつ選定して行った。植生管理のパターンとしては，築堤から長くて３年までの期間では雑草の手抜き，薬剤散布，施肥などを行い，それ以降では年２回程度の草刈りを何らかの除草用機械を用いて行うとまとめられる。これらの調査地点でのシバの被度と経過年数の関係を図−1.1に示す。図−1.1には，北川ほか[13]および建設省四国技術事務所[14]による磐井川および吉野川（いずれも年２回の草刈りを行っている河川）のデータを併記してある。シバの被度は，経過年数が１，２年では５であるが，その後減少しはじめて５～15年(平均的には約10年)で０になり，いわゆる雑草のみが繁茂する堤防になる。シバの被度が０になるまでの約10年という期間は，のり面侵食に対する設計外力の算定対象とする出水規模のリターンピリオドに比較して短い。以上の調査結果に基づいて評価対象とする植生繁茂状況を，年２回程度の草刈りによって維持できると判断される植生繁茂状況に相当する「シバの被度０」と想定した。

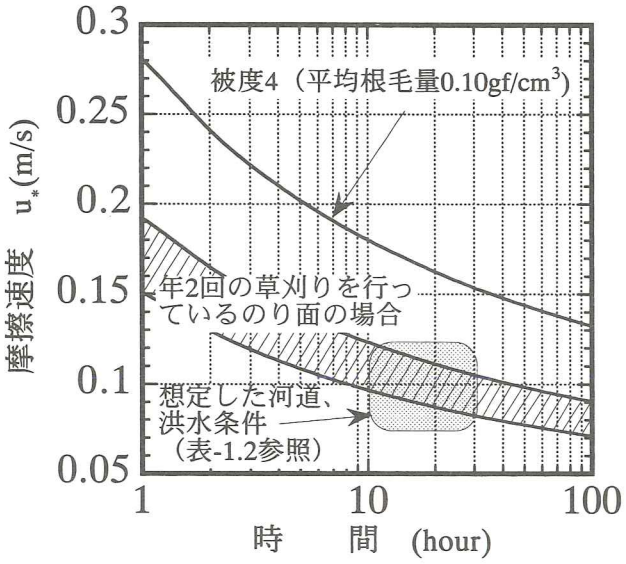
上記のように想定した繁茂状況について，宇多ほか[12]が提案した耐侵食力の評価方法(詳細は1.3.2(1)に示す)によって評価した結果を図−1.2の斜線範囲として示す。のり面に作用する摩擦速度と時間のプロッ

表−1.1　調査対象とした河川堤防の特徴

河川名	地方名	経過年数	土質	植生管理方法	
				経過年数	管理方法および年間実施回数
阿武隈川	東北	4～12	砂質土	1年 2,3年 4年以降	施肥1回、手抜き除草1回 施肥1回、手抜き除草2回 ﾊﾝﾄﾞｶﾞｲﾄﾞ or 肩掛け式除草2回
小貝川	関東	2～17	シルト質砂	H4年以前 H5年以降	ﾊﾝﾄﾞｶﾞｲﾄﾞ式除草2回 大型自走式除草2～4回
黄瀬川	中部	8～11	未調査	1年以降 1～3年 2年以降	薬剤散布2回 施肥1～2回 焼き芝1回
袋川	中国	5～12	未調査	1～3年 4年以降	薬剤散布、手抜き除草各2回 大型自走式除草2回
吉野川	四国	4～10	礫質土	1～3年 4年以降	手抜き除草2回 ﾊﾝﾄﾞｶﾞｲﾄﾞ式除草2回
遠賀川	九州	1～5	砂質土	1年以降	肩掛け式除草2回



図－1.1　シバの被度の経年変化



図－1.2　年2回程度の草刈りを行っているのり面の耐侵食力

トがこの斜線の範囲より下の領域に位置する場合には侵食に対して安全であること，斜線の範囲内では侵食防止可，斜線の範囲より上の領域では侵食防止不可と判断する。なお，侵食防止不可とは，1.3.2(1)に詳細を示すように評価対象とした植生の耐侵食力の発揮機構に基づく侵食防止ができないことを意味するもので，破堤などの大規模な堤防被災の発生を意味するものではないことに留意されたい。

図－1.2に灰色範囲として堤防に作用する侵食外力の想定範囲を併記したが，それは以下のように算定している。現状の高水護岸の整備状況を総括すると，河床勾配が1/1,000より急な扇状地を貫流する河川においては，大部分の河川においてほぼ全面的に高水護岸が設置されている。したがって，ここでは高水護岸が未設置である堤防区間が比較的多く，かつ比較的河床勾配が急な河道区間を想定の対象にすることとした。また，高水敷の幅は十分に広く，高水敷上の流速がマニング式によって近似的に計算できる[15)]と仮定する。以上の仮定と一級河川の実態に基づいて，計画規模の洪水時に生じるであろう高水敷上の水深h，堤防の冠水時間tなどを想定した結果を表－1.2にまとめて示す。この想定条件のもとで計算した摩擦速度u_*と時間tの関係が図－1.2に示した侵食外力範囲となっている。

表－1.2　想定した河道・洪水条件

高水敷上の水深(m)	3～4
高水敷の勾配	1/2,500～1/5,000
マニングの粗度係数	0.03～0.04
平均流速(m/s)	0.7～1.7
摩擦速度(m/s)	0.08～0.13
冠水時間(hour)	10～30

侵食外力の分布範囲は年2回程度の草刈りによって維持できる植物群落によって侵食防止可能と判断される領域にほぼ一致していることから，堤防近傍の流速が1～1.5m/s程度まで侵食防止できると考えられる。ただし，高水敷幅が狭い，またはないような場合には，堤防近傍の流速が低水路内の流速に近づくため，表－1.2のように想定した条件より大きな侵食外力(摩擦速度)が作用する。また，高水敷が十分に広い場合であっても，大出水時には急な湾曲部の内岸側において，高水敷の侵食が生じるほど

の高流速が生じた事例が報告されている[15]。これらの場合には，明らかに侵食防止不可と判断せざるを得ない。

図－1.2にはのり面にシバが繁茂する場合（被度４）での平均的な耐侵食力を評価した結果を併記している。この評価結果をシバの被度０（いわゆる雑草と呼ばれる植物群落）に相当する斜線範囲と比較すると，摩擦速度で（すなわち流速でも）約1.5倍も大きい範囲（流速1.5～2.3m/s）まで侵食防止が可能となることがわかる。この程度まで耐侵食力が向上できれば，高水敷幅がある程度小さい場合でも侵食防止が可能となることが期待できる。以上の評価結果から，のり面侵食に起因する堤防被災防止を目的とした侵食防止工の一種として植生を利用することが十分可能であると判断される。

1.2.2　新工法の必要性とコンセプト

年２回程度の草刈りで維持できる植物群落にも実用に適う十分な侵食防止効果があるが，流速の比較的小さい範囲に限定されることも分かった。つまり，堤防のり面などの侵食防止措置の一工種として植物群落を利用するには，その適用範囲が1.2.1に示した流速以下に限られることになる。植生の適用範囲を上回る侵食外力が作用する河道区間において用いられている既往工法の一つとして，コンクリートブロックを用いた従来どおりの護岸を土砂で覆い隠して植物を繁茂させる「覆土工」が挙げられる。この工法の特徴は，侵食防止機能は護岸にのみ持たせて，設計で見込んだ値より小さい侵食外力しか作用しない中小洪水時での覆土（植生の繁茂する土壌）の流失を植生の耐侵食力によって防ぐことである。ブロック，石材，金属などの重量物を護岸材として用いて，その護岸材自体（例えばポーラスコンクリート，ふとんかごなど）もしくは護岸材間に設けた隙間から植物を繁茂させる工法は，上記と同じ特徴を有するタイプと分類できる。言い換えれば，1.1において「創生期の体系」と呼んだ（「自明」な危険個所をしっかり防御する）時期に発展した工法をベースにして多自然型に改良したタイプとも言える。このタイプは重量物のサイズ（限界掃流力）を調整することで，植生に比較して非常に大きな耐侵食力（適用できる流速の上限値）が得られるという点が優れている。

侵食防止工として，現時点では上記の改良タイプに属するものが主流である。侵食防止工の設置が必要（堤防のり面の場合では植生の耐侵食力では侵食防止ができない）と判断された場合に改良タイプを用いるのは，1.1に示した耐侵食力に応じた侵食防止工法の使い分けを促す新しい体系に適合はしているが，新しい体系にした意義や効果を十分に引き出せていない。つまり，侵食防止を「植生か改良タイプのどちらで行うか」という従前と同じ二択を「新しい体系」と呼んだ手法に基づいて行っているに過ぎない（1.1に示した①のみ：それでも設置の不必要区間を特定できるというメリットはあるが）。工法のバリエーション，具体的には植生と改良タイプの中間的な耐侵食力を有するとともにコストと環境保全の面でも改良タイプより優れた工法を充実させ，その新工法と植生，改良タイプを安全性を確実に確保できるように使い分ける（1.1に示した②）ことが十分に行われていない。特に堤防のり面は，低水路河岸に比較して侵食外力が一般的に小さいので，中間的な耐侵食力を有するタイプの侵食防止工の活用によって，治水安全度の早期向上とコスト縮減に大きな効果を発揮すると期待できる。以上の考えに基づき，本研究では「堤防のり面を主たる適応対象とした，中間的な耐侵食力を有する新しい侵食防止工」を開発コンセプト（その１）とした。

上記したように新工法は改良タイプに比較して，河川環境の保全の観点で優れたものにする必要がある。

この条件は，新工法の普及を促すためには欠かせない条件である。新工法は耐侵食力では改良タイプに劣っているが，さらに保全の観点でも劣っていると「低廉な分だけ性能の低い工法」という位置づけになる。つまり，新工法が普及するほど環境保全の観点ではマイナスになり，新しい体系の目指す「自然環境や景観に配慮した川づくり」とは相反する結果になるからである。上記の条件を満たすような新工法を開発するためには，開発当初から改良タイプとの差別化を図っておく必要がある。改良タイプの大多数は，護岸材自体のサイズ(限界掃流力)を調整することで侵食防止機能をまず優先的に確保し，そこから更に護岸材の隙間などに植生のための土壌を「組み込む」工夫をして河川環境の保全機能を付け加えるという，「機能の足し算」がベースとなっている。そのため，植生を生育環境（例えば隙間の大きさなど）の確保がおのずと制約を受けてしまう。新工法は「機能の融合」をベースとすることで上記の制約を取り払い，河川環境の保全の観点でさらに優れた工法とすることを狙う必要がある。以上を考慮して開発コンセプト（その２）は「植生の耐侵食力の発揮機構を理解し，その機構を踏まえて耐侵食力の補強を行える新しい侵食防止工」と定めた。

1.3　実用化のためのアイデア　―植生の耐侵食力の発揮機構を参考にして―

開発コンセプトに適合した新しい侵食防止工法として，**写真－1.1**に示すように根茎のように細い繊維状の材料(以下，構成材と呼ぶ)を結合させたシートを用いるというアイデアを得た。本節では，このアイデアが植生の耐侵食力の発揮機構（宇多ほか[12]）をベースにしてどのように考えて行きついたものであるかを示す。まず**写真－1.1**に示したような人工的な材料を用いずに，耐侵食力の補強が現実的に可能であるか検討を行い，その結果を踏まえて補強のための本質的課題を明らかにする（1.3.1参照）。次に，植生の耐侵食力の発揮機構および侵食弱点箇所での侵食特性について概要を説明した後，シートによってどのように耐侵食力を補強するか説明を加える(1.3.2参照)。



写真－1.1　シートの設置状況イメージ

1.3.1　耐侵食力を補強するための本質的課題

大きな耐侵食力を有することが知られているシバを活用するにあたっては，その繁茂所況を維持することができなければ，真に実用的とは言い難い。既に**図－1.1**に示したように，現行での一般的な植生管理である年２回程度の草刈りではシバ群落が維持できない。シバ群落を維持するために必要な草刈りの年回数は，建設省四国技術事務所[14]や奥田ほか[16]によれば年４回以上とされている。現状の草刈りなど植生管理に関わる予算では平均的には年２回程度であり，全ての河川管理区間で草刈り回数を増加させるのはか

なり困難である。また，河川の整備が今後進むにつれて新たに整備した構造物などの維持費も必要になることなどを考慮すると，草刈りに割ける予算の増加はあまり見込めないと考えておくべきであろう。したがって，シバ群落が有する高い侵食防止効果の利用は，年4回以上といった高頻度での草刈りが可能な特殊なケースを除いて，実用的とは言えない。

年2回程度の草刈りによって維持できるという制約下で，より高い侵食防止効果を得るための一案として，シバに次いで高い耐侵食力を有する[12]チガヤを利用することが提案されている[14,16]。この場合の問題点として，見た目(被度)では同様なチガヤやシバの群落であっても，繁茂状況に応じては侵食防止効果がかなり小さくなる危険性があることが挙げられる。宇多ほか[12]は，実堤防での調査からシバが同じ被度で繁茂する植物群落であっても，土壌硬度が4 (kgf/cm^2) を上回るとのり面の表層に含まれる根茎の量がかなり小さくなることを明らかにしている。 1.3.2(1)に詳細に示すように地表近傍の土中に含まれる根茎の量に伴って耐侵食力が増減することを考慮すると，締め固まった堅い土壌部分では，他の場所に比較して耐侵食力が小さい侵食弱点箇所になると考えられる。土壌硬度などの土壌条件のみでなく，モグラなどの動物がのり面に形成する孔も侵食弱点箇所になる。 1.3.2(2)に詳細を示すように，一様に繁茂した植物群落に比較して侵食弱点箇所を有する群落の耐侵食力が小さくなる。このように植物群落はコンクリートブロックや石材のように空間的に均一かつ時間的に一定したものではないので，侵食防止材としての信頼性が低いという課題を本質的に持っている。チガヤに代表される群落種の変更による侵食防止効果の向上を狙うには，上記の本質的課題を維持管理などで克服することが求められる。

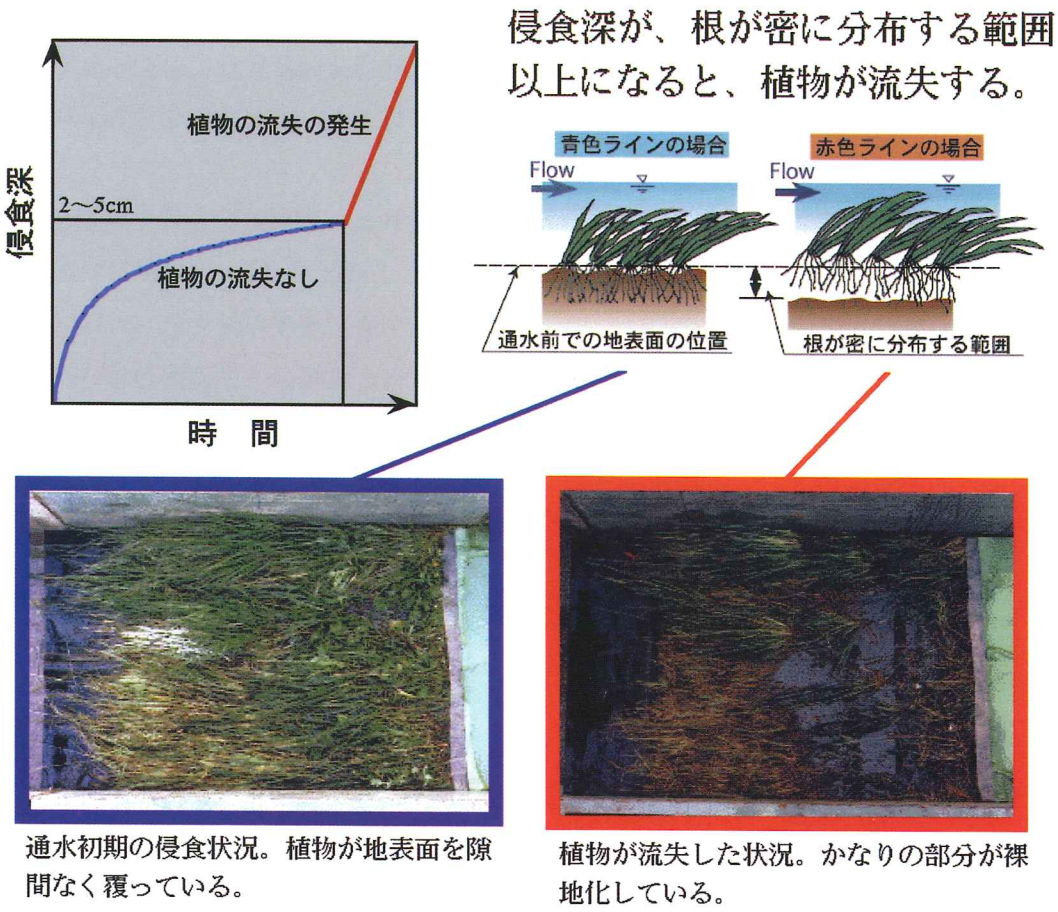
この本質的課題を確実に改善するための一案として，植物単体での改善をあきらめて，何らかの人工材料と組み合わせることに行きつく。

1.3.2　耐侵食力補強に関するアイデア

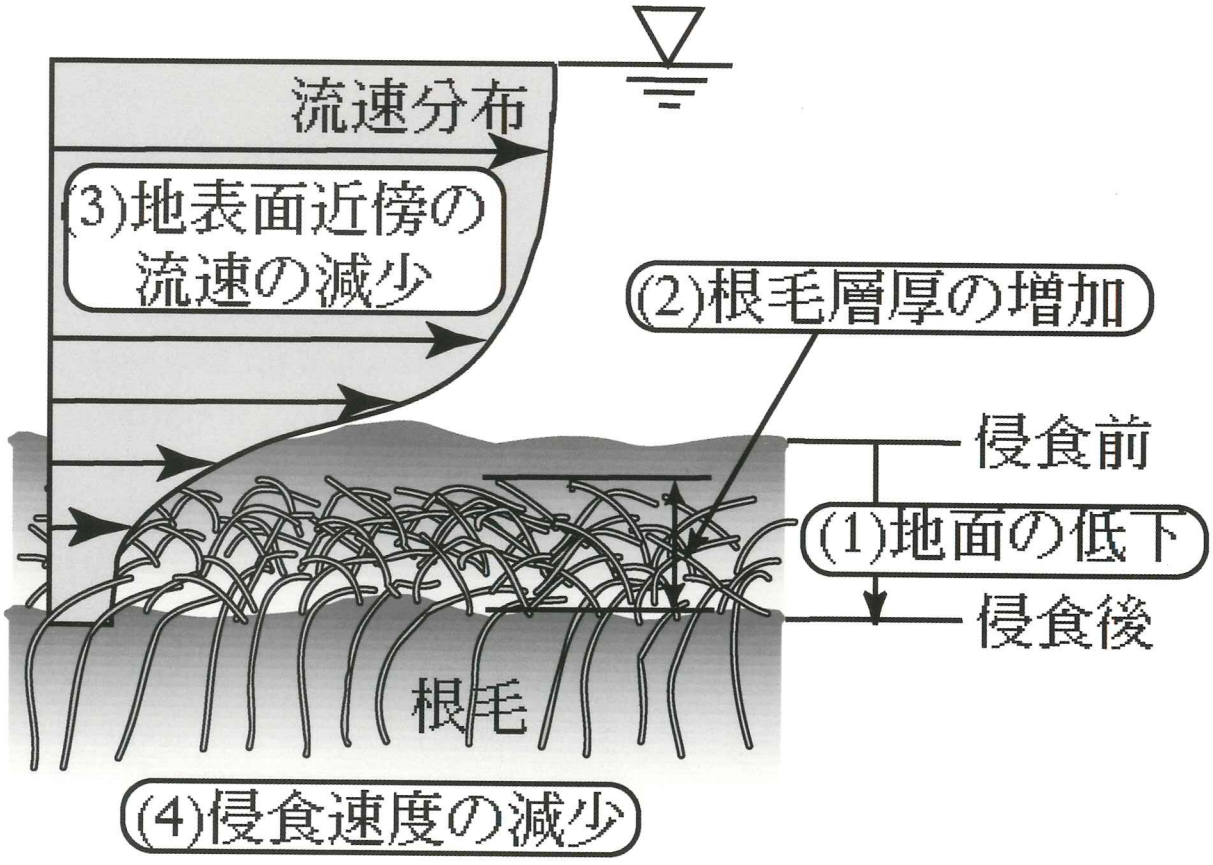
(1)　一様に繁茂した植生の耐侵食力の発揮機構

ここではまず，平坦な地表面が植物群落によって一様に被覆された状況を対象として，耐侵食力の発揮機構について説明する。植物の耐侵食力は，植物本体が流水抵抗となる分，地面近傍の流速(掃流力)が裸地の場合に比較して低減されるために生じる[注)]。ただし，植物の種類によって，流水抵抗を受ける主な部位が異なる。植物の部位を葉や茎からなる地上部と根茎にあたる地下部に大別すると，例えばシバやチガヤなどに代表されるイネ科の多年草が優占する植物群落（地表近傍に1 mm程度以下の直径の根が密に分布する植物が優占する植物群落）では地下部が(福岡・藤田[17]，福岡・渡辺ほか[18]，佐々木ほか[19])，またヨシのように長い葉茎が密に繁茂する植物群落では地上部(例えば服部ほか[20])である。以下では，開発の主対象とした堤防のり面に繁茂する植物群落に多く見られる，地下部によって流速(掃流力)が低減される場合について説明を加える。

一定の侵食外力が作用する場合の侵食深の経時変化を**図－1.3**に模式的に示す[17,19]。青線で示す通水初期では，侵食の進行にともなって徐々に侵食速度が小さくなる。その状態が続いてある侵食深以上に達すると，赤線で示すようにほぼ一定の侵食速度で急激に侵食が進行するように変化する。この変化が生じる前後の植物群落の状況の一例を**図－1.3**に併せて示している。通水初期では全面的に植物によって覆われているが，変化後には一部流失して裸地化している状況が見られる。以上の様子は，**図－1.4**に示す根茎による掃流力の低減機構に基づいて以下のように説明できる[12]。侵食に伴って根茎が徐々に洗い出され（図中



図－1.3　侵食深の経時変化と植生流失状況の関係



図－1.4　根茎による耐侵食力の発揮機構

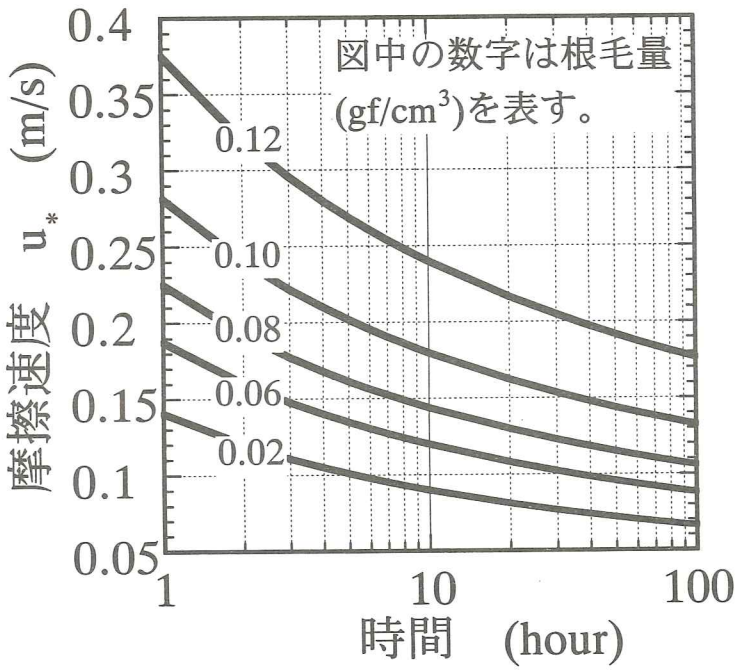
の(1))，地表面を覆うように折り重なって層（以下，根茎層と呼ぶ）を形成する（図中の(2)）。根茎層が流水抵抗となり，地表面近傍の流速（または地表面に作用する掃流力）を低減する（図中の(3)）。低減効果は根茎層の厚さの増加に伴って大きくなる（図中の(4)）。流速（掃流力）の低下に伴って侵食速度も小さくなることから，図－1.3に青線で示したように侵食深が大きくなるに伴って侵食速度が小さくなることが理解できる。さらに侵食が進行すると，地表近傍の土中に密に分布していた根茎の大部分が地表面上に洗い出されてしまい，根茎ともども植物がめくれあがったり，流送されてしまう。そのため掃流力の低減効果が失われ，図－1.3に赤線で示したような急激な侵食が生じることが説明できる。

これらの特徴を踏まえ植生の耐侵食力評価は，通水開始から植物（根茎層）の流失が生じる侵食深に達するまでの（図－1.3に青線で示した）時間内に限って耐侵食力が発揮されると考え，その時間と侵食外力（例えば摩擦速度）の関係を与えるものとなっている（Hewllet ほか[21]，福岡ほか[18]，宇多ほか[12]）。宇多ほか[12]は，地表近傍の根茎の量が耐侵食力の優劣を支配すると考え，耐侵食力を表すパラメータとして平均根毛量σ_0を「地表面から深さ 3 cm までの土中に含まれる根および地下茎の重量（単位体積当たり）」として定義した。また，平均根毛量σ_0(gf/cm^3)を用いて，式(1.1)によって耐侵食力を評価することを提案した。

$$z_p \geqq \alpha u_* \ln t \qquad \alpha = -50\sigma_0 + 9 \tag{1.1}$$

ここで，z_p(＝2.5cm)は許容侵食深（根茎層の流失が生じるとした侵食深），u_*(m/s)は摩擦速度，t(min)は時間である。式(1.1)の計算結果の一例を図－1.5に示す。各曲線は併記した平均根毛量σ_0での計算結果であり，各曲線より下側の領域が侵食防止が可能な摩擦速度および時間の範囲である。平均根毛量が大きいほど侵食防止の可能領域が広くなる，すなわち耐侵食力が大きくなることが分かる。

以上に示した根茎の耐侵食性の発揮機構を考慮すると，地表面近傍により多くの根茎が含まれているほど耐侵食力が大きくなることが分かる。

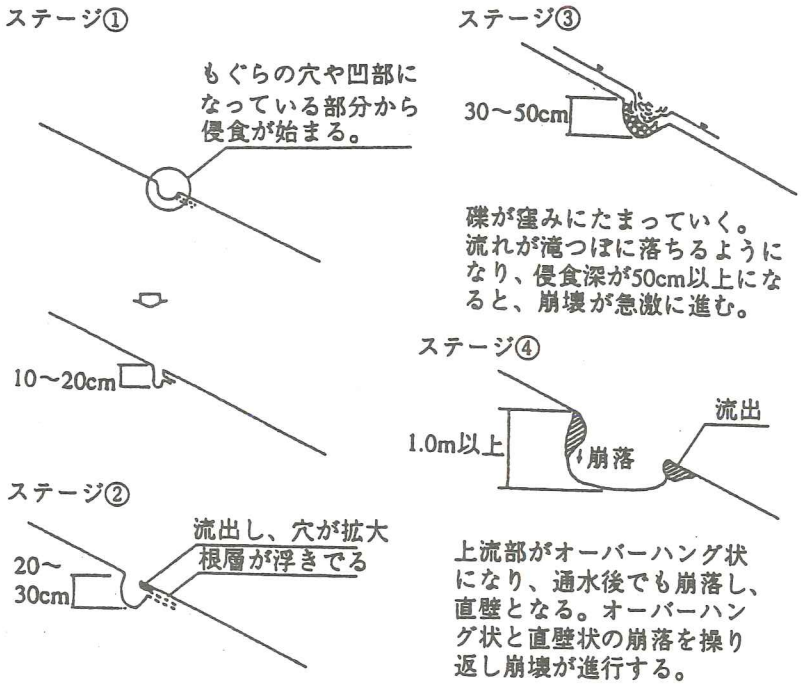


図－1.5　植物の耐侵食力の評価結果（宇多ほか[12]）

⑵　侵食弱点箇所での侵食特性

侵食弱点箇所での侵食特性については，旧堤防のり面における越流侵食実験によって明らかにされている[22),23)]。以下では，モグラ孔[22)]およびのり面の凹凸[23)]に起因する侵食現象について説明する。

モグラ孔を有する堤防のり面での越流による侵食実験で観察された侵食の過程および形態を模式的に図－1.6に示す。なおのり面は礫混じりの中砂によって構成され，そこにイネ科の多年草であるチガヤとカモガヤを優占種とする植物群落が繁茂していた。通水開始直後では，ステージ①として示すように，モグラ孔の位置において最大洗掘深が約10～20cmのスポット状の侵食が生じた。通水前の調査ではモグラ穴が砂礫で塞がれていたことから，モグラ孔を塞いでいた土砂が流失し，モグラ孔が洗い出されるとともに



図－1.6　モグラ孔周辺での侵食の進行過程と形態(北川ほか[22])

若干の侵食が進行した状況であると考えられる。流量を大きくして通水を継続すると，ステージ②として示すようにスポット状の侵食範囲が面的に拡大するとともに侵食深も約20～30cmに達した。モグラ孔の下流側では，侵食の進行に伴って根茎が洗い出された。根茎は折り重なって層状になっており，地面から若干浮き上がった。流況の観察より，モグラ孔の下流側の面が水衝部となり，そこで地面が侵食されるとともに根茎が洗い出されたものと推察される。しかし，植生が流失するには至っていない。さらに通水を継続すると，ステージ③として示すように最大侵食深が30～50cmに達するとともに，モグラ孔の下流側での侵食範囲の拡大に伴いステージ②で形成された根茎の層が完全に浮き上がり，植物の流失が生じた。なお，以上に示す過程でほぼ一様に植生が繁茂していた他の場所では，モグラ孔周辺のような顕著な侵食がほとんど生じなかった。また，チガヤが繁茂していた区域においてトレンチ掘削によって根茎状態の調査した結果，チガヤの根茎は地表から５cmまでに密集しており，最大で約30cmまで伸長していた。ステージ②で地面から浮き上がって形成された根茎層は，地表近くに密集した根茎が洗い出されて形成されたものである。

また，被度５のシバが繁茂する地表面を押し込むことによって幅20cm，深さ５cmの凹部を設け，上記と同様な侵食実験を行った。この凹部は自走式草刈り機の走行によってキャタピラの幅でのり面がへこんだ状況を模擬したものである。この場合においても図－1.6に示したステージ②と同様に凹部下流側が水衝部となって，そこで侵食が進行したためシバの根が洗い出されて浮かび上がった状態となった。しかし，シバは根茎の平面的つながりが強くシート状になっているため，流失することなく水衝部を覆っており，そのためステージ③に相当する侵食範囲の拡大が抑制された。

以上の実験結果から侵食弱点箇所とは，局所的に深く侵食される，または地面の極端な凹凸が形成されるなどの原因で水衝部が形成される箇所であって，そこでの侵食機構は1)根茎が密集した地層より下部からも侵食が進行するため根茎層が浮き上がった状態となり，2)流失すると下流側へ侵食範囲が急激に拡大するとまとめられる。

⑶　補強のアイデア

根茎による耐侵食力の発揮機構((1)参照)に基づくと，効果的に補強を行うポイントとして，1)地表近傍の根茎量を増加させる，2)根茎層の流失が発生する侵食深(許容侵食深)を大きくするということが挙げられる。また弱点箇所の補強のアイデアとしては，3)水衝部が形成されても容易に根茎層が地表からめくれ上がらないようにすることが挙げられる。

1),2)に対して効果を有する補強方法として，繊維状の材料を地表面近傍に埋設することが考えられる。すなわち，繊維状の材料が根や地下茎と同様に流水抵抗となるため，地表近傍の根茎量を増加させるとともに，根茎層を厚くするのと同じ効果が得られるためである。3)については，侵食範囲の拡大が抑制されたシバの事例を参考にすると，補強のポイントとしてシバのような平面的なつながりと地面との活着性が挙げられる。まず平面的つながりに関しては，埋設する繊維状材料としてシート状に加工したものを用いればよい。地面との活着性は，シートの地面への固定方法に関連する。シバの侵食実験の場合(⑵参照)，侵食域の周縁部で根茎層が地面に活着していたため，根茎層の浮き上がりが侵食域に留められた。モグラ孔の侵食実験のように，モグラ孔の周縁部で活着していない場合には，そこからめくれ上がるため侵食域が拡大すると考えられる。そのため，シートの固定にあたっては，密に伸長した細い根茎がピンの役割を果たして面的に固定されていたシバのような状況を模擬する必要がある。しかし，シートの固定をピンの打ち込みのみで行う場合，隣接するピンの間隔をかなり小さくしなければならない。このようにピンを密に打ち込むのではなく，シートを貫通して根茎が伸長できるようにすれば，根茎層と同様にシートも根茎によって面的に固定されることが期待できる。そこで，シートは根茎の伸長のための土壌が保持できるような空隙を有する多孔質体とし，シート上に植物を繁茂させた状態で使用することが考えられる。

以上のアイデアを具体的に形にしたのが**写真－1.1**に示した状況である。これによって，コンセプトに示した以下の効果が得られる

- 植物の耐侵食力および侵食弱点箇所を空間的に均一かつ時間的にも一定になるように補強して，植物による侵食防御の信頼性を向上させることができる。
- シバやチガヤといった草本植物の耐侵食力の発揮機構と同じ機構によって耐侵食力を補強する。つまり植物が繁茂することが侵食防止効果の発揮に不可欠であることを前提とした侵食防止工法なので，そこを生育場とする生物に与えるインパクトも小さくすることができる。

注）植物が受ける流体力は土中の根茎に伝わり，最終的には多数の根や地下茎に接する土との間の引き抜き抵抗力を介して，土中に分散される。土中に分散された力は，ある厚さの土層（地表面から根が密に分布している範囲程度と考えられる）を下流方向に移動させる駆動力として働くが，一般的には土層境界面に働く摩擦力や土層の自重がそれを上回るため，土層の滑り破壊は生じない。しかし，植物の根の発達が不十分で根が切れたり，摩擦力が何らかの原因で小さかった場合には，植物の流失や地表面全体の滑り破壊が生じるため，侵食防止が不可能となる。

1.4　シートを用いた侵食防止工の特徴

ここでは，本研究で提案する侵食防止シートとそれを用いた侵食防止工の特徴についてまとめて示す。まずコンセプトとそれを具体化するアイデアを整理して，シートの構成・素材・使用形態(1.4.1参照)と侵食防止効果の発揮機構（1.4.2参照）について説明する。最後に以上の素材や発揮機構に起因する本工法の適用範囲および留意事項を示す(1.4.3参照)。

1.4.1　シートの構成・素材・使用形態

本研究では，1.3.2に示したアイデアに基づいてシートを開発する際に，以下のような構成・素材・使

用形態とすることを基本とした。

⑴　構成

①　繊維状(細長い形状を有する)の部材を主構成材とする

②　主構成材が一体となってシート状を呈する

③　シートは土砂の充填が可能な大きさの空隙がある多孔質体とする

④　シートの厚さは，シバやチガヤなど堤防に繁茂する代表的な植物の根茎が密に分布する土層厚以下とする

シートの構成（主構成材の太さ，単位体積あたりに占める空隙の割合（以下，空隙率と呼ぶ），シートの厚さなど）は，シートに被覆された地表近傍の流速を侵食発生限界値以下に抑えるように調整する必要がある。さらに，根茎の伸長を妨げないようにシートの空隙部に土砂が充填できるようにも調整する必要がある。これらの要求を満たすように構成を調整するのが技術的な観点での最大の課題である。また，シバの根茎が密に繁茂する土層厚は5 cm以下である[12]ことから，シート厚さの目標は約3 cm以下とした。

なお,「繊維状」とは糸のように細長い材料であることを意味し，その断面形状(例えば円形であったり薄べったいテープ)はどのようなものでも良い。また「繊維状の部材を主構成材とする」とは，例えば一体整形のネットのように，始めから繊維状の部材をある形に組上げたものも含まれる。

⑵　素材

①　シートに加工した状態でも，シートが地表面の凹凸に追従できるような柔軟性を有する

②　シートに要求される耐用年数，使用法などに応じて適切な素材を選択できる。

①の条件を満たせば素材を特に限定しない。シートの使い方や耐用年数などから決まる要求性能に応じて適切に選択して良い。その一例を以下に示す。

例1：堤防のり面へ種子吹付工を行う場合など植物が密に繁茂するまでの一時的(数年程度)な侵食防止
　　腐食性の素材(椰子の実繊維などの天然素材や生分解性プラスチックなど)

例2：通常の護岸と同じように長期的(数十年オーダー)な侵食防止
　　耐久性に優れた化学製品(熱可塑性樹脂など)

本研究では，既往の侵食防止工の代替工法として開発することを優先したため，素材として熱可塑性樹脂を用いることとした。

⑶　使用形態

①　シートは植物の根茎が密に分布する土層内～近傍に埋設する

②　シートの空隙内にあらかじめ土を充填する

③　シート上には草本植物を繁茂させる

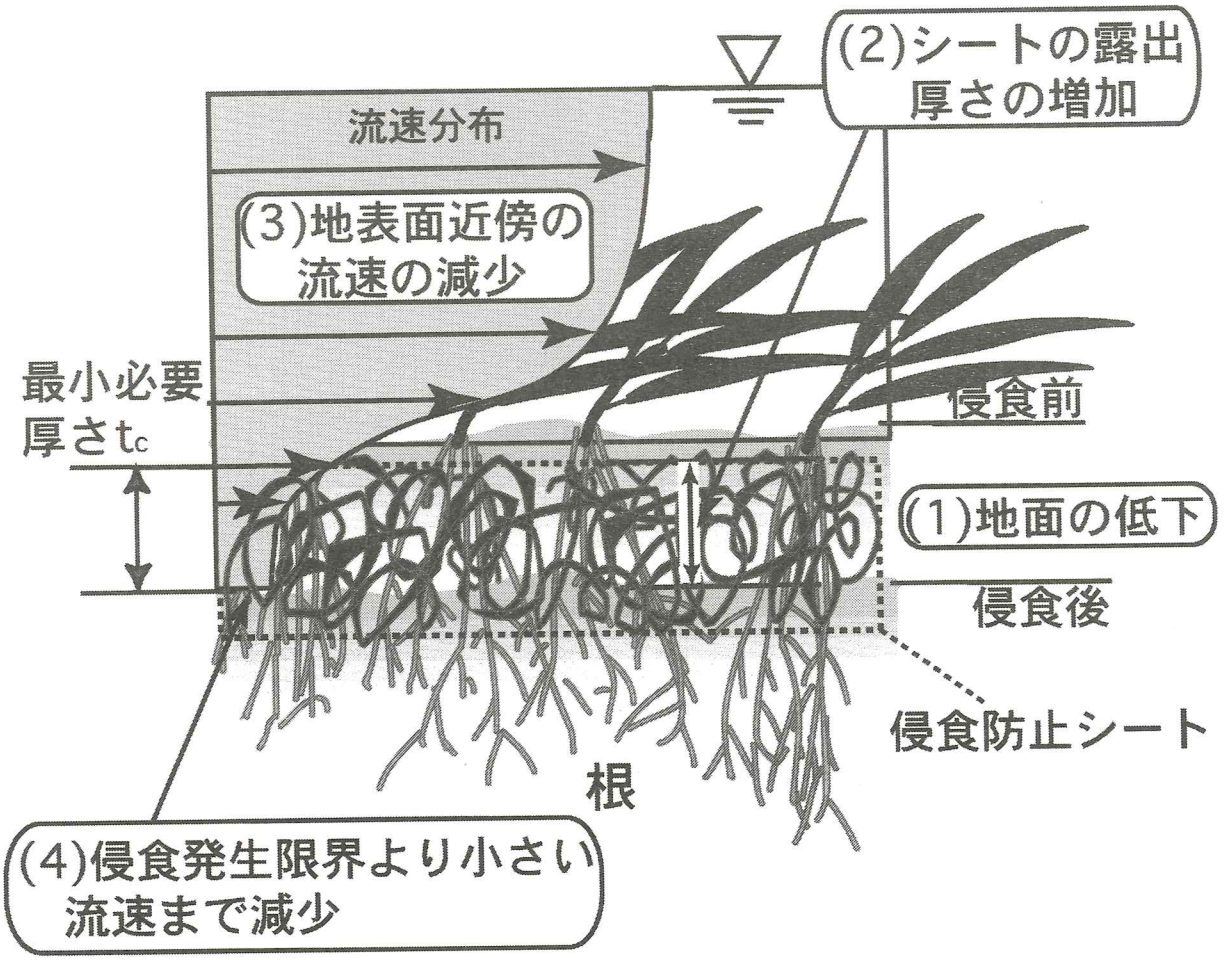
空隙に土砂を充填したシートを，**写真－1.1**に示したように根茎が密に分布する土層である地表面から5 cm程度の範囲内に埋設する。草本植物(**写真－1.1**ではノシバ)を繁茂させると，根茎がシート空隙内の土砂からシート下部の土にまで伸長する。そのため，シートが埋設されていても植物の生育が全く阻害されない。またそのように伸長した根茎がピンの役割を果たして，シートを地盤に固定する。

なお，シートを埋設するのは，平水時における人々の利用や景観の良好性の維持，堤防のり面での草刈り・除草作業への支障をなくすこと，シートの劣化・破損や燃焼の防止などにも役立つ。

1.4.2　シートの侵食防止効果の発揮機構

シートは，吸い出し防止材(ジオテキスタイルシート)とは異なり，砂粒よりはるかに大きい空隙を有する多孔質なものである(**写真－1.1**参照)。このような“すかすか”なシートが侵食防止効果をどのように発揮するのか,**図－1.7**を用いて説明する。シートを埋設した地面上に洪水流が作用すると，最初，植物が有する侵食耐力によって地面の侵食が防止される。それを少し上回る侵食力が作用するようになると，植物の繁茂密度が粗な部分などの侵食弱点箇所において局所的に侵食が進行してシートが露出し始める（**図－1.7**の⑴)。シートの露出厚さは，侵食の進行に伴って大きくなる（**図－1.7**の⑵)。それに伴って，地表面近傍の流速が急激に小さくなる(**図－1.7**の⑶)。侵食発生限界より小さい流速まで低減できる厚さ t_c(以下，最小必要厚さと呼ぶ)までシートが露出した時点で，侵食が生じなくなり(**図－1.7**の⑷)，侵食防止が達成される。このように，シートは“すかすか”ではあるが，地面に作用する侵食力を侵食発生限界より小さくできるようにシートの厚さ，構成材の直径，空隙率が調整されているので侵食防止が可能となる。

吸い出し防止材やコンクリートブロックなどに代表される被覆材の上に覆土工を施した侵食防御工では，覆土が侵食を受けたときに被覆材が露出して，被覆材下の地面を流れから“遮蔽”することで侵食防止を行う。したがって，被覆材が露出した時点で，侵食防止の要因が植物の流速低減効果から被覆材の遮蔽による侵食防止に変化する。この点がシートと大きく異なる点である。



図－1.7　シートの侵食防止効果の発揮機構

1.4.3　適用範囲と留意事項

シートには，その侵食防止機構に起因する適用範囲がある。また，1.4.1に示したシートの構成・素材・使用形態を満たすための留意事項もある。それらについて以下にまとめて示す。

⑴　適用範囲

●図－1.7に示すように地面とほぼ平行な主流速分布となる流れ場であるときのみ，シートによって侵食力（流速）の低減が可能である。侵食力の低減が困難である地面に衝突するような流れ場となる場所（例えば，堰など横断構造物下流の段落ち流れ部），浸透流の浸出地点での侵食防止，雨滴や波による侵食の防止などへは基本的に適用できない。

●シート内への土砂充填と草本植物の繁茂が不可能な場所へは適用できない。そのような場所として河床表層の主構成材が礫である場所，平水時においても水面以下となる場所などが挙げられる。

解説

シートと地面の間に隙間が生じるのを防止するための制限である。シートと地面の間に隙間が生じると，隙間に沿って侵食発生限界より高流速の流れが発生し，その結果として隙間に面した地面の侵食が進行する危険性がある（1.3.2⑵参照）。このような危険性の排除のために本工法では，**写真－1.1**に示したように，シート内に土砂を充填するとともに，植物を繁茂させることで，隙間発生の防止を行うこととしている。隙間の発生原因として以下の２種類が考えられる。

a)　施工時に形成される隙間：例）シートを敷設する地面は，シートと密着するように凹凸が無いようにあらかじめ整形する必要があるが，完全を期するのは施工管理上，かなり難しい。その結果として，部分的にではあるが，隙間が形成される。

b）洪水流を受けている最中に生じる隙間：例）シートは約１m間隔で打設するピンによって地面に固定することになっているが，ピンが打設されていない場所では揚力によりシートが持ち上げられて隙間が形成される懸念がある。

a)のような隙間は，シートへの土砂充填を実施する際に，シート下の隙間にも土砂が到達するように充填を行うことで埋める。また，b)のような隙間の発生防止は，シート上に繁茂した植物の根茎がシート下の地中にまで達して，この根茎がピンと同等の機能を果たすことにより達成される。このように根茎を発達させるためにも，シート内に土砂を充填する必要がある。以上の理由により，**写真－1.1**に示したようにシート内に土砂を完全に充填することが，侵食防止効果を発揮させるために必要不可欠である。

●シート敷設範囲より上流側の範囲においても，何らかの侵食防止措置が必ず行われていること

解説

シートはその敷設範囲より上流側で侵食が進み，それが敷設範囲上流端に及ぶと全く侵食防止効果を発揮できないという危険性が高い。例えばコンクリート護岸では，その構造が強固でかつ重量があるため，その上流側で侵食が生じても被災しないで侵食防止効果を発揮し続けることができる場合がある。シートにはそのような強固さがないため，侵食の進行に伴って上流端から下流側に向かってシートが徐々にめくれ上がっていくというプロセスで被災範囲が拡大しやすい，つまり脆いと考えられる。したがって，脆さをカバーするために，シート敷設範囲より上流でも必ず何らかの手段（植生または他の侵食防止工）で侵食防止が行われている場合にのみ適用が出来る。

⑵　留意事項

シートの素材については，本研究を行った時点では，1.4.1に示すような熱可塑性樹脂(例えばポリプロピレン，ポリエステル，ポリエチレン，塩化ビニリデンなど）を主素材としている。以下に示す留意事項はそのような主素材の一般的特徴に基づいて挙げたものである。したがって，主素材の変更や素材の改良によって改善が可能である。

●シートの露出頻度が高い場所への適用は控えること

解説

植生の耐侵食力のみでは侵食防止が不可能となると，シートが地表面上に洗い出されて侵食防止効果を発揮する。その後，シートを露出したままで放置しておくと，熱可塑性樹脂には紫外線に暴露すると劣化しやすい性質があるため，シートの劣化を早める原因となる。劣化対策として，カーボンブラックなどで暗色に着色するが，それでも完全に改善されるには至っていない。そのため，維持管理の一環としてシートを埋め戻すことで，できるだけ暴露する時間を減じる必要がある。このような維持管理を多くの回数行うことができるならば，シートの露出頻度が高い場所（つまり植物の耐侵食力を上回るような侵食外力が作用する出水の発生頻度が高い場所)への設置ができる。ただし，シートは「植物の耐侵食力を補強する」ことをコンセプトとしている。このコンセプトに対して，植物の耐侵食力を上回る侵食外力が頻繁に作用する場へのシート設置というのはやや無理がある(そもそもそういう場所には植生は密に繁茂しにくい)。そのことも考慮すると，露出した状態で長期間放置できるような耐久性が得られるまでは，適用を控えるべきである。

以上を考慮して，耐久性の問題が解決されるまでは，流速が4 m/s以上になる場所での使用を控えるのがよい。

●シートを敷設した地面上での焼きシバや集草焼却などといった燃焼を行うのは控えること

解説

熱可塑性樹脂は可燃物であるから，シートが燃焼して孔が開くのを防止するためである。シートは土中に埋めて使用しているので露出していなければ，簡単には燃焼しない。しかし，燃焼しないにしても，高温が加わることでの劣化も生じる。したがって，露出部を誤って焼却したり，劣化を促進させないためにも，シート上での燃焼を控えるべきである。

●安全性確保への対応をあらかじめはっきりさせておくこと

解説

熱可塑性樹脂を素材とするシートから有害物質が発生する(燃焼した場合など)，シートの構成材が魚や鳥などの動物に摂取される危険性などの問題について指摘を受ける可能性がある。さらに最近，環境ホルモン(外因性内分泌撹乱化学物質)の問題が大きく取り上げられているところであり，これに関連した問題が生じることも懸念されている。以上のような有害性に関する問題に対しては，以下のような対応を基本とすること。

★基本対応方針

1．シートの素材としては，「化学物質の審査及び製造等の規制に関する法律」に基づいて安全性が確認されている化学物質およびそれら化学物質から造られた物質のみを用いる。また，シートの主材料については事前に調査を行う。

2．環境庁が公表した内分泌撹乱作用が疑われる化学物質（いわゆる環境ホルモンと疑われている物質（例えば参考文献24））が含まれているか，含まれている場合にはその物質名と含有量および水への溶出量について事前に調査を行う。

3．燃焼時に発生するガスの成分とその有害性について事前に調査を行う。

4．シートを敷設した場所においては，水質および土壌について追跡調査を行う。

5．有害物質に係る国の基準を満たさないなど，素材の安全性に問題があると判断される調査結果が得られた場合には，シートの撤去を行うとともに，その原因を究明する。

6．上記１～５の調査結果については公開する。

本研究では，上記３に関連してシートの燃焼ガスに関する試験法について（8.3.1参照），上記２に関連してシートの環境ホルモン含有量および溶出量に関する試験法について（8.3.2参照）検討を行っている。当面は本研究で用いた方法で試験を行うこととするが，内分泌撹乱作用が疑われる化学物質に関して基準・試験方法が新たに確立された場合には，速やかにそれらをシートの基準・試験方法に取り入れて試験を実施する。

参考文献

1）建設省河川局監修:改訂新版建設省河川砂防技術基準(案)同解説･調査編,(株)山海堂，第１刷，591p.，1997.

2）建設省河川局監修:改訂新版建設省河川砂防技術基準(案)同解説･計画編,(株)山海堂，第１刷，222p.，1997.

3）建設省河川局監修：改訂新版建設省河川砂防技術基準(案)同解説・設計編[Ⅰ]，(株)山海堂，第１刷，251p.，1997.

4）建設省河川局監修：改訂新版建設省河川砂防技術基準(案)同解説・設計編[Ⅱ]，(株)山海堂，第１刷，218p.，1997.

5）(財)国土開発技術研究センター編集:改訂　解説･河川管理施設等構造令,(株)山海堂，第１刷，423p.，2000.

6）建設省河川局防災・海岸課監修：美しい山河を守る災害復旧基本方針，(社)全国防災協会，第二版，1999.

7）土木学会水理委員会水理公式集改訂小委員会編集：水理公式集[平成11年度版]，丸善(株)，第１刷，713p. 1999.

8）(財)リバーフロント整備センター編著：まちと水辺に豊かな自然をⅢ　多自然型川づくりの取り組みとポイント，山海堂，初版，230p.，1996.

9）(財)リバーフロント整備センター編集：多自然型川づくり施工と現場の工夫，(財)リバーフロント整備センター，初版，91p.，1998.

10）宇多高明・藤田光一・平林　桂・是沢　毅：多自然型河岸防御工の洪水時挙動―多自然型河岸防御工の設計法立案のために―，土木研究所資料第3366号，76p. 1995.

11）(財)国土開発技術研究センター編：護岸の力学設計法，(株)山海堂，第１刷，151p.，1999.

12) 宇多高明・望月達也・藤田光一ほか：洪水流を受けた時の多自然型河岸防御工・粘性土・植生の挙動—流水に対する安定性・耐侵食性を判断するために—，土木研究所資料，第3489号，pp. 97～214，1997.
13) 北川　明・宇多高明・竹本典道・栗田信博・服部　敦：植生の遷移と堤防管理，水工学論文集，第39巻，pp. 883～886，1995.
14) 建設省四国地方建設局・四国技術事務所：平成4年度河川環境整備に関する調査（河川植生に関する調査），63p.，1992.
15) 藤田光一：空から見たミシシッピー・ミズーリ川の破堤形態，土木技術資料，37－10，pp. 54～59，1995.
16) 奥田繁俊・佐々木寧 編：河川環境と水辺植物－植生の保全と管理－，ソフトサイエンス社，初版，pp. 145～148，1996.
17) 福岡捷二・藤田光一：堤防法面張芝の侵食限界，水工学論文集，第34巻，pp. 319～324，1990.
18) 福岡捷二・渡辺和足・柿沼孝治：堤防芝の流水に対する侵食抵抗，土木学会論文集，No. 491，Ⅱ－27，pp. 31～40，1994.
19) 佐々木克也・宇多高明・藤田光一・服部　敦・平舘　治：堤防のり面の耐侵食強度評価実験，第49回年次学術講演会概要集，Ⅱ－A，土木学会，pp. 486～487，1994.
20) 服部　敦・瀬崎智之・近藤知仁・藤田光一：ヨシ群落上流れに関する大型実験水路と抵抗則の検討，第55回年次学術講演会講演概要集，第Ⅱ部，土木学会，pp. 616～617，2000.
21) Hewllet,H.W.M., Boorman,L.A. and Bramley,M.E. : Design of reinforced grass waterways, CIRIA, Report116, 116p., 1987.
22) 北川　明・宇多高明・福岡捷二ほか：一関遊水地における越流小堤の耐侵食力に関する現地実験，水工学論文集，第39巻，pp. 489～494，1995.
23) 郡山秀樹・服部　敦・藤田光一ほか：越流を受ける植生のり面の耐侵食性に与える表面凹凸の影響，第51回年次学術講演会概要集，Ⅱ，土木学会，pp. 548～549，1996.
24) 環境庁：外因性内分泌撹乱化学物質問題への環境庁の対応方針について，1997.

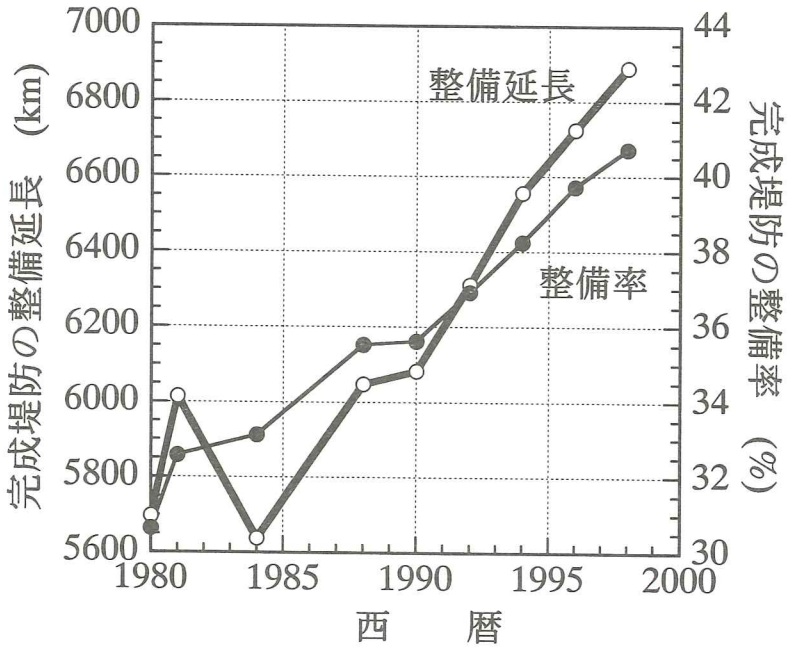
第2章　シートの開発目標と要求性能

シートに関するコンセプトおよびアイデア(1.3参照)に基づけば，かなりの大きな流速(弱点箇所のないシバが平均流速7 (m/s)に対しても侵食防止効果を発揮する[1]ように)まで侵食防止が行える可能性があると考えている。しかし，むやみに高い流速まで侵食防止できるシートを開発しても，他の多種多様な侵食防止工と比較して，何らかの優位性(例えば，コスト，環境保全性，維持管理の容易性など)がなければ実用的工法として不十分である。本章では，シートの主たる適用箇所となる場所を明確にするとともに，その場での侵食防止に対するニーズをまとめて開発目標を設定した結果を示す(2.1参照)。それとともに，シートに要求される性能をリストアップするとともに，その設定の目的または基本的方針を示す(2.2参照)。最後に，シート開発のための実験を進める上で用いたプロトタイプシートを示す(2.3参照)。

2.1　シートの開発目標

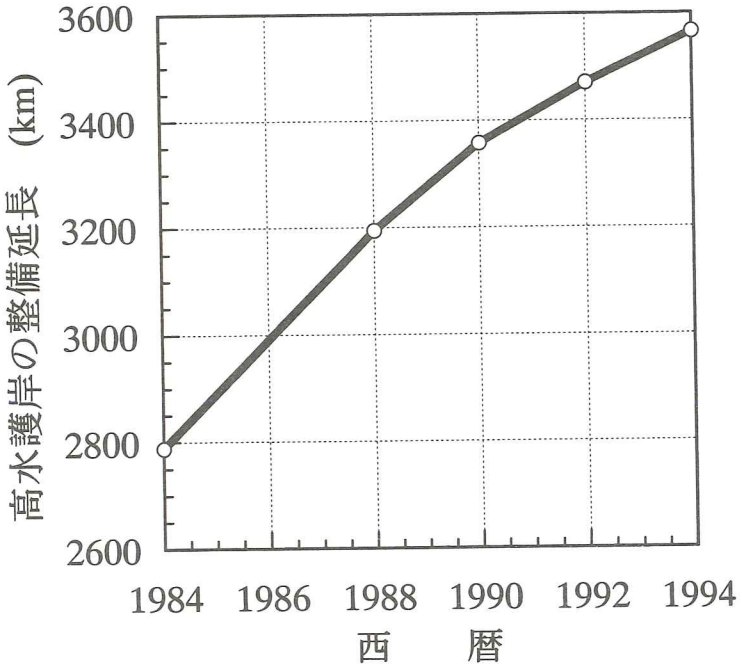
2.1.1　堤防整備の現状と開発目標

1.4.3に適用範囲として示したように，シートは陸生の草本植物が繁茂する場所にのみ適用が可能である。この条件を満たし，かつ現在なお侵食防止工の設置が必要とされている場所として，堤防のり面が挙げられる。一級河川の堤防総延長は約13,300kmであり，そのうち改修計画のとおりの断面形状に完成した堤防(以下，完成堤と呼ぶ)の延長は約41%である[2] (1998年3月末現在)。1984～1998年での完成堤整備延長および整備率の経年変化を図－2.1に示す。ほぼ直線的に整備延長は増加しており，平均では約90km/年（堤防総延長に対して約0.65%/年）となっている。このペースで今後とも整備が進行すると仮定しても，堤防が全て完成する(整備率が100%になる)には，あと約70年を要する。



図－2.1　完成堤防の整備延長および整備率の経年変化

同様に高水護岸の整備延長[2]の経年変化 (1984～1994年) を図－2.2に示す。1994年時点での整備延長は約3,570kmであり，完成堤の整備延長である約8,730kmに比較して半分以下となっている。また，近年8年間 (1986～1994年) でみると約61km/年で整備が進められている。堤防の場合のように整備完了までの年数を概算するためには，高水護岸の整備総延長が必要であるが，その集計値が既存の資料から得られなかった。そこでここでは「侵食防止工の整備総延長＝堤防総延長」と仮定することとした。この仮定は，出水時の堤防の安全性を確保するためには，堤防総延長に渡ってのり面に高水護岸または何らかの侵食防止



図－2.2　高水護岸の整備延長の経年変化(1984～1994年)

工(ここでは植生も含める)を設置しなければならないとの考えに基づいている。さらに「侵食防止工の工種をいわゆる高水護岸（主にコンクリートブロックと思われる）に限定し，それによって近年８年間と同じペースで整備を進める」と仮定したとき，未整備区間（＝堤防総延長－1994年時点での高水護岸の整備延長）への整備を完了するのに要する年数は，約160年と概算される。

以上から，堤防の整備が完了するには，まだ長い年月を必要とすることがわかる。このような数値だけを見ると堤防の侵食防御に対する整備が非常に遅れているという印象になる。しかし，1.2.1に示したように植生の耐侵食力によって計画高水流量規模の出水に対しても侵食防止が可能な堤防区間が実際にはあること，その区間を「侵食防止工」の整備延長としてカウントしていないことを考慮しなければならない。植生を繁茂させた堤防区間を整備延長としてカウントしていない主な理由は以下のように推察される。

1）侵食防止効果が定量的に明らかではなく，河道計画の対象としたような大きな出水に対しても植生で侵食防止が可能か，という問いに明確に答えることができなかったため。

2）経験的には上記のような評価ができた場合でも，植物の耐侵食力が空間的に不均一かつ時間的にも一定しないという特性があるため，その侵食防止効果をもって「高水護岸」と同等と位置づけられるような信頼性がないため。

これらの課題について工学的にしっかりした答えが出せれば，より短期間に高水護岸と比較しうる信頼性を有する「侵食防止工」が設置でき，堤防の安全度向上に資することができる。1.3.2に示した植生の耐侵食力評価法は，課題１）に対する改善を主に行うものであり，具体的には植生のみでは侵食防御が不可能な区間を明らかにし，それらの区間の総延長として「なんらかの侵食防御工の設置が必要である実質的な未整備延長」を明らかにすることである。その総延長は，上記した定義による未整備区間(＝堤防総延長－高水護岸の整備延長）より当然，小さい。なお，「植生による侵食防御が不可能」と判断するのは，a）1.3.2に示したような評価方法で求めた植生の耐侵食力を侵食外力が上回る場合と，b）その堤防区間の防災上の重要性を勘案して侵食防止に対する安全性に余裕を持たせるべきと判断した場合の２種類がある。つまり，「どの程度の安全性が必要か」ということが決まっておらず，これについては各河川の事情に応じて独自に設定するスタンスとなっている。

侵食防止シートは，1.2.2にコンセプトとして示したように課題２)に対する改善を行うものであり，主に実質的な未整備区間に設置する侵食防止工の一選択肢として位置づけられる。以上を踏まえて，シート

を用いた侵食防止工では,「堤防のり面を適用の主対象として，侵食防止工の整備率向上が早期化できる低廉な侵食防止工」としての開発を目標とした。なお，この目標設定は適用範囲を堤防のり面に限定するものではない。河岸･高水敷でも1.4.3に示した適用範囲を満たし，かつ留意事項も守れる場所であれば，基本的に適用してよい。

2.1.2　シートの目標単価　—コストと耐用年数の観点での優位性—

必要とされる侵食防止効果を同様に有する複数の工法の中からある一工法を選択する場合，コスト（耐用年数も含めて）と環境保全効果の観点から比較が行われるであろう。シートを用いた侵食防止工法は，**写真－1.1**に示したように土のみの場合と同様に植生が繁茂するという観点では，河川景観の向上に資するものである（例えば，島谷[3]）。景観を除くと河川環境における堤防のり面の役割が明確になっていないため，河川環境の観点での比較検討を行うことが困難である。そこで以下では，コストおよび耐用年数の観点からシート工法に優位性が認められるような目標設定を行う。比較の対象は，一般的によく使用されているコンクリートブロックによるのり覆工とする。

コストの比較にあたっては，その構造物の施工費であるイニシャルコストと，草刈りに関わる費用であるランニングコストの総和としてのトータルコストを用いる（簡単のため補修費など他のランニングコストを省略した)。のり覆工および草刈・集草・運搬の平均的なコストについてアンケートなどによって推定した結果を**表－2.1**に示す。推定結果は，１m^2あたり単価（諸経費などを抜いた直接工事費ベース，材料費込み)として示してある。また，草刈りに関する単価は，草刈りの方法(人力か機械か，機械の種類など）によって異なる。のり覆工では，草刈りを必要としないためトータルコストがイニシャルコストと同額の14,000円/m^2となる。

シートのトータルコスト目標額は，上記の額より小さくなるように設定する必要がある。そこで，その目標額の試算を以下のように行なった。まずシート工の場合のランニングコストを推定し，次にその額をのり覆工のトータルコストから差し引いた値として，シートのイニシャルコスト(＝施工費)の最大額を求める。

表－2.1　のり覆工および草刈・集草・運搬の平均的なコスト(直接工事費ベース,材料費込み)

項　　目	単価の範囲(円/m^2)	平均単価(円/m^2)	調査数
のり覆工 (コンクリートブロック)	4,750～16,666	14,000	8
覆土工	229～3,280	1,400	7
植生工	230～3,160	2,100	7
草刈り(肩掛け式)	28.4～76.0	40.2	39
草刈り(自走式)	4.0～44.0	10.7	33
草刈り(遠隔式)	8.8～15.0	11.1	3
集草(人力)	10.1～28.0	13.8	25
集草(機械)	5.5～7.4	6.2	8
搬出	3.8～38.0	11.2	13
焼却	4.5～12.1	6.0	21

ランニングコストの試算にあたっては，草刈りの年回数とそれを実施する年数，つまりシートの耐用年数を設定しなければならない。草刈りの年回数については，堤防植生管理として一般的に良く行われる年2回と仮定する。また，耐用年数については，コンクリートブロックの耐用年数に関するアンケート結果に基づいて，目標値として設定することとした。アンケートによると，コンクリートブロックはブロック自体の劣化以外にも，背後土の空洞化に伴うブロックの陥没またはクラックの発生という変擾も「劣化」として挙げられていた。しかし，いずれの場合にしても劣化が認められるようになる年数（耐用年数に近いと考えられる）については情報を得ることができなかった。その代わりに実態ベースではないが，「30年または50年を高水護岸の耐用年数と考えている」とする答えが多かった。これらの年数は，一般的なコンクリート構造物の耐用年数としてよく言われているものであり，「実態が把握できかねているのでそれを参考にしている」という状況と理解できる。以上のように耐用年数については情報が不足しており合理的な判断が付けにくい状態である。そこで，シートの耐用年数は「コンクリートブロックと同じか少し短い程度」という程度とすることとして，具体的には30年を目安とするとした。

以上よりシートのイニシャルコスト最大額は以下のように試算される。なお草刈りの単価は，最も高額である肩掛け式を用いる。

（シートのイニシャルコスト目標最大額）

＝（のり覆工のトータルコスト）

－（年2回の草刈り・集草（人力）・搬出・焼却を耐用年数と同じ期間まで行うのに必要なコスト）

＝14,000円/m^2－（40.2+13.8+11.2+6.0円/（回・m^2）× 2回/年×30年）

＝14,000－4,272＝9,728円/m^2　（**表－2.1**参照）

コストの観点での優位性をより高めるためには，目標最大額よりさら低廉化を図る必要がある。その観点に加え，**巻末資料1**に示す施工法によって施工単価が3,000～6,000円/m^{2}と試算されたこと（6.1.1に示す施工実験による）を考慮して，シート開発にあたってのシート単価目標値を3,000円/m^2（目標耐用年数30年）と設定した。

2.2　シートの要求性能と本研究での目標および方針

適用の主対象とした堤防のり面に**写真－1.1**に示した状況となるように施工でき（施工法については**巻末資料1**に示す），かつ目標とした耐用年数（約30年）までの期間中に，設計で見込んだ侵食防止効果を発揮できるように，シートは各種の性能を備えていなければならない。以下では，上記したような実用性を備えたシートであるための要求性能をリストアップするとともに，各要求性能ごとに本研究において設定した目標および方針をまとめて示す。

2.2.1　要求性能とその目的，基本方針

(1)　シートの侵食防止効果

●シートの適用限界流速の目標値

シートの主たる適用場所として堤防のり面を想定した。しかし，堤防のり面の侵食による被災防止や護岸の設置状況を考えると，扇状地を貫流する急流河道区間（セグメント1）へのシート適用が不適な場合が多い。

① シートは高流速の侵食防止にそもそも不向きである(1.4.3(1)参照)。

② 堤脚部が激しく局所洗掘を受ける場所では端部処理(根入れ)が重要である。平水時に水面下となる範囲ではシート自体の固定が困難であるだけでなく，シート端部を根固工と接続することによって深い局所洗掘に対処するのが困難である。

③ 多くののり面にはコンクリートブロック，石材などによる護岸が既に設置されている。

以上を勘案して，シート適用限界としてセグメント2－1，2－2，3（水面勾配1/300以下），設計限界流速4(m/s)を本研究の開発目標とした。

●基本物性(構成材の太さ，厚さ，空隙率)と侵食防止効果(第3章)

侵食防止シートは，シートの構成材が流体抵抗となることで，シートに被覆された地表面に作用する侵食外力(すなわち掃流力)を侵食発生限界(限界掃流力)以下まで低減させるという機構で，侵食防止効果を発揮する(1.4.2参照)。所定の侵食外力(例えば水深方向の平均流速などで表される設計最大外力)に対して上記の機構によって侵食防止が可能なように，シートの諸元(構成材の太さ，空隙率，厚さなど)をあらかじめ調節しておく必要がある。したがって，水理学的知見に基づいて定量的に侵食防止効果が評価できるモデルを活用したシートの諸元設定法を提案する。

●ピンと根茎による固定，シートつなぎ合わせなどの処理(第4章)

接合部や切断部などがない均一なシートが平坦な地表面にしっかり固定されているという，理想的な状況でのシートの侵食防止効果については上記の方法で評価できる。しかし，現地で実際にシートを使用する際には，このような理想的状況であるとは限らない。まず，ピンと根茎によってシートが地面に固定されるとしているが，堤防上に一般的に見られる植生繁茂状況では植物が離散的に繁茂している部分もあるので，シートが面的に連続して固定されているという理想的状況ではない。また，のり面にシートを敷設する場合，複数のシートをつなぎ合わせていくので，その部分でシート面の凹凸ができる。さらに，供用時にはシートが切断したり，シート上に石などが積載されることも想定しておくべきである。上記した状況下においてもシートが侵食防止機能を発揮できるか明らかにするとともに，また発揮されるならばその条件を明確にし，侵食防止効果を発揮させる上での留意点をとりまとめる。

⑵ 土砂充填性(第5章)

●土砂充填工法の開発(5.1)

シートへの土砂充填は，シートによる侵食防止が可能となるための必須条件である「地面とシートが密着した状態を保つこと」を実現する上で欠かせない重要な作業である(土砂充填が植生繁茂に必須の条件である)。シートへの土砂充填は，のり面にシートを敷設･固定した後に実施する場合と，あらかじめ実施しておいたシートを敷設・固定するという，大きく分けて2つの方法が考えられる。後者のあらかじめ充填する方法では，併せて植物も繁茂させておけば，現場では敷設・固定するだけで済むというように施工を容易にすることができる。しかし，そのような形態での製造・流通を考えた場合，シート製造ラインでの土砂充填や植生の繁茂させ方などにかなり工夫が必要となる。特に，土砂充填法が確立されていない状況で上記のような工夫について最初から取りかかるのは困難であると思われる。

以上の理由によって，のり面にシートを敷設・固定した後に充填する方法についてまず開発することとした。なお，そのような工法であっても，あらかじめ充填する場合，例えばシバを繁茂させる畑にシートを敷設して土砂充填をする場合にも応用可能である。

●土砂充填が可能なシート諸元(5.2)

上記のように土砂充填工法を選定したことから，シートへの要求性能も異なる部分がある。例えば，土砂充填の有無でシートの単位面積あたりの重量が50～60kg/m²程度（空隙率90%以下，厚さ3cmの場合の土砂だけの重さに相当する）も異なる。したがって敷設時に破断しないために必要とされる強度が異なるであろう。また，あらかじめ土砂を充填したシートでは，充填した土砂が運搬時などに抜け落ちないように，シート下面の空隙径を小さくするなどの工夫が必要となる。敷設後に充填するシートでは，逆に地面の凸凹によって生じるシートと地面間の隙間に土砂が充填できるようにシート下面から充填した土砂が抜け落ちやすい方がよい(1.4.3参照)。以上の例から分かるように，本研究で開発するシートの要求性能は，シートに土砂が充填されていない状態での施工を前提として設定されている。

また，シート開発上の本質的な課題として，土砂の充填性を優先させると“すかすか”なシートがよいが，その反面，侵食防止効果が低下することが挙げられる。この課題の根本的な解決は，土砂充填効率が良く，かつ現地での適用が可能な充填工法を開発するところにある。しかし，どのようなシート諸元でも完全に充填できる工法を開発するには至らなかった。そこで完全な充填が可能となるシート諸元（構成材料の直径，空隙率，厚さ，圧縮強度)を提案することとした。

⑶　強度・加工性(第6章)

●目的

施工や維持修繕時にシートに力が作用した際に破断したり，元の形状から大きく変形したまま回復しないなど，当初の侵食防止効果が損なわれる(以下，損傷と呼ぶ)のを防止するのにある一定の強度が必要である。また，シートをのり面に敷設するにあたって，シートを折り曲げたり，刃物で切断するなどの加工を行う必要がある(**巻末資料1**参照)。損傷が生じない強度および加工しやすさ(加工性)を有するシートの材料力学的な特性について検討を加える。

●強度・加工性の基準化にあたっての基本方針

コンクリートや石材といった堅くかつ重量の大きい護岸材料については，材料力学的な要求性能について，経験的に培われた知識として蓄積，整理されてきている。しかし，シートのような“柔らかい”材料を侵食防止効果を発揮する主材料として用いた侵食防止工の実績はほとんどなく，また侵食防止効果の発揮機構も既往の護岸と全く異なるため，上記の知識をそのままシートに当てはめて要求性能を決めようとするのは無理がある。そのため，新たに検討を行う必要がある。

この検討を行うにあたってのキーポイントは，破損や許容限界以上の変形が生じるイベント（例えば，シート敷設時にロール状にして搬入されたシートを展開する際に引っ張るなど）を的確に想定することである。つまりシートの破損や変形が生じるのがどのような状況であるかという「問題設定」がしっかりなされれば，破損現象について力学的に比較的明快に理解できるからである。そこで，①施工および維持修繕時，草刈り時，出水時，撤去時にシートへ力が作用する状況(イベント)を想定し，作用状況が比較的似ているイベントに分類して，各分類で損傷や変形が生じる可能性が大きいと懸念されるイベントを実際に実施して，シートの損傷状況を比較する，②問題となるイベントを抽出して様々な強度のシートに対してそのイベントの再現実験を行い，損傷・変形させてみることで，そのパターンと機構を明らかにする，③パターンと機構が概ね反映されている強度試験法を選定するとともに，その試験法によって測定した強度と損傷の有無や変形の大きさの関係を調べ，必要強度の判定基準を明らかにする，といった方法を基本とし

て，基準化することとした。

ただし，想定にあたっては施工法(特に土砂充填工法)を特定しているので，本研究で示す結果は限定的である。施工法はより効率的なものへ改良が進むと期待されるが，その際にはシートの強度・加工性についても今後とも経験を重ねて改良すべきである。上記のような手順で基準化されているので，改良あたっては対象となる項目とその改良理由を明確にすることができる。

⑷　耐久性(第７章)

●本研究での目標

シートの目標耐用年数は30年とした（2.1参照)。この期間，侵食防止効果はもちろん，シート撤去時に必要とされる強度（6.3.1参照）も保持しなければならない。耐久性に対する要求性能は定量的に明確になっている。しかし，経験的判断に拠るところが大きい現状の耐久性に関する試験・評価技術のみでは，上記の要求性能を満たすシートを設計・製造するのが難しく，現地で実際に使用して試行錯誤を繰り返して耐久性の向上を行う必要がある。

そこで本研究では，今後，試行錯誤を行いながら耐久性の改善が行えるような(つまり現行の試験･評価技術で現地施工することが可能と判断しうるだけの耐久性を有する)シートを開発することを目標とした。したがって，試験法や評価の考え方は暫定的なものであり，目標耐用年数を満たす耐久性の有無を完全に確認できるものではないことに留意されたい。

●耐久性の基準化にあたっての基本的方針

現地で実際に生じる劣化現象には多様な要因が関与しているだけでなく，各要因による影響の現れ方が独立ではないと言われている。シートに関してそのような現場での劣化の実態を調査できていない時点で，耐久性について評価するのは困難である。その原因は大きく分けて二つある。

まず一つは，シートを劣化させる多種の要因のうち，シートの耐久性の試験対象とすべき要因（つまり「耐用年数30年」の期間内で保持すべき性能を損失させるに至る劣化要因）があらかじめ特定できないことである。熱可塑性樹脂を主素材としたシートの場合，紫外線に暴露すると劣化が最も進行しやすいことが経験的に分かっている。これについては，当然試験対象となる。しかし紫外線への暴露ほど早く劣化が生じないという理由でもって，他の要因(例えば温度，水質など)を試験対象からはずすことはできない。なぜならばそのような劣化の進行程度でも「耐用年数30年」の期間内で保持すべき性能を損失させるに至る可能性があるからである。そのような劣化を生じさせる要因とそうでないものを区別することが，現時点では完全にできない。

もう一つは，シートの耐久性の測定に用いる屋内試験で得られる結果のみから，現地での劣化状況を推定できないことである。ここで屋内試験とは，劣化の進行を促進させたり，ある一定条件（例えば気温や水質）に制御された状況下で劣化させるなどの，人工的な環境を作り出して劣化させるタイプの試験である。屋内試験は，劣化を生じさせる要因とその条件が明確であり，同じ環境の再現性があること，さらに比較的短時間で結果が得られることなどのメリットがある。そのため，「ある試験条件」を決めてしまえば，その条件に対して耐久性を向上させるのに最適な試験である。しかし，その「試験条件」が実際にシートを適用する現場の自然環境の条件とどのような関係があるのか（例えば促進暴露試験の場合には現地での１年が何時間の試験に相当するか）があらかじめ特定できないので，屋内試験の結果のみからは現地で生じるであろう劣化状況を予測したり，耐久性に関する要求性能を満たすシートであるかを評価することがで

きない。

現状の技術には上記のような問題があるため，本来は以下のようなプロセスを経てシートの耐久性の評価を行うとともに，性能向上のための改善を行わなければならない。

① 開発したシートを実際に現場に施工し，劣化状況および劣化の主要因を明らかにする。

② その主要因に関する屋内試験を行って，試験と現地調査の結果を比較して，例えば現地で1年間で生じる劣化が室内試験では何時間で得られるかというような，試験結果から現地での劣化状況を評価しうる関係を明らかにする。

③ 耐久性について改善を加えたシートに屋内試験を行い，耐久性を評価するとともに，必要に応じて更に改善を加える。

④ 改善を加えたシートを現地に施工し，所定の耐久性が得られているか現地調査する。得られていない場合は，以上を繰り返す。

②，③のプロセスは，ある特定のシートのみの改善を行うことを目的とした際には必ずしも必要ではないが，本研究のようにシート全般に対して耐久性に関する要求性能の有無を評価する手法の開発を行う上では必要不可欠である。

今回の開発研究は僅か4年の期間で行っているため，上記のようなプロセスでシートの耐久性に関する性能改善を完全に行うことができないのは，開発開始当初から分かっていた。そのため目的として先述したように，今後上記のプロセスで改善が可能な（つまり現地施工することが可能と判断しうるだけの耐久性を有する）シートを以下のような方針に基づいて開発することとした。

まず，プロセス①に対応する劣化の主要因（以下，基本要因と呼ぶ）の特定については，シートと同様に熱可塑性樹脂を主素材とする既往の土木資材の屋内試験項目から選定することとした（7.1.1参照）。さらに，それらの土木資材には見られなかったシートに特有と想定される劣化要因（以下，特殊要因と呼ぶ）を明確にするとともに，実大試験を行って劣化の程度を調べ，試験対象とすべき要因であるか検討を加えることとする（7.1.2参照）。

次にプロセス②に対応する試験法の設定については，屋内試験法および試験条件を既往の土木資材で採用されているJIS規格などの試験法と同一とした。それらの試験の項目と方法をとりまとめるとともに，各試験をプロトタイプシートに対して行った結果から，シートに特有の試験上の留意点を明らかにすることとした。特に，シートの劣化が最も顕著に生じると思われる紫外線への暴露については，室内試験と屋外暴露試験を行い，屋外暴露1年が室内試験の何時間の試験に相当するかを明らかにする実験を行い，その結果に基づいて，今回の開発研究ではどの程度の耐久性を有するシートを開発したのか考察を加える（7.2参照）。

⑸ 安全性（第8章）

●基本的考え方

シートの主素材は熱可塑性樹脂と呼ばれる化学物質であるが，同じような物質を素材とする他の製品と同様に，「化学物質の審査及び製造等の規制に関する法律」に基づいて安全性が確認されている化学物質およびそれら化学物質から造られた物質のみを用いている。しかし，そのような素材を用いているシートでも堤防のり面などに敷設した状況において，人体や生物に対して全く問題がないとは言い難い。その一方，実際にシートを敷設してみて実態を調査しないと，上記のような問題全てに対して答えを出すことはでき

ない。2000年からシートの試験施工を本格的に始めているが，現状では上記のような問題が報告されていない。しかし，まだ実績として十分な年月が経過したわけではないので今後とも調査を継続する必要がある。以上のような現状認識のもと，今後のシート施工にあたっては，1)まず現地への敷設を行う前に有害性が懸念される成分の有無について明らかにしておく，2)特に問題のないシートは実際に現地施工を行って，その後安全性に関する調査を実施する，3)上記のようにシートを施工したり調査を行うこと，また問題発生時の対応について施工前に明確にまとめておき，必要に応じて地域住民などと打ち合わせておくこと，とする。本研究では１）に対応する部分について，①シートの解れ易さ，②シートの燃焼しやすさ，③燃焼に伴って発生するガスの安全性，③環境ホルモンと疑われる化学物質の含有量・溶出量について確認する方法を提案する。

●シートの解れが生じる状況とその対応方針(8.1参照)

シートは，その構成材を編んだり，織ったりしてして形成されているものがある（編み物および織物タイプ)。これらのタイプに代表されるように，構成材が接着されていないシートでは，切断面や端部などから構成材が解れやすい。この場合，シートの構造が維持できなくて侵食防止効果が失われることだけでなく，シート設置範囲に構成材が散乱することが環境上の問題となることが懸念される。

シートの切断が生じるのは，施工時(シート敷設)と供用時の事故によるものが考えられる。施工時については，解れやすいシートであるか事前に明らかにしておくとともに，解れやすい場合には解れ防止の措置を行うということで，全てのシートについてあらかじめ対策を行うことが可能である。また，事故の場合については，シート構成材の散乱を特に防止する必要がある場合には，解れにくいシートを設置する以外の対策がない。

以上より，シートの解れについては，1)解れ易さの事前評価と２)解れやすい場合の解れ防止策と効果について明らかにしておけば良いと考えられる。本研究ではこの２項目について検討する。

●燃焼が生じる状況の想定とその対応方針(8.2参照)

シートの燃焼が生じる状況については，不審火がまず挙げられる。不審火以外で供用時にのり面上で燃焼が生じる場合として，植生管理の一手法である焼きシバ，および集草焼却が考えられる。しかし，これらの焼却処理は「廃棄物の処理及び清掃に関する法律」によって禁止されたため，今後のり面で行われることはない。また，施工時については，工程の一部にシートを切断する場合があり，その切断面からシート構成材がほつれる(離脱しやすい)ものについては，上記した解れ防止の一手法としてシート切断面をバーナーで焼き付けることが考えられる。この場合には，施工者が燃焼状態をコントロールしているので，シートの侵食防止効果が失われるという問題は生じない。ただし，燃焼時に生じるガスの人体に対する安全性について検討する必要がある。

燃焼への対応策として，シートの素材である熱可塑性樹脂の難燃化加工がまず考えられる。この加工をシートに行うことは技術的には可能であるが，2.1.2に示したシートの目標単価を上回ることがシートのプロトタイプ作成作業を進めるなかで明確になった。また，もう一つの対応策として，**写真－1.1**に示したようにシートは供用時には地表近くに埋設した状態であること，つまり直接火に触れないようになっていることが挙げられる。この状態が完全に保たれていれば，のり面上で枯れ草が燃える程度の燃焼に対しては，シートの損傷が完全に防げる対応策となる（詳細については8.2.1参照)。しかし，供用時には雨水によるガリ侵食の発生や動物による掘削など，シートを地表面に露出させるような擾乱が加わるものであ

る。したがって，シートが常に埋設した状態を保つことを前提とする上記の対策は，全く無効ではないが不完全であると考えなければならない。

以上の状況を考慮して，不審火に対する対応方針を以下のように設定した。不審火は，それを起こすことが基本的に禁止行為であり，シートを損傷する外力として恒常的に作用する損傷外力ではない。そのような外力に対して，シート自体に対して難燃化加工のような抜本的対策を目標単価を上回ってまで行うことはしないこととする。シートを常に埋設した状態に保つ維持管理を行うことを前提として，埋設することを燃焼防止対策の基本とする。したがってシートに要求する耐燃焼性としては，万が一シートが露出した部分で不審火が生じた場合でも，シートが原因となって燃焼範囲が拡大することがないこととする。なお，燃え広がらないにしろ，シートが部分的に燃焼して侵食防止効果を失うが，その場所は点検により発見し次第，速やかに補修することで対応することとする(補修方法については**巻末資料2**参照)。また，上記の方針では，シートが燃焼するのを完全には防止していない。さらに解れ防止策としてシート切断面を焼き付けることがあることも考慮して，燃焼によって生じるガスが人体に対して安全であることも事前に確認することとする。

以上から，1)不審火に対してどの程度の耐燃焼を持たせるべきか(8.2参照)，2)燃焼した場合にも人体に対して安全であるか(8.3.1参照)という2項目について検討する。2)の試験法については，上記と同様な安全性の確認を行っている既往の土木資材に対する試験法と同一とする。

●環境ホルモンに関する対応方針(8.3.2参照)

環境ホルモンが生物に及ぼす影響は日に日に明らかになってきており，それに対する社会的関心は非常に高い。しかし，環境ホルモンについては，なお研究段階の知見が多く，またシートの開発を行っていた期間に環境基準が設けられるには至っていない。一方で環境ホルモンと疑われる化学物質を含む添加剤などにも，熱可塑性樹脂を主素材とした製品に加工する際に重要な役割がある。このような状況において，現時点ではその化学物質の利用が避けられない特別の理由がない限り，極力使用を控える努力を行う気運があるようである。今回開発したシートも基本的には上記と同じと考えている。つまり，上記のような努力を行っても，なお環境ホルモンが含有されているシートの使用を否定することはしない。ただし，環境ホルモンの種類と含有量などについて全く情報を持たないまま使用しないこととした(1.4.3参照)。そのようにした狙いは，1)複数のシート(または侵食防止工法)から一つを選定する際に，環境ホルモンの含有に関する情報が判断材料となる場合に対応するため，2)施工後に環境ホルモンに関する調査を行う際の基本データとなること，また3)将来的に環境基準化された場合に適切な対応が行える準備とすることである。1)の場合のみが環境ホルモンに関する情報が具体的な判断に使われる。しかし，具体的にどのように判断するかは実際の利用者にゆだねざるを得ない。本研究では，上記の狙いで用いられる環境ホルモンの含有量および溶出量に関する情報を得るための試験法を提案する。

2.2.2 検討項目とその試験・評価法の概要

(1)～(5)に示した事項について，本研究で提案した試験・評価法とともに整理した結果を**表－2.2**に示す。このような試験・評価法を提案するに至った経緯および根拠を第3～8章にまとめて示す。

2.3 実験に用いたプロトタイプシート

2.2に示した要求性能(1)～(5)を有するシートを開発するにあたって，まず様々なプロトタイプを作成し，各性能について**表－2.2**や第３～８章に示す実験を行なった。それらの実験に用いたシートの概観を**写真－2.1**に，諸元を**表－2.3**にまとめて示す。

プロトタイプの作成は３回行った。第一次プロトタイプは，主に他の用途で用いられている製品の中から，今回開発する侵食防止シートに転用できそうな構造を有するものを集めたものである。第一次では**表－2.3**に示すように一つの構造について多様な諸元（シート構成材の太さ，空隙率など）のプロトタイプを作成した。それらのシートを用いて上記の実験を行った結果から，特に侵食防止効果，土砂充填性，強度について要求性能を有することを確認するための試験・評価法の一次案を作成した。それに基づいて改良を加えたのが第二次プロトタイプである。これらのシートについても上記の実験を行って，試験・評価法の改善を行うとともに，個々のプロトタイプの改良点も明らかにした。第三次プロトタイプはシートの完成を目指した現時点での最終版であり，現地での試験施工も行い，実用性の確認も行った。

以上のようにプロトタイプの段階的改良と各実験を並行して行っていったので，各実験ごとに使用したプロトタイプが異なる。各実験で用いたプロトタイプを系統的に表記するために，以下では**写真－2.1**および**表－2.3**に示した記号を用いて表記することとする。

プロトタイプシートは大きく４タイプに分けられる。ヘチマタイプは，円形断面を有するカールした繊維状の構成材がランダムに熔着または接着された構造を有する。ネットタイプは，ネット状の構成材を使用したもので，ネット状のパネルを折り曲げ加工したり，細断したネット材をパネル状のネット材で作成した袋内に充填する２種類の構造がある。編み物タイプは，繊維状に加工した構成材を編んで作成したシートで，シート表面に見られる編み目の作った形がハニカム状のものと，直線状のものの２種類がある。最後に織物タイプは，繊維状またはテープ状に加工した構成材を織って作成したシートで，シートに厚みを付ける構造に２種類ある。一つは平面の織物を波形に加工したもので，もう一つは同じく平面織物にテープ状の構成材をループを付けて編み込んだものである。

参考文献

1）宇多高明・望月達也・藤田光一ほか：洪水流を受けた時の多自然型河岸防御工・粘性土・植生の挙動－流水に対する安定性･耐侵食性を判断するために－，土木研究所資料，第3489号，pp.97～214，1997.

2）(社)日本河川協会監修：河川便覧，国土開発調査会.

3）島谷幸宏編著：河川風景デザイン，(株)山海堂，初版，195p.，1994.

表－2.2(1)　シートの性能検討項目とその試験・評価法の概要

試験の種類	試験項目	測定項目	試験規格	試験の概要	評　価
1.耐侵食性	1.1 基本構造	厚さ　t	JIS L 1908	円形(面積 25cm^2)のプレッサーフットで 0.7kPa の圧力を加えた状態での厚さを測定する。加圧した状態で厚さの変化が認められなくなってから(通常 30 秒以上)厚さの測定を行う(有効桁数 3 桁)。	圧力 0kPa(見かけの厚さ)も測定し、シートの圧縮変形のしやすさも確認しておく。
		構成材の代表径　d		実体顕微鏡（倍率 50 倍）による写真測定。異なる直径である複数の構成材によって構成されるシートの場合、それぞれについて測定を行う。ただし、流水抵抗となるシート部分が明確ならば、その部分を構成する構成材に対してのみ測定すればよい。	
		比重	JIS K 7112	比重を水深方向に連続的に変化させた水中に構成材を自然沈降させ、沈降が止まった水深での水の比重を構成材の比重とする。異なる比重である複数の構成材から成るシートの場合、それぞれについて測定を行う。	複数の構成材から成る場合には、シート全体の平均比重も求めること。
		目付(単位面積あたりの重量)		シートを一辺が約 0.5m の正方形に切り出し、その重量と面積を測定して、(目付)=(重量)/(面積)として算定する。	
		空隙率　λ_p		空隙率(%)=100-(目付)/(厚さ)/(平均比重)×100 として算定する。	
	1.2 抵抗特性	透過係数　K	3.5 参照	矩形管水路にシートを設置して、断面平均流速 U と動水勾配 I の関係を測定する。その結果から $K/\lambda_p=U/I^{0.5}$ として算定する。	K とレイノルズ数 Re(=U･d/ν)の関係として整理する。
	1.3 耐侵食性	限界流速　V_c		シート上が裸地であり、かつ水面勾配 1/300 とした条件で、流速およびせん断力分布を算定する予測式に基づいて、堤体土の設計耐侵食力以下となる流速として算定する。予測式が適用可であることは実験によって確認する。	限界流速は 0.5(m/s)刻みで評価する。限界流速とそれが適用できる水深の範囲との関係として評価結果を示す。
2.土砂充填性	2.1 シート内への充填性	充填深と振動回数の関係	5.2.2 参照	充填用振動装置(小型：接地圧 1,800N/m^2,接地面積 30×30cm)によって、スランプ値 25cm とした砂質土をシート(60×60cm)に充填する。充填 1 回あたり、加振時間は 5 秒、土砂量は(シート厚 t)×(シート面積の半値)とする。	A,B が合格 A:充填深>シート厚(充填 1 回) B:充填深>シート厚(充填 2 回) C:上記以外
	2.2 不陸部充填性	隙間への充填性	5.2.3 参照	シートの重ね合わせ部および地面の凹部(深さ 5cm、幅および長さ 20cm)でのシート面と地面の隙間への土砂充填性(隙間が充填した土砂で埋めることができる、またはシートが変形して隙間内に垂れ込んで隙間を埋めることができる)を確認する。	A,B が合格 A:隙間がない(充填 1 回) B:隙間がない(充填 2 回) C:上記以外

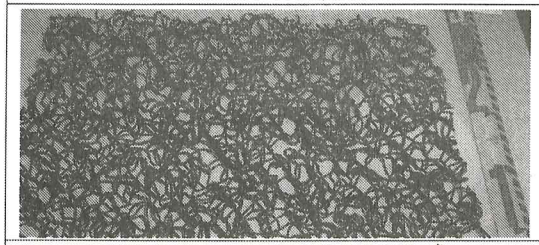
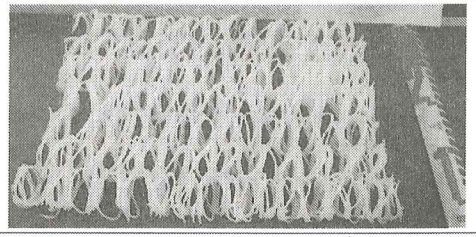
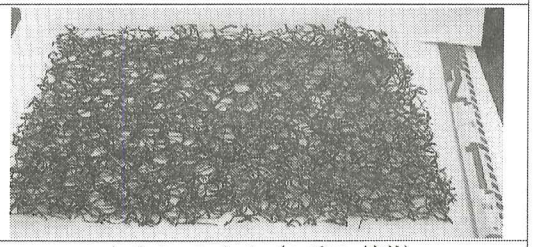
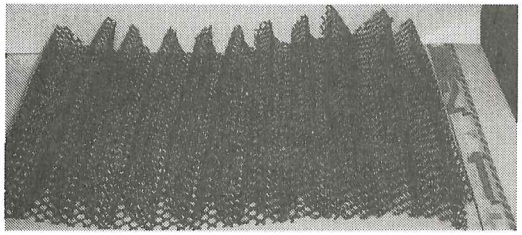
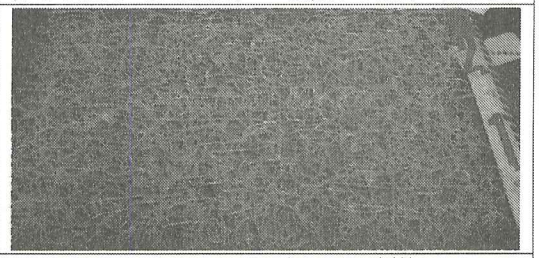
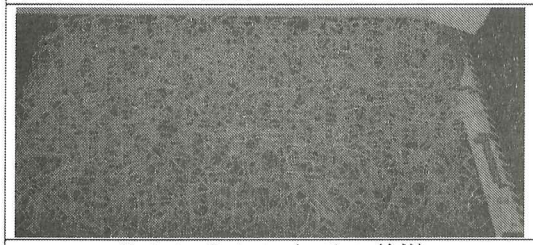
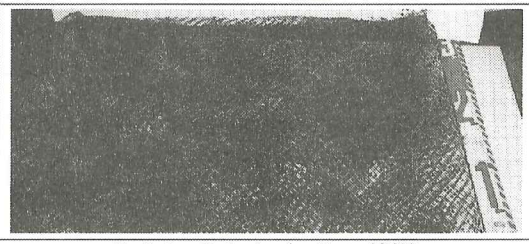
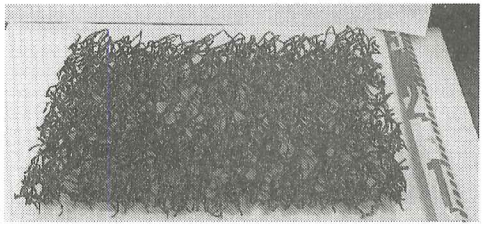
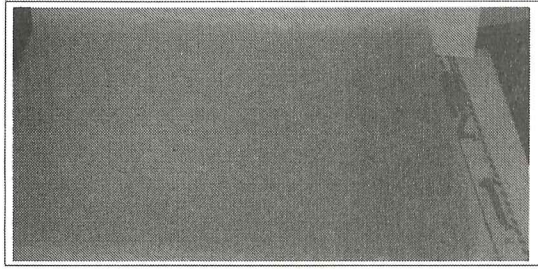
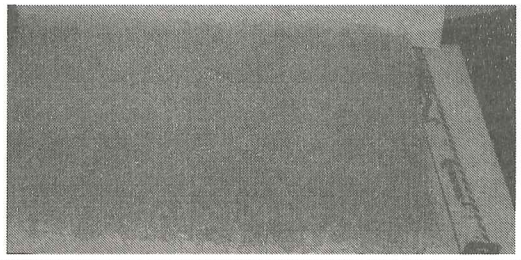
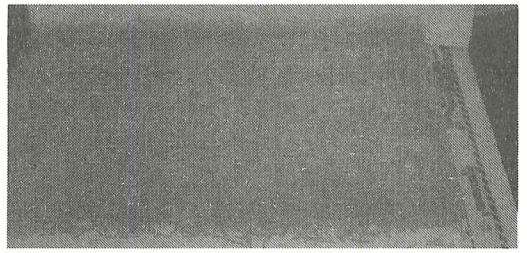
表－2.2(2)　シートの性能検討項目とその試験・評価法の概要

試験の種類	試験項目	測定項目	試験規格	試験の概要	評　価
3.強　度	3.1 耐損傷性	引っ掛け強度	JIS L 1043	試験片(幅 10cm、長さ 20cm)をフック間隔 10cm、引っ張り速度 20cm/min で引っ張った際の、最大強度(kgf)を測定する	引っ掛け強度 15kgf 以上を合格とする。
	3.2 伸びに対する復元性	伸長回復率	JIS L 1096	試験片(幅 5cm、長さ 20cm)をチャック間隔 10cm、引っ張り速度 10cm/min で 50kgf/m に達するまで引っ張る。50kgf/m の引っ張り荷重を 1 分間作用させた後に、除荷して 3 分後、厚さと長さを測定する。(回復率)=(試験後の測定値)/(試験前の測定値)×100 として算定する。	厚さ回復率が 90%以上かつ伸び回復率が 105%以下を合格とする。
	3.3 圧縮に対する復元性	圧縮復元率	JIS L 1096	円形(面積 25cm^2)のプレッサーフットで 100kPa の圧力を 30 秒間加え、除荷した 1 分後の厚さを測定する。(回復率)=(試験後の測定値)/(試験前の測定値)×100 として算定する。	厚さ回復率が 90%以上を合格とする。
	3.4 耐衝撃性	剣先スコップの衝突に対する損傷程度	6.3.3 参照	平地に敷設したシート上に高さ 1m から剣先スコップ(重量約 1.7kgf)を剣先がシートに衝突するように自然落下させる。シートの長手方向および幅方向にスコップ面が平行になるように上記試験を行い、シートの損傷状況を観察する。	A,B が合格 A:損傷が認められない B:破断はないがシートが凹む C:構成材が切断するが貫通しない D:スコップが貫通する
4.加工性	4.1 敷設･固定作業性	端部処理性(折り曲げ損傷) ピンによる固定性 シート上での作業性	6.3.5 参照	幅 0.6m 程度、長さ 2m 程度のシートを 2 枚用いて、のり勾配 1:2 の斜面上に敷設･固定を行う。シートを折り曲げてもシートが損傷しないか、固定用ピンによってシートがしっかりと固定できるか、濡れた作業靴でシートに載っても滑らないか、確認する。確認する内容は以下のとおり。 端部処理性 A:損傷が認められない B:折り曲げた凸側で一部切断する D:折り曲げ部にそって完全に切断される ピンによる固定性 A:ピンを打ち込んだ孔が広がることなく、シートががたつき無く固定できる B:ピン周りでシートが浮かび上がるが固定できる D:シートがピンから容易に離脱する シート上での作業性 A:滑りにくく歩きやすい B:多少滑るが歩行に支障はない D:滑りやすく歩行するのに注意を要する	端部処理性：A が合格 ピンによる固定性、およびシート上での作業性 ：A,B が合格
	4.2 シートの重ね合わせ易さ	自重に対する伸長しにくさ		幅 60cm、長さ 2m のシートを片手で掴んでつり下げ、掴んだ場所からシート最下端までの距離を測定する。(伸び率)=(つり下げ時の距離)/(つり下げ前のシート長さ(2m))として算定する。	A,B が合格 A:110%以内 B:110～120% D:120%以上

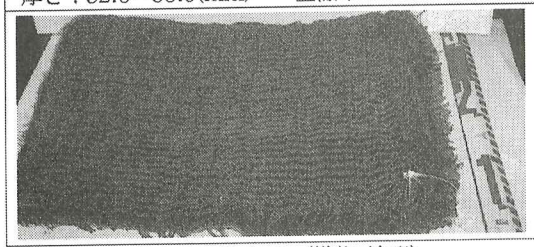
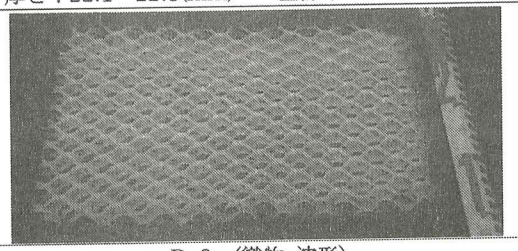
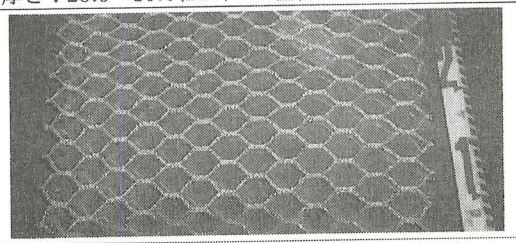
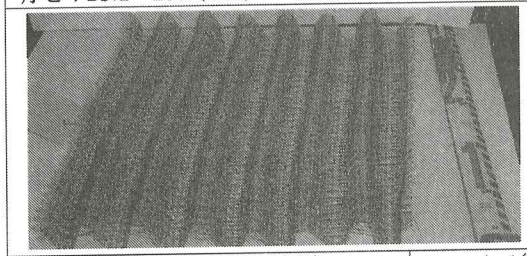
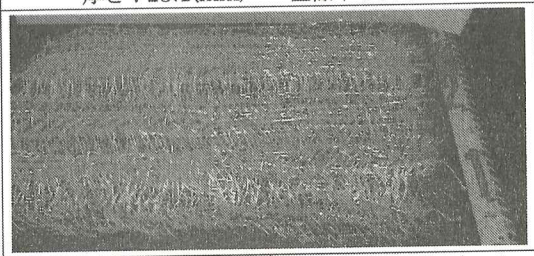
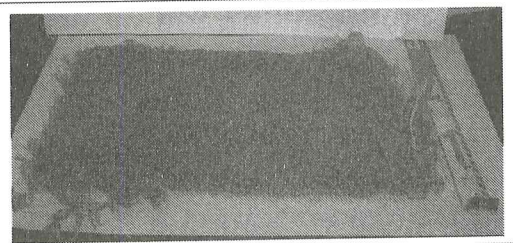
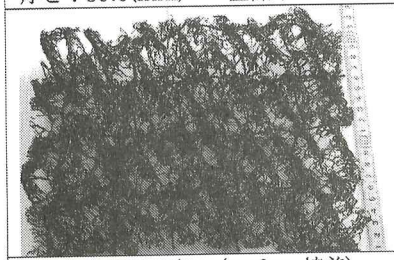
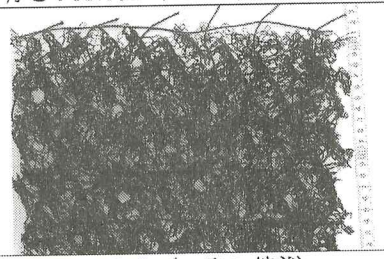
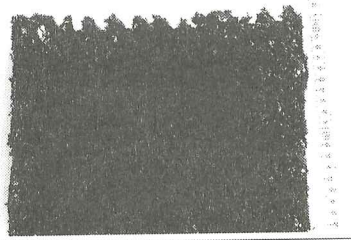
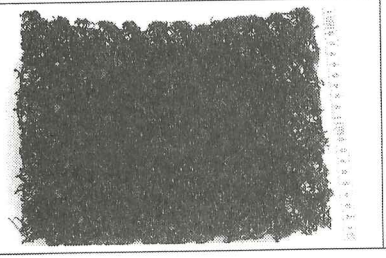
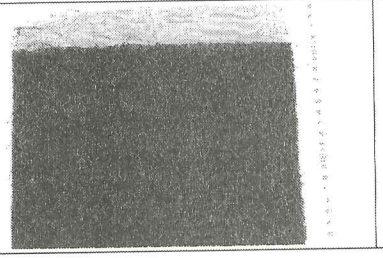
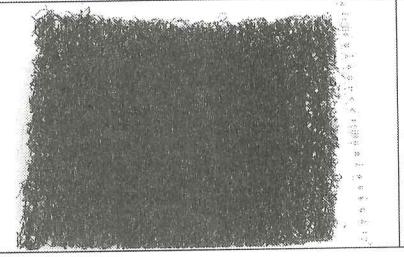
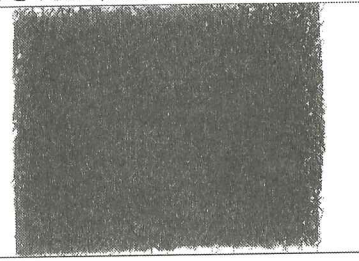
表－2.2(3)　シートの性能検討項目とその試験・評価法の概要

試験の種類	試験項目	測定項目	試験規格	試験の概要	評　価
5.耐久性	5.1 耐候性	引っ掛け強度の保持率 シートの形状保持性 (目視による変化の有無の確認)	JIS A 1415 JIS A 1410	累積暴露時間が 2 年程度までの耐劣化性を評価する。屋外暴露試験(2,4,8,12 ヶ月)とキセノンアークランプ式の促進暴露試験(400,1000,2000,4000 時間)を行う。両試験の強度保持率の経時変化を比較して、4000 時間の促進暴露試験が屋外暴露試験の 2 年以上に相当することを確認する。	A,B が合格 A:90%≦保持率≦110%、かつ試験後にも引っ掛け強度 15kgf 以上であり、C のような変化が認められない B: 80%≦保持率≦120%以下同上 C:上記以外の強度保持率および引っ掛け強度、または切断や脆性化などがシートの流水抵抗を発揮する主要部に認められた場合。
	5.2 耐水・耐薬品性		JIS K 7114	pH=2,7,12(硫酸溶液、蒸留水、水酸化カルシウム溶液)に水温 50±2℃で 250 時間浸漬した後に引っ掛け試験を行う。	
	5.3 耐寒・耐熱性		7.2.3 参照	気温が-20℃、70℃の恒温槽内にシートを 24 時間放置し、その気温状態のまま引っ掛け試験を行う。	
	5.4 耐土壌性		7.2.5 参照	市販の腐葉土にシートを 3,6,9 ヶ月埋設した後に引っ掛け試験を行う。	
6.安全性	6.1 解れ易さ	切断面からの解れ易さ	8.1 参照	シートを切断し、切断面に位置する構成材を指で引っ張って解れ易さを確認する。	織物、編み物など構成材同士が接合されていないタイプは解れやすい。
	6.2 耐燃焼性	燃焼範囲の拡大しにくさ	JIS L 1091 一部改変	直径 10mm の球状の綿にエタノール 0.3mℓを染み込ませたものを火種とする。シート(200×275mm)に乾燥砂を厚さ半分まで、および全厚さまで埋設した状態を試験対象として、火種を載せて着火し、自然消火するまで放置する。消火後下記のように燃焼状態を分類する。 全厚さ充填：A:ほとんど燃焼しない、B:火種部のみ燃焼する、D:燃え広がる 半分充填：A:ほとんど燃焼しない、B:炭化距離が 10cm 以内、D:燃え広がる	A,B が合格
	6.3 燃焼ガスの有害性	ガス成分とその発生量	8.3.1 参照	室温から 700℃まで上昇させてシートを燃焼し、その際に発生するガスの成分と発生量を分析する。	有害性が認められる成分については環境基準と照らし合わせて安全性を判断する。
	6.4 環境ホルモンの含有量	シート単位質量あたりの含有量	8.3.2 参照	細断したシートを有機溶媒に浸漬して、環境ホルモンと疑われている化学物質を溶出させる。	現状では特になし。今後、適用可能な基準などが設定された際には、それにしたがって安全性を評価する。
	6.5 環境ホルモンの溶出しやすさ	単位質量あたりのシートからの溶出量		溶出量試験:細断したシートを pH が約 2,7,10 に調整した水に 7 日間浸漬する。 付着量試験:精製水に細断したシートを 5 分間浸漬する。	

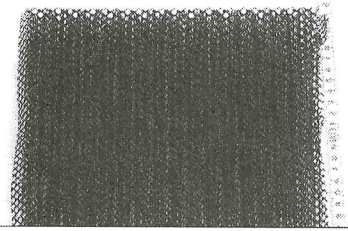
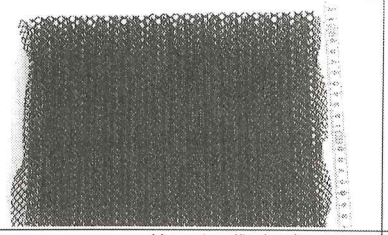
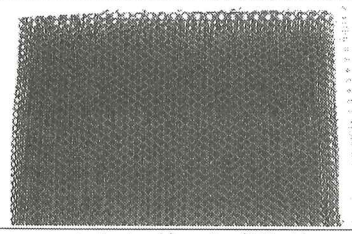
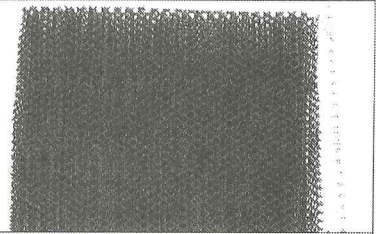
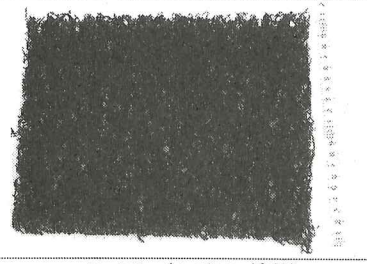
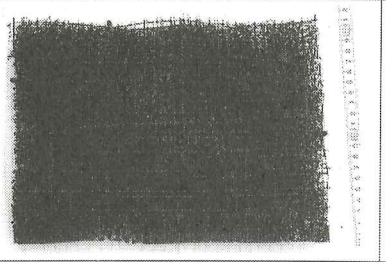
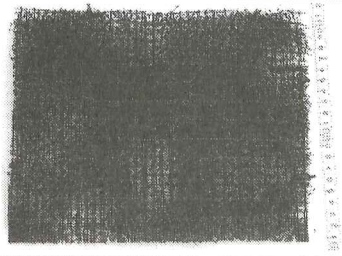
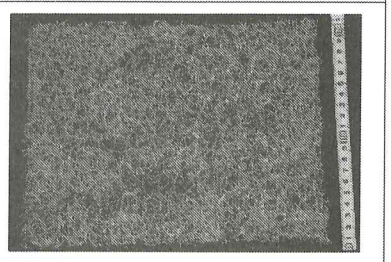
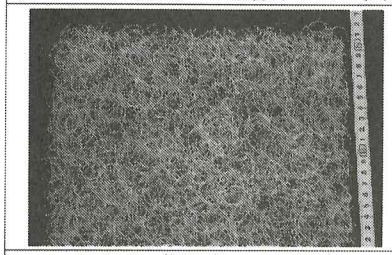
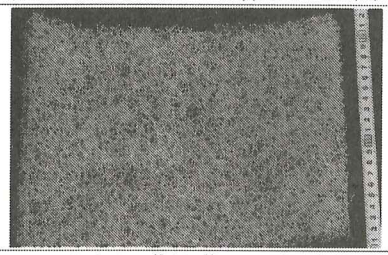
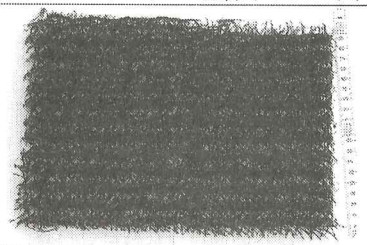
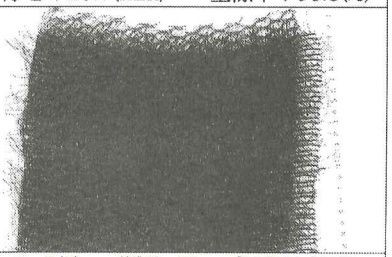
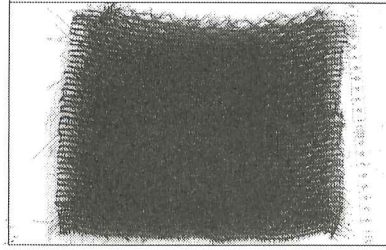
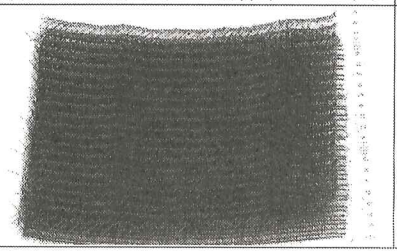
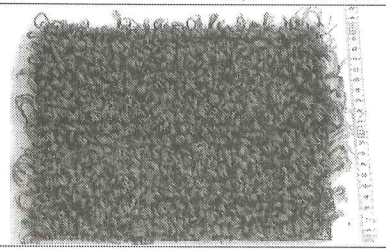
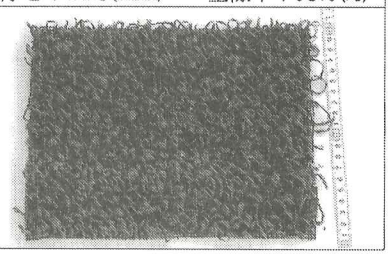
写真－2.1(1)　プロトタイプの分類と概観

A-1-1～A-1-4　（ヘチマ-熔着） 厚さ：12.2～12.3(mm)　空隙率：93.8～97.5(%)	A-2-1～A-2-4　（ヘチマ-熔着） 厚さ：29.4～33.5(mm)　空隙率：94.8～98.2(%)	A-3-1～A-3-4　（ヘチマ-熔着） 厚さ：17.7～24.4(mm)　空隙率：94.3～97.8(%)
		
A-4-1～A-4-6　（ネット-折り曲げ） 厚さ：24.0～30.3(mm)　空隙率：95.4～98.1(%)	A-5　（ネット-折り曲げ） 厚さ：30.0(mm)　空隙率：97.6(%)	A-6-1～A-6-4　（ヘチマ-熔着） 厚さ：26.4～27.3(mm)　空隙率：93.0～98.2(%)
		
A-7-1～A-7-4　（ヘチマ-熔着） 厚さ：25.9～28.0(mm)　空隙率：92.5～97.9(%)	A-8-1～A-8-2　（ネット-袋詰め） 厚さ：44.7～46.3(mm)　空隙率：97.3～98.1(%)	A-9-1～A-9-4　（ヘチマ-熔着） 厚さ：31.1～35.0(mm)　空隙率：94.4～97.5(%)
		
B-1-1～B-1-4　（ヘチマ-接着） 厚さ：60.5～65.5(mm)　空隙率：91.3～97.4(%)	B-2-1～B-2-4　（ヘチマ-接着） 厚さ：58.0～64.4(mm)　空隙率：92.5～97.5(%)	B-3-1～B-3-3　（ヘチマ-接着） 厚さ：54.9～66..3(mm)　空隙率：91.9～96.4(%)
		

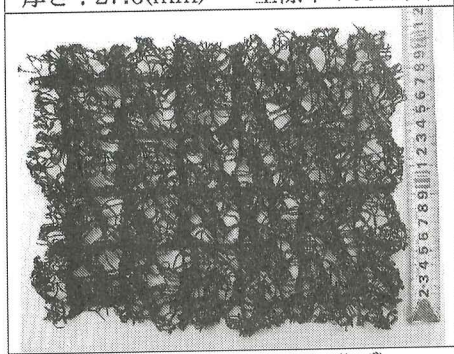
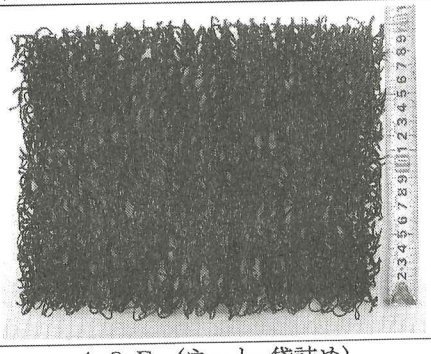
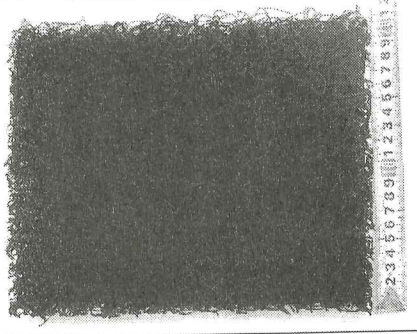
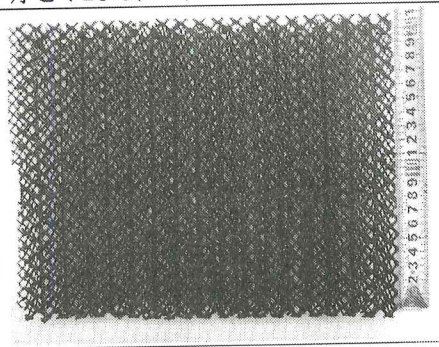
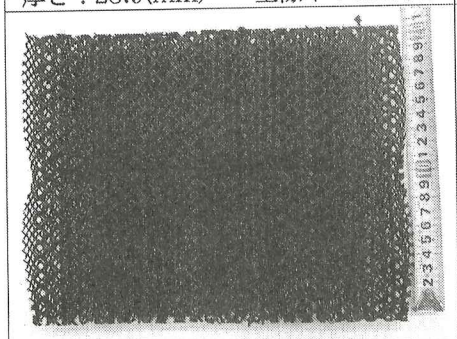
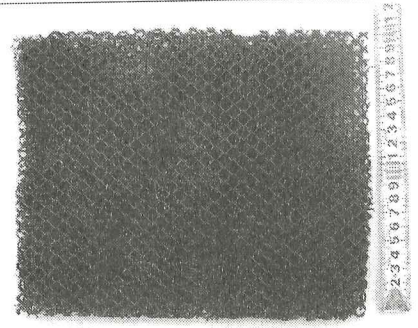
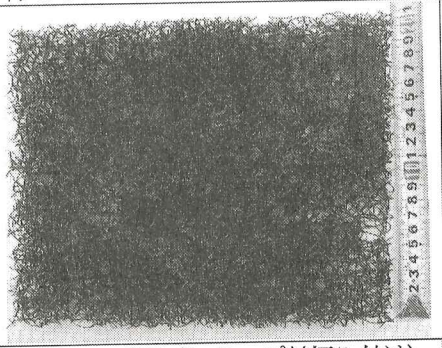
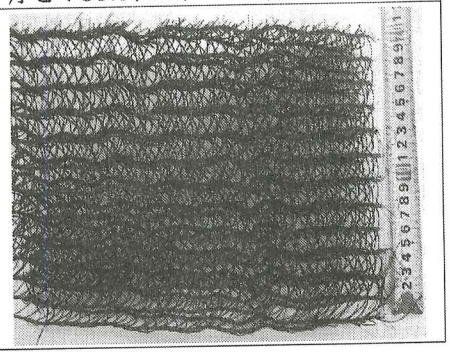
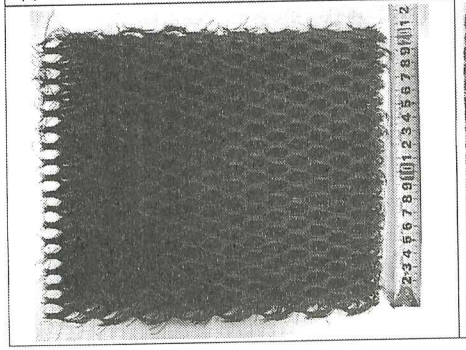
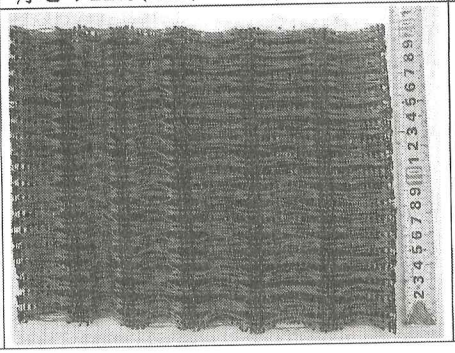
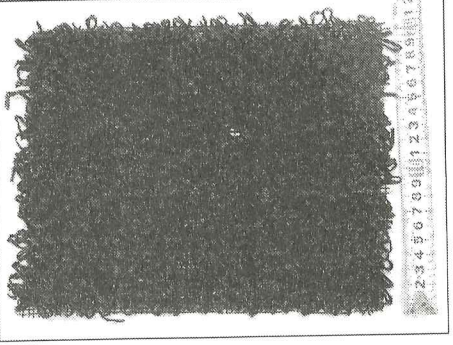
写真－2.1(2)　プロトタイプの分類と概観

C-1-1～C-1-2　(編み物-直線) 厚さ：32.6～33.9(mm)　空隙率：95.2～97.1(%)	C-2-1～C-2-2　(編み物-ハニカム) 厚さ：22.1～22.3(mm)　空隙率：95.5～96.4(%)	C-3-1～C-3-4 厚さ：25.9～30.0(mm)　空隙率：94.9～98.4(%)
		
D-1-1～D-1-6　(織物-波形) 厚さ：23.1～29.7(mm)　空隙率：97.1～98.3(%)	D-2　(織物-波形) 厚さ：23.1(mm)　空隙率：97.1(%)	D-3-1～D-3-4　(織物-テープ材編み付け) 厚さ：10.7～14.1(mm)　空隙率：94.4～98.1(%)
		
A-1(B)　(ヘチマ-熔着) 厚さ：30.0(mm)　空隙率：97.4(%)	A-1(B 改)　(ヘチマ-熔着) 厚さ：17.6(mm)　空隙率：94.9(%)	A-1(A)　(ヘチマ-熔着) 厚さ：33.6(mm)　空隙率：95.9(%)	A-1(特 A-2)　(ヘチマ-熔着) 厚さ：34.0(mm)　空隙率：92.2(%)
			
A-1(特 A-3)　(ヘチマ-熔着) 厚さ：37.1(mm)　空隙率：92.8(%)	A-2(改)　(ヘチマ-熔着) 厚さ：15.5(mm)　空隙率：88.9(%)	A-3-5　(ヘチマ-熔着) 厚さ：25.1(mm)　空隙率：93.4(%)	A-3-8　(ヘチマ-熔着) 厚さ：31.6(mm)　空隙率：94.4(%)
			

写真－2.1(3)　プロトタイプの分類と概観

A-4-2a （ネット-折り曲げ）	A-4-2b （ネット-折り曲げ）	A-4-4a （ネット-折り曲げ）	A-4-4b （ネット-折り曲げ）
厚さ：23.7(mm)　空隙率：94.4(%)	厚さ：27.1(mm)　空隙率：95.1(%)	厚さ：29.0(mm)　空隙率：92.4(%)	厚さ：28.0(mm)　空隙率：92.0(%)
			
A-6 （ヘチマ-熔着）	A-8-3 （ネット-袋詰め）	A-8-4 （ネット-袋詰め）	B-A1 （ヘチマ-接着）
厚さ：24.6(mm)　空隙率：91.9(%)	厚さ：23.1(mm)　空隙率：94.8(%)	厚さ：13.6(mm)　空隙率：93.9(%)	厚さ：25.4(mm)　空隙率：94.2(%)
			
B-A2 （ヘチマ-接着）	B-B （ヘチマ-接着）	C-1(改) （編み物-直線）	C-3-5 （編み物-ハニカム）
厚さ：29.7(mm)　空隙率：97.1(%)	厚さ：18.1(mm)　空隙率：94.0(%)	厚さ：29.1(mm)　空隙率：96.0(%)	厚さ：20.7(mm)　空隙率：96.5(%)
			
C-3-6 （編み物-ハニカム）	C-3-7 （編み物-ハニカム）	D-3(1) （織物-テープ材編み付け）	D-3(2) （織物-テープ材編み付け）
厚さ：25.0(mm)　空隙率：97.3(%)	厚さ：22.7(mm)　空隙率：97.4(%)	厚さ：16.8(mm)　空隙率：93.9(%)	厚さ：14.3(mm)　空隙率：93.0(%)
			

写真－2.1(4)　プロトタイプの分類と概観

A-1-F （ヘチマ-熔着）	A-2-F （ヘチマ-熔着）	A-3-F （ヘチマ-熔着）	A-4-3F （ネット-折り曲げ）
厚さ：27.6(mm)　空隙率：95.5(%)	厚さ：26.2(mm)　空隙率：92.6(%)	厚さ：26.8(mm)　空隙率：92.5(%)	厚さ：23.6(mm)　空隙率：95.2(%)
			
A-4-5F （ネット-折り曲げ）	A-8-F （ネット-袋詰め）	B-F （ヘチマ-接着）	C-1-F （編み物-直線）
厚さ：28.9(mm)　空隙率：92.6(%)	厚さ：17.0(mm)　空隙率：89.9(%)	厚さ：38.9(mm)　空隙率：97.3(%)	厚さ：35.0(mm)　空隙率：98.2(%)
			
C-3-F （編み物-ハニカム）	D-1-F （編み物-直線）	D-3-F （編み物-テープ材編み付け）	
厚さ：32.1(mm)　空隙率：96.2(%)	厚さ：22.9(mm)　空隙率：95.9(%)	厚さ：12.9(mm)　空隙率：91.1(%)	
			

表−2.3　シートのプロトタイプの分類と諸元

タイプ		プロトタイプの世代	シート名	構成材経 (mm)	比重	厚さ (mm)	目付 (gf/m2)	空隙率 (%)	主素材
大区分	小区分								
ヘチマタイプ	熔着タイプ	第一次	A-1-1	0.75	0.912	12.2	273.6	97.54	PP
			A-1-2	0.75	0.912	12.2	281.4	97.47	PP
			A-1-3	0.75	0.912	12.3	446.9	96.02	PP
			A-1-4	0.75	0.912	13.2	747.6	93.79	PP
			A-2-1	0.36	1.334	29.6	707.0	98.21	PET
			A-2-2	0.41	1.334	29.4	935.1	97.62	PET
			A-2-3	0.46	1.334	32.1	1426.0	96.67	PET
			A-2-4	0.49	1.334	33.5	2344.8	94.75	PET
			A-3-1	0.60	0.899	17.7	350.8	97.80	PP
			A-3-2	0.60	0.899	22.9	527.5	97.44	PP
			A-3-3	0.60	0.899	22.1	909.6	95.42	PP
			A-3-4	0.60	0.899	24.4	1255.5	94.28	PP
			A-6-1	0.72	0.920	27.3	454.2	98.19	PP
			A-6-2	0.72	0.920	27.2	474.2	98.11	PP
			A-6-3	0.72	0.920	27.0	1240.8	95.00	PP
			A-6-4	0.72	0.920	26.4	1697.5	93.01	PP
			A-7-1	1.10	0.898	25.9	495.8	97.87	PP
			A-7-2	1.10	0.898	27.0	583.3	97.59	PP
			A-7-3	1.10	0.898	28.0	1229.2	95.11	PP
			A-7-4	1.10	0.898	28.0	1883.3	92.51	PP
			A-9-1	0.85	0.926	31.1	734.2	97.45	PP
			A-9-2	0.85	0.926	32.2	953.3	96.80	PP
			A-9-3	0.85	0.926	32.9	1049.2	96.56	PP
			A-9-4	0.85	0.926	35.0	1831.7	94.35	PP
	接着タイプ		B-1-1	0.29	1.591	61.4	2558.3	97.38	PVDC
			B-1-2	0.29	1.591	65.9	3082.5	97.06	PVDC
			B-1-3	0.29	1.591	60.5	5032.5	94.77	PVDC
			B-1-4	0.29	1.591	60.8	8398.3	91.32	PVDC
			B-2-1	0.58	1.591	58.0	2300.0	97.51	PVDC
			B-2-2	0.58	1.591	63.6	3155.8	96.88	PVDC
			B-2-3	0.58	1.591	59.5	4721.7	95.01	PVDC
			B-2-4	0.58	1.591	64.4	7698.3	92.49	PVDC
			B-3-1	0.91	1.591	66.3	3789.2	96.41	PVDC
			B-3-2	0.91	1.591	54.9	5049.2	94.22	PVDC
			B-3-3	0.91	1.591	60.7	7813.3	91.91	PVDC
	熔着タイプ	第二次	A-1(B)	0.57	0.870	30.0	691.1	97.35	PP+PET
			A-1(B改)	0.57	0.864	17.6	772.9	94.92	PP+PET
			A-1(A)	0.57	0.848	33.6	1179.6	95.86	PP+PET
			A-1(特A-2)	0.70	0.834	34.0	2225.8	92.15	PP+PET
			A-1(特A-3)	0.70	0.834	37.1	2243.9	92.75	PP+PET
			A-2 (改)	0.61	1.328	15.5	2286.3	88.89	PET
			A-3-5	0.58	0.905	25.1	1500.4	93.39	PP+ｴﾗｽﾄﾏｰ
			A-3-8	0.80	0.897	31.6	1575.8	94.44	PP+ｴﾗｽﾄﾏｰ
			A-6	0.92	0.909	24.6	1802.8	91.94	PP+ｴﾗｽﾄﾏｰ
	接着タイプ		B-A1	0.63	1.610	25.4	2380.3	94.18	PVDC
			B-A2	0.57	1.646	29.7	1405.5	97.12	PVDC
			B-B	0.46	1.656	18.1	1790.7	94.03	PVDC
	熔着タイプ	第三次	A-1-F	0.77	0.954	27.3	1164.8	95.53	PE+PET
			A-2-F	1.08	1.325	26.2	2576.6	92.58	PET
			A-3-F	0.68	0.927	26.8	1876.7	92.45	PP+ｴﾗｽﾄﾏｰ
	接着タイプ		B-F	0.62	1.574	38.9	1667.7	97.28	PVDC

タイプ		プロトタイプの世代	シート名	構成材経 (mm)	比重	厚さ (mm)	目付 (gf/m2)	空隙率 (%)	主素材
大区分	小区分								
ネットタイプ	織り曲げタイプ	第一次	A-4-1	0.60	0.924	24.0	412.5	98.14	PP
			A-4-2	0.68	0.924	28.1	805.8	96.90	PP
			A-4-3	0.66	0.924	30.1	1288.3	95.37	PP
			A-4-4	0.82	0.924	25.8	439.2	98.16	PP
			A-4-5	0.89	0.924	28.6	795.8	96.99	PP
			A-4-6	0.88	0.924	30.3	1262.5	95.49	PP
			A-5	0.65	0.867	30.0	633.3	97.57	PE
	袋詰めタイプ		A-8-1	0.25	0.897	44.7	763.9	98.09	PP
			A-8-2	0.25	0.897	46.3	1111.4	97.32	PP
	織り曲げタイプ	第二次	A-4-2a	1.02	0.895	23.7	1194.0	94.37	PP+ｴﾗｽﾄﾏｰ
			A-4-2b	1.02	0.895	27.1	1183.7	95.12	PP+ｴﾗｽﾄﾏｰ
			A-4-4a	1.25	0.904	29.0	2005.8	92.35	PP+ｴﾗｽﾄﾏｰ
			A-4-4b	1.25	0.904	28.0	2038.5	91.95	PP+ｴﾗｽﾄﾏｰ
	袋詰めタイプ		A-8-3	0.37	0.979	23.1	1175.4	94.80	PP
			A-8-4	0.30	0.924	13.6	765.4	93.91	PP
	織り曲げタイプ	第三次	A-4-3F	0.97	0.946	23.6	1067.5	95.22	PP+ｴﾗｽﾄﾏｰ
			A-4-5F	0.97	0.946	28.9	2027.5	92.58	PP+ｴﾗｽﾄﾏｰ
	袋詰めタイプ		A-8-F	0.36	0.836	17.0	1433.4	89.91	PP
編み物タイプ	直線タイプ	第一次	C-1-1	0.25	0.860	32.6	804.0	97.13	PP
			C-1-2	0.25	0.860	33.9	1398.1	95.20	PP
	ハニカムタイプ		C-2-1	0.32	1.280	22.1	1014.9	96.41	PET
			C-2-2	0.32	1.280	22.3	1283.0	95.51	PET
			C-3-1	0.32	1.391	30.0	678.1	98.38	PET
			C-3-2	0.32	1.391	25.9	937.5	97.40	PET
			C-3-3	0.32	1.391	26.3	1162.5	96.82	PET
			C-3-4	0.32	1.391	26.8	1896.7	94.91	PET
	直線タイプ	第二次	C-1（改）	1.02	0.959	29.1	1113.3	96.01	PP
	ハニカムタイプ		C-3-5	0.33	1.456	20.7	1067.0	96.46	PET
			C-3-6	0.33	1.475	25.0	1008.2	97.27	PET
			C-3-7	0.33	1.438	22.7	844.6	97.41	PET
	直線タイプ	第三次	C-1-F	0.29	1.372	35.0	858.2	98.21	PET
	ハニカムタイプ		C-3-F	0.30	1.391	32.1	1698.6	96.20	PET
織物タイプ	波形タイプ	第一次	D-1-1	0.50	0.935	23.1	427.4	98.02	PP(+PET)
			D-1-2	0.50	0.913	24.4	630.2	97.17	PP(+PET)
			D-1-3	0.50	0.928	29.7	475.2	98.28	PP(+PET)
			D-1-4	0.50	0.908	29.0	660.6	97.49	PP(+PET)
			D-1-5	0.50	0.933	25.9	426.3	98.24	PP(+PET)
			D-1-6	0.50	0.907	25.7	601.2	97.42	PP(+PET)
			D-2	0.35	1.385	23.1	939.0	97.07	PET
	テープ材編み付けタイプ		D-3-1	0.80	0.835	10.7	171.0	98.09	PP
			D-3-2	1.10	0.807	12.5	320.3	96.82	PP
			D-3-3	2.10	0.798	13.0	442.7	95.73	PP
			D-3-4	3.00	0.792	14.1	631.0	94.35	PP
		第二次	D-3(1)	2.38	0.690	16.8	710.9	93.87	PP
			D-3(2)	1.76	0.691	14.3	689.5	93.02	PP
	波形タイプ	第三次	D-1-F	0.58	1.001	22.9	939.4	95.90	PP(+PET)
	テープ材編み付けタイプ		D-3-F	1.89	0.608	12.9	701.0	91.07	PP+PE

注)第一次では、シート厚さと構成材経はノギスによって測定した。
素材の凡例)PP:ポリプロピレン、PE:ポリエチレン、PET:ポリエステル、PVDCポリ塩化ビニリデン
準主素材は括弧書きとした

第3章　シートの侵食防止効果

侵食防止シートは，侵食外力(すなわち掃流力)を侵食発生限界(限界掃流力)以下まで低減させるという機構で，侵食防止効果を発揮する(1.4.2参照)。したがって，より大きな侵食外力が作用する場所に用いるシートは，掃流力の低減効果がより大きくなるようにシート諸元(構成材の太さ，空隙率，厚さなど)を調節したものでなければならない。シートを製造する立場からは，開発目標とした最大外力（例えば水深方向の平均流速で表される)まで適用が可能なようにシート諸元を設計できることが望まれる。本章では，流れおよび侵食に関する力学的知見に基づいたモデルによる解析と実験を併用することで，シート諸元と関連づけて侵食防止効果が評価できる手法を提案する。

まず，シートによる侵食外力低減効果の評価法を開発するにあたっての基本的考え方を示す(3.1参照)。次に，評価に用いるモデルの数式とパラメータの実験による調節法を示した後(3.2～3.4参照)，それらの知見を整理してシートの限界流速の評価法をとりまとめるとともに，第3次シートに対する評価結果を示す(3.5参照)。

3.1　評価法の基本的考え方と枠組み

本節では，評価法を提案する際に前提とした条件と考え方を整理するとともに，評価法として侵食実験と流れ場の予測モデルを併用することに至った理由をまとめて示す。

3.1.1　シート敷設状況の想定とその評価法での位置づけ

評価対象として想定したシート敷設状況は，重ね部や損傷箇所などがない一様均質なシートが，植生が繁茂していない平坦な裸地面に密着した状態とした。裸地面という想定は，シート上に植物を繁茂させて使用するとしたシート工法の適用条件（1.4.3参照）と相反するものである。つまりこの想定は実際の使用状況を再現したものではなく，1.3.1に示した本質的な課題，すなわち一見すると一様な繁茂状況である植物群落のなかに存在する部分的な裸地，またはそれに近い繁茂不良箇所などの侵食弱点箇所における侵食防止について検討するための仮想的な状況である。侵食弱点箇所となる場所はごく限られた範囲であり，その周囲に繁茂する植物によって地表面近傍の流速はある程度低減されると考えられる（当然であるが一様に繁茂している場所に比べると流速の低減効果は小さい)。しかし侵食弱点箇所の大きさは一定したものでなく，土壌条件やモグラなど動物の掘削の有無などの条件に応じて多様に変化するため，その最大値ですらも特定しがたいのが現状である。したがって，上記の検討にあたっては，周囲に繁茂する植物の流速低減効果を考慮しないため安全側の評価結果となる「全面的に裸地である」という仮想状況を想定することとした。このような想定は，堤防のり面において草刈りによって一時的に葉茎がほとんどない（裸地に近い）状態で出水が生じたという場合が生じうることを考えると，安全側に偏りすぎた想定では必ずしも無い。なお，シートの重ね部や切断部など非一様な場所での侵食防止については，第4章において実験的に検討を加え，一様均一なシートと同等な侵食防止効果が発揮される条件を明らかにする。したがって，シートの侵食耐力は，上記の想定に基づいて本章で提案する手法によって評価されると考えて良い。

3.1.2　評価対象とする侵食防止効果の定義(シート厚さを決める考え方)

シートの侵食防止効果は，図－1.7に模式的に示したように植生と同様の機構によって発揮される。そのため，シート厚さより侵食深が小さい範囲では，植生の場合と同様に図－1.3に模式的に示したように，侵食深の増加に伴って侵食速度が減少し，地表面に作用する掃流力が限界掃流力以下まで低減される侵食深(最小必要厚さ)に達すると侵食が進まなくなる。これらの特徴を考慮すると，あるハイドログラフで与えられた出水を設計外力とする場合に，シートによる侵食防止の仕方として次の２種類が考えられる。

１）ピーク流量（厳密にはのり面に作用する侵食外力が最大になる流量）と同一の一定流量が流下すると想定した際に生じうる最大侵食深を最小必要厚さ t_c として，それよりシート厚さ t を大きくする。（掃流力の大きさでシート厚が決まる）

２）ハイドログラフの一波分が流下し終わるまでに生じうる侵食深を最小必要厚さ t_c として，それよりシート厚さ t を大きくする。(掃流力とその作用時間でシート厚が決まる)

１)は護岸ブロックと，2)は植生の耐侵食力の評価(図－1.5参照)と同様な考え方である。また，1)に比べ２）のほうがシートを薄くすることが可能である。しかし，2)ではシートに土砂が完全に充填されている状況をスタートとして想定しているので，そのような想定の必要がないという点で，1)のほうが侵食防止の確実性・安全性が優れていると考えられる。このような長所・短所を考慮して１），2)のどちらを採用するかは，シートの侵食防止に関わる設計の基本的考え方として決めるべきものである。本研究では，地表近傍に埋設するシートではあるが，思わぬ理由で露出することをあらかじめ考慮しておくこととしている(2.2参照)。そのような前提に基づくと，1)の考え方でシート厚さを設定するのが適切と判断される。他の各種侵食防止工との比較検討を容易にすることも考慮すると，侵食防止シートの基本的考え方として１)を用いるのが妥当と考えられる。

3.1.3　侵食防止効果を表す指標と充填土砂の耐侵食力の評価

シートの侵食防止効果は，水深方向に平均した流速(以下，代表流速と呼ぶ)を侵食外力を表す指標として用い，3.1.2に示した考え方で侵食防止が可能な最大流速(以下，限界流速と呼ぶ)として表すこととした。そうすることによって，既存の護岸設計手法[1),2)]において代表流速を用いた具体的な設計フローが提案されており，シートもこれに倣って設計する（設計外力として代表流速を求め，その値より大きい限界流速であるシートを選定する）ことができる。したがって，侵食防止効果の評価とは，具体的には限界流速を求めることとなる。

侵食防止効果は，シート自体が発揮する流速低減効果と充填する土砂の耐侵食力によって決まる。細粒分（粒径0.075mm 以下）が含まれる充填土砂は，粘着力が発揮されるため耐侵食力に優れているので，侵食防止効果の向上に役立つ。第５章に示すようにシートへの土砂充填工法を考案する際，細粒分が含有される土砂(砂質土：細粒分の含有率15～50%)も充填が容易にできるように工夫を加えたのは，耐侵食力の高い土砂を充填することによって侵食防止効果を少しでも向上できるようにするためである。その向上効果も反映して限界流速を評価できるようにすることが，評価手法を提案する上での重要な課題の一つである。

その課題への取り組み方としては，現状の技術的水準でもって無理なく実現可能であるとともに，評価した限界流速以下の代表流速では余裕を持って安全に侵食防止が行えるようにすることを最大優先すると

の基本的考え方に基づいて，「現地で生じうる耐侵食力の下限値に近い一定値」に充填土砂の耐侵食力を設定して，限界流速を評価することにした。その理由は，1)土砂の耐侵食力を設計項目の一つとして設計値を求めてみても，その設計値を確保できるように土質をコントロール・維持する実用的技術が現状では確立されていない，2)しかしながら第5章に示す土砂充填工法によって発揮することが十分可能である耐侵食力の下限値を過去の研究事例(例えば参考文献3))に基づき見きわめ，その値をもって「現地で想定しうる耐侵食力の範囲の下限値に近い一定値」と設定することは可能と考えたためである。

3.1.4　侵食実験と流れ場の予測モデルを併用した評価手法の枠組み

限界流速を評価する最も明解かつ確かな手法は，3.1.1で想定した状況のとおりにシートを実際に敷設して実施する実大規模の(つまり土砂の耐侵食力と流速を現地と同程度にした)侵食実験である。その手法が「確か」となる前提条件の一つとして，同一と見なせる程度に実験条件のばらつきが抑えられる再現性を確保できることが挙げられる。しかし，3.1.3にも示したようにシート内に充填する土砂の耐侵食力を実大規模実験においても常に一定とできる技術が不十分であるため，再現性が確保できない。そのため，例えば設定した下限値より大きな耐侵食力での実験となったことに気付かずに侵食防止効果を評価した場合には，限界流速を過大に見積もってしまう危険側の結果が生じうる，すなわち評価結果の信頼性が失われてしまう懸念がある。

その解決策として，現状の技術でもって耐侵食力の再現性が確保できる非粘着性の土砂を実験に用いることとし，それより耐侵食力が大きい粘着力のある土砂を充填した場合については，上記の実験結果を良好に再現しうる力学モデルを用いて評価することが考えられる。この場合では，モデルの予測精度が評価結果の信頼性確保に直結するが，それさえクリアできれば下記のようなメリットも得られる。

●シート諸元設計の容易化

シート製作にあたっては，開発目標とした侵食防止効果を発揮できるようにシート諸元をあらかじめ設定しなければならない。侵食実験のみを用いた評価法であると，新たなシートの開発段階で様々な諸元を有するシートを試作して，それらについて系統的に複数種の実験ケースを行わなければならない。そのような試行錯誤の労力を減少させ，合理的にシート諸元の設定範囲を狭めることが，モデルを併用することによって可能となる。

なお，モデルを利用するにあたっては，シートの流速低減効果(透過係数とカルマン定数：3.2，3.3参照)や，充填土砂の侵食限界(侵食が生じないと見なせる最大外力＝限界掃流力:3.1.5，3.4参照)に関わるパラメータを設定しなければならない。これらのパラメータがシート諸元，土質，水理量などに応じて変化する状況を精度良く数式化でき，かつモデル自体が実際の侵食現象を良好に表現できるもので有れば，モデルのみによって限界流速の評価が可能であり，実験を行う必要はない。しかし，本研究ではそのようなモデルを開発するまでには至らず，またパラメータとシート諸元の関係においても実験によってのみ明らかにできる部分が残された。したがって，侵食実験とモデルを併用しなければ評価できない。そのような技術的現状であっても，今回の研究で様々な実験を行ったシートおよびそれらにシート構造が似ていると思われるシートで有れば，パラメータの概略設定が可能である。また，全く新規のシートであっても，比較的簡易な実験によってパラメータの設定が行えるように工夫をした(3.5参照)。そのため実験のみに比べれば容易に，シート諸元の概略設計が行えるであろう。

●水深および水面(動水)勾配の変化を考慮した限界流速の設定

侵食実験に用いた水路は，幅１ m，高さ0.8m の矩形管水路であり，断面平均流速で最大５(m/s) 程度の通水が可能である。流速のみに着目すると，開発目標とした限界流速４(m/s) (2.2.1(1)参照) 以上の通水が可能なことから，実大スケールの実験が可能である。しかし，シートの適用主対象と想定したセグメント２～３(2.2.1(1)参照)の出水時に生じうる最大(設計対象)水深に比べて水深が非常に小さい水路では，同一の流速で比べると水路のほうが侵食が発生しやすい条件となっている。まず，対数則に代表される粗面上(本研究の場合ではシート上)での流速分布に関する知見によると，侵食の発生に直接関与する地面近傍流速が水深が小さいほど代表流速に近い値となる。つまり，同一の代表流速であっても水深が小さい侵食実験のほうが地面近傍流速が大きくなるため，侵食が発生しやすいと言える[4]。さらにシートの場合には，動水勾配に伴って地面近傍流速が増加する(詳細については3.2，3.3参照)。上記の管水路を用いた実験では，動水勾配（実河川を含む開水路の場合の水面勾配に相当する）が流速１(m/s) で約1/660，1.5(m/s)で約1/330，2(m/s)で約1/190となるため，流速２(m/s)以上での実験はセグメント２～３での最大勾配(約1/400)を大きく上回る。

以上の理由により，水深と動水勾配に関わる実験水路の制約のため，侵食実験では限界流速を過小に評価する懸念がある。モデルを併用することによって，水深と動水勾配を適用主対象と想定したセグメント２～３で生じる条件に合わせて，各種シートの限界流速を補正することができる。

3.1.5　限界掃流力の設定(組織的渦による吸い出し現象)

モデルの予測精度および信頼性を確保するにあたって最も重要なのが，地面の侵食が発生しない侵食外力の最大値，すなわち限界掃流力の設定である。この値の大小によってシートの最小必要厚さが変化する。この値については，土砂のみが水路床上に敷き詰めてあり，シートなどの流れを乱す他の物体がない場合について，一般的な評価法が提案されている（例えば参考文献３)，5))。しかし，シートのようにその存在によって特徴的な乱れ(組織的乱流)が発生する流れ場の場合には，上記によって求められる限界掃流力とは異なると考えられている。したがって，シート特有の乱れに応じて限界掃流力を設定する必要がある。その方法については，現象観察結果に基づいて，以下のように定めることとした。

シート上面まで砂を充填した状態をスタートとして断面平均流速が1.5(m/s)以上で侵食実験を行うと，次の侵食現象が明瞭に観察できた（実験の詳細については3.4参照)。まず通水初期では，砂がシートフロー状に激しく流送される。この状態ではシートが砂面から僅かしか露出していない。侵食の進行に伴ってシートが露出してくると流砂量が減少する。すると，砂が周期的に巻き上げられる現象が確認できるようになる。巻き上げ現象の素過程は，1)あるまとまった範囲の砂面から砂が上方に急激に巻き上げられ，2)そのうち一部は沈降して砂面に戻るが，3) シート表面から抜け出したものはシート上の高流速中を浮遊した状態で流送されるというようにまとめることができる。シートの露出厚さや断面平均流速などによっても変化するが，１m 四方程度の範囲を観察していると２～５秒程度の周期で巻き上げられることが多いように思われた。その後，シートの露出厚さが大きくなると，一度に巻き上げられる量が減少するとともに，シート表面から抜け出す量も減少してくる。また，巻き上げも周期的というより間欠的に発生するようになる。さらに露出すると，明確な巻き上げが確認できなくなり，その代わり砂が間欠的に掃流される場所がパッチ状に見られるようになる。

以上の侵食現象は，既往の流砂に関する力学的な知見とシートの掃流力低減効果を考慮すると以下のよ

うに説明できる。シートの露出厚さが大きくなるに伴って，図－1.7に示したように掃流力がより低減されるが，砂面に作用する掃流力は移動限界を上回っており，そのため流砂量は減少するもののとぎれることなく砂が流送される。ここまで至る過程で約２～５秒周期の組織的渦（シート上の速い流れがシート内に入り込む，またはその逆を繰り返す渦のような流れ）が発生する[6),7)]ようになり，その組織的渦による乱れにより，周期的な砂の巻き上げが生じたと考えられる。さらに侵食が進行すると，砂面近傍での組織的渦による乱れの強さが指数関数的に減少する[7)]ため，巻き上げ量（つまり侵食速度）が減少するとともに，巻き上げの発生が間欠的になると考えられる。そして，組織的渦の一周期より長い時間で平均した掃流力が上記した一般的手法で評価できる限界掃流力以下となると，組織的渦の通過に伴って掃流力が増加した瞬間にのみ掃流されるようになるため，間欠的な掃流現象が表れると推察される。

以上の現象をシートに被覆された場合の限界掃流力の設定法を検討する観点から見ると，組織的渦による侵食現象を考慮する必要性があり，具体的には一般的手法で求められる限界掃流力を，組織的渦による巻き上げが生じない程度まで割り引く必要があると考えられる。この割引率はシートの構成材の配列などによって決まるシート空隙内の乱れの強さによっても変化すると考えられる。モデルではそのような乱れまで再現するのが困難なため，実際に侵食実験を行って割引率の推定を行うこととする。

3.1.6　限界流速の評価法のまとめ

本研究で提案する評価法は，代表流速とシートの最小必要厚さの関係をシートの諸元（シートの構造，構成材の太さ，空隙率など）から求められるものとする。また充填する土砂の耐侵食力には，砂質土が発揮すると推定される下限値を与えて上記の評価を行う。評価にあたっては，実験とモデルを併用する。実験によって流れの予測に必要なパラメータとシート諸元の関係を明らかにするとともに，限界掃流力の割引率を明らかにする。これらをモデルに代入するとともに，実河川の出水時に生じうる水理量と砂質土の耐侵食力などの実際の条件を与えて計算を行い，その条件と異なる条件でしか実施できなかった侵食実験から求めた限界流速に補正を加えるものとする。

3.2　シート内外の流れ場のモデル

シートの侵食防止効果は，地表面に作用する侵食外力（せん断応力，それを一般に掃流力と呼ぶ）が侵食発生限界（限界掃流力と呼ぶ）以下となった状態で発揮されると考えられる。したがって，限界流速の評価に用いる流れ場のモデルには，地面に作用する掃流力 τ_b を精度良くかつ力学的にも十分な妥当性を持って（汎用性を確保して）推定できることが求められる。今回の研究では，地表面近傍の局所的な流れ場について力学的に矛盾のないモデルを開発するに至らず，近似的な手法を用いている。本節では，その近似的取り扱いに重点を置いて提案する流れ場の予測モデルについて説明するとともに，そのような取り扱いでも本研究の目的に十分適うことについて検討した結果を示す。

3.2.1　既往研究の概要と本研究の特徴

本研究は，床面上に「浸透性を有する多孔質体」が設置された流れ場を対象として，特に抵抗則および掃流力の予測が行えるモデルの開発を目指したものである。本研究と同様な焦点で行われている代表的な既往研究について，概要を以下にまとめて示す。

まず抵抗則の観点からは，地表面上に草本植物が繁茂する水路や河道の粗度係数に関する研究が挙げられる。それに関する初期の代表的な研究の一例として，植物の種類とその状態（草丈，草刈りの有無，枯れているかなど）ごとにマニングの粗度係数 n と V·R（ここで V は断面平均流速，R は径深）の関係として整理している Ree ほか[8]の研究が挙げられる。この段階では，水路の断面設計に用いる粗度係数の経験的予測手法をとりまとめるに留まっており，流れ場の詳細な特性にまで検討が至っていない。Kouwen ほか[9),10)]は，流れを受けると変形する草本植物を模擬した粗度要素を水路床に設置した実験を行い，粗度要素の変形状態に着目して，粗度係数の変化特性についてまとめている。すなわち，粗度要素上の流速分布が対数則で近似できること，さらに対数則に基づいた抵抗則である式（3.1）の係数 C_1，C_2が粗度要素の変形状態（直立または倒伏した状態）によって異なることを示している。

$$\frac{U}{u_*} = C_1 \ln\left(\frac{h}{k}\right) + C_2 \qquad (3.1)$$

ここで，U は平均流速，u_* は摩擦速度，h は水深，k は流れによって変形した状態での粗度要素の高さである。Kouwen ほかの研究は，粗度要素群（多孔質体）より上部の流れ場のみを対象としているが，流速分布に関連づけて粗度係数の変化を明らかにしようと試みた初期の代表的な研究の一つと位置づけられる。また，多孔質体内については，Inoue[11]が植物群落内での気流を検討対象として，流速分布を指数関数で近似的に表せることを実験だけでなく理論的にも明らかにしている。

その後，多孔質体内部での流れ場の特性についてより詳細な検討がなされるようになった。Chu and Gelhar[12]は，多孔質体を有する流れ場の抵抗係数が著しく大きくなることについて，系統的な実験を行って増加特性を明らかにしている。中川ほか[6]は，抵抗増大の支配的要因が乱れによる多孔質体内外の運動量交換であることについて理論的に検討を加えている。上記のような流れの特性を考慮して多孔質体内の流速分布やせん断力分布といった流れ場諸量の予測モデルについて検討したものとして，日野ほか[13]，山田ほか[14]，室田ほか[15]，清水ほか[7]そして服部ほか[16]が挙げられる。これら研究の共通点として，混合距離理論に基づいた 0 次乱流モデルが採用されていることが挙げられる。また，清水ほか[17]は多孔質体内の流れにも適用可能な k − ε 乱流モデルを提案しており，0 次モデルでは検討できなかった流速分布の遷移過程についてシミュレーションを行っている。これらの研究は全て，多孔質体自体の抵抗則として流速の二乗に比例する（完全乱流）場合に限られている。本研究の対象である侵食防止シートの場合，シート内流速の 1 ～ 2 乗の範囲で変化する，いわゆる遷移域に属している（3.3参照）。そのため，抵抗が遷移～完全乱流に属する場合にも適用可能な流れ場の予測モデルが必要とされる。

清水ほか[7]，服部ほか[16]は，固定床面での抵抗を考慮しない近似的な境界条件を用いた流速およびせん断力分布の予測モデルを提案しているが，それらによると固定床面のごく近傍を除いて，多孔質体内外の流速分布が良好に予測できること（つまり抵抗則として十分な精度で流れ場の予測が可能であること）がわかっている。したがって，多孔質体自体の抵抗が固定床面での摩擦抵抗に比較して非常に大きい場合には，近似的な境界条件を用いても，壁面ごく近傍まで流速やせん断力が比較的精度良く予測でき，本研究の目的であるシートの限界流速の評価を行うには十分な近似誤差の程度内に収まると期待できる。そこで本研究では，上記の近似的境界条件を用いて掃流力 τ_b の近似値を求めることとする。この近似的取り扱いでは，地表面の粗度を考慮していないなど，実際には壁面で成立している抵抗則（掃流力と流速の関係）を厳密に満たしていないという点で，力学的な合理性が完全に満たされていない。

3.2.2　シート内外の流れのモデル

本研究では，服部ほか[16]のモデルをベースとして，多孔質体の抵抗則をシートに適合した遷移域となる場合に変更することで流れ場のモデルを得ている。ここでは，多孔質体の抵抗則が完全乱流域となる場合を対象とした服部ほか[16]のモデルについてまず説明するとともに，平均流速分布の測定結果とモデルによる予測結果の比較から，3.2.1に示した固定床面近傍での近似的取り扱いの妥当性について検討を加える。

(1)　多孔質体内でのモデルの概要と固定床面での近似的取り扱い

多孔質体の抵抗則が完全乱流領域に属する(すなわち抵抗係数が流速によらず一定値である)場合，流れ場の特徴として図－3.1に示す知見が得られており，それらは以下のように整理できる。

- 多孔質体内の流速およびレイノルズ応力の分布はほぼ相似であり，シート表面から底面に向かって減少する指数関数で近似できる。(例えば清水ほか[7])
- 多孔質体上の流速分布は対数分布で近似できる。(例えば山田ほか[14])

服部ほか[16]は上記の特徴を考慮して，以下の仮定を行った。

仮定１)多孔質体内の渦動粘性係数は水深方向に一様分布であるとする。

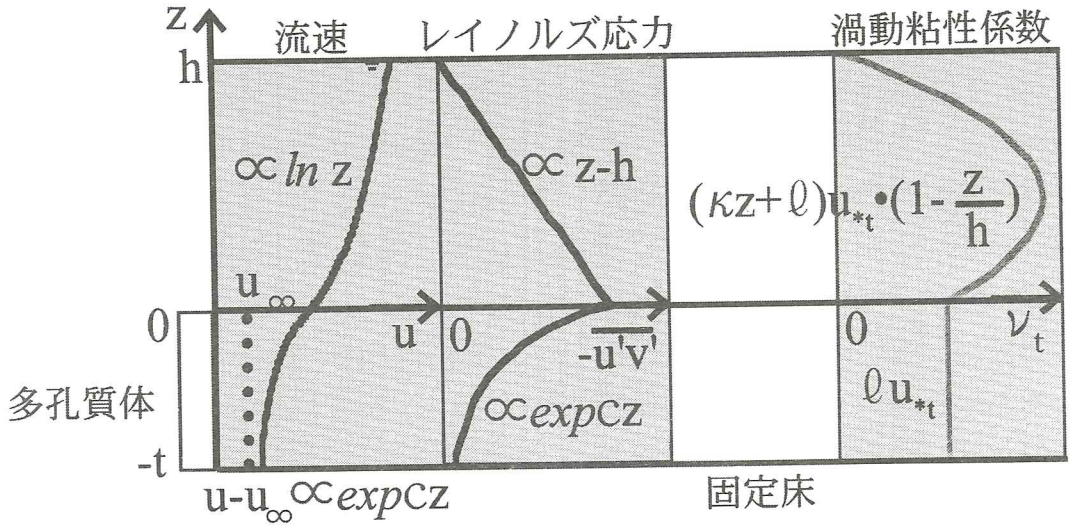
仮定２)多孔質体上では渦動粘性係数の分布形状は対数則と同一とする。

以上の仮定に基づいて，混合距離理論に基づいたモデル化を以下のように行った。まず仮定１）に基づいて，定常等流での多孔質体内の運動量保存則を式(3.2)で与える。

$$\nu_t \frac{d^2u}{dz^2} - g\left(\frac{\lambda_p}{K}\right)^2 u^2 + g\,i = 0 \tag{3.2}$$

ここで，z は多孔質体表面に原点を有する水深方向の座標軸(図－3.1参照)，u は流速，ν_t は渦動粘性係数，g は重力加速度，i は水面勾配，λ_p は空隙率，K は透過係数である。透過係数[18]は，式(3.3)に示す抵抗則で定義される多孔質体の抵抗特性を表すパラメータである。

$$\frac{K}{\lambda_p} = \frac{u}{i^{0.5}} \tag{3.3}$$



図－3.1　固定床上に多孔質体を敷設した場合での流れ場の特徴

ここで，iはエネルギー勾配である。なお，式(3.3)のように定式化する場合の流速は，着目した「点」における流速ではなく，着目した点を中心としたある大きさの空間内（多孔質体の構成材周辺の局所流れを平均化しうる代表スケール程度）の平均的な流速である（清水ほか[17]）。

渦動粘性係数は式(3.4)に示すようにモデル化する。

$$\nu_t = \ell u_{*0} \tag{3.4}$$

ここで，u_{*0}は多孔質体表面（z＝0）における摩擦速度，ℓは混合距離である。混合距離には式(3.5)として示す山田ほか[14]のモデルを用いることとした。

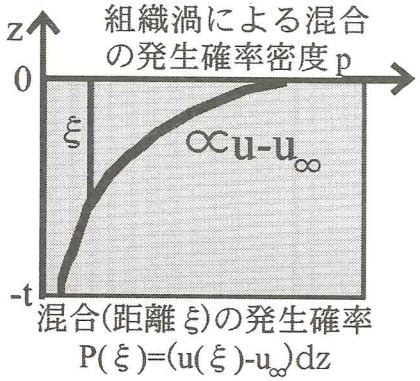
$$\frac{\ell}{\kappa} = -\beta\int_{-t}^{0} z\left(u-u_\infty\right)dz$$
$$u_\infty = \frac{K}{\lambda_p} i^{0.5} \tag{3.5}$$

ここで，κはカルマン定数，tは多孔質体の厚さ，βは式(3.6)で求められる係数である。

$$\beta^{-1} = \int_{-t}^{0}\left(u-u_\infty\right)dz \tag{3.6}$$

山田ほか[14]の混合距離モデルは，図－3.2に示すように「多孔質体表面からその内部への乱流混合が生じる確率密度分布が流速分布（$u-u_\infty$）と相似である」と仮定し，確率Pを式(3.7)で与えたことに相当する。

$$P = \beta\left(u-u_\infty\right)dz \tag{3.7}$$

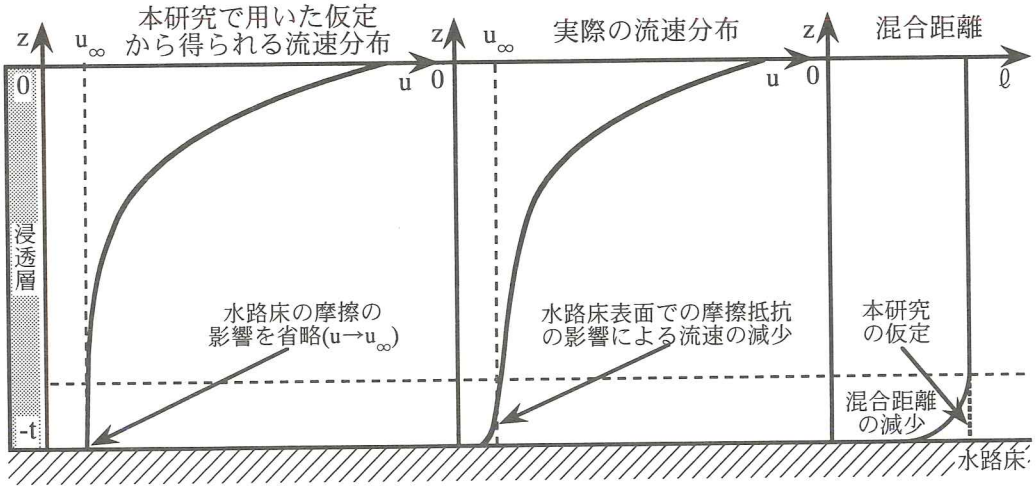


図－3.2　山田ほか[14]の混合距離の概念

混合距離ℓは，式(3.5)に示したように多孔質体表面からの距離に確率Pで重みをつけた平均距離と等しいとモデル化したことに相当する。このように本研究で用いる混合距離モデルは，多孔質体内外に渡る乱流混合現象（例えば中川[6]ほか）をイメージしたものとなっていることから，多孔質体自体の抵抗則（遷移領域であるか完全乱流領域か；より具体的にはKがuに応じて変化する変数であるか一定値であるか）に関わらず有効と期待できる（その妥当性については3.3において確認する）。

しかしながらこの混合距離モデルは，固定床面近傍に生じるせん断流れに起因する乱流混合のモデルとしては不適である。すなわち図－3.3に示すように，実際には固定床面近傍では壁面に近づくにつれて混合距離が小さくなるようであり（例えば室田ほか[15]），そのためν_tが水深方向に変化するようになるが，本研究のモデルではそのような範囲も含めてν_tを一様分布としているため，固定床近傍の流れ場を精度良く予測する（例えば，図－3.3に示すように固定床近傍で流速が壁面上流れと似た分布形状で減少する）ことができない。しかし，室田ほか[15]および清水ほか[7]による流速分布の測定結果によると，図－3.3に示したように固定床近傍の流速減少域は多孔質体の厚さに比較して小さいので，固定床の粗度を考慮しないモデルで求めた流速で十分に近似できることが期待できる（その妥当性について3.2.3において確認する）。

以上の考えに基づいて，式(3.2)～(3.6)として定式化したモデルを固定床近傍まで適用することとし，式(3.2)を積分する際に固定床面（z＝－t）における境界条件（すなわち壁面の抵抗則）に代わって，式(3.8)



図－3.3　固定床面近傍でのモデル化

に示す近似的な境界条件を用いることとする。

$$u \to u_\infty, \frac{du}{dz} \to 0 \quad (z \to -\infty) \tag{3.8}$$

以上のような近似が有効となる流れ場(図－3.3に示した固定床近傍の混合距離および流速の減少域が微少)は，以下の条件を全て満たすと考えられる。

- 式 (3.4) ～ (3.6) のようにモデル化できる多孔質体内外に渡る乱流混合が，固定床面近傍でのせん断流(図－3.3参照)によって生成される乱流混合より卓越すること。すなわち，$u=u_\infty$と見なせるような流速分布域に達しない程度まで，シート厚さが小さいこと。
- 多孔質体の抵抗が固定床面での摩擦抵抗に比較して非常に大きいこと(清水ほか[17])。

なお，固定床面の存在が流れ場に与える影響は，混合距離 ℓ のモデル式(3.5)において考慮されている。すなわち固定壁面の存在によって乱流混合のスケールが制限される（厚さにともなって混合距離も小さくなる)現象についてはモデルに組み込まれている。

Kが定数となる場合（完全乱流域での抵抗則)，式 (3.8) の境界条件を用いて式 (3.2) を積分すると，式(3.9)が得られる。

$$\begin{aligned}
u &= \frac{u_{*0}\psi_0}{\chi}\left[3\left(\frac{1+c\,e^{\alpha\eta}}{1-c\,e^{\alpha\eta}}\right)^2-2\right] \\
\eta &= \frac{z}{t} \\
\chi &= \frac{u_0}{u_\infty} = \frac{u_{*0}\psi_0}{u_\infty} \\
c &= \frac{\sqrt{\chi+2}-\sqrt{3}}{\sqrt{\chi+2}+\sqrt{3}} \\
\alpha &= \sqrt{\frac{2\chi}{\varepsilon}} \\
\varepsilon &= \frac{u_{*0}\psi_0\nu_t}{t^2 g\, i}
\end{aligned} \tag{3.9}$$

ここで，ψ_0，u_0は多孔質体表面(z＝0)における流速係数および流速である。

(2) 多孔質体上でのモデルの概要

多孔質体上(z>0)の流速分布については，仮定2)に基づいて山田ほか[14]と同様に式(3.10)で与える。

$$\frac{u}{u_{*0}} = \frac{1}{\kappa}\ln\left(\frac{\kappa z+\ell}{\ell}\right)+\psi_0 \tag{3.10}$$

ψ_0は，式(3.2)と式(3.10)より求められる多孔質体の内外におけるレイノルズ応力(=$\nu_t$du/dz)が多孔質体表面(z=0)において一致するという条件に基づいて求められる。Kが定数となる場合(完全乱流域での抵抗則)では式(3.2)の代わりに式(3.9)を用いることで，式(3.11)に示すように求められる。

$$\psi_0 = \frac{\chi t}{12\ell}\frac{(1-c)^3}{\alpha c(1+c)} \tag{3.11}$$

式(3.5)からℓ/κは，多孔質体の厚さtより必ず小さくなる。したがって，tが水深hに比較して無視しうるほど小さい場合には，式(3.10)を水深hに渡って積分することにより抵抗則が式(3.12)のように求められる。

$$\begin{aligned}\frac{U}{u_{*0}} &= \frac{1}{\kappa}\left(1+\frac{\ell}{\kappa h}\right)\ln\left(\frac{\kappa h+\ell}{\ell}\right)+\psi_0-\frac{1}{\kappa}\\ &\fallingdotseq \frac{1}{\kappa}\ln\left(\frac{\kappa h}{\ell}\right)+\psi_0-\frac{1}{\kappa}\end{aligned} \tag{3.12}$$

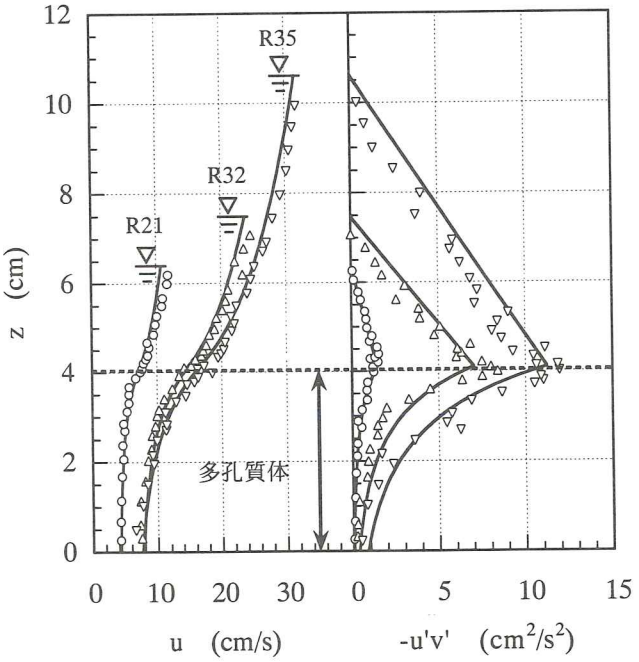
ここで，Uは代表流速である。式(3.12)は，$C_1=1/\kappa$，$C_2=\psi_0-1/\kappa$，$k=\ell/\kappa$とすれば式(3.1)に示したKouwen[9),10)]が経験的に提案した抵抗則式と同一となる。

なおκは，一般的には0.4程度となることが明らかにされているが，浸透層上流れでは0.4よりかなり小さな値となる場合があることが実験的に知られている[6),19)]。したがってκは0.4を標準とするが，実験値と比較して0.4以下の範囲で調整するパラメータとする。

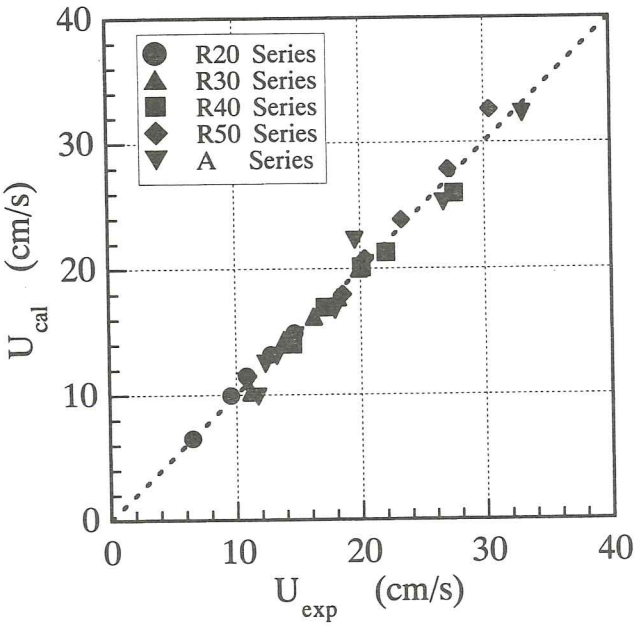
3.2.3 混合距離モデルおよび固定床近傍での近似的取り扱いの妥当性(透過係数が一定の場合)

固定床近傍での近似的取り扱いは，透過係数Kが大きくなる（多孔質体の抵抗が小さい）ほど，適用が困難になると考えられる。そこで，シートよりKが大きい多孔質体を用いた流速分布の測定結果と3.2.2に示したモデルによる計算結果を比較して，混合距離モデルと近似的取り扱いの妥当性を確認する。なお，ここではKが一定の場合のみを対象とする。その理由は，Kが変化する場合にはさらにKの予測モデルも必要となり(そのモデルは3.3に示す)，そのモデルの精度によっても流速分布の予測結果が変わるため，流速分布の比較のみからは混合距離モデルと近似的取り扱いについての妥当性が判断できなくなるためである。また，以下に示す計算結果では，全て$\kappa=0.4$としている。

まず最初に，清水ほか[7)]の実験結果と比較して，主に混合距離モデルの妥当性について検討する。清水ほか[7)]は，アクリル樹脂板を固定床としてその上に同一の高さの円柱(非変形)を格子状に立てることで多孔質体を得ている。多孔質体は2種類（AおよびRシリーズ）あり，Aシリーズでは高さ4.6cm，直径0.15cmの円柱を空隙率99.56%で，Rシリーズでは高さ4.1cm，直径0.1cm，空隙率99.22%である。清水ほか[7)]の実験結果によると透過係数KはAシリーズ：190(cm/s)，Rシリーズ：160(cm/s)と推定される。なお，これらの値はシートに比較すると少なくとも2倍以上大きい（3.3参照)。これらの多孔質体諸元を



図－3.4　流速およびレイノルズ応力分布の測定値（清水ほか[7]）と計算値の比較

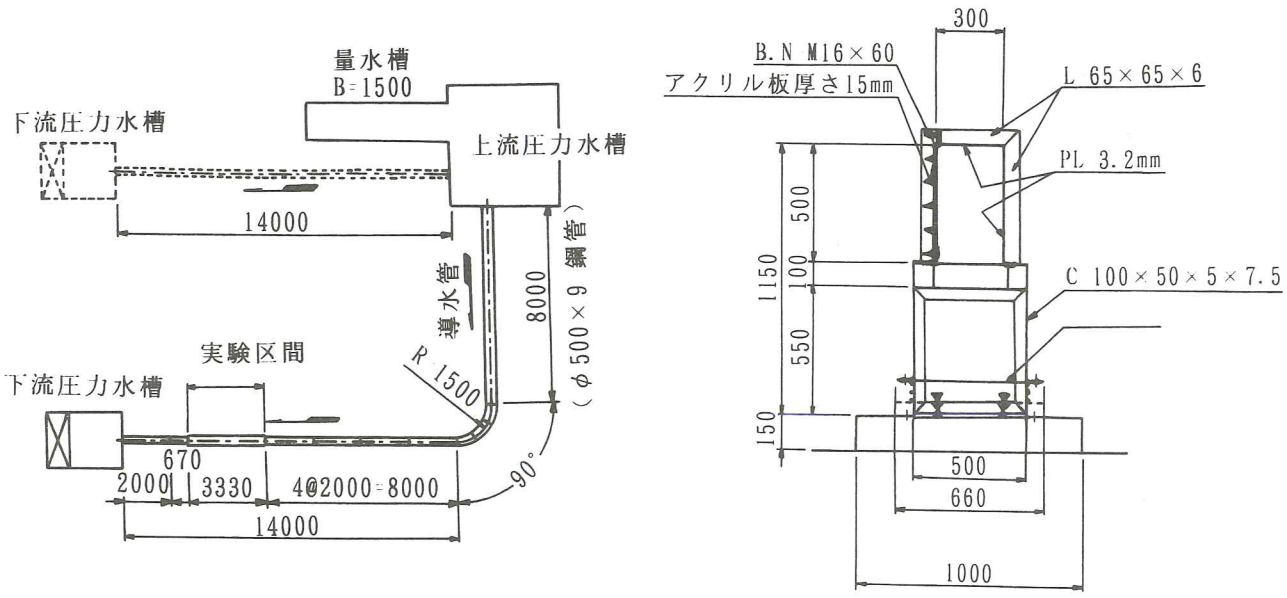


図－3.5　水深方向平均流速の測定値 U_{exp}（清水ほか[7]）とモデルによる計算値 U_{cal} の比較

式(3.9), (3.12)に代入して求めた流速およびレイノルズ応力分布の計算値と測定値とを比較した結果の一例を図－3.4に示すが，いずれのケースとも良好に一致している。また，図－3.4に示したケースを含む全てのケースについて水深方向平均流速の計算値と測定値を比較した結果を図－3.5に示す。各ケースは水深や水面勾配を系統的に変化させて行われているが，平均流速については全て非常に良好な予測結果が得られている。流速分布を示さなかった他のケースについても，図－3.5に示したように平均流速がほぼ一致する場合には，図－3.4に示したように流速分布およびレイノルズ応力分布も良く一致することを確認している。以上の検討より，混合距離モデルは妥当と判断される。

次に図－3.4の固定床近傍の流速分布に着目すると，固定床のごく近傍でも測定値が計算値とほぼ一致している。この結果は固定床近傍での近似的取り扱いがほぼ妥当であることを示唆する。しかし，固定床が粗度の小さいアクリル板であること，シートを現地で用いる場合にはアクリル板より明らかに粗度の大きい砂などで構成される地面であることを考慮すると，粗度がより大きい場合についても確認する必要がある。そこで，粒径1.2mm でほぼ均一な移動床材料をベニヤ板に接着した固定床を用いて実験を行い，近似的取り扱いの妥当性について更に検討を加えることとした。

実験水路として，図－3.6に示す幅0.3m，高さ0.5m の矩形断面を有する管水路を用いた。この水路は最大で約 4 (m/s) の断面平均流速が通水可能である。多孔質体の敷設範囲は，管水路が90° 曲がり終わった位置から水路下流端までの全長14m の区間（図－3.6参照）である。この区間の水路床には上記したように移動床材料を張り付けてあり，この板上に多孔質体を敷設した。多孔質体は，外観が写真－2.1に示したヘチマタイプであり，実験結果より K＝110 (cm/s) と推定できた。水深方向の流速分布の測定にはＬ型の２次元電磁流速計を用い，１点あたりサンプリング周波数20Hz で11秒間の測定を行い，A/D 変換してデータを記録した。流速計の設置地点は，水深方向の境界層がほぼ完全に発達した上流端から約10.5m 下流の水路中央の位置である。多孔質体内における流速測定は，多孔質体の空隙が小さく流速計が挿入で

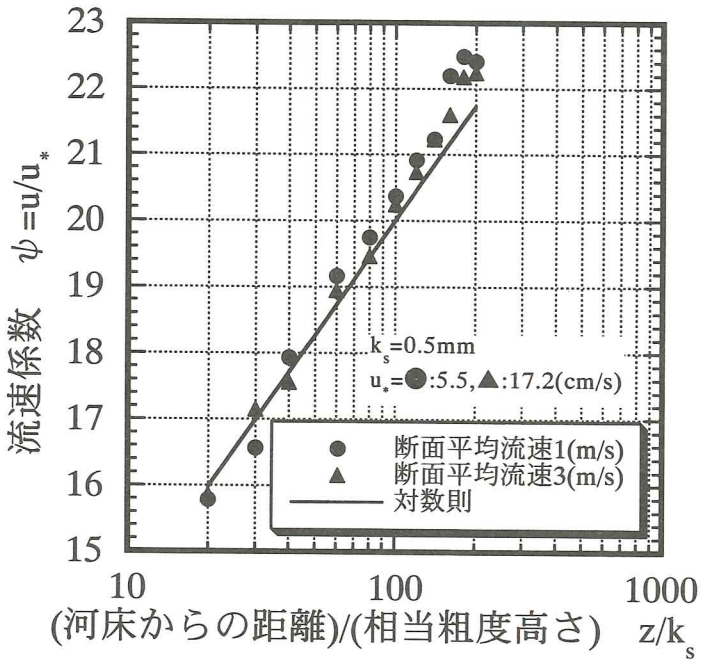


図－3.6　小型矩形管水路

きないため，流速計が挿入できる必要最小限の大きさの穴を設け，この穴内において実施した。またピエゾ水頭を測定し，これから動水勾配を算定した。なお，多孔質体表面（z＝0）における摩擦速度 u_{*0}は，式(3.13)より計算した。

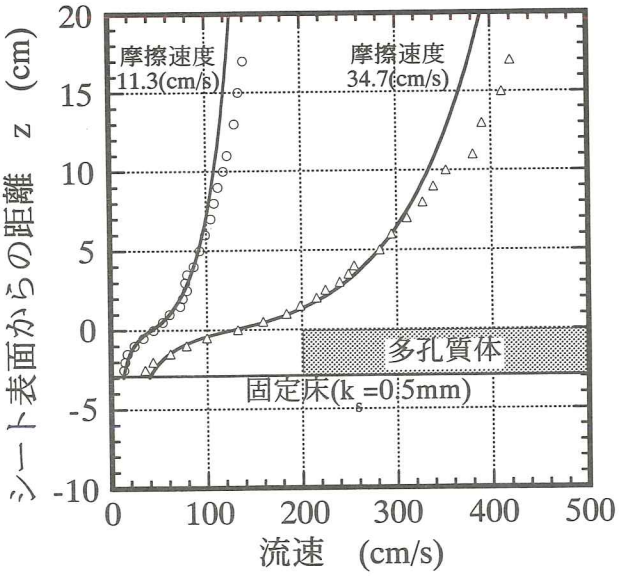
$$u_{*0} = \sqrt{g\,\delta\,i} \tag{3.13}$$

ここで，iはピエゾ水頭差から計算した動水勾配，δは多孔質体上の境界層厚さである。δは，多孔質体上面から最大流速が生じる位置までの距離と，同じくレイノルズ応力が0となる位置までの距離の平均的な値として定めた。式(3.13)は厳密には境界層が完全に発達した場合にのみ適用される。しかし，今回の実験のように完全に発達していない場合でも境界層厚さの下流方向への増加量が比較的小さい区間であれば，摩擦速度の近似値を求めることができる。

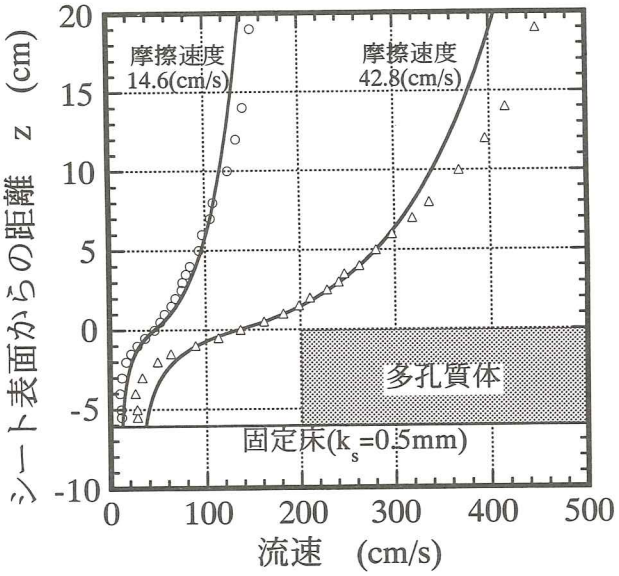


図－3.7　移動床材料を接着した固定床上の流速分布

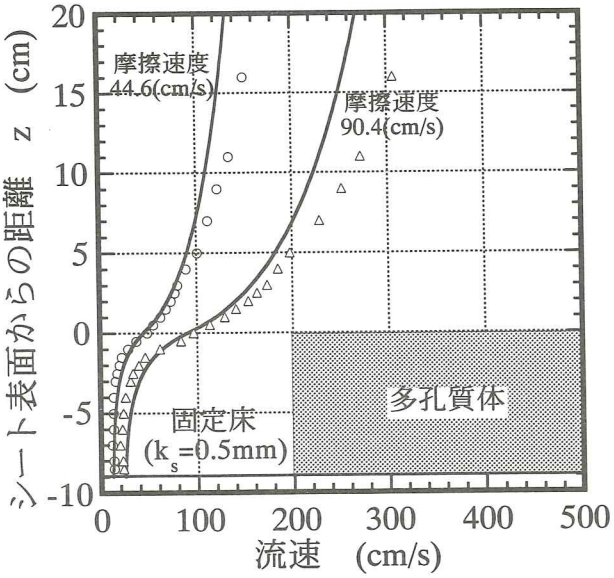
固定床板のみ（多孔質体なし）での流速分布の測定値と相当粗度高さ k_s＝0.5mm とした対数流速分布の計算値を図－3.7に示す。両者は良好に一致しており，k_sが概ね上記の値程度であると推定される。そのような粗度を有する固定床上に多孔質体を厚さ3，6，9 cm で敷設した場合の流速分布の測定値と計算値を比較した結果を図－3.8a)～c）に示す。まず多孔質体内の流速分布に着目すると，図－3.4に示した結果と同様に固定床近傍においても計算値が測定値と良く



図－3.8a) 流速分布の測定値とモデルによる計算値の比較(厚さｔ＝3cm)



図－3.8b) 流速分布の測定値とモデルによる計算値の比較(厚さｔ＝6cm)



図－3.8c) 流速分布の測定値とモデルによる計算値の比較(厚さｔ＝9cm)

一致しており，砂粒程度の粗度であれば近似的取り扱いが有効であることが分かる。なお，多孔質体上の流速分布では，いずれのケースともz>10cmの範囲で測定値が計算値より大きくなるようなズレが見られる。発達過程にある平板上境界層の場合，対数則による流速分布より流速が大きくなり，平板近傍領域でのみ対数則が成立することが知られている（例えばロッタ[20]）。上記のズレはこれと同様な現象と推察される。

以上より，$\kappa=0.4$と固定して良好に実験結果と一致していることから，提案したモデルが流れ場の予測（Kが一定の場合）に適用できると思われる。

3.3 シートの透過係数およびそれを用いた流れ場のモデル

透過係数Kが流速uに伴って変化するシートの場合には，その関係をモデル化し，3.2.2に示した流れ場のモデルと組み合わせて流速分布およびレイノルズ応力分布を予測しなければならない。本節では，Kのモデルを示した後，それを用いて流速分布およびレイノルズ応力分布を計算した結果と実験結果を比較することからモデルの妥当性について検討を加える。さらにモデルによる計算誤差の傾向を踏まえて，シートの限界流速評価への適用性についても検討する。

3.3.1 シートの透過係数の変化特性とそのモデル

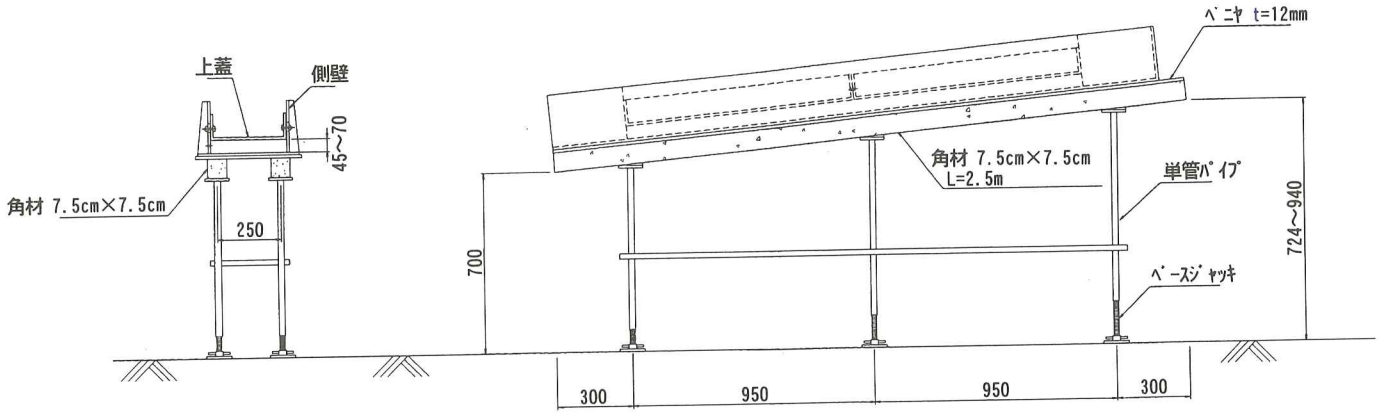
シートの透過係数は流速のみならずシート諸元（構成材の太さ，空隙率λ_p，シート構造など）によっても変化する。本研究では，福岡ほか[18]に倣って各構成材に作用する抗力と流速の関係式をベースとして，透過係数と流速およびシート諸元の関係をモデル化することとした。以下では，シートの抵抗特性を実験的に明らかにするとともに，その特性を再現しうる上記モデルについて説明する。

(1) 透過係数の測定方法

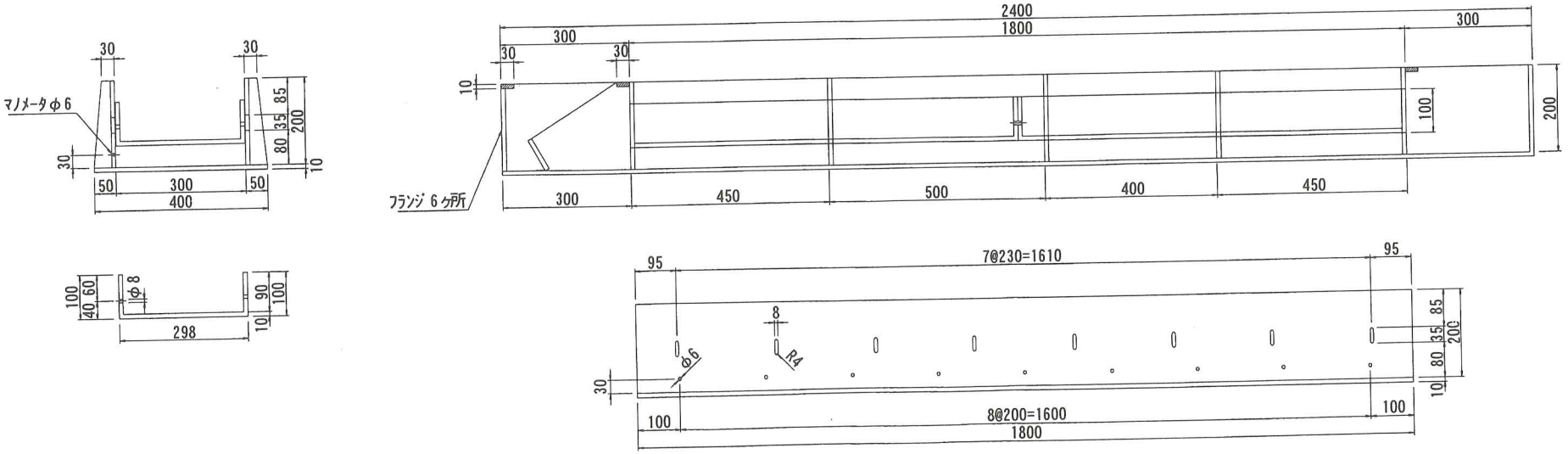
透過係数の測定には**図－3.9**に示す矩形管水路を用いた。管水路を用いるメリットは，開水路での実験に比較して通水流量を変化させた場合に定常状態に達する時間が短いことと，高流速を通水するのが容易なことである。図示した水路は長さ2 m，幅60cmであり，高さは6～10cmの範囲で調節することができる。高さを可変としたのは，厚さが異なるシートを管水路内に隙間なく設置できるようにするためである。また，シートと水路壁が隙間なく接していることが確認しやすいように，透明アクリル板によって水路を作成した。水路側壁には10cmピッチでマノメーターを設置し，これにより動水勾配の測定を行った。また，通水流量は水路下流端で一定時間採水し，その容量を計測することによって求めた。動水勾配を1/5～1/100の範囲で段階的に変化させ，その都度，動水勾配と断面平均流速（＝通水流量/水路断面積）の測定を行い，式(3.3)にそれら測定値を代入して透過係数Kを求めた。なお，上記のような大きな動水勾配までを実験対象としたのは，**図－3.8**に測定例を示したようにシート表面近傍に生じる高流速域も実験対象範囲としたためである。

以上の実験方法では，シートの抵抗のみでなく水路壁面の摩擦抵抗を流れが受けているので，厳密には式(3.3)によって透過係数を求めることができない。ただし，以下に示すようにシートの抵抗が摩擦抵抗に比較して非常に大きいため，式(3.3)によって十分な精度で透過係数が求められる。福岡ほか[18]は固定床面の摩擦抵抗を考慮した多孔質体内流れの抵抗則として，式(3.14)が適用できることを実験によって明らかにしている。

実験装置一般図



実験装置構造図



図－3.9　透過係数の測定に用いた矩形管水路

$$u = \frac{K}{\lambda_p}\left\{1 + \boxed{\left(\frac{K}{\lambda_p}\frac{n}{h^{2/3}}\right)^2}\right\}^{-0.5} i^{0.5} \qquad (3.14)$$

ここで，nは水路床面のマニングの粗度係数である。式(3.14)のうち□で囲った項が微小(≪1)であれば，式(3.3)で近似できることが分かる。そのような近似が可能であるか評価するために，□で囲った項がとりうる最大に近い値を，実験水路の諸元などを考慮してn，K，hを想定することにより求めてみる。アクリル板のような平滑な素材では，滑面乱流となるのでnが大きい場合でも0.015程度と推定される(例えば水理公式集[21])。また，水深hは最少でも約3cmである(管水路では水路高さの半値とする)。また，シートのK/λ_pは以下にデータを示すように最大でも約1(m/s)と推定される。これらの値をアンダーラインを付した項に代入すると，この項がとりうる最大値のオーダーは式(3.15)に示すように求められる。

$$\left(\frac{K}{\lambda_p}\frac{n}{h^{2/3}}\right)^2 = \left(1\frac{0.015}{0.03^{2/3}}\right)^2 \fallingdotseq 0.0241\cdots\cdots \qquad (3.15)$$

以上から式(3.3)によって少なくとも2桁までは正確にKが求められることが明らかとなり，Kの測定上に問題がないと判断される。

⑵　透過係数の測定結果

ほぼ同じシート構造でシート構成材の代表直径dおよび空隙率λ_pを系統的に変化させたB－1，2，3シリーズのシート(表－2.3参照)について，上記した実験方法によって測定したKを流速uとの関係として整理した結果を図－3.10a)～c)に示す。

まず，uとの関係に着目すると，uの増加に伴ってKがu→∞においてある一定値に漸近するように単調に増加する傾向が見られる。図示した範囲ではKは$u^{0.25\sim0.4}$に比例する傾向が見られる。そのため，シートの抵抗は，$u^{1.2\sim1.5}$($\propto$(u/K)^2：式(3.2)参照)に比例することとなり，遷移領域に属することが分かる。

また，d，λ_pに着目するとそれらの値の増加に伴ってKが減少する傾向が見られる。これは，流れを遮蔽して抵抗を発揮する構成材の総面積が増加したためと推察される。

⑶　透過係数の予測モデル

透過係数がu，d，λ_pに応じて変化する傾向を表現できるモデルを提案する。シートの構成材に作用する抗力F(単位体積あたり)と流速uの関係は，抗力係数C_D'を用いて式(3.16)として与えられる。

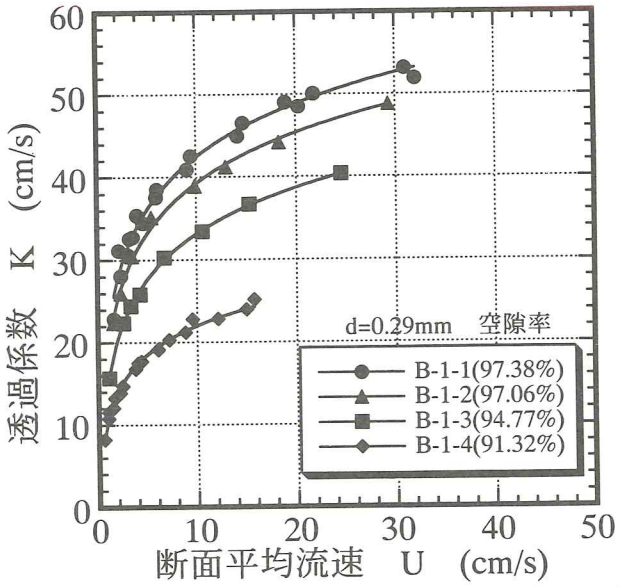
$$F = \frac{1}{2}\rho C_D' d L u^2 \qquad (3.16)$$

ここで，ρは水の密度，Lは単位体積あたりに含まれるシート構成材の長さである。Lは空隙率λ_pの定義に基づいてλ_pとdの関数として式(3.17)に示すように表せる。

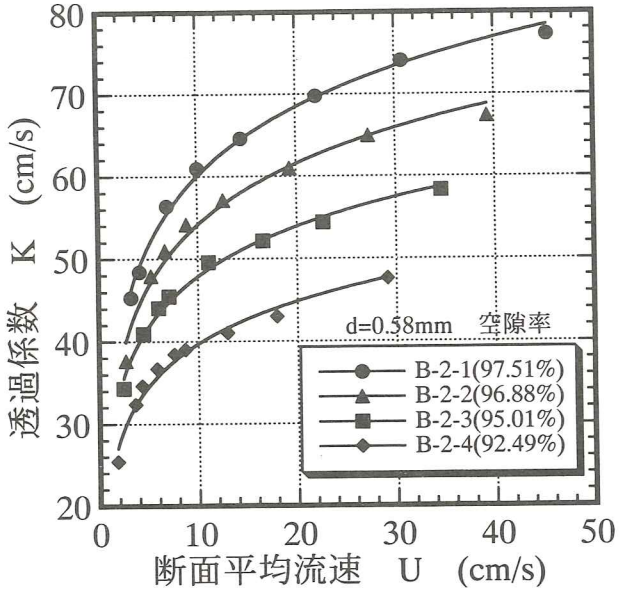
$$L = \frac{1-\lambda_p}{A} = \frac{4\left(1-\lambda_p\right)}{C\pi d^2} \qquad (3.17)$$

ここで，Aは構成材の断面積，C(=A/(0.25πd^2))は断面積補正係数である。なお，前記のようにCを定義したのは，表－2.3に示したシートプロトタイプの多くが，円形断面を有する構成材を用いているためである。

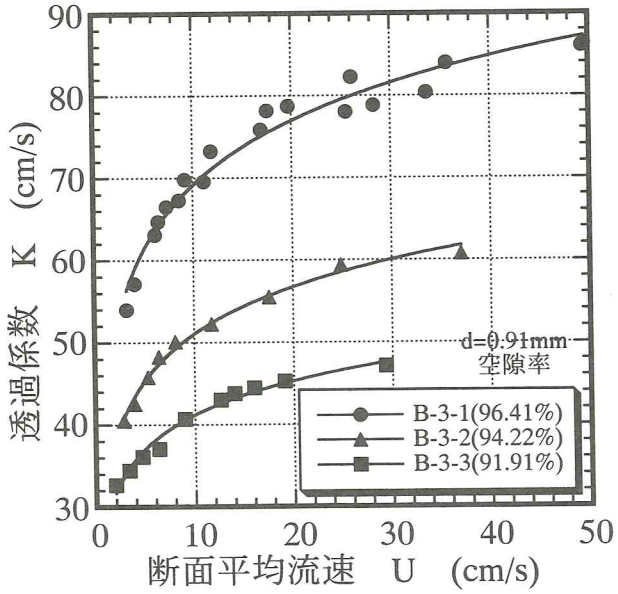
式(3.3)，(3.16)，(3.17)および i=F/ρg から式(3.18)が得られる。



図－3.10a) 透過係数Kと流速uの関係(B－1シリーズ)



図－3.10b) 透過係数Kと流速uの関係(B－2シリーズ)



図－3.10c) 透過係数Kと流速uの関係(B－3シリーズ)

$$\frac{K}{\lambda_p} = \left(\frac{\pi g d}{2\left(1-\lambda_p\right) C_D} \right)^{0.5} \tag{3.18}$$

抗力係数は，遷移領域では式(3.19)によって定義されるレイノルズ数 R_e の関数となると思われる。

$$R_e = \frac{u d}{\nu} \tag{3.19}$$

ここで，ν は水の動粘性係数である。さらにシートの場合では抗力係数 C_D ($=C_D'/C$) は，シートの構造(例えば流向に対する構成材断面方向の角度，隣り合う構成材間の距離，配置など)や構成材の断面形状などに応じて複雑に変化すると推察される。したがって，幾何学的に相似なシート構造および構成材形状であれば，C_D は R_e のみの関数として表せることが期待できる。今井[22]は円柱や平板のような“にぶい物体”(形状抵抗が卓越する形状)について，式(3.20)によって C_D と R_e の関係が良好に表せることを報告している。

$$C_D = \left(C_{D\infty}^{0.5} + \gamma^{0.5} R_e^{-0.5} \right)^2 \tag{3.20}$$

ここで，$C_{D\infty}$ は $R_e \rightarrow \infty$ での抗力係数，γ は定数であり，これらの値がシート構造および構成材形状などに応じて変化すると考えられる。式(3.20)を式(3.18)に代入すると，K は式(3.21)として表せる。

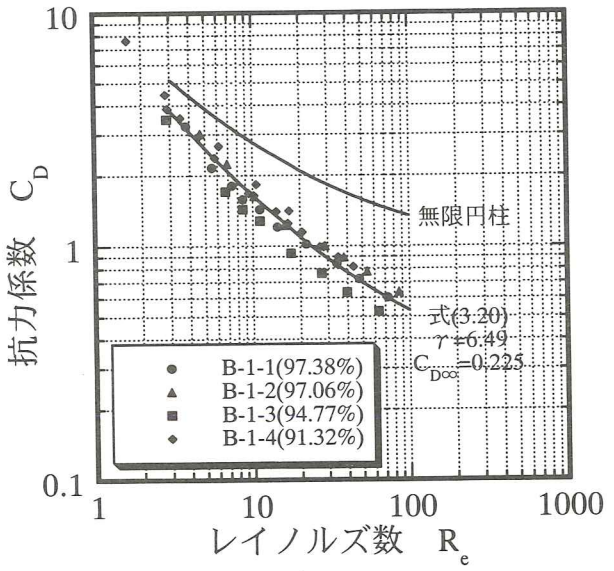
$$\begin{aligned} \frac{K}{\lambda_p} &= \frac{1}{1+\left(\gamma/C_{D\infty} R_e\right)^{0.5}} \left(\frac{\pi g d}{2\left(1-\lambda_p\right) C_{D\infty}} \right)^{0.5} \\ &= \frac{K_\infty}{1+\left(\gamma/C_{D\infty} R_e\right)^{0.5}} \end{aligned} \tag{3.21}$$

ここで，K_∞ は $R_e \rightarrow \infty$ (完全乱流域)での透過係数である。式(3.21)によれば，K は d，λ_p，R_e の変数として表され，シート構造や構成材形状などのその他の影響が $C_{D\infty}$，γ に陰に含まれることになる。したがって，式(3.21)は $C_{D\infty}$ と γ を実験によって定める必要がある半経験式と位置づけられる。

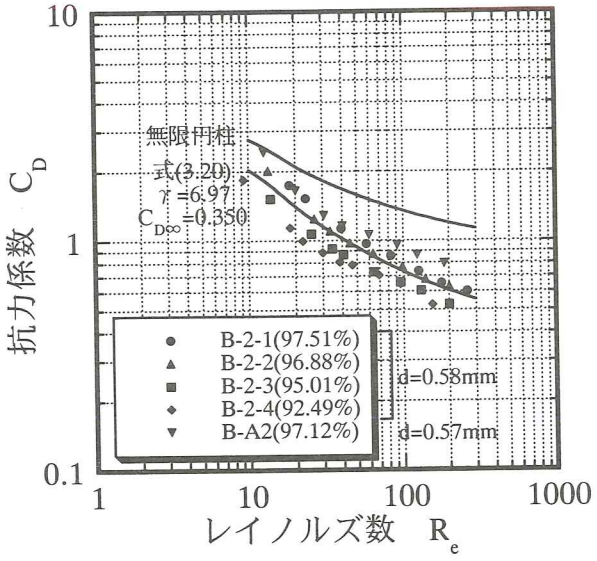
⑷　予測モデルの適用性　－ $C_{D\infty}$ と γ の空隙率 λ_p，構成材の代表直径 d に対する依存性－

図－3.10に透過係数の測定結果を示したB－1，2，3シリーズについて，式(3.18)を用いて C_D を算定し，R_e との関係として整理した結果を図－3.11に示す。同図に併記した流向に直交するように配置された無限長円柱の C_D と R_e の関係[23]と比較すると，R_e の増加に伴う C_D の減少傾向が円柱の場合とほぼ同様であり，シートのような複雑な形状を有する多孔質体でも式(3.20)が適用できると判断される。また，円柱に比較してシートの C_D が全般的に小さいが，その理由として構成材の長手方向と流向が必ずしも直交していないこと，また隣り合う構成材間の遮蔽効果などが考えられる。

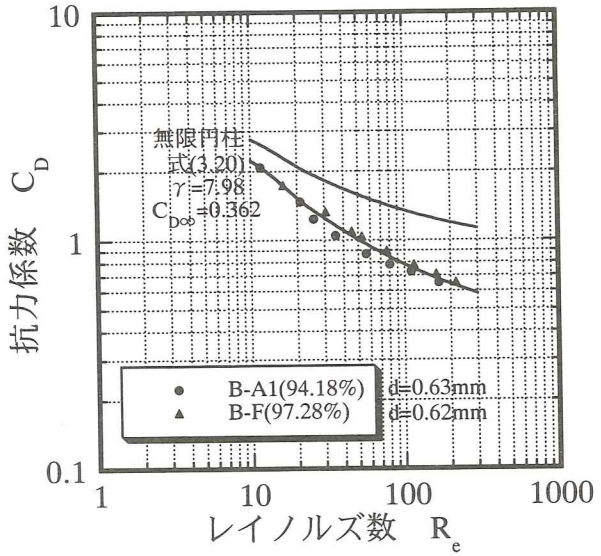
次に各シリーズ(d が同一であるケースごと)に着目すると，多少のばらつきはあるものの，λ_p に関係なく図中に実線で示した一つの関係式($C_{D\infty}$ と γ が同値の式(3.20))で表すことが可能と思われる。また，d の増加に伴って C_D が大きな値をとる傾向が見られる。⑶に示したモデル(仮定)が成り立つ場合，シート構造が非常によく似たシートであるB－1，2，3シリーズのシートでは，λ_p だけでなく d にも関わらず C_D と R_e の関係が $C_{D\infty}$ と γ を一定値として式(3.20)で表すことができると期待された。上記した結果は，λ_p については上記のモデルの適用が可能であるが，d では完全に成立しないことを示唆する。この原因として考えられるのは，d が異なるシートは見た目が似ていても，流体抵抗に関わる幾何学的相似性（シート



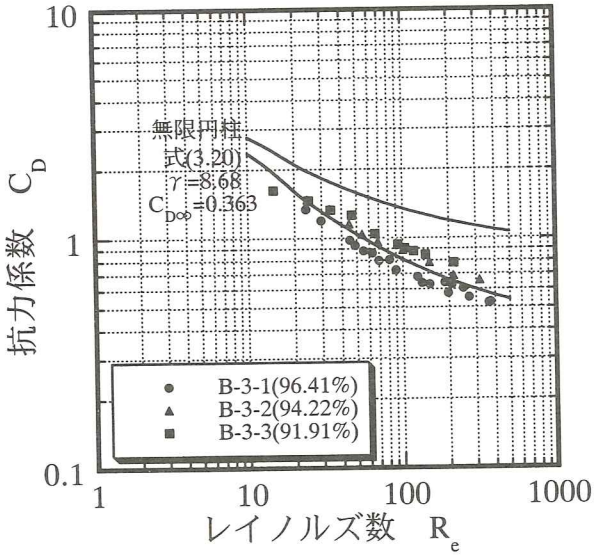
図−3.11a) 抗力係数 C_D とレイノルズ数 R_e の関係（d=0.29mm：ヘチマー接着タイプ：Bシリーズ）



図−3.11b) 抗力係数 C_D とレイノルズ数 R_e の関係（d=0.57～0.58mm：ヘチマー接着タイプ：Bシリーズ）



図−3.11c) 抗力係数 C_D とレイノルズ数 R_e の関係（d=0.62～0.63mm：ヘチマー接着タイプ：Bシリーズ）

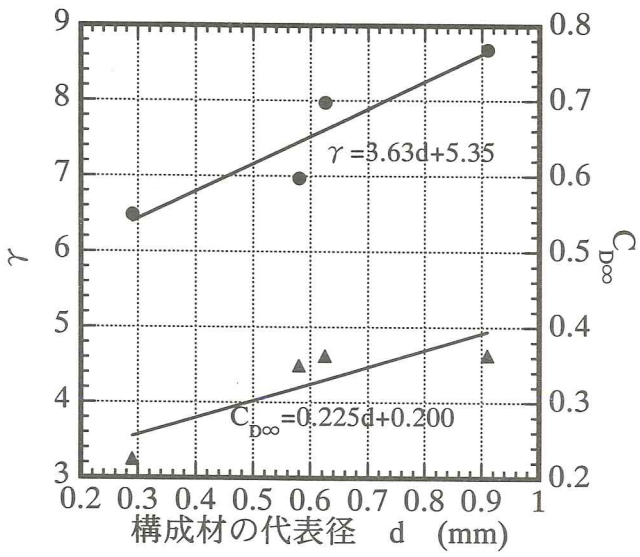


図−3.11d) 抗力係数 C_D とレイノルズ数 R_e の関係（d=0.91mm：ヘチマー接着タイプ：Bシリーズ）

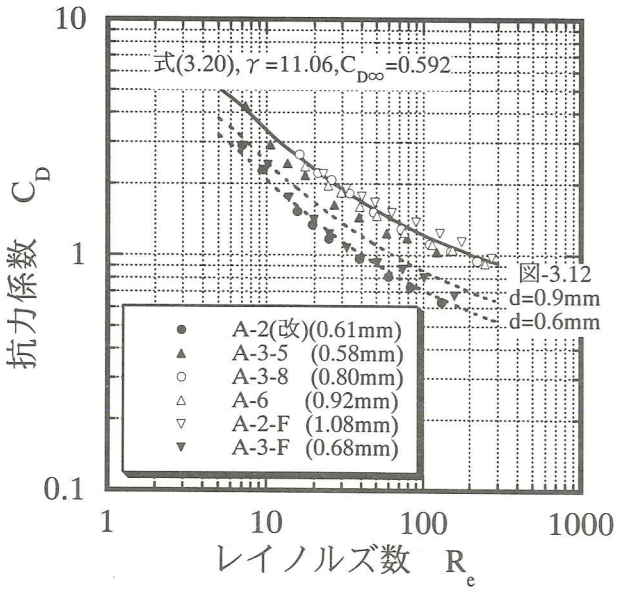
構造や構成材形状）が満たされていなかったためと推察される。例えば，B−1，2，3では円弧状にカールされた円形断面ファイバーを構成材としている（**写真−2.1**参照）が，円弧の曲率半径とdの比率が幾何学的な相似条件を満たしていない。

⑸ 各シートタイプの $C_{D\infty}$ と γ

シート構造がほぼ同一と見なせるシートごとにタイプ分けを行い，各タイプごとに $C_{D\infty}$ と γ を実験により求めることによって，dと λ_p の関数として透過係数が推定できることが期待できる。ここでは，各シートタイプごとに $C_{D\infty}$ と γ の実験結果を整理する。なお，$C_{D\infty}{}^{0.5}$ と $R_e{}^{-0.5}$ の関係としてプロットした後に最小自乗法によって線形関数をフィッティングすると，線形関数の切片が $C_{D\infty}{}^{0.5}$，傾きが $\gamma^{0.5}$ に相当する。



図－3.12 C_D, γ とdの関係(ヘチマー接着タイプ:Bシリーズ)



図－3.13 抗力係数 C_D とレイノルズ数 R_e の関係(ヘチマー熔着タイプ：A －2,3,6シリーズ)

このような整理を各シートに対して行って $C_{D\infty}$ と γ を求めた結果を表－3.1に示す。

a) ヘチマー接着タイプ(B シリーズ)

⑷で述べたように，同一の R_e で比較すると d が小さいほうが C_D が大きくなる傾向が見られる。この傾向は $C_{D\infty}$ および γ を d の関数として近似的に表現できることが期待できる。そこで，まずほぼ同じ d と見なせるグループに分けて $C_{D\infty}$，γ を求めた結果を図－3.11に示したが，d に伴って $C_{D\infty}$，γ が若干増加する傾向が確認できる。その関係を $C_{D\infty}$，γ を d の線形関数として近似することを試みた結果を図－3.12に示す。概ね良好に近似できることから，このタイプのシート諸元に関する概略設計においては図－3.12に示した式を利用して K の推定が行えるであろう。

b) ヘチマー熔着タイプ(A－1，2，3，6シリーズ)

このタイプはシート構造によってさらに 2 種類に細分することができる。すなわち，ヘチマー接着タイプと比較的よく似た構造である構成材を円弧上にカールさせて熔着したタイプ 1 (A－2，3，6シリーズ)と，波形の型枠面に沿って構成材が面的に熔着したネットー折り曲げタイプのような構造を有するタイプ 2 (A－1シリーズ)である。

まず，タイプ 1 について C_D と R_e の関係を図－3.13に示す。ヘチマー接着タイプと同様に d に伴って C_D が大きくなる傾向が認められる。構造的にもよく似ていることから，図－3.12に示した $C_{D\infty}$，γ と d の関係式が適用可能であることが期待できる。そこで，関係式から算定した結果を図－3.13に破線で併記した。d が0.6mm 程度であるシートでは， A－3－5を除いた 2 シートで関係式と良好に一致している。しかし，d が0.9mm 程度である 3 シートでは，関係式では過小評価となっており，図中に実線で示す関係によって近似すべきである。以上より，タイプ 1 はヘチマー接着タイプと同様に $C_{D\infty}$，γ が d に応じて増加する傾向が見られるが，その関係式は必ずしも一致しないこと(ヘチマー接着タイプより C_D が大きくなる傾向が見られること) がわかった。このタイプのシートの概略設計では d が0.9mm 以下の場合には，図－3.12に示したヘチマー接着タイプの関係式を用い，それ以上では図－3.13に実線で示した関係式を適用すると

表−3.1　$C_{D\infty}$とγの測定結果

タイプ		プロトタイプの世代	シート名	構成材経 (mm)	空隙率 (%)	$C_{D\infty}$	γ
大区分	小区分						
ヘチマタイプ	接着タイプ	第一次	B-1-1	0.29	97.38	0.280	4.83
			B-1-2	0.29	97.06	0.260	6.71
			B-1-3	0.29	94.77	0.195	5.03
			B-1-4	0.29	91.32	0.274	6.38
			B-2-1	0.58	97.51	0.327	10.12
			B-2-2	0.58	96.88	0.375	6.55
			B-2-3	0.58	95.01	0.321	5.45
			B-2-4	0.58	92.49	0.336	4.12
			B-3-1	0.91	96.41	0.341	7.29
			B-3-2	0.91	94.22	0.419	8.10
			B-3-3	0.91	91.91	0.493	6.82
	熔着タイプ	第二次	A-1(B)	0.57	97.35	0.392	9.48
			A-1(B改)	0.57	94.92	0.274	7.03
			A-1(A)	0.57	95.86	0.184	7.43
			A-1(特A-2)	0.70	92.15	0.251	6.63
			A-1(特A-3)	0.70	92.75	0.252	5.37
			A-2（改）	0.61	88.89	0.318	6.87
			A-3-5	0.58	93.39	0.499	10.09
			A-3-8	0.80	94.44	0.514	13.15
			A-6	0.92	91.94	0.565	10.59
	接着タイプ		B-A1	0.63	94.18	0.372	6.22
			B-A2	0.57	97.12	0.493	6.21
			B-B	0.46	94.03	0.312	8.72
	熔着タイプ	第三次	A-1-F	0.77	95.53	0.782	8.60
			A-2-F	1.08	92.58	0.708	9.53
			A-3-F	0.68	92.45	0.391	6.21
	接着タイプ		B-F	0.62	97.28	0.385	8.25
ネットタイプ	織り曲げタイプ	第二次	A-4-2a	1.02	94.37	1.351	3.06
			A-4-2b	1.02	95.12	1.188	13.68
			A-4-4a	1.25	92.35	1.336	14.87
			A-4-4b	1.25	91.95	1.071	17.45
	袋詰めタイプ		A-8-3	0.37	94.80	0.258	7.12
			A-8-4	0.30	93.91	0.168	1.83
	織り曲げタイプ	第三次	A-4-3F	0.97	95.22	1.253	22.67
			A-4-5F	0.97	92.58	0.764	21.36
	袋詰めタイプ		A-8-F	0.36	89.91	0.086	2.20
編み物タイプ	ハニカムタイプ	第一次	C-3-1	0.32	98.38	0.416	1.92
			C-3-2	0.32	97.40	0.418	4.47
			C-3-3	0.32	96.82	0.231	6.70
			C-3-4	0.32	94.91	0.305	5.33
	直線タイプ	第二次	C-1（改）	1.02	96.01	0.712	13.36
	ハニカムタイプ		C-3-5	0.33	96.46	0.206	5.96
			C-3-6	0.33	97.27	0.300	5.96
			C-3-7	0.33	97.41	0.243	5.34
	直線タイプ	第三次	C-1-F	0.29	98.21	0.318	1.61
	ハニカムタイプ		C-3-F	0.30	96.20	0.244	5.73
織物タイプ	テープ材編み付けタイプ	第二次	D-3(1)	2.38	93.87	6.979	606.59
			D-3(2)	1.76	93.02	3.157	116.42
	波形タイプ	第三次	D-1-F	0.58	95.90	1.021	7.87
	テープ材編み付けタイプ		D-3-F	1.89	91.07	2.120	42.58

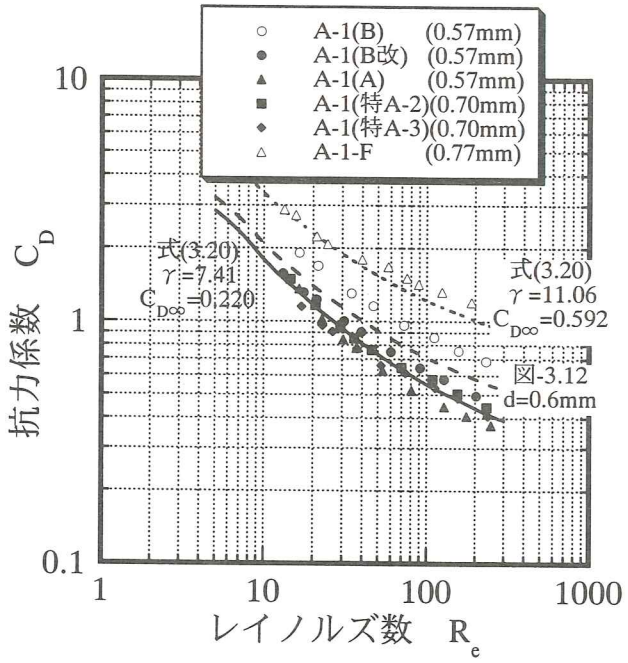
よい。しかし，これはあくまでも第一近似であり，シート諸元をより厳密に設定するにあたっては，プロトタイプシートを作成して$C_{D\infty}$，γとdの関数を改める必要がある。

タイプ2についてC_DとR_eの関係を図−3.14に示す。dが0.57〜0.77mmの比較的狭い範囲に限られていることもあって，dに伴ってC_Dが増加する傾向は見られない。A−1(B)とA−1−Fが特に大きめのC_Dになるが，それ以外はほぼ同値になり，実線で示す関係式で近似可能である。A−1(B)とA−1−Fのみが大きくなった理由は現時点では明らかではない。ただし，A−1−Fのみ第3次でありその他は全て第2次であるが，第2次シートの以下の欠点を修正するように第3次シートを作成した効果が表れた可能性がある。すなわち，第2次のシートでは波形の頂部に構成材が密に分布しており，肝心の抵抗を主に発揮する厚さ方向にほぼ平行な面において疎であったのを，頂部も平行な面でもほぼ同じような密度になるように第3次シートは配慮して作成した。頂部に構成材が密に分布する傾向は，空隙率の小さいシートほど顕著であること，さらにC_Dが大きめとなったA−1(B)は第2次シートで最も空隙率が大きいことも，上記の推察の妥当性を裏付けていると思われる。

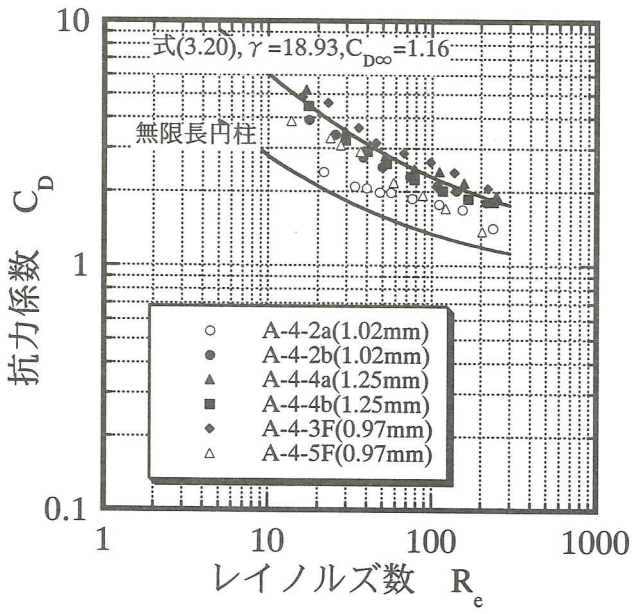
ヘチマ−接着タイプ(d=0.6mm)のC_DとR_eの関係を図−3.12を用いて計算した結果を図−3.14に破線で併記した。A−1(B)とA−1−Fを除くと，ヘチマ−接着タイプよりC_Dが小さくなることが解る。また，A−1−Fはタイプ1のdが0.9mm程度であるシートのC_D(図−3.14に点線で併記した)とほぼ同程度のC_Dになることが確認できる。この結果は，上記した構成材の頂部への集中による抗力低下に関する説明と当てはまるものである。以上の傾向を考慮すると，タイプ2は波形頂部に構成材を集中させないように作成すべきであり，その場合にはタイプ1と同様にして，シート諸元の概略設計を行えばよいと思われる。

c) ネット−折り曲げタイプ(A−4シリーズ)

C_DとR_eの関係を図−3.15に示す。dが0.97〜1.25mmの比較的狭い範囲に限られていることもあって，dに伴ってC_Dが増加する傾向は見られない。ばらつきが大きいものの，実線で示した関係で近似するこ



図−3.14 抗力係数C_Dとレイノルズ数R_eの関係(ヘチマ−熔着タイプ：A−1シリーズ)



図−3.15 抗力係数C_Dとレイノルズ数R_eの関係(ネット−折り曲げタイプ：A−4シリーズ)

とが可能と思われる。このタイプで特徴的なのは，シートの C_D が流向に直交するように配置された無限長円柱の C_D より大きくなることである。このタイプでは，構成材の断面形が円ではなく矩形に近いこと，ネットが流れにほぼ直交するような構造となっていること，さらに隣り合うネットでは構成材が千鳥状に配置されていることなど，C_D が大きくなる要因が多く見られる。このタイプの例から解るように，上記した3つの特徴を有するシートは高い抵抗を示すので，シート構造を考案するにあたってはそれらに配慮するのがよい。なお，シート諸元の概略設計にあたっては，図－3.15に示した関係式を用いればよい。

d)　ネット－袋詰めタイプ(A－8シリーズ)

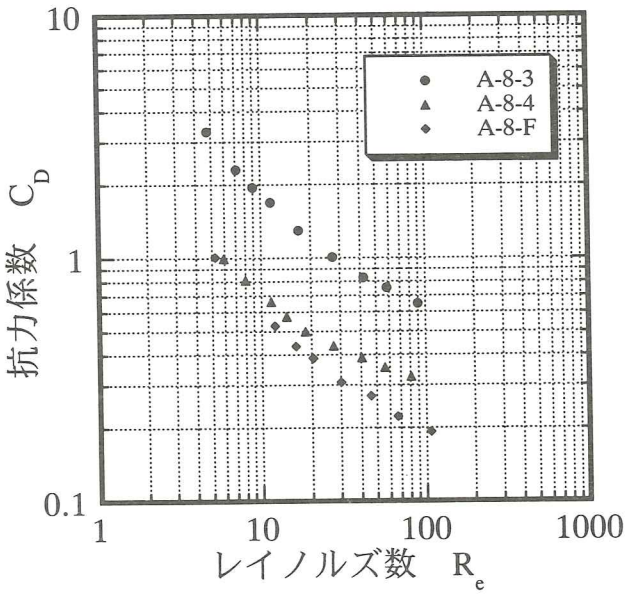
C_D と R_e の関係を図－3.16に示す。d が0.30～0.37mm の比較的狭い範囲であるが，シートごとに C_D が大きく異なり，近似的な関係式を導くことが困難である。各シートは細断したネット材の詰め方が異なるのでそれによって C_D が大きく変わったと思われる。このタイプはプロトタイプを作成して実験を行わないと $C_{D\infty}$，γ が評価できない。

e)　編み物－ハニカムタイプ(C－3シリーズ)

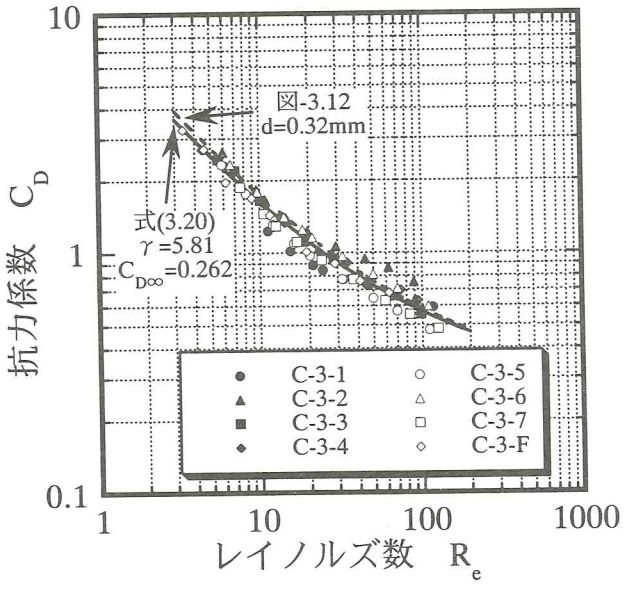
C_D と R_e の関係を図－3.17に示す。d が0.30～0.32mm の狭い範囲に限られていることもあって，ほぼ同一の C_D になるようであり，実線で示した関係で近似することが可能と思われる。ヘチマ－接着タイプ(d＝0.32mm) の C_D と R_e の関係を図－3.12を用いて計算した結果を図－3.17に破線で併記したが，実線で示した本タイプの C_D とほぼ同じ値になることが確認できる。構造が全く違うのでこの結果は偶然と思われるが，同程度の C_D 値を発揮する構造であることが分かる。なお，シート諸元の概略設計にあたっては，図－3.17に実線で示した関係式を用いればよい。

f)　編み物－直線タイプ(C－1シリーズ)

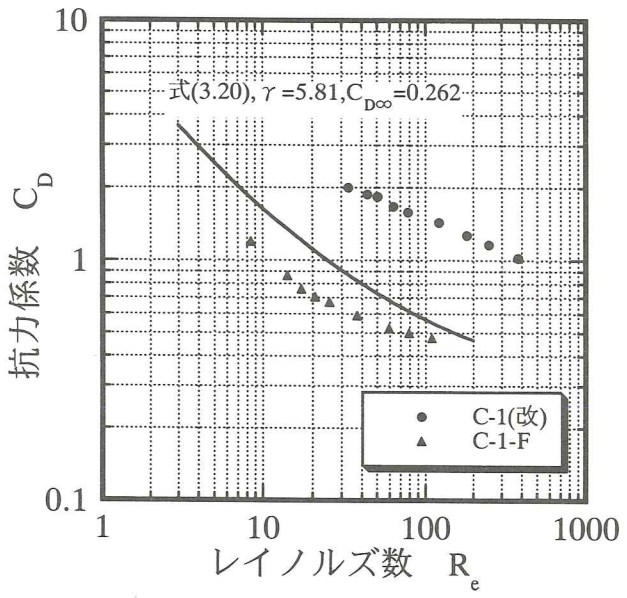
C_D と R_e の関係を図－3.18に示す。d に伴って C_D が大きくなる結果となっているが，2種類の結果しかないためヘチマ－接着タイプのようにその関係を導くことが困難である。編み物－ハニカムタイプと d が比較的近い C－1－F とを比較すると，本タイプのほうが C_D が小さくなる。その原因として，本タイプの



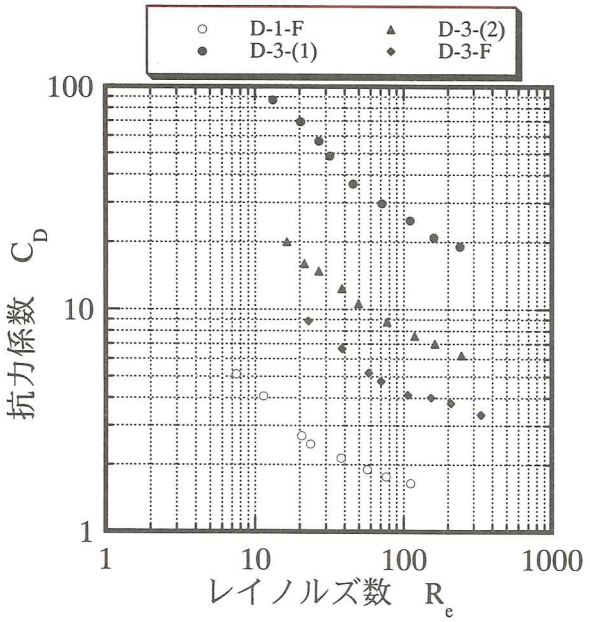
図－3.16　抗力係数 C_D とレイノルズ数 R_e の関係(ネット－袋詰めタイプ：A－8シリーズ)



図－3.17　抗力係数 C_D とレイノルズ数 R_e の関係(編み物－ハニカムタイプ：C－3シリーズ)



図－3.18　抗力係数 C_D とレイノルズ数 R_e の関係(編み物－直線タイプ：C－1シリーズ)



図－3.19　抗力係数 C_D とレイノルズ数 R_e の関係(織物タイプ：D シリーズ)

シートでは，厚さ方向にのびる構成材が複数本をまとめた束になっており，そのため遮蔽効果が大きくなったためと考えられる。抗力をより効率的に発揮させるためには，束をばらして遮蔽効果を弱める必要がある。なお，このタイプでは d が異なるプロトタイプを作成してヘチマ－接着タイプのように系統的な実験を行い，$C_{D\infty}$，γ と d の関係を明らかにすることが望まれる。それが行われるまでは，プロトタイプを作成して実験を行って $C_{D\infty}$，γ を評価することとする。

g)　織物タイプ(D シリーズ)

C_D と R_e の関係を**図－3.19**に示す。テープ材編み付けタイプ(D－3シリーズ)では，シートごとに C_D が大きく異なり，近似的な関係式を導くことが困難である。今回の結果を見る限りネット－袋詰めタイプと同様にプロトタイプを作成して実験を行わないと $C_{D\infty}$，γ が評価できないと思われる。また波形タイプ(D－1シリーズ)は，波形に見えるヘチマ－熔着タイプ(タイプ２)(**図－3.14**参照)やネット－折り曲げタイプ(**図－3.15**参照)に比べて，かなり C_D が小さい。その理由は，波形タイプではシート形状を保つ役割を持っている構成材がシート表面に流れ方向に沿って配置されており，その部分で抗力があまり生じないためと考えられる。

h)　まとめ

多くのタイプでは，$C_{D\infty}$，γ と d の関係が与えられ，⑶に示したモデルの有効性が確認できた。しかし，ネット－袋詰めタイプや織物－テープ材編み付けタイプは変化特性が複雑であったため，また編み物－直線タイプや織物－波形タイプでは実験ケース数が少なかったため，関係式を求めることができないものもあった。それらについては今後とも実験によって $C_{D\infty}$，γ を評価する必要がある。

また，C_D が大きな値となるシートの特徴は以下のようにまとめられる。

- 構成材が流れにほぼ直交するように配置している。
- 構成材が千鳥状に配置している。
- シート表面などに偏ることなく構成材がシート厚さ方向に均等に分布している。

• 構成材の断面形が円ではなく矩形に近い。

これらの特徴を有する構造を考案すれば，空隙率が大きい(すなわち疎なシート)でも抵抗を大きくすること(透過係数を小さくすること)が可能と考えられる。

3.3.2　混合距離モデルおよび固定床近傍での近似的取り扱いの妥当性(透過係数が変化する場合)

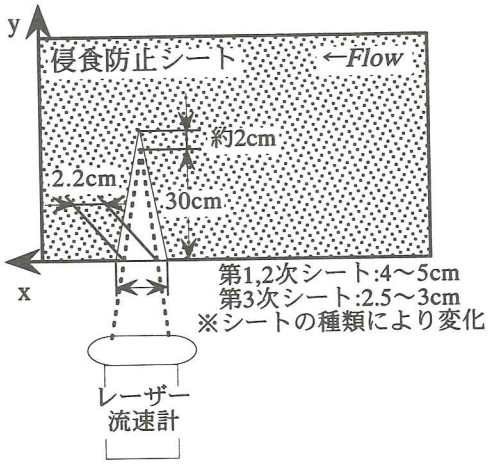
透過係数Kが一定値である多孔質体上の流れについては，3.2.2において提案した流れ場のモデルが良好に適用できることを示した。以下では，透過係数Kがd，λ_p，R_eに応じて変化する場合についても，3.3.1に示したKとR_eの関係式を組み込んだ流れ場のモデルが適用できるかについて，実験によって測定した流速およびレイノルズ応力分布とモデルによる計算結果を比較することより検討を加える。

(1)　実験概要

実河川での出水より流速は小さいもののモデルを検証するのに適した定常等流条件を得ることができる小規模水路実験(ケース1)と，実際の出水と同程度の流速が発生させられる大型矩形管水路を用いた実験(ケース2)を実施した。

a)　ケース1

実験水路として幅60cm，高さ50cm，長さ30mの可変勾配開水路を用いた。水路床にシートを長さ約20m敷設し，水深20cmまたは30cm (C－3－1～C－3－4のみ) のほぼ等流となるように流量および勾配を調整した。それらの調整後，水深，水面勾配，流速を測定した。流速測定には2次元のレーザー流速計または電磁流速計(第一次シートのみ)を用いた。レーザー流速計(Dantec社製)では，サンプリング周波数が20～200Hz，計測時間60secとした。なお，サンプリング周波数に幅があるのは，レーザー流速計の特性上，シート内での低流速域では高周波数でのサンプリングが非常に困難だったためである。電磁流速計(ケネック社製)は，センサー部の直径が8 mmであり，サンプリング周波数20Hzで60sec間の測定を行った。また，シート内の流速を測定するために，図－3.20に示すようにシートに切り込みを入れた。切り込みの形状をV字型にしたのは，流速測定点での切り込み幅をより小さくすることで，シート表面近傍におけるキャビティー流れと似た逆流域の発生（シートの切り込みの幅が広くなるほど，また透過係数が小さいほど明確に生じた）を防止することを狙ったためである。しかし，詳細な結果を(2)において示すが，V型にしても，その効果は十分ではなかった。したがって，上記の方法による測定結果とモデルによる計算結果との比較においては，シート表面近傍でのみ定性的な比較に留まっている。以上に示した実験条件をシートごとに整理した結果を表－3.2に示す。



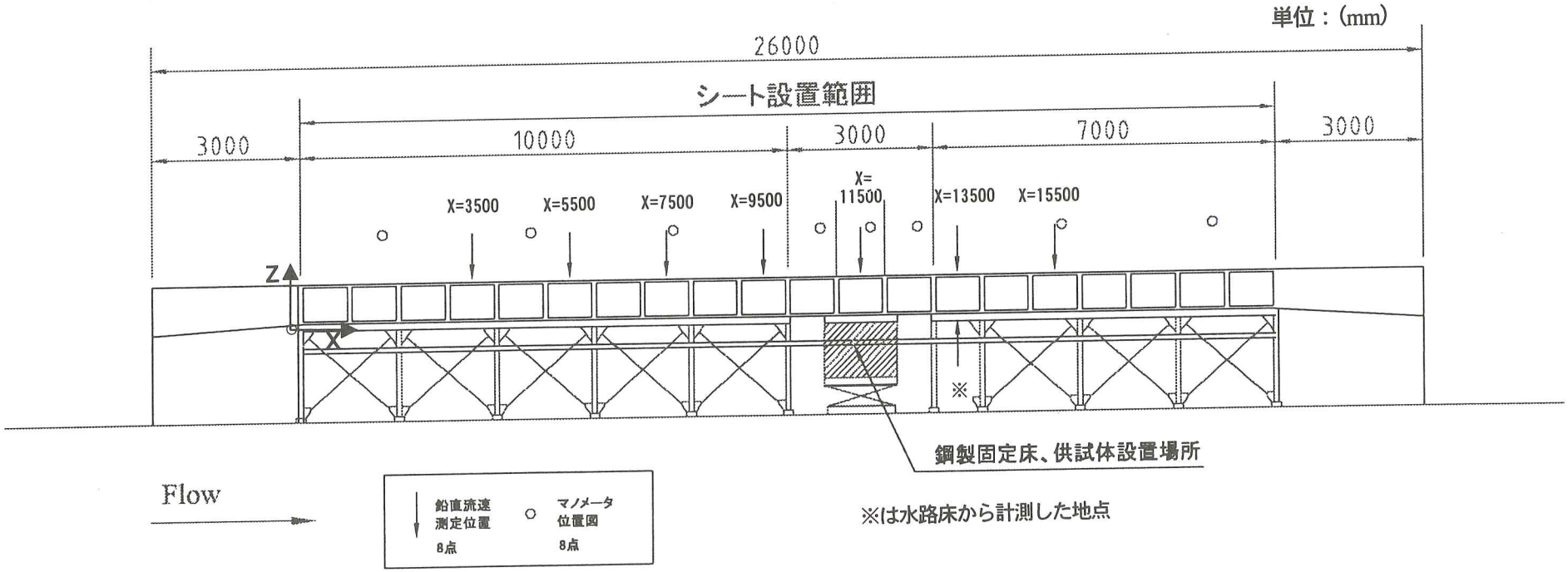
図－3.20　シート内の流速測定

b)　ケース2

実験水路は図－3.21に示す幅1.0m，高さ0.8m，長さ20mの矩形管水路であり，最大で約4 m^3/s（断面平均流速で約5 m/s）の通水が可能である。水路上流端から10.75～12.25mには侵食実験区間として幅1.0m，長さ1.5m，深さ0.5mの鋼製枠が水路床に設置できる。本実験ではこの区間をステンレス製の固

表−3.2　流れ場測定の実験ケース

タイプ		プロトタイプの世代	シート名	厚さ (mm)	平均流速[cm/s](1/水面勾配)		
大区分	小区分						
ヘチマタイプ	接着タイプ	第一次	B-1-1	57.5	31.5(421)	27.7(571)	19.1(1503)
			B-1-2	55.0	33.2(417)	27.5(571)	17.8(1612)
			B-1-3	57.5	36.3(462)	31.5(581)	20.6(1652)
			B-1-4	55.0	44.5(473)	35.0(729)	21.8(1639)
			B-2-1	55.0	27.2(382)	20.2(675)	17.2(1052)
			B-2-2	60.0	29.8(452)	24.4(714)	16.5(1438)
			B-2-3	55.0	33.7(282)	25.4(476)	21.9(709)
			B-2-4	65.0	31.6(326)	22.6(684)	18.2(1063)
			B-3-1	55.0	29.3(412)	22.6(667)	15.5(1538)
			B-3-2	60.0	30.3(417)	23.6(667)	20.9(1429)
			B-3-3	55.0	34.4(417)	26.8(667)	21.0(1429)
	熔着タイプ	第二次	A-1(B)	60.0	26.4(393)	21.6(732)	13.9(1600)
			A-1(B改)	65.0	28.7(350)	21.9(591)	18.4(956)
			A-1(A)	60.0	26.4(402)	21.6(625)	13.9(1361)
			A-1(特A-2)	60.0	30.5(402)	23.5(691)	16.8(1418)
			A-1(特A-3)	65.0	34.1(393)	26.7(633)	20.2(1204)
			A-2（改）	55.0	35.6(381)	29.1(571)	20.9(1242)
			A-3-5	60.0	34.9(339)	26.9(617)	15.6(1680)
			A-3-8	60.0	31.5(400)	24.3(694)	16.6(1575)
			A-6	75.0	34.7(249)	21.8(685)	16.4(1397)
	接着タイプ		B-A1	60.0	26.4(409)	21.6(666)	13.9(1652)
			B-A2	60.0	26.4(373)	21.6(641)	13.9(1142)
			B-B	55.0	36.8(389)	29.0(671)	24.9(1666)
	熔着タイプ	第三次	A-1-F	27.3	50.3(398)	38.3(702)	--------
				54.6	33.1(395)	25.9(702)	--------
			A-2-F	26.2	50.6(394)	38.8(699)	--------
				70.0	27.3(395)	21.3(696)	--------
			A-3-F	26.8	54.8(404)	42.6(702)	--------
				53.6	40.9(395)	31.0(699)	--------
	接着タイプ		B-F	38.9	40.9(402)	30.3(704)	--------
				77.8	23.7(404)	18.2(702)	--------
ネットタイプ	織り曲げタイプ	第二次	A-4-2a	60.0	24.4(389)	20.0(602)	16.1(1025)
			A-4-2b	55.0	34.6(364)	26.0(690)	20.1(1212)
			A-4-4a	57.5	34.1(364)	25.9(671)	19.6(1234)
			A-4-4b	60.0	37.1(389)	27.5(671)	18.1(1666)
	袋詰めタイプ		A-8-3	57.5	28.2(249)	22.6(549)	15.6(1142)
			A-8-4	52.5	32.2(333)	25.6(583)	17.2(1351)
	織り曲げタイプ	第三次	A-4-3F	23.6	54.1(400)	41.9(702)	--------
				47.2	37.8(401)	30.0(694)	--------
			A-4-5F	28.9	57.1(395)	42.5(697)	--------
				57.8	37.0(394)	27.2(702)	--------
	袋詰めタイプ		A-8-F	17.0	62.0(402)	49.6(697)	--------
				34.0	52.5(401)	39.5(687)	--------
編み物タイプ	ハニカムタイプ	第一次	C-3-1	50.0	64.1(400)	50.4(714)	38.5(1429)
			C-3-2	50.0	64.3(400)	49.0(714)	34.3(1429)
			C-3-3	50.0	63.1(400)	47.3(714)	35.6(1667)
			C-3-4	60.0	69.2(400)	54.1(714)	40.4(1429)
	直線タイプ	第二次	C-1（改）	60.0	35.9(361)	26.4(685)	19.1(1399)
	ハニカムタイプ		C-3-5	50.0	49.4(342)	40.5(543)	29.6(1162)
			C-3-6	50.0	44.6(383)	34.9(654)	27.7(1130)
			C-3-7	50.0	51.1(254)	33.4(671)	28.3(1156)
	直線タイプ	第三次	C-1-F	35.0	45.0(404)	34.8(702)	--------
				70.0	27.2(394)	20.7(702)	--------
	ハニカムタイプ		C-3-F	32.1	57.8(404)	43.9(702)	--------
				64.2	38.8(401)	30.2(702)	--------
織物タイプ	テープ材編み付けタイプ	第二次	D-3(1)	55.0	37.3(428)	32.3(588)	21.8(1242)
			D-3(2)	60.0	38.4(401)	32.2(593)	24.4(1010)
	波形タイプ	第三次	D-1-F	20.0	64.0(403)	46.9(702)	--------
				57.5	40.7(402)	32.5(694)	--------
	テープ材編み付けタイプ		D-3-F	20.0	59.2(397)	46.5(703)	--------
				60.0	41.3(397)	31.2(703)	--------



図－3.21　実験ケース2および侵食実験で用いた矩形管水路

定床に置き換えて，上流端から下流端までシートを敷設して，一定流量の通水時における流速およびレイノルズ応力分布をレーザー流速計を用いて測定した。実験に用いたシートの名称と通水した一定流量について表−3.3にまとめて示す。測定個所は侵食実験区間の下流端から1.5m 下流(水路上流端から13.5m)の位置である。この位置では概ね境界層が発達しきっており，準等流としてデータ整理を行うことができる(詳細については4.1.3参照)。シート上流れについては，流下方向と鉛直方向の 2 成分同時計測を行い，レイノルズ応力分布を得た。シート内流れについては，水路床に設けた窓から鉛直上方に向かってレーザーを照射して流れ方向成分のみの流速測定を行った。このような計測を行ったのは，流速測定のためシートに設ける穴を流れ方向の長さ約 5 cm，幅 3 ～ 4 mm のスリットとすることで，ケース 1 のようなキャビティー流れの形成を抑制して，シート内の流速分布をより精度良く測定するためである。シート表面の位置に作用するせん断力（レイノルズ応力）u_{*0}^2は，上記の測定によって得たレイノルズ応力分布を外挿することにより推定した。また，各通水時に図−3.21に示した位置に設置したマノメータによって動水勾配の測定も行った。それらの結果を表−3.3に併記した。

表−3.3　シートの限界流速評価のための実験ケース

タイプ		シート名	厚さ	平均流速	動水勾配		シート表面でのせん断力	最小必要厚さ	カルマン定数	無次元限界
大区分	小区分		(mm)	(m/s)	流速測定	侵食実験	u_{*0}^2(cm^2/s^2)	t_c(mm)	(補正値)	掃流力
ヘチマ	熔着	A-1-F	27.3	0.85	0.00116	0.00124	55.1	19.0	0.38	0.030
				1.0	0.00196	0.00177	78.1	22.1		
				1.5	0.00346	0.00329	155.9	-------		
		A-2-F	26.2	1.0	0.00170	0.00127	67.6	12.7	0.36	0.045
				1.5	0.00347	0.00274	155.3	26.3		
				2.0	0.00553	0.00429	266.5	-------		
		A-3-F	26.8	1.5	0.00320	0.00282	130.3	15.5	0.33	0.060
				2.0	0.00573	0.00491	236.6	21.7		
				2.5	0.00854	0.00777	370.5	-------		
	接着	B-F	38.9	1.0	0.00152	0.00149	78.3	9.7	0.36	0.060
				1.5	0.00352	0.00312	185.6	17.9		
				2.0	0.00630	0.00571	319.3	-------		
ネット	織り曲げ	A-4-3F	23.6	1.0	0.00175	0.00136	57.5	16.8	0.34	0.030
				1.5	0.00313	0.00250	130.0	28.5		
				2.0	0.00549	0.00432	235.5	-------		
		A-4-5F	28.9	1.5	0.00297	0.00238	123.8	8.8	0.31	0.030
				2.0	0.00501	0.00450	214.3	22.3		
				2.5	0.00787	0.00777	337.0	-------		
	袋詰め	A-8-F	25.0	1.0	0.00147	0.00143	59.3	21.6	0.35	0.060
				1.5	0.00280	0.00265	139.7	34.5		
				2.0	0.00496	0.00477	231.2	-------		
編み物	直線	C-1-F	35.0	1.0	0.00160	0.00144	66.1	17.0	0.33	0.060
				1.5	0.00325	0.00277	149.7	33.0		
				2.0	0.00582	0.00532	260.0	-------		
	ハニカム	C-3-F	32.1	1.5	0.00240	0.00221	108.6	16.8	0.29	0.030
				2.0	0.00422	0.00427	197.9	21.2		
				2.5	0.00632	0.00706	312.2	-------		
織物	波形	D-1-F	22.9	1.0	0.00100	0.00103	48.9	9.1	0.30	0.030
				1.5	0.00237	0.00238	114.0	20.2		
				2.0	0.00397	0.00418	191.2	-------		
	テープ材編み付け	D-3-F	12.9	1.0	0.00114	0.00142	51.7	10.1	0.36	0.030
				1.5	0.00244	0.00247	108.9	-------		
				2.0	0.00434	0.00447	208.1	-------		

⑵　KがRₑによって変化する場合のモデルの適用性

ここでも，3.3.2に示した透過係数の場合と同じく，ヘチマ－接着型タイプであるB－1，2，3シリーズ（第一次）についてまず検討を加える。3.3.1⑶に示した透過係数Kのモデルを3.2.2に示した流れ場モデルに組み込み，$\kappa=0.4$としてシート内の流速分布およびレイノルズ応力分布を数値積分（ルンゲ－クッタ法）によって求めた。その際，u_∞およびψ_0は式(3.5)，(3.11)に示した式の換わりに式(3.22)を用いる。

$$u_\infty=\frac{K_\infty}{\lambda_p}\left[\left(1+\frac{\gamma}{4C_{D\infty}}R_{e\infty}^{-1}\right)^{0.5}-\left(\frac{\gamma}{4C_{D\infty}}R_{e\infty}^{-1}\right)^{0.5}\right]^2 i^{0.5} \qquad (3.22)$$

$$R_{e\infty}=\frac{K_\infty i^{0.5} d}{\lambda_p \nu} \qquad \psi_0=\frac{u_0}{\ell}\left(\frac{du}{dz}\right)_{z=0}^{-1}$$

その計算値と実験値（ケース１）とを比較した結果を**図－3.22**に示す（なお，$C_{D\infty}$，γは**表－3.1**に示した値を用いた）。まず，シート上での流速分布に着目すると，対数則によって良好に近似できていることが確認できる。したがって，粗度についても良好に推定しうることが期待できる。それについて確認するため，水深方向の平均流速の実験値と計算値を比較した結果を**図－3.23**に示す。±15%以下の予測誤差となるのが全体の90%を占め，また最大でも±20%程度の誤差であることが分かる。透過係数が一定値である場合（**図－3.5**参照）に比較すると予測誤差が大きいようであるが，シート諸元（構成材の代表径dと空隙率λ_p）と水面勾配を系統的に変化させても，比較的良好な予測結果が得られることが分かった。

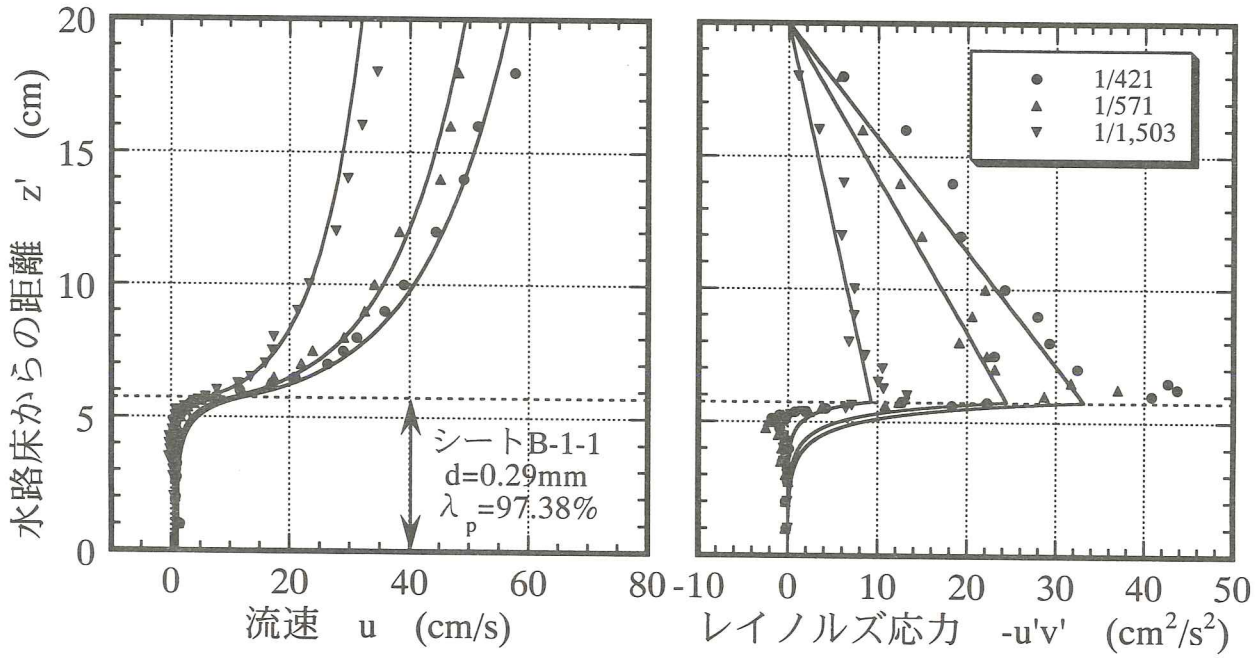
次に，シート内の流速分布に着目すると，Kが小さい（つまりシートの抵抗が大きい）B－1シリーズなどでは，逆流が明確に認められる。この原因はシートの抵抗が大きくシート内流れが小さい場合ほど，流速測定のために設けた穴のなかでキャビティー流れと似た流況が生じやすいためと推察される。そのため，測定された流速値が予測値より小さくなる場合が多い。しかし，比較的Kが大きい（抵抗が小さい）シートでは，例えばB－2－2のようにシート内でも計算結果と実験値が良好に一致していると思われる。キャビティー流れの抑制を狙ったV型切り込みを行ったB－Fシートの流速分布およびレイノルズ分布の測定結果と計算結果を**図－3.24**に示す。B－2－2と同様に良好に一致していることが確認できる。

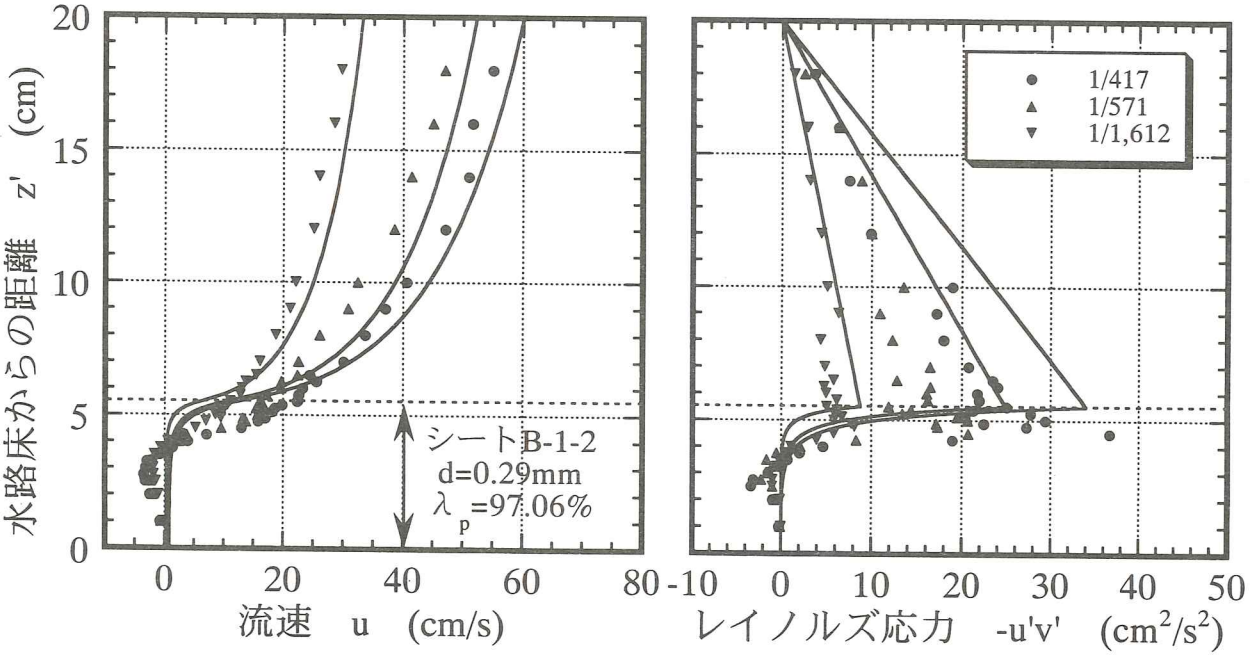
さらに，**図－3.24**において水路床近傍の分布形状に着目すると，**図－3.4,3.8**に示したKが一定の場合の結果と同様に，固定床近傍においても計算値が測定値と良く一致しており，3.2.2に示した地表近傍での近似的取り扱いが有効であることが分かる。以上より，透過係数Kがレイノルズ数R_eに応じて変化する場合にも3.2.2に示した混合距離モデルが適用できると判断される。上記のような適用性が得られたのは，「厚さ方向の流速分布u(z)を用いて局所的レイノルズ数$R_e=u(z)\cdot d/\nu$を求め，その値に応じてKを厚さ方向に変化させる」というモデル化が妥当であったためと考えられる。

⑶　各シートへの適用性（ケース１によるκの調整）

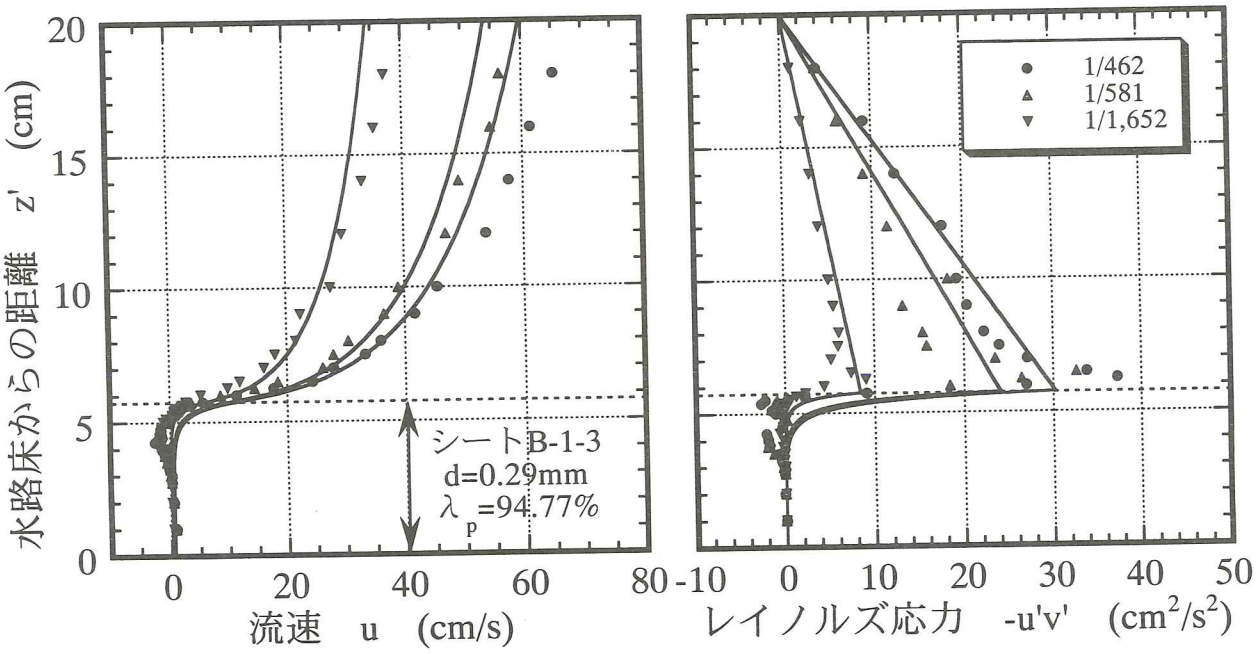
ヘチマ－接着型タイプの第二，三次シート（Bシリーズ）について水深方向の平均流速の実験値と計算値を比較した結果を**図－3.25**に示す。第一次シートと同様に±15%以下の予測誤差内に収まっていることから，透過係数Kが一定の場合（3.2.3参照）と同様に$\kappa=0.4$として良好な予測結果が得られると判断できる。同様な結果は，**図－3.26～3.30**に示すようにヘチマ－熔着タイプ，ネット－折り曲げタイプ，編み物－直線タイプ，織物－波形タイプ，織物－テープ編み付けタイプで得られた。

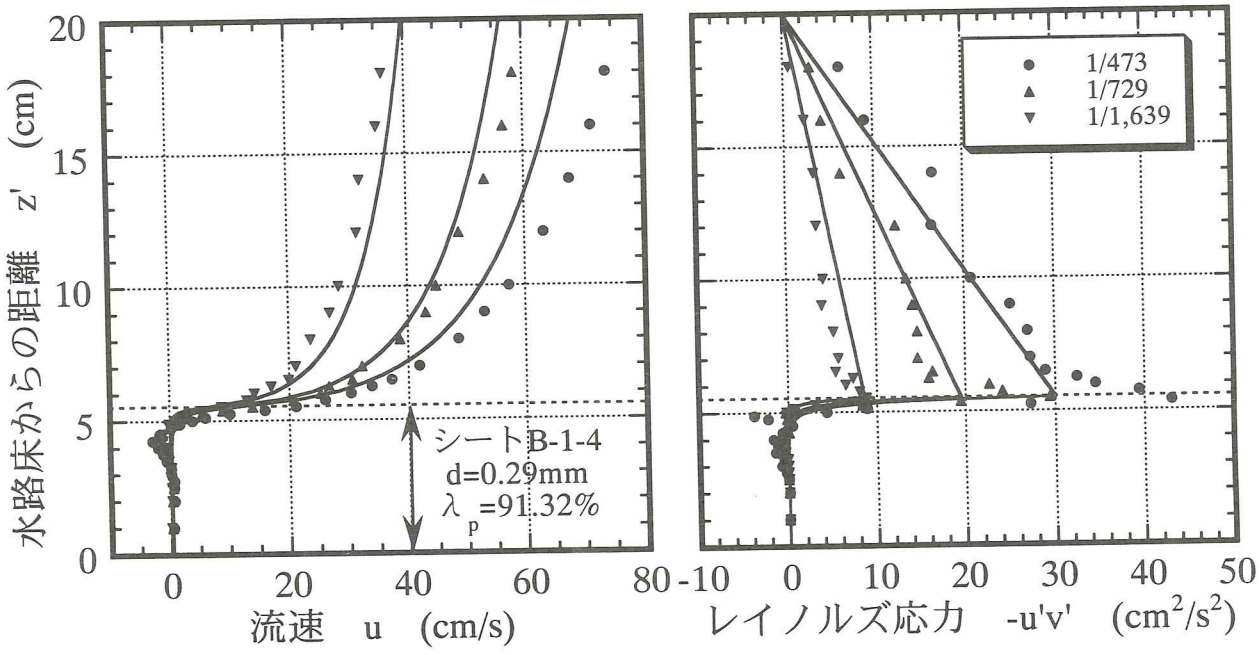
図－3.31に示すネット－袋詰めタイプでは，3種類のシートのうちA－8－3のみ20%以上の誤差になっ



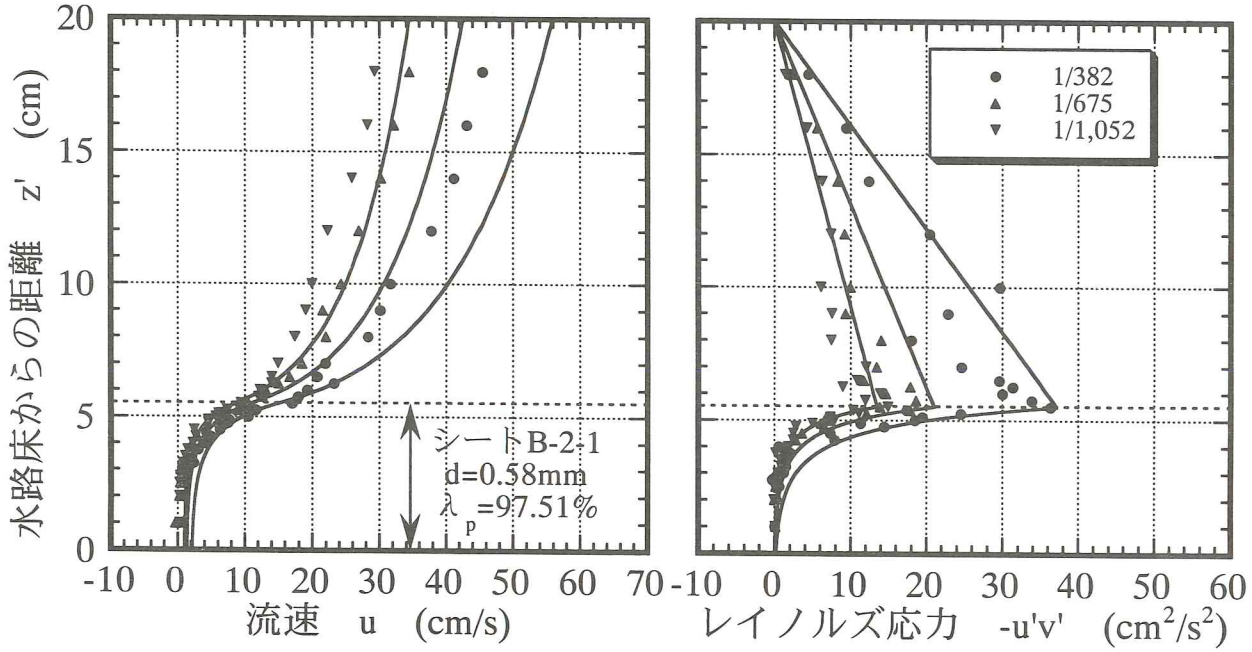


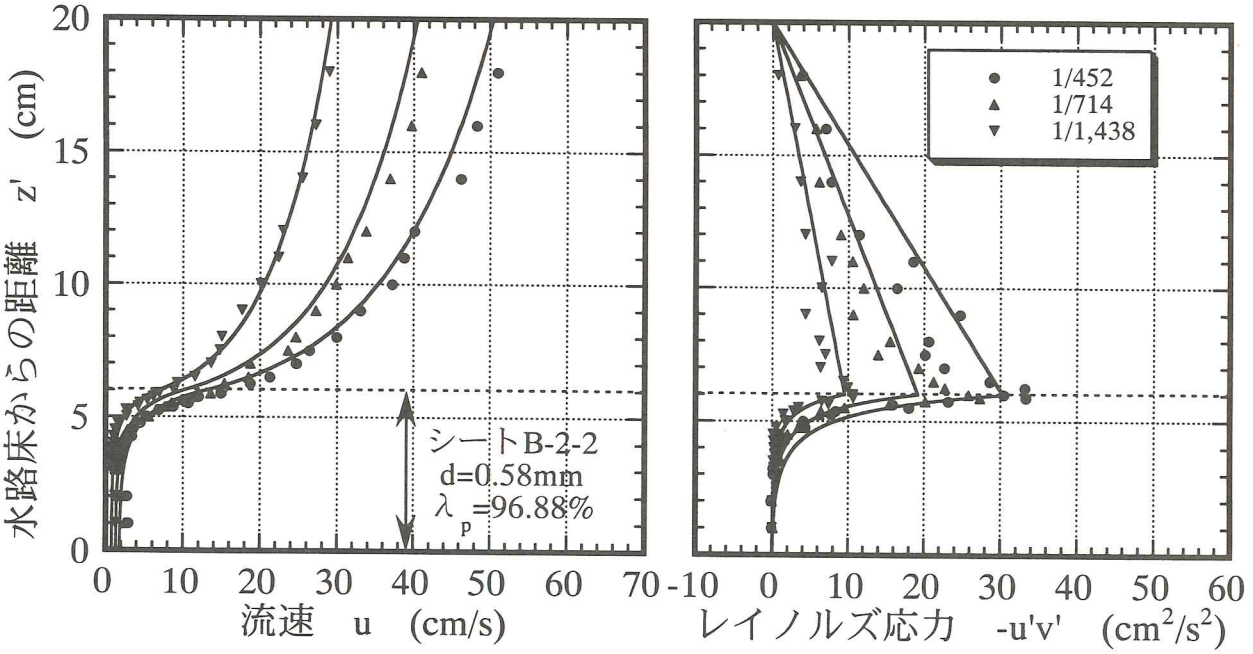
図－3.22a)(1)　流速分布とレイノルズ応力分布の比較(B －1シリーズ)



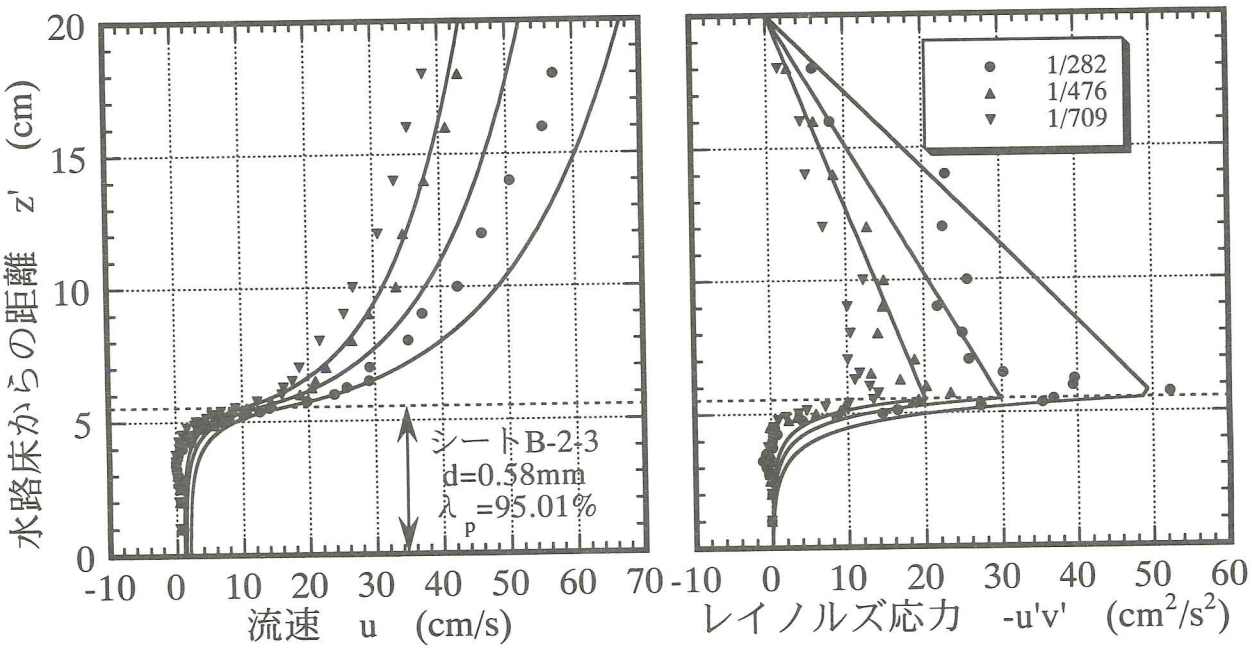


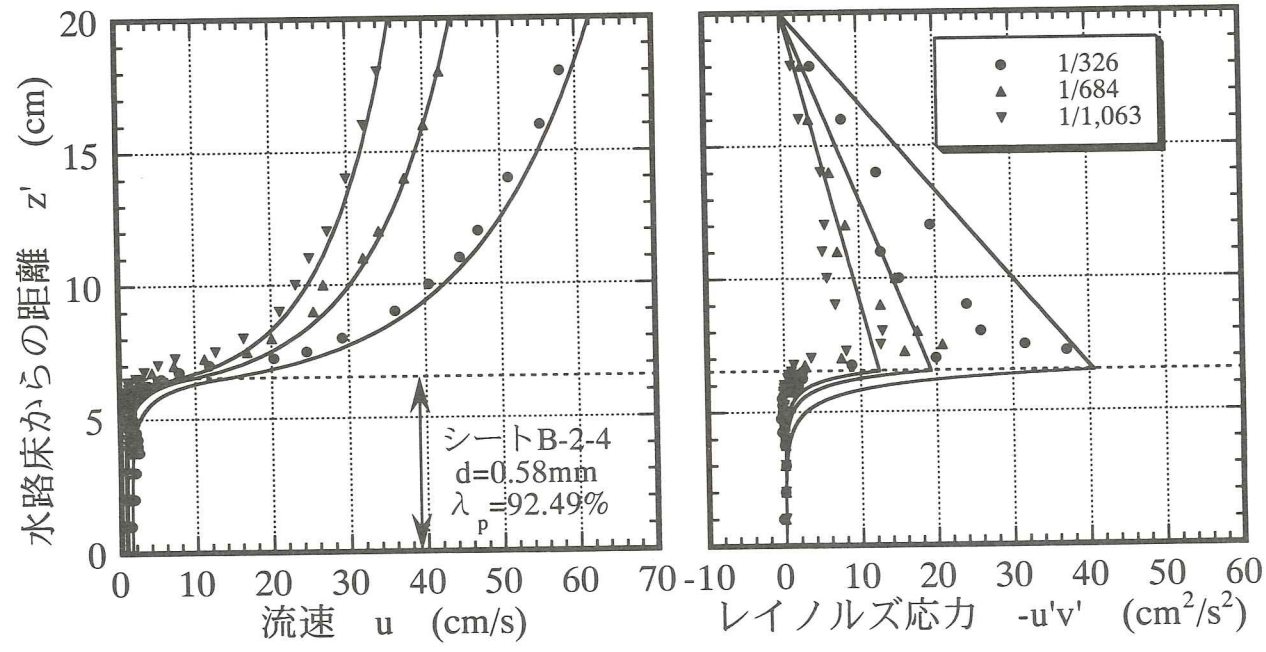
図－3.22a)(2)　流速分布とレイノルズ応力分布の比較(B －1シリーズ)



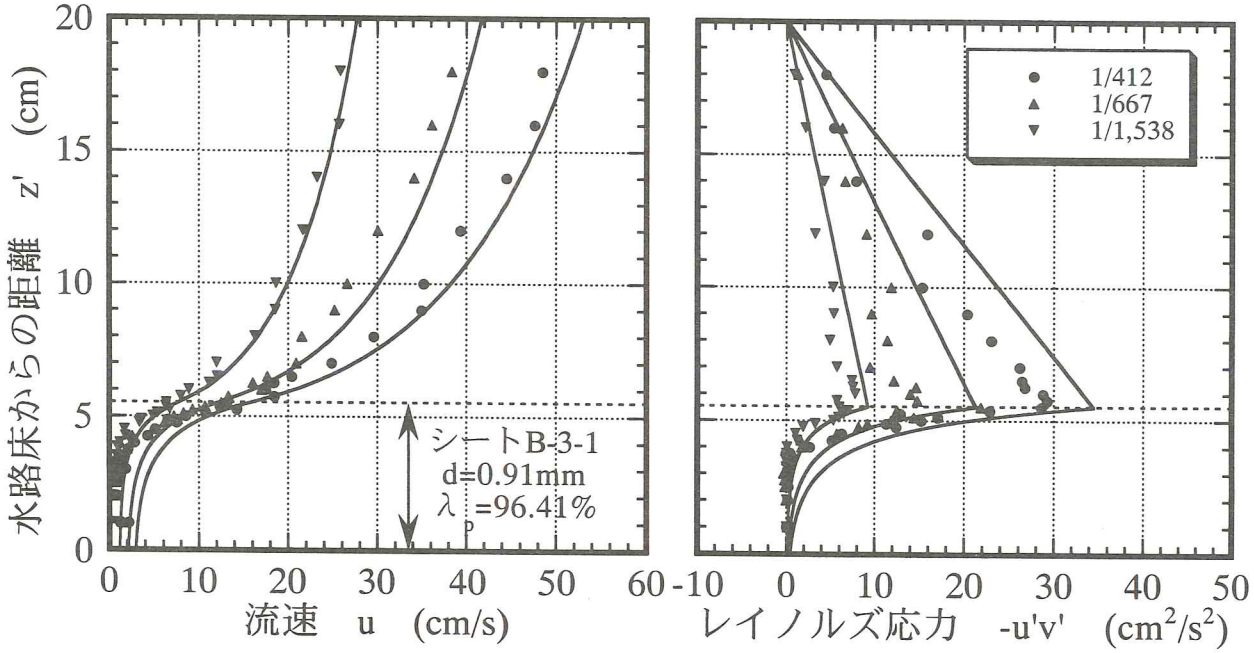


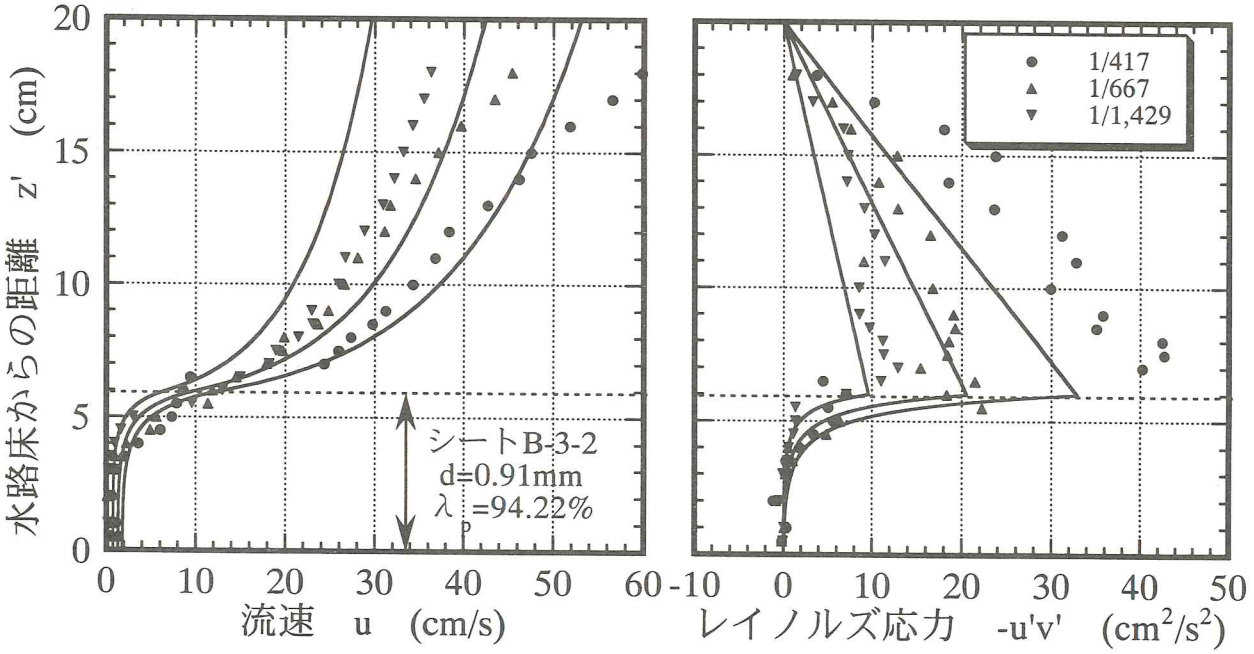
図－3.22b)(1)　流速分布とレイノルズ応力分布の比較(B －2シリーズ)



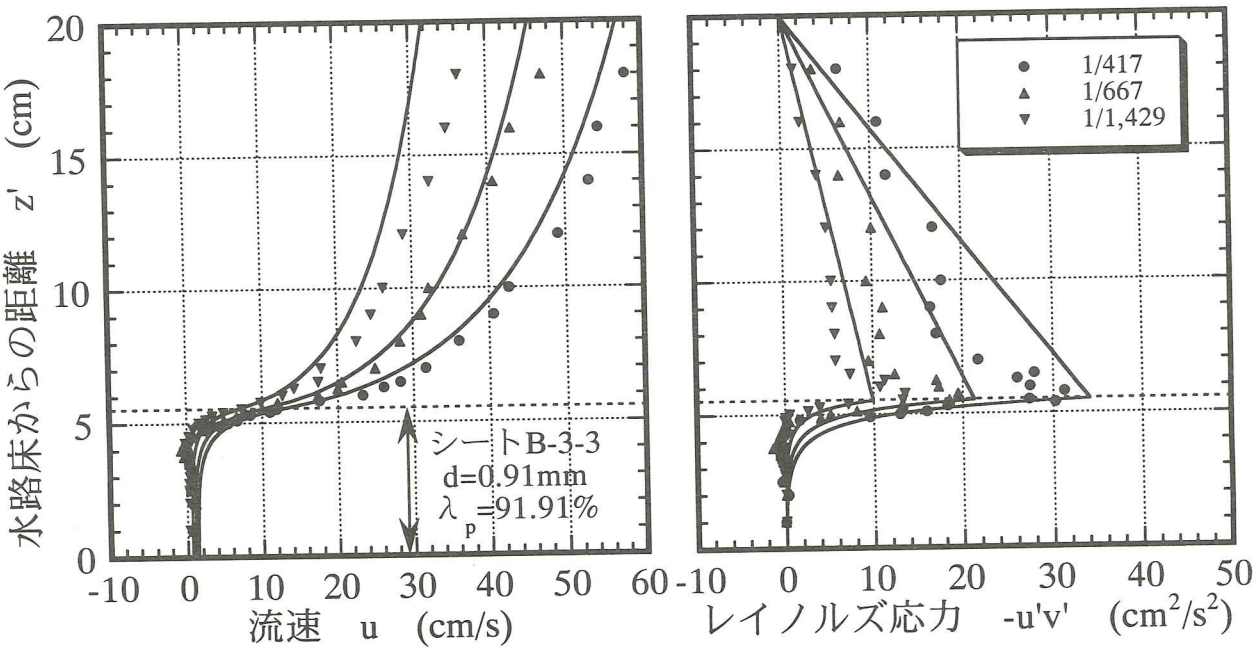


図－3.22b)(2)　流速分布とレイノルズ応力分布の比較(B －2シリーズ)

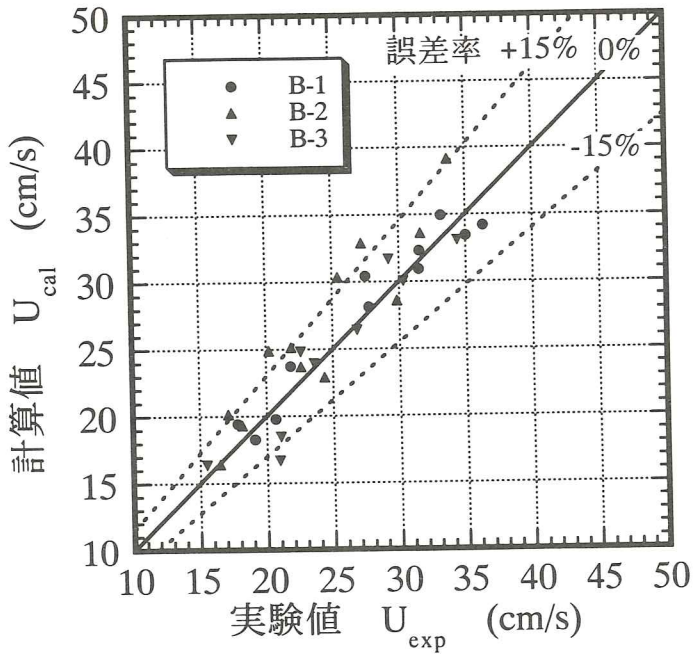




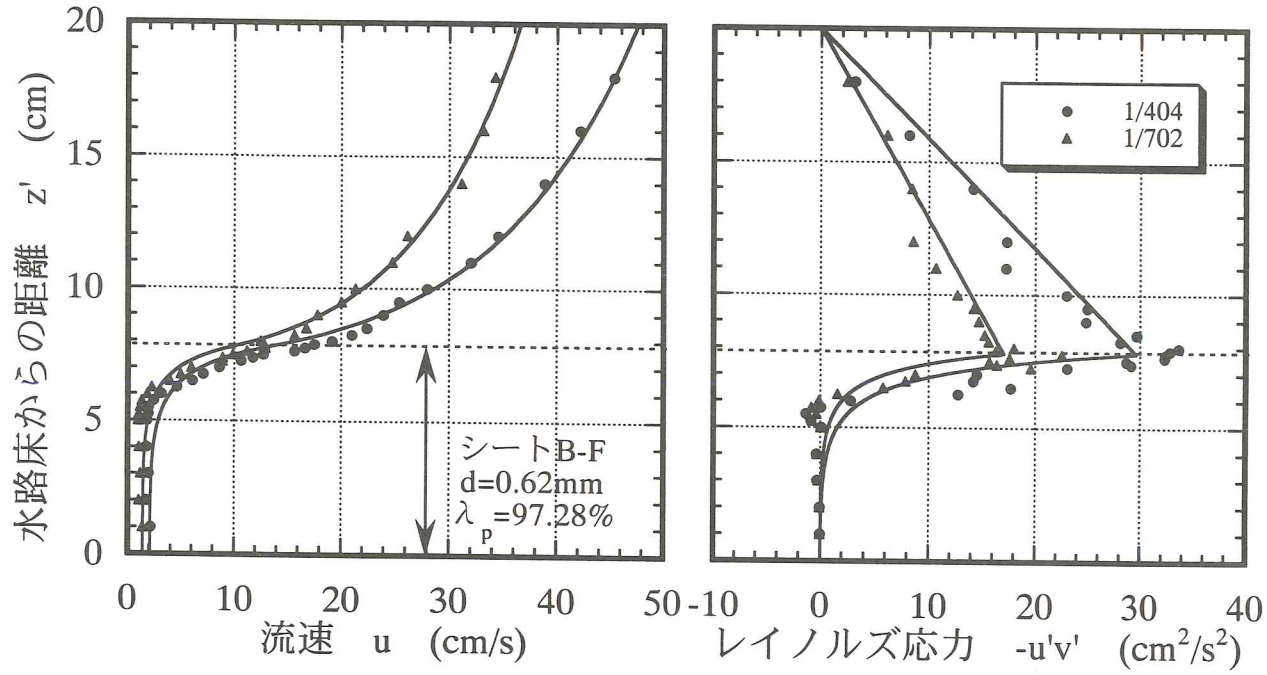
図－3.22c)(1)　流速分布とレイノルズ応力分布の比較(B －3シリーズ)

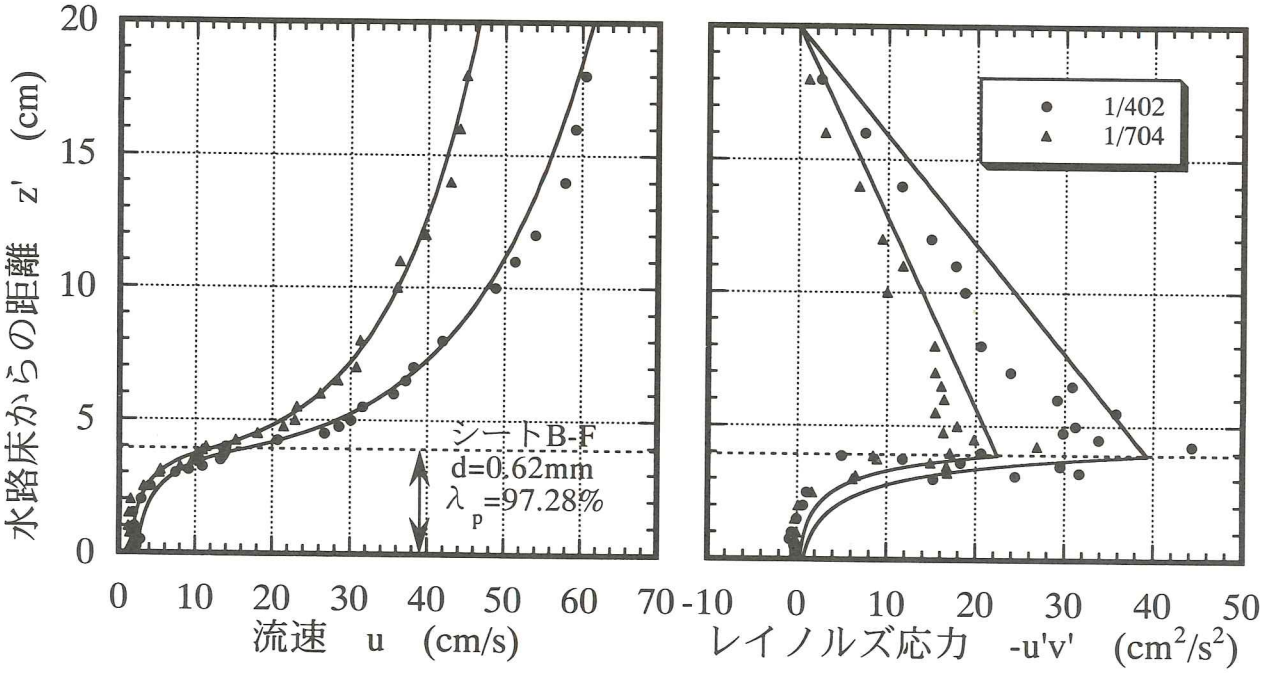


図－3.22c)(2)　流速分布とレイノルズ応力分布の比較(B －3シリーズ)

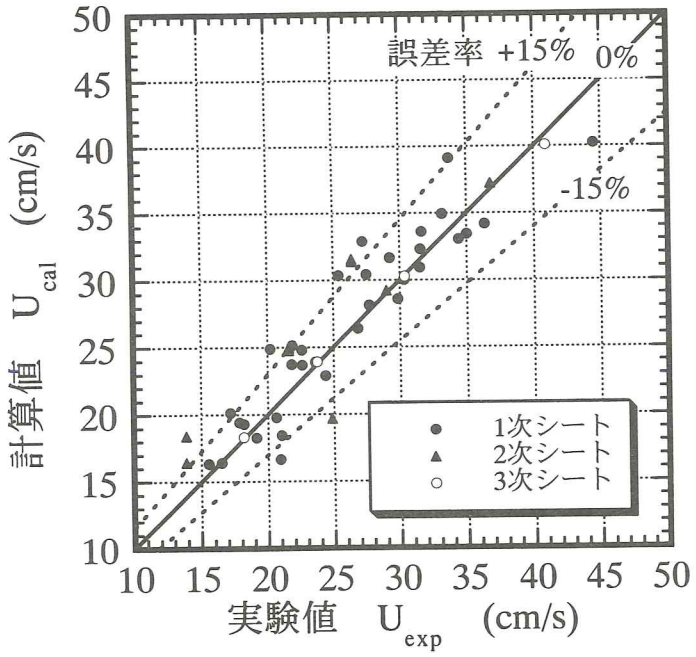


図－3.23　水深方向の平均流速の比較(ヘチマー接着タイプ：B シリーズ：第一次)

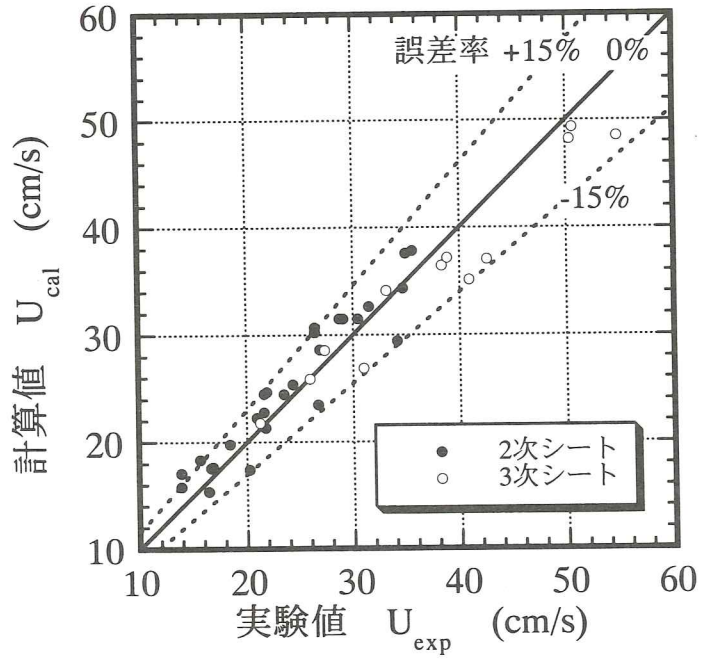




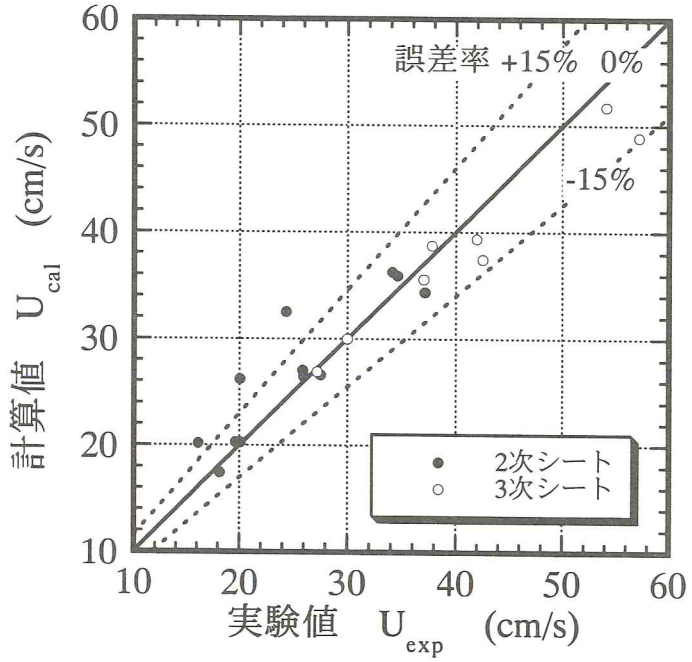
図－3.24　流速分布とレイノルズ応力分布の比較(B － F)



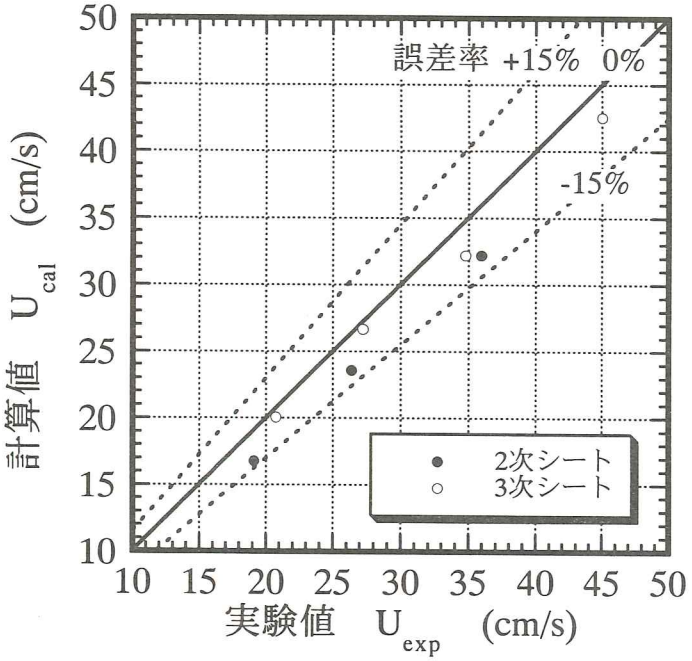
図－3.25　水深方向の平均流速の比較(ヘチマー接着タイプ：Bシリーズ：第二，三次)



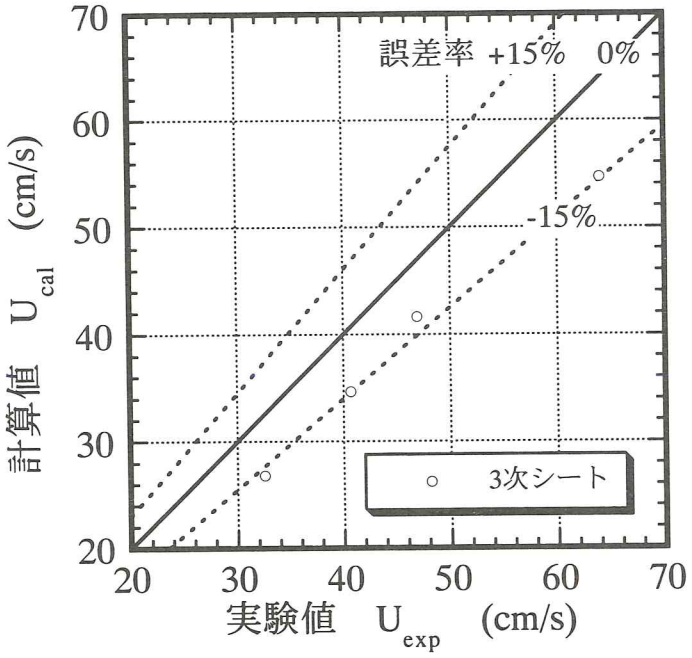
図－3.26　水深方向の平均流速の比較(ヘチマー熔着タイプ：A－1,2,3,6シリーズ)



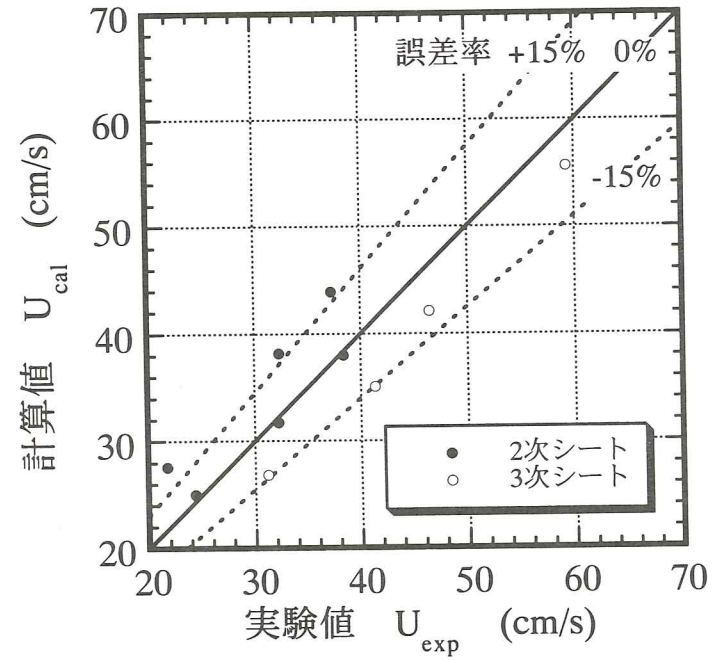
図－3.27　水深方向の平均流速の比較(ネットー折り曲げタイプ)



図－3.28　水深方向の平均流速の比較(編み物－直線タイプ)



図－3.29　水深方向の平均流速の比較(織物－波形タイプ)



図－3.30　水深方向の平均流速の比較(織物－テープ編み付けタイプ)

ているため，上記と同様に判断して良いか見きわめがたい。しかし，図－3.16に示したC_DとR_eの関係を見直すと，A－8－3が他の3倍程度大きなC_D値になる結果となっている。これら3種類は構造的にはほぼ同一であるので，上記のようなC_Dの差違が生じる理由はよく分からない。仮にA－8－3の実験にミスがあり，実際にはA－8－4と同等のC_Dになると仮定して，A－8－4の$C_{D\infty}$，γを用いてA－8－3の実験について計算し直した結果を図－3.31に併記した。このような仮定の場合，A－8－4と同程度の誤差になることから，A－8－3についてはC_DとR_eの関係について再度実験し直して，その結果に基づいて誤差率について再評価すべきと思われる。したがって，ここでは，A－8－3を除いて考えると，$\kappa=0.4$として良いと判断される。しかし，実験ケース数が少ないため，今後ケース数を増やし，再確認する必要がある。

以上において検討対象としたシートでは，±15%以下の予測誤差を期待するならば，$\kappa=0.4$と考えて良いことが分かる。しかし，$\kappa=0.4$では明らかに予測精度が低くなったのが，編み物－ハニカムタイプ（C－3シリーズ）である。このタイプの水深方向の平均流速の実験値と$\kappa=0.4$および$\kappa=0.34$とした計算値を比較した結果を図－3.32に示す。$\kappa=0.4$の場合ではほとんどのケースで－15%以下の誤差となり，計算値が過小であることが明らかである。このタイプのC_DとR_eの関係（図－3.17参照）では，ネット－袋詰めタイプ（A－8シリーズ）のようなばらつきがなく，同一の関係式で近似できたことを考えると，C_Dの測定誤差などのミスの可能性を疑うのは難しい。$\kappa=0.34$ではどのケースでも±15%以下の予測誤差内に収まること，さらに一例としてC－3－Fについて流速分布とレイノルズ応力分布の実験および計算結果を図－3.33に示すように両者が良好に一致することから，何らかの理由でκが小さくなる機構があると考えるべきと思われる。現時点では理由が明確ではないが，このタイプに特徴的な構造は，シート表面に1～3 mm程度の比較的幅広の網目がハニカム型を構成しつつ密に分布していることが挙げられる。この部分がシート内外に渡る組織渦による運動量輸送を抑制する効果（例えば，網目の抵抗で水深方向の乱れ流速成分を小さくする，またはハニカム型であることが渦のスケールを小さくする効果など）を発揮していると考えている。しかし，ネット－折り曲げタイプではシート表面にハニカムに近い形状の平面ネット（ハニカムの一辺の長さは上記タイプよりかなり小さい）が設置されており，この点において上記タイプと似た構造であるのに$\kappa=0.4$で良好な結果が得られたこともあり，今後より詳細な検討を要すると思われる。

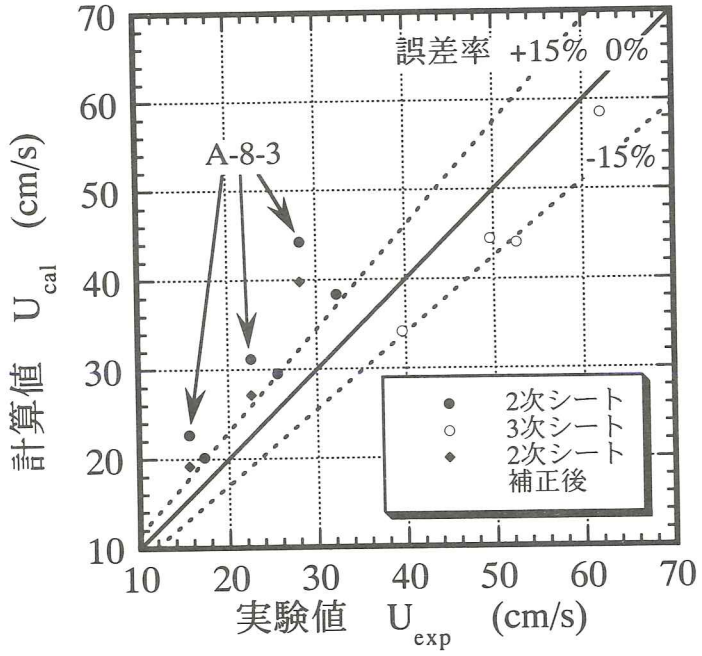
以上のように幾つかの課題が残ったが，本研究では編み物－ハニカムタイプのみ$\kappa=0.34$とし，他のタイプは全て$\kappa=0.4$とすることとした。

(4) 実際の出水で生じうる高流速（高レイノルズ数R_e）でのモデルの適用性（ケース2の結果）

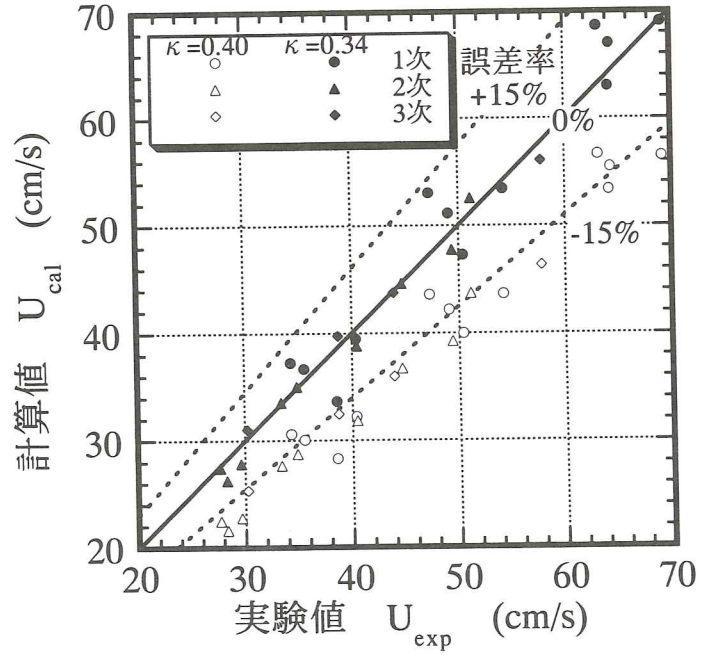
ケース1の実験で調整したκを用いて，ケース2の水深方向の平均流速の実験値と計算値（境界層が発達しており，対数則と良く一致する（3.2.3参照）シート上面から水深20cmまでの範囲）を比較した結果を図－3.34に示す。計算結果は小さめの値（平均で約15%のズレ）となっている。ズレの大きさとシートタイプには特に明確な関係が見られない。

比較的ズレが小さかったB－Fについて流速分布を比較した結果を図－3.35に示す。シート近くでの流速の急激な変化を概ね良く再現できていると思われる。しかしながら，計算値は実験結果に比べて流速の増加勾配du/dzが小さめになっている。そのため，シート上では流速が過小評価になるが，シート内では大きめの評価（特に底面近く）になる傾向が見られる。

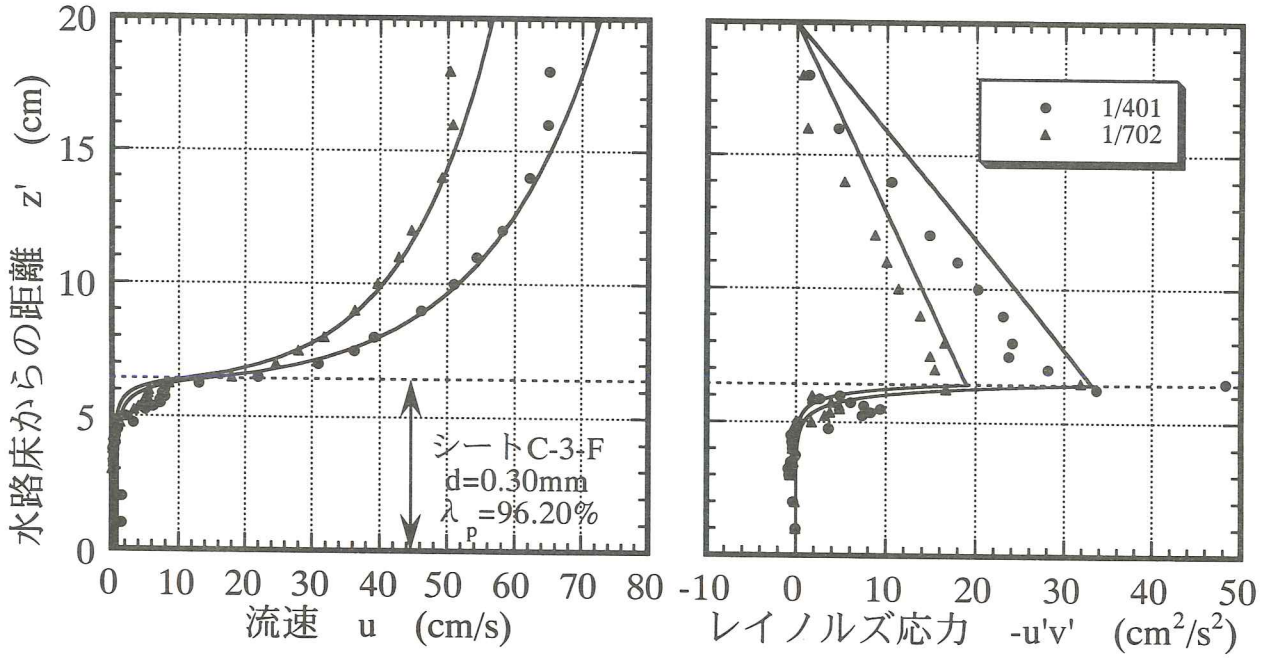
このようなズレはκの値を小さくすることで補正可能である。B－Fについて実験結果と良く一致するようにκを調節して再計算した結果を図－3.35に併記した。平均流速で比較すると$\kappa=0.4$では10%程度の

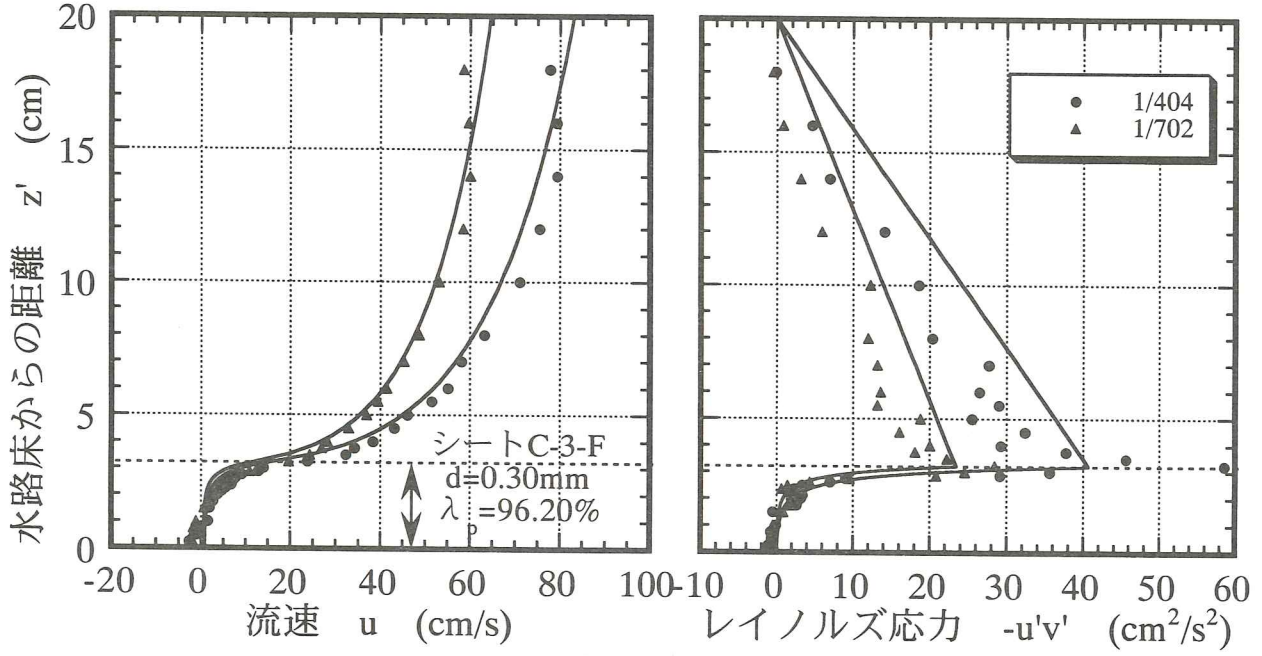


図－3.31　水深方向の平均流速の比較（ネット－袋詰めタイプ）

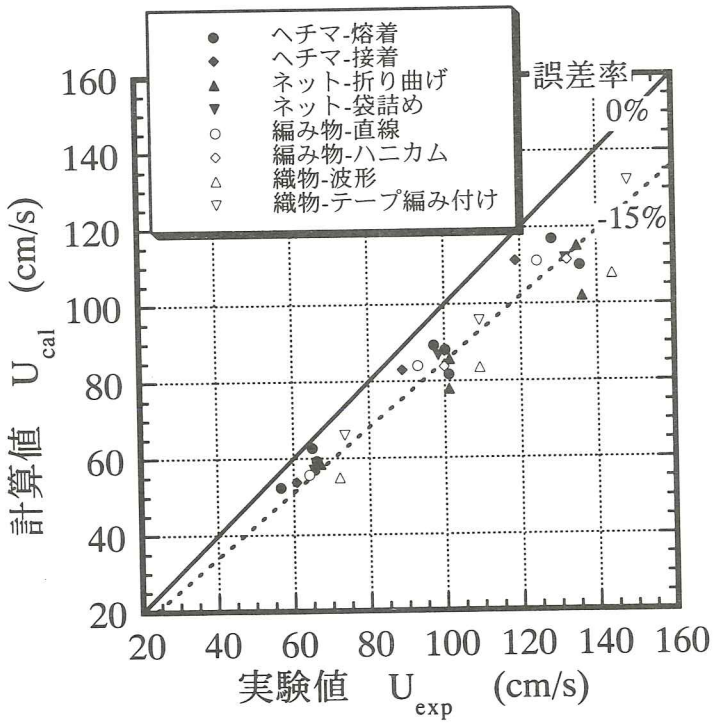


図－3.32　水深方向の平均流速の比較（編み物－ハニカムタイプ）





図－3.33　流速分布とレイノルズ応力分布の比較(C －3－ F)

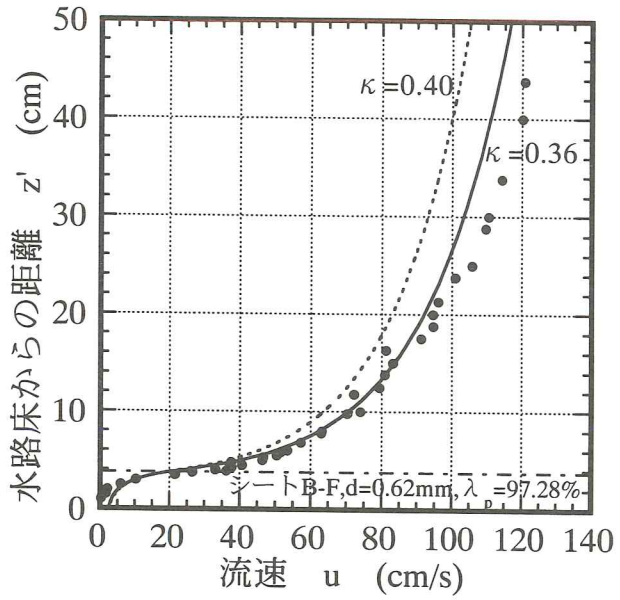


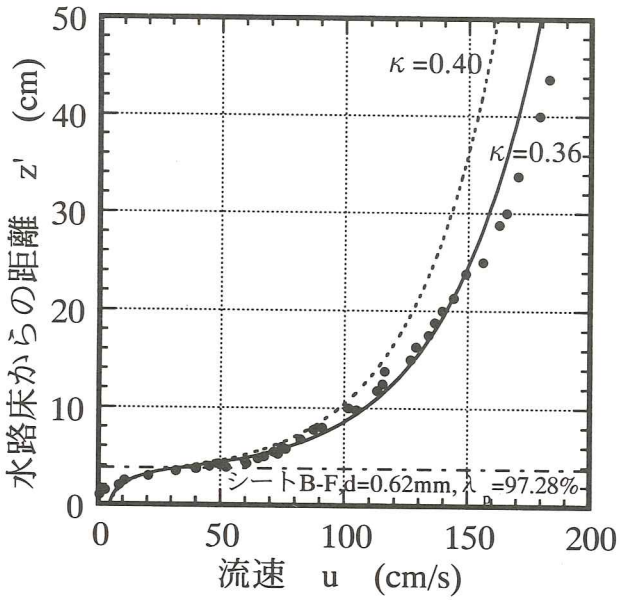
図－3.34　水深方向の平均流速の比較(ケース2)

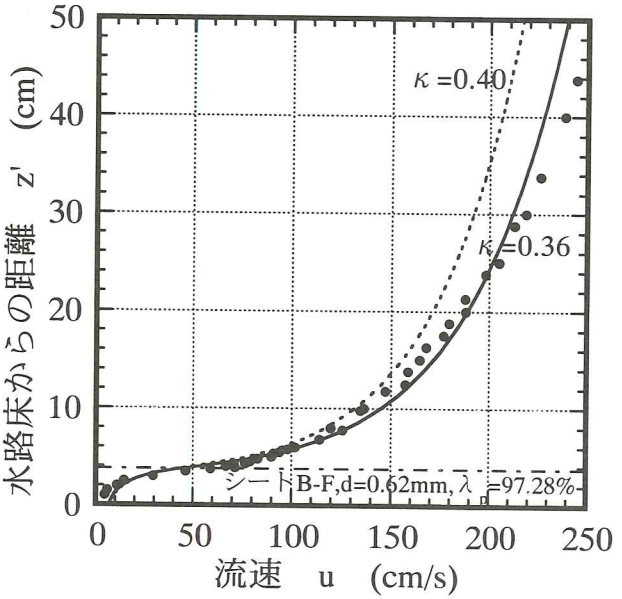
過小評価であったが，$\kappa=0.36$とすると約１％までズレを小さくすることができた。流速の増加勾配 du/dz についてもズレの大きかったシートの表面周辺で良好に一致するようになった。他のシートについても同様な調節をして求めたκの値を表－3.3に併記した。何れの場合も0.4より小さくなった。山田ほか[19]は，多孔質体としてガラス玉を敷き並べた層を用いた実験を行い，粒子レイノルズ数（ガラス玉の粒径と多孔質体表面に作用する摩擦速度を代表スケールとしたレイノルズ数）の増加に伴ってκが小さくなることを明らかにしている。ケース１に比べて高流速，すなわち高レイノルズ数での実験であるケース２では，山田ほかの実験と同様にκが小さくなっているとも類推できる。以上より，κの調節が有効であると考えられる。

3.3.3　シートの限界流速評価への適用性

実験ケース２を良好に再現するためにはκの調整を行うのがよいが，シートの限界流速の評価に用いることを考えた場合，κの調整が適切であるかは別途検討する必要がある。本研究で用いたモデルには，3.2，3.3に示した仮定が含まれており，その不備でズレが生じているとも考えられる。特に透過係数Ｋが一定の場合ではかなり良好な計算結果が得られたにも関わらず，Ｋをレイノルズ数に応じて厚さ方向に変化させたシートの場合では，±15%のズレ(ケース１)が生じるようになった。したがって，シートの場合にはＫの変化に関わるモデル化が不十分であった可能性が考えられる。また，そのズレの大きさは，ケース２の過小評価の程度(15%)とほぼ一致する結果となっている。したがって，山田ほか[19]が指摘したようにκがレイノルズ数の増加に伴って実際に小さくなっていたとしても，本研究で用いたモデルでは，それによって生じるズレとモデルの不完全さによって生じるズレが同程度であるため，κの調整のみでズ







図－3.35　流速分布の比較(B － F：ケース2)

レを解消することに合理性が見いだせない。κがシートの構造やレイノルズ数によって変化する機構が十分に理解されていないこと，ケース２のように流速測定によって得たレイノルズ応力分布からシート表面に作用するせん断力を推定する(3.3.2(1)参照)など実験にどうしても含まれる誤差の影響も考慮すると，κとしてケース１で定めた値を用いるのが妥当と考えられる。

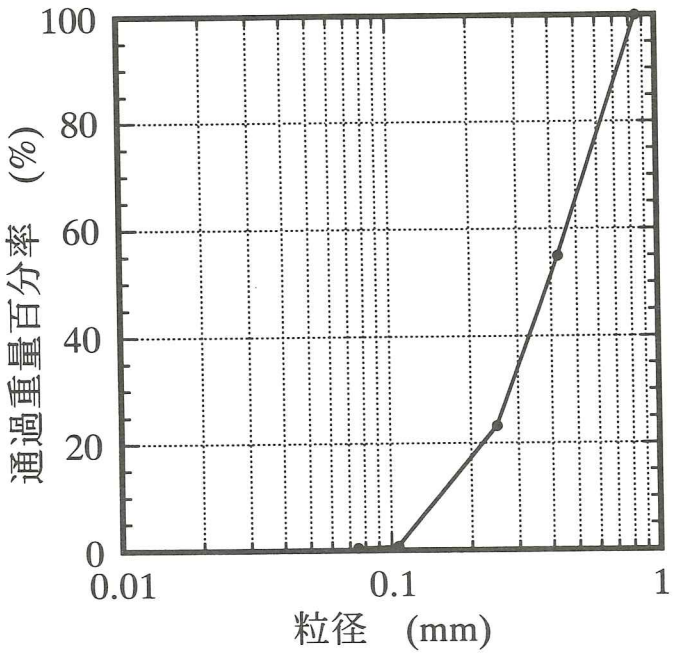
その場合，15%程度の過小評価(限界流速の設定の観点からは安全側の評価)になる傾向が見られること，流速分布を概ね良好に再現し得ていることを考慮すると，提案したモデルによってシートの限界流速を0.5(m/s)刻みでの評価([限界流速の最大値４(m/s)]×[計算のズレ15%])することが可能である。侵食防止工の設計において代表流速を推定する場合でも，±0.5（m/s）程度の精度で十分に行えると思われるので，上記の刻みで限界流速の評価を行えば実用上十分と判断される。

3.4　シートに被覆された地表面の侵食特性と侵食限界の設定

本節では，実大スケールでの侵食実験の結果に基づいて，シートに被覆された地面の限界掃流力と最小必要厚さの設定法を提案する。

3.4.1　侵食実験の概要

限界流速の評価法に関する基本的考え方(3.1参照)に基づいて，図－3.36に示す粒度分布を有する砂(平均粒径 D_m＝0.43mm，水中比重 s＝1.67）を移動床材料とした侵食実験を行った。この移動床材料は，シルト～粘土(粒径0.075mm 以下)の含有量が0.5%程度とごく微小であるため粘着力が発揮されない。本研究で用いた堤防盛土などにも用いられている購入土砂では，平均粒径が上記材料より小さいが，図－4.17，5.1，5.5，5.8に示すようにシルト～粘土(粒径0.075mm 以下)含有率が約10%以上となっている。また，宇多ほか[24] による堤防のり面の土質調査結果によると，シルト～粘土が15%以上含有される砂質土



図－3.36　侵食実験に用いた移動床材料の粒度分布

や細粒土であった場合が多い。以上を踏まえると，本実験で用いる移動床材料は，堤防のり面を非粘着性土が構成する場合に相当する，最も耐侵食力が小さい場合に属すると推察される。したがって，上記の移動床材料を用いた本実験は，耐侵食力(限界掃流力)の再現性が確保できるとともに，充填土砂が非粘着性である場合に相当する最小の限界流速の評価に適していると考えられる。

実験水路は，実際の出水と同程度の高流速での実験が可能な矩形管水路を用いた(3.3.2に示した実験と同一の水路，**図－3.21**参照)。侵食実験区間に設置された鋼製枠内に，隣接する固定水路床（ステンレス製)と同一平面になるように移動床材料を設置･整形した後，第3次シートを敷き詰め，さらに侵食実験区間とその上下流50cm 程度の範囲においてシート内に移動床材料を充填し，シート表面と地表面とが一致するように整形した。上記を初期河床として一定流速を所定の時間通水した後に侵食深の測定を行うことを5回繰り返して，トータル通水時間700（min）までの侵食深の経時変化を得た。侵食深の測定は，侵食実験区間において幅60cm，長さ140cm の範囲を対象として10cm 間隔（全105点）で実施した。平均侵食深はこれら全点での測定値の平均として求めた。また，各通水時に**図－3.21**に示した位置に設置したマノメータによって動水勾配の測定も行った。実験に用いたシートの名称と通水した一定流速について**表－3.3**にまとめて示す。流速を0.5（m/s）刻みに段階的に大きくすることを基本として，3流速での通水を各シートで行った。最大流速は，トータル通水時間が700（min）に達する以前に平均侵食深がシート厚さを上回るようになる最小の流速となるように設定した。

3.4.2　シートの侵食防止特性と限界流速の評価に用いるシート厚さ

(1)　平均侵食深の経時変化に見られる植生の侵食防止効果との類似性

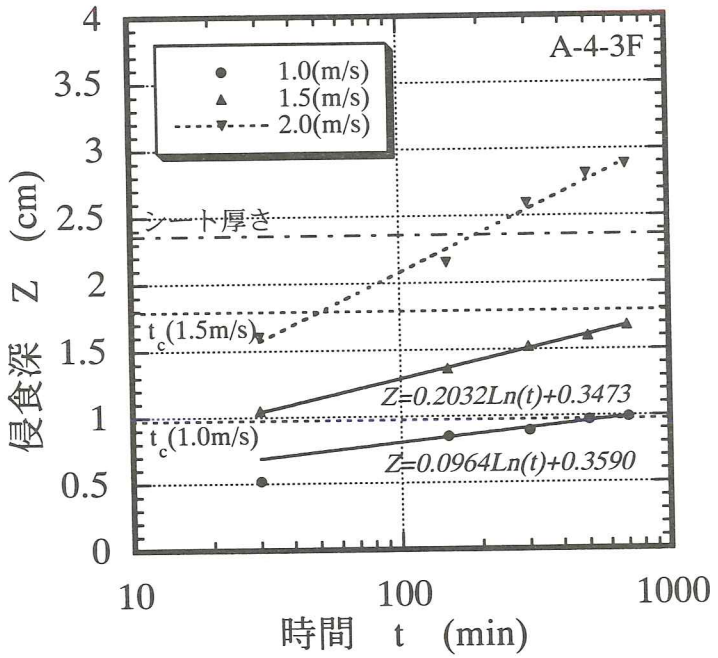
侵食深の経時変化を測定した結果の一例（A－4－3F，A－4－5F）を**図－3.37**に示す。侵食深は通水時間とともに増加するが，その増加量は時間の経過(または侵食深が大きくなる)にともなって小さくなっている。このような特徴は，**図－1.3**に模式的に示したように，植生が繁茂する地面の侵食でも見られる。福岡ほか[25]は，植生が繁茂した地面の侵食深の経時変化が，式(3.23)に示す対数式で良好に近似できることを報告している。

$$Z = A \ln t + B \tag{3.23}$$

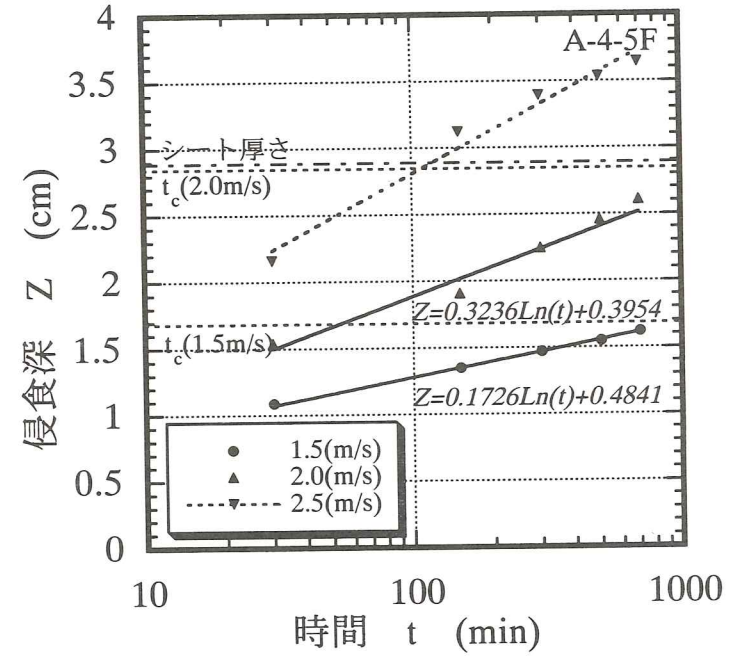
ここで，Z は平均侵食深（cm)，t は通水時間（min)，A，B は実験係数である。シートの場合にも式(3.23)を適用したところ，**図－3.37**に実線で示したように，実験結果を良好に近似できることが分かる。他のシートについても**図－3.38**に示すように同様の近似できる。

図－3.37に示したシートは構造が同じであり空隙率が異なるシートであるが，それらの侵食深の増加傾向を比較すると，同じ断面平均流速では空隙率が小さいA－4－5F のほうが侵食深の増加が抑制されていることが分かる。植生の場合についてもこれと同様な特徴として，単位体積あたりの土中に含まれる根および地下茎の量が大きいほど侵食防止効果が高くなることを宇多ほか[24]が報告している（詳細については1.3.2参照)。以上に示したようにシートは植生と共通した特徴を有することから，1.4.2に示した侵食防止効果を発揮すると考えてよい。したがって，1.2.2に示したコンセプトのとおりのシートが開発されたことが確認できる。

また，**図－3.37，3.38**での最大流速通水時のケースに着目すると，平均侵食深がシート厚以上になって

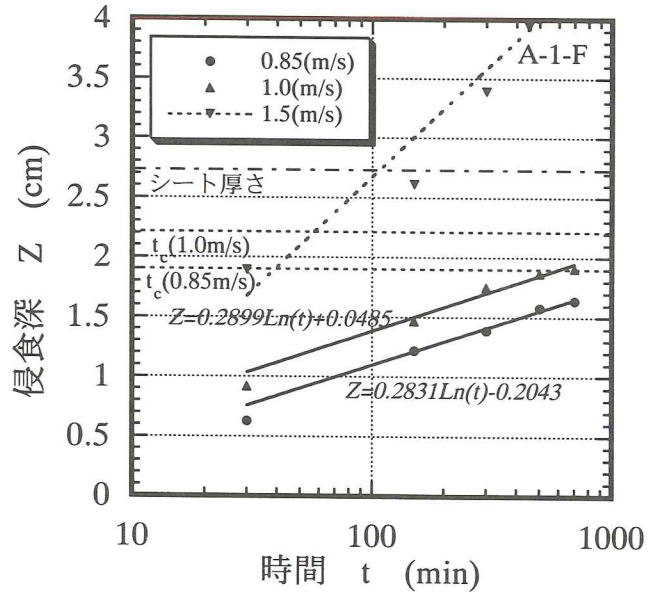


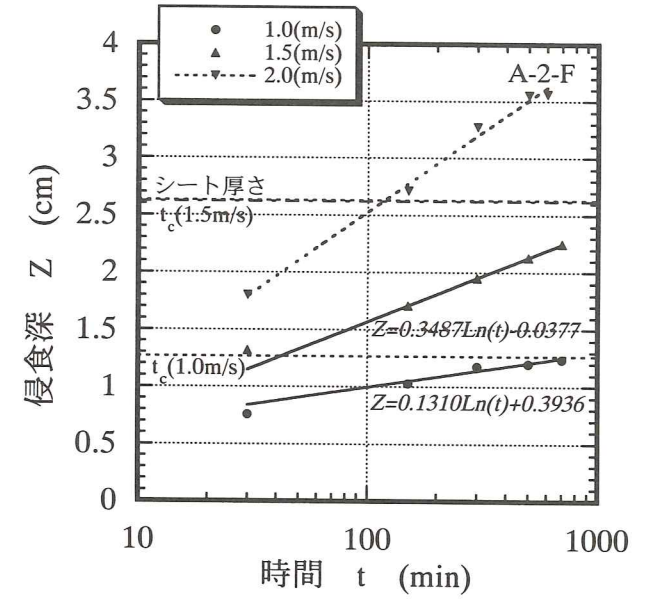
図－3.37a)侵食深の経時変化の測定結果(A －4－3F)

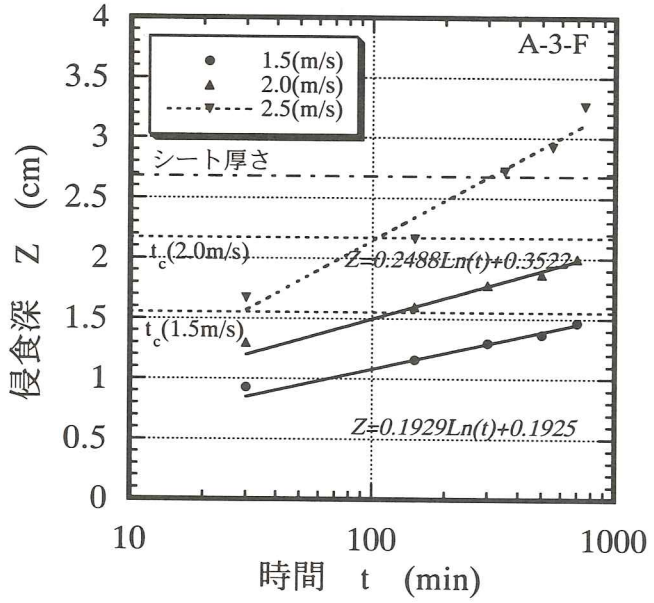


図－3.37b)侵食深の経時変化の測定結果(A －4－5F)

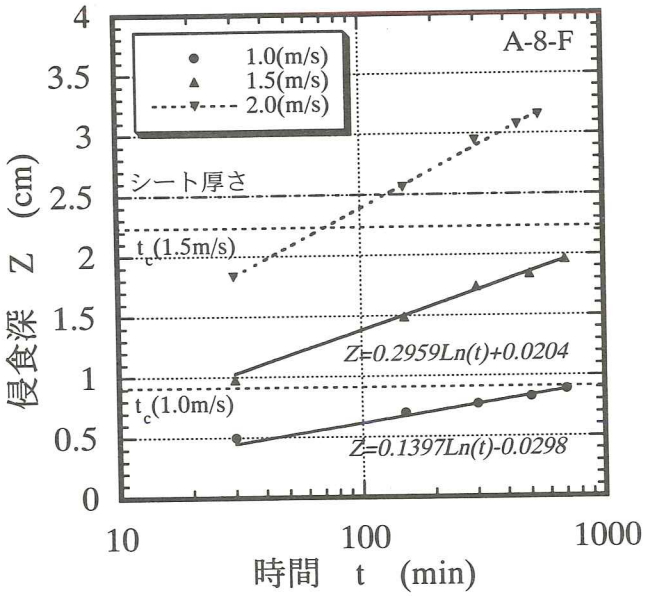
も，植生の場合のように侵食が急激に進行する（図－1.3参照）ことがない。この理由は，シートが地面から浮かび上がった状況となるが，植生の場合のように流失したり，めくれ上がったりしなかったためと考えられる。めくれ上がり等が生じなかったのは，シートが侵食実験区間に隣接する固定床に固定されていたためである。つまり1.3.2に示したように面的なつながりがあるシート状にしたことで，シート厚より侵食深が大きくなる場所が部分的に生じても，それをきっかけとして急激に侵食防止効果が失われることがないという効果が得られたことが確認できる。

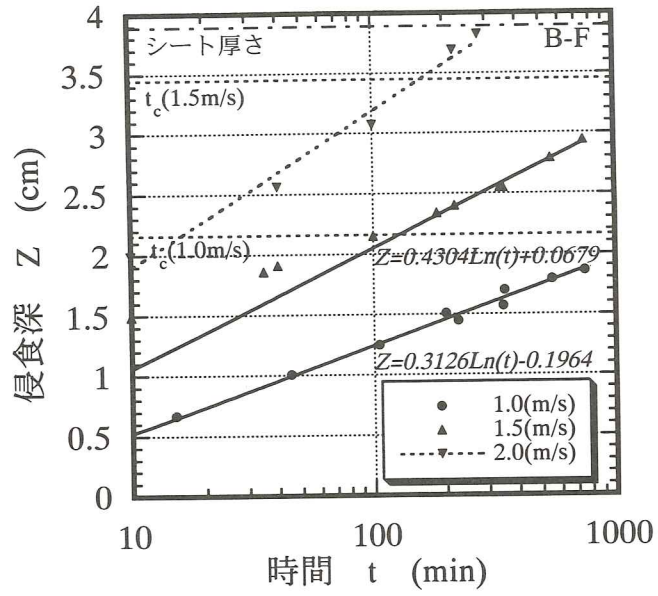


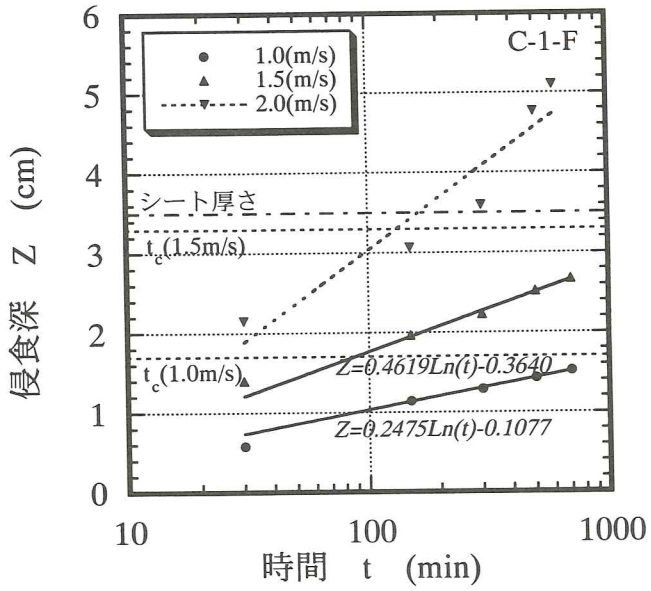




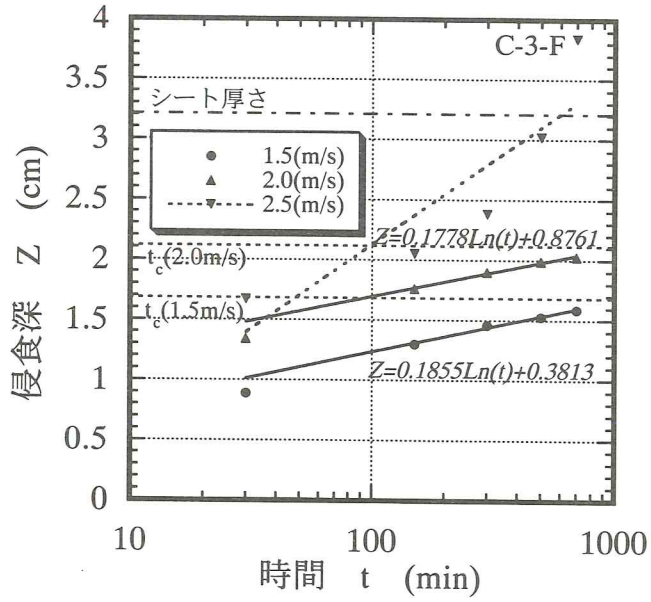
図－3.38(1)　侵食深の経時変化の測定結果

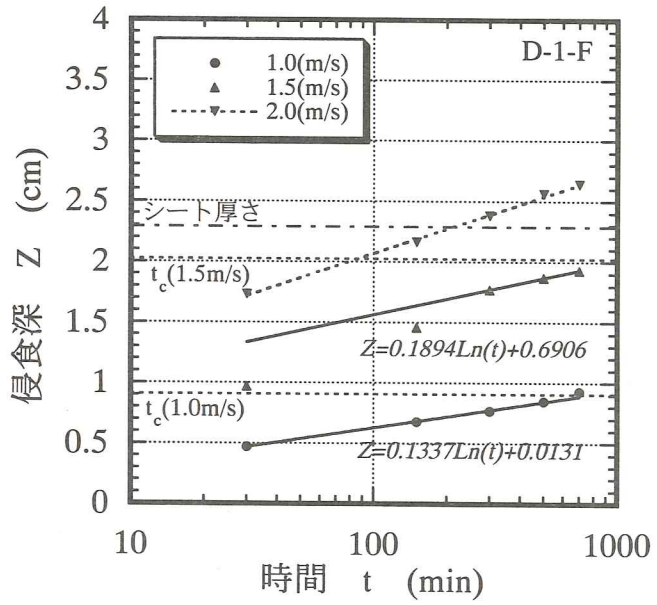


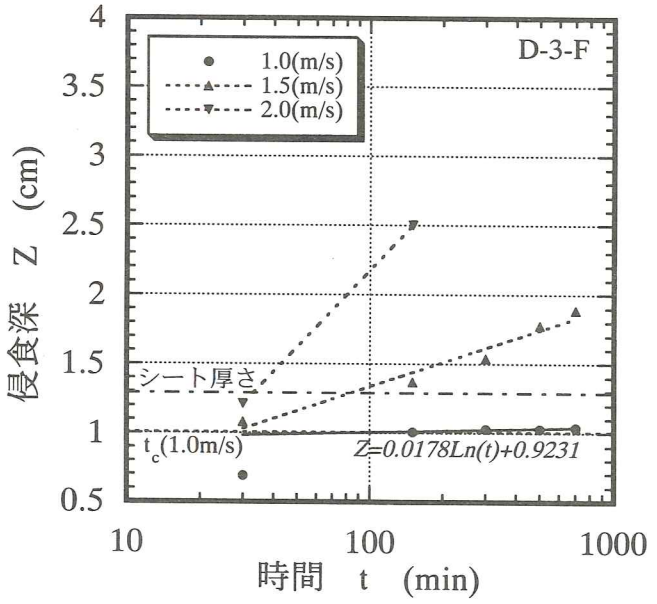




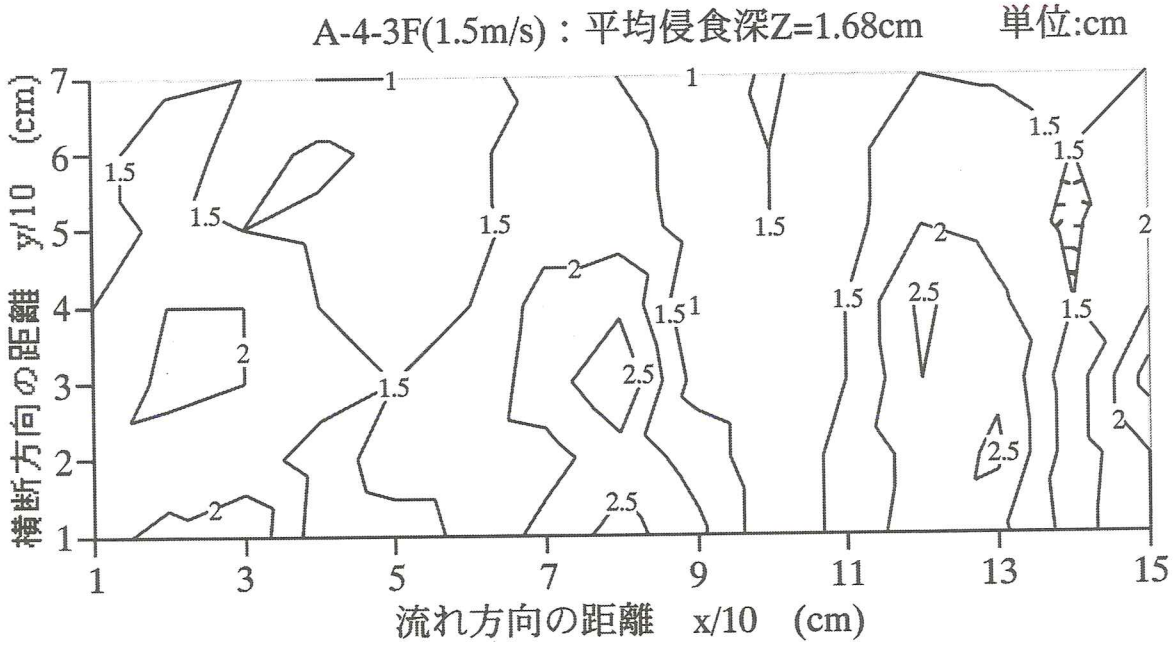
図－3.38(2)　侵食深の経時変化の測定結果







図－3.38(3)　侵食深の経時変化の測定結果

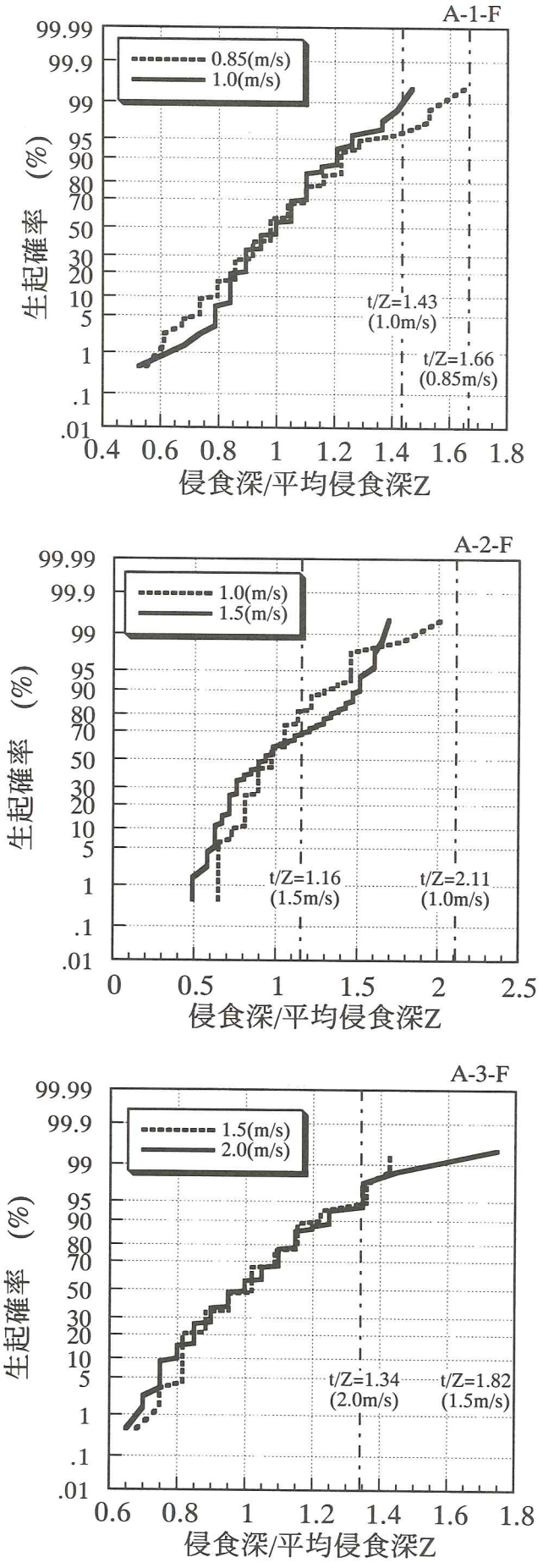


図－3.39　侵食深の平面分布(A －4－3F：流速1.5m/s シート厚さ2.36cm)

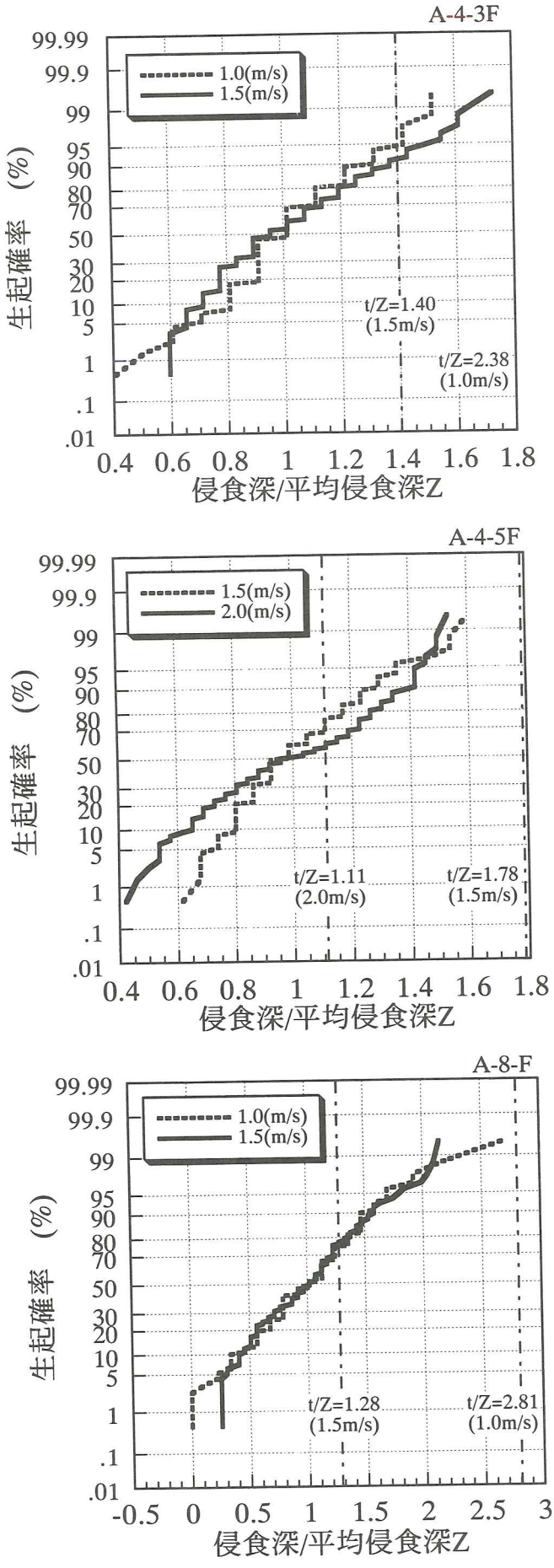
⑵　侵食深の場所的ばらつき

平均侵食深Zがシート厚さt以下となる場合の典型的な一例として，700min通水終了後における侵食深の平面分布の測定結果（A－4－3F）を図－3.39に示す。局所的に侵食深が大きい場所があり，場所によってはシート厚を上回る侵食が生じている。また，それらの場所が隣り合う間隔は，シート厚さの10～40倍程度である場合が多い。他のケースでも上記と同様な傾向が見られるが，平均侵食深より侵食深が大きくなる範囲の大きさや分布パターンに明確な類似性が見られない。侵食面を観察すると，例えば砂漣や砂堆に特徴的な下流側に下る斜面が砂の安息角に近い急勾配になるような形態が見られなかった。したがって，上記の侵食深の場所的ばらつきが生じた主原因は，シート製造時に生じてしまう面的な空隙率および厚さの変化と考えられる。

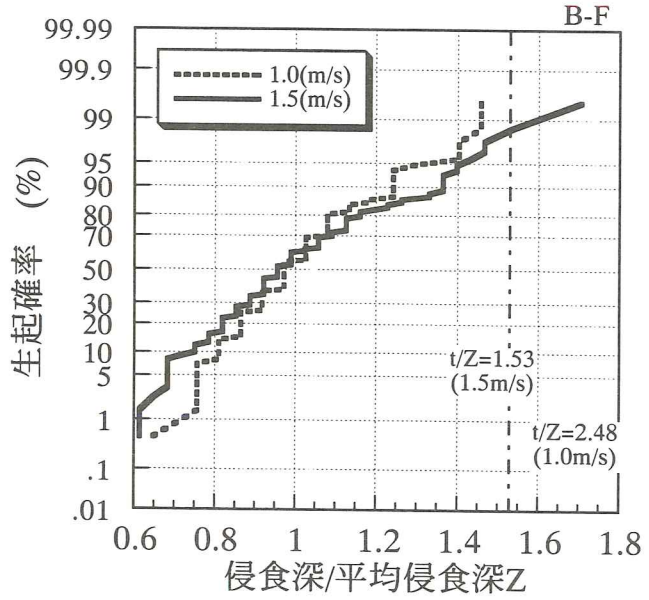
このようなばらつきが侵食の進行に与える影響を考察するため，Z<t の場合を対象として侵食深の生起確率Pを求めた結果（サンプル数は105点）を各シートごとに図－3.40に示す。侵食深は平均侵食深で基準化している。また，図中には（シート厚t)/(平均侵食深Z）を併記している。各シートにおいてP＝20～80%の範囲に着目すると，A－2－FとA－4－5Fでは流速の大きいケースで分布曲線の傾き(標準偏差)が明らかに大きくなる特徴が見られる。これらのケースは流速を大きくしたことでt/Z≦1.16まで侵食が進行したものである。それに伴って侵食面全体に対してシートの下まで侵食が到達している範囲が占める割合（100%－Pとして求められる）が30%以上まで増加している。以上より，シート下まで侵食が到達する範囲が広くなるに伴い，そこでの侵食の進行が速まったと考えられる。そのようになった状態での範囲の広がり方の特徴を見るため，700min通水終了後における侵食深の平面分布の測定結果(A－2－F, A－4－5F)を図－3.41，3.42に示す。t/Z>1.2の一例である図－3.39に示した測定例(A－4－3F：t/Z＝1.40)と比較すると，シート厚と同程度まで侵食が進んだ場所が流れ方向につながっていること，すなわちシート下部を抜けるような水みちが形成されつつあることが分かる。この水みちに沿った流れはシート内のように強い抵抗を受けないため流速が増加し，そのため侵食の進行が速まったと推察される。

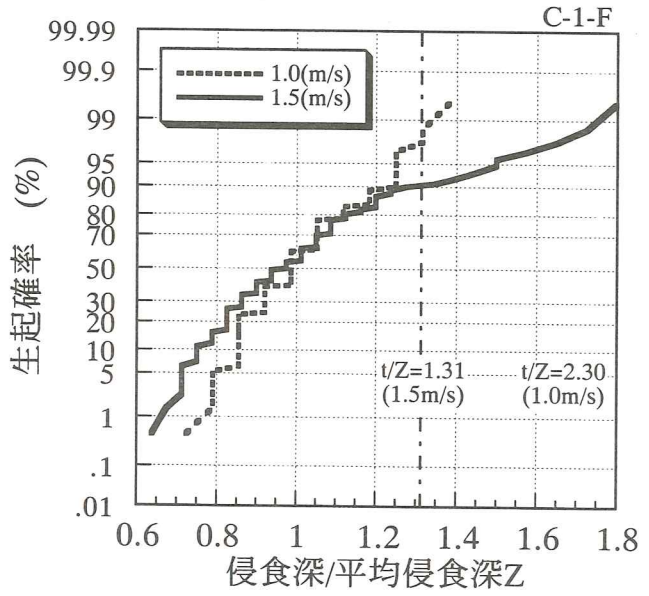


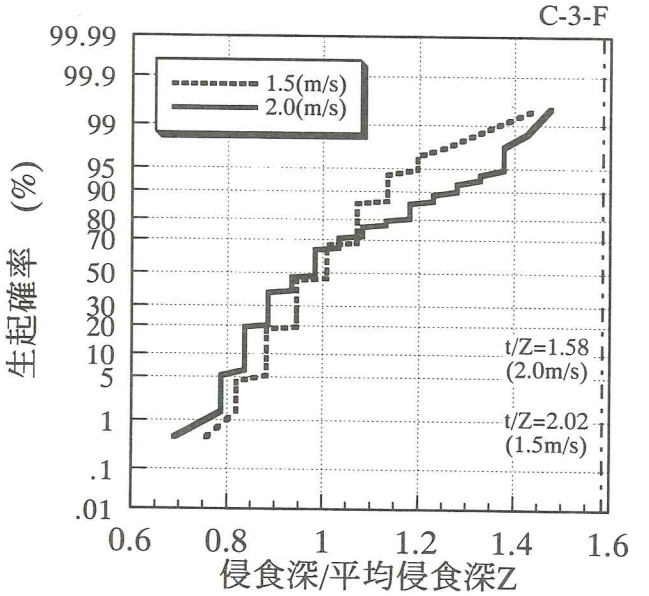
図－3.40(1)　侵食深の生起確率分布とシート厚 t/ 平均侵食深 Z



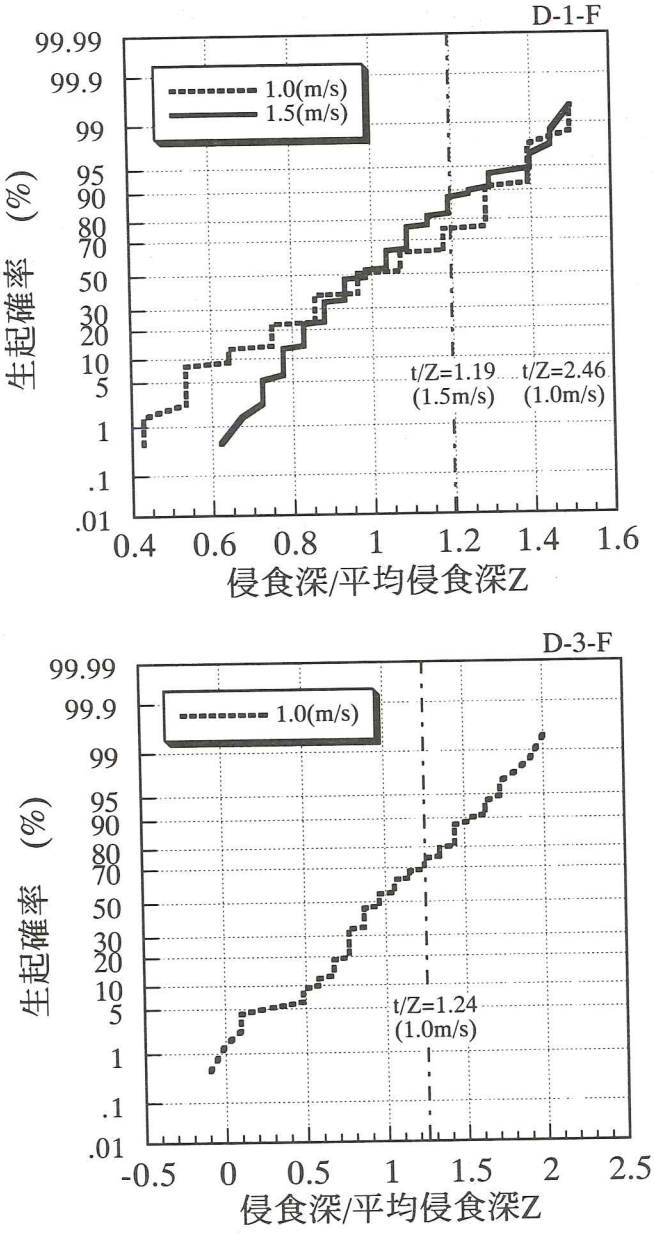
図－3.40(2)　侵食深の生起確率分布とシート厚 t/ 平均侵食深 Z



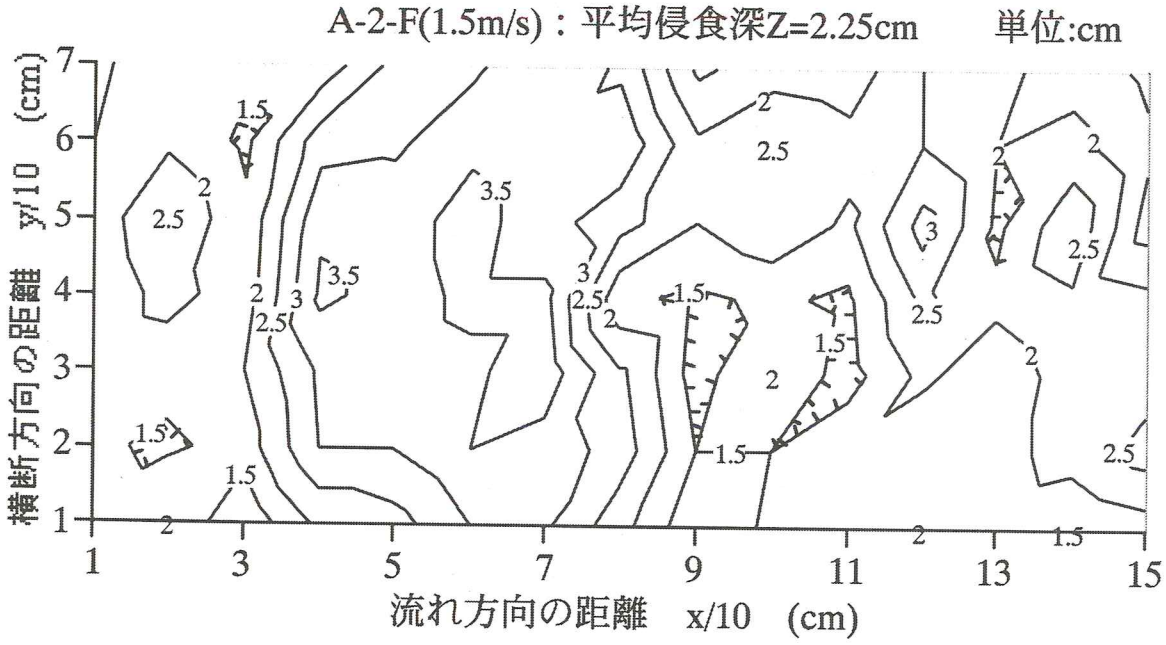




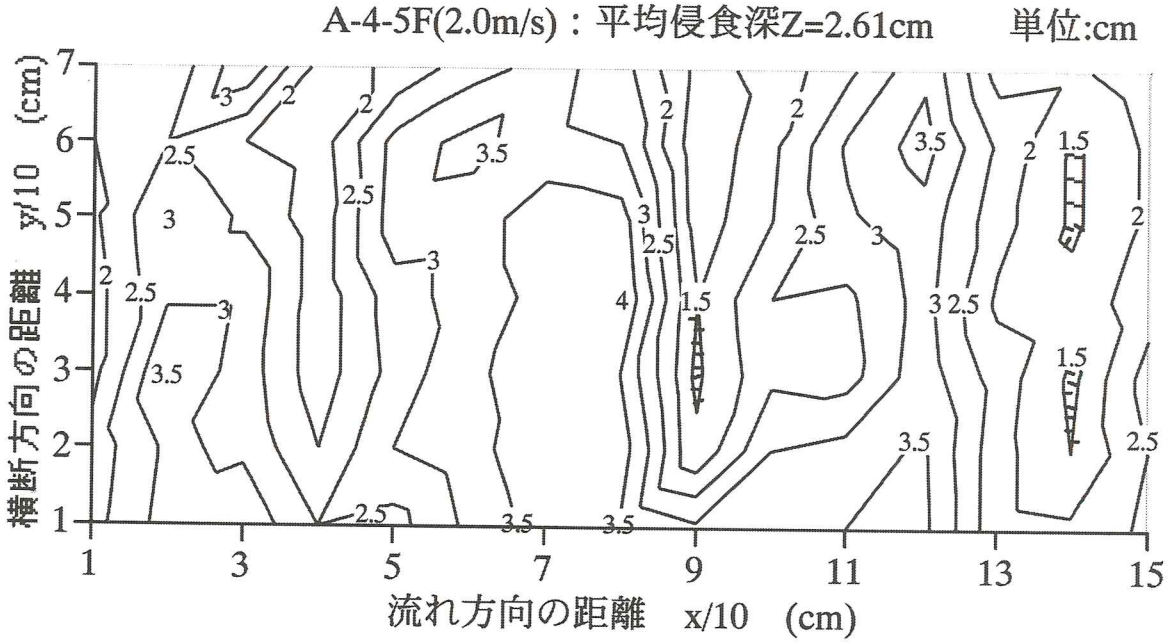
図－3.40(3)　侵食深の生起確率分布とシート厚 t/ 平均侵食深 Z



図－3.40(4)　侵食深の生起確率分布とシート厚 t/ 平均侵食深 Z



図－3.41　侵食深の平面分布(A －2－ F：流速1.5m/s シート厚2.62cm)



図－3.42　侵食深の平面分布(A －4－5F：流速2.0m/s シート厚2.89cm)

⑶　限界流速の評価に用いるシート厚さ

水みちの形成に伴ってそれに沿った範囲での侵食の進行が速まることは，シートによる侵食防止が困難となる「予兆」と考えられる。したがって本研究で提案する限界流速の評価法においては，シートによる侵食防止効果が正常に発揮されているとする条件の一つとして，上記の予兆が現れない（すなわち水みちが形成されない）ことを加えることとする。ここでは，その条件を数値化して力学モデルを用いた限界流速の評価に反映できるようにした考え方を示す。

シート厚さtは，設計対象とした侵食外力で生じうる最大侵食深（このとき地表面に作用する掃流力は限界掃流力と等しい）を最小必要厚さt_cとすると，$t \geqq t_c$としなければならないことを3.1.2において示した。しかし，⑵に示した結果から明らかなように$t = t_c$とすると上記した条件を満たすことができない。つまり，上記の条件はtをt_cよりどれだけ大きくすべきか，その最低値t/t_cを決めるのに用いることとする。具体的には，厚さtのシートの限界流速を評価するにあたって，評価に用いるシート厚さは上記条件で決めたt_c/tの値（以下，厚さ割引率Rと呼ぶ）を乗じて小さくした厚さを用いることとなる。

⑵に示した結果では，$t/Z \leqq 1.16$でかつPが70%未満になると水みちが形成された。**図－3.40**を参照すると，今回の実験では$t/Z \geqq 1.2$であれば，$z/Z = 1.2$においてP≧70%となっている。それらの場合には**図－3.39**に示したように水みちは形成されなかったことを確認している。以上の結果を参考にしてシート厚さにR＝0.85（≒1/1.2）を乗じた値を用いて限界流速の評価を行うこととする。

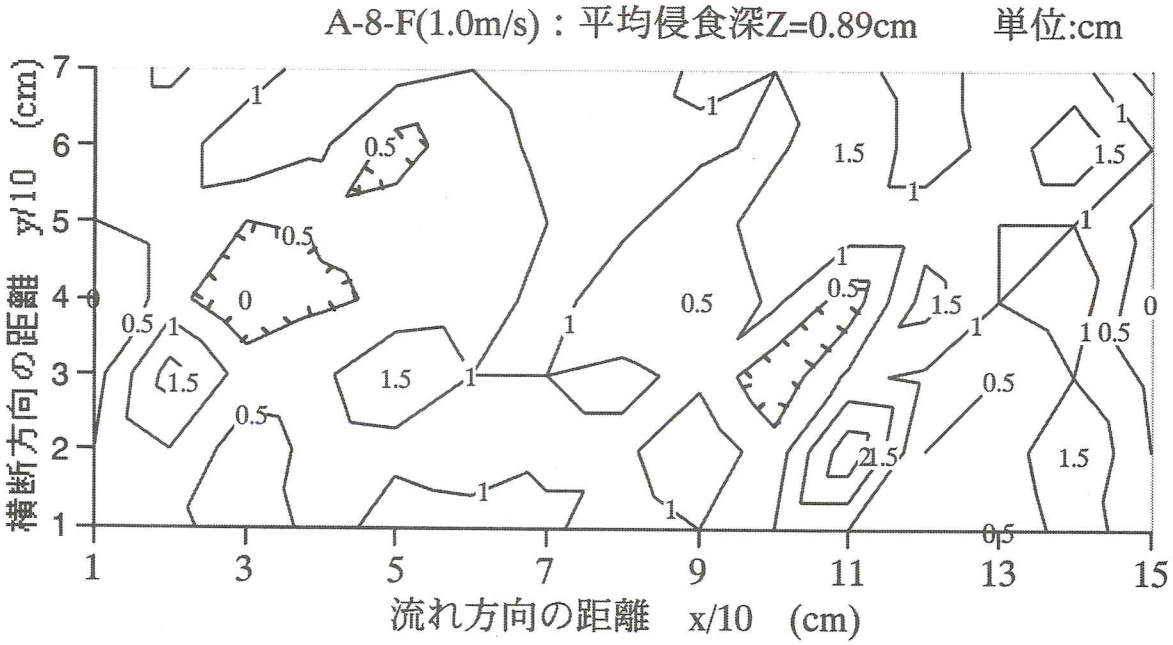
なお，上記の値はP≧70%では水みちが形成されてなかったという今回の実験結果から定めた経験値である。したがって，今後行われるであろう新たなシートの開発において，面的な空隙率および厚さの変化が今回の実験で用いたものより激しく，より小さなP値で水みちが形成される可能性があり得る。例えば，今回の実験で空隙率および厚さの変化が最も激しかったA－8－Fの場合に着目してみる。**図－3.40**に示したように$t/Z = 2.81$となる小流速のケースでも，$t/Z = 1.28$の大流速のケースとほぼ一致する生起確率分布になっている。それらのケースの侵食深の平面分布を**図－3.43，3.44**に示す。水みちの形成には至っていないものの，**図－3.39**に示したA－4－3Fに比較すると侵食の大きな範囲が数多く形成されていることが分かる。このようにシートの空隙率および厚さの変化が激しいシートでは，3.4.1に示した侵食実験を行って**図－3.39**および**図－3.40**に示したデータ整理を行うことで，0.85より小さなR値に変更する必要性について検討することとする。

3.4.3　限界掃流力の評価

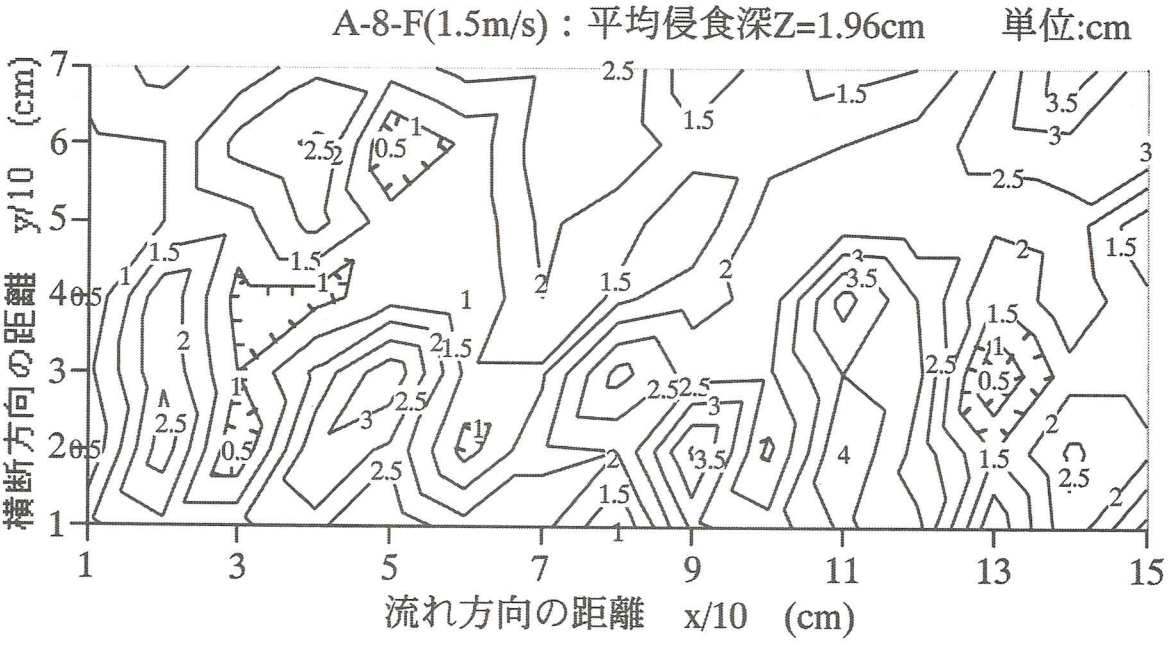
式(3.23)によって平均侵食深の経時変化を近似できる場合，式(3.23)を時間tで微分し，tをZに置き換えると侵食速度Eと侵食深Zの関係が式(3.24)に示すように得られる。

$$E = \frac{dZ}{dt} = \frac{A}{t} = \frac{A}{\exp\left(\dfrac{Z-B}{A}\right)} \qquad (3.24)$$

侵食防止が可能と見なせるほど小さな侵食速度E_c（すなわち限界掃流力の作用時における侵食速度：以下，限界侵食速度と呼ぶ）を設定すれば，式(3.24)によってそれに達する侵食深，すなわち最小必要厚さt_cを求めることができる。本研究では，ある一定の掃流力が10時間連続して作用しても，1 mm以下（シートの侵食に対する余裕厚さ，すなわち(1－R)tの最小値として設定）の侵食しか生じない状態に達す



図－3.43　侵食深の平面分布(A －8－ F：流速1.0m/s シート厚2.50cm)



図－3.44　侵食深の平面分布(A －8－ F：流速1.5m/s シート厚2.50cm)

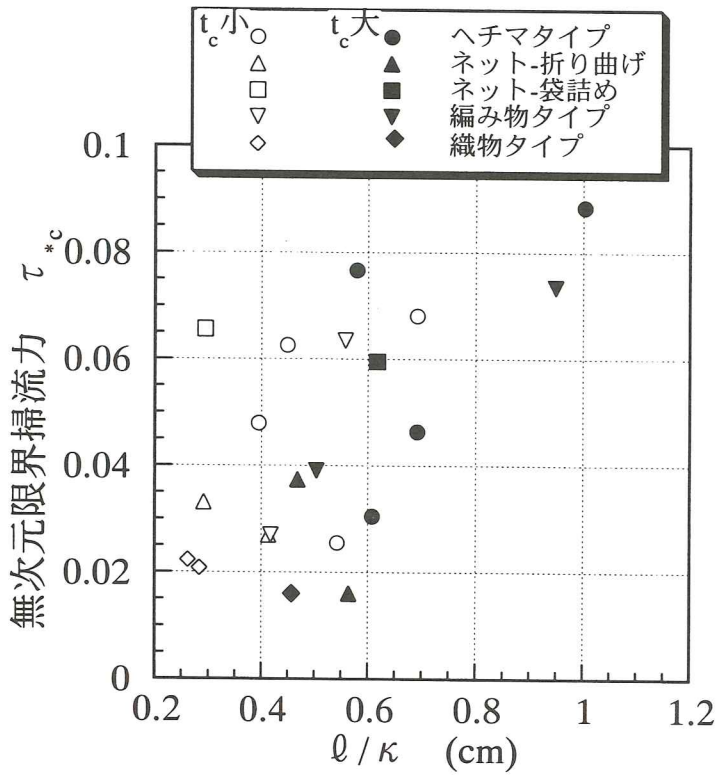
る侵食深をt_cと定義することとした。言い換えると，限界掃流力を「$E_c=0.1$(mm/hr)となる掃流力」と設定したことになる。トータル通水時間700 (min) での侵食深がシート厚以下であった全ケースを対象として，図−3.37，3.38に例示したように式(3.23)をフィッティングして(その際，Z/t>0.85となったデータを除く)係数A，Bを求め，それとE_cを式(3.24)に代入してt_cを求めた結果を表−3.3に併記した。

これらのt_cを3.3.2(2)に示したモデルに代入して，砂面に作用する掃流力 (すなわち限界掃流力) の推定を行った。なお，シートの抵抗特性($C_{D\infty}$，γ)については表−3.1，シート表面に作用するせん断力およびカルマン定数(ケース2の結果を精度良く再現できるように調節した値)，侵食実験時に測定した動水勾配については表−3.3に併記した値を用いた。

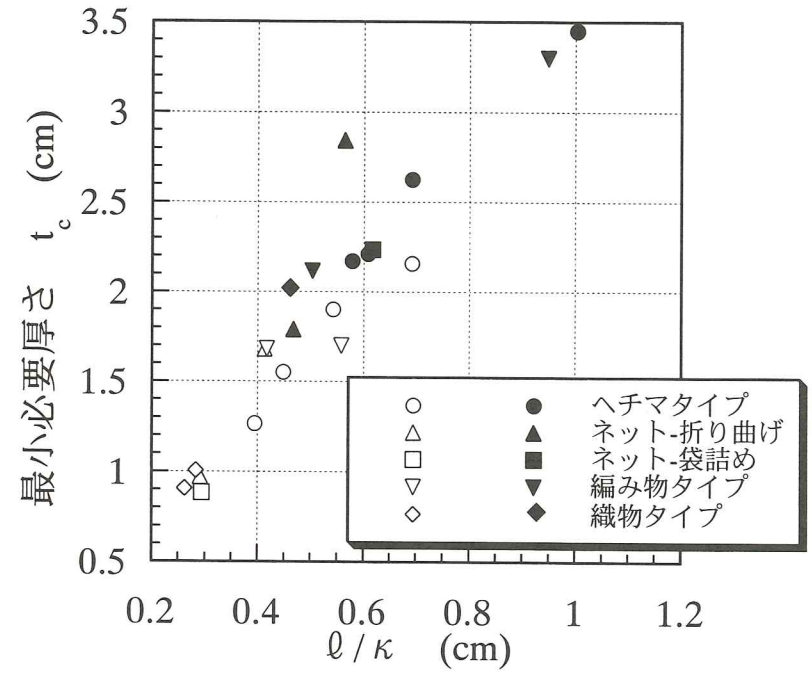
推定した限界掃流力を無次元化(sgD_mで除す：無次元限界掃流力τ_{*c}と呼ぶ)して，ℓ/κ(混合距離/カルマン定数) との関係として整理した結果を図−3.45に示す。シートに被覆されていない砂のみの侵食面での無次元限界掃流力τ_{*c0}は0.06である。上記方法によって得たτ_{*c}の値はτ_{*c0}の0.3〜1.3倍の範囲に集中しており，推定誤差があることにも配慮すると，以下に示すように3.1.5に示した侵食形態に対応した結果が得られたと思われる。まず，ばらつきが大きく不明瞭ながらもτ_{*c}がℓ/κに伴って増加する傾向が見られる。この傾向は各シートのプロットのうち流速大でのケース，すなわちt_cが大きなケース (黒塗りのプロット)のみに着目するとより明確に確認できる。t_cとℓ/κの関係を図−3.46に示すが，t_cにもℓ/κに伴って増加する傾向が (黒塗りにした流速大のケースほど明確に) 見られる。つまり，t_cが大きいほどτ_{*c}も増加することとなる。この傾向は，3.1.5に示した組織的渦による吸い出し現象と関連づけて考えると，「砂面からピックアップされた砂がシート外に運び去られる確率はt_cが小さいほど大きくなるため，同じ侵食速度になるためには，t_cが小さいほどピックアップされる砂量，すなわちτ_{*c}が小さくならなければならない」ことを示唆していると考えられる。

しかし，「ピックアップされた砂がシート外に運び去られる確率」はt_cのみではなく，シート構造などによっても変化すると考えられる。例えば，巻き上がった砂がシート構成材に多く衝突するような構造のシートでは，確率が減少すると考えられる。同程度のℓ/κ(またはt_c)となったA−3−FとC−3−Fを比較すると，ハニカム型をした厚さ方向に連続した孔のあるC−3−Fは，ヘチマタイプ特有の構成材が入り組んだA−3−Fに比較してτ_{*c}が小さくなっている。$\tau_{*c}>0.04$となるのはヘチマタイプ(A−2−F，A−3−F，B−F)またはネット−袋詰めタイプ(A−8−F：ヘチマタイプと同様に構成材が入り組んでいる)のシートが多いこと，また$\tau_{*c}<0.04$ではハニカム型(C−3−F)および波形シート(A−1−F，A−4−3F，A−4−5F，D−1−F：厚さ方向に1〜2枚の波型のシート面があるだけの比較的，砂が抜け出しやすいと思われるシート)が多いことも上記の考察を裏付けるものである。

少なくとも上記した2種類の要因からτ_{*c}が変化していると思われるが，本研究では各要因に対応したパラメータを設定して，それらとτ_{*c}の関係を定量的に表せる経験式を導くまでには至らなかった。そこで本研究ではτ_{*c}の評価方法として，$\tau_{*c}=0.030$，0.045，0.060の3段階で与えることとした。各シートのτ_{*c}は，図−3.45に示した推定値と前記の値を比較して，両者が最も近い値を用いることとする。そのようにして段階分けした結果を表−3.3に併記した。なお，τ_{*c}を0.015刻みで段階分けしたのは，表−3.3に示すシートについて3.5に示す評価法にしたがってτ_{*c}を変えながら限界流速を評価したところ，0.5m/s刻みで限界流速を評価する (3.3.3参照) にあたっては，上記の刻み幅程度内の変化であれば，ほぼ同じ結果となることが確かめられたためである。



図－3.45　無次元限界掃流力 τ_{*c} と ℓ/κ の関係



図－3.46　最小必要厚さ t_c と ℓ/κ の関係

以上のように今回のτ_{*c}の評価法は力学的合理性より，現状の技術的限界に適った結果が得られるように配慮して定められている。そのため，侵食現象を明らかにし，より合理的に設定できるように研究を行うことが今後の課題である。

3.5 限界流速の評価法

これまでに示してきた実験およびモデルによる計算を活用して限界流速を評価する手順をまとめて示すとともに，本章で実験の主対象としてきた第三次シートについて限界流速を評価した結果を示す。モデルに用いるパラメータのち，実験によって決めなければならないパラメータは，流れ場の予測に必要な$C_{D\infty}$，γ，κと，侵食防止の予測に必要なτ_{*c}，Rの5個である。これらをどのように求めるかについてまず示し(3.5.1～3.5.3参照)，次に評価の妥当性の確認を行った上(3.5.4参照)で，3.1.3，3.1.4に示した考え方で粘着力を有する充填土砂の耐侵食力を考慮した限界流速の評価法とその評価結果の一例を示す(3.5.5参照)。

なお，本研究では実験対象としていない全く新しくシートを開発する場合についても，モデルのみを用いて限界流速を評価することでシート諸元の絞り込みができるように，上記パラメータの概略値の設定法についても併せて示している。概略値は上記の目的にのみ使うものであり，シートの完成品について限界流速を評価する際には，実験を必ず行ってパラメータの調整を行わなければならない。

3.5.1 透過係数Kとレイノルズ数R_eの関係を求める －管水路による抵抗測定実験－

シートの基本諸元，すなわち構成材料の代表径d，空隙率λ_p，厚さtについては，**表－2.2(1)**に示した方法によってあらかじめ測定しておくこととする。次に，3.3.1(1)に示した実験装置･方法に準拠して透過係数Kと断面平均流速uの関係を得る。その際，uの最大値を50cm/s程度とするのが好ましい。その測定結果に3.3.1(3)に示したモデルを適用して$C_{D\infty}$，γを求める(その方法は3.3.1(5)の冒頭に示した)。

シート構造はほぼ同一であり代表径dを変化させた場合には，3.3.1(5)a)に示した例のように$C_{D\infty}$,γがdに応じて変化する可能性があるので，その関係を例えば**図－3.12**に示すような経験式で表示することを試みると良い。なお，シート構造が**写真－2.1**に示したプロトタイプと類似している場合には，3.3.1(5)に示したように$C_{D\infty}$，γの概略設定が可能である。

3.5.2 流れ場モデルの適用性の確認とカルマン定数κの調整 －可変勾配水路による流速測定実験－

ここに示す手順はκの標準値0.4を用いる場合には省いてもよい。κが標準値より小さくなる可能性が考えられる(例えば編み物－ハニカムタイプと類似したシート構造である場合)には，以下に示す手順によってκの調整を行う。また，流れ場モデルの適用が困難と予想されるようなシート（シートの厚さの凹凸が激しい，不均一性が高いなど：**写真－2.1**に示したプロトタイプに比較して)については必ず実施すること。

3.3.2(1) a)に示した実験装置・方法に準拠して流速分布と水深および水面勾配の関係を得る。さらに，3.2.2および3.3.2(2)に示した式および計算法によって流速分布の再現計算を行う。実験と計算から得た流速分布と平均流速が±15%程度の誤差範囲内で一致することを確認する（**図－3.22，3.23**に示したような図を作成して)。その際，**図－3.32**に例を示すように空隙率などの諸元が異なる複数の同タイプシートの全結果にいて，実験値と計算値に系統的なズレが確認できる場合にはκの調整を行うこととする。κの調整

を行うためには少なくとも4種類の諸元が異なるシート（表−2.3に見られる程度の差異があること）について実験を行う必要がある。それらの結果が最も一致するようにκ値を調整する。

なお，κを小さくすると限界流速が大きくなるメリットがあるので，標準値より小さくなる期待が少しでもあるならば，上記の作業をできるだけ行うことを勧める。

3.5.3　無次元限界掃流力τ_{*c}と厚さ割引率Rの設定　−矩形管水路による侵食実験−

3.4.1に示した実験装置･方法に準拠して侵食深の測定を行う。それと同一の実験装置を用いて，3.3.2(1) b) に示した実験方法に準拠して流速およびレイノルズ応力分布の測定を行う。実験ケースは3.4.1に示したように断面平均流速が0.5m/s刻みで異なる最低3ケースとして，そのうちの最大流速のケースは平均侵食深がシート厚さを上回るようになる最小の流速となるように設定することとする。

まず，平均侵食深の経時変化について図−3.37に示すようにプロットし，これに最小二乗法で式(3.23)をフィッティングすることで係数A,Bを得る。それらの係数と$E_c=0.1$(mm/hr)を式(3.24)を代入して最小必要厚さt_cを求める。各ケースのt_c，シート表面におけるレイノルズ応力（レイノルズ応力分布の測定結果に直線をフィッティングして，その直線をシート表面の位置まで外挿することで求める）と動水勾配を3.5.2に示した流れ場のモデルに代入して侵食面における無次元掃流力を求める。その際に用いるカルマン定数κは標準値ではなく，上記の実験で得た流速分布の測定結果を用いて図−3.35に例示したように調整した値を用いることとする。上記のように推定した無次元掃流力の値と$\tau_{*c}=0.030$，0.045，0.060の3段階の値を比較して，両者が最も近い値となるτ_{*c}値として設定する。なおτ_{*c}の概略値設定としては，シート構造が写真−2.1に示したプロトタイプと類似している場合には，ヘチマタイプ（波形のA−1シリーズを除く）およびネット−袋詰めタイプ（構成材が厚さ方向にランダムに重なった構造を有するシート）では$\tau_{*c}=0.06$，それ以外では0.03とすればよい。

厚さ割引率Rは0.85を標準値とし，標準値より大きな値に変更してはならない。その理由は，シートの施工時などに生じるシートの変形が避けられないとの前提に基づいて，シート厚が小さくなった場合（元の厚さの90%までを許容範囲とする：第6，7章参照）をあらかじめ想定して，限界流速の評価を行うこととしたためである。

侵食実験の結果を図−3.40のように整理してt/Z ≧1.2の実験ケースでは，z/Z=1.2においてP ≧70%となっていること，かつ，図−3.39のように整理して水みちが形成されていないことを確認できた場合には，Rを標準値として良い。t/Z ≧1.2の実験ケースにおいても水みちの形成が見られる場合には，1)水みちが見られなくなるP値を明らかにし，2)図−3.40のように整理した確率分布からそのP値となるt/Z値を求め，3)その逆数をR値とする。

3.5.4　モデルによる評価の妥当性の確認　−侵食実験とモデルによって求めた限界流速の比較−

上記したようにして設定したパラメータをモデルに代入して，3.5.3に示した侵食実験から得られた限界流速とそのモデルによる推定値を比較し，モデルおよびパラメータ設定の妥当性を確認する。

(1)　実験による限界流速の評価

3.5.3に示した方法によって，侵食実験よりt_cが求められる。シート厚さtとt_cの比t_c/tがR値以下となる最大の流速を限界流速とする。その評価の一例を表−3.4に示す。

表－3.4　侵食実験とモデルによる限界流速の比較

タイプ		シート名	限界流速(m/s)	
			実験値	推定値
ヘチマ	熔着	A-1-F	1.0	1.0
		A-2-F	1.0	1.0
		A-3-F	2.0	1.5
	接着	B-F	1.0	1.0
ネット	織り曲げ	A-4-3F	1.5	1.0
		A-4-5F	1.5	1.5
	袋詰め	A-8-F	1.0	1.0
編み物	直線	C-1-F	1.0	1.0
	ハニカム	C-3-F	2.0	1.5
織物	波形	D-1-F	1.0	1.0
	テープ材編み付け	D-3-F	1.0	1.0

⑵　モデルによる限界流速の評価とその妥当性の検証

モデルに3.5.1～3.5.3で調整したパラメータを代入して限界流速を求める。その際，シート厚さはR･t，動水勾配は開発目標(2.2.1(1)参照)としたセグメント2の最大値1/300を用いる。そのように設定して算定した限界流速を表－3.4に示す(水深は実験において測定した境界層厚さとほぼ等しい50cmとした)。評価値は実験値以下となることが確かめられたことから，モデルによって安全側に評価可能であると判断できる。

3.5.5　限界流速の評価　－粘着力を有する充填土砂の耐侵食力を考慮して－

⑴　評価に用いるシートの厚さ t_d と空隙率 λ_{pd}

3.5.3においても触れたように，施工時などに生じるシートの変形が避けられないとの前提に基づいて，シートが変形することで侵食防止効果が低減する(シート厚が小さく，または空隙率が大きくなる)ことをあらかじめ見込んで，限界流速の評価を行うこととした。シートの変形については実際の状況を再現した変形実験を行い，その結果に基づいて定めた変形許容量以下に変形が収まるようにシートの強度を定めている(詳細については第6，7章参照)。その許容量から，t_d と λ_{pd} は式(3.25)のように求めることとする。

$$t_d = R\,t$$
$$\lambda_{pd} = 1 - 0.95\left(1 - \lambda_p\right) \qquad (3.25)$$

t_d は厚さ回復率を90%，λ_{pd} は長さ回復率を95%としたことに対応して設定したものである。

⑵　充填土砂の限界掃流力の設定

ここでは，3.1.3に示した考え方に従って，第5章に示す土砂充填工法によって発揮することが十分可能である耐侵食力の下限値を過去の研究事例3)に基づき見きわめ，その値をもって「充填土砂の限界掃流力」と設定する。

充填する土砂には第5章に示すように砂質土を用いることとしたので，細粒分の含有率15～50%となる。

宇多ほか[3]によると細粒分が10%程度の場合，最低でも4 (gf/cm²)程度の引っ張り破壊応力σ_{tb}となり，侵食速度が10mm/10hrとなる掃流力τがσ_{tb}の関数として式(3.26)で求められるとしている。

$$\frac{\tau}{\sigma_{tb}} = 0.027 \tag{3.26}$$

本研究では限界掃流力τ_cの定義として「侵食速度が1mm/10hrとなる掃流力」とした(3.4.3参照)ので，式(3.26)で算定される掃流力より小さくする必要がある。宇多ほか[3]は侵食速度がτの二乗に概ね比例することを明らかにしているので，この比例関係と式(3.26)からτ_cとσ_{tb}の関係を式(3.27)として与えることができる。

$$\frac{\tau_c}{\sigma_{tb}} = 0.0085 \tag{3.27}$$

式(3.27)に$\sigma_{tb}=4$ (gf/cm²)を代入すると，$\tau_c/\rho \fallingdotseq 34$ (cm²/s²)が得られる。充填土砂には根茎が伸長すること，また地表面近傍であるため乾燥することなどによって耐侵食力の低下が見込まれるため，上記の値の約1/2を目安として$\tau_c/\rho = 20$ (cm²/s²)と定める。3.5.3において設定した3段階のτ_{*c}値に対応して，τ_c/ρとして式(3.28)を用いることとする。

$$\begin{aligned} &\tau_{*c} = 0.060 \text{ の場合} \quad && \frac{\tau_c}{\rho} = 20\left(cm^2/s^2\right) \\ &\tau_{*c} = 0.045 \text{ の場合} && \frac{\tau_c}{\rho} = 15\left(cm^2/s^2\right) \\ &\tau_{*c} = 0.030 \text{ の場合} && \frac{\tau_c}{\rho} = 10\left(cm^2/s^2\right) \end{aligned} \tag{3.28}$$

⑶ 限界流速の評価

上記のように求めたt_d，λ_{pd}，τ_c/ρと水面勾配i=1/300を3.2.2，3.3.1⑶，3.3.2⑵に示したモデルに代入すると，水深と限界流速の関係が得られる。その計算結果の一例を図−3.47に示す。限界流速は2.5〜4.0 (m/s)の範囲に集中しており，本研究の開発目標とした「水面勾配1/300以下のセグメントで，最大4 m/sまで適用可能シート」の開発が行えたと言えよう。

シート名	限界流速(水面勾配1/300以下)				
	2.0(m/s)	2.5(m/s)	3.0(m/s)	3.5(m/s)	4.0(m/s)
A-1-F	1.0〜2.5	〜9.0	〜10以上		
A-2-F		1.0〜3.0	〜9.0	〜10以上	
A-3-F		1.0〜1.5	〜4.0	〜10以上	
B-F	1.0〜2.0	〜5.5	〜10以上		
A-4-3F	1.0〜1.5	〜4.5	〜10以上		
A-4-5F		1.0〜2.5	〜6.5	〜10以上	
A-8-F	1.0〜1.5	〜5.5	〜10以上		
C-1-F	1.0〜2.0	〜6.5	〜10以上		
C-3-F			1.0〜2.0	〜4.5	〜10以上
D-1-F	1.0〜1.5	〜4	〜10以上		
D-3-F	1.0〜1.5	〜6.5	〜10以上		

※図中の数字は各限界流速に対する水深(m)の適用範囲である。

図−3.47 限界流速の評価結果

参考文献

1）(財)国土開発技術研究センター編：護岸の力学設計法，(株)山海堂，第1刷，151p.，1999.

2）建設省河川局防災・海岸課監修：美しい山河を守る災害復旧基本方針，(社)全国防災協会，第二版，1999.

3）宇多高明・望月達也・藤田光一ほか：洪水流を受けた時の多自然型河岸防御工・粘性土・植生の挙動－流水に対する安定性･耐侵食性を判断するために－，土木研究所資料，第3489号，pp.7～96，1997.

4）(財)国土開発技術研究センター編：護岸の力学設計法，(株)山海堂，第1刷，pp.74～77，1999.

5）土木学会水理委員会編:水理公式集[平成11年版]，丸善，第1刷，pp.158－159，pp.178－179，1999.

6）中川博次・祢津家久：透水性開水路乱流場における主流と浸透層との相互作用，土木学会論文報告集，第244号，pp.81～90，1975.

7）清水義彦・辻本哲郎・中川博次・北村忠紀：直立性植生層を伴う流れ場の構造に関する実験的研究，土木学会論文集，No.438，Ⅱ－17，pp.31～40，1991.

8）Ree, W.O. and Palmer, V.J. : Flow of water in channels protected by vegetation linings, Technical Bulletin 967, U.S. Dept. of Agriculture, 115p., 1949.

9）Kouwen, N., Unny, T.E. and Hill, H.M. : Flow retardance in vegetated channels, Journal of the irrigation and drainage division, IR2, A.S.C.E., pp.329～342, 1969.

10）Kouwen, N. and Unny, T.E. : Flexible roughness in open channels, Journal of the hydraulics division, HY5, A.S.C.E., pp.713～728, 1973.

11）Inoue, E : On the turbulent structure of air flow within crop canopies, Journal of Meteorological Society Japan, Vol.41, No.6, 1963.

12）Chu, Y. and Gelhar, L.W. : Tuburent pipe flow with granular permeable boundaries, Ralph M Parsons Labo. Report No.148, MIT, 1972.

13）日野幹雄・歌原英明：水草のある流れの水理学的研究，土木学会論文報告集，第268号，pp.87～94，1977.

14）山田　正・川端規之：浸透層上の流れの抵抗則に関する理論的研究，土木学会論文報告集，第325号，pp.69～80，1982.

15）室田　明・福原輝幸：直立性の植物を有する開水路の流れ構造について，水理講演会論文集，第28回，pp.225～231，1984.

16）服部　敦・瀬崎智之・近藤和仁・藤田光一：ヨシ群落上流れに関する大型水路実験と抵抗則の検討，第55回年次学術講演会講演概要集，Ⅱ－308，2000.

17）清水義彦・辻本哲郎・中川博次：直立性植生層を伴う流れ場の数値計算に関する研究，土木学会論文集，No.447，Ⅱ－19，pp.35～44，1992.

18）福岡捷二・藤田光一：洪水流に及ぼす河道内樹木群の水理的影響，土木研究所報告，第180号－3，pp.129～192，1990

19）山田　正・川端規之：浸透層上の流れの抵抗則に関する実験的研究，土木学会論文報告集，第325号，pp.81～91，1982.

20）J.C.ロッタ(大路通雄訳)：乱流，岩波書店，初版，pp.228～231，1975.

21) 土木学会水理委員会編：水理公式集[平成11年版]，丸善，第１刷，p.89，1999.
22) 今井　功：流体抵抗の理論，科学，Vol.28，No.3，pp.110～115，1958.
23) 例えば，(社)日本機械学会：機械工学便覧，新版，pp.Ａ５－97～Ａ５－106，1987.
24) 宇多高明・望月達也・藤田光一ほか：洪水流を受けた時の多自然型河岸防御工・粘性土・植生の挙動－流水に対する安定性・耐侵食性を判断するために－，土木研究所資料，第3489号，pp.97～214，1997.
25) 福岡捷二・藤田光一：堤防法面張芝の侵食限界，水工学論文集，第34巻，pp.319～324，1990.

第4章　根茎・ピンによるシートの固定性とシート重ね部・切断部・轍部・礫積載部での侵食防止

現地におけるシートの使用状況としては，第3章で想定したように均一なシートが平坦な地面に密着している理想的な状況のみではない。本章では，実際に生じうる以下のようなシートの敷設・固定および損傷などの状況を再現して，それらについて侵食実験を行って，シートが侵食防止効果を発揮できるか，また発揮できる場合の条件を明確にする。

まず，堤防のり面において一般的に見られるように植物が株状になって離散的に繁茂する場合にも，根茎によってシートが地面に固定でき，かつシートの侵食防止効果が発揮できるかについて確認する（4.1参照）。次にシートを固定するピンの周辺，およびシートの重ね合わせによって形成されるシート端部の凹凸部における局所的な侵食状況を明らかにするとともに，局所洗掘に起因するシートのめくれ上がりが防止可能な重ね合わせ方を明らかにする（4.2参照）。最後に，シートの切断，轍形成に伴うシートの陥没変形，およびシート上に礫を積載した場合について，点検･修繕の対象とすべき(つまり侵食防止効果が発揮できなくなる)損傷などの状況についてまとめて示す(4.3参照)。

4.1　シート上での植生繁茂と根茎によるシート固定

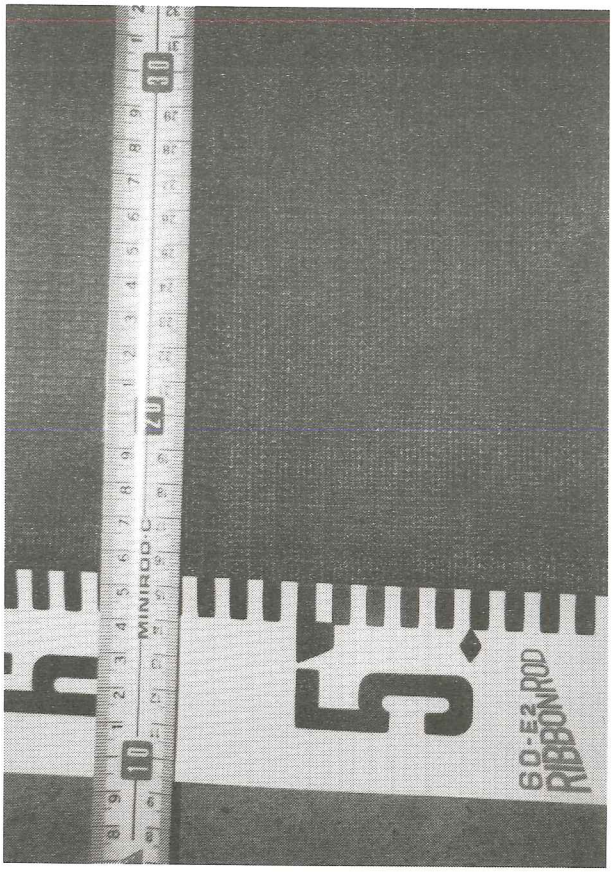
シートの空隙内に根茎が良好に伸長できること，またその根茎によってシートの固定が可能であることを確認するための実験を行った。まず，植生繁茂に関する基礎的実験として，編み目の大きさ（すなわち空隙径）を段階的に変化させたネット上にシバを繁茂させ，空隙径が根の伸長に及ぼす影響について調べた(4.1.1)。次に，シートのプロトタイプを用いた繁茂実験を行い，土中鉛直方向の根茎の現存量分布などからシートが植物の生長をほとんど阻害しないことを確認する(4.1.2)。最後にシートが根茎によって固定できることを実大侵食実験によって確認する(4.1.3)。

4.1.1　空隙径が根茎の伸長に与える影響

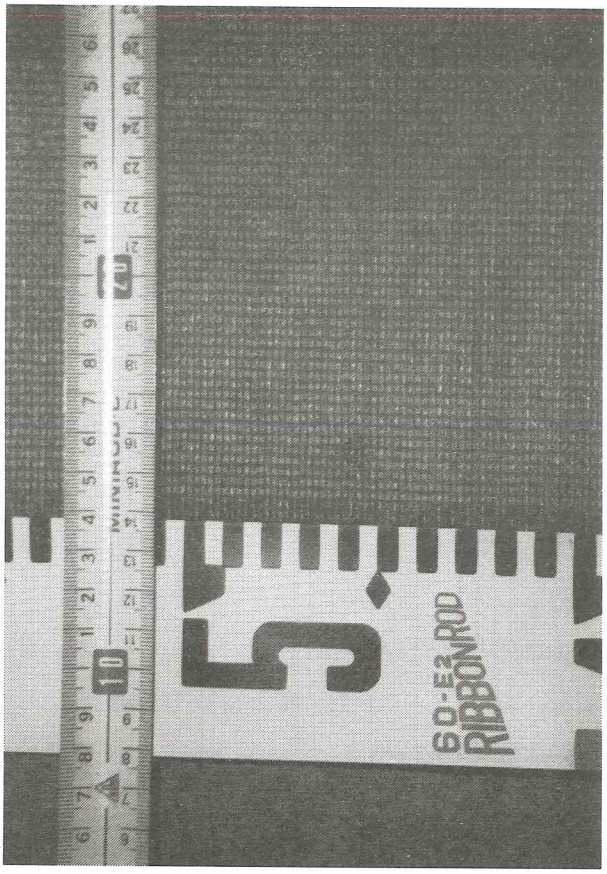
シートの開発当初，多孔質なシートであってもその空隙経が小さいと根茎の伸長に対して何らかの障害をもたらすことが懸念された。堤防のり面に繁茂する植生として好適とされる（侵食防止効果が高い，堤防のり面の点検に支障がないなど[1]）シバのような植物に対しては，障害はあってはならない。それに対して，近年，堤防のり面の点検や維持管理を困難にしているセイタカアワダチソウやクズなどの植物に対しては，むしろ障害があったほうが草刈りに関する労力縮減という観点で好ましい。そこで，空隙径が異なるネット上に植物を繁茂させ，根茎の伸長状況を比較し，上記について検討を加えることとした。

(1)　実験の概要

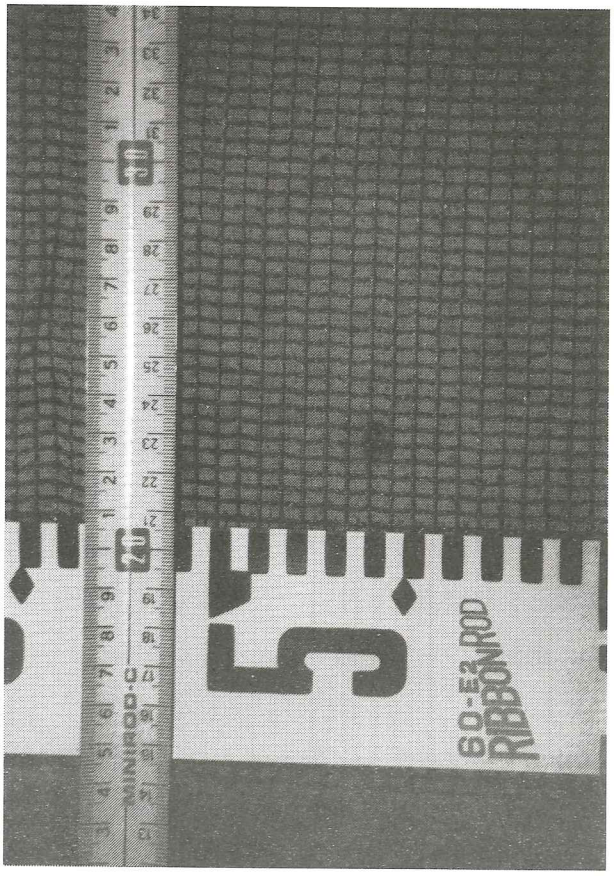
実験には，**写真－4.1**に示す空隙径が1mm，2mm，4mmのポリエチレン製ネットと，厚さ約3mmのジオテキスタイルシートを用いた。ネットおよびジオテキスタイルには延伸性があり，空隙をある程度まで押し広げることが可能である。ジオテキスタイルシートの空隙径は数値としておさえていないが，粒径0.1mmの細砂が通らないほど小さな空隙である。上記のようにネットを選択したのは，侵食防止シートの空隙径が最も小さいものでも1mm程度であることを考慮してである。また，ジオテキスタイルシー



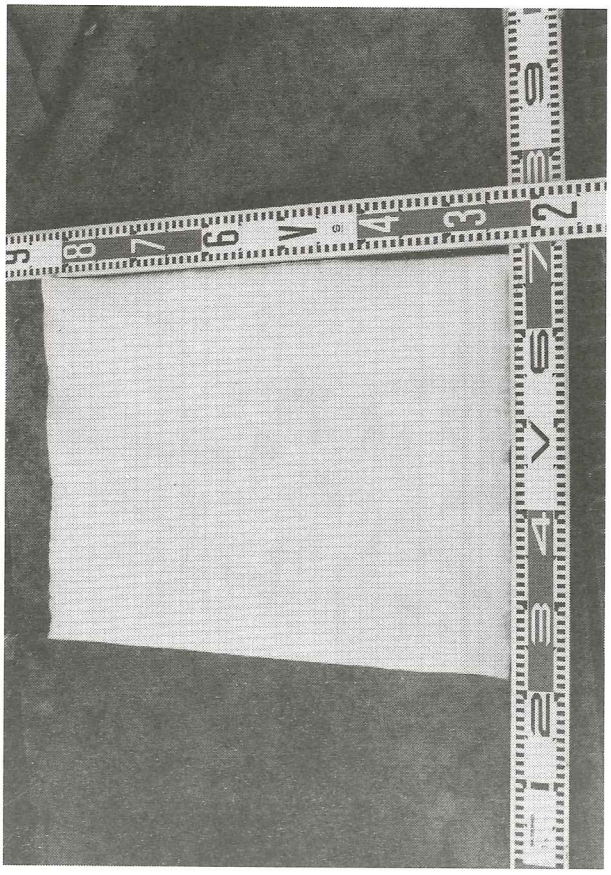
a）ネット(空隙径 1 mm)



b）ネット(空隙径 2 mm)



c）ネット(空隙径 4 mm)



d）ジオテキスタイルシート(厚さ 3 mm)

写真－4.1　実験に使用したネットおよびジオテキスタイルシート

トを用いたのは，より小さな空隙径のものでは，どの程度の影響が生じるかを明らかにするためである。

これらのシートを表−4.1に示す実験ケースのように地表面からの埋設深さを変えて敷設した。各ケースごとに幅37cm，長さ53cm，深さ17cmのプランターを１個ずつ用意した。また土壌としては作物栽培用の肥料を配合した黒土を用いた。そして，各プランターにノシバ，セイタカアワダチソウ，クズを繁茂させた。ノシバは市販の張り芝から，その他は土木研究所構内において採取した種子から発芽・生長させた。

表−4.1　根茎の伸長阻害確認実験の実験ケース・条件

ケース	シートの種類	シートの埋設深さ
0	なし	−
G	ジオテキ	3cm
N-1-1	1mmネット	1cm
N-1-2		3cm
N-2-1	2mmネット	1cm
N-2-2		3cm
N-3-1	4mmネット	1cm
N-3-2		3cm

実験期間は，ノシバでは平成９年１月13日～７月７日，その他は平成９年２月10日～７月７日である。１月13日～４月９日までは室温約22度に保った温室において，４月９日～７月７日は屋外にて栽培した。温室での栽培期間中には土壌表面が湿っているような状態を保つように散水を行った。その際，根茎の成長を促して短期間で結果が得られることを狙って，土中への酸素供給液剤を適宜散布した（肥料を配合した黒土を用いたのも同じ狙いである）。屋外に移してからは，土壌の乾燥状態がひどい場合以外は，特に散水していない。

なお，ノシバ以外の植物についてもノシバと同時に実験を開始したが，生育途中で立ち枯れ病やナメクジの発生により，多くの芽がしおれてしまった。そのため，２月10日にしおれた部分に再度，播種しなおして実験を再開した。その後も，立ち枯れ病と思われる病気の発生があり，実験終了時点まで成育状況が良好ではなかった(詳細については4.1.2に示す)。そのため，計測実施対象範囲としては，植生繁茂状況の最も良い範囲(プランターの栽培面積の約半分)を選択した。

根茎が十分にネットを貫通したのを確認して栽培を終了し，以下の計測を実施した。

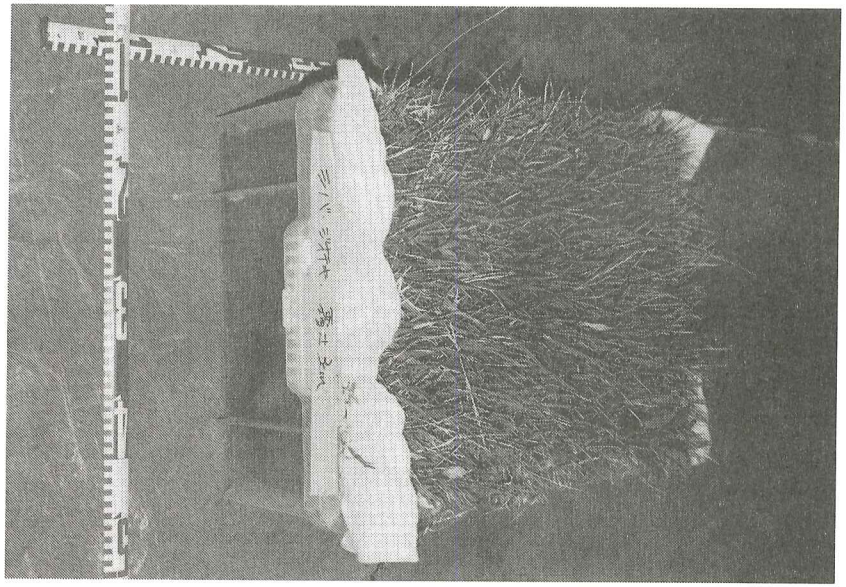
- 群落高
- 生育密度(シバは植被率(%)，その他は個体密度(本 /m^2))
- ネット埋設位置での根および地下茎の直径
- 地上部(葉，茎)の現存量
- 根茎の現存量(ネットの上下に分けて，乾重量を測定)
- 土壌硬度(ネットの上下に分けて：山中式土壌硬度計による)

⑵　実験の結果

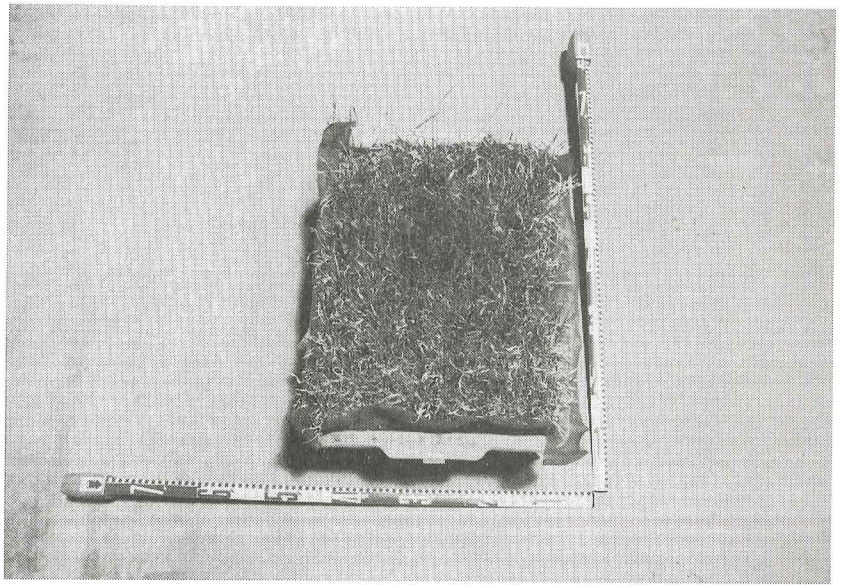
栽培終了直後(７月８～10日)でのノシバ，セイタカアワダチソウ，クズの繁茂状況を写真4.2～4.4に示す。ノシバは，すべてのケースで繁茂状況が良好であり，ネットの有無による見た目の差異はなかった。セイタカアワダチソウは，全般的に繁茂状況が良くない。特に空隙径４mmのネットを深さ３cmに埋設したケースN−3−2およびネットなし(ケース０)での繁茂状況が悪い。繁茂状況の差異が生じた最大の原因は上記したように立ち枯れ病であり，そのためネットの有無に帰因する見た目の差異を判別することが



ケースO



ケースG



N－1－1

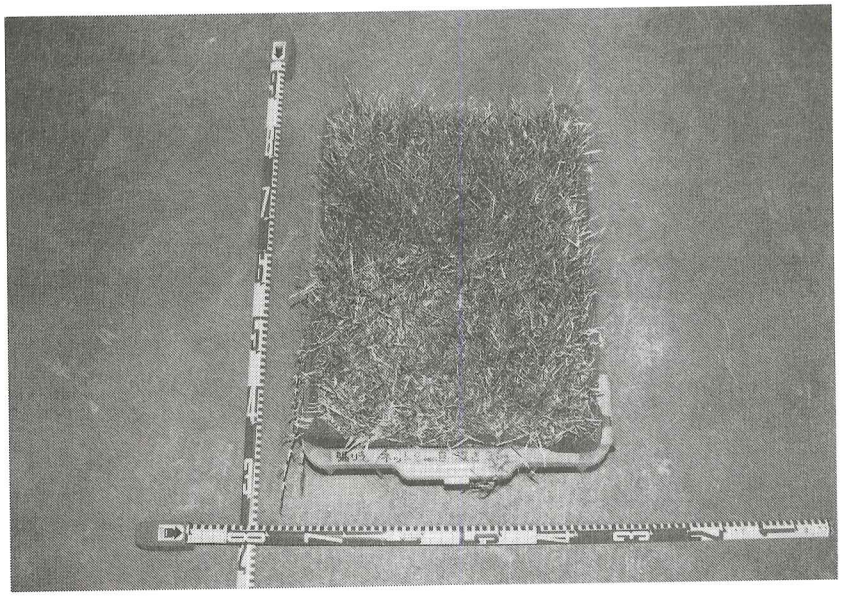


N－1－2

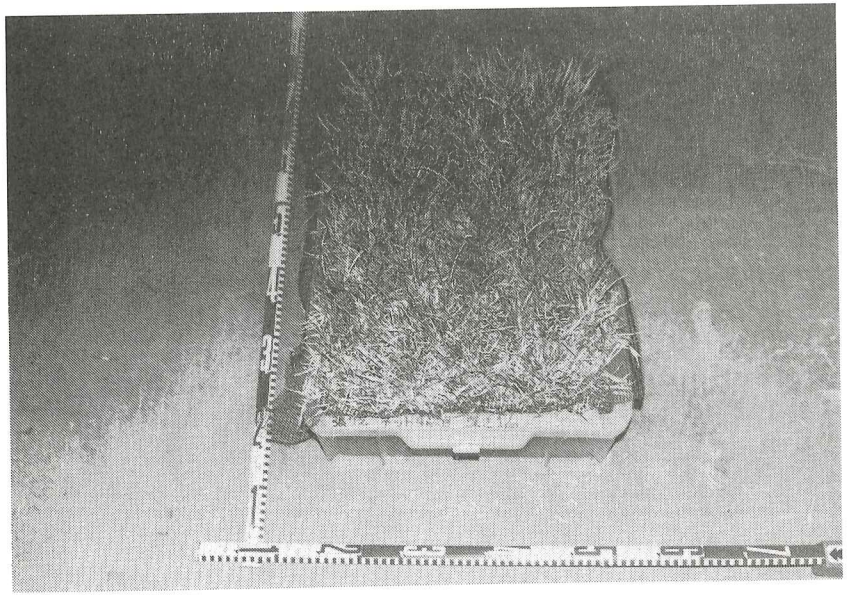
写真－4.2(1)　シバの繁茂状況



N－2－1

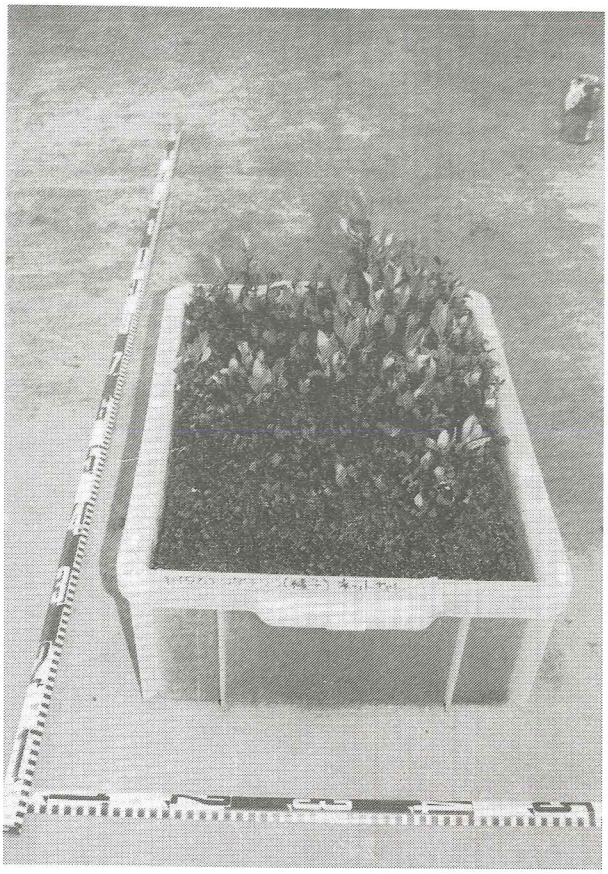


N－2－2



N－3－1

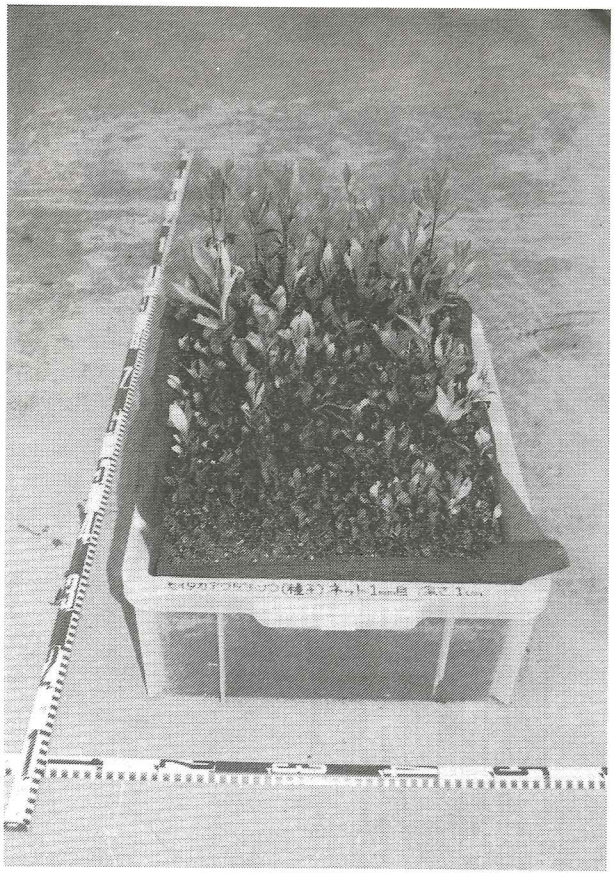
写真－4.2(2)　シバの繁茂状況



ケースO



ケースG

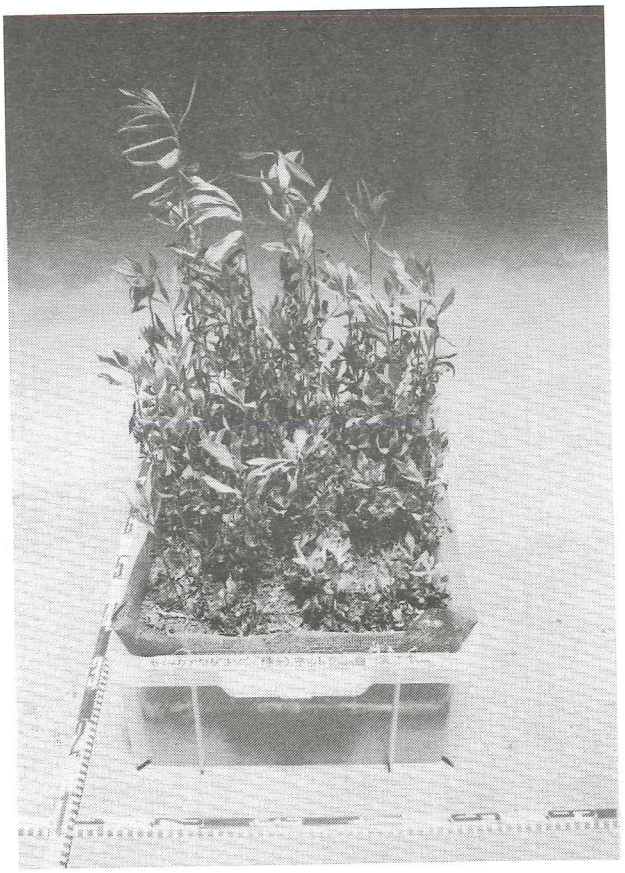


N－1－1



N－1－2

写真－4.3(1)　セイタカアワダチソウの繁茂状況



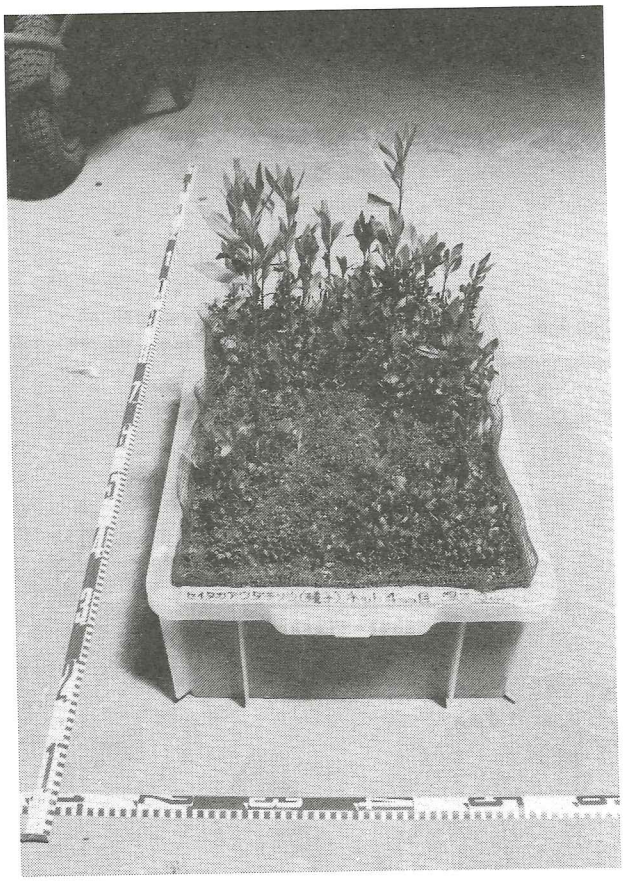
N－2－1



N－2－2

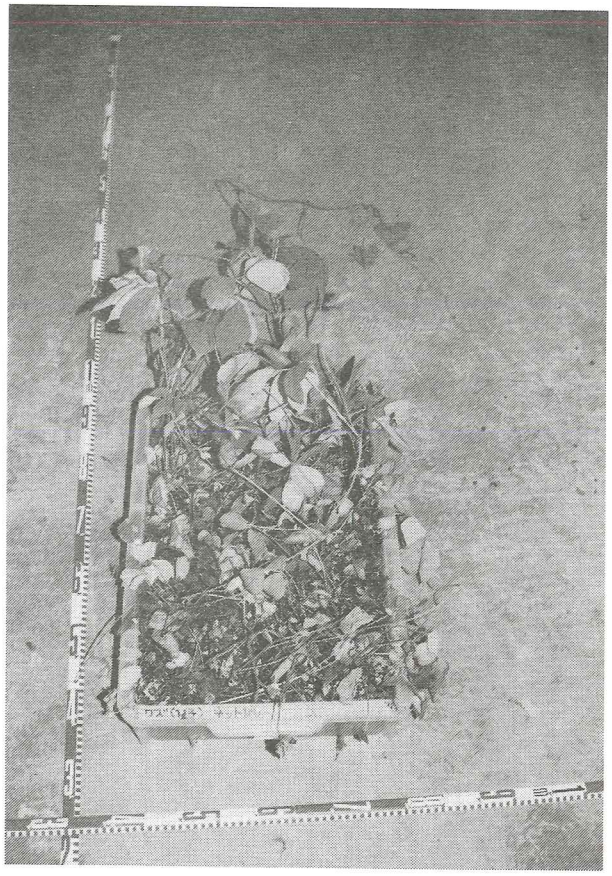


N－3－1



N－3－2

写真－4.3(2)　セイタカアワダチソウの繁茂状況



ケースO



ケースG



N－1－1



N－1－2

写真－4.4(1)　クズの繁茂状況



N－2－1



N－2－2



N－3－1



N－3－2

写真－4.4(2)　クズの繁茂状況

表－4.2　植物の繁茂状況に関する測定結果

<シバ>

項　目	単位	ネット区						ｼﾞｵﾃｷｽ区	対象区
ネット目合い	(mm)	4mm		2mm		1mm		－	－
ネット設置深さ	(cm)	3cm	1cm	3cm	1cm	3cm	1cm	3cm	－
群落高	(cm)	－	9	9	9	10	10	10	10
生育密度	(%)	－	100	100	100	100	100	100	100
地上茎平均長さ	(cm)	－	－	－	－	－	－	－	－
地上茎平均太さ	(mm)	－	－	－	－	－	－	－	－
「地下茎」のシート通根位置平均直径	(mm)	－	1.8	1.8	1.7	2.1	2.1	2.2	－
「細根」のシート通根位置平均直径	(mm)	－	0.5	0.5	0.4	0.5	0.5	0.7	－
地上部現存量	(g/m²)	－	868.1	781.4	732.2	984.2	753.0	715.5	690.2
根の現存量(シート上)	(g/m²)	－	785.3	932.3	914.4	1061.0	946.0	968.4	857.8
根の現存量(シート下・上層)	(g/m²·5cm	－	126.5	96.7	63.0	87.8	160.3	73.0	104.4
根の現存量(シート下・下層)	(g/m²·5cm	－	54	27.5	83.7	36.1	77.9	54.1	57.2
土壌硬度(シート上)	(kg/cm2)	－							
土壌硬度(シート下)	(kg/cm2)	－	1.4	2.3	3.9	4.3	3.0	0.7	0.94

<セイタカアワダチソウ>

項　目	単位	ネット区						ｼﾞｵﾃｷｽ区	対象区
ネット目合い	(mm)	4mm		2mm		1mm		－	－
ネット設置深さ	(cm)	3cm	1cm	3cm	1cm	3cm	1cm	3cm	－
群落高	(cm)	25	15	40	20	25	20	18	15
生育密度	(本/m²)	2,224	2,587	1,483	3,119	2,000	3,245	4,615	2,503
地上茎平均長さ	(cm)	11.0	24.2	13.4	24.5	15.4	14.2	13.6	8.0
地上茎平均太さ	(mm)	2.0	2.6	2.0	2.7	2.1	1.8	2.0	1.7
「地下茎」のシート通根位置平均直径	(mm)	－	－	－	－	－	－	－	－
「細根」のシート通根位置平均直径	(mm)	0.6	0.8	0.5	0.5	0.6	0.5	0.6	－
地上部現存量	(g/m²)	291.3	717.3	418.3	536.7	434.6	392.8	556.0	282.5
根の現存量(シート上)	(g/m²)	150.4	197.1	226.9	176.2	181.0	120.8	228.1	166.7
根の現存量(シート下・上層)	(g/m²·5cm	68.1	425.3	91.2	234.6	153.5	103.2	78.7	324.2
根の現存量(シート下・下層)	(g/m²·5cm	60.6	125.6	38.2	176.1	24.6	39.2	61.8	75.3
土壌硬度(シート上)	(kg/cm2)	－	－	－	－	－	－	－	－
土壌硬度(シート下)	(kg/cm2)	6.6	5.4	5.4	3.0	6.5	7.2	0.5	8.9

<クズ>

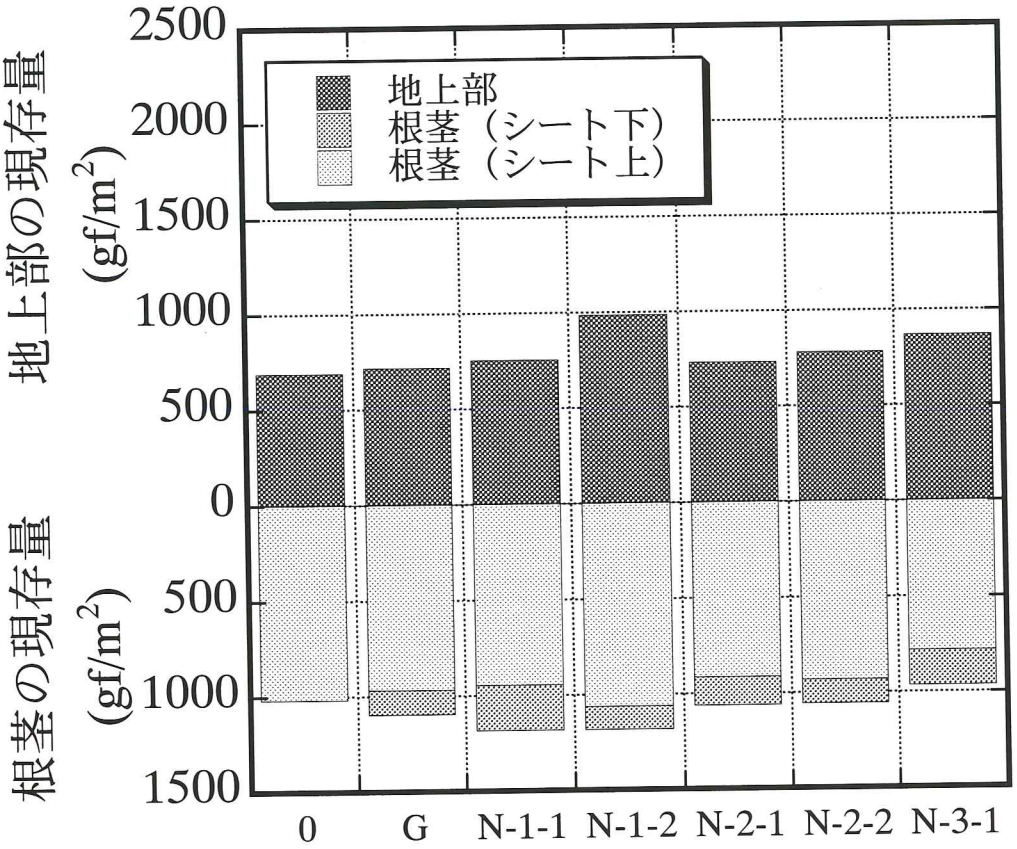
項　目	単位	ネット区						ｼﾞｵﾃｷｽ区	対象区
ネット目合い	(mm)	4mm		2mm		1mm		－	－
ネット設置深さ	(cm)	3cm	1cm	3cm	1cm	3cm	1cm	3cm	－
群落高	(cm)	－	－	－	－	－	－	－	－
生育密度	(本/m²)	252	154	252	252	476	266	657	1,049
地上茎平均長さ	(cm)	68.3	99.8	76.4	49.0	135.5	35.0	61.9	25.5
地上茎平均太さ	(mm)	－	－	－	－	－	－	－	－
地下茎の長さ	(cm)	11.3	13.3	9.6	14.6	13.5	13.6	13.3	12.9
地下茎の最大太さ位置の直径	(mm)	5.7	6.5	6.1	6.0	5.8	6.0	4.8	4.9
地下茎のシート通根位置平均直径	(mm)	3.6	3.1	2.5	2.7	2.9	2.6	1.6	－
地上部現存量	(g/m²)	919.8	1857.5	2351.8	712.5	1153.0	759.4	531.1	405.9
根の現存量(シート上)	(g/m²)	70.1	67.0	118.0	124.8	249.9	134.7	480.8	807.0
根の現存量(シート下)	(g/m²·10c	265.0	220.6	500.9	393.4	976.1	664.8	670.7	
土壌硬度(シート上)	(kg/cm2)	－	－	－	－	－	－	－	－
土壌硬度(シート下)	(kg/cm2)	0.5	1.0	0.9	1.9	0.5	1.1	0.9	0.9

できなかった。クズは，全般的に繁茂状況が良かった。強いて言えばネットなし(ケース０)の成育状況がやや劣っているようであった。

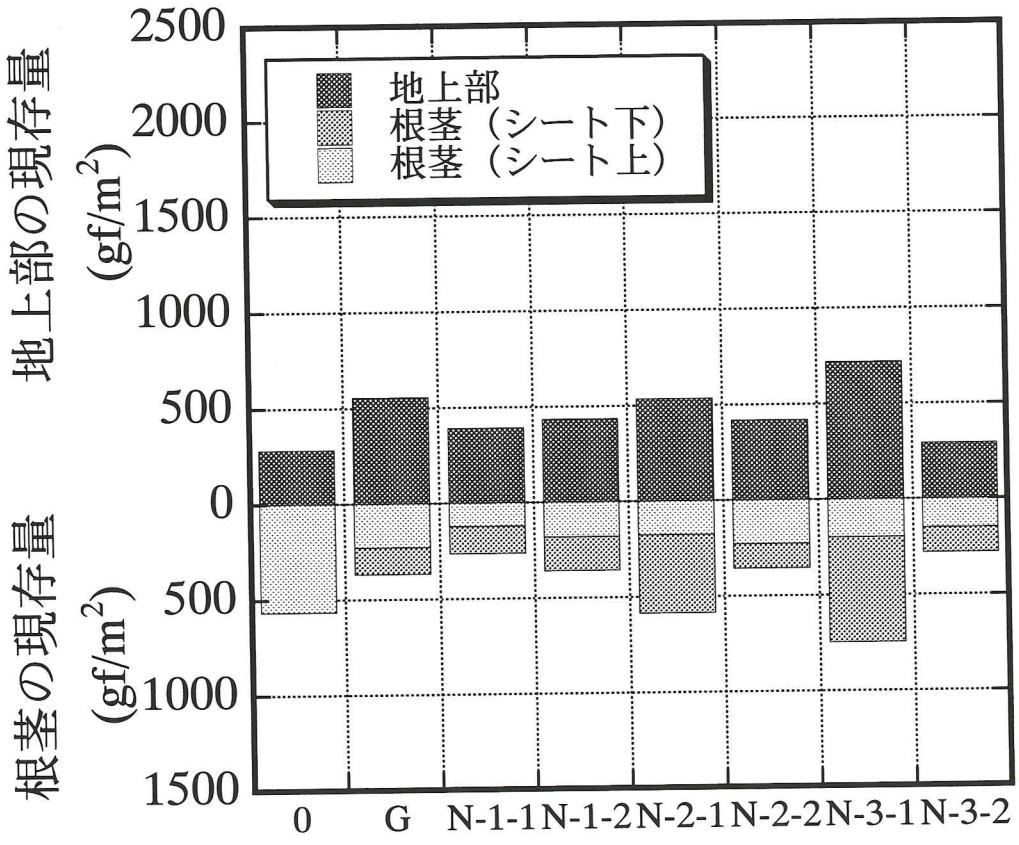
各種測定項目の測定結果を表－4.2に示す。この結果を各植物ごとに整理すると，以下のような特長が挙げられる。

・ノシバ

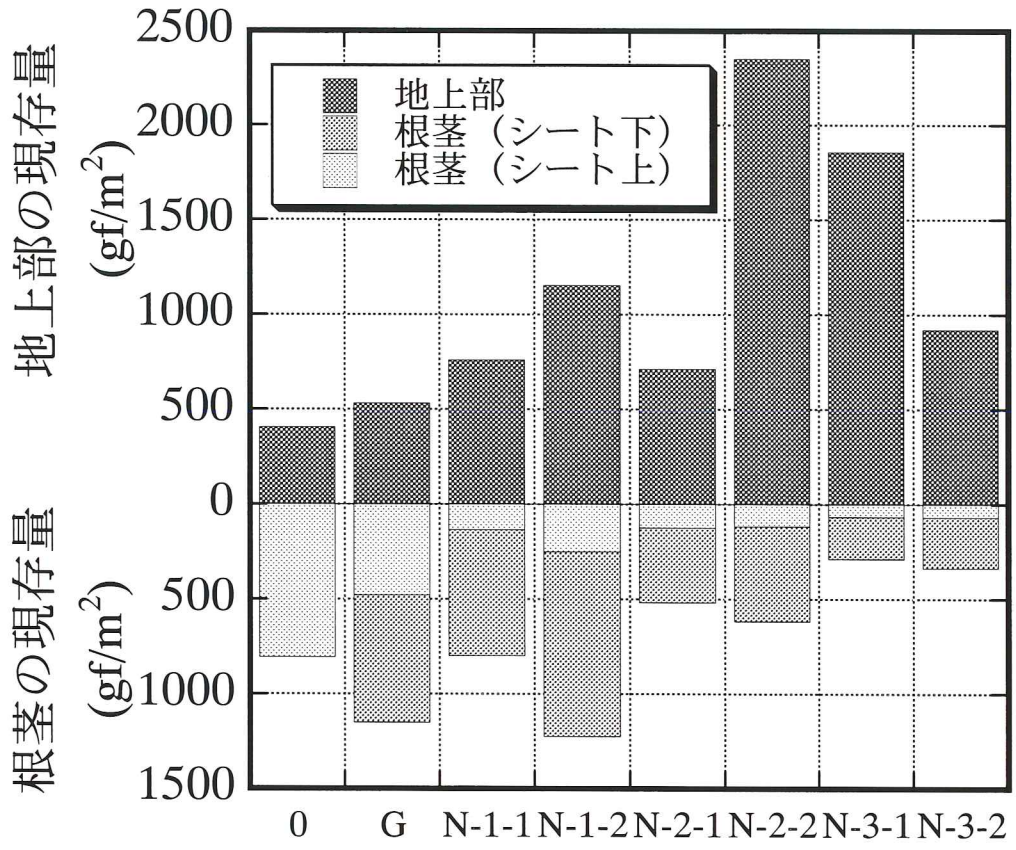
地上部および根茎の現存量を比較した結果を図－4.1に示す。各ケースともほぼ同様な値であり，ネットやジオテキスタイルシートによる現存量の変化は顕著ではない。この原因の一つとしてシートより上の土中に根茎の現存量が集中しており，そのためシートの影響が生じにくかったことが考えられる。



図－4.1　シバの地上部および根茎の現存量



図－4.2　セイタカアワダチソウの地上部および根茎の現存量



図－4.3　クズの地上部および根茎の現存量



写真－4.5　ネットを貫通したクズの根茎の様子

• セイタカアワダチソウ

地上部および根茎の現存量を比較した結果を図－4.2に示す。埋設深１cmの場合について空隙径１mm，２mm，４mm(ケースＮ－１－１，Ｎ－２－１，Ｎ－３－１)を比較すると，空隙径が小さいほどシート下の根茎の現存量が小さくなる傾向が見られる。それに応じて地上部の現存量も減少していることから，ネットによる根茎の伸長障害効果が生じた可能性がある。しかし，埋設深３cmのケースでは上記のような傾向が見られない。セイタカアワダチソウの根茎は地表近傍の範囲に密に分布する特徴があるため，地表面から１cm程度の位置にネットを敷設すると，成育状況に影響を及ぼす可能性があると推察される。

• クズ

地上部および根茎の現存量を比較した結果を図－4.3に示す。根茎の現存量に着目すると，ネットの空隙径が小さいほど，現存量が増加する傾向が認められる。根茎の観察によると，埋設深３cmで空隙径が小さいジオテキスタイル，ネット１mmでは細根の発達が他のケースに比較して顕著であった。また，写真－4.5に示すように主根はネットによって著しくくびれていた。以上より，主根を一箇所大きくくびれさせても，細根の発達により繁茂状況を良好に保つことができたと推定される。

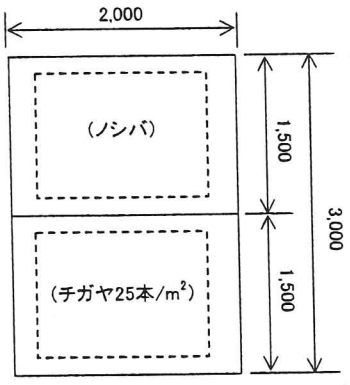
以上の実験結果から，地表面のごく近傍に空隙径の小さいシートを敷設すると，若干の成長障害が生じる可能性があるが，地表面近傍に細根を発達させる植物ではほとんど影響がないと考えられる。

4.1.2　シートに対する通根性

温室での実験では，生育期間が短かったためシバでは十分な根茎成長がなかったこと，また実物のシートのような厚さがないネットを用いて空隙径の影響のみを調べるのに留まっている。ここでは生育期間を約１年とし，また堤防のり面での通常の栽培状況と同様な方法でもって実際にシート上にノシバおよびチガヤを繁茂させ，その生育に対する阻害の有無を明らかにした実験についてまとめて示す。

(1)　実験の概要

礫混じり砂で構成される地面に幅３m，長さ28m，深さ0．4mの溝を４本掘削し，そこに山砂(江戸崎産，平均粒径約0．4mm)を敷き詰めた後，図－4.4に示すように幅２m，長さ３mの一区画ごとにシートの種類(詳細について写真－2.1，表－2.3参照)を変えて埋設した。ここで埋設とは，上記の山砂をシートに充填するとともに，さらにシート上に厚さ約３cmの覆土を行うことである。埋設したシート上には，図－4.4



A-1-2	A-6-2	B-2-2	D-1-3
A-1-3	A-6-3	B-2-3	D-1-4
A-2-2	A-7-2	B-3-1	D-1-5
A-2-3	A-7-3	B-3-2	D-1-6
A-3-2	A-8-1	C-1-1	D-3-2
A-3-3	A-8-2	C-1-2	D-3-3
A-4-2	A-9-2	C-2-1	D-2
A-4-3	A-9-3	C-2-2	A-5
A-4-5	B-1-2	C-3-2	なし(3ヶ)
A-4-6	B-1-3	C-3-3	

図－4.4　シート上でのシバおよびチガヤの繁茂実験のケース

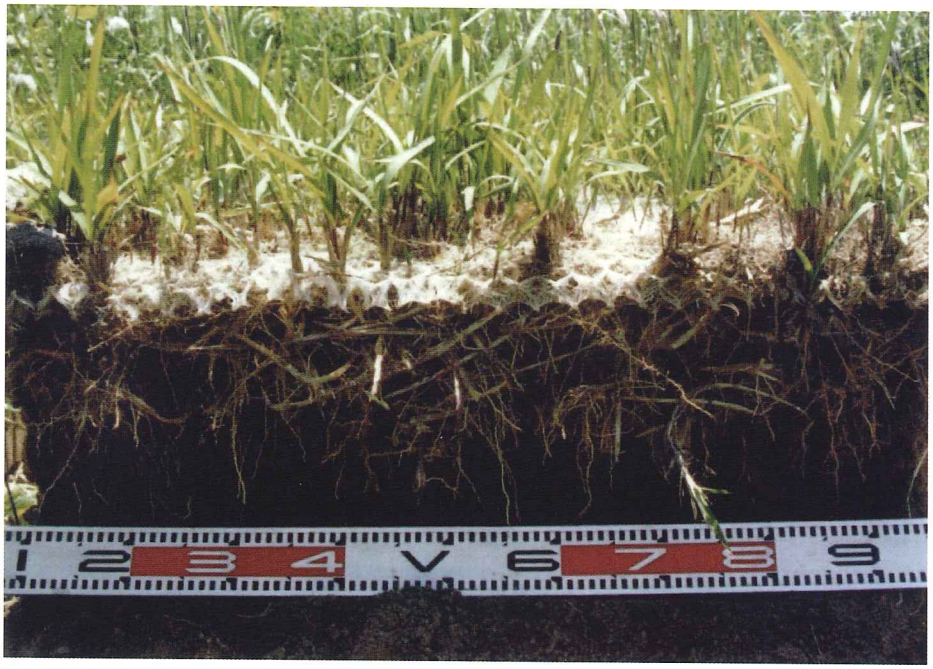
に示したように，一区画を幅２m，長さ1.5mに２等分して，シバとチガヤ地下茎の植栽（１m^2あたり25本）を行った（平成10年６月）。また，対象区としてシートなしの区画も同様に用意した。

約１年の経過後，まず目視によってシバとチガヤの繁茂状況を観察した。また，4.1.3に詳細を示す侵食実験の対象としたシート（**表－4.3**参照）については，チガヤが繁茂する範囲で根茎の現存量（湿重量）を測定した。現存量の測定は，①内径10cmの塩化ビニル管を地面から深さ20cm程度まで鉛直に打ち込み，②その管内に採取された土砂を地表からの距離が０～2.5（シート上面まで），シート内にあたる2.5～５（シート下面まで），５～10，10～15，15～20cmの５層に分けて，③各層ごとに土中に含まれる根茎を収集して重量測定を行うという手順で行った。各層の現存量をその層の体積（塩化ビニル管の断面積×層厚）で割ることで，単位体積あたりの土中に含まれる根茎の重量と定義される「根茎量」を求めた。なお，上記の現存量測定は１箇所あたり２回行っており，それら測定値の平均値から根茎量を求めている。

さらに根茎量とともに，草丈，茎・地下茎・根（第一枝）の直径，単位面積あたりの個体数（以下，繁茂密度とよぶ）を測定した。草丈，茎・地下茎・根（第一枝）の直径は無作為に選択した12個体について測定して，平均値を求めている。また，繁茂密度は，幅１m，長さ1.5mの範囲（4.1.3に詳細を示す鋼製枠内に採取された範囲）の総数を測定して求めている。

⑵　実験の結果

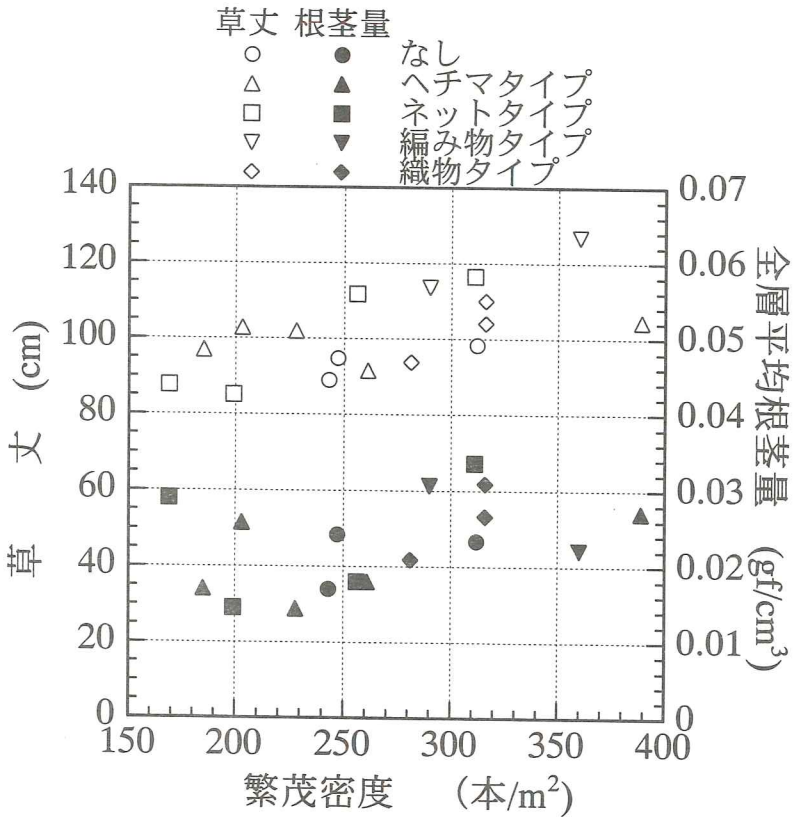
各区画の繁茂状況を目視で比較したところ，シートの有無や種類による差異はなかった。ただし，特にチガヤを繁茂させた範囲では，養生が悪く地下茎から発芽，定着しなかった部分が裸地になったり，ヨシやスギナなど隣接地に繁茂している他の植物の侵入が見られた。また，チガヤがシートを貫通して伸長している状況の一例を**写真－4.6**に示す。シートが露出しているが，これはシート上～シート内の土砂を侵食実験（4.1.3参照）によって流失させた後に撮影したためである。根茎がシート下の地中に広く伸長しているとともに，茎と地下茎がピンのようにシートを貫通している状況が見られる。以上のように目視による観察では，シートの有無や種類によって，シバやチガヤの繁茂状況の差異は認められず，また根茎も



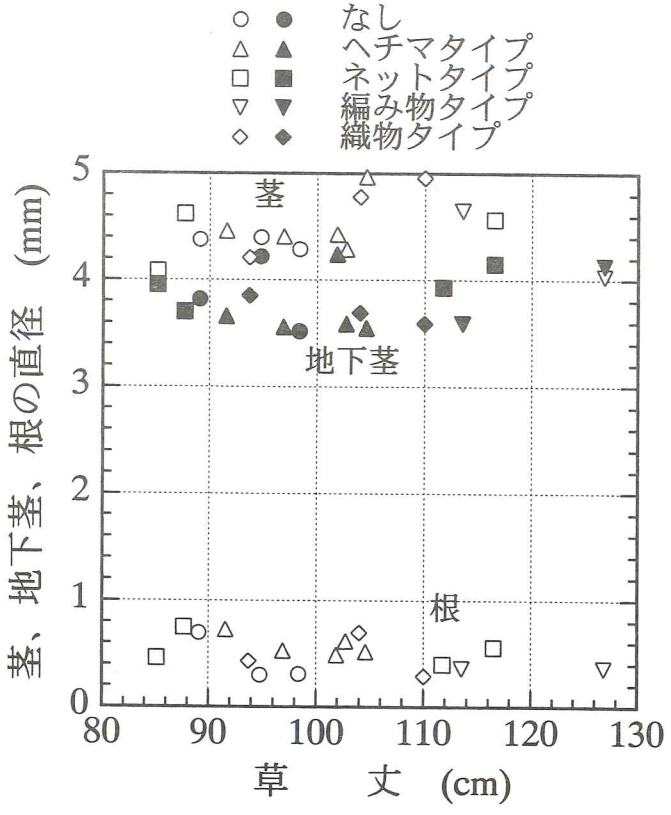
写真－4.6　シートを貫通して伸長するチガヤの根茎

表－4.3　チガヤの草丈，茎・地下茎・根（第一枝）の直径，繁茂密度，根茎量の測定結果

シートタイプ	シート名	繁茂密度	草丈	直径　(mm)			根茎量(gf/cm^3)					
		($本/m^2$)	(cm)	茎	地下茎	根	0～2.5cm	2.5～5.0cm	5.0～10cm	10～15cm	15～20cm	全層（0～20cm）
-----	なし	247	94.75	4.4	4.22	0.3	0.04	0.08	0.02	0.01	0.007	0.024
		312	98.33	4.29	3.52	0.31	0.029	0.032	0.036	0.02	0.007	0.023
		243	89.08	4.38	3.82	0.7	0.033	0.025	0.023	0.011	0.005	0.017
ヘチマ	A-3-3	228	101.9	4.43	4.24	0.49	0.014	0.015	0.017	0.019	0.007	0.014
	B-1-2	389	104.6	4.97	3.55	0.52	0.019	0.098	0.022	0.019	0.009	0.027
	B-2-2	185	96.9	4.41	3.56	0.53	0.015	0.027	0.025	0.012	0.01	0.017
	B-2-3	203	102.8	4.29	3.59	0.62	0.051	0.071	0.023	0.014	0.005	0.026
	B-3-2	261	91.6	4.46	3.66	0.73	0.006	0.024	0.024	0.019	0.014	0.018
ネット	A-4-3	256	111.8	3.93	3.93	0.4	0.017	0.037	0.028	0.006	0.011	0.018
	A-4-6	311	116.5	4.57	4.15	0.56	0.08	0.067	0.022	0.032	0.007	0.034
	A-8-1	199	85.13	4.08	3.95	0.46	0.025	0.025	0.02	0.007	0.006	0.015
	A-8-2	169	87.7	4.62	3.7	0.75	0.038	0.048	0.036	0.028	0.009	0.029
編み物	C-3-1	290	113.5	4.65	3.59	0.36	0.027	0.048	0.047	0.027	0.011	0.031
	C-3-2	360	126.8	4.03	4.13	0.36	0.057	0.034	0.025	0.015	0.003	0.022
織物	D-1-6	316	110	4.96	3.59	0.29	0.043	0.068	0.029	0.011	0.011	0.027
	D-3-2	316	104	4.78	3.69	0.7	0.068	0.041	0.041	0.021	0.007	0.031
	D-3-3	281	93.75	4.21	3.85	0.43	0.051	0.042	0.025	0.009	0.003	0.021



図－4.5　繁茂密度と草丈および全層平均根茎量の関係



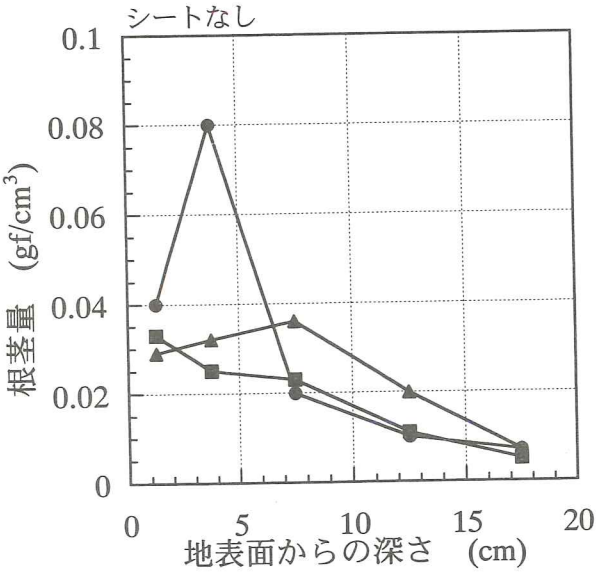
図－4.6　草丈と茎・地下茎・根(第一枝)の直径との関係

シートを貫通して良好に伸長していた。

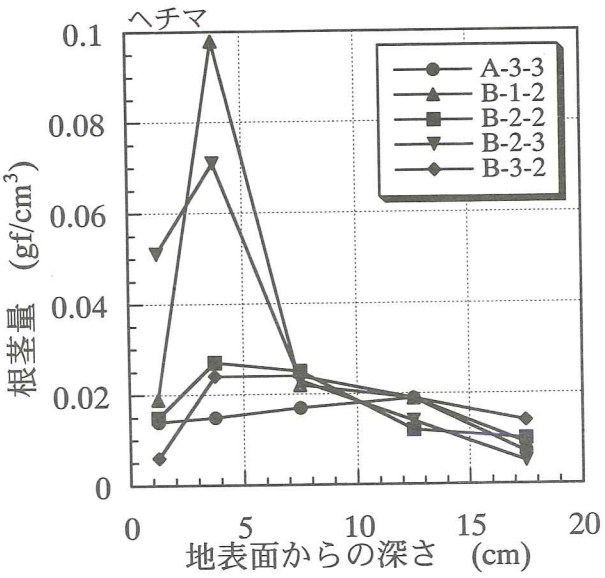
表－4.3に示す繁茂密度，草丈，全層平均根茎量（深さ０～20cmでの平均根茎量），茎・地下茎・根(第一枝）の直径の測定結果に基づいてシートの有無による差異があるかより詳細に調べる。まず，繁茂密度と草丈および全層平均根茎量の関係を図－4.5に示す。いずれも繁茂密度の増加に伴って大きくなる傾向が見られる。この原因は，チガヤの養生の差異によるものと思われる。次に草丈と茎・地下茎・根(第一枝)の直径の関係を図－4.6に示す。いずれの直径とも，草丈の増減に関係なくある範囲内にばらついている。以上の測定結果についてシートの有無に分けて比較すると，いずれも同じような範囲分布しており，上記した繁茂状況の観察結果と同様に，特に顕著な差異が認められない。

根茎量の鉛直分布の測定結果を図－4.7に示す。根茎量が深さ方向に減少する傾向が見られる。また，シートの固定に直接関係する2.5～5 cm（シート内にあたる範囲）および５～10cm（シート直下の層）に着目すると，シートなしでは0.025～0.080(g/cm³)および0.020～0.035(g/cm³)となったが，この値の範囲はシートありとほぼ一致している。このようにシートによって根茎の深さ方向の分布に変化が特に見られない。

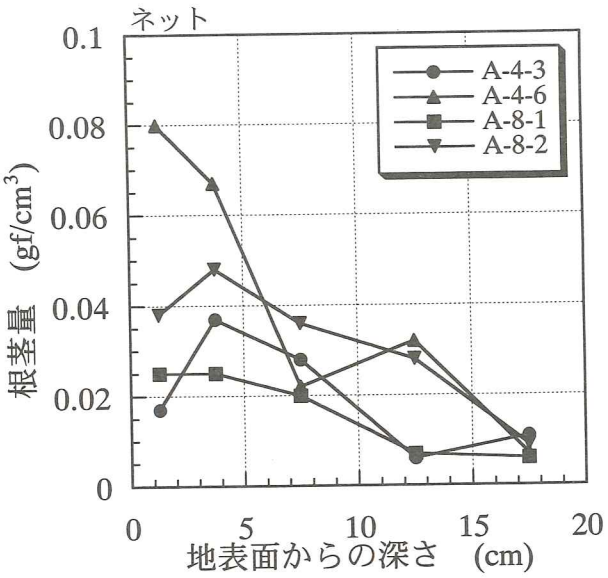
以上の結果から，シートは根茎の伸長を阻害することなく，植生の地



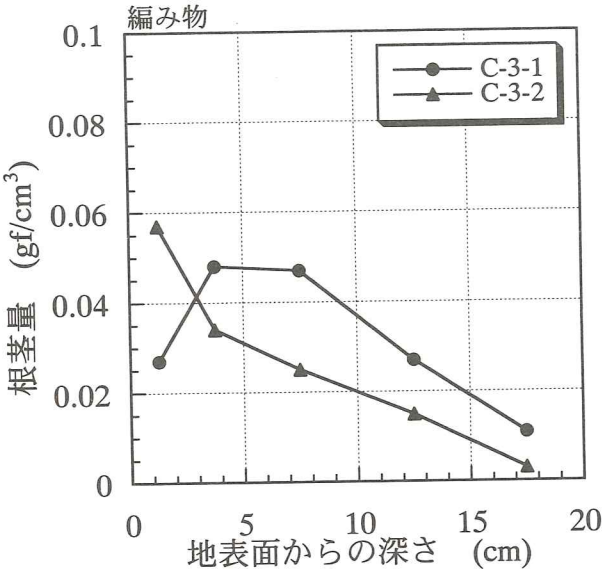
a）シートなし



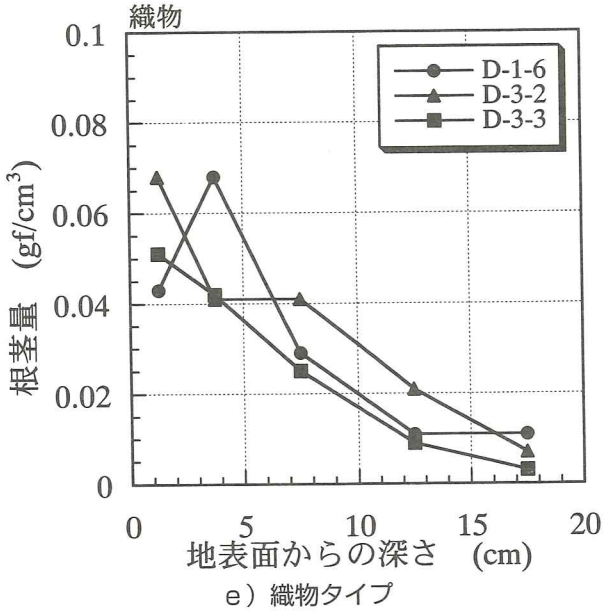
b）ヘチマタイプ



c）ネットタイプ

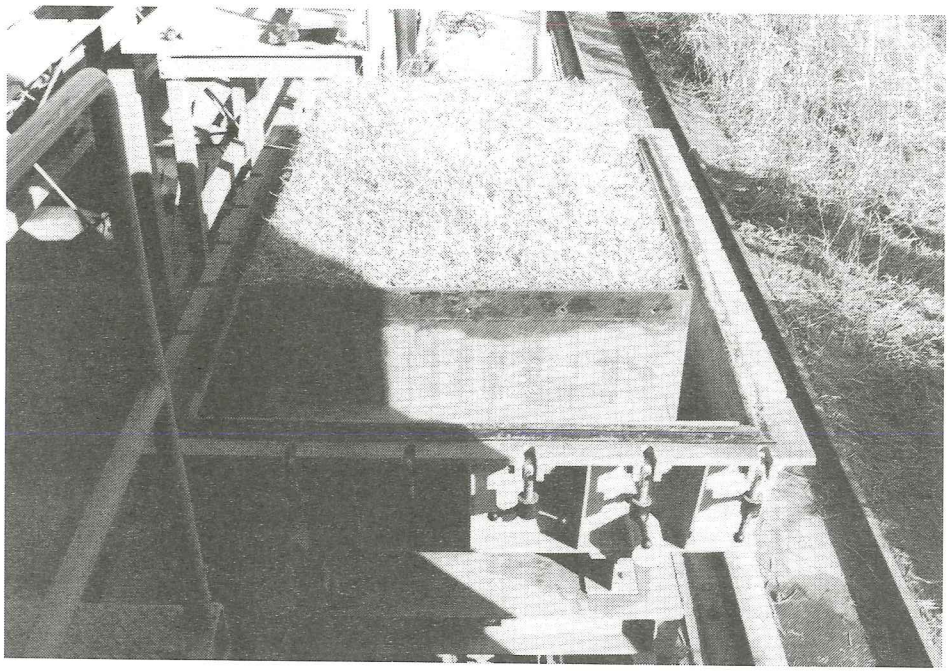


d）編み物タイプ



e）織物タイプ

図－4.7　根茎量の鉛直分布



写真－4.7　侵食実験区間に設置された供試体設置装置の概観

上部もシートなしの場合と同じように良好に生育することが分かった。シートの平均的な空隙径は4.1.1で根茎の伸長を阻害する傾向が見られたネット（1～2mm）やジオテキスタイルシートより大きいため，上記のような結果になったと思われる。

4.1.3　根茎によるシートの固定

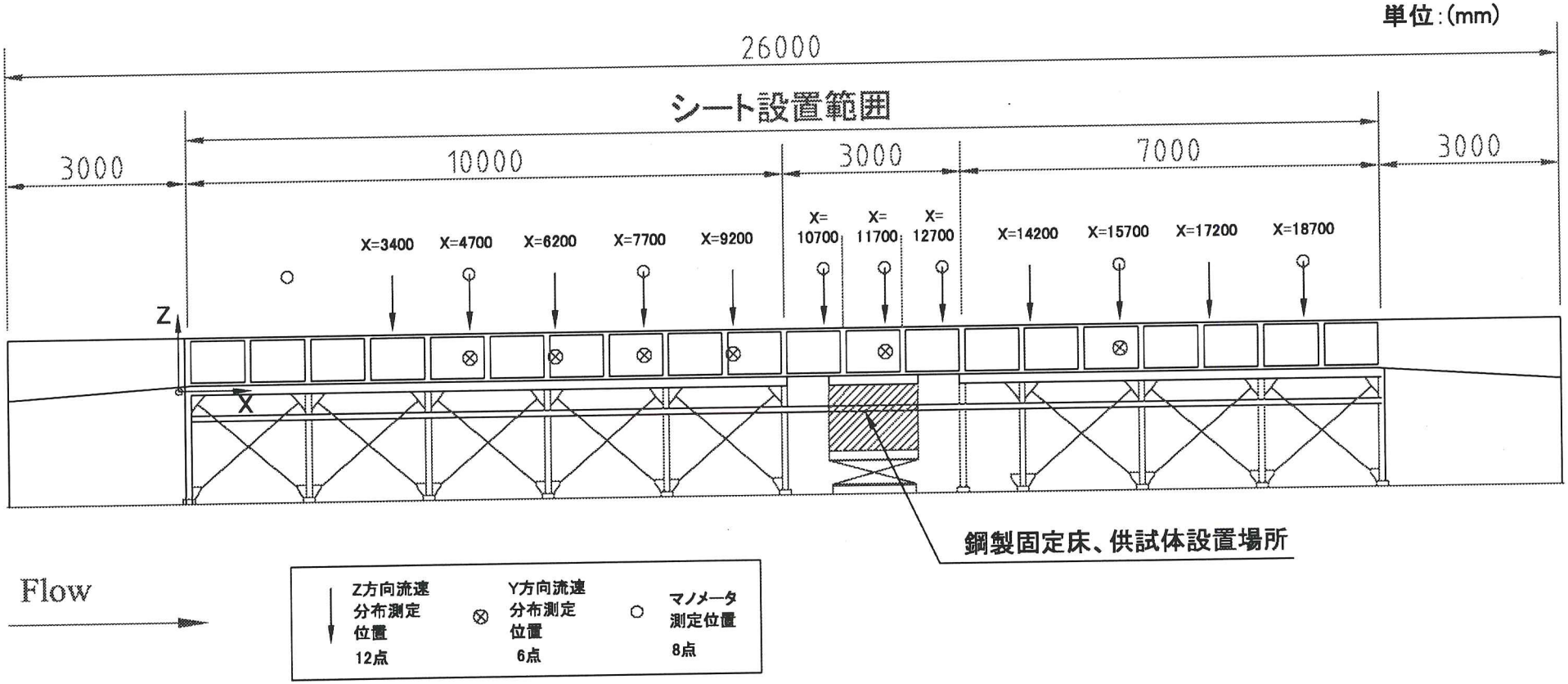
1.3.2⑶に示したアイデアのように根茎によってシートが固定できるか，実際の出水とほぼ同等の高流速での侵食実験を行って確認した。

⑴　実験の概要

実験に用いた水路は，図－4.8に示すように幅1.0m，高さ0.8m，長さ20mの矩形管水路であり，最大で約4（m^3/s）（断面平均流速で約5（m/s））の通水が可能である。侵食実験区間には，写真－4.7に示すように幅1.0m，長さ1.5m，深さ0.5mの鋼製枠が着脱できる装置が設置されている。鋼製枠は底面と側壁に分離できるので，写真－4.8に示すようにして，侵食実験用の供試体を鋼製枠内に不攪乱で採取することができる。この方法によって表－4.4に示すシートが敷設されてたチガヤ繁茂範囲において供試体を採取した。なお，侵食実験区間の上下流には水路床（ステンレス製）への粗度付けのためにプ

表－4.4　根茎によるシートの固定性に関する実験ケース

実験ケース	シートタイプ	シート名	繁茂密度 ($本/m^2$)	草丈 (cm)	侵食深 (cm)
Ⅰ	----	なし	312	98.33	2.67
Ⅱ	ヘチマ	B-2-2	185	96.9	3.49
Ⅲ	編み物	C-3-1	290	113.5	3.47
Ⅳ	ヘチマ	A-3-3	228	101.9	3.17
Ⅴ	ネット	A-4-6	311	116.5	3.04
Ⅵ	ネット	A-8-2	169	87.7	5.52
Ⅶ	織物	D-3-2	316	104	3.58
Ⅷ	織物	D-1-6	316	110	2.18
Ⅸ	ヘチマ	B-1-2	389	104.6	3.42
Ⅹ	ヘチマ	B-3-2	261	91.6	3.03



図－4.8　矩形管水路の諸元と流速およびピエゾ水頭の測定位置



1)植物を痛めないように鋼製枠を地面上に下ろす



2)鋼製枠を地面に押し込む



3)枠周囲を掘削した後、底板を差し込む

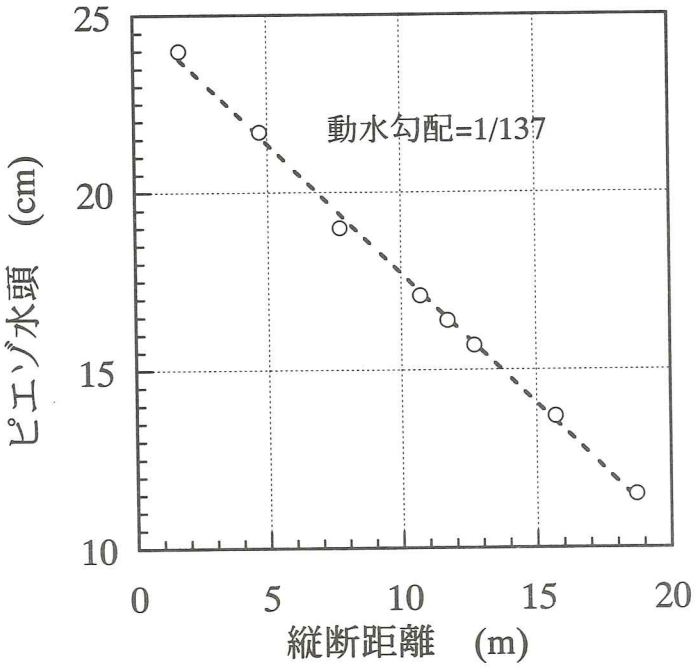


4)水路に運搬する

写真－4.8　鋼製枠を用いた供試体の採取方法

ロトタイプシート（4.2.1に示す実験で用いたシートと同一）を敷設した。

実験ケースを表－4.4に示す。予備実験では，侵食外力の作用状況を明らかにすることを目的として，侵食実験区間にもステンレス製の固定床を設置するとともに粗度付けとして用いたプロトタイプシートを敷設し，侵食実験区間での流速およびレイノルズ応力分布をレーザー流速計を用いて測定した。実験Ⅰ～Ⅹでは，チガヤを繁茂させた供試体を水路に設置した後，断面平均流速を2（m/s）に一定に保ったまま平均侵食深が3.0～3.5cmに達するまで通水し，シートの固定状況を確認する。なお，シート上には平均的には厚さ3cm程度の土砂で覆われている。したがって上記の平均侵食深に達するまで通水すると，シート表面が全面的に洗い出される状況となる。また，部分的には，シート上の土砂厚が3cm以下であったり，侵食深が4～5cmにまで達することがあるので，シート内に充填した土砂が完全に洗い出された状況となった（例えば写真－4.6参照）。したがってシートが洗い出された状況において，根茎によるシート固定の可否を判断するのに十分な侵食深に達していると判断できる。なお，侵食深は，幅80cm，長さ110cmの範囲を対象とし10cm間隔の格子点（全108点）で測定した。



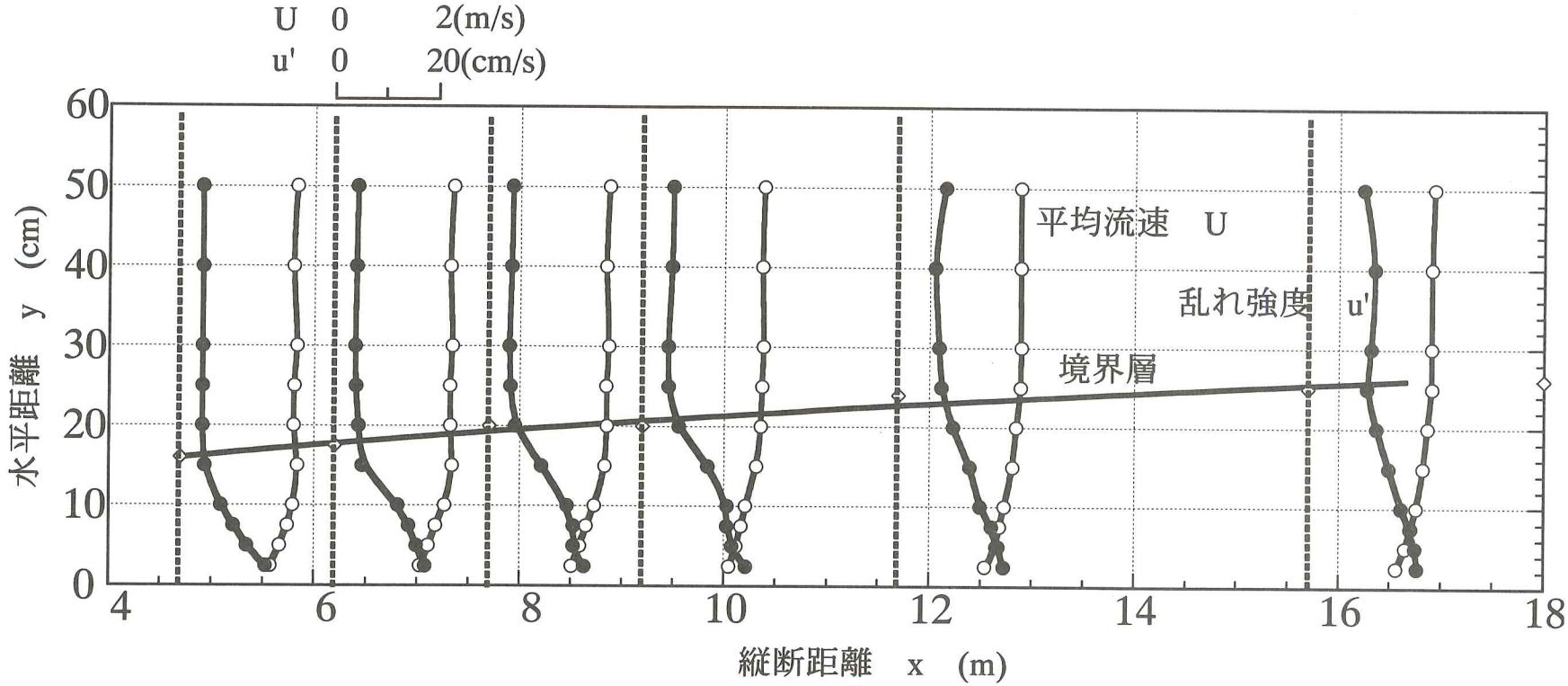
図－4.9　断面平均流速2（m/s）における動水勾配の測定結果

⑵　予備実験の結果

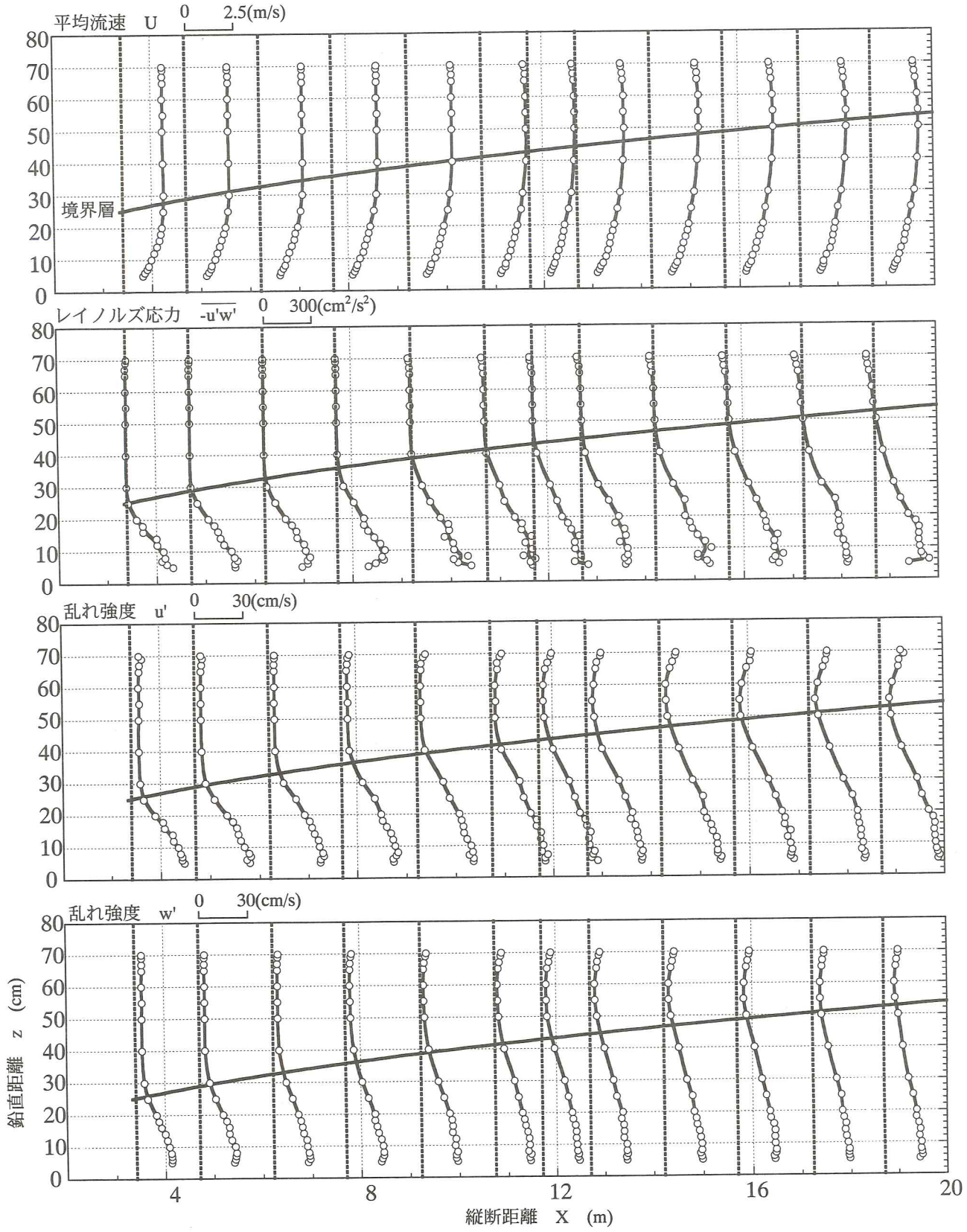
予備実験では図－4.8に示す位置で流速分布およびピエゾ水頭の測定を行った。なお，縦断距離xはシート敷設を行った上流端を原点として下流方向に，横断距離yは通水方向に対して左側壁を原点として右側壁方向に，水深方向距離zは河床面を原点として鉛直上方に正となる座標軸である。さらにそれぞれの方向の流速成分をu，v，wとする。

動水勾配は，測定結果を図－4.9に示すように1/137となった。z=40cm（水路高さの半値）での平均流速Uおよび乱れ強度u′のy方向分布の測定結果を図－4.10に示す。y軸方向の境界層厚さは，側壁から約20cmとなっている。この原因は側壁がガラス製で粗度が小さく，境界層の発達が顕著でなかったためと推察される。特に側壁から10cm以内では流速の逓減が大きい。以上の結果を考慮して，侵食深の測定は側壁から10cm以上離れた位置で行うこととした。また，シート上（z方向）の境界層発達について考察する際には，側壁からの境界層発達の影響を無視しうると判断される。

次にy=40cmにおける平均流速U，乱れ強度u′，w′およびレイノルズ応力$-\overline{u'w'}$の鉛直方向分布の測定結果を図－4.11に示す。シート近傍の境界層に着目すると，最上流の測定断面x=3.4mでは約25cmであった境界層厚が，最下流のx=18.7mでは約50cmまで増加するとともに水路天井から発達した境界層と合わさっている。最下流の測定断面と同様な分布形状がその一つ上流側の断面x=17.2mでも見られることから，鉛直方向流れが完全発達するのに少なくとも17m必要であることが分かる。侵食実験測定区間は



図－4.10　平均流速Uおよび乱れ強度u´の横断方向分布(z=40cm：水路高さの半値)



図－4.11　平均流速 U，乱れ強度 u′，w′ およびレイノルズ応力－ $\overline{u'w'}$ の鉛直方向分布(y=40cm)

x=10～13mであるので，流れは完全に発達しきっていない。侵食実験区間のほぼ中央に位置する断面x=11.7mの測定結果からシート上面に作用するレイノルズ応力は約350(cm^2/s^2)と推定される。この値は境界層厚を50cmとした完全流れ発達領域でのレイノルズ応力358(cm^2/s^2)(＝水深50(cm)×重力加速度980(cm^2/s^2)×動水勾配1/137)とほぼ等しい。したがって，実験Ⅰ～Ⅹでの流れ場に関する実験条件は，侵食測定区間では流れがほぼ発達しきっており，河床面に350(cm^2/s^2)程度のせん断力が作用する(シートや根茎の粗度によらず動水勾配が同程度であったため)と推察される。

⑶　侵食実験の結果

侵食実験を行うにあたって，チガヤの地上部(葉茎)を地表面すれすれで刈り取った。これは，実際の堤防で草刈り直後に出水があった場合，また部分的な裸地ができた状態を模擬するためである。

実験Ⅰ～Ⅹの実験終了時点での平均侵食深を**表－4.4**に併記するとともに，シートの露出状況を**写真－4.9**に示す。シートなしの実験Ⅰでは，供試体の上流側で侵食が進行したため，地中から洗い出された根茎が地表を覆うような層(以下，根茎層と呼ぶ)を形成している状況が見られる。この根茎層がシートと同様に侵食防止効果を発揮している（詳細については，1.3.2⑴参照のこと)。侵食深は最大で6cmにも達したが，根茎の流失は生じなかった。なお，供試体の隅に灰色の部分が見られるが，これはモルタルを侵食面に盛って補修した跡である。このような補修を行うのは，供試体を採取する際，鋼製枠の近傍が局所的に乱されたり，または枠と土の間に隙間ができたりして侵食弱点箇所となり，極端に大きく侵食が進行するのを防ぐためである。このような補修部分は侵食深の測定対象外としている。

次に，シートを敷設した実験Ⅱ～Ⅹを見てみると，部分的にシート内の土砂が完全に流失している場所があるが，その場所では根茎がシートと一体となっており，またシートが浮き上がっていなかった（通水中にも浮かび上がっていない)。また，手でシートを地面から引き離そうとすると，かなりの力を加えなければならず，場合によってはシートが破損してしまうことがあった。以上の結果から，今回と同程度に植生が繁茂すれば，根茎によってシートが完全に固定できることが分かった。

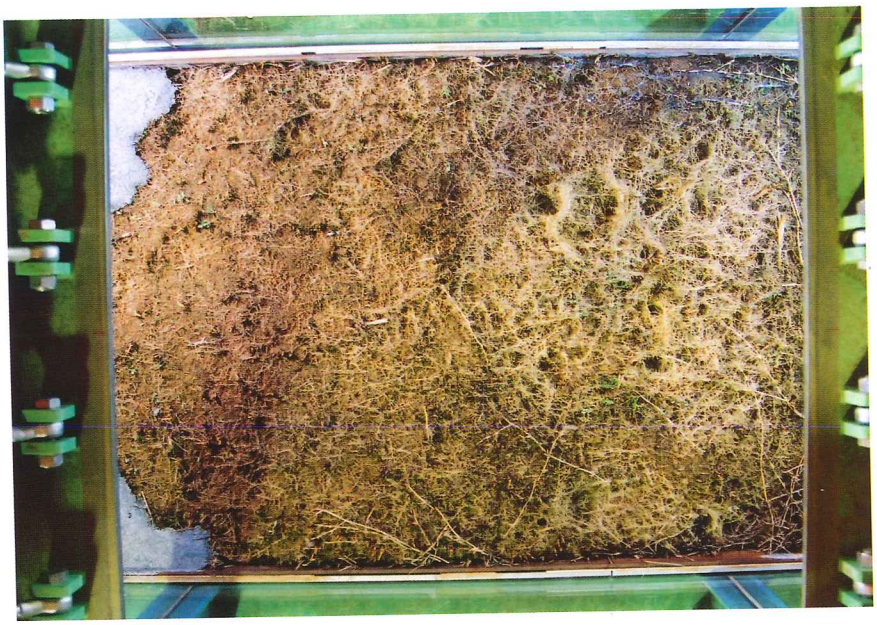
チガヤの各個体の周りでは，根茎が多いこと，また茎自体がピンの役割をするため，特に良く固定されている。したがって繁茂密度が高いほどシートがしっかり固定されると考えられる。今回の実験では繁茂密度が169～389(本/m^2)である。四国地方建設局ほか[1)]による実堤防でのチガヤの繁茂密度の測定結果を見ると概ね100～400(本/m^2)となっており，本実験とほぼ同程度である。したがって，実堤防にシートを敷設した場合にも，根茎によるシートの固定が可能であると考えられる。

繁茂密度が最小，ほぼ平均値（261本/m^2)，最大となった実験Ⅵ，Ⅹ，Ⅸの供試体について，侵食面上のチガヤ個体の位置を測定した結果を**図－4.12**に示す。なお図中には破線で10cm間隔の格子を併記してある。チガヤの個体は面的に均一に分布しておらず，密集している場所と疎な場所が比較的明確に分けられる。繁茂密度が最小の実験Ⅵでは，最も大きく疎になっている場所は約20cm四方程度の広さとなっている。繁茂密度が最大の実験Ⅹでは約10cm程度である。以上のようにシートはかなりきめ細かな間隔で地面に固定されており，そのため上記のように流れを受けても捲れ上がらなかったと推定される。

4.1.4　まとめ

根茎の直径に比較して大きな空隙を有するシートでは根茎の伸長をほとんど妨げることがなく，シートなしの場合とほぼ同じ根茎の分布状況となる。そのため，地表から3cm程度の深さにシートを埋設すれ

a）実験Ⅰ　シートなし



b）実験Ⅱ　B－2－2



c）実験Ⅲ　C－3－1

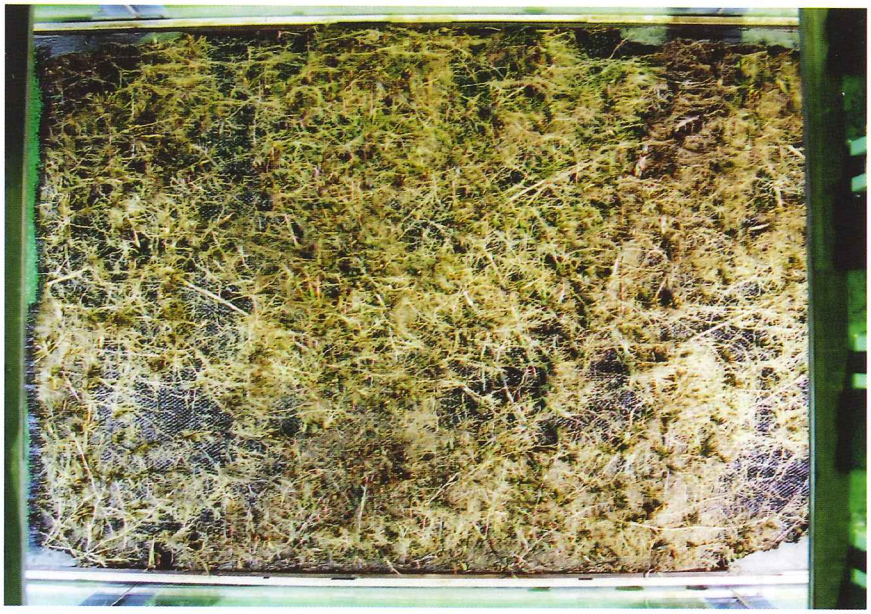


写真－4.9(1)　侵食実験によるシートの露出状況（流向は右→左）

d）実験Ⅳ　A－3－3



e）実験Ⅴ　A－4－6

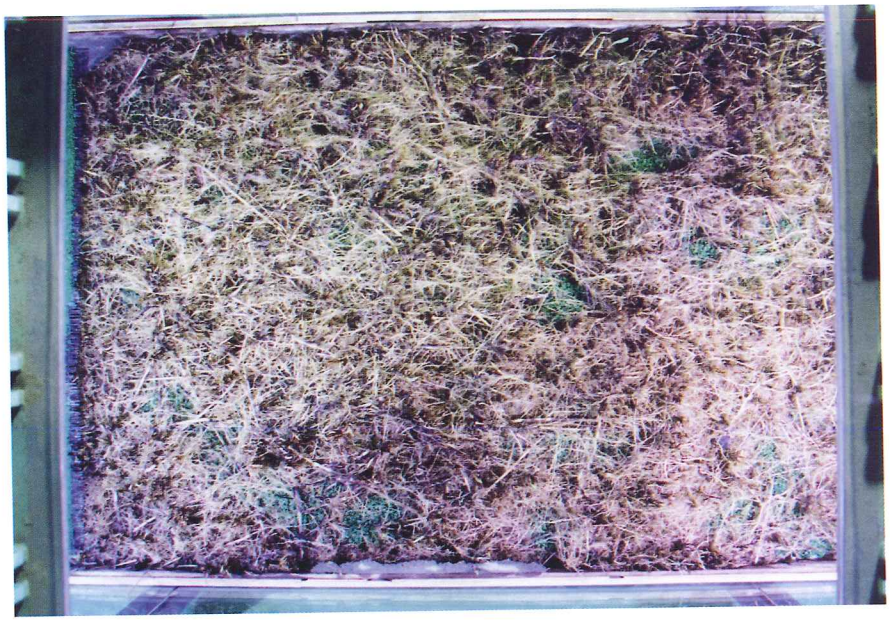


f）実験Ⅵ　A－8－2



写真－4.9(2)　侵食実験によるシートの露出状況（流向は右→左）

g）実験Ⅶ　D－3－2



h）実験Ⅷ　D－1－6



i）実験Ⅸ　B－1－2

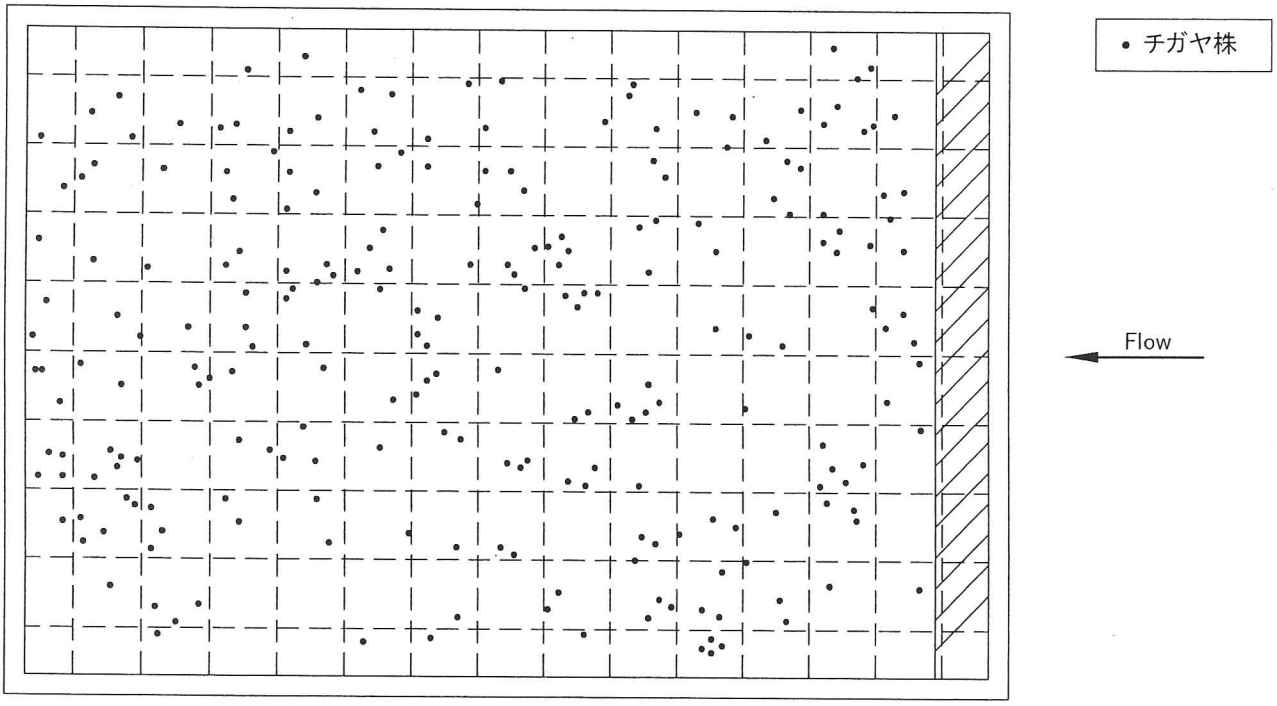


写真－4.9(3)　侵食実験によるシートの露出状況（流向は右→左）

j）実験Ⅹ　B－3－2



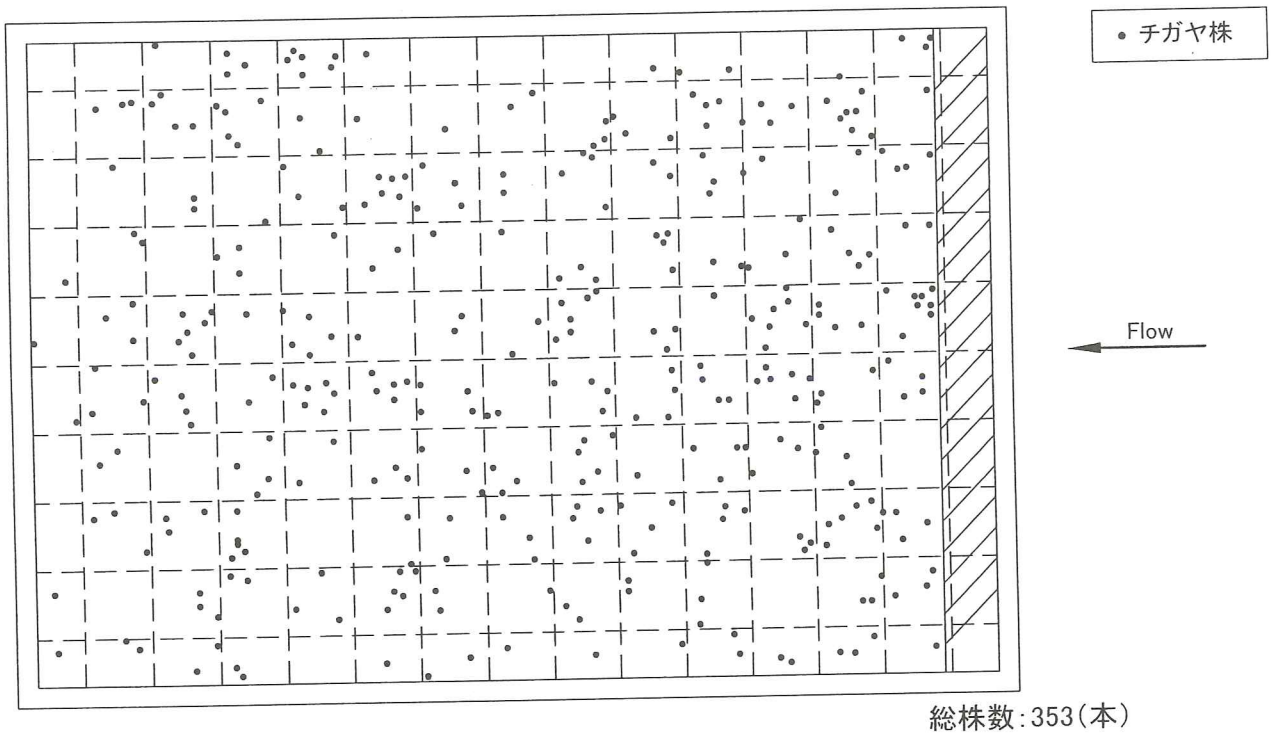
写真－4.9(4)　侵食実験によるシートの露出状況（流向は右→左）



総株数：229（本）
単位面積あたり：169（本／m2）

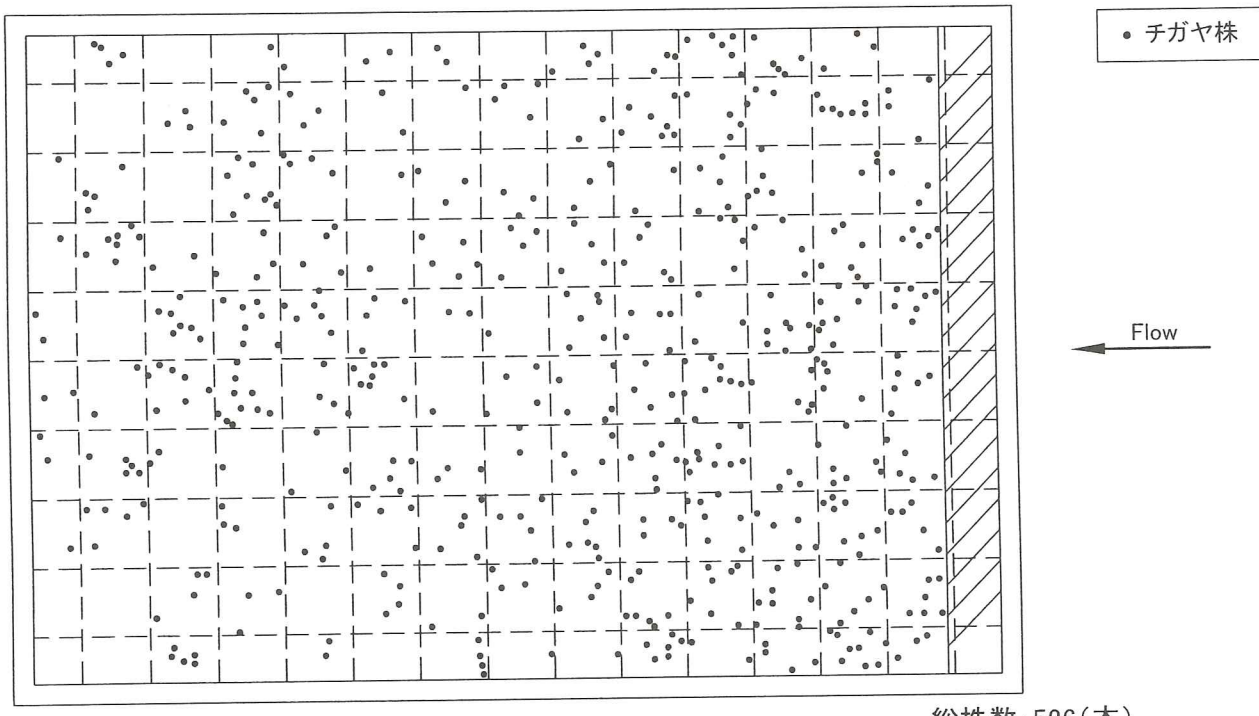
a）最小本数（実験Ⅵ）

図－4.12(1)　供試体に繁茂したチガヤ（株）の平面分布（図中の破線による格子は１マス10cm四方である）



総株数:353(本)
単位面積あたり:261(本／m2)

b) 平均的本数(実験X)



総株数:526(本)
単位面積あたり:389(本／m2)

c) 最大本数(実験IX)

図－4.12(2)　供試体に繁茂したチガヤ(株)の平面分布(図中の破線による格子は１マス10cm四方である)

ば，多くの根茎がシートを貫通できる。また，これ以上深い場所では，貫通する根茎の量が少なく，シートを固定するのに不十分になることが懸念される。上記のようにシートを埋設すれば，植生によってシートが固定できると考えられる。

4.2 シート重ね部および打設したピン周辺での侵食特性

ある対象範囲にシートを施工する場合，複数のシートをつなぎ合わせて敷設するが，その際に隣り合うシートを重ね合わせ，そこをピンおよび植生の根茎によって地面に固定することで，個々のシートを面的に一体化させる。また施工範囲の周縁部に位置するシート端部は，流水の作用によって容易に捲れ上がらないように土中に埋設，固定する。(上記に関する施工法の詳細については**巻末資料１**参照)

シートの重ね合わせ部や端部においても，侵食防止が確実に行えるような工夫を行うことが，シートを用いた侵食防止工法を実用化する上で非常に重要である。本節では，実物と同じ重ね合わせおよびピン打設を行った試験体を用いて侵食実験を行い，重ね合わせ部，端部，ピン打設部の侵食状況を調べ，それらの場所での侵食防止の可否，およびその条件について明らかにする。

4.2.1 実験の概要

実験水路は4.1.3に示した実験に用いた矩形管水路（**図－4.8**参照）と同一である。本実験では鋼製枠に砂を入れて，そこでシート重ね合わせ部を実際に施工して，侵食実験を行った。

実験ケースを**表－4.5**に示す。ケースⅠは，シートを単に一枚設置した場合(重ね合わせやピン打設がない）という理想的な状態での侵食実験である。この実験での侵食深を基準として重ね合わせやピン打設部周辺での侵食深の増減を評価する。

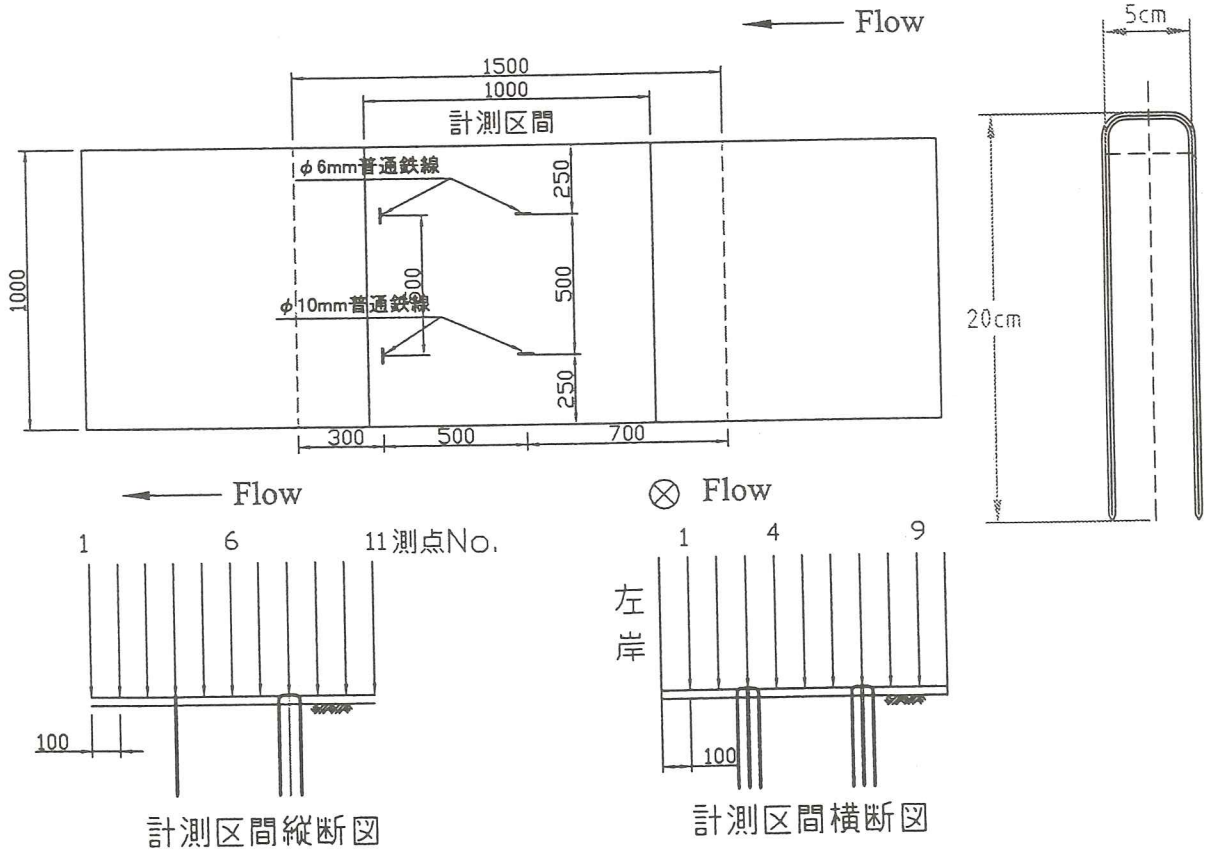
ケースⅡはピン周辺での侵食増加の有無を明らかにすることを目的とした実験であり，ケースⅠと同様にシートを敷設して，さらに**図－4.13**に示すようにピンを打設して侵食実験を行った。なお，ピンの形状は**図－4.13**に示したもので，実際の施工に使用するものとほぼ同じである。

ケースⅢは流向に対して直交する方向に重ね合わせ部が連なる場合（上下流方向に隣り合うシートの重ね合わせ部)の侵食実験であり，**図－4.14**に示す３タイプの重ね合わせ方について実験を行った。タイプ１（ケースⅢ－1）は端部同士を単純に重ね合わせて，そこをピンで固定するものである。この場合，上に重ねたシートが一段突出した状況になるため，そこでの侵食進行が懸念される。その侵食状況が重ね合わせ長さを10，20，30cmと大きくした場合にどのように変化するかを調べ，適切な重ね長さを見出すことを目的としている。タイプ２，３(ケースⅢ－2，Ⅲ－3)はシート端部を埋設することで，タイプ１に見られるようなシートの突出が形成されないように工夫した重ね合わせ方である。タイプ３は２に比較して地中深くまで埋設しており，この点で端部の捲れ上がり防止の確実性が高い方法である。なお，これらのタイプで下流側のシートの埋設方法はシート上流端部処理として行う埋設方法と同一である(**巻末資料１**参照)。したがって，ケースⅢ－2，Ⅲ－3の実験は上流側のシートは「植生」を模擬した代替物であると見ることで，上流端部の処理方法の実験を兼ねている。

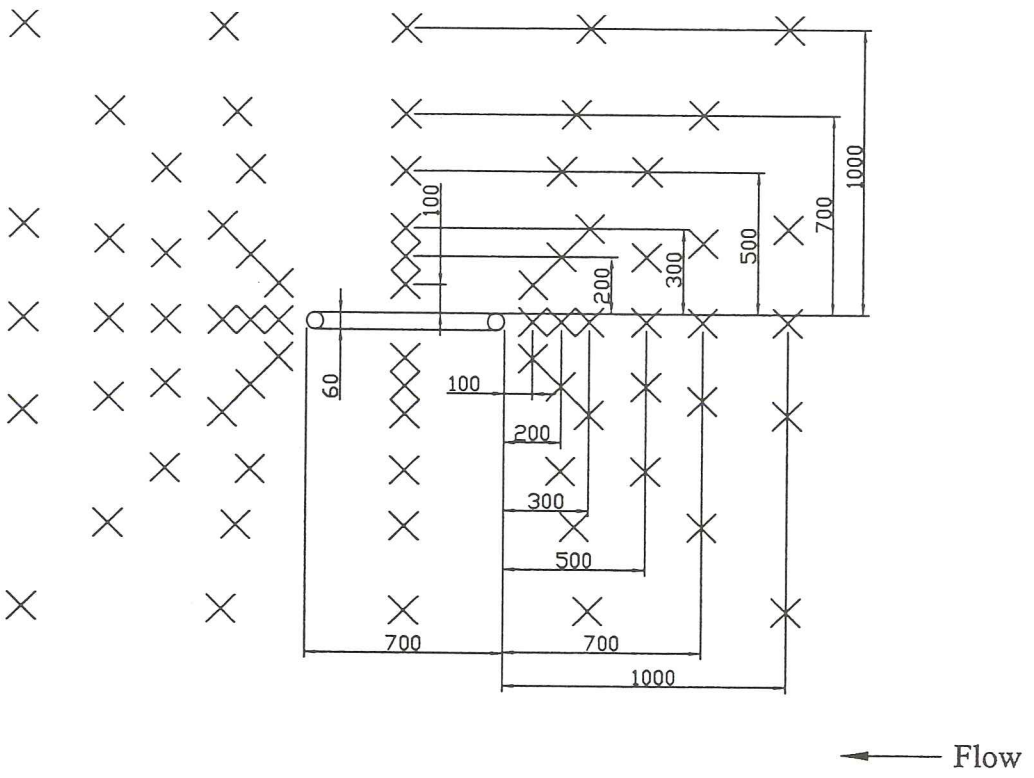
ケースⅣは流向と同一方向に重ね合わせ部が連なる場合（河道の横断方向に隣り合うシートの重ね合わせ部)の侵食実験であり，**図－4.15**に示す２タイプの重ね合わせ方について実験を行った。重ね合わせ方はケースⅢのタイプ１，２(ケースⅣ－1，Ⅳ－2とする)と同じであり，実際にのり面上に施工する場合には

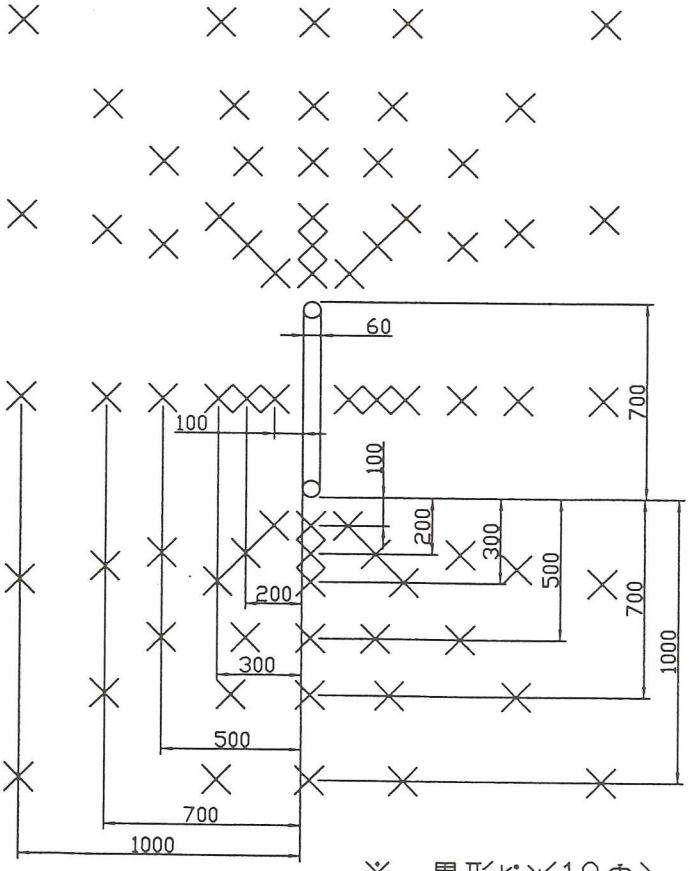
表－4.5　ピン打設部および重ね部の侵食実験ケース

	断面平均流速	重ね合わせるシート端部の方向	重ねタイプ	ピン打設
Ⅰ	2m/s	なし	----------	×
Ⅱ			----------(図-4.13参照)	○
Ⅲ-1		流れに対して直交方向(図-4.14参照)	単純重ね(タイプ1)	○
Ⅲ-2			下流側のみ埋設(タイプ2)	○
Ⅲ-3			両端埋設(タイプ3)	○
Ⅳ-1		流れ方向(図-4.15参照)	(タイプ1)	○
Ⅳ-2			(タイプ2)	○
Ⅴ-1		直交方向と流れ方向(図-4.16参照)	(タイプ1)+(タイプ1)	○
Ⅴ-2			(タイプ2)+(タイプ1)	○
Ⅴ-3			(タイプ2)+(タイプ2)	○



図－4.13(1)　ピン周辺の侵食実験(ケースⅡ)

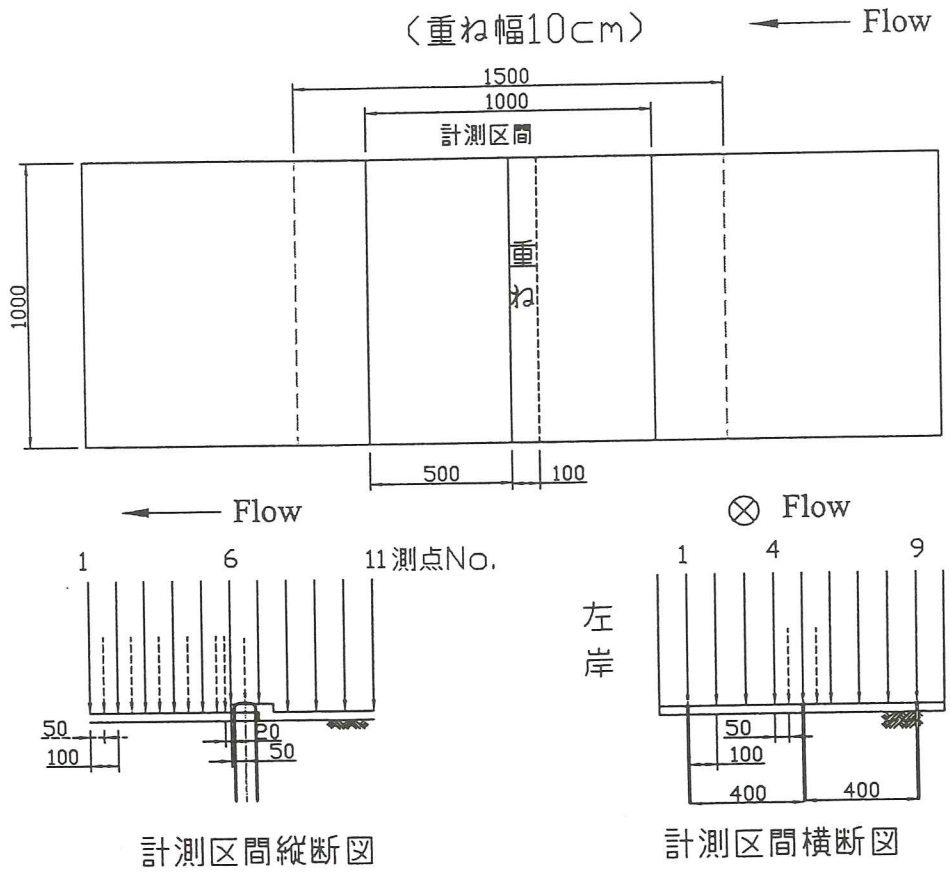




※　異形ﾋﾟﾝ(10Φ)・丸鋼ﾋﾟﾝ(6Φ)ともに計測距離(ﾋﾟﾝ側面からの距離)は同じ。

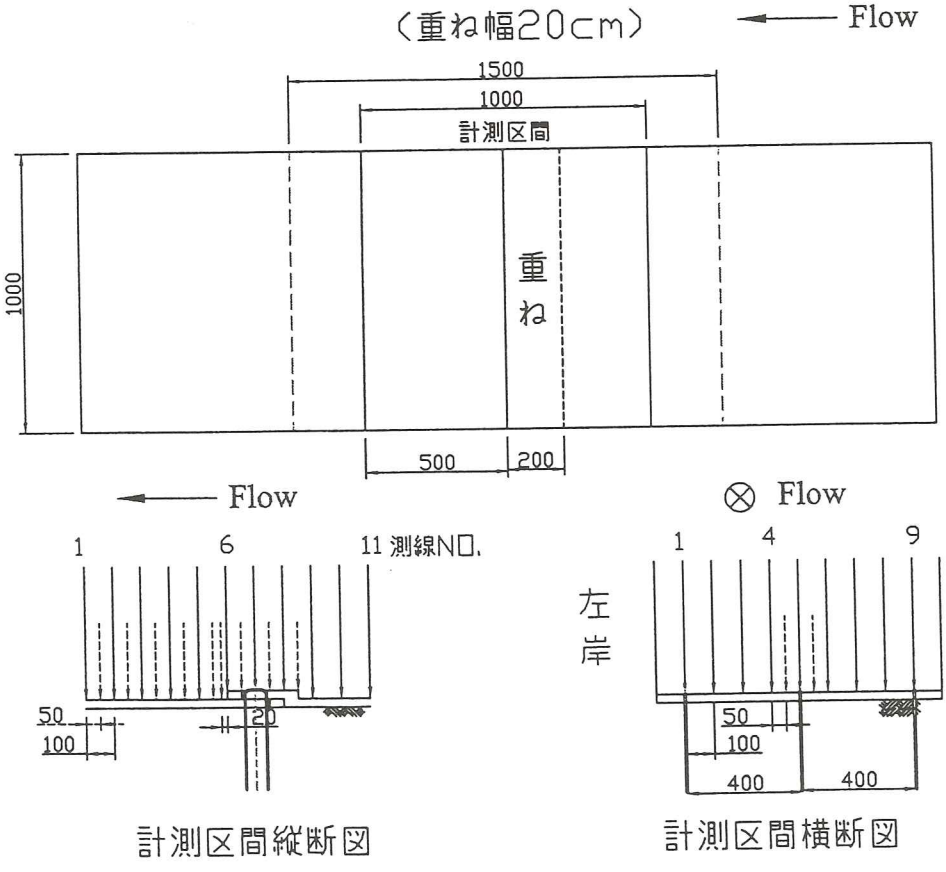
図－4.13(2)　ピン周辺の侵食実験(ケースⅡ：×印の位置で侵食深を測定した)

a）Ⅲ−1−1



計測区間縦断図　　計測区間横断図

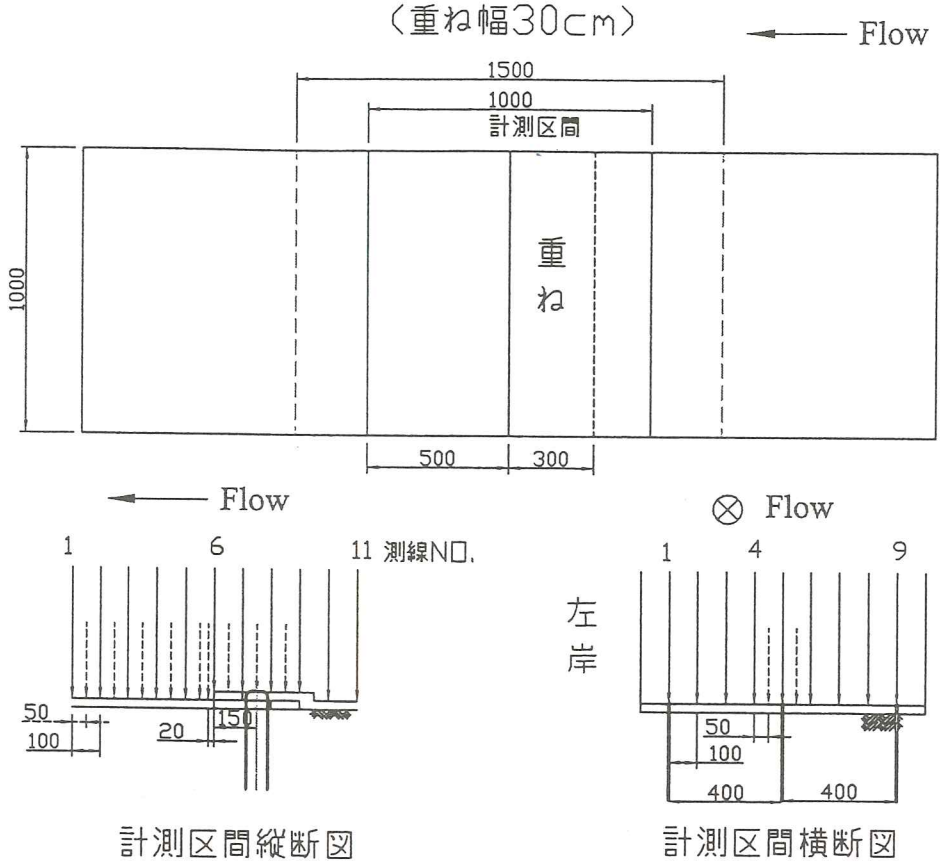
b）Ⅲ−1−2



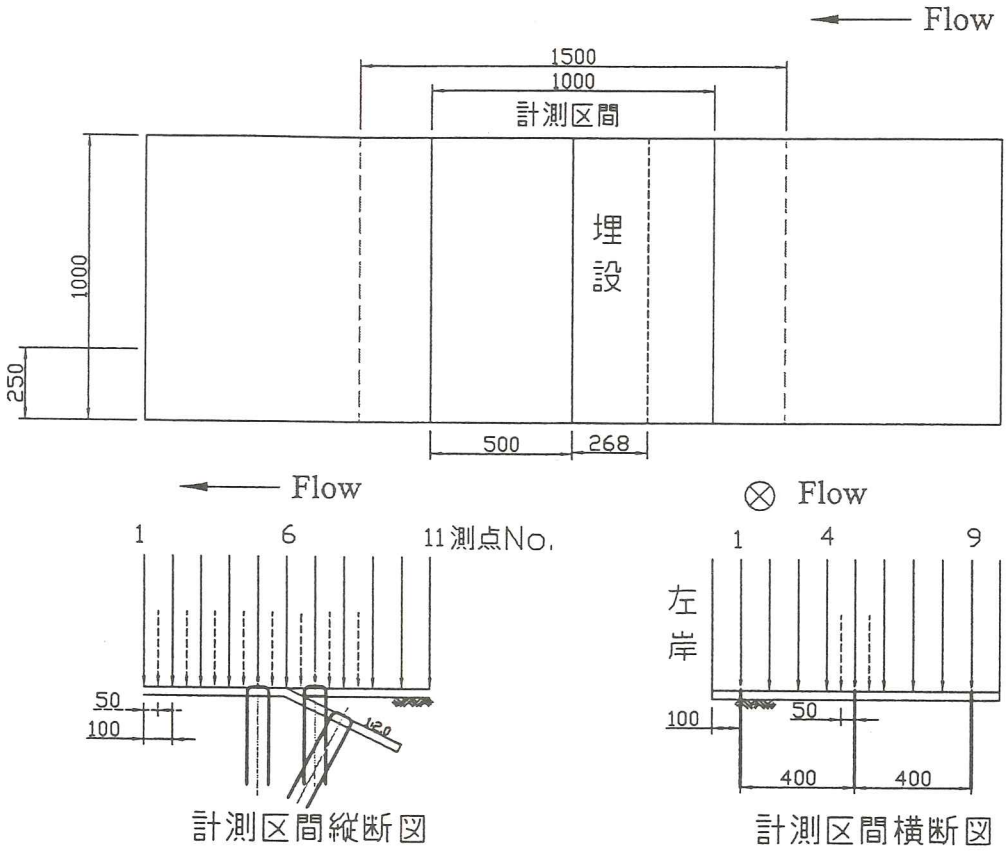
計測区間縦断図　　計測区間横断図

図−4.14(1)　流向に直交する重ね部の侵食実験

c）Ⅲ－1－3

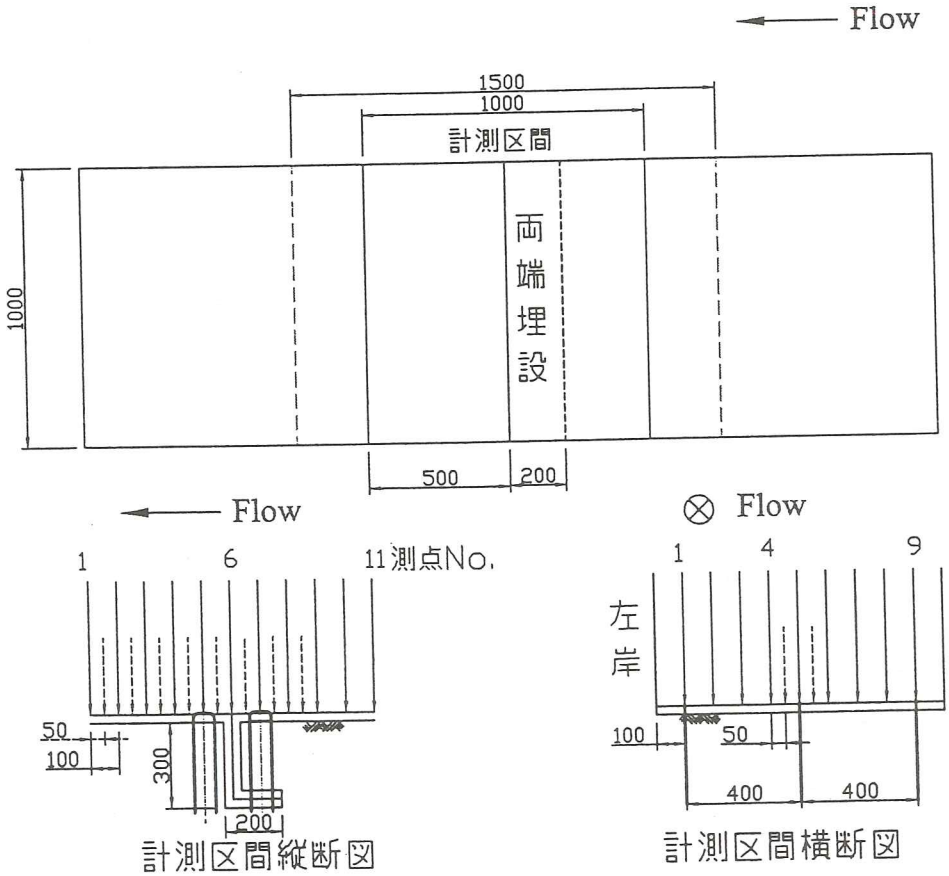


d）Ⅲ－2



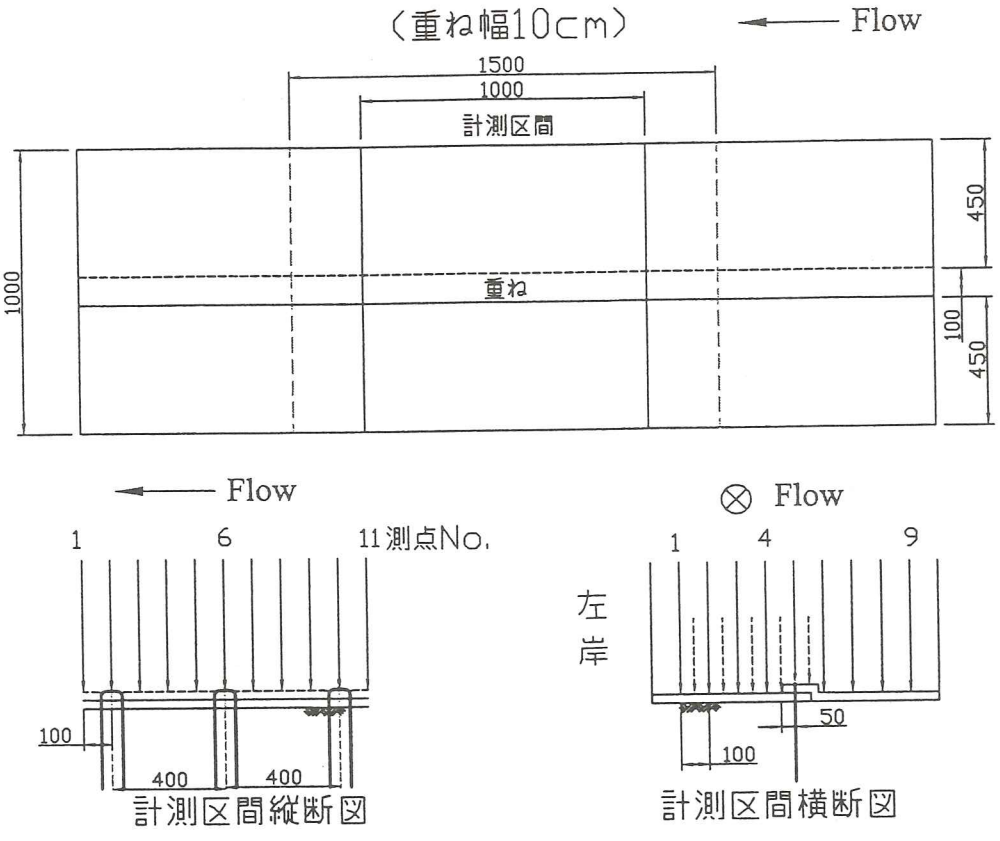
図－4.14(2)　流向に直交する重ね部の侵食実験

e）Ⅲ－3



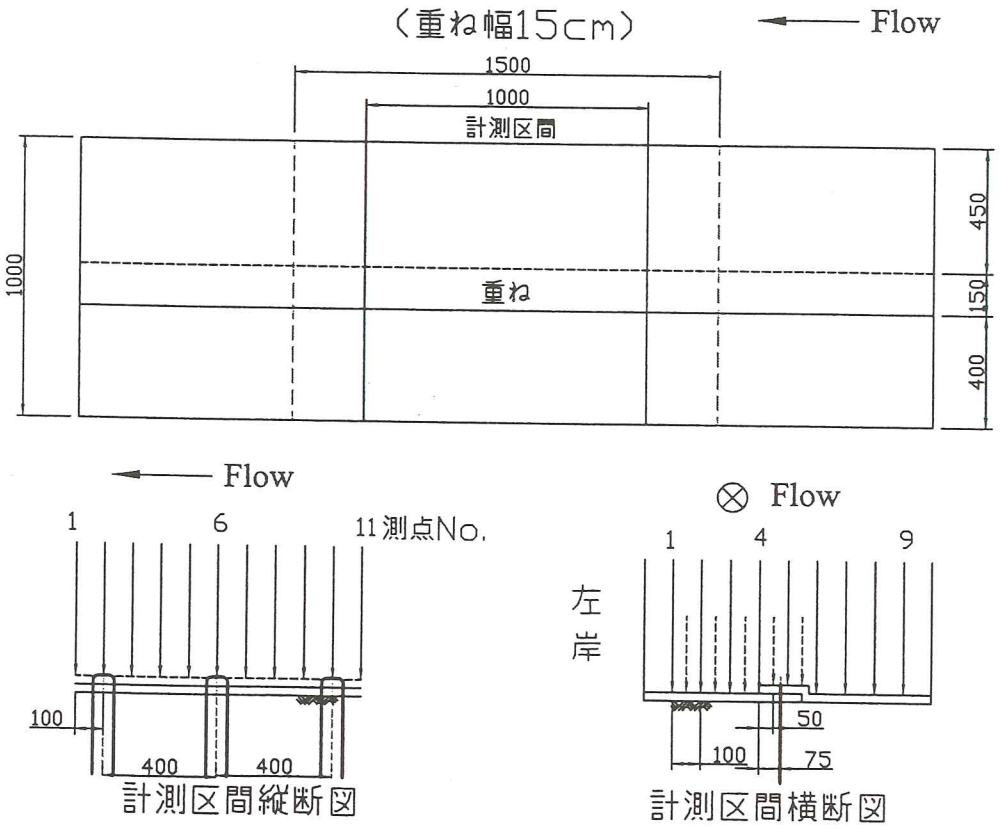
図－4.14(3)　流向に直交する重ね部の侵食実験

a）Ⅳ－1－1

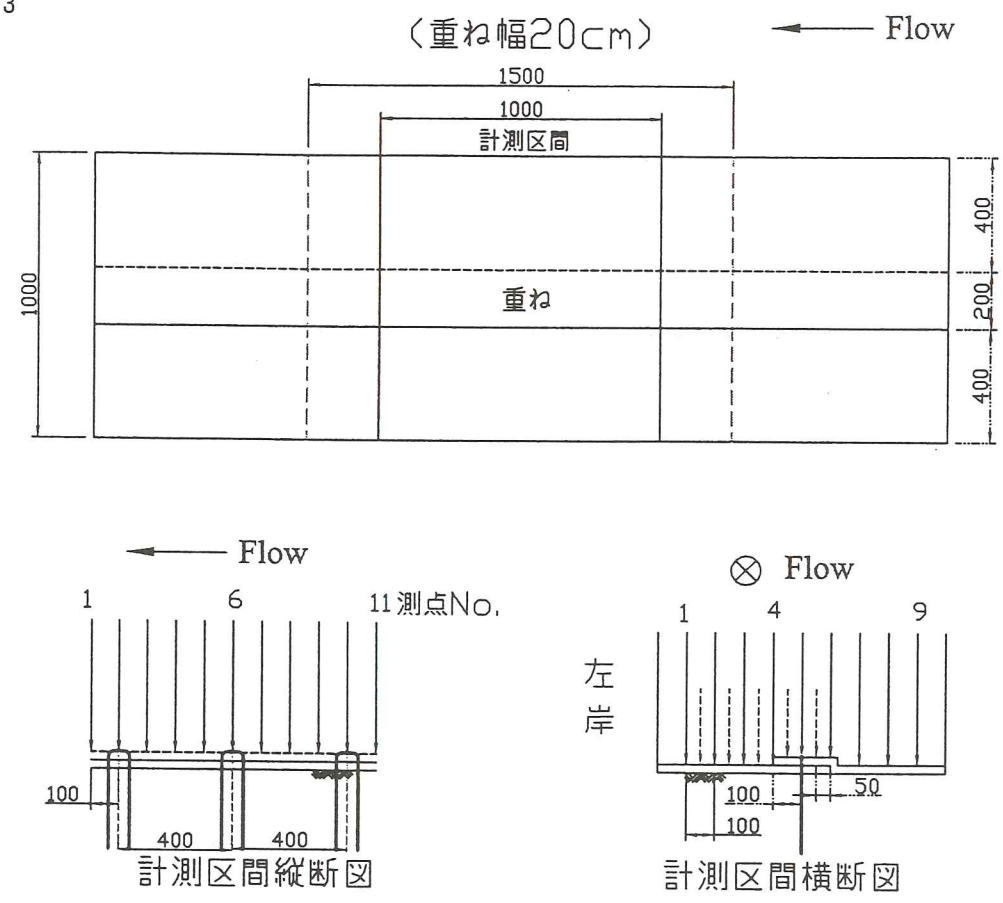


図－4.15(1)　流向に沿った重ね合わせ部の侵食実験

b）Ⅳ−1−2

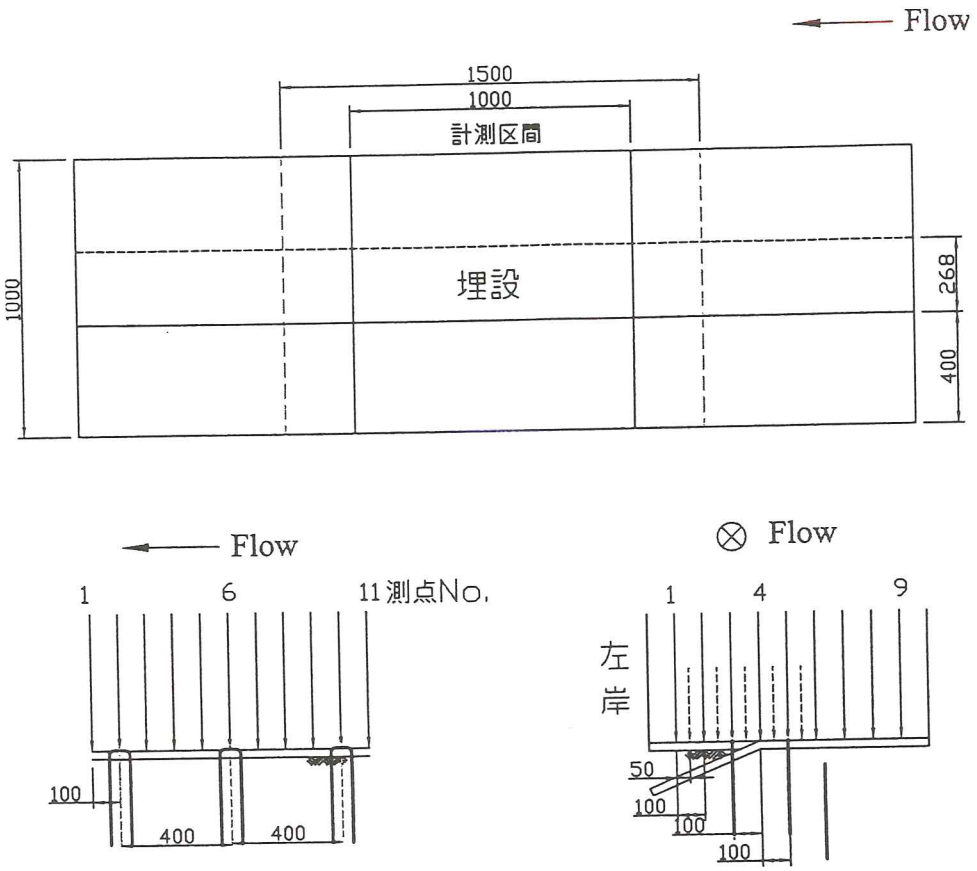


c）Ⅳ−1−3



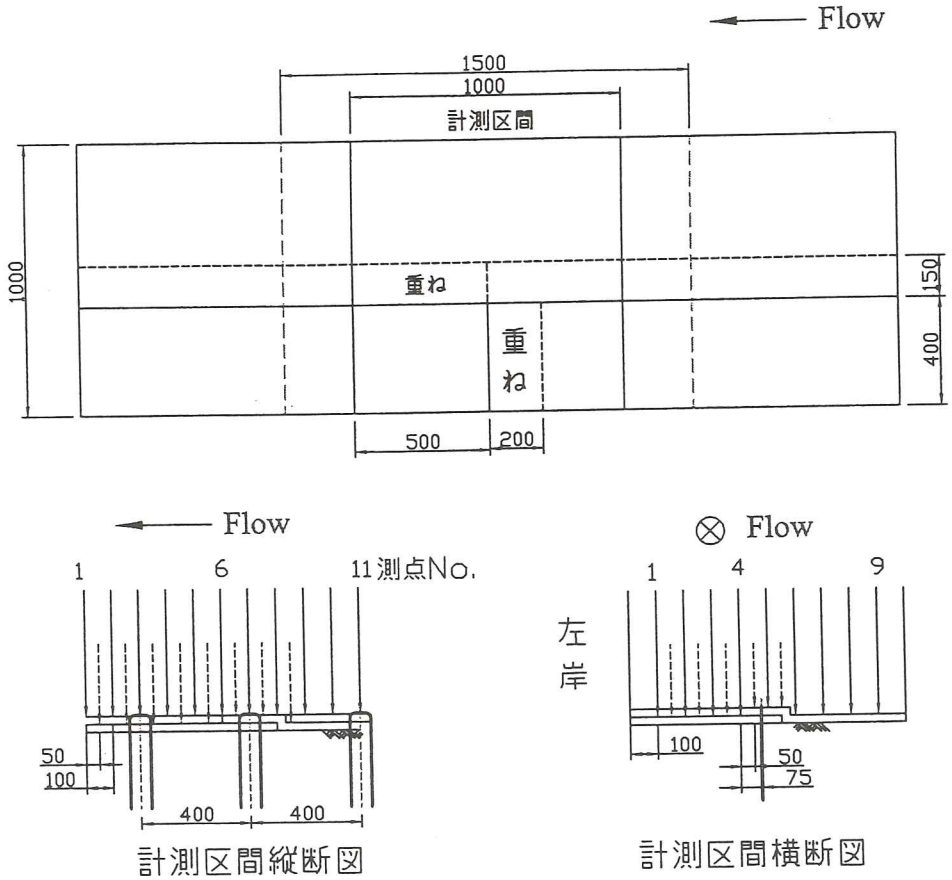
図−4.15(2)　流向に沿った重ね合わせ部の侵食実験

d) Ⅳ−2



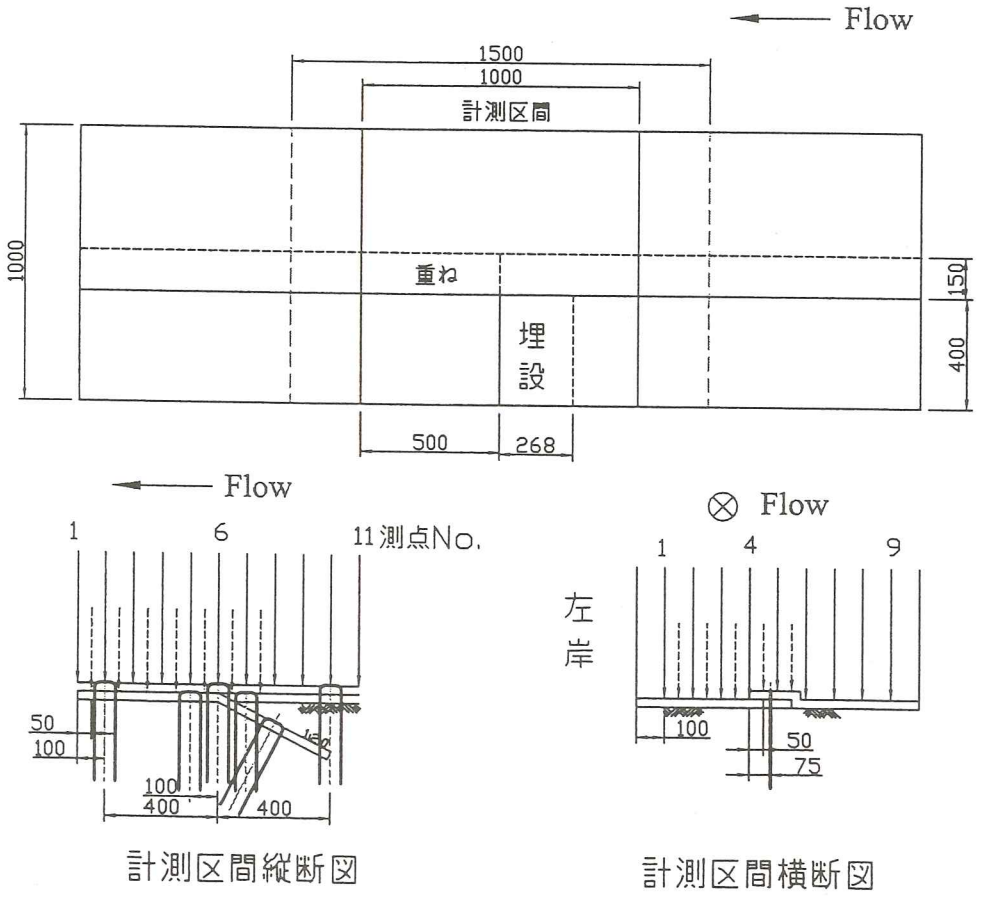
図−4.15(3)　流向に沿った重ね合わせ部の侵食実験

a) Ⅴ−1



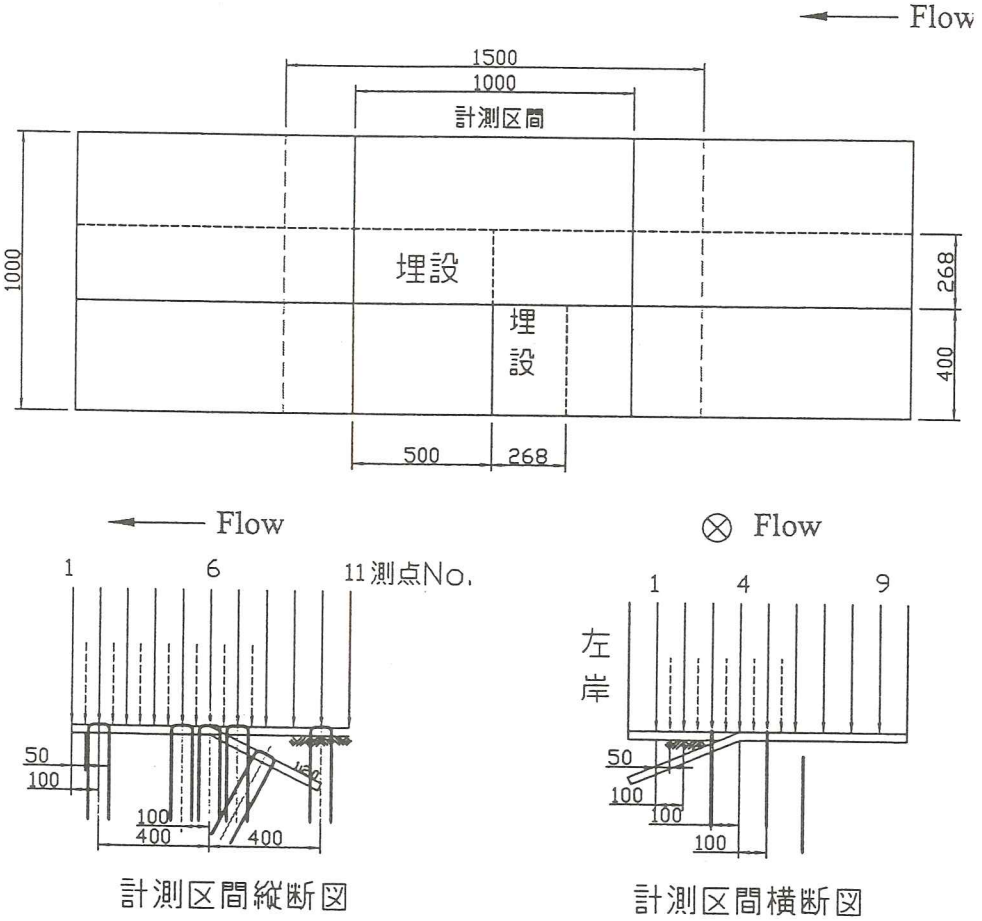
図−4.16(1)　3枚のシートが重なる箇所の侵食実験

b）V－2



計測区間縦断図　　計測区間横断図

c）V－3

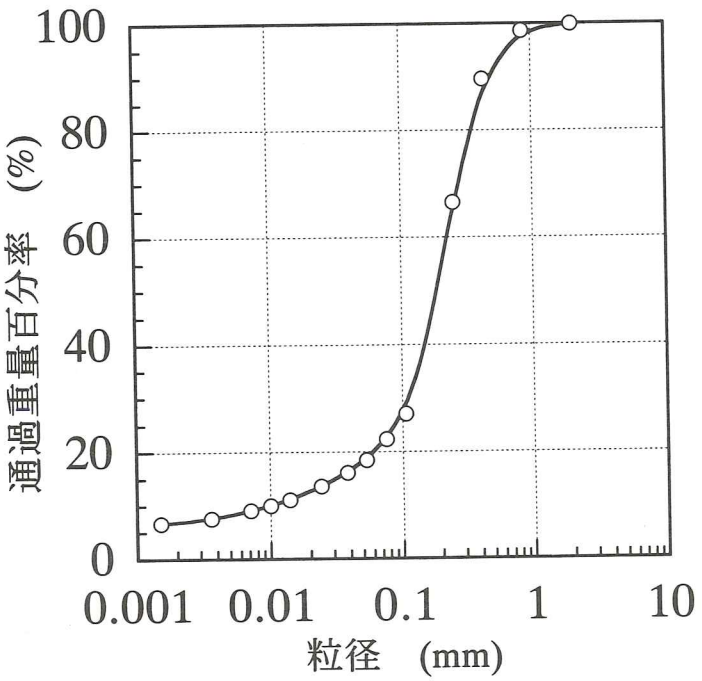


計測区間縦断図　　計測区間横断図

図－4.16(2)　3枚のシートが重なる箇所の侵食実験

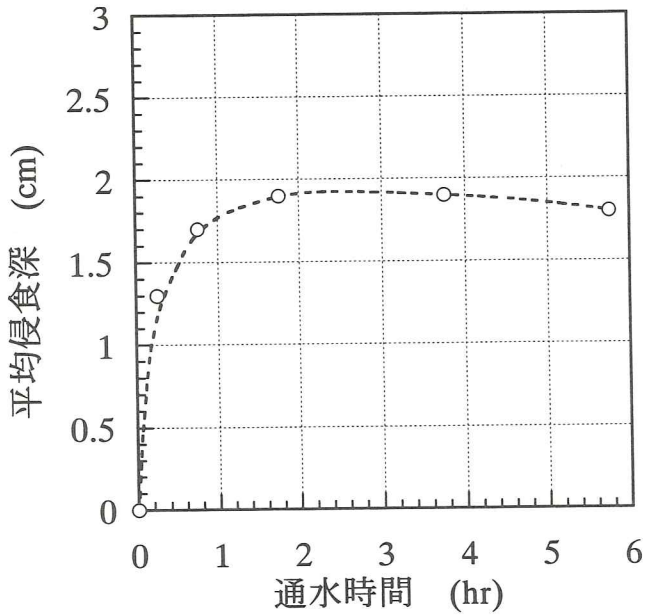
上側に重ねるシートが堤防天端側に位置する（巻末資料１参照）。ケースⅣ－1では重ね合わせ長を10，15，20cmとした３種類の実験を行い，ケースⅢ－1と同様に適切な重ね長さについて調べている。また，ケースⅣ－2のシートの埋設方法はシート端部処理として行う埋設方法と同一である（巻末資料１参照）。したがって，Ⅳ－2についてもケースⅢの場合と同じように端部の処理方法の実験を兼ねている。

ケースⅤは，3枚のシートが接合する場合（ケースⅢとⅣの重ね合わせが重複して現れる場所）の侵食実験であり，図－4.16に示す３種類の実験を行った。重ね合わせ方はタイプ１，２のみを用いており，その組み合わせがそれぞれ異なるケースである。

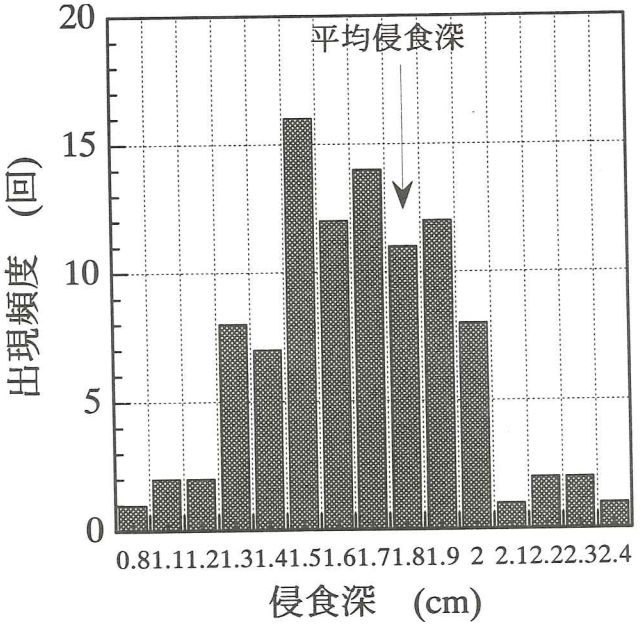


図－4.17　実験に用いた移動床材料の粒度分布

実験に用いたシートは，ヘチマ－接着タイプのシート（写真－2.1にＢ－2－1～Ｂ－2－4として示したものと同一構造である）であり，厚さ25mm，空隙率97%，構成材の太さ0.58mmである。このシートを上記したように敷設した後，図－4.17に示す粒度分布の砂をシート厚さ一杯まで充填する。その後，断面平均流速２（m/s）の流れを３時間通水した後（この設定根拠については4.2.2において示す），図－4.13～4.16に併記した測点で侵食深の測定を行った。



図－4.18　平均侵食深の経時変化（ケースⅠ）



図－4.19　全通水終了後（通水時間5.75時間）での侵食深の発生頻度分布

4.2.2　重ね部やピンが無い理想的状況での侵食状況－侵食深の評価基準の設定－(ケースⅠの実験結果)

平均侵食深の経時変化の測定結果を図－4.18に示す。通水開始から１時間までの間に急激に侵食が進行するが，２時間以降では約19mmの侵食深でほぼ一定している。また，全通水終了後(通水時間5．75時間)での侵食深の発生頻度分布（測定点数99点）を図－4.19に示す。最大侵食深がシート厚さとほぼ等しい24mmとなっていることからも分かるように，平均侵食深に対して±６mm程度のばらつきがあることが分かる。以上の実験結果から，ケースⅡ以降では，流速２（m/s）を３時間通水した後（侵食がほとんど進行しなくなるのに要する時間）に侵食深を測定し，シート下部まで侵食が進行する（侵食深が25mm以上となる)かどうかで，重ね部およびピン打ちによる局所洗掘の影響を評価することとする。

4.2.3　ピン周辺の局所洗掘状況　（ケースⅡの実験結果)

φ６mmの異形鉄筋とφ10mmの丸鋼で作成した「コ」の字型ピンを，流れに沿うような方向に打設した場合の侵食深のコンターを図－4.20に示す。なお，コンターでは，基準高さがシート下面であり，シート下面より下方まで侵食された場所(シートの浮き上がりが生じた危険個所)が負の値，シートが洗い出されたものの浮き上がりが生じない場所は正の値で表示されている。

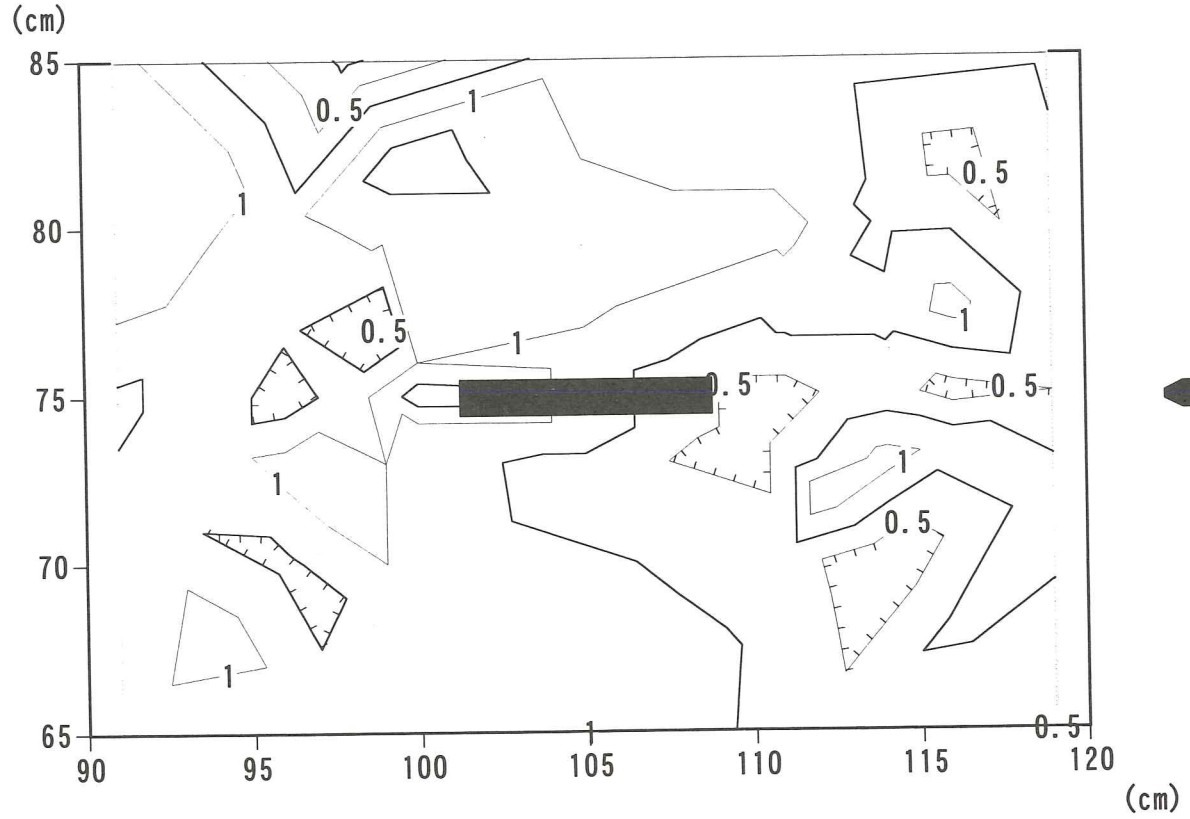
いずれの場合もピンの上流側で20mm以上の侵食が生じている箇所（コンター値が0．5cm以下になる場所）が見られる。しかし，そのような箇所はピンから離れた場所にもあることからもわかるように，ピンの上流側で局所的に侵食深が大きくなった様子は見られなかった。また，流向と直交するように打設したピン周りでの侵食深のコンターを図－4.21に示す。この結果も上記と同様な結果となっている。また，ピンを４本打設した範囲（ケース１と同じ範囲）の平均侵食深は20mmであり，シートのみの場合とほぼ同値である。

以上より，ピン周りでシートの固定が困難となるような局所洗掘の発生はなく，またシートのみ場合と同程度の侵食深となることが確かめられた。

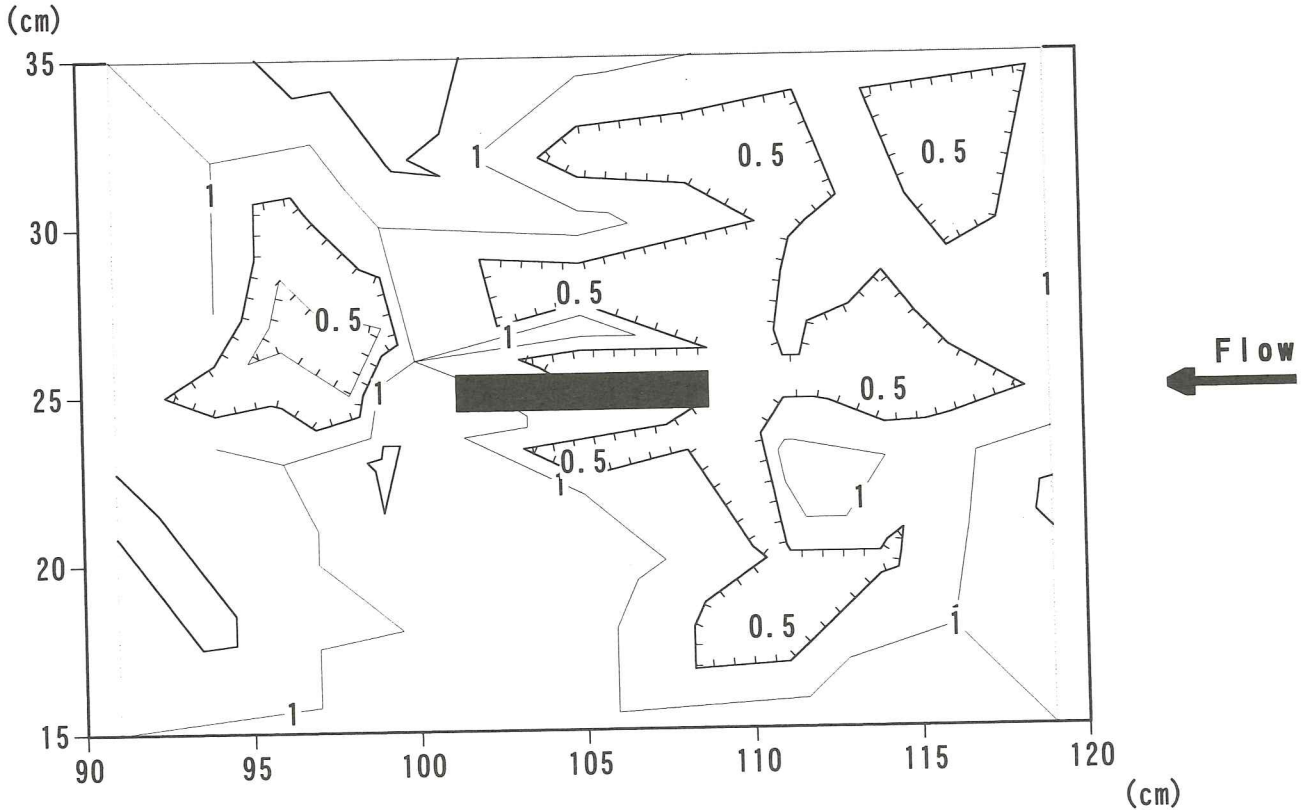
4.2.4　流向に直交する重ね部周辺での侵食状況　（ケースⅢの実験結果)

まず，タイプ１の重ね合わせの実験結果（ケースⅢ－1）について，実験結果を整理する。重ね長を10，20，30cmとした場合の侵食深の平面分布コンターを図－4.22a),b),c)に示す。10cmの場合には，重ね合わせ部の下流側周辺でシート内の土砂が全て洗い出されるとともに，砂面がシート下面より最大で４cm程度も低下する結果となった。そのように大きな侵食が生じた範囲でも，シートが比較的変形しにくいこともあったため，捲れ上がることはなかった。しかし，接合方法として明らかに不適である。また，20，30cmの場合では，10cmの場合のようにシートが広範囲に浮き上がるようなことがない。重ね合わせ長を大きくすることで，侵食深を小さくすることが可能なことが分かる。

次に，最適な重ね長を見出すために，侵食深の縦断方向の変化を比較した結果を図－4.23に示す。実線で結んだプロットは横断方向に位置が異なる９箇所(図－4.14参照)の測定値の平均値である。またプロットの上下の破線は最大および最小侵食深を示したものである。重ね合わせ長が10cmのみ極端に大きな侵食が生じているが，20cmおよび30cmでは平均，ばらつきの範囲ともほぼ同じ傾向が見られる。すなわち，10cmの場合に大きな侵食が見られたシート重ね部下流に着目すると，重ね部から下流20cm程度までの範囲では，ごく僅かな侵食深から25mm程度まで下流方向に向かって侵食深が増加するが，それより下流で

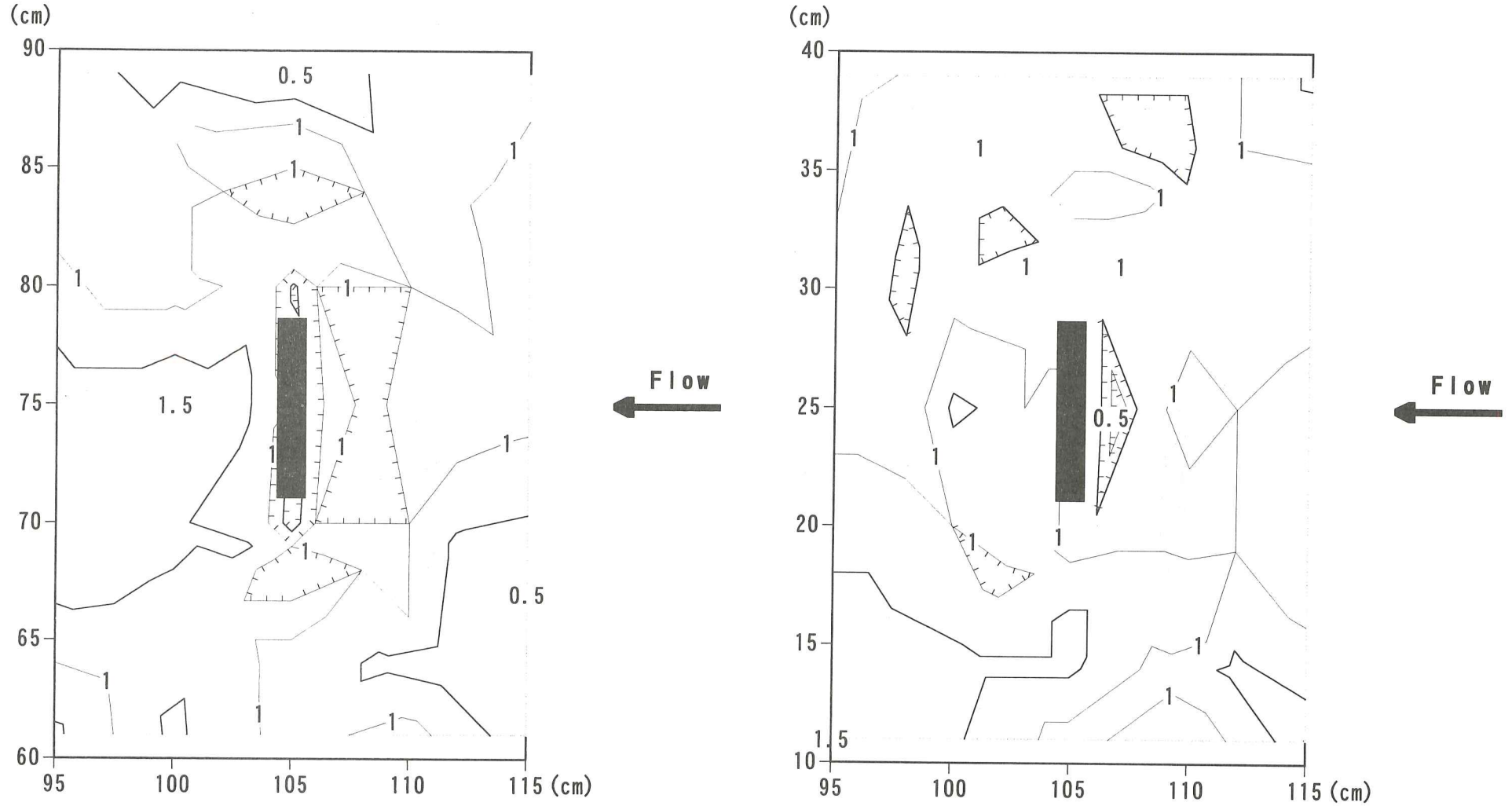


a）異形鉄筋（ϕ＝6 mm）



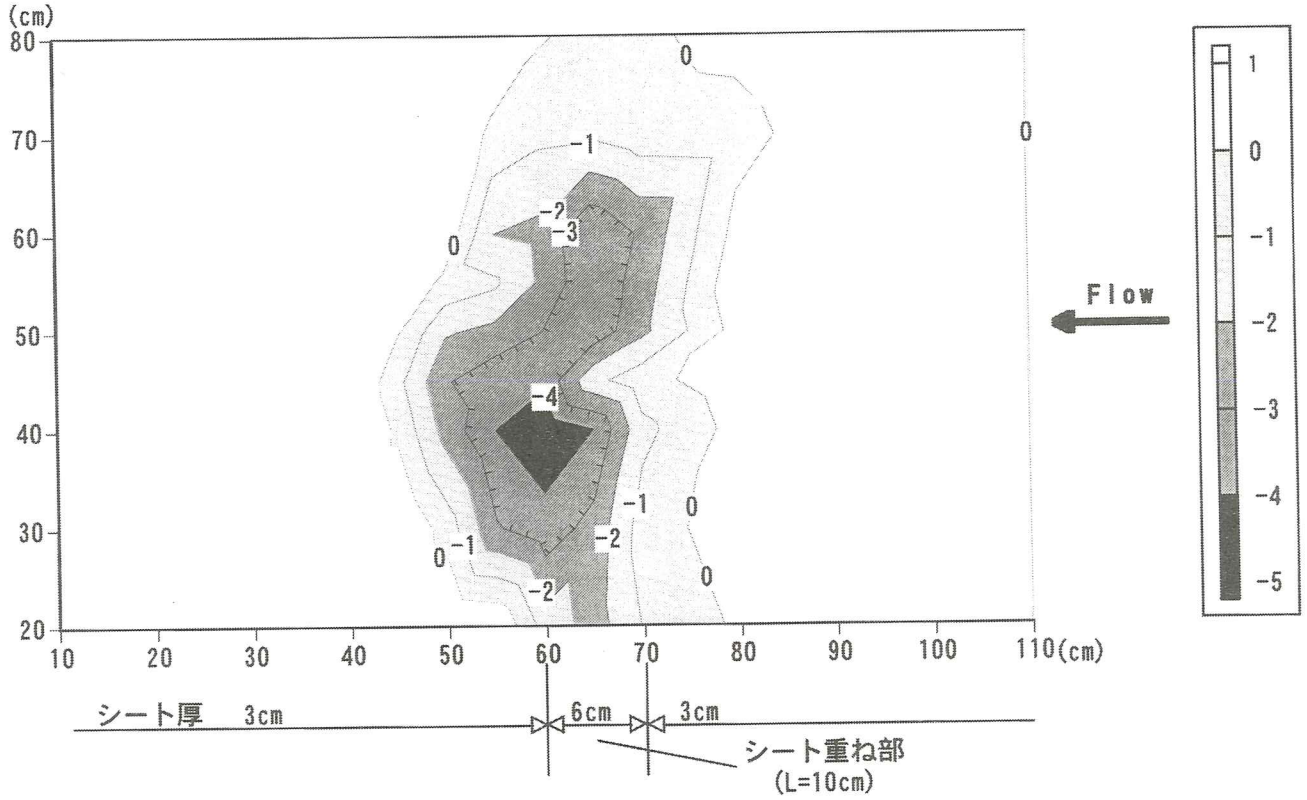
b）丸鋼鉄筋（ϕ＝10mm）

図－4.20　流れ方向に沿うように打設したピン周りの侵食状況（コンター）

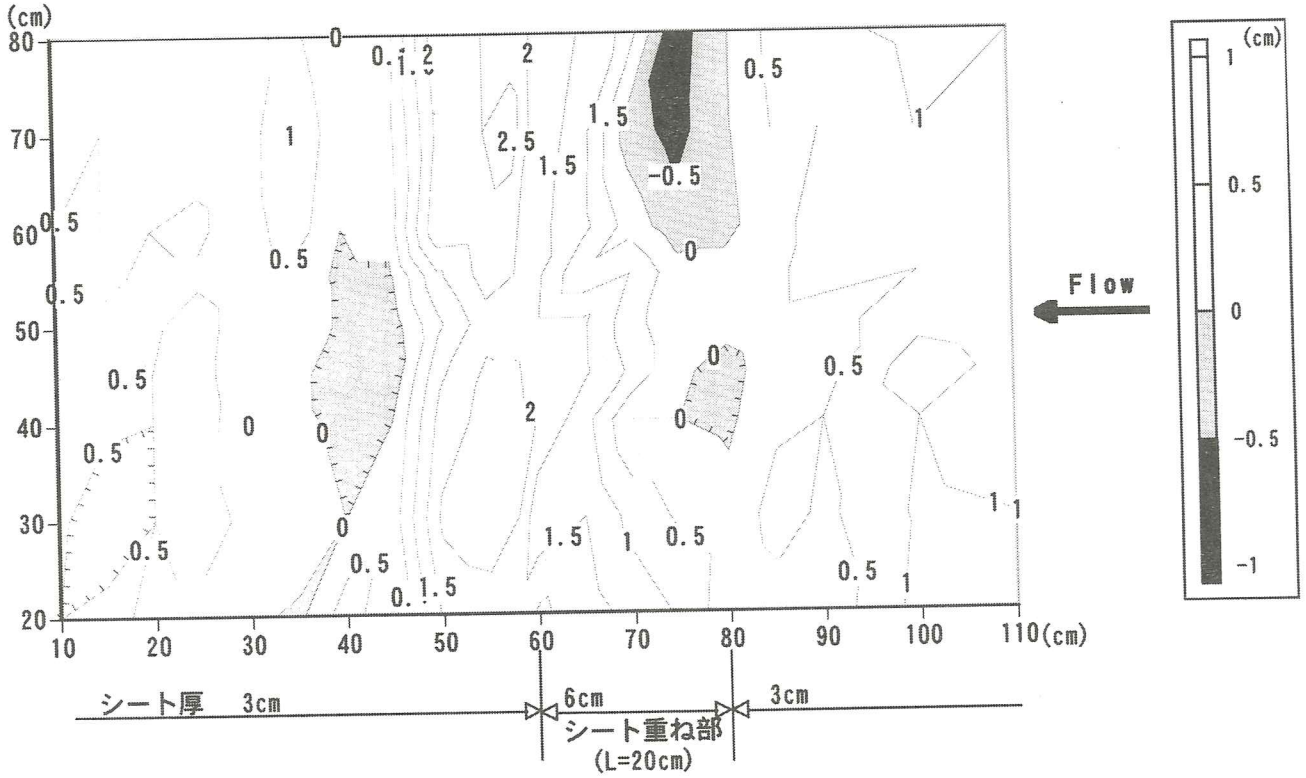


a）異形鉄筋（ϕ＝6 mm）　　b）丸鋼鉄筋（ϕ＝10mm）

図－4.21　流れ方向に直交するように打設したピン周りの侵食状況（コンター）

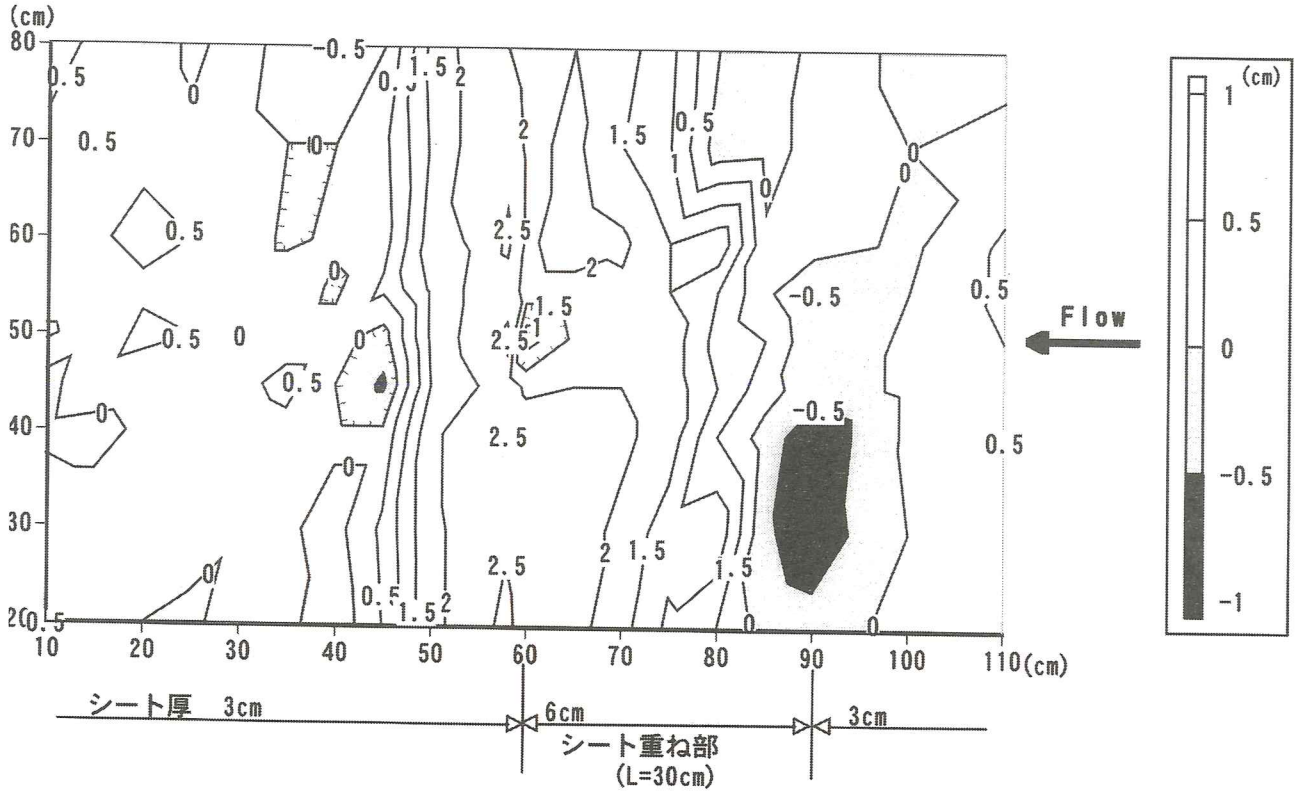


a）Ⅲ－1－1(重ね長10cm)



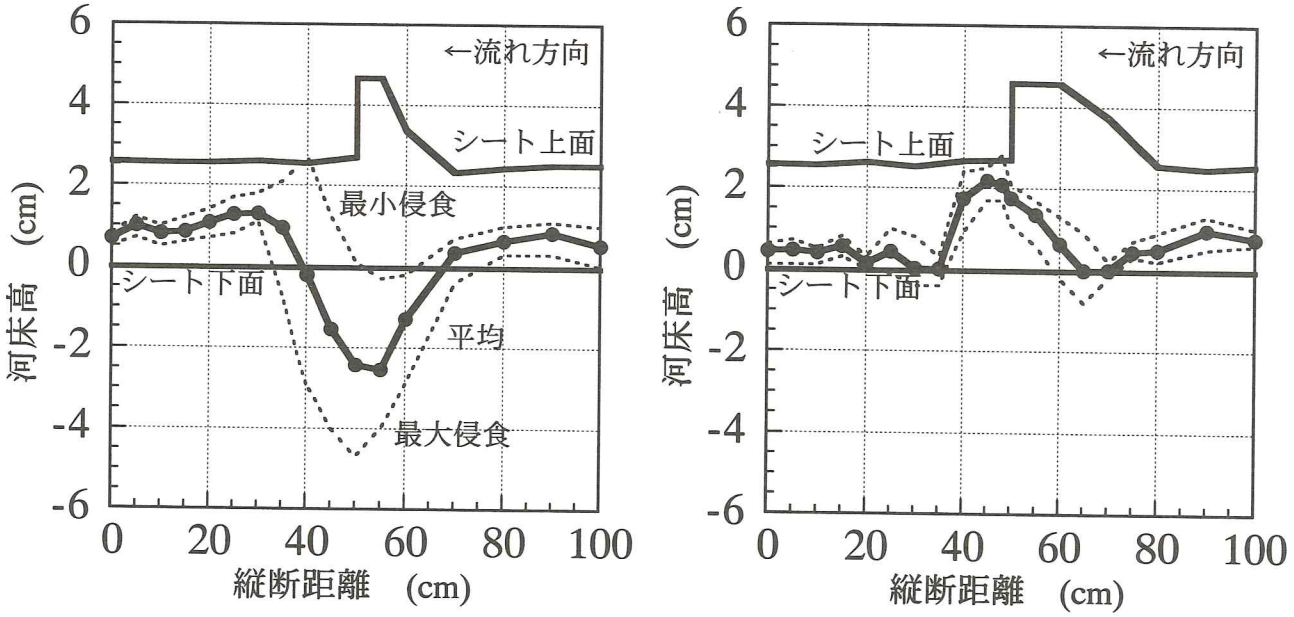
b）Ⅲ－1－2(重ね長20cm)

図－4.22(1)　ケースⅢ－1の侵食深平面分布(コンター：単位 cm)



c）Ⅲ－1－3(重ね長30cm)

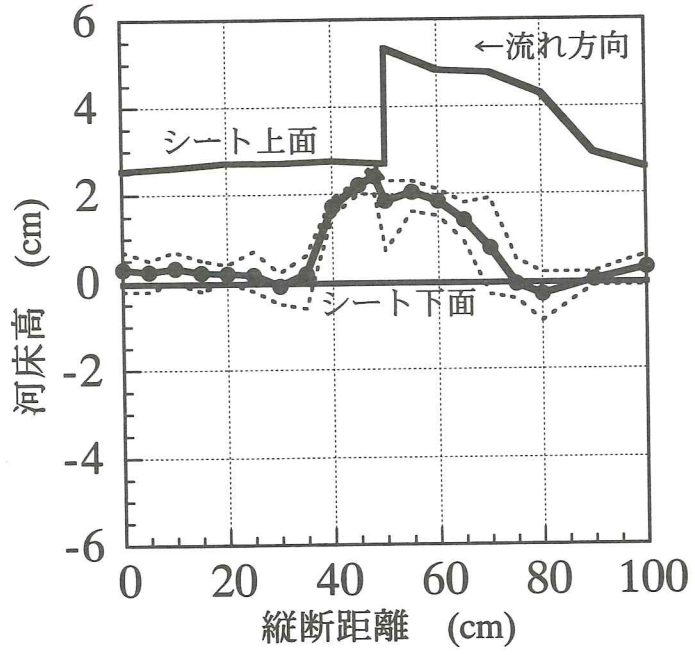
図－4.22(2)　ケースⅢ－1の侵食深平面分布(コンター：単位 cm)



a）Ⅲ－1－1

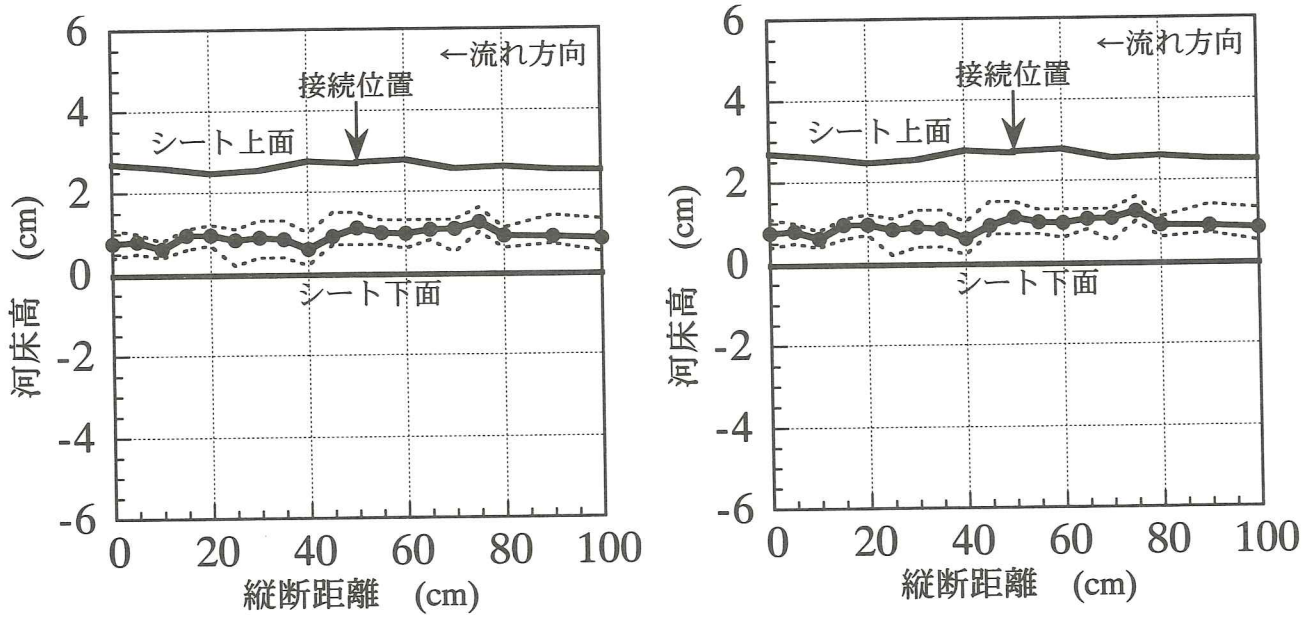
b）Ⅲ－1－2

図－4.23(1)　河床高の縦断分布(ケースⅢ－1)



c）Ⅲ－1－3

図－4.23(2)　河床高の縦断分布(ケースⅢ－1)



a）Ⅲ－2　　b）Ⅲ－3

図－4.24　河床高の縦断分布(ケースⅢ－2,Ⅲ－3)

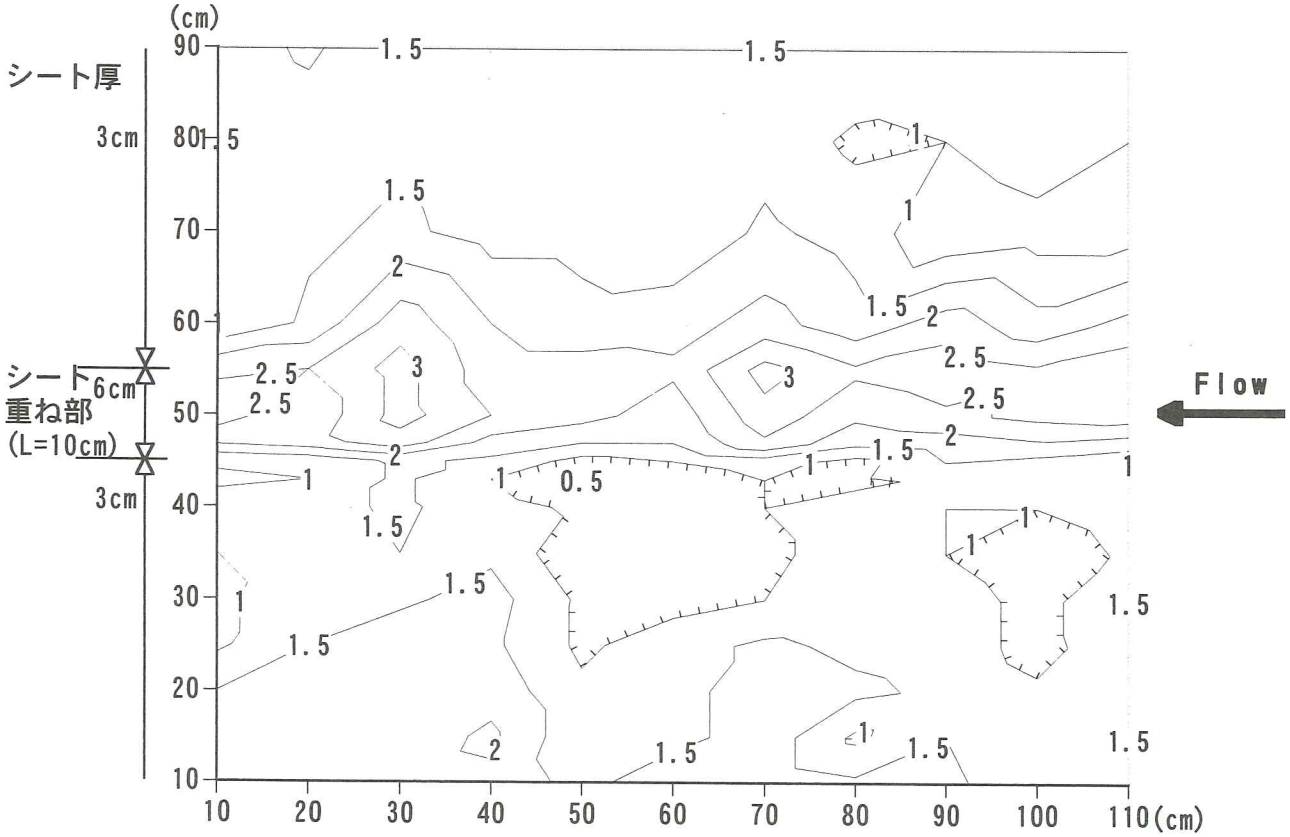
はケースⅠのシートのみの場合とほぼ同程度の侵食深（約19mm）となっている。以上の結果からタイプ1の重ね合わせを行う際には，重ね長を最低20cmとすれば良いと判断される。

次にタイプ2，3の重ね合わせの実験結果（ケースⅢ－2，Ⅲ－3）について，図－4.23に示した侵食深の縦断分布と同様な整理を行った結果を図－4.24に示す。いずれの場合も重ね合わせ部周辺で特に侵食深が増加している様子が全く見られず，平均侵食深およびばらつきの範囲ともケースⅠのシートのみの場合とほぼ同程度である。特に安全性を高める必要があるシート同士の接合やシート上流端部の埋設処理には，タイプ2または3のように行えば良いことが確かめられた。

4.2.5　流向に沿った重ね部周辺での侵食状況　（ケースⅣの実験結果）

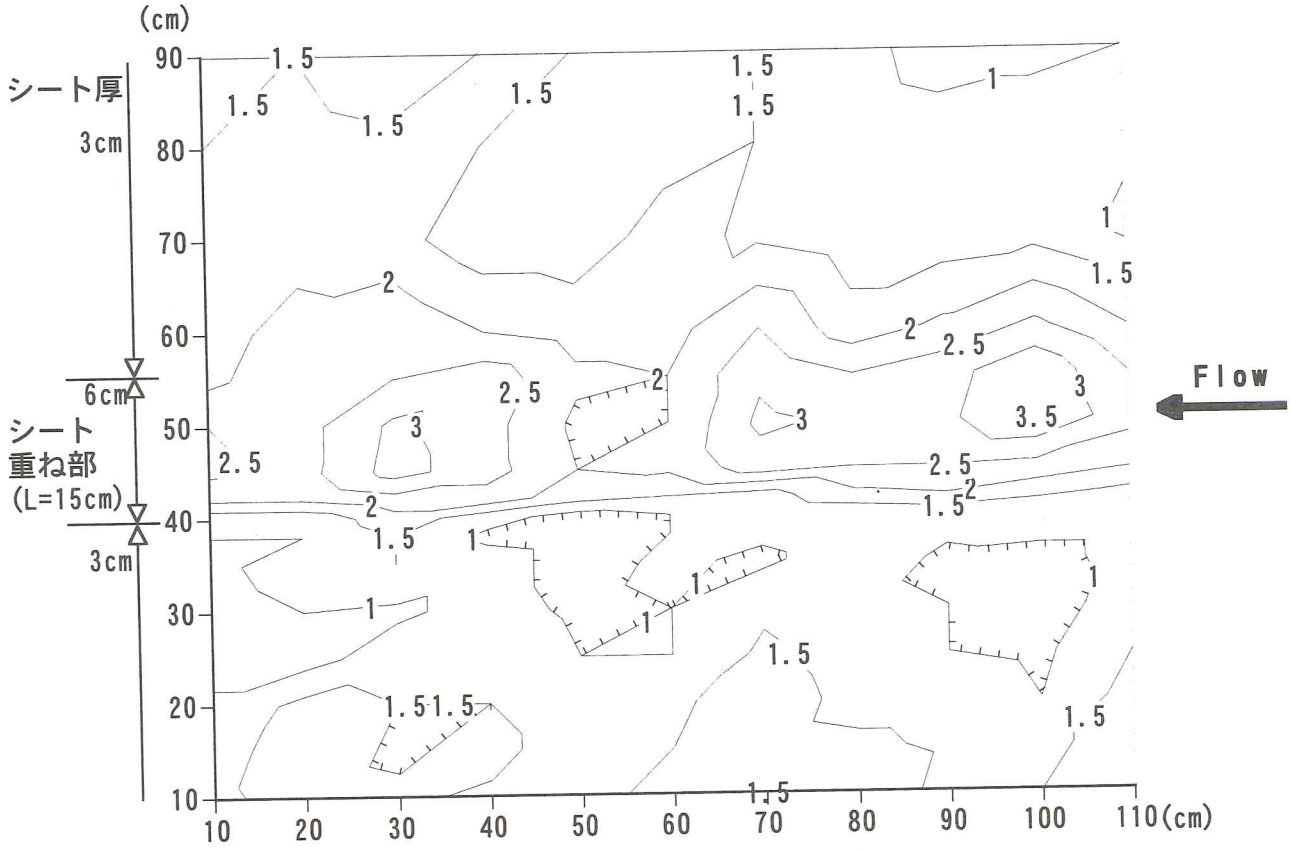
タイプ1の重ね合わせの実験（ケースⅣ－1）について，重ね長を10，15，20cmとした場合の侵食深の平面分布コンターを図－4.25a），b），c）に示す。いずれの場合も，シートが広範囲に浮き上がるようなことがない。また，特徴的なこととして，重ね部上に縦断方向に30～40cm間隔で侵食深が小さい範囲がほぼ周期的に表れていることが挙げられる。また重ね合わせ部で下側に位置するシートでは，重ね部に沿うように侵食深が大きい範囲が上記と同じ周期だが位相がほぼ半波長分ずれて形成されているように，やや不明瞭ながらも見ることができる。このような特徴的な侵食が生じる原因は明らかでないが，重ね合わせ部でシート面が段状になっていることによって形成される平面渦と関連していると思われる。

最適な重ね長を見出すために，侵食深の横断方向の変化を比較した結果を図－4.26に示す。実線で結ん

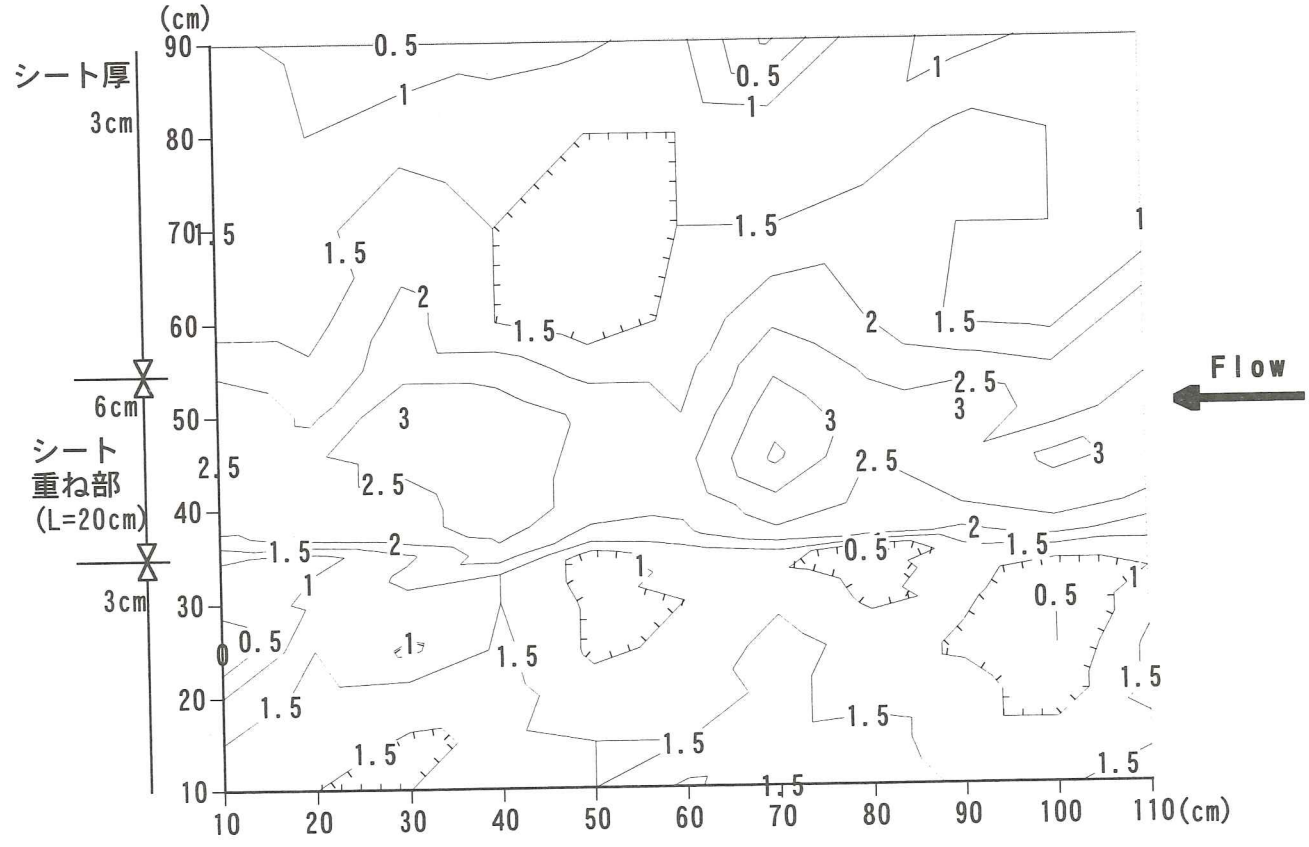


a）Ⅳ－1－1（重ね長10cm）

図－4.25(1)　ケースⅣ－1の侵食深平面分布（コンター：単位 cm）

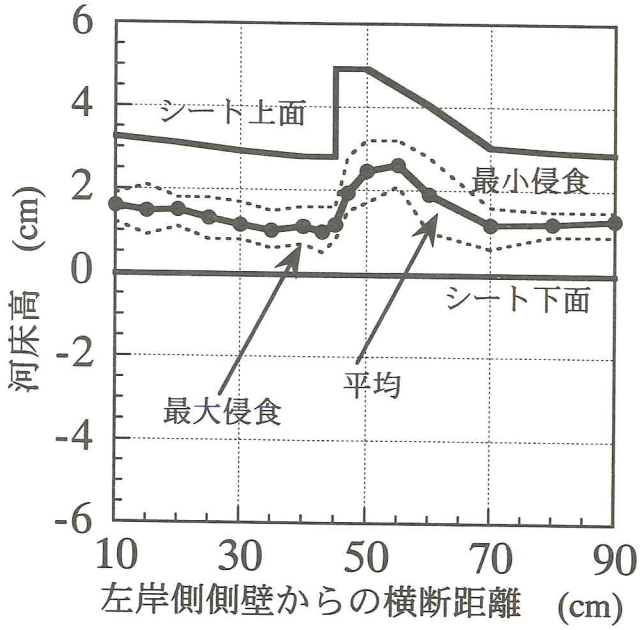


b）Ⅳ－1－2(重ね長15cm)

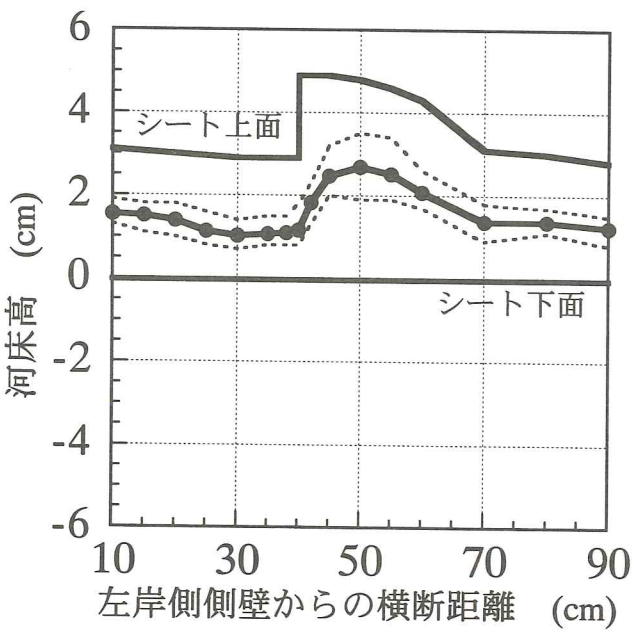


c）Ⅳ－1－3(重ね長20cm)

図－4.25(2)　ケースⅣ－1の侵食深平面分布(コンター：単位 cm)

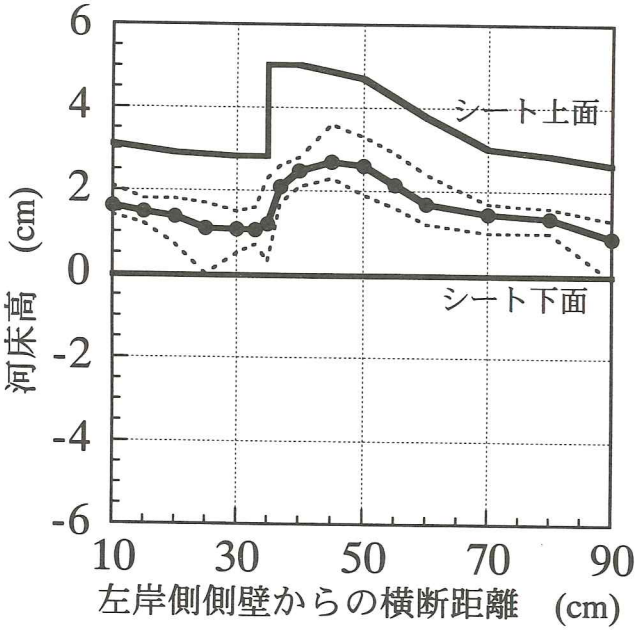


a）Ⅳ−1−1



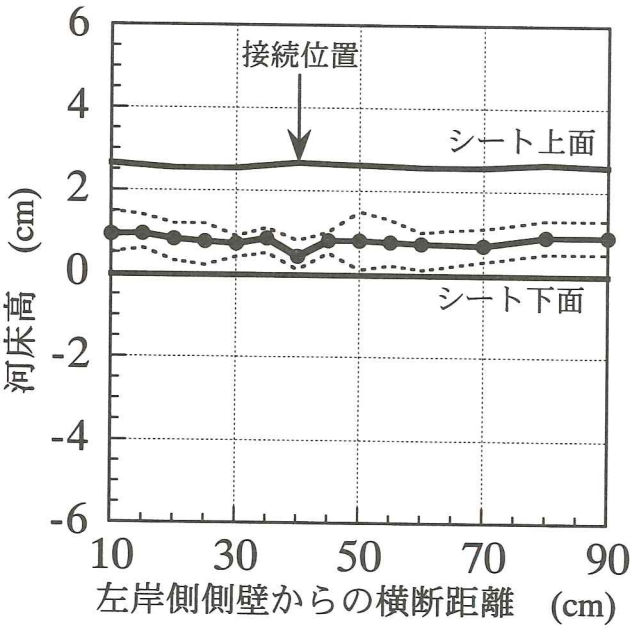
b）Ⅳ−1−2

図−4.26(1)　河床高の横断分布(ケースⅣ−1)



c）Ⅳ−1−3

図−4.26(2)　河床高の横断分布(ケースⅣ−1)



図−4.27　河床高の横断分布(ケースⅣ−2)

だプロットは縦断方向に位置が異なる11箇所(図−4.15参照)の測定値の平均値である。またプロットの上下に延びる破線は最大および最小侵食深を示したものである。上側に重ねたシートの端部近傍で最大侵食深が生じる傾向が見られるが，その深さは重ね長を変化させても顕著な差違が認められず，またシート下部まで及ぶ侵食が生じているが，その深さが微小である。以上の結果からタイプ１の重ね合わせを行う際には，重ね長を最低10cmとすれば良いと判断される。

次にタイプ２の重ね合わせの実験結果(ケースⅣ−2)について，図−4.26に示した侵食深の横断分布と同

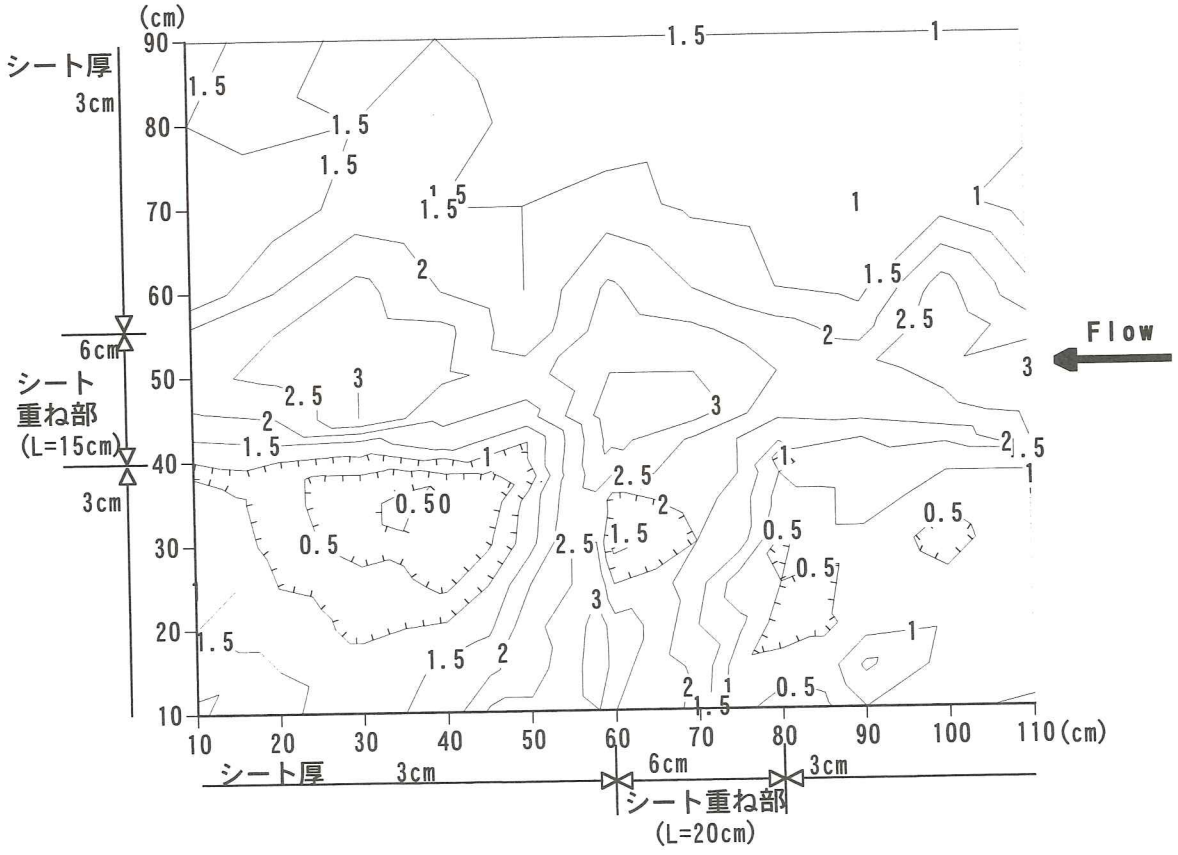
様な整理を行った結果を図－4.27に示す。この場合も重ね合わせ部周辺で特に侵食深が増加している様子は全く見られず，平均侵食深およびばらつきの範囲ともケースⅠのシートのみの場合とほぼ同程度である。特に安全性を高める必要があるシート同士の接合やシート端部の埋設処理には，ケースⅢと同様にタイプ2のように行えば良いことが確かめられた。

4.2.6　3枚のシートの重ね部での侵食状況　（ケースⅤの実験結果）

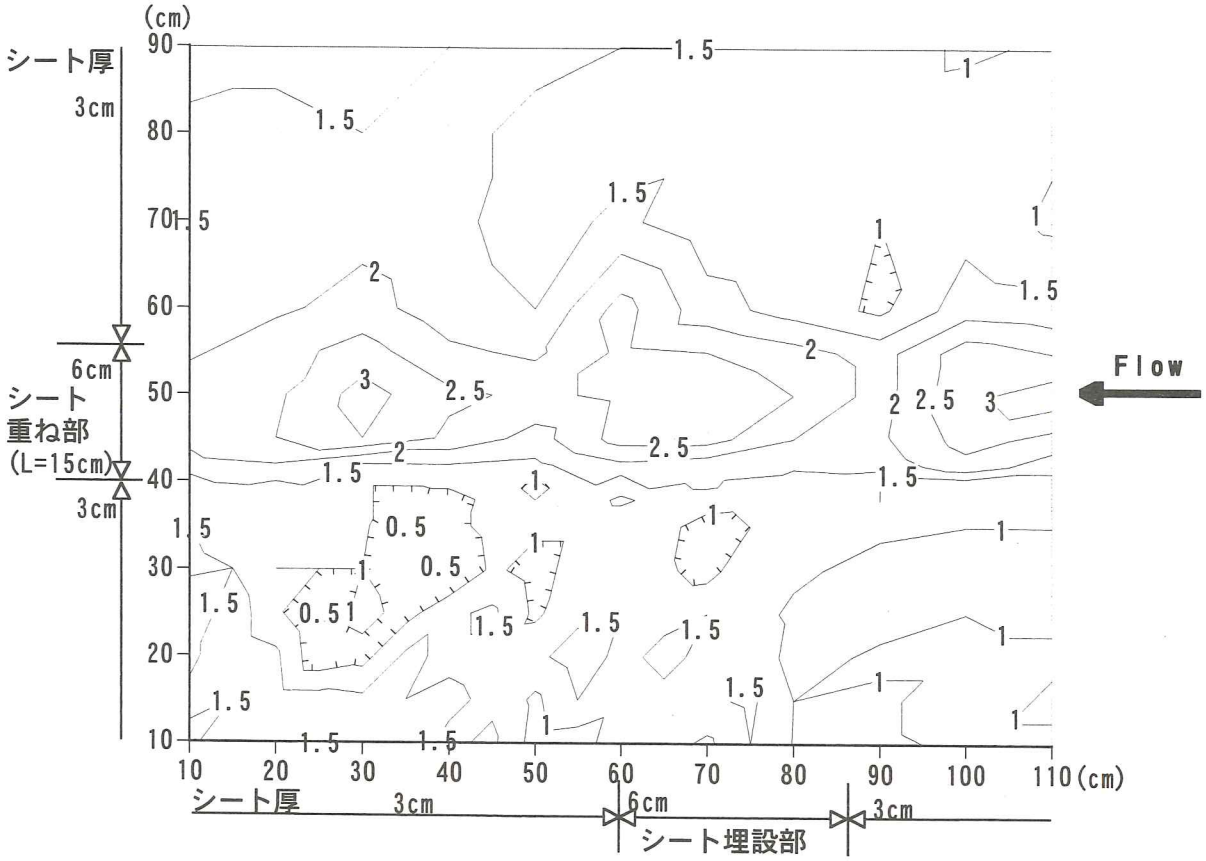
まず最初にタイプ1のみで重ね合わせた実験（ケースⅤ－1）について，侵食深の平面分布コンターを図－4.28に示す。なお，重ね長はケースⅢ－1およびⅣ－1の結果を踏まえて，流向に直交する重ね部では20cm，沿う方向では15cmとした。3枚が重なる場所周辺では，流向に直交するまたは沿う方向の重ね部についてそれぞれ単独で実験した結果（ケースⅢ－1およびⅣ－1）に見られた特徴が両方とも表れているが，それらのケースと比較して特に局所洗掘が大きくなった場所がなく，シート下部まで侵食が及ぶ箇所はほとんど見られない。以上より，ケースⅢ－1およびⅣ－1の実験によって設定した重ね長を確保すれば，3枚の重ね部においても侵食防止が的確に行えると判断できる。

次に，流向に直交する重ね部はタイプ2，沿う方向はタイプ1とした実験（ケースⅤ－2）について，侵食深の平面分布コンターを図－4.29に示す。この実験結果には，流向に沿う方向の重ね部のみの実験ケースⅣ－1（図－4.25参照）の結果との差異がほとんど見られない。

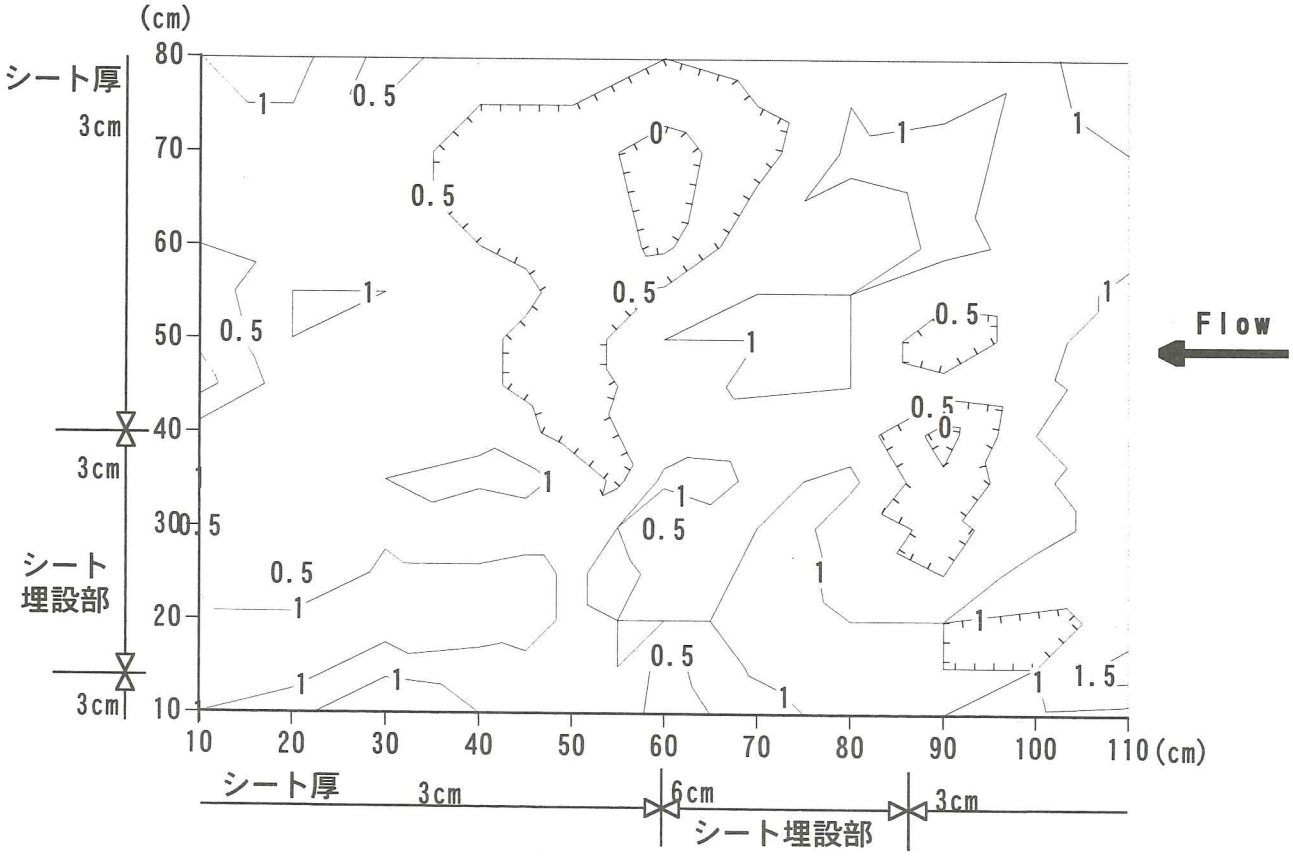
最後に，タイプ2のみで重ね合わせた実験（ケースⅤ－3）について，侵食深の平面分布コンターを図－4.30に示す。直交および沿う方向の重ね部をそれぞれ単独で行った実験結果から想像がつくように，シー



図－4.28　ケースⅤ－1の侵食深平面分布（コンター：単位 cm）



図－4.29　ケースⅤ－2の侵食深平面分布(コンター：単位 cm)



図－4.30　ケースⅤ－3の侵食深平面分布(コンター：単位 cm)

トのみのケースⅠと同様な結果が得られた。タイプ2の重ね合わせは3枚のシートを接合する部分においても，非常に有効であることが確認できた。

4.2.7　まとめ

シートに打設したピンが流れを受けても，その周りに局所洗掘がほとんど生じず，シートを良好に固定できることが分かった。またタイプ1(図−4.14参照)のようにシートを重ね合わせる場合でも，流向に直交する重ね部の場合は20cm，流向に沿った場合には15cmの重ね長をとれば，重ね部においてもシートによって侵食防止が可能なことがわかった。タイプ2，3(図−4.14参照)では，シートの継ぎ目がない場合とほとんど差異がない侵食状況となり，局所洗掘の発生防止に特に優れていることが明らかとなった。以上を参考にしてシートを接続すれば，侵食に対して弱点箇所となり易いシート端部でも侵食防止が確実に行える。

4.3　シートの切断，轍形成に伴う変形およびシート上に礫が設置された場合での侵食防止効果

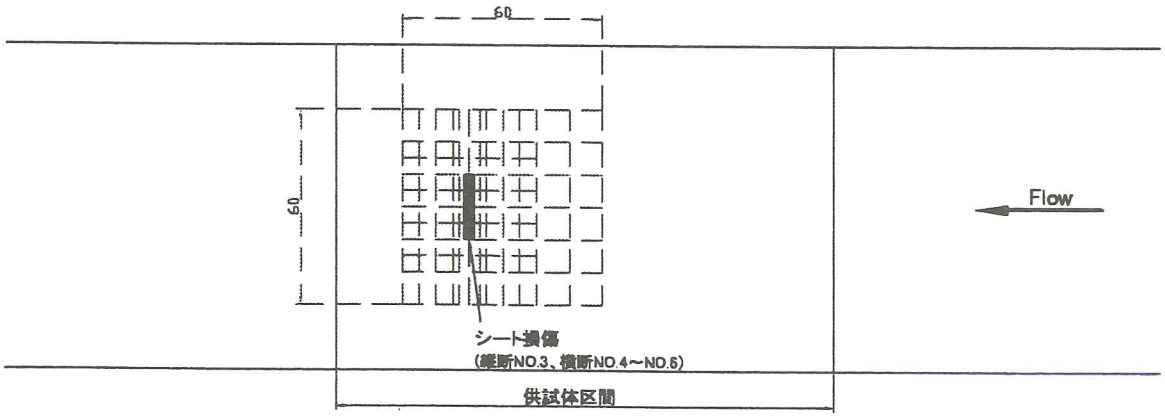
4.1および4.2に示したようにシートの敷設・固定を行えば侵食防止効果を発揮できることが分かったが，その後の供用時にシートに損傷や変壊が生じることは不可避と考えるべきである。損傷が軽度であれば，侵食防止効果を維持できることが，シートの維持管理に関わる労力を軽減する上で必要とされよう。また，補修が必要な損傷や変形の程度を明らかにすることも，点検による安全性確保を的確に行う上で不可欠である。本節では，シートに損傷，変壊を設けて侵食実験を行い，上記について検討を加える。

4.3.1　実験の概要

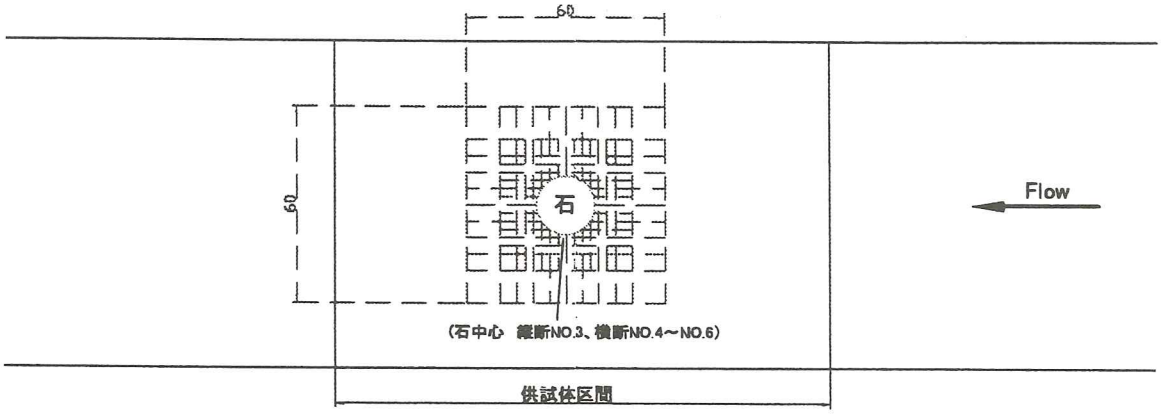
実験水路は4.1.3に示した実験に用いた矩形管水路(図−4.8参照)と同一である。実験ケースを表−4.6に示す。実験Ⅰのシート切断および実験Ⅱの礫設置では，4.1.3に示した実験終了後の供試体を再使用した。4.1.3の実験終了後，まず図−4.31に示すように流向と直交する方向に幅20cmに渡ってシートを切断した。このように切断したのは，シートを敷設したのり面にスコップを差し込んだ際に生じる切断を模擬した実験を行うためである。切断終了後，断面平均流速2(m/s)を60分間通水して，図−4.31に示した格子点において侵食深を測定した。実験Ⅱは，実験Ⅰが終了した後，図−4.32に示す位置に粒径約15cmの礫を置き，実験Ⅰと同様に通水した後に格子点において侵食深を測定した。礫の粒径は，断面平均流速2(m/s)の条

表−4.6　シートの切断(ケースⅠ)，礫設置(ケースⅡ)，轍(ケースⅢ)による変形に関する実験ケース

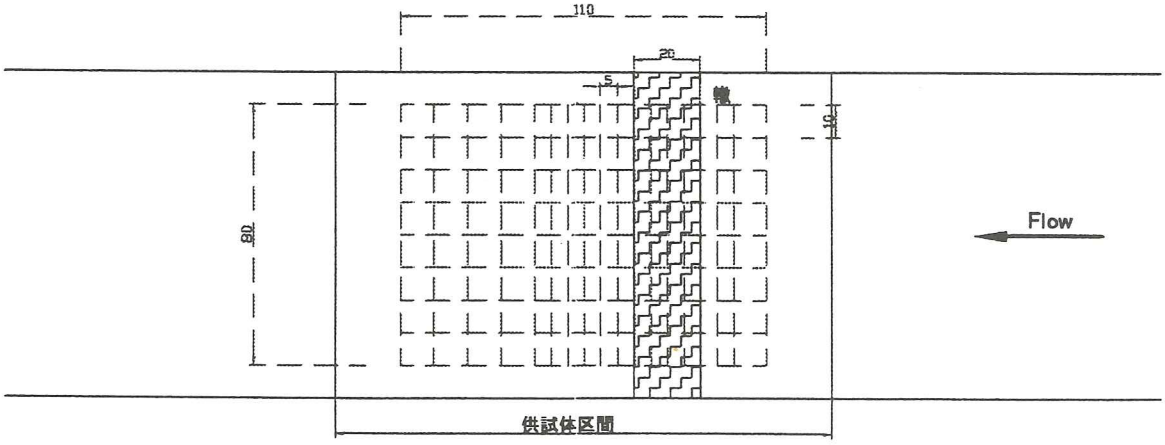
実験ケース	シートタイプ	シート名	繁茂密度 (本/m²)	草丈 (cm)	通水時間 (min)	侵食深 (cm)
Ⅰ,Ⅱ-1	ヘチマ	B-2-2	185	96.9	各60	----
Ⅰ,Ⅱ-2	編み物	C-3-1	290	113.5		
Ⅰ,Ⅱ-3	ヘチマ	A-3-3	228	101.9		
Ⅰ,Ⅱ-4	ネット	A-4-6	311	116.5		
Ⅰ,Ⅱ-5	ネット	A-8-2	169	87.7		
Ⅰ,Ⅱ-6	織物	D-3-2	316	104		
Ⅲ-1	ヘチマ	B-2-3	203	102.8	340	1.51
Ⅲ-2	編み物	C-3-2	360	126.8		0.95
Ⅲ-3	ネット	A-4-3	256	111.8		1.86
Ⅲ-4	ネット	A-8-1	199	85.13		1.37
Ⅲ-5	織物	D-3-3	281	93.75		2.71



図－4.31　シートの切断箇所の侵食実験



図－4.32　シート上へ礫設置した状態での侵食実験



図－4.33　轍によるシート変形箇所の侵食実験

件で流送されない大きさとして設定した。また礫を設置した場所は，シート切断を行った場所より約30cm下流に位置している。球体周りの流れに関する既往の知見によると，球体が及ぼす影響が上流側に顕著に表れる範囲は，球体の直径程度である。切断箇所は礫より粒径の約２倍上流側に位置しているので，切断箇所の周辺の流れ場は礫の影響をほとんど受けないと考えて良い。また，切断箇所と礫上流に生じる局所洗掘域は，お互いに離れて形成された。以上より，切断と礫設置の実験を同一の供試体で行なっても，両実験の相互作用は無視できる程度と考えられる。

実験Ⅲの轍によるシート変形では，**図－4.4**に示したチガヤ繁茂範囲のうち**表－4.6**に示したシートが敷設されている場所から供試体を採取した。供試体の採取に先立ち，チガヤの地上部（葉茎）を地表面際で刈り取る（その理由については4.1.3⑶参照のこと）とともに，重機で角材を地面に押しつけて幅が約20cm，深さが約５cmの凹み（これを轍と呼んでいる）を**図－4.33**に示すように製作した。供試体を水路に設置した後，**表－4.6**に示した通水時間に達するまで断面平均流速２（m/s）を繰り返し通水するとともに，侵食深を**図－4.33**に示した格子点上で測定した。以上の実験を１時間あたりの平均侵食深の増加量が２mm以下となるまで行った。実験終了時の平均侵食深を**表－4.6**に併記した。

なお，侵食実験区間の上下流には水路床（ステンレス製）への粗度付けのために4.2.1に示した実験と同一のプロトタイプシートを敷設した。

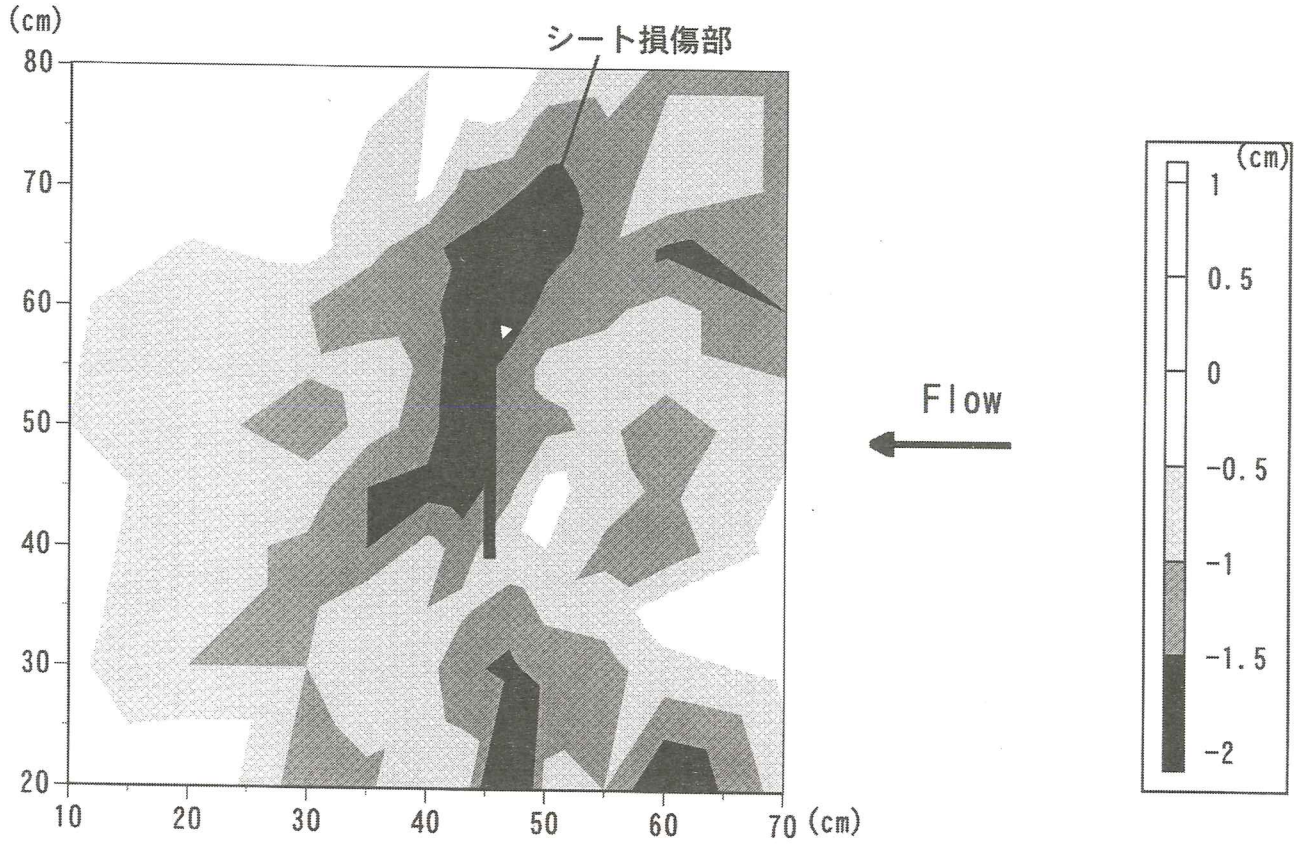
4.3.2　シート切断と礫設置の実験結果

切断部周辺の侵食深の分布を**図－4.34**に，そして礫を設置した位置周辺の侵食深分布を**図－4.35**に示す。シート切断部の下流側に沿って幅が約５cmの局所洗掘（深さ２～３cm）が形成される場合が多い。また，礫設置の場合には礫の上流側に沿って深さ約２cmの局所洗掘が生じている。侵食実験前後の切断部周辺の状況を**写真－4.10**に，そして実験終了後の礫周辺の状況を**写真－4.11**に示す。いずれの場合もシートが根茎によって地面に固定されており，シートが捲れ上がったり，切断部の隙間が広がったりした様子は認められなかった。本実験のような程度の切断や礫設置であれば，局所洗掘の範囲が小さいことから，シートによる侵食防止を特に困難にすることはない。

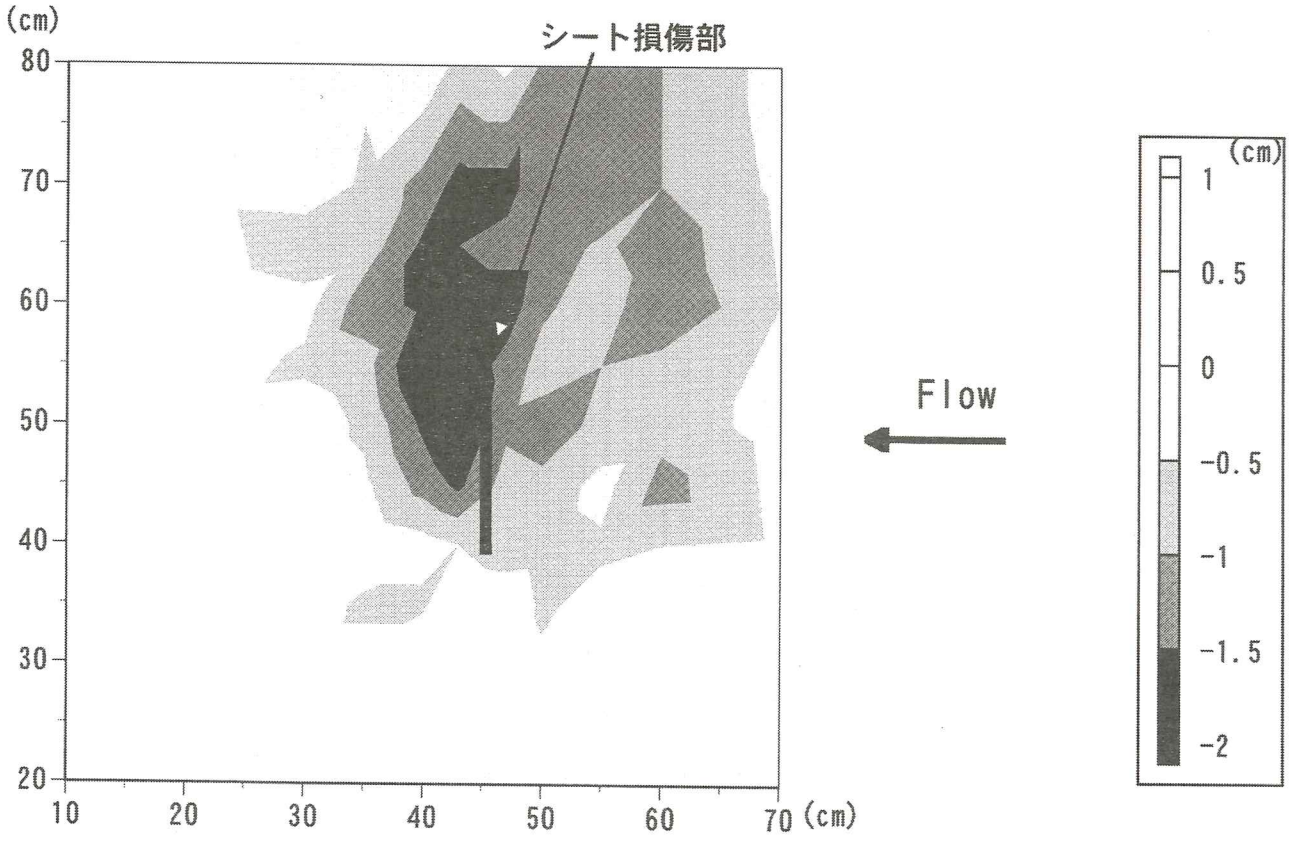
以上の結果から植生が良好に繁茂している場所であればシートが多少切断されていても特に問題とならないと考えられるので，シートの維持管理を行う際，植生があまり繁茂していない場所を集中的に点検するのがよいと言える。また，シートを敷設した堤防のり面に粒径15cmの礫が置かれた状況を想定すると，上記の実験のように水平な地面に礫を設置した場合に比べてのり面上の礫の移動限界流速は小さくなるので，実験と同じ流速２（m/s）では礫がのり面上から流送されてしまうと思われる。このことも考慮すると，礫の設置による侵食増大に対する懸念はほとんどないと考えて良いであろう。

4.3.3　轍部の実験結果

轍周辺の侵食状況を**写真－4.12**に示す。轍の下流側が水衝部となるため，シートが露出するとともにシート下面の土砂まで流失するような局所洗掘が発生している。そのためシートは地面から浮かび上がった状態となって，侵食防止効果を十分に発揮できていない。しかし，その範囲より上下流側では，シートが根茎によって地面に固定されているため，シートが捲れ上がることはない。この状態が維持できている間は，郡山ほか[2]のシバが繁茂した轍部の侵食実験結果と同様に，局所洗掘範囲の急激な拡大は生じない

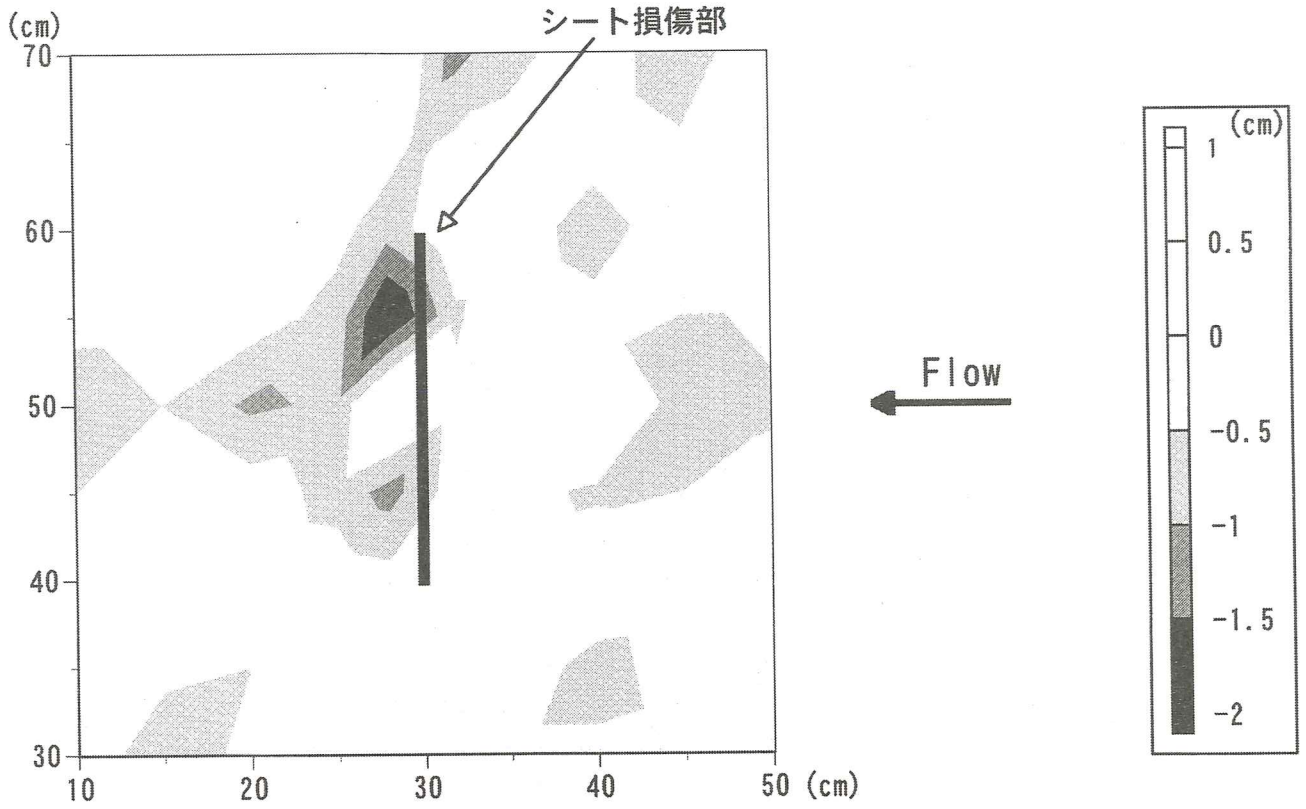


a) Ⅰ−1(B−2−2)

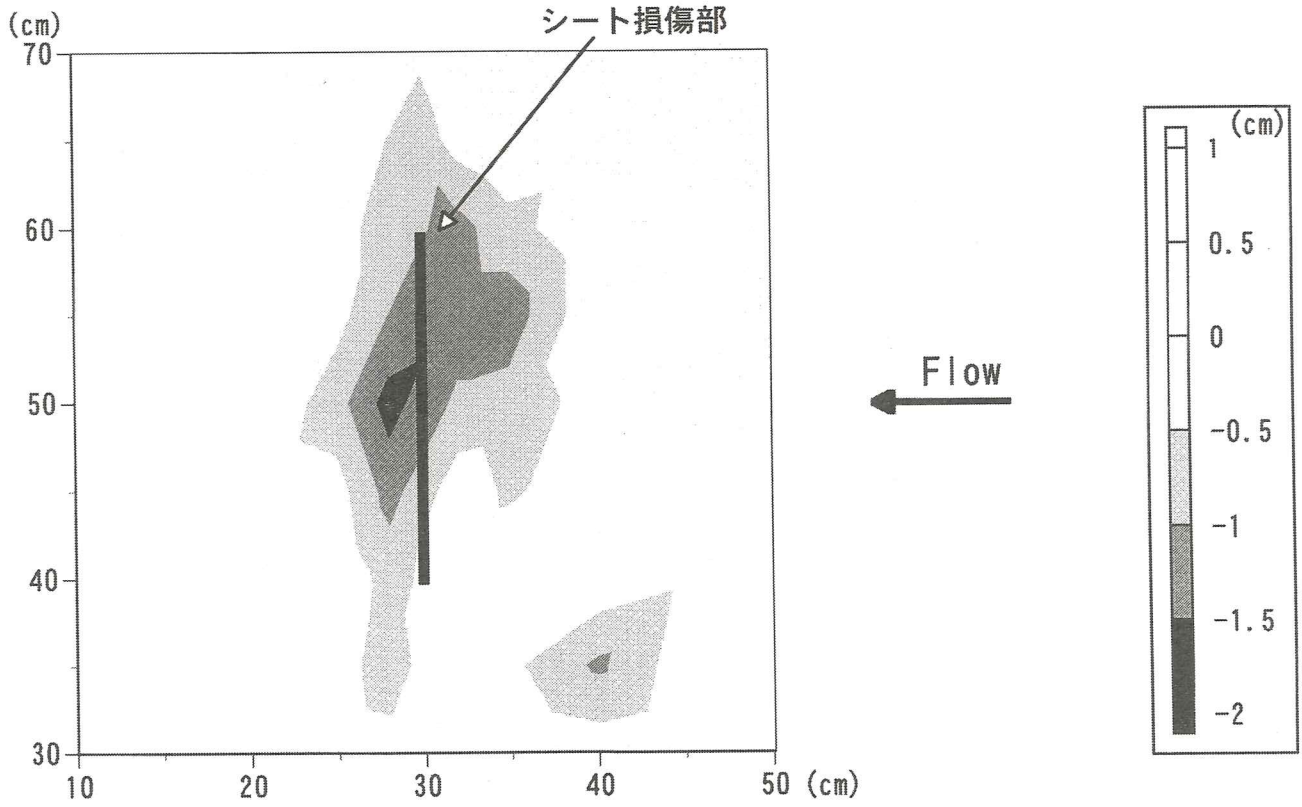


b) Ⅰ−2 (C−3−1)

図−4.34(1)　切断部周辺の侵食深分布(コンター)

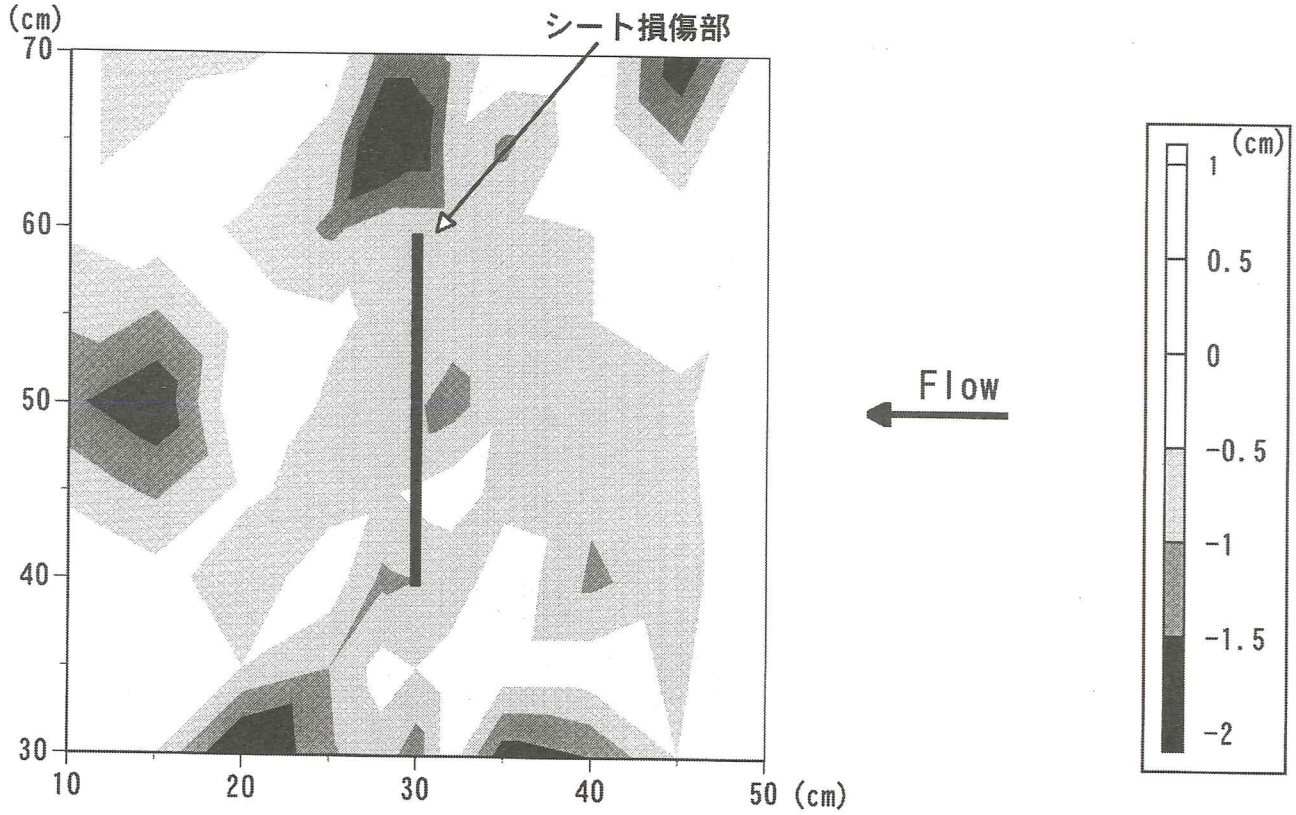


c) Ⅰ−3 (A−3−3)

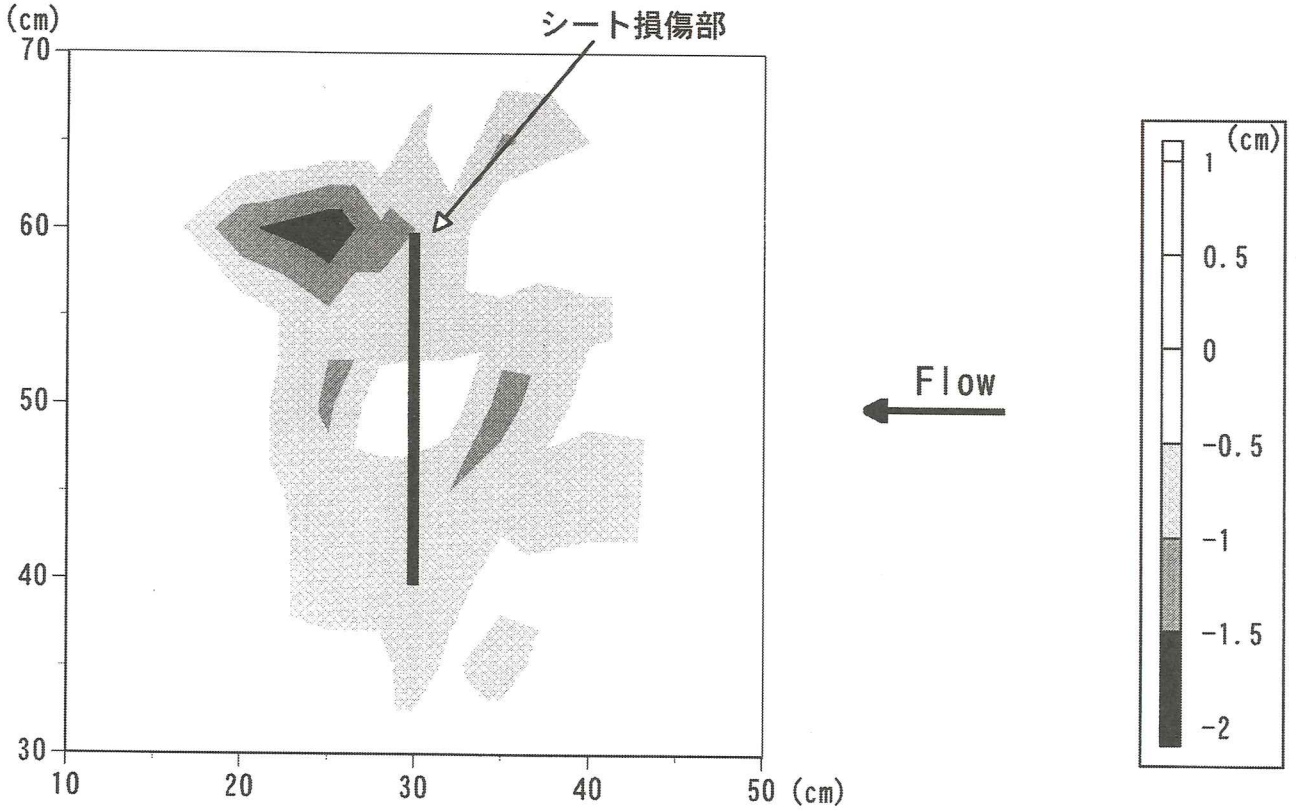


d) Ⅰ−4 (A−4−6)

図−4.34(2) 切断部周辺の侵食深分布(コンター)

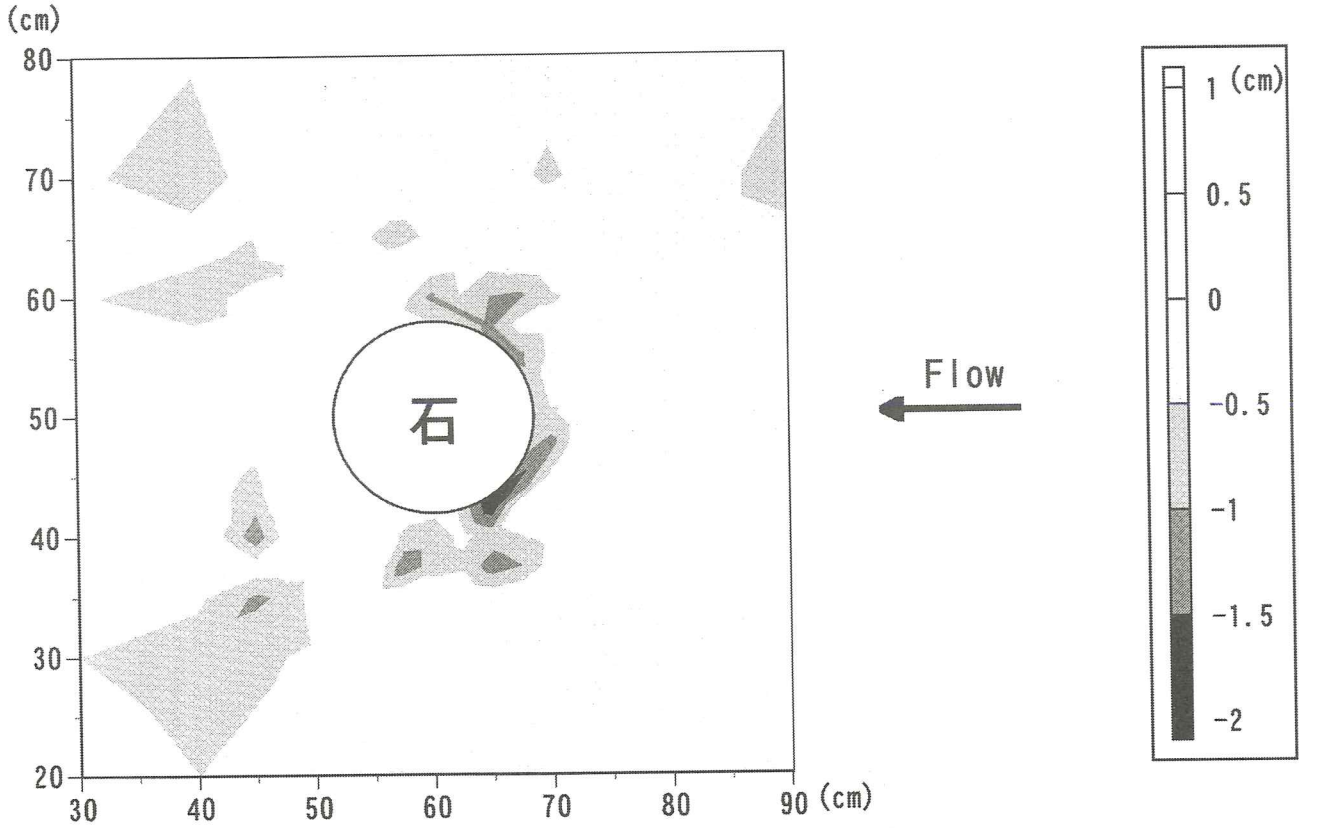


e) Ⅰ−5 (A−8−2)

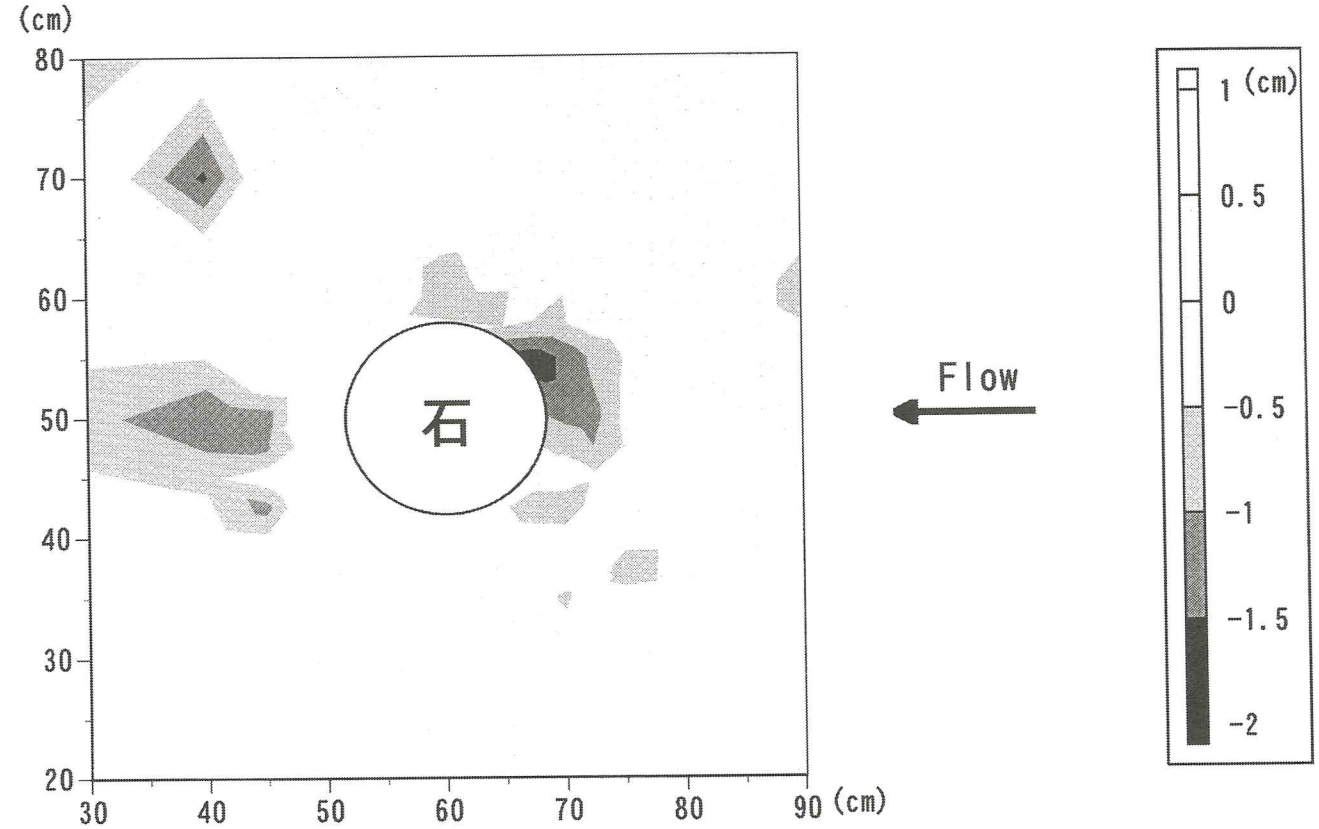


f) Ⅰ−6 (D−3−2)

図−4.34(3) 切断部周辺の侵食深分布(コンター)

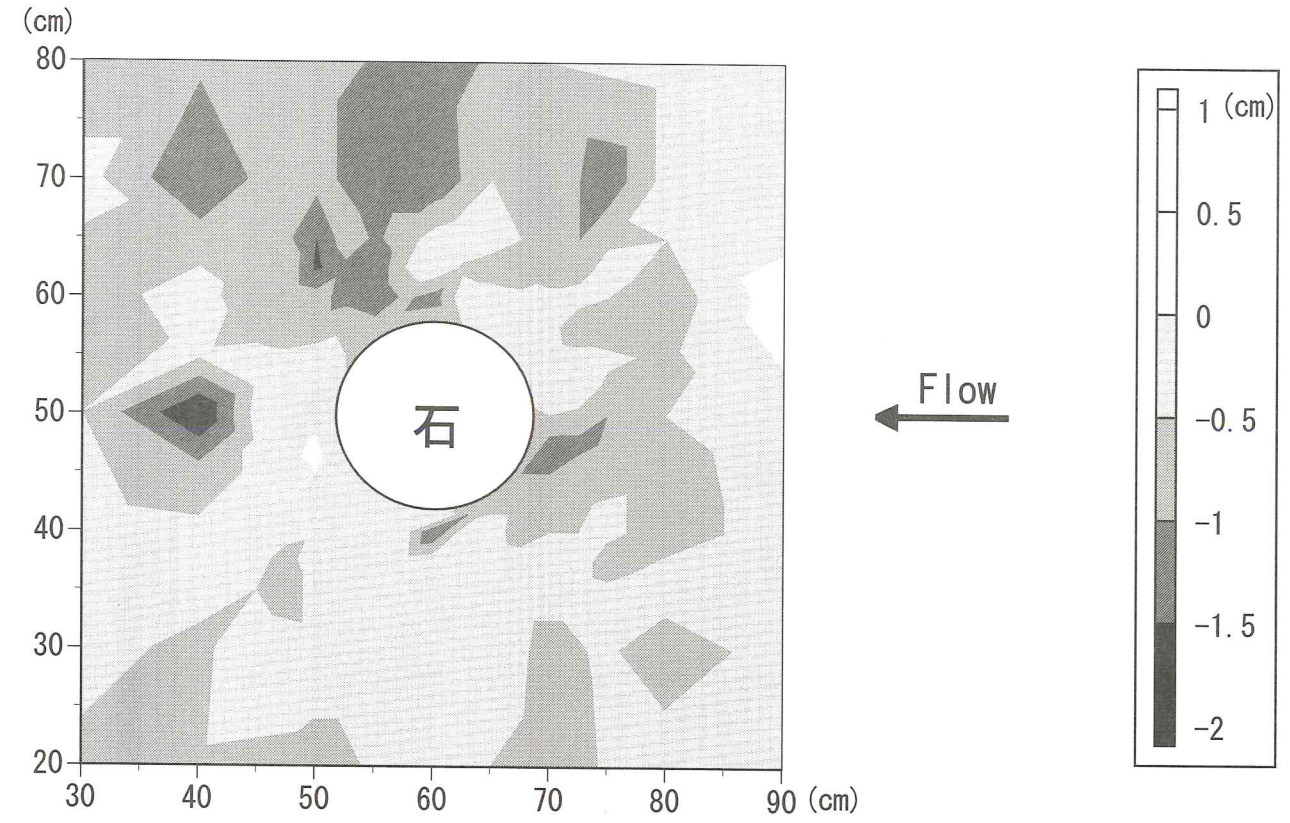


a) Ⅱ－1 (B－2－2)

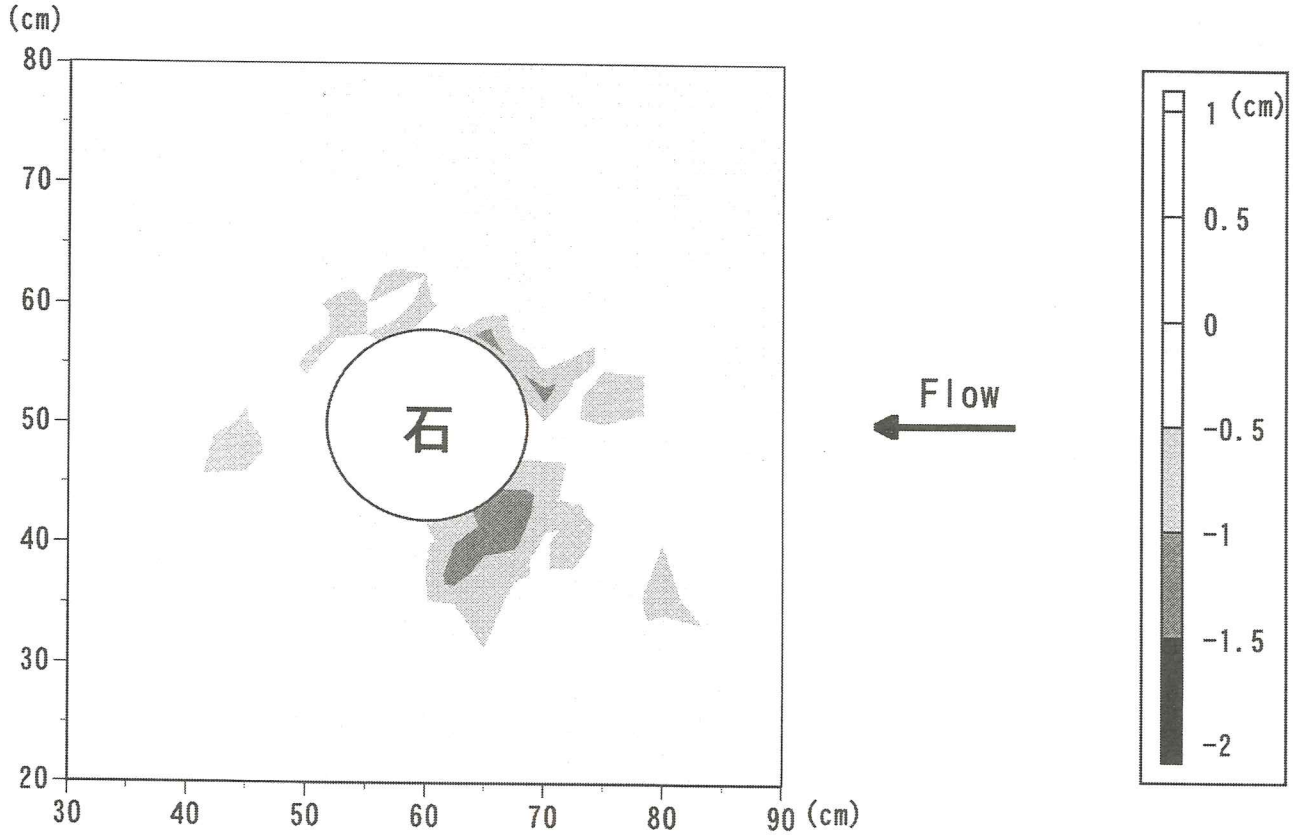


b) Ⅱ－2 (C－3－1)

図－4.35　礫周辺の侵食深分布(コンター)

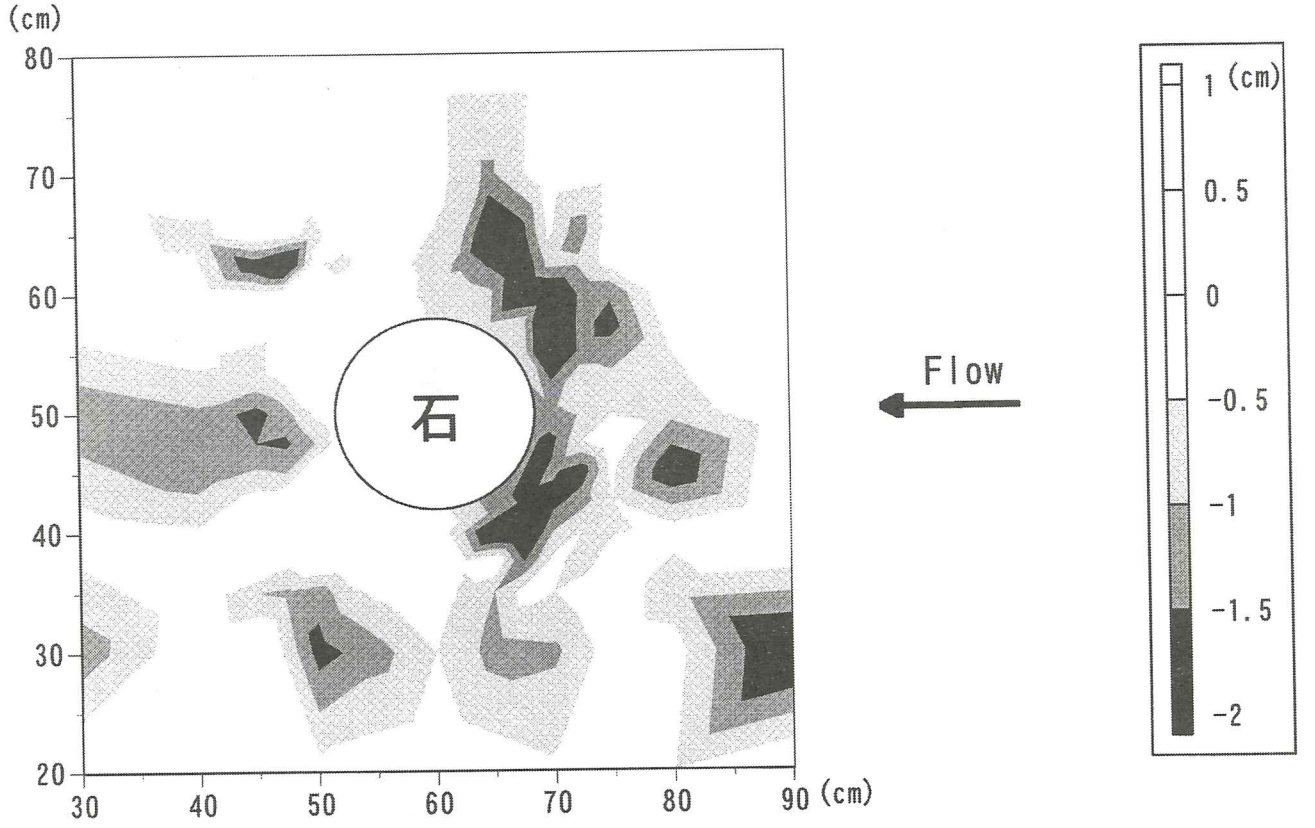


c) Ⅱ－3 (A－3－3)

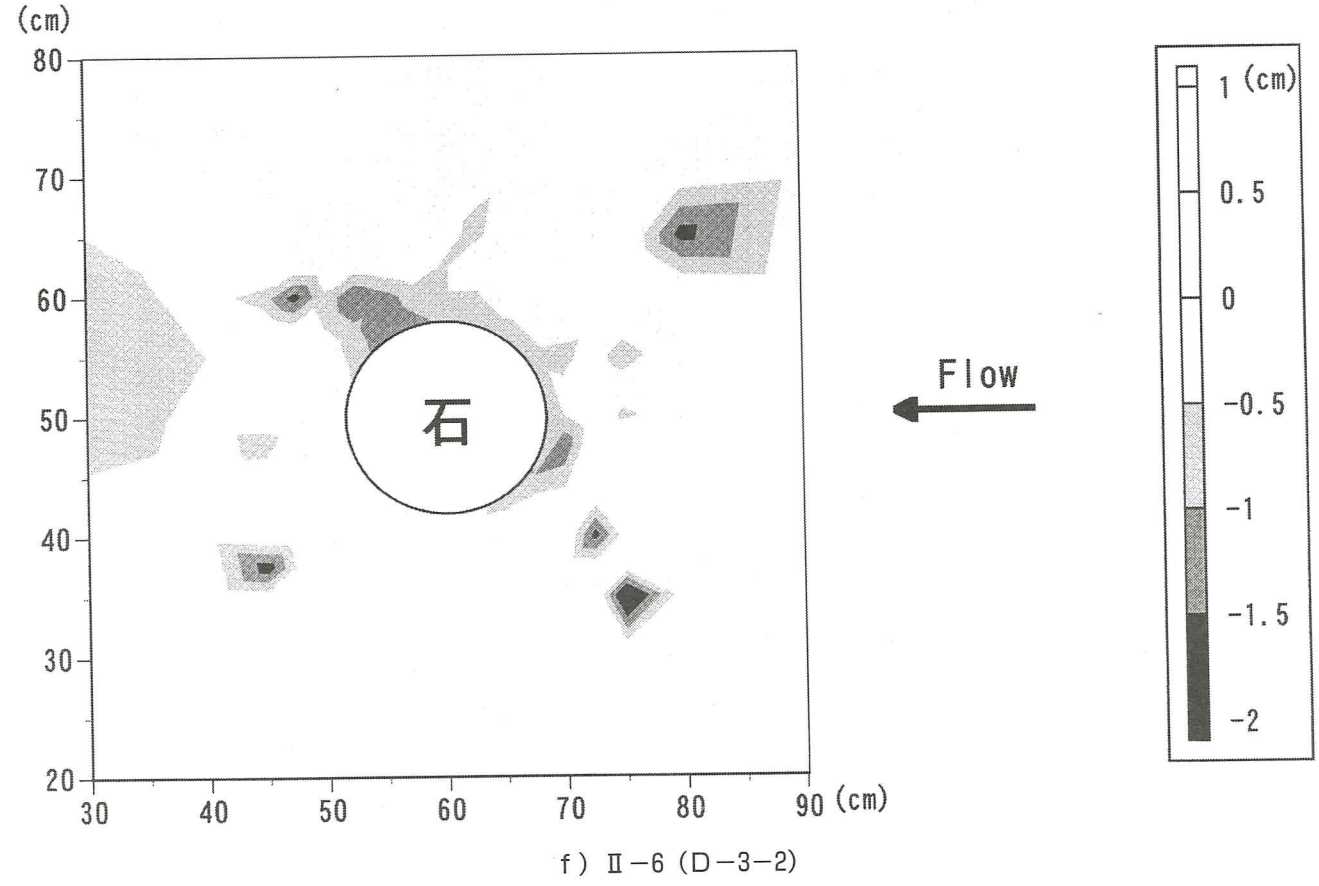


d) Ⅱ－4 (A－4－6)

図－4.35　礫周辺の侵食深分布(コンター)



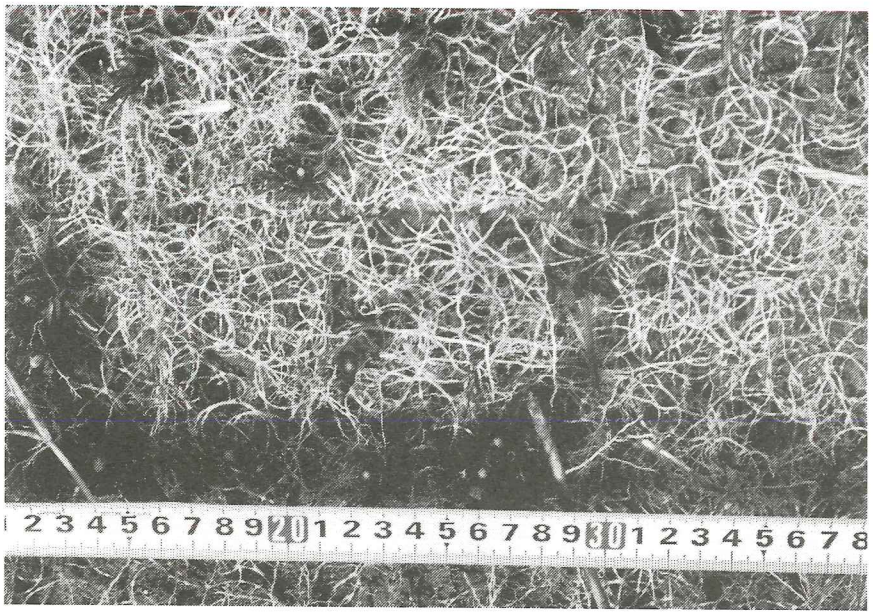
e) Ⅱ－5 (A－8－2)



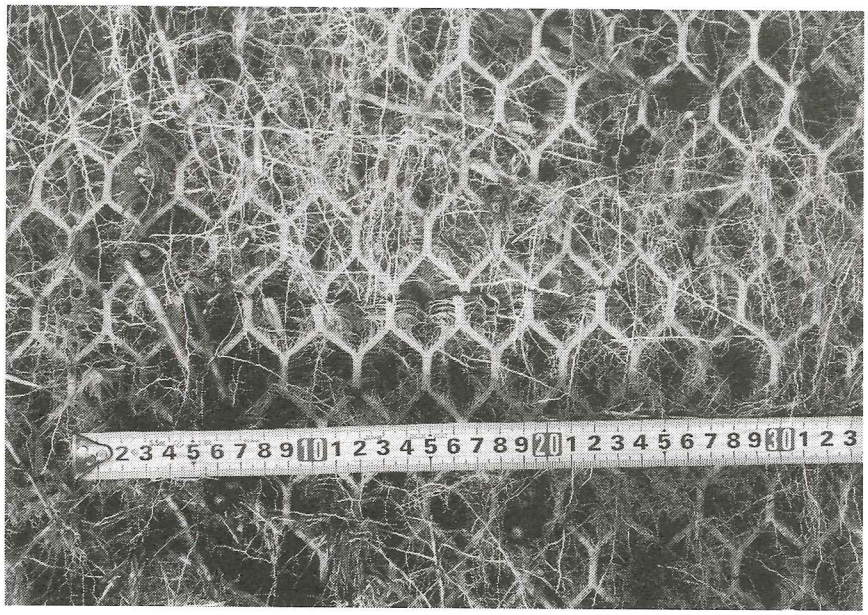
f) Ⅱ－6 (D－3－2)

図－4.35　礫周辺の侵食深分布(コンター)

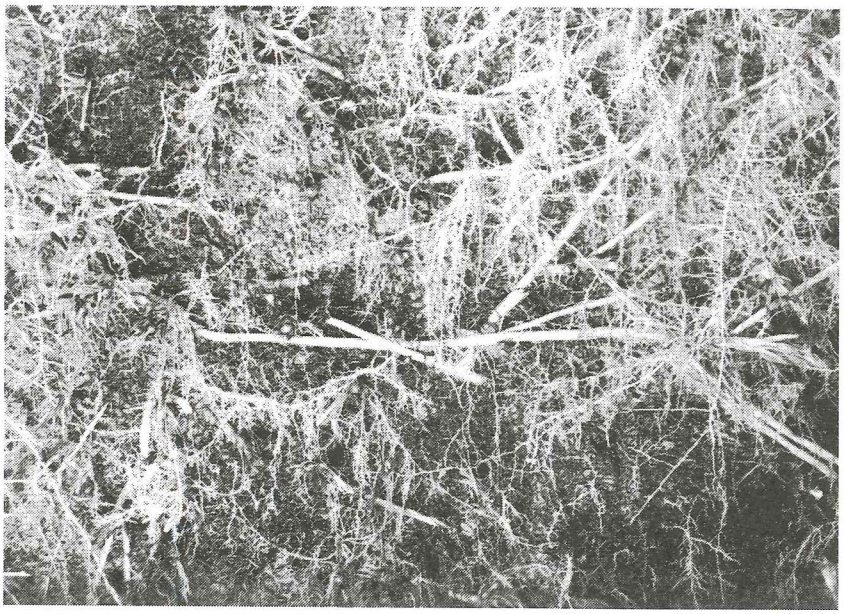
a）Ⅰ－1（B－2－2）



b）Ⅰ－2（C－3－1）

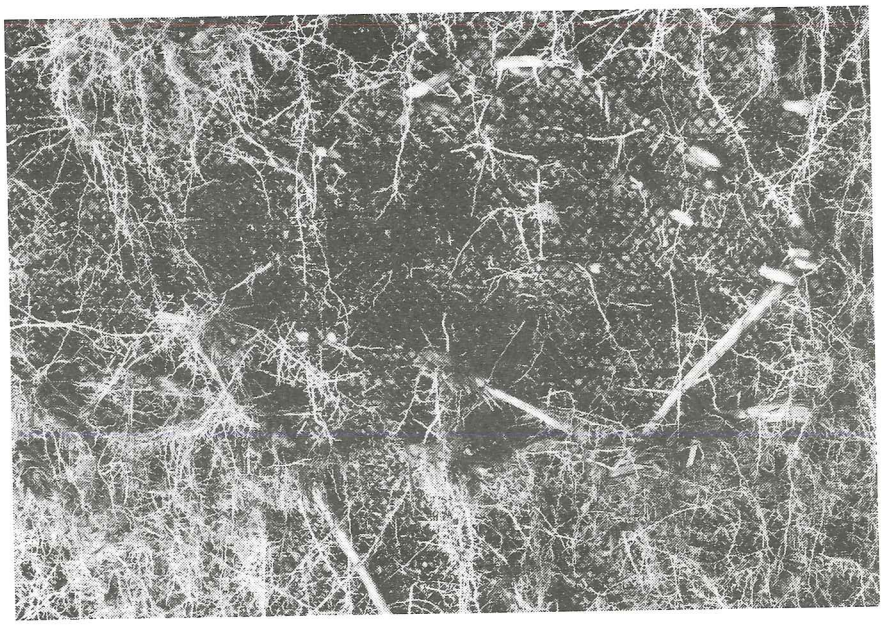


c）Ⅰ－3（A－3－3）

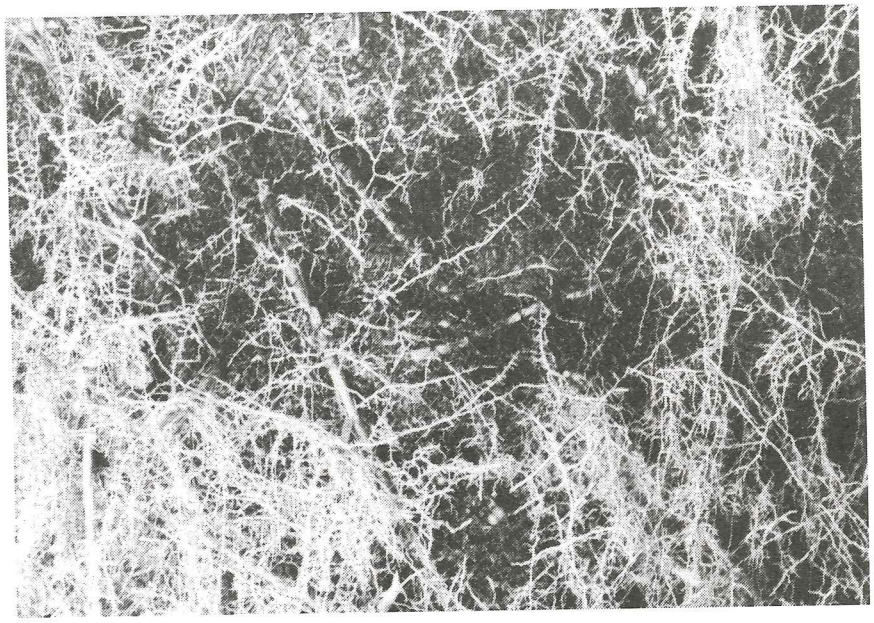


写真－4.10(1)　切断部周辺のシートの固定状況

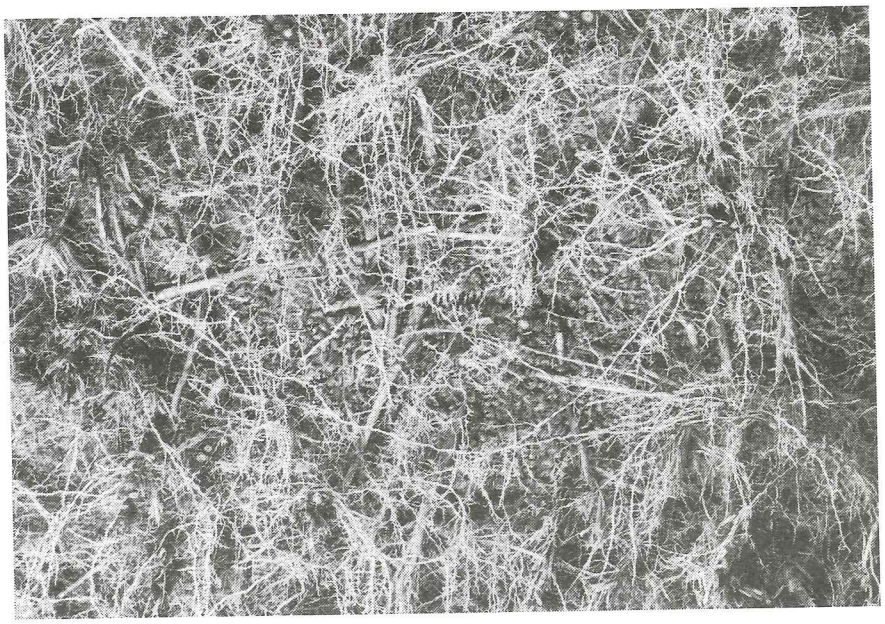
d) Ⅰ－4（A－4－6）



e) Ⅰ－5（A－8－2）

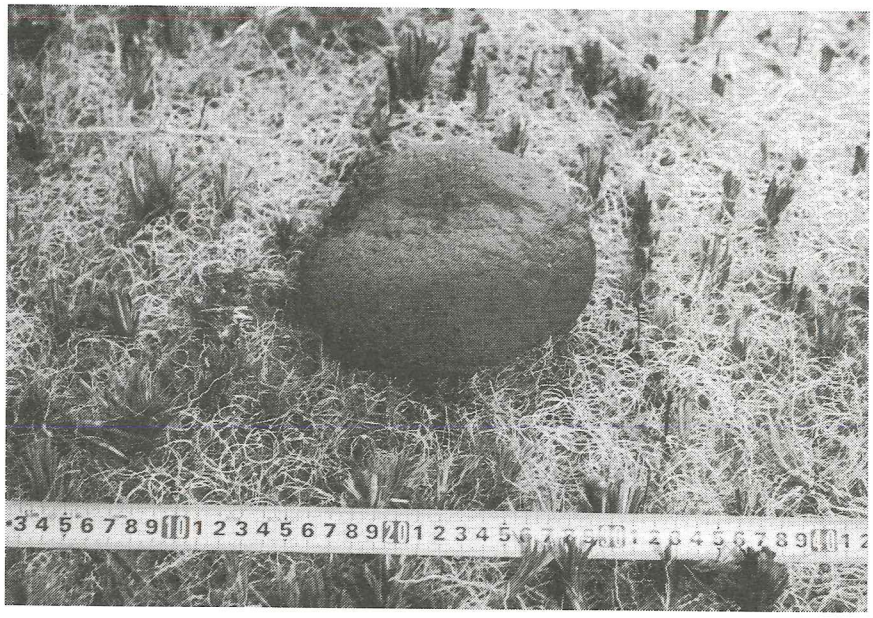


f) Ⅰ－6（D－3－2）

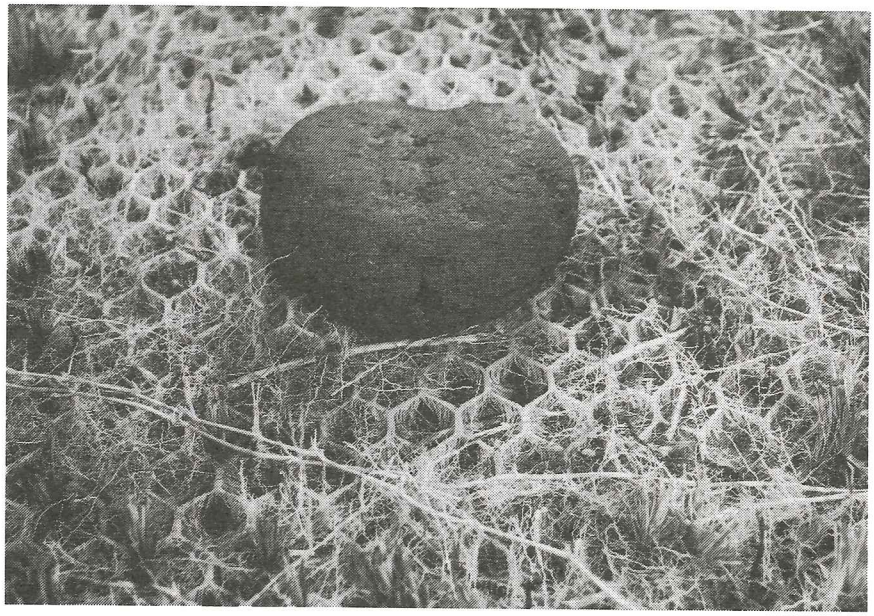


写真－4.10(2)　切断部周辺のシートの固定状況

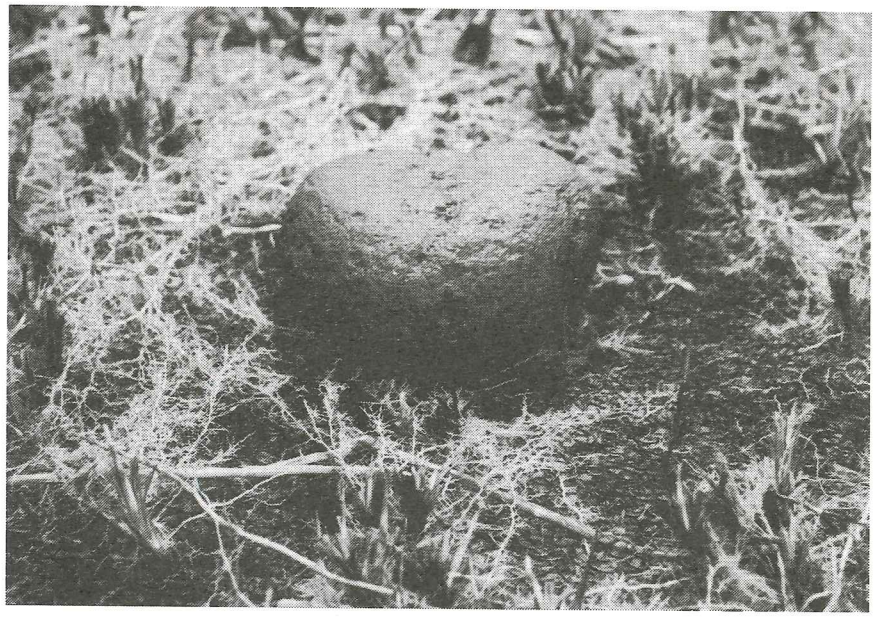
a）Ⅱ－1（B－2－2）



c）Ⅱ－2（C－3－1）



c）Ⅱ－3（A－3－3）

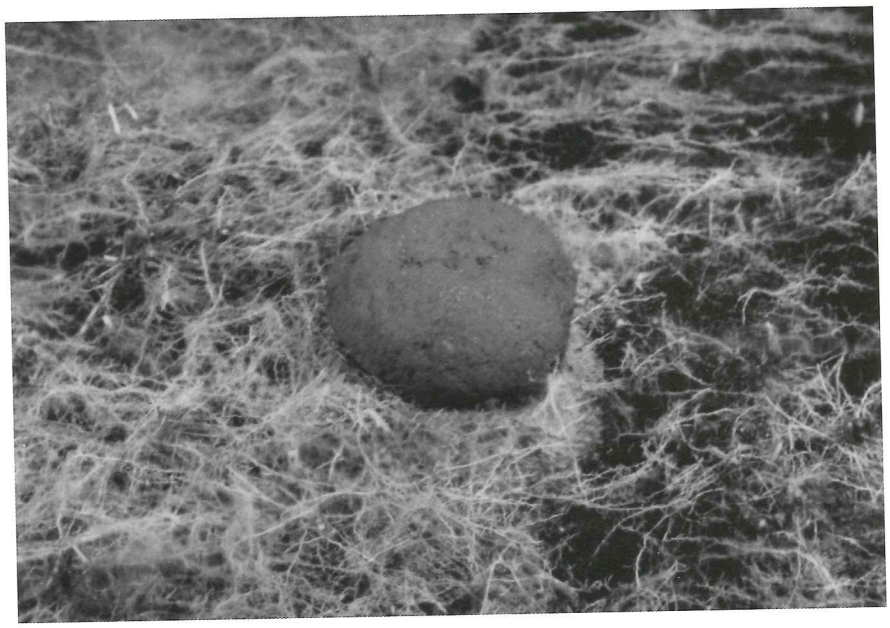


写真－4.11(1)　シート上に設置した礫周辺の侵食状況

d) Ⅱ－4（A－4－6）



e) Ⅱ－5（A－8－2）



f) Ⅱ－6（D－3－2）



写真－4.11(2)　シート上に設置した礫周辺の侵食状況

a）Ⅲ－1（B－2－3）



b）Ⅲ－2（C－3－2）

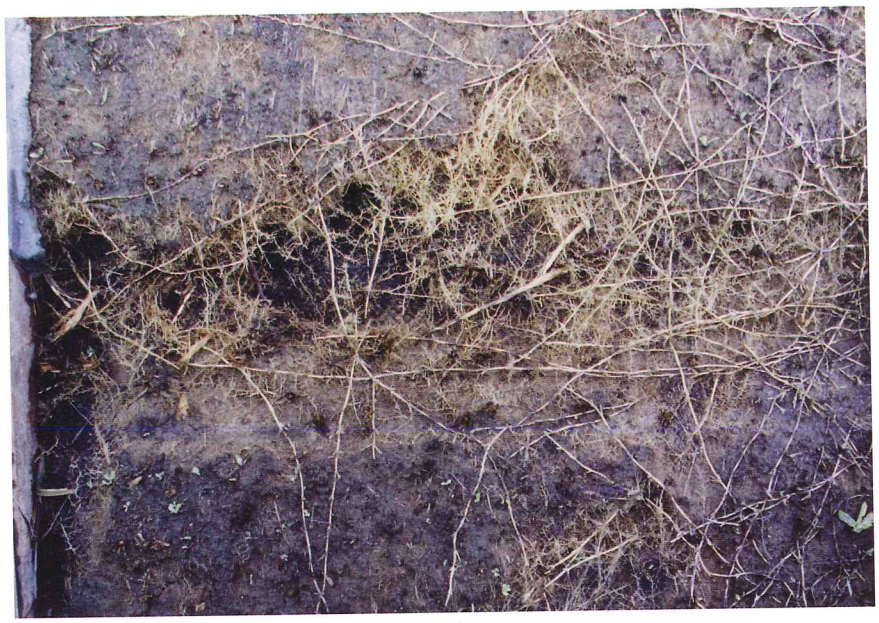


c）Ⅲ－3（A－4－3）



写真－4.12(1)　轍周辺の侵食状況（流向は下→上）

d）Ⅲ－4（A－8－1）



e）Ⅲ－5（D－3－3）



写真－4.12(2)　轍周辺の侵食状況（流向は下→上）

と思われる。ただし，徐々に侵食が進行するので全く安全な状況ではない。

以上より轍の形成に伴ってシートが陥没した箇所では，維持管理によって補修する必要があると考えられる。

4.3.4　まとめ

シートが20cm程度切断したり，シート上に礫が積載される状況でも，植物が繁茂して根茎によってシートが固定されていれば，特に侵食弱点箇所とならないことが分かった。点検においては20cm以上の切断箇所の有無を，特に植物の繁茂密度が小さい場所において調べれば良いであろう。また，轍の形成に伴ってシートが地面に押し込まれたような場所では，ある程度侵食防止効果が発揮されるものの，侵食が大きく進む傾向が見られる。したがって，轍部は点検によって発見し次第，補修する必要があると考えられる。

参考文献

1）建設省四国地方建設局・四国技術事務所：平成4年度河川環境整備に関する調査（河川植生に関する調査），63p.，1992．

2）郡山秀樹・服部　敦・藤田光一ほか：越流を受ける植生のり面の耐侵食性に与える表面凹凸の影響，第51回年次学術講演会概要集，Ⅱ，土木学会，pp.548～549，1996．

第５章　シートへの土砂充填工法の開発と土砂充填が可能なシート諸元

シートに土砂充填を行って，「地面とシートが密着した状態」を作り出すことは，シートの侵食防止機能を発揮させるための必須条件である（詳細については1.4.3参照）。本章では，シートを用いた侵食防止工法の開発を進める上での重要課題の一つである，侵食防止シートへの土砂充填に関する成果をとりまとめる。まず最初に，シート開発上の本質的な課題，すなわち充填性を優先させると“すかすか”なシートがよいが，その反面，侵食防止効果が低下することになるので，すかすかではないシートにいかに効率よく充填するかという課題の解決のために，本研究で開発した高含水比土砂を用いた土砂充填工法の開発経緯を示す(5.1参照)。次に，この工法を用いて完全な充填が可能となるシート諸元(構成材料の直径，空隙率，厚さ)を明らかにする実験とその成果についてまとめて示す(5.2参照)。

5.1　土砂充填工法の開発

シートは，**写真－2.1**に示したように“すかすか”ではあるが，その空隙に土砂を充填するには，特別な工夫が必要であった。本研究で考案した最適な充填工法とは，コンクリートのスランプ試験と全く同様な方法で測定したスランプ値が23～27cmになるように含水比を調整した流動性の高い土砂（以下，高含水比土砂と呼ぶ）をシート上に載せ，その土砂に振動を加えて液状化させ，空隙内に“流し込む”という方式である。本節では，この工法に至るまでに検討した他の工法と，それらと最適な工法との比較結果をまとめて示す。したがって本節の内容は結果的に採用されなかった工法の紹介になるが，今後現地施工の件数が多くなるにつれて充填工法が見直される際の参考資料になると考えている。

5.1.1　充填工法案とそれらの比較

充填工法の開発にあたっては，下記の順にアイデアが出され，それぞれについて実験的な検討が進められた。

１）さらさらの乾燥砂を“流し込む”工法

２）土砂に圧力をかけて“押し込む”工法

３）高含水比土砂を液状化させて“流し込む”工法

４）高含水比土砂をシートに吹き付ける工法

上記の順番にしたがって，以下に説明を加える。

(1)　乾燥砂を流し込む工法

写真－2.1に示した第１次プロトタイプを対象に，乾燥したさらさらの砂を水を注ぐようにシート上に投下して充填を行うことを試みた。その結果，どのシートでも空隙を砂でほぼ完全に満たすことができた。この実験はシートが完全に乾燥している状態で行ったが，現場への適用を考えると，シートの敷設後に地面からの水分の蒸発や降雨などによってシートが水分を含むケースが考えられる。そこで，シート構成材の表面が湿る程度の水分を与えた後に，上記と同様に充填を試みたところ，水分を含んで流動性を失った砂が空隙径の小さい場所を閉塞してしまうため，完全に土砂充填ができなくなった。また，充填に用いる乾燥砂を，砂粒単位まで分離したものから，細粒分が固結した塊を含むものに変更したところ，塊が空隙

を閉塞して充填がうまくできない場合が見られた。以上からこの充填方法では，砂およびシートが完全な乾燥状態であり，かつ塊がない砂を用いなければならないことが分かる。

そのような条件を実際のあらゆる施工現場で満たすことが可能であろうか？広い範囲に敷設し終わった後に湿ったシートを乾燥状態に戻すのが困難であること，またそもそも乾燥砂を大量に入手するのが困難なことなどといった問題がある。これらの問題は，特に施工面積が大きい場合に顕在化すると予想される。したがって，小規模な補修工などを除いて，一般的工法としての実現性は乏しいと思われる。以上の理由によりこの案を却下した。

⑵　土砂を押し込む工法

シートおよび土砂の湿っている状態では，シート上に土砂を単に投下したり，敷き均したりしても，ほとんど充填できなかった。そこで，シート上に土砂を載せた後に，何らかの方法で土砂をシートに押しつけるような力を加えて，土砂を空隙内に押し込めることができないか検討することとした。押し込み法としては，瞬間的に大きな押し込み力が周期的に作用するような方法が良いようであった。つまり一定の力を継続的に作用させる方法では，シートが潰れない範囲の力ではほとんど充填できず，またそれ以上の力を加えると土砂が充填されるはずの空隙自体が潰れてしまい充填できなかったためである。そこで，堤防のり面での施工実現性も考慮して，振動コンパクタによって押し込み力を加えることとした。

a）実験概要

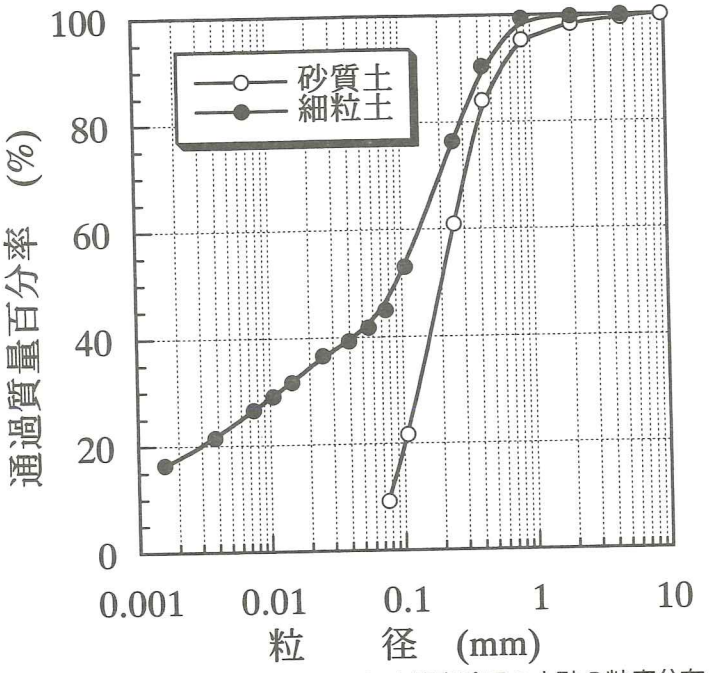
この充填実験には，2タイプのシート構造(**写真－2.1**に示した分類でヘチマ－接着タイプと編み物－ハニカムタイプ）について，それぞれ4種類の空隙率のシートを用いた。それらシートの名称と諸元を**表－5.1**に示す。各シートをコンクリート床上に土を厚さ約30cmで締め固めて作成した実験地盤上に敷いて，その上に振動コンパクタを走行させて充填することとした。コンパクタは，シート上に載せてもその自重でシートが若干圧縮される程度の軽量なタイプ(転圧板の大きさ：36cm ×46cm，重量61kg，振動数5,500VPM，遠心力810kg）を使用した。また土砂には，砂分を主体とする「砂質土」(山砂：江戸崎産)と粘土～シルトを多く含有する「細粒土」（関東ローム）の2種類を用いた（**図－5.1**に粒度分布を示す)。これらの土砂の含水比を**表－5.2**に示す値近傍に調整したものを充填用試料とした。なお，土砂購入時の含水比

表－5.1　シートの名称と諸元(振動コンパクタによる充填実験)

シート名	シートタイプ	構成材直径 (mm)	厚さ (mm)	空隙率 (%)
ヘチマ1	ヘチマ	0.29	30	99
ヘチマ2				98
ヘチマ3				96
ヘチマ4				94
ハニカム1	編み物	0.32		99
ハニカム2				98
ハニカム3				96
ハニカム4				94

表－5.2　充填土砂の含水比(振動コンパクタによる充填実験)

充填土砂の種類	含水比(%)	最適含水比(%)
砂質土	0.0	19.0
	5.0	
	10.0	
	20.0	
	25.0	
	30.0	
細粒土	0.0	37.9
	30.0	
	34.0	
	45.0	
	70.0	



図－5.1　振動コンパクタを用いた充填実験用の土砂の粒度分布

の範囲は，一般的には最適含水比以下と考えて良いようである（それを越えた土砂は流動性があり運搬に適さないため）。

シートの種類，空隙率および土砂の種類，含水率の組み合わせを変えて充填を行い，各組み合わせごとにシート内に充填された土砂の重量を測定した。その実験手順は以下のとおりである。

①実験地盤面を掘り込んで作成した幅30cm，長さ3 m，深さ3 cmの枠（シートがぴったり収まる大きさである）のなかにシートを敷設する。

②上記と同じ諸元を有する別の土砂敷き均し用枠を上記の枠の上に重ね，その中に充填用試料を枠擦り切り一杯になるように敷き均す。

③土砂敷き均し用枠を取り外した後，振動コンパクタをシートの長さ方向に所定の回数だけ往復走行させる。

④シート内に充填されずにシート上に残った土砂を取り除いた後，土砂が充填されたままシートを取り出して重量を測定する。

⑤重量測定後，また枠内にシートを戻して，②～④を繰り返す。繰り返すたびに土砂が充填されて重量が大きくなるが，その増加量は徐々に小さくなる。１回の繰り返しでの重量の増加が300g以下となったら，その実験を終了する。

⑥実験終了後，充填された土砂の含水比を測定する。また，④で測定した重量からシートの自重および含水比から求められる水の重量を差し引くことによって，「充填土砂重量」(絶乾状態の土砂の重量)を求める。

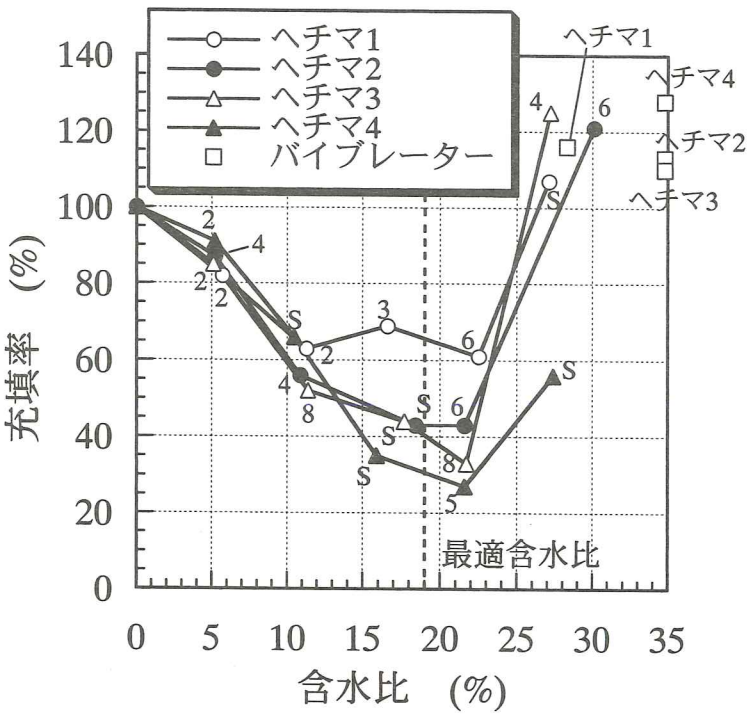
なお，振動コンパクタは通常，作業員１人が軽く押すと自走するが，今回の実験では自走しない場合があった。その場合には振動コンパクタに紐をくくりつけて，それをさらにもう一人の作業員が引っ張って走行させた。それでも動かないときは，コンパクタを移動させずに１分間振動を加えた後，振動板の幅だけずらし，また同様に振動を加えることをシート全長にわたって繰り返すこととした。振動を加える方法が場合によって異なるが，上記の実験手順⑤で最後に測定した充填土砂重量は「振動コンパクタによって充填しうる最大値（以下，最大充填土砂重量と呼ぶ)」という意味では同一であり，相互比較が可能であろう。

b）実験結果

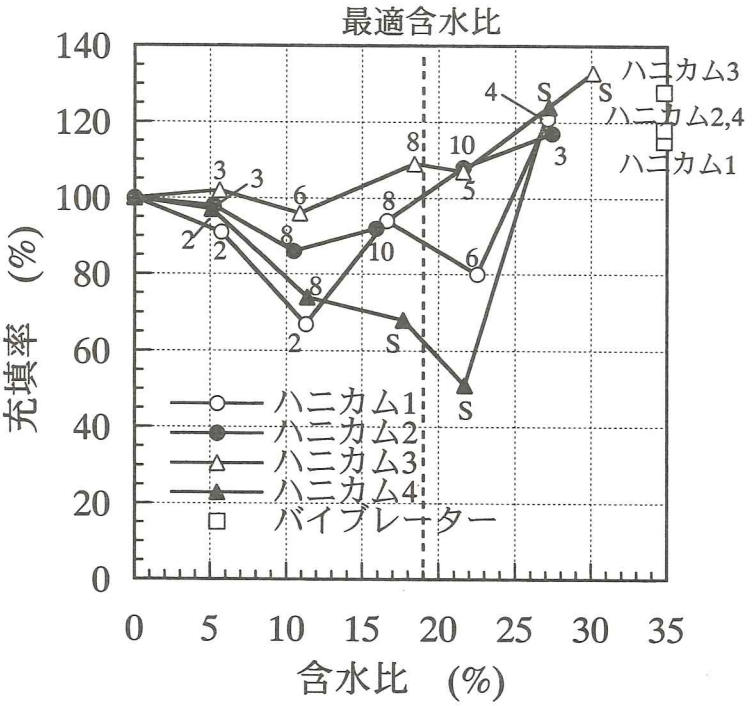
含水比０％では，(1)に示した乾燥砂の充填と同じく，シート上に投下するだけで完全な充填が可能であった。この場合には，空隙内に充填された土砂はほとんど締め固められていないルーズな状態であるので，この場合の充填土砂重量は完全充填に必要な最小重量とほぼ一致すると考えられる。そこで以下では

各ケースの充填土砂重量を含水比０％での充填土砂重量に対する重量比，すなわち充填率(%)として表すことにする。充填率が100%以上であれば完全に充填された状態であると判断できる。

まず，砂質土の場合の最大充填土砂重量の測定結果を充填率と含水比の関係として整理した結果を，シート構造のタイプ別（ヘチマとハニカムタイプ：表−5.1参照）に図−5.2に示す。なお，各プロットに添えられている数字は振動コンパクタの総往復回数，Sはコンパクタの移動ができない場合の充填法で充填したことを表す。カールした繊維がランダムに接合した構造を有するヘチマタイプのシートの結果を見ると，最適含水比以下では乾燥砂（含水比０％）の場合を除いて充填率が100%以下であり，完全には充填が行えない。また，含水比が増加して最適含水比に近くなるほど充填率が小さくなる傾向が見られる。この原因は，砂粒同士が水の表面張力で付着して塊状になっており（含水比10%以上で顕著となる），それをコンパクタが加える振動力でシートに押しつけて崩しながら充填する状況となっているが，充填された砂がシート表面付近にとどまったまま締め固められて空隙を塞いでしまうため，それより下への充填ができなくなるからである。それに対して，



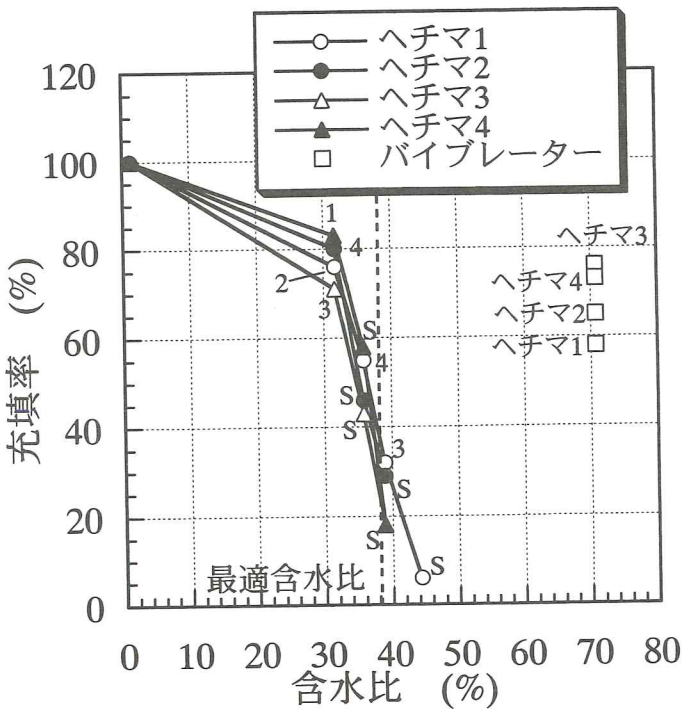
図−5.2ａ） 充填率と含水比の関係(ヘチマタイプ：砂質土)



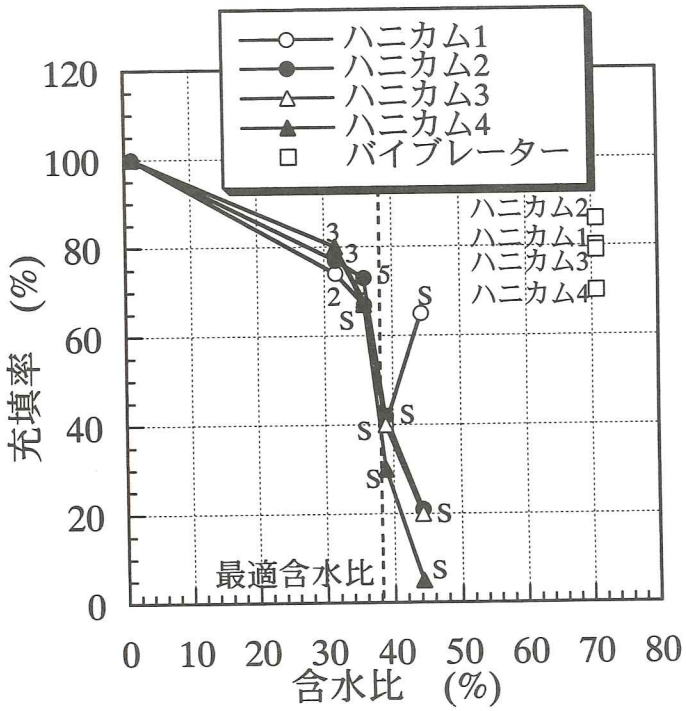
図−5.2ｂ） 充填率と含水比の関係(ハニカムタイプ：砂質土)

最適含水比以上では，急激に充填率が大きくなり空隙率が大きい(つまりよりすかすかな)シートでは完全に充填が行えるようになった。これは，コンパクタによって砂に振動を加えると液状化が生じ，流動性を持った土砂がシート内に流れ込むように充填されていく状況となったためである。

次に，ハニカムタイプの結果を見ると，ヘチマタイプに比較して全般的に充填率が大きく，特に空隙率96%(ハニカム３)では全ての含水比で完全に充填できた。ハニカムタイプのシートはシート表面に六角形に開口した空隙を有する構造をしており，この開口部がヘチマタイプのシートに比較して大きいため充填



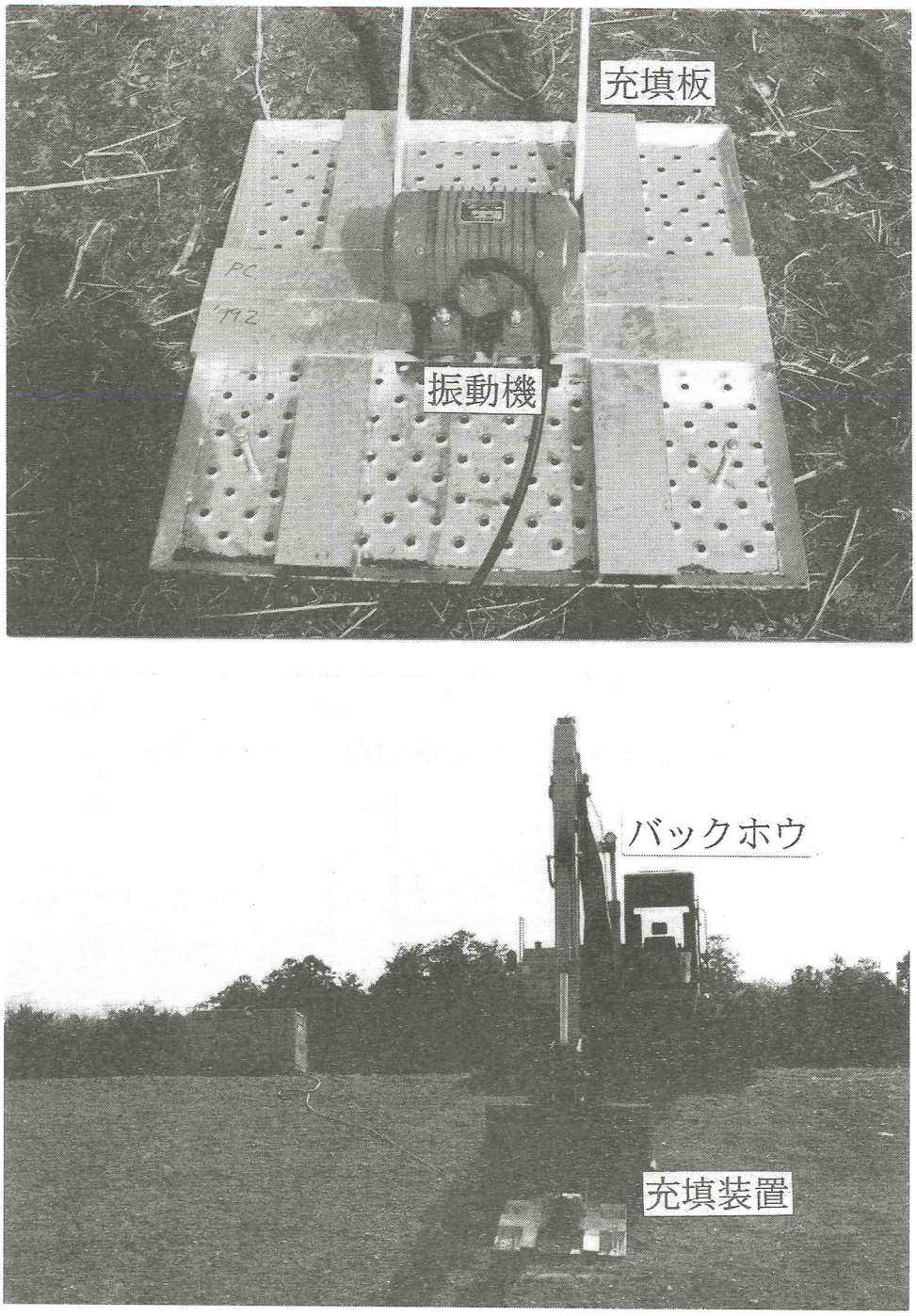
図－5.3a） 充填率と含水比の関係(ヘチマタイプ：細粒土)



図－5.3b） 充填率と含水比の関係(ハニカムタイプ：細粒土)

率が大きくなったと考えられる。また，空隙率96%のシートの充填率が特に大きいのは，充填性に及ぼすシートの空隙の大きさと圧縮強度の兼ね合いとして以下のように説明できる。空隙が大きいほど充填性は高くなることについては，上記したとおりである。また，圧縮強度の小さいシートは，振動コンパクタによって土砂を圧入しようとすると，充填されるはずの空隙が潰れてしまい，土砂が空隙に充填しにくくなる。つまり，充填性の高いシートとなる条件は，空隙径と圧縮強度がいずれも大きいことである。しかし，シートの構造上の特徴として，空隙率が小さくなる（つまり単位体積あたりに含まれる構成材の量が多くなる）ほど，空隙径は小さくなるがそれに反して圧縮強度が大きくなる，つまり上記の条件を同時に満たすのが難しいことが挙げられる。そのため，充填性が最も良好になる空隙の大きさと圧縮強度の組み合わせがあり，それがハニカムタイプのシートの場合，空隙率96%であったと考えられる。

細粒土の場合の充填率と含水比の関係を図－5.2と同様にまとめた結果を図－5.3に示す。両タイプのシートとも最適含水比以下では砂質土に比較して充填率がかなり低下している。これは，細粒土に含まれる粘土・シルトが水を含むことによって強い粘着力を発揮するためである。また，最適含水比以上では，振動コンパクタが自走できない場合が多いが，これは粘着性を持った細粒土が振動面にこびりついてしまうためである。含水比を70%程度にした場合には，粘着力が弱まりドロドロとした流動性を示すようになったが，コンパクタを走行させることは不可能であった。この場合，何らかの方法で土砂に振動が加えられれば，砂質土と同様に液状化して，シート内に充填できる可能性が考えられたので，振動コンパクタに換わってハンドバイブレーター(コンクリート型枠を振動させるハンディータイプのバイブレーター)を用いて振動を加えて



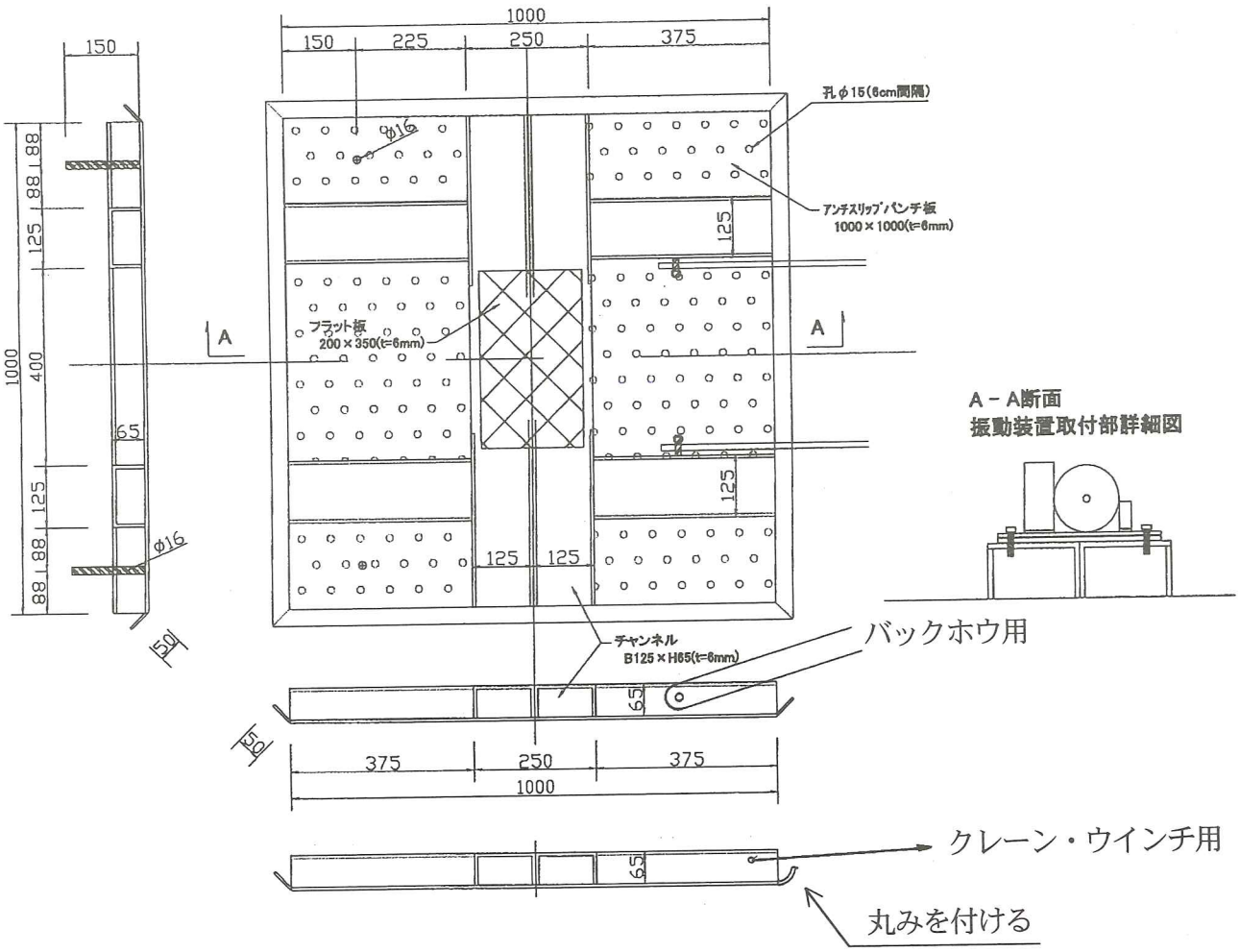
写真－5.1　土砂充填用振動板

充填した結果を図－5.3に併記した。完全に液状化させるのに十分な振動を加えることができなかったため，完全には充填できなかったが，振動コンパクタの場合より良好に充填できることが分かる。

以上の実験結果から，現場で通常得られる含水比(最適含水比以下)の土砂を振動コンパクタを用いて充填する工法は，高い充填性を有する特殊な条件を有するシート(例えばCタイプの空隙率96%)に砂質土のような粘着性の小さい土砂を充填するようなごく限られた場合を除いて適用が困難であり，すなわち一般的な充填法として用いるのは不十分と判断される。

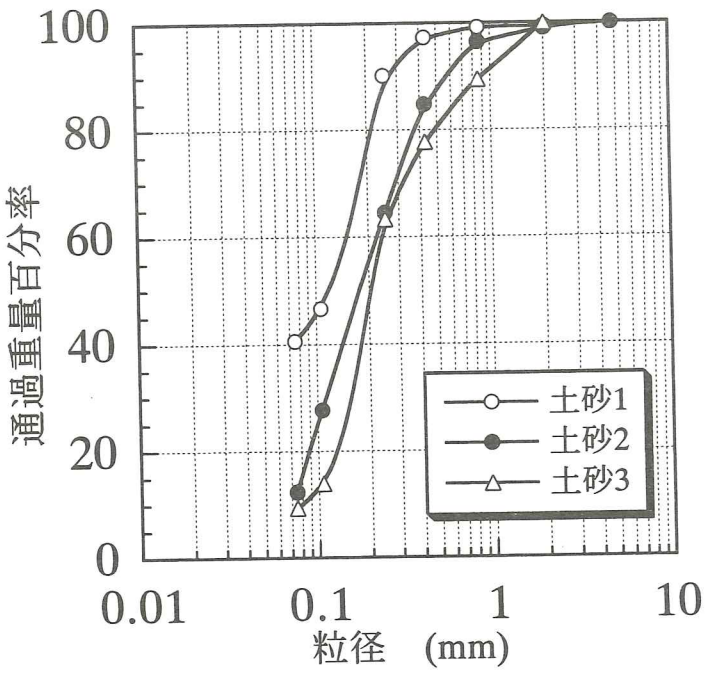
⑶　高含水比土砂を液状化させて流し込む工法[注1)]

振動コンパクタの実験結果に見られたように，あらゆるタイプのシート，土砂に対しても良好に充填で



図－5.4　土砂充填用振動板の諸元

きたのは，最適含水比以上という高含水比の土砂が振動を加えたことによって液状化し，それがシートに流れ込むようになった場合である。「流し込む」ように充填することを狙った場合，振動コンパクタ不適であった。なぜならばコンパクタ走行が困難であったこと，加振時にコンパクタの自重および強い振動力でシートが圧縮されてしまうためである。これらの問題がない加振装置として，写真－5.1および図－5.4に示す振動装置を開発した。一辺が１mのパンチ穴がある金属板の中央に市販されているコンクリート型枠用の振動装置をビス止めした単純な構造のもので，総重量は約1.8KNである。この振動装置は，(自重)÷



図－5.5　振動装置を用いた充填実験用の土砂の粒度分布

（振動板の面積）として求められる圧縮強度が⑵に示した振動コンパクタの約1/2である。また，振動コンパクタのように振動板が強い力で上下動するのではなく，金属板が小さな振幅で細かく振動する。そのため，シートの圧縮変形を小さくすることができた。また，振動装置はバックホウのバケット部に接合してつり下げるようにして移動するので，高含水比土砂を敷き均したシート上での走行も容易にできる。なお，のり面天端に設置したウィンチによって引き上げるようにして移動することも可能である。

この装置を用いた土砂充填を行うのに最適な含水状態を明らかにすることを目的とした実験を行った。実験に用いた土砂は，図－5.5に示す粒度分布を有する3種類である。バケツ内である含水比に調整した土砂（約20ℓ）をのり勾配1：2ののり面上に敷設したシート上に投下する。その次に，振動装置で約10秒間振動を加えた後に，充填状況を観察した。なお，実験に使用したシートタイプはB－2－2である（諸元は表－2.3参照）。

a）スランプ値による最適含水状態の指標化

充填用土砂に求められる条件は以下の2点である

1）加振すると液状化してシート内へ充填できること。

2）シート上にシート厚さとほぼ同じ厚さ，つまり単位面積あたりのシートの全空隙を土砂で満杯にするのに必要な土砂量を盛り土できること。

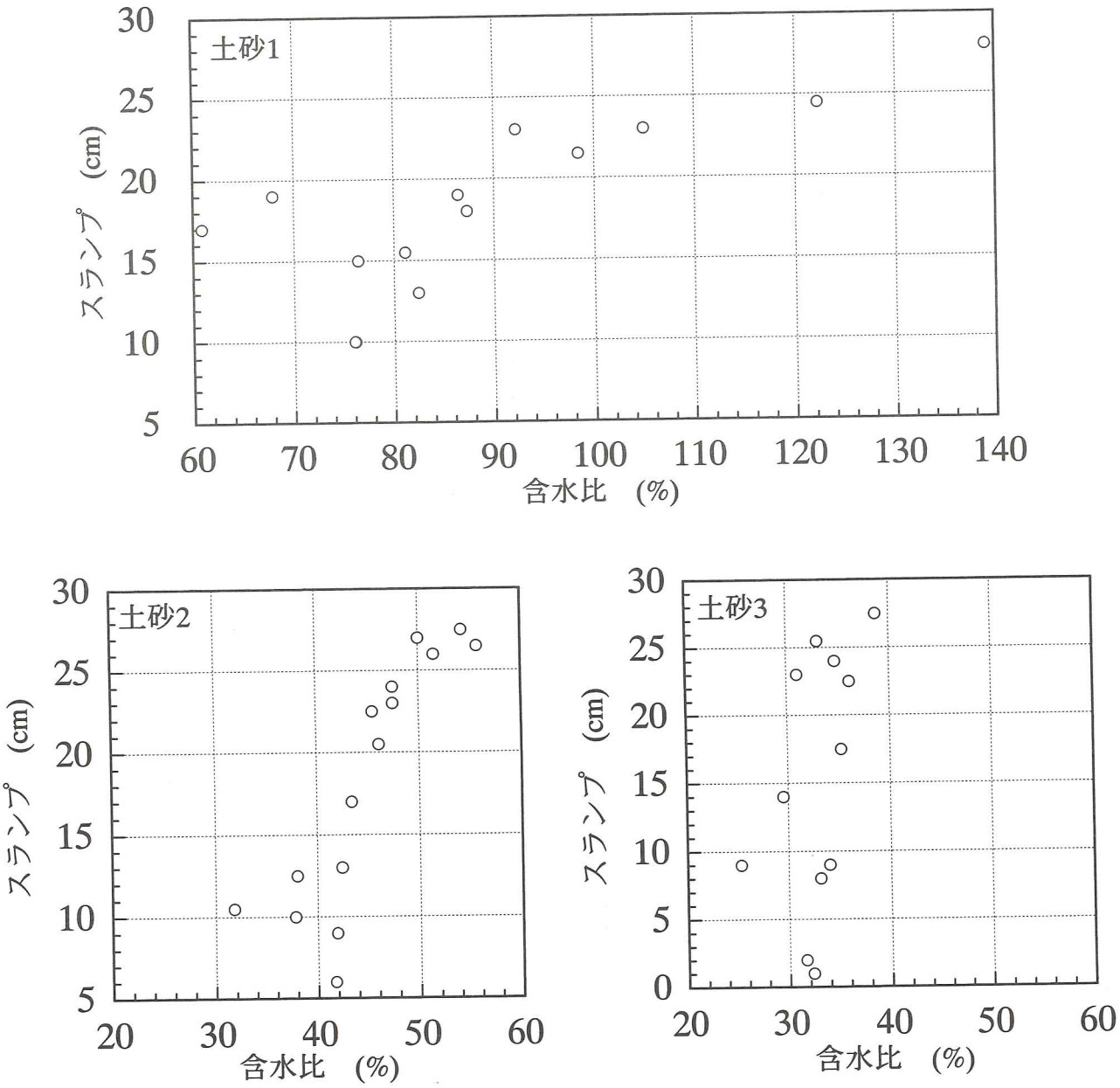
シート内に土砂を流し込むことを優先すれば，含水比を非常に大きくすればよい。しかし，土砂の含水比を増加させていくと，塑性から液性状態に変化して流動性を増すことは一般に良く知られている。あまりにも過度に含水比を大きくした高含水比土砂は，2)に示した目標厚さまで盛ろうとしても，流動性が非常に高いために薄く広がり，厚さが確保できない。このような高含水比土砂は，シートの空隙を満杯にするのに必要な土砂量を1回でシート上に盛れないため必然的に複数回の充填作業を行うこととなり，充填作業の非効率化をまねくので使用を避けなければならない。

以上の条件を満たす高含水比土砂の含水状態を指標化するにあたって，コンクリートの分野で一般的に用いられているスランプ試験を用いることとした。スランプ値SL（スランプコーンによって整形した高さ30cmの土砂が自重によって変形して高さを減じた量）はその試験状況から考えて，条件2）の「シート上に投下した土砂がシートと同じ程度の厚さ3～5cmになること」を表す指標として適切と考えたからである。実験に用いた3種類の土砂について含水比とスランプ値の関係を測定した結果を図－5.6に示す。粘土・シルトの含有率が小さい土砂2，3は，含水比の10%程度の変化でスランプ値が急激に小さくなる。それに対して含有率の大きな土砂1は，粘土・シルトが粘着力を発揮するため，穏やかに減少する傾向が見られる。

b）充填に最適なスランプ値の範囲

⑵に示した振動コンパクタによる充填実験で，粘土・シルトの含有率が大きい土砂では，液状化が生じても充填率が100%に満たない（つまり完全に充填できない）場合があった。そこで，粘土・シルトの含有率が最も大きい土砂1をもちいて充填が完全に行えるスランプ値SLを調べた。その結果，SL<24cmでは完全に充填するのが困難であり，SL＝24cm（含水比100%）程度で充填できる状態となった。粘土・シルト含有率が小さい土砂2，3についても，SL＝24cm（含水比35～45%）程度で十分に充填することができた。

条件2）については，スランプ値を段階的に変化させた土砂をシート上に投下して，その盛り土の高さ，



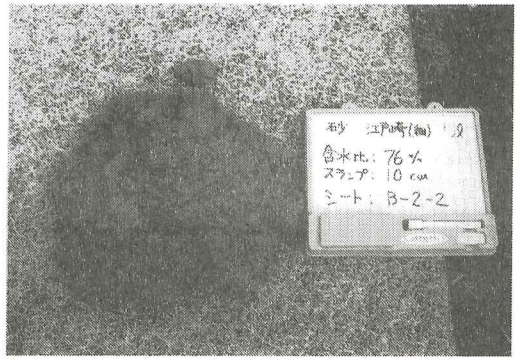
図－5.6　含水比とスランプ値の関係

広がりについて観察した。なお，この実験は堤防のり面での施工を想定して，約 2 割勾配の斜面上で実施した。観察時に見られた高含水比土砂の盛土状況を土砂の種類ごとに写真－5.2～5.4に示す。どの土砂も SL＝23cm 程度からのり尻に向かって流れ落ちる様子が見られるようになる。また SL＝27cm を越すとその傾向が更に強まり投下した地点より，流下した先端近くの場所で盛土高さが最大になる場合も見られるようになった。また，広い範囲に広がるようになったので，盛土高さが 3 cmを下回る場合が多くなった。これらの実験から，条件 2)の観点からは SL＝27cm 以下にすべきであることが分かった。

以上より，最適な土砂充填が行える高含水比土砂のスランプ値の目安は，24～27cm と判断される。

⑷　高含水比土砂をシートに吹き付ける工法

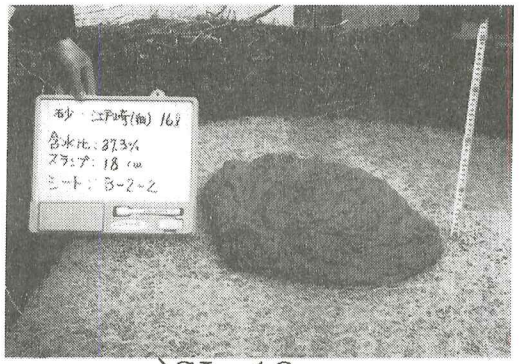
高含水比土砂を加振して液状化する工法によって，土砂やシートの種類によらず良好な充填ができるようになった。ここでは，この工法をさらに改良を試みたが十分な成果が得られず，現時点でなお開発途上



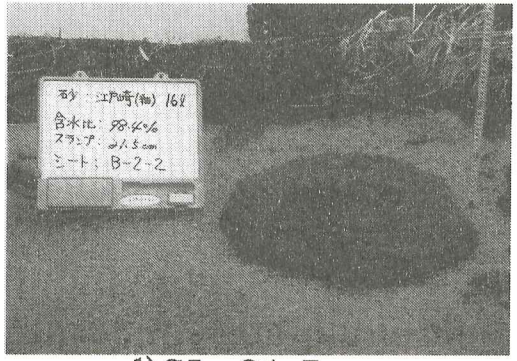
a)SL=10 c m



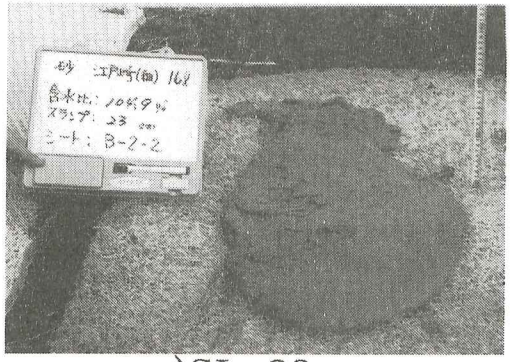
b)SL=13 c m



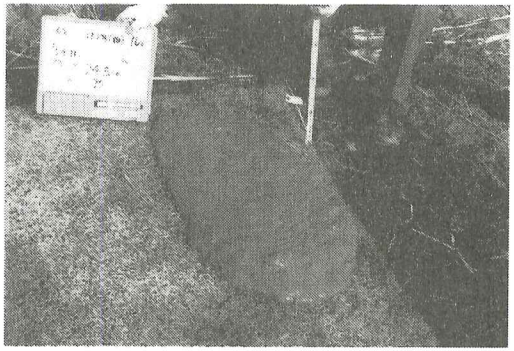
c)SL=18 c m



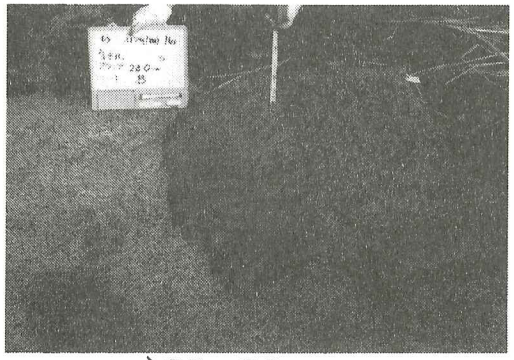
d)SL=21.5 c m



e)SL=23 c m

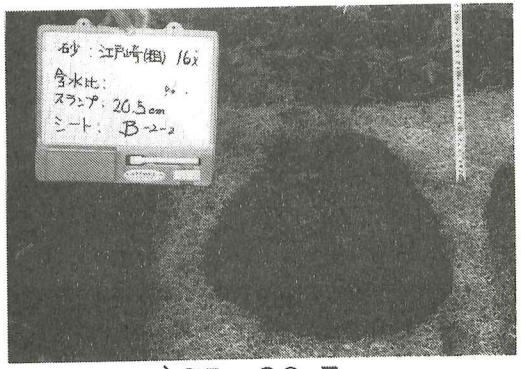


f)SL=24.5 c m

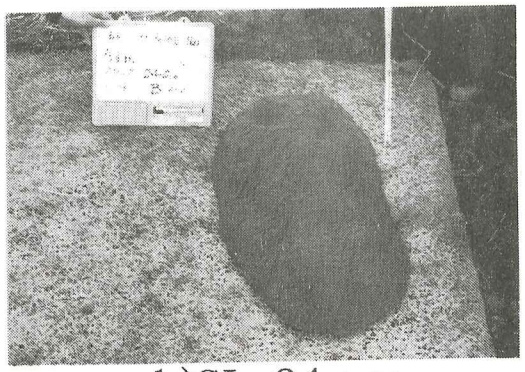


g)SL=28 c m

写真－5.2　シート上に投下した土砂の様子(土砂1)



a)SL=20.5 c m



b)SL=24 c m

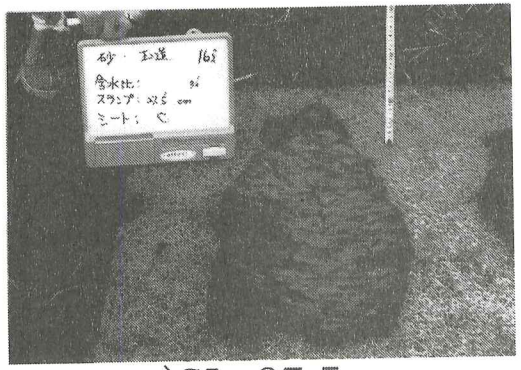


c)SL=26.5 c m

写真－5.3　シート上に投下した土砂の様子(土砂2)



c)SL=24 c m



c)SL=27.5 c m

写真－5.4　シート上に投下した土砂の様子(土砂3)

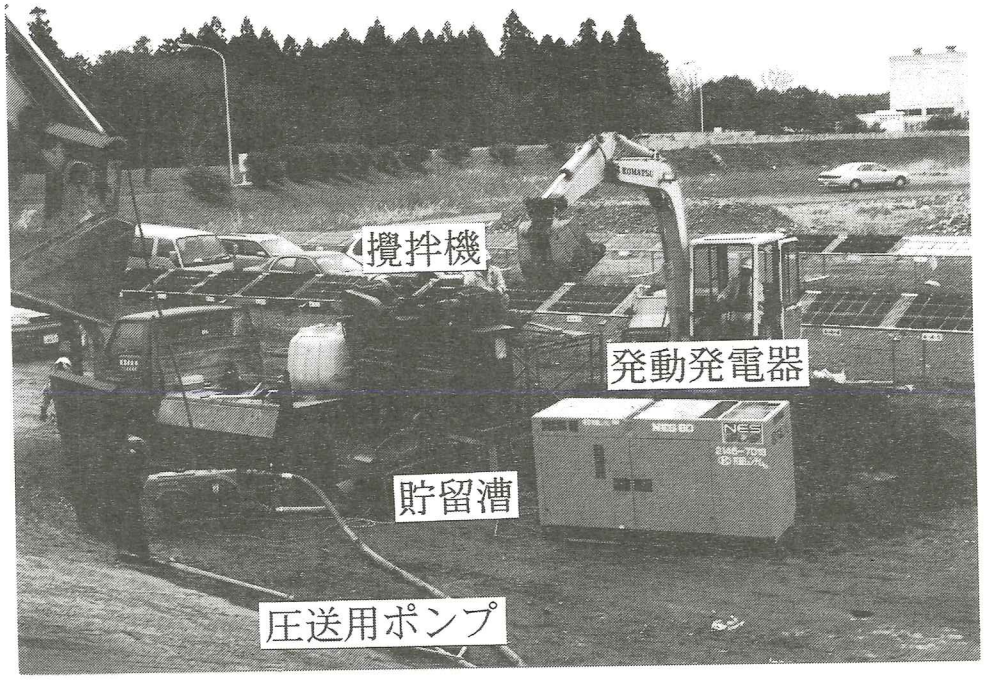


写真－5.5　高含水比土砂の吹き付けに用いた機械の外観

にある標記の充填法についてまとめて示す。この工法のアイデアは，⑶に示した実験で高含水比土砂を投下した際に，空隙径の大きいシートではそれだけである程度充填できたことから得られた。つまり，高含水比土砂をシートにより強くたたきつけられれば，それだけであらゆるシートに充填できる可能性があると考えた。そこで，コンクリート吹き付け機として既に広く使用されている**写真－5.5**に示す吹き付け機を用いて，高含水比土砂をシートに吹き付ける実験を行った。この吹き付け機の特徴は，タンク内に撹拌機があり高含水比土砂が水と土砂に分離しないように撹拌することができ，その撹拌を行いながらタンク内に圧搾空気を送り込んで，タンクから吐出口であるパイプへ高流速の気流とともに高含水比土砂を排出し，吹き付けられることである。このような吹き付け機で試したところ，SL＝23～27cm の高含水比土砂を排出するのがうまくいかず，ごく短時間しか吹きつけが行えなかった。多くの場合，土砂がパイプに詰まる(特にシルト・粘土を多く含有し粘着力の大きい土砂１)というトラブルが頻発して，実用的でないことが分かった。しかし，まれに吹き付けられた場合で充填状況を見ると，比較的良好に充填できており，⑶に示した振動装置で振動を加えれば完全に充填できた。

上記のトラブルを解消するためにスランプ値がより小さい(つまり含水比が小さい)土砂を吹き付けることを試みた。土砂２についてSL＝17～20cm で実験を行ったところ，土砂がパイプに詰まるトラブルは減少したものの，全てのシートタイプに対して吹き付けのみでは完全に充填できなかった。さらに吹き付けた土砂がシート表面で固結化してシートの空隙を覆い隠してしまったため，充填が不十分な箇所への追加的な充填が行えなくなった。したがって，⑶に示した最適値より小さいスランプ値の土砂を吹き付けるのは，吹き付けのみで完全に充填できる場合を除いて行うべきではない。

上記したトラブルがなくSL＝23～27cm の高含水比土砂を吹き付けられる機械[注2)]があれば，吹き付けによる充填を行っても良い。しかし，完全に充填できるか事前に確認して，できない場合には⑶に示した振動装置を併用する必要がある。



写真－5.6　攪拌機と圧送ポンプ

5.1.2　開発した充填工法のまとめ

以上の実験結果に基づいて，本研究では以下の充填工法を提案した。なお施工法の詳細については**巻末資料１**を参照されたい。

⑴　充填用の土砂

充填用の土砂としては，植物の根茎発達を阻害しない性質のものを用いる必要がある。この観点からも，また充填しやすさの観点からも空隙径より粒径が大きい礫は不適であり，礫が混入しない砂質土（細粒分の含有率15～50%）が最適である。山砂では細粒分（粒径0.075mm 以下）が大きな塊となっている場合があり，これも礫と同じ理由で好ましくない。礫や細粒分の塊は充填に先立って除去しておく必要がある。塊状でなくても細粒分を非常に多く含む砂質土については，上記のスランプ値にするためにより多くの水を必要とすること，さらに充填終了後，水分が乾燥すると収縮ひび割れなどが発生し，シートと地面の間に隙間が生じやすくなることから，充填用の土砂として好ましくない。含水比が60%以下でスランプ値が23～27cm に達する土砂であれば，上記の問題が生じないことを実験において確認している。これ以上の含水比とする必要がある土砂を用いる場合には，試験施工を行って上記の問題が生じないことを確認する必要がある。

⑵　土砂充填に用いる機器と施工法

シート内への土砂充填工法は，高含水比土砂の配合，運搬，充填の３工程からなる。以下では，この工程を１）配合・運搬と２）充填に分けて，各工程で使用する機器と施工法について説明する。なお，土砂充填に用いる施工機器は，高含水比土砂の充填板（**図－5.4**参照）を除いてすべて既往の機器を活用した。

a）配合・運搬工

写真－5.6に高含水比土砂の配合･運搬に用いた機器を示す。いずれの機器もコンクリート用のものであり，配合には２槽式の攪拌機，運搬には高粘性用のグラウトポンプを利用した。これらの機器を用いた工

程は以下のとおりである。

1）撹拌機内に，スランプ値が23～27cmになるように土砂と水を供給し，次に撹拌して高含水比土砂とする。

2）高含水比土砂を撹拌槽に設けられた流出口からグラウトポンプの貯留槽に流し込む。

3）グラウトポンプにより貯留槽からシート上に高含水比土砂を圧送する。圧送管の出口を作業員が持ち歩いて，シート上にまんべんなく積載する。

b）充填工

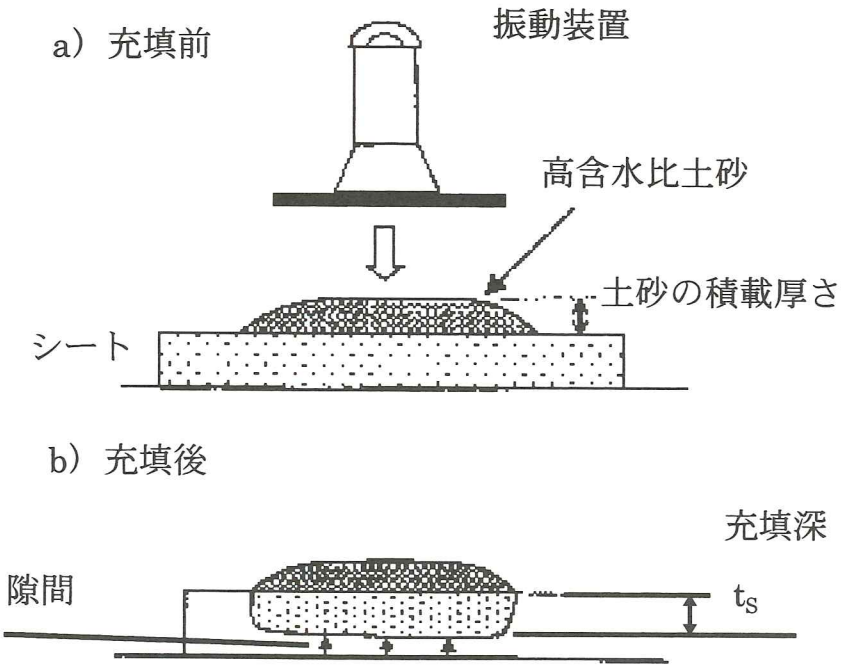
上記工程が終了した後，高含水比土砂に振動を加えるが，その作業に用いる充填装置を**図－5.4**および**写真－5.1**に示した（詳細については5.1.1(3)参照）。この装置を**写真－5.1**に示すようにバックホウに取り付け，振動機を作動させながら充填板をシート面から離れないように（つまり，**写真－5.1**に示した状態を保ちながら）斜面下部から持ち上げていく。充填終了後，充填されずにシート上に残った高含水比土砂を敷き均してシートを覆い隠し（目安として厚さ１～３cm程度），張りシバなど適当な方法で草本植物を繁茂させれば完成である。

5.2　土砂充填が可能なシート諸元

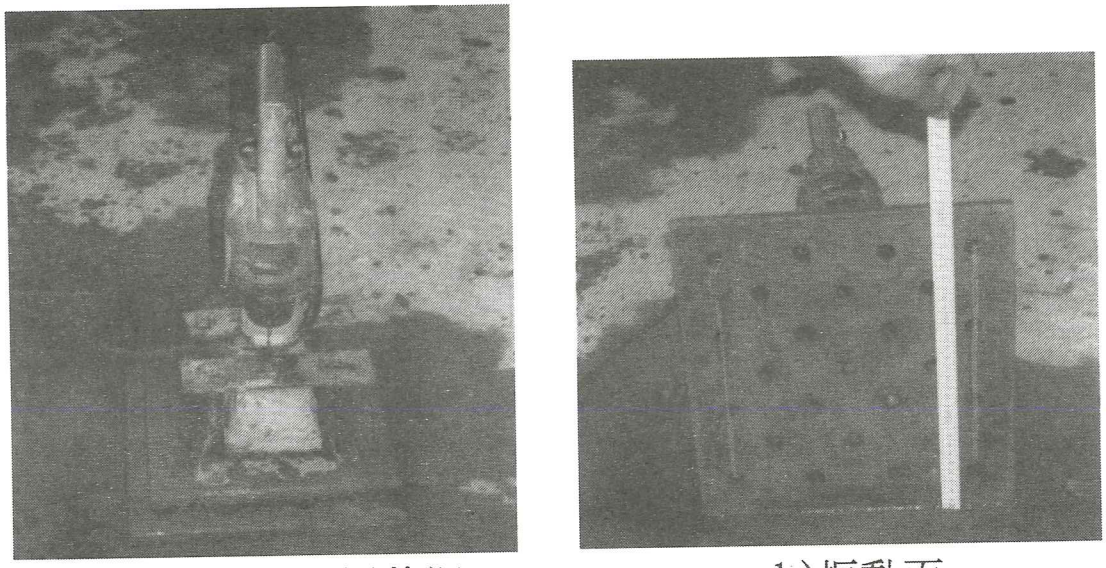
液状化した高含水比土砂を“流し込む”ように充填を行う際には，当然ながら流速低減効果の大きい（つまり空隙径が小さい）シートほど流し込みにくくなる。本節では，土砂充填が完全に行えるシート諸元設定法を提案する。この設定法と，所定の侵食防止効果を得るためのシート諸元設定法（第３章参照）を活用すれば土砂充填性と侵食防止効果を兼ね備えるシートの設計が可能となる。

5.2.1　土砂充填性実験の概要

液状化した高含水比土砂を“流し込む”と，**図－5.7**に模式的に示すようにシート表面から深さt_sまでは完



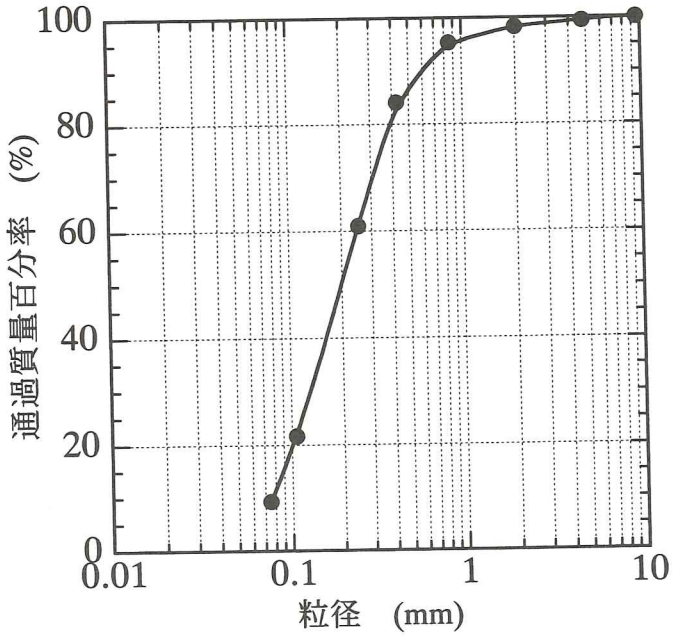
図－5.7　シートの土砂充填深さt_sの測定実験



a)加振時の設置状況　　b)振動面

写真－5.7　小型簡易充填試験器

全に充填されるが，それより下側では土砂充填されない“隙間”が生じることがわかった。t_sは，流速低減効果が大きいシートほど小さくなる傾向がみられた。この原因は，鉛直方向に連続した空隙からなる流路に液状化した高含水比土砂が流れ込む際に，空隙径(つまり流路の径)が小さいほど流動を阻害する抵抗が大きくなるためと考えられる。この傾向を定量的に評価できるようにすることを目的として，5.1.2に示した充填工法と同様な方法で土砂充填実験を行った。ただし，室内の小規模実験としたため，**写真－5.1**に示した充填装置を小型化した振動装置（**写真－5.7**参照）を用いた。この振動装置は，振動板の単位面積あたり重量が**写真－5.1**に示した充填装置（約1.8kN/m^2）と同一である。スランプ値25cmの高含水比土砂をシート厚さtと同じ厚さでシート上に載せ，これに振動装置により約5秒振動を加えた後（実際の充填施工とほぼ同じ秒数），充填深t_{s1}を測定した。この充填作業を続けて2回行った際の充填深をt_{s2}とする。なお，充填用の土砂としては**図－5.8**に示す粒度分布を有する江戸崎山砂を用いた。実験結果を**表－5.3**にまとめて示す。



図－5.8　土砂充填深さt_sの測定実験に用いた砂の粒度分布

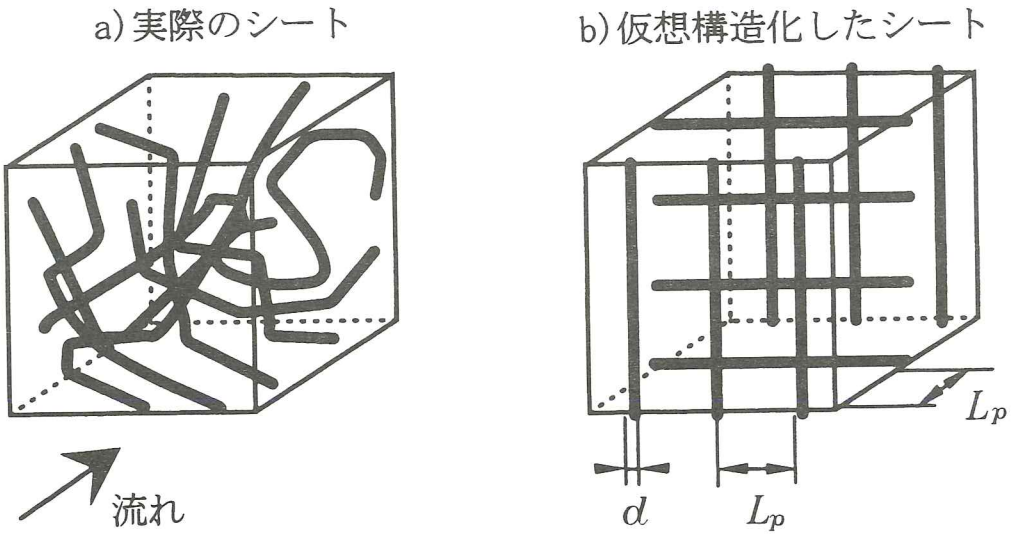
5.2.2　代表空隙径と充填深の関係

液状化した高含水比土砂は，シートの構成材に囲まれてできた隙間を流路として鉛直下方に向かって流下していく。しかし，流下を妨げる要因として構成材の抵抗があり，この抵抗が大きいと**図－5.7**に示したようにシート下面まで土砂が流下できない，すなわち充填深t_sが小さくなると解釈することができる。

表－5.3　振動装置を用いた土砂充填実験の結果

タイプ		プロトタイプの世代	シート名	代表空隙径	圧縮沈下量	圧縮変形率	充填深　t_s (mm)				
大区分	小区分			L_p (mm)	(mm)	(%)	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目
ヘチマタイプ	熔着	第一次	A-1-1	4.78	0.0	0.0	60.0				
			A-1-2	4.72	0.0	0.0	22.6	45.2	56.5		
			A-1-3	3.76	0.0	0.0	24.8	37.2	49.6	62.0	
			A-1-4	3.01	0.0	0.0	20.8	33.7	46.6	59.5	64.5
			A-2-1	2.69	7.0	23.6	22.3	25.6	30.6		
			A-2-2	2.66	8.0	27.2	16.8	18.4	20.1	20.1	30.1
			A-2-3	2.52	2.0	6.2	9.6	16.3	16.3	18.0	31.3
			A-2-4	2.14	0.5	1.5	7.3	9.0	12.3	12.3	12.3
			A-3-1	4.05	5.0	28.2	18.6	33.6	53.6	0.0	
			A-3-2	3.75	3.5	15.3	23.8	28.8	33.8	48.8	
			A-3-3	2.80	3.0	13.6	26.6	36.6	51.6		
			A-3-4	2.51	0.0	0.0	24.6	24.6	28.6	28.6	
			A-6-1	5.35	1.0	3.7	43.4	58.4	58.4		
			A-6-2	5.24	0.0	0.0	49.3	57.6			
			A-6-3	3.22	0.0	0.0	29.1	35.8	39.1	40.8	54.8
			A-6-4	2.72	0.0	0.0	18.0	26.3			
			A-7-1	7.54	0.0	0.0	48.2				
			A-7-2	7.09	0.0	0.0	50.8				
			A-7-3	4.97	0.0	0.0	50.4	55.4			
			A-7-4	4.02	0.0	0.0	31.8	43.1	49.8	54.8	
			A-9-1	5.32	1.0	3.2	70.6				
			A-9-2	4.75	2.0	6.2	73.2				
			A-9-3	4.58	0.0	0.0	63.4	73.4			
			A-9-4	3.58	0.0	0.0	44.4	64.4	74.4		
	接着		B-1-1	1.79	19.0	53.1	20.8	35.8			
			B-1-2	1.69	16.0	35.7	11.5	18.1	21.5	28.1	
			B-1-3	1.27	9.0	32.7	4.2	7.5	9.2	10.8	
			B-1-4	0.98	11.5	29.4	4.1	4.1	19.1	19.1	
			B-2-1	3.68	8.5	23.5	54.1	72.4			
			B-2-2	3.28	10.0	28.7	51.3	59.6	69.6		
			B-2-3	2.60	13.0	36.3	24.1	30.8	35.8		
			B-2-4	2.12	19.0	47.6	11.6	23.2	24.9	39.9	
			B-3-1	4.80	5.5	19.9	35.2	50.2	55.2		
			B-3-2	3.79	4.5	11.9	48.7	67.1	75.4		
			B-3-3	3.20	5.0	11.3	50.3	55.3	58.6	68.6	76.9
	熔着	第二次	A-1（B）	3.50	1.0	3.3	47.7	56.0			
			A-1(B改)	2.53	1.0	5.7	24.0	39.7	48.0		
			A-1（A）	2.80	3.5	10.4	44.3	56.0			
			A-1(特A-2)	2.50	2.0	5.9	28.0	41.7	45.0	51.0	56.0
			A-1(特A-3)	2.60	1.0	2.7	28.0	40.0	41.7	45.0	56.0
			A-2（改）	1.83	5.0	32.3	5.0	8.3	10.0	15.0	15.0
			A-3-5	2.26	0.5	2.0	15.0	25.0			
			A-3-8	3.39	0.0	0.0	33.3	35.0	41.7	45.0	50.0
			A-6	3.24	2.5	10.2	36.9	39.5	47.2	52.2	55.5
	接着		B-A1	2.61	10.0	39.4	12.7	21.0			
			B-A2	3.36	7.0	23.6	21.7	30.0			
			B-B	1.88	10.0	55.2	12.7	17.7	21.0		
	熔着	第三次	A-1-F	3.64	0.0	0.0	53.0				
			A-2-F	3.96	0.0	0.0	26.0	29.0	35.0	37.7	45.7
			A-3-F	2.47	1.0	3.7	26.0	29.0	31.0	33.3	36.0
	接着		B-F	3.76	5.0	12.9	36.3	50.0	55.7	60.0	

タイプ		プロトタイプの世代	シート名	代表空隙径	圧縮沈下量	圧縮変形率	充填深　t_s (mm)				
大区分	小区分			L_p (mm)	(mm)	(%)	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目
ネットタイプ	織り曲げ	第一次	A-4-1	4.36	0.0	0.0	14.7	24.7			
			A-4-2	3.86	0.0	0.0	11.3	21.3	28.0		
			A-4-3	3.04	0.0	0.0	10.0	20.0	30.0		
			A-4-4	6.01	0.0	0.0	26.9	33.6	48.6		
			A-4-5	5.10	0.0	0.0	32.6	40.6	48.6	57.6	
			A-4-6	4.12	0.0	0.0	10.0	30.0			
			A-5	4.17	1.5	5.0	27.0	32.0	37.0	42.0	
	袋詰め		A-8-1	1.81	26.5	59.3	46.0	51.0	56.0	61.0	66.0
			A-8-2	1.53	20.0	43.2	22.8	27.8	42.8		
	織り曲げ	第二次	A-4-2a	4.30	2.5	10.5	45.1	46.7	53.4		
			A-4-2b	4.62	1.0	3.7	41.7	45.1	53.4		
			A-4-4a	4.52	0.5	1.7	19.2	27.5			
			A-4-4b	4.41	5.5	19.6	29.8	48.5	50.1	56.8	0.0
	袋詰めタイプ		A-8-3	1.62	20.5	88.7	17.3	29.0	29.0		
			A-8-4	1.22	12.0	88.2	11.3	20.0	41.7	48.0	58.0
	織り曲げ	第三次	A-4-3F	4.44	1.0	4.2	33.0	43.7	47.7	53.7	
			A-4-5F	3.56	0.0	0.0	30.0	31.3	41.7	49.0	54.0
	袋詰め		A-8-F	1.13	0.5	2.9	47.3	47.3	47.3	47.3	47.3
編み物タイプ	直線	第一次	C-1-1	1.48	6.0	18.4	40.0	45.0	65.0		
			C-1-2	1.14	0.0	0.0	26.0	34.3			
	ハニカム		C-2-1	1.69	0.0	0.0	23.4	30.4	45.4		
			C-2-2	1.51	0.0	0.0	21.0	22.0	33.7	42.0	
			C-3-1	2.51	2.0	6.7	45.6	60.6			
			C-3-2	1.98	0.5	1.9	37.8	62.8			
			C-3-3	1.79	0.5	1.9	26.0	32.7	41.0	51.0	
			C-3-4	1.42	3.0	11.2	26.0	29.3			
	直線	第二次	C-1（改）	1.00	3.5	12.0	30.0	31.7	43.3	50.0	60.0
	ハニカム		C-3-5	1.75	13.5	65.2	2.9	13.2	16.6	24.9	
			C-3-6	2.00	14.0	56.0	10.4	17.7	24.4		
			C-3-7	2.05	17.0	74.9	4.6	16.3	24.6		
	直線	第三次	C-1-F	2.17	1.3	3.8	38.3	61.0			
	ハニカム		C-3-F	1.54	2.0	6.2	32.0	32.0	34.0	35.0	37.0
繊物タイプ	波形	第一次	D-1-1	3.55	2.0	8.7	25.0	25.0	25.0	25.0	
			D-1-2	2.97	0.0	0.0	28.0	28.0	28.0	28.0	
			D-1-3	3.81	1.5	5.1	25.0	25.0	30.0	30.0	
			D-1-4	3.16	1.0	3.4	26.0	26.0	31.0		
			D-1-5	3.77	0.0	0.0	36.0				
			D-1-6	3.11	0.0	0.0	40.0				
	テープ材編み付け		D-2	2.04	0.5	2.2	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1
			D-3-1	5.79	8.0	74.8	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0
			D-3-2	6.17	5.0	40.0	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0
			D-3-3	10.16	2.5	19.2	14.3	14.3			
			D-3-4	12.62	3.0	21.3	14.2	14.2	14.2		
		第二次	D-3(1)	9.61	3.0	17.9	18.0	18.0	18.0	18.0	
			D-3(2)	6.66	4.5	31.5	17.9	17.9	17.9		
	波形	第三次	D-1-F	2.86	2.2	9.5	32.7	35.7	37.7	39.3	42.0
	テープ材編み付け		D-3-F	6.32	0.2	1.3	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0

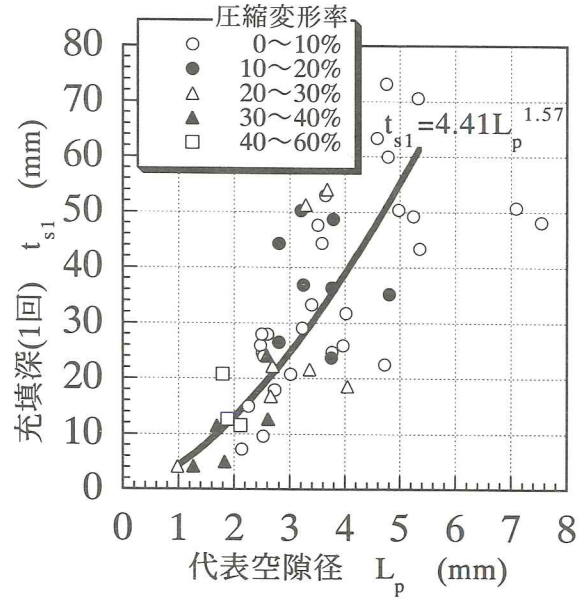


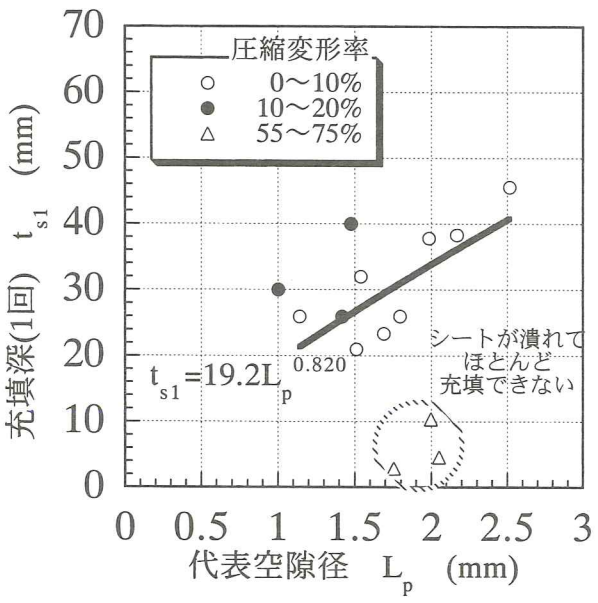
図－5.9　代表空隙径 L_p の定義

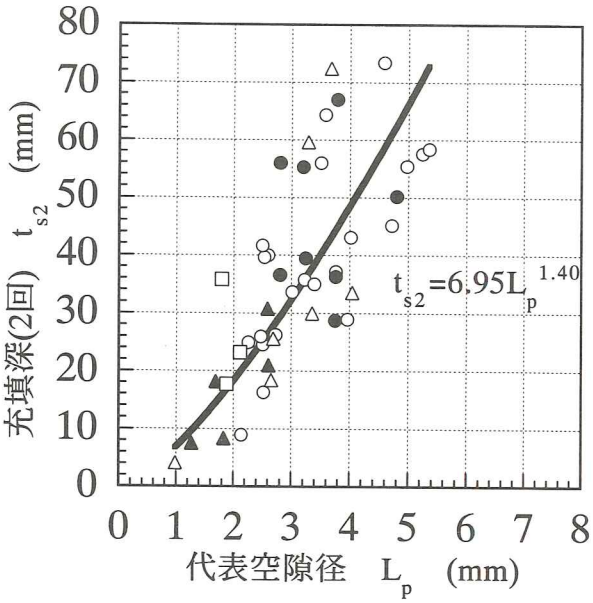
この解釈に基づくと，空隙率が小さく構成材が密に分布するシートほど t_s が小さくなる傾向が見られるのは，それらのシートでは空隙径，すなわち流路幅が小さい流路ほど抵抗が大きいためと説明できる。そこで，流路幅の大小を表すパラメータを用いて充填深との関係を整理することとした。本研究では，以下のように代表空隙径 L_p を定義した。

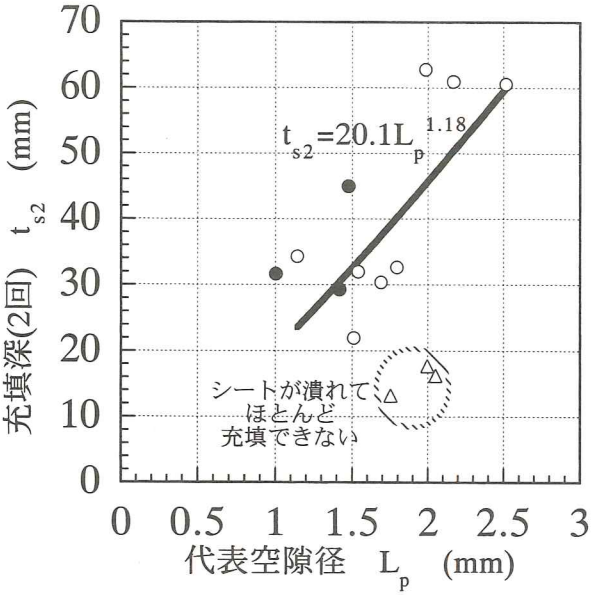
一般にシートは図－5.9a）に示すように構成材が複雑に入り組んだ状態になっていると想定する。この入り組んだ構造を空隙率および構成材太さを同一に保ったまま，図－5.9b）に示す格子状に整然と整列した仮想の構造に作り替えたと仮定する。この仮想構造での構成材間の間隔を代表空隙径 L_p と定義した。実際のシートの平均的な空隙径は代表空隙径に補正係数を乗した値になると思われる。その補正係数がどの程度の値になるかは，シート構造によってまちまちであろう。したがって，代表空隙径と充填深の関係を整理するにあたっては，「シート構造が似ている」グループに分けて行う必要がある。このグループ分けとして表－2.3，写真－2.1に示したタイプ分類を用いることとした。

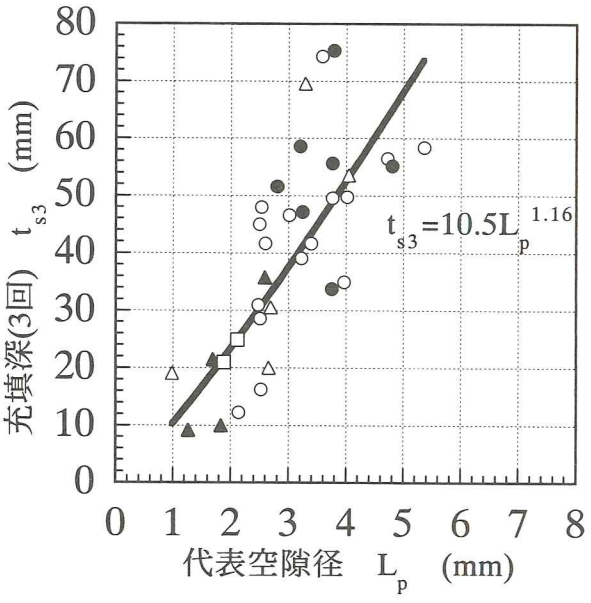
ヘチマタイプのシートを対象として，充填深 t_{s1}，t_{s2}，t_{s3} と代表空隙径 L_p との関係を整理した結果を図－5.10に示す。図－5.10から代表空隙径の増加に伴って充填深も大きくなること，1回より2回の充填作業を行った方が充填深は大きくなるが，$t_{s2} < 2 \times t_{s1}$ であることから充填回数に比例しては充填深が大きくならないことがわかる。なお，さらに充填回数を増加させても，充填作業1回あたりの充填深の増加量が小さくなり，ある最大充填深までしか充填できないことが t_{s2} と t_{s3} の比較より確かめられる。同様に編み物タイプのシートの充填深と代表空隙径との関係を図－5.11に示す。ヘチマタイプ比較すると，同じ代表空隙径でも充填深が大きくなっている，つまり充填性が高いことが分かる。これは5.1.1(2)にも指摘したように，編み物タイプでは土砂充填が容易になるようにシート表面にハニカム形状の大きな空隙径を有する構造となっているためである。図－5.11に破線で囲んだプロットは，他の同タイプのシートの実験結果に比較して充填深が小さい。これらのシートは振動装置を載せたときの圧縮変形が大きかったものである。編み物タイプのシートについて，写真－5.7に示した小型簡易充填装置をシート上に載せて圧縮されたシート厚の変形前のシート厚に対する割合（以下，圧縮変形率と呼ぶ）と充填深の関係を整理した結果を図

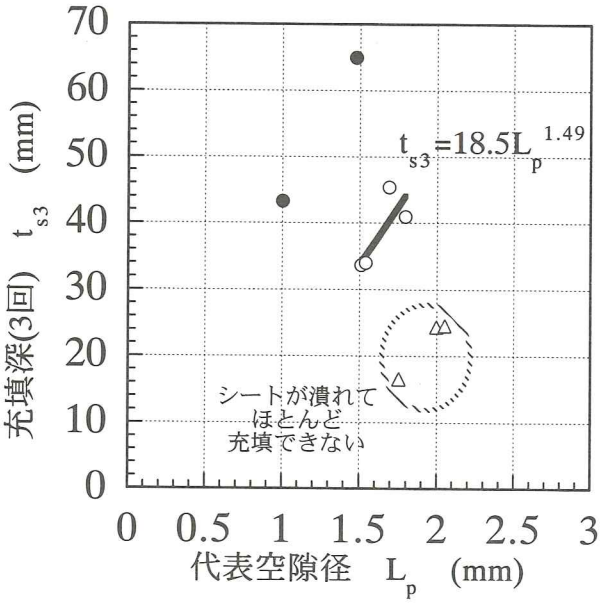






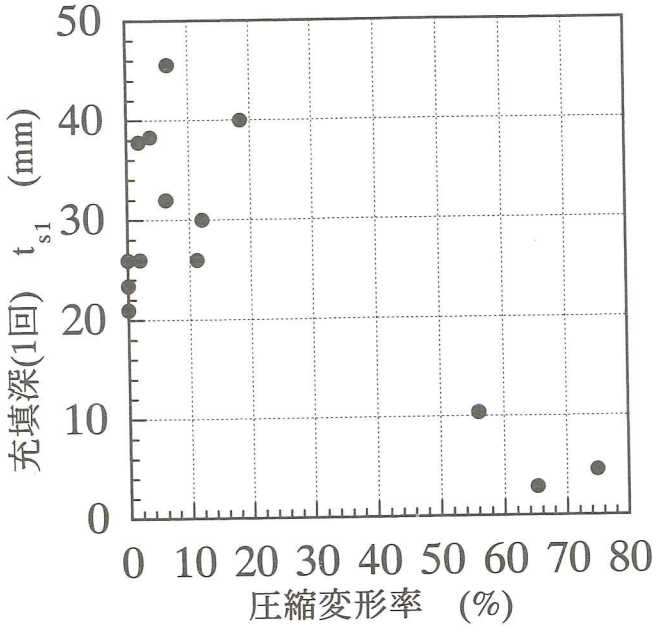




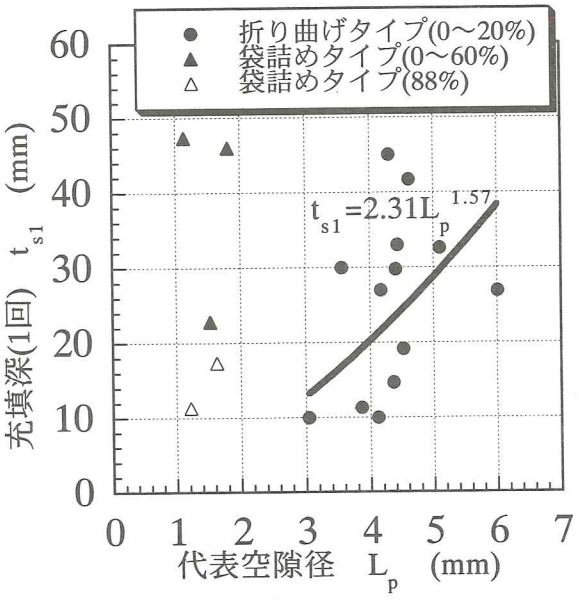


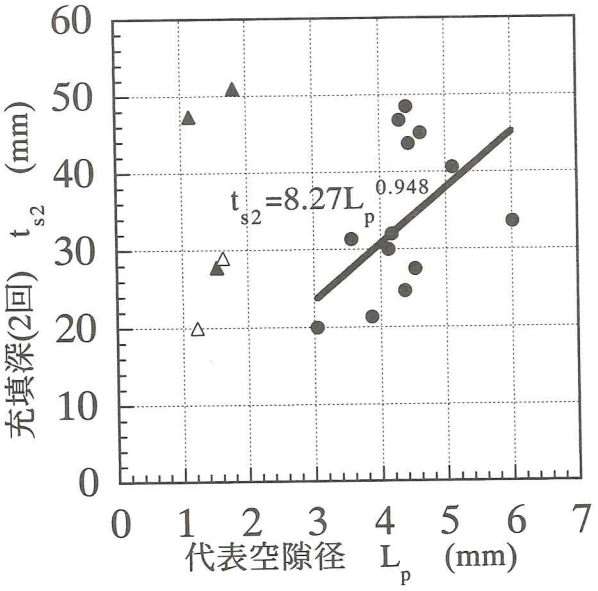
図－5.10　代表空隙径 L_p と充填深 t_s の関係（ヘチマタイプ）

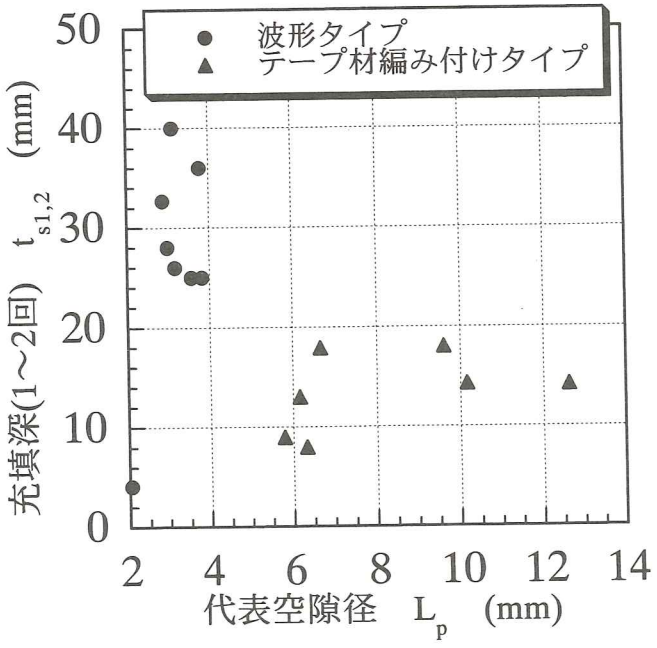
図－5.11　代表空隙径 L_p と充填深 t_s の関係（編み物タイプ）



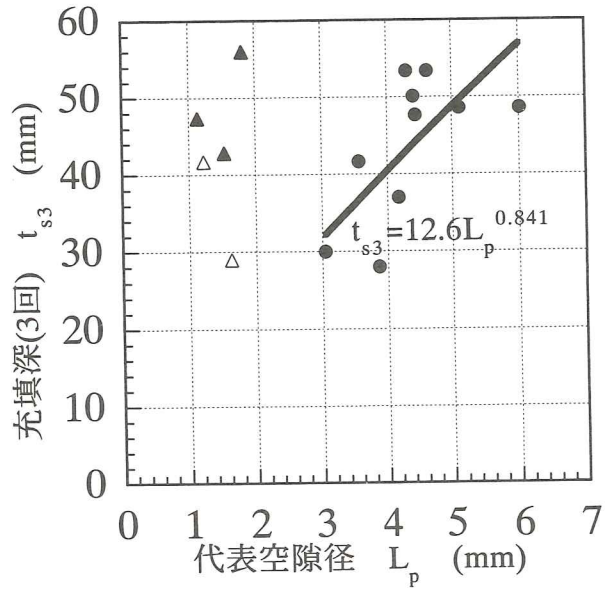
図－5.12　圧縮変形率と充填深 t_s の関係(編み物タイプ)







図－5.14　代表空隙径 L_p と充填深 t_s の関係(織物タイプ)



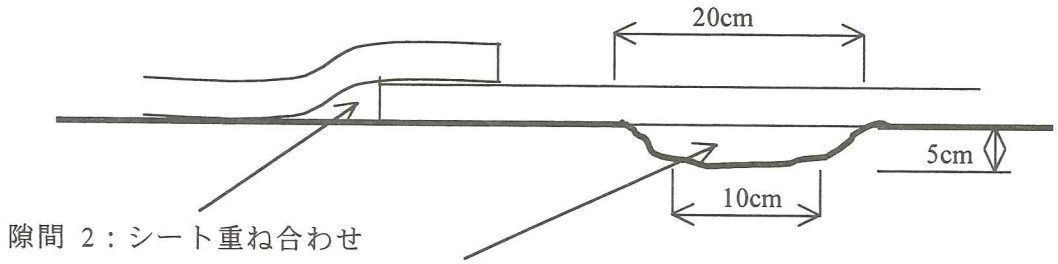
図－5.13　代表空隙径 L_p と充填深 t_s の関係（ネットタイプ）

−5.12に示す。圧縮変形率が55%以上になると極端に充填深が小さくなる傾向が見られる。ヘチマタイプでは最大の圧縮変形率が50%程度であったが，上記のような充填深の減少傾向が見られ無かった（図−5.10参照）。以上より，土砂充填性の高いシートの圧縮強度に関わる条件として，1.8（KN/m²）の荷重が作用した際に加圧前の厚さの50%以上の厚さを維持できることが求められる。

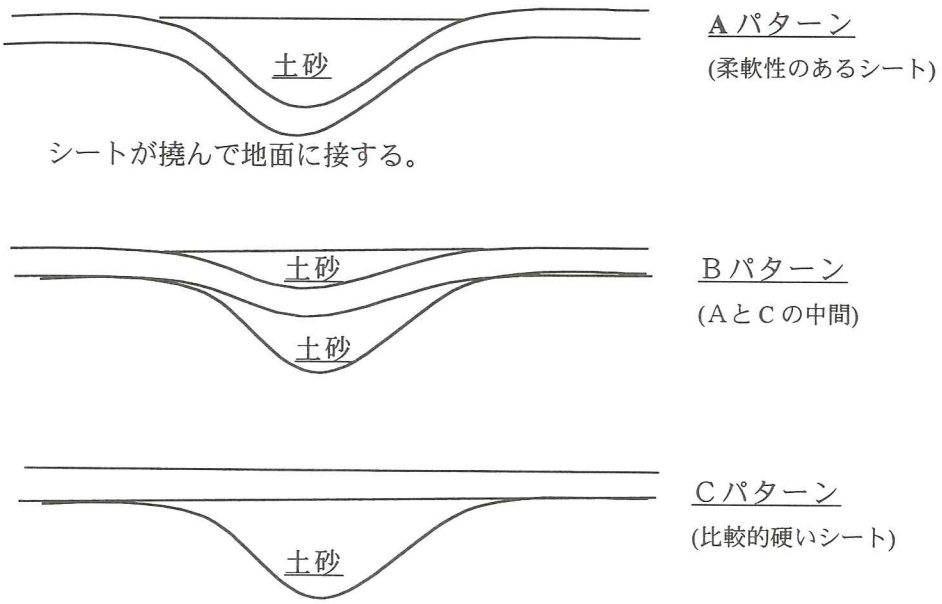
他のタイプ（ネットタイプ，織物タイプ））の実験結果を図−5.13，5.14に示す。シートを新たに設計または改良するにあたって充填深の推定するためには，図−5.10，5.11，5.13，5.14に実線で併記した実験式を活用すればよい。実線より求められる充填深より小さなシート厚であれば，完全な充填が可能と判断できる。

5.2.3　シート下面と地面との隙間への土砂充填性

シートを敷設した地面に不陸があるとシート下面と地面の間に隙間が生じる。また，シート同士を重ね合わた場所では上側に重ねたシートがシート厚さの分だけ浮かび上がって，やはり隙間が生じる。それらの状況を図−5.15に示すように模擬して，シートへの土砂充填によって隙間が埋められる条件を明らかにする実験を行った。地面不陸部への充填状況を観察すると，隙間を埋めることができる状態として図−



図−5.15　隙間への土砂充填性を確認する実験



図−5.16　不陸への土砂充填が行えるパターンの分類

表－5.4　シート下面の隙間への土砂充填性に関する実験結果

タイプ		シート名	シート重複部充填の可否	不陸部の充填パターンと可否注)
大区分	小区分			
ヘチマタイプ	熔着タイプ	A-1-F	○	B　○
		A-2-F	○	B　○
		A-3-F	×	C　×(4cm)
	接着タイプ	B-F	○	B　○(2回)
ネットタイプ	織り曲げタイプ	A-4-3F	○	C　○(2回)
		A-4-5F	○	C　○(2回)
	袋詰めタイプ	A-8-F	×	B　×(4cm)
編み物タイプ	直線タイプ	C-1-F	○	B　○
	ハニカムタイプ	C-3-F	×	A　○
織物タイプ	波形タイプ	D-1-F	○	C　×(4cm)
	テープ材編み付けタイプ	D-3-F	○(ただし2回充填作業必要)	A　○

注)括弧内は、×の場合には未充填隙間の深さ、
○の場合は完全充填に達するのに必要な充填回数

5.16に示す3種類に分類することができた。Cパターンは充填前と同様にシートが隙間の中に垂れ込むことがなく，隙間内に土砂が満たされている場合である。Aパターンはシートが隙間の中に垂れ込んで不陸面にぴったり接触するようになる場合である。Bパターンはパターン AとCの中間で，シートが垂れ込むが隙間は残っており，その隙間には土砂が充填されている場合である。第3次シートの実験結果を表－5.4に示す。いずれのシートもシート1枚の場合には1回の充填作業で完全に充填できる充填性を有する(表－5.3参照)。シートを2枚重ねた場合には2枚目のシートまで土砂充填が及ぶシート(充填深＞シート厚となるシート)では，隙間への充填性が良好である。しかし，2枚目まで充填がほとんど及ばないシート(充填深≒シート厚となるシート)では，シートが垂れ込むAパターンの場合のみ充填性がよい。このようなシートでは，シート下面から空隙に供給される土砂量が少なく，そのため不陸による隙間を埋めることができないが，その分だけシートが垂れ込めないと良好に充填できないことが分かる。したがって，土砂充填性が低いシートでは，シートの垂れ込みが生じるような柔軟性を確保しなければならない。シート重ね部の充填性に関する実験結果は不陸の結果とほぼ同じであり，上記の考察はそのまま重ね部にも当てはまる。

5.3　まとめ

土砂充填工法として，高含水比土砂を加振して液状化させ，シートに流し込む工法が最も優れていることを明らかにした。また，上記の工法によって充填できるシートの厚さを推定する方法を図－5.10～図－5.14に示したように提案し，充填が可能なシート諸元の設定ができるようになった。そのため，シート製作にあたって，事前に土砂充填性を確保したシート設計が可能となった。

注1）ここで示した充填工法および充填装置については，特許申請中である。

注2）撹拌槽からはグラウドポンプで高含水比土砂を送り出し，吹き付け用の圧搾空気噴出口が圧送管の出口付近に設置され，そこで噴出する空気流と高含水比土砂を混ぜて吹き付けるタイプの機械では，充填に最適なスランプ値23～27cmでもトラブル無く吹き付けられた事例がある。

第6章　シートの強度・加工性に関する要求性能と試験法

設計時に見込んだシートの侵食防止効果を損なうことなく施工でき，かつ耐用年数まで確実に供用できる強度･加工性を有するシートを作成することが，実用化のために欠かせない。本章では，2.2.1⑶に示した基本方針にしたがって，シートの損傷原因となる力の作用状況を整理し，各状況ごとに具体的な要求性能をまとめるとともに，その性能の有無を評価するための試験方法を提案する。

まず，要求性能や評価方法を提案するための基礎的情報の整理，すなわち実際にシートの侵食防止効果の損失に至る損傷の発生状況(以下，損傷発生状況と呼ぶ)や施工・維持管理などの作業に困難が生じる状況(以下，不具合発生状況と呼ぶ)を推定するとともに，それらの状況の発生に関わっている強度特性の整理を行う(6.1参照)。次に施工･撤去時および供用時にわけて損傷発生状況を再現する実大実験によって損傷の程度を，また損傷発生機構を模擬できる試験法によって強度を表す指標を測定し，それらの結果を比較して損傷発生の有無について判定可能な試験法および基準値を明らかにする(6.2および6.3参照)。

6.1　損傷・不具合発生状況とそれに関連する強度特性

まず，損傷および不具合の発生が懸念される状況を挙げ，次にそれぞれの状況に対して主要因となる強度特性(例えば引っ掛け強度，圧縮変形率など)を推定する。最後に同じ主要因ごとに発生状況をグループ分けをし，必要とする強度特性を得るためのキーとなる損傷・不具合発生状況を特定する。なお，ここで特定した状況を6.2で行う実大再現実験の対象とした。

6.1.1　損傷・不具合発生状況

シートの実大施工実験，小規模なシート撤去実験，および堤防点検時に見られた実堤防（シートは敷設されていない）の損傷状況に関するアンケートの結果から，シートの破損が懸念される状況を施工時，供用時そして撤去時などにわけて整理した結果を以下に示す。

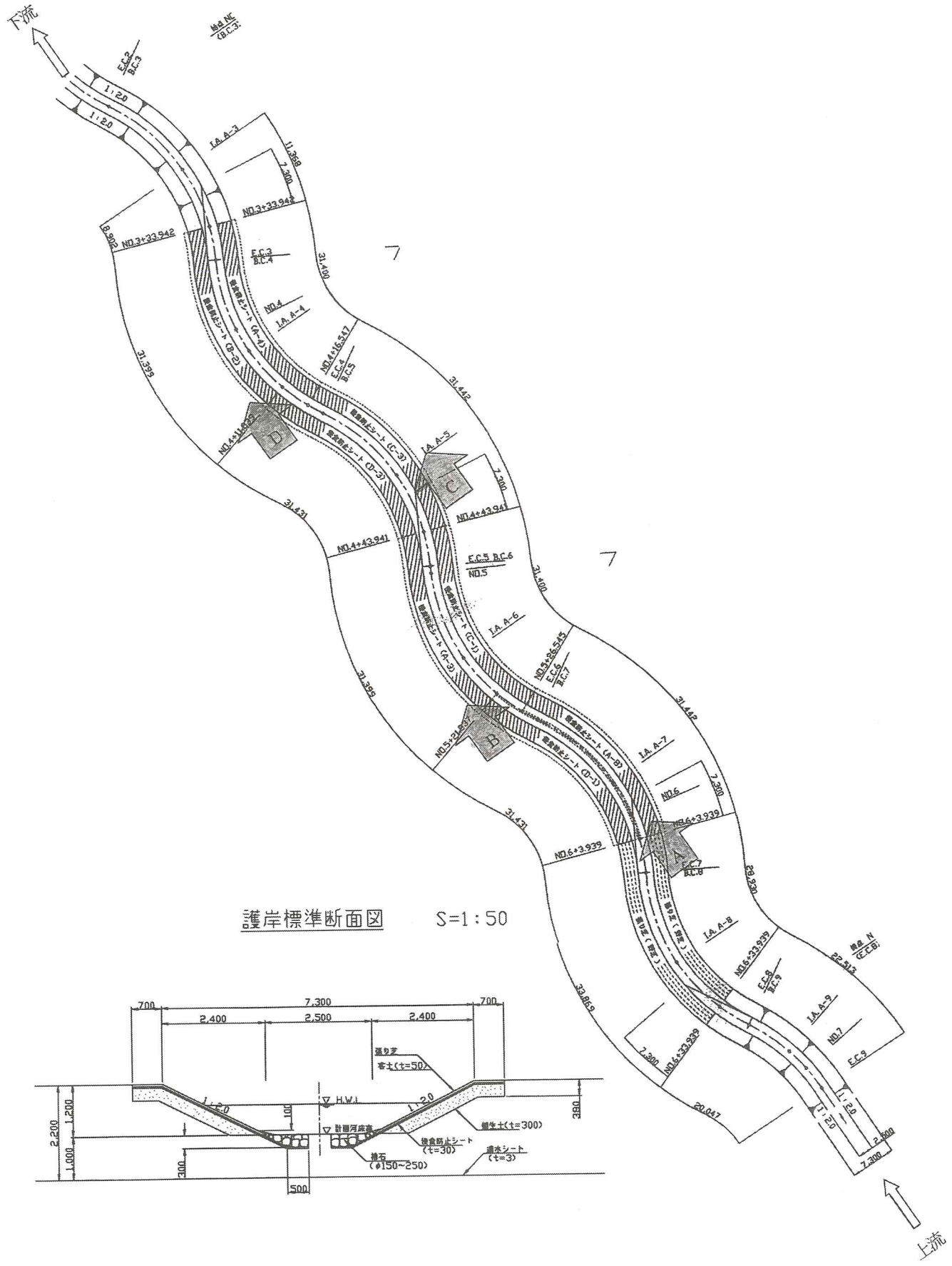
⑴　施工時

自然共生研究センターの実験河川と土木研究所(河川模型実験施設)で実大施工実験を実施し，その各工程で生じた損傷・不具合発生状況の観察を行った。

自然共生研究センターでは，**図－6.1**および**写真－6.1**に示すように実験水路の蛇行区間(河岸防御工開発区間)の高さ1.2m，のり勾配１：２の河岸面に全10種類のシートを施工した(平成10年９～10月)。また，施工に用いたシートは第一次プロトタイプであり，その種類(**表－2.3**に基づく)は**図－6.1**に併記した。

土木研究所では，**図－6.2**および**写真－6.2**に示すように堤防を模擬した盛土のり面（高さ2.5m，のり勾配は１：２と１：３の２種類）に全８種類のシートを施工した（平成11年３月)。施工に用いたシートは上記と同様に第一次プロトタイプであり，種類を**図－6.2**に併記した。

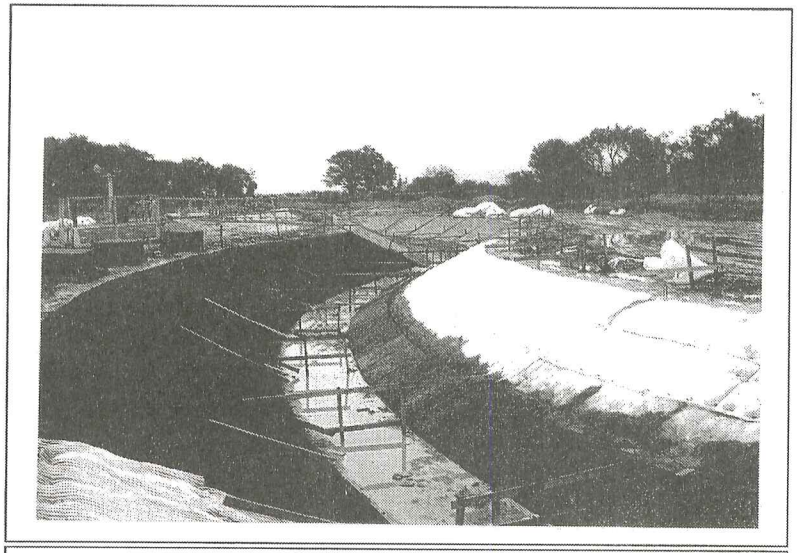
これらの施工は，実際の河川堤防などで行われる本施工とほぼ同様な施工条件(施工場所の地形的特徴，施工方法，施工担当者の職種など)となるように配慮して，**巻末資料１**に示した施工法とほぼ同内容(ピンの打設間隔やシート重ね合わせ長などの細かい諸元が異なる）の説明書を工事担当業者に施工に前もって配布，説明してから行った。



図－6.1　自然共生研究センターにおける実大施工実験概要



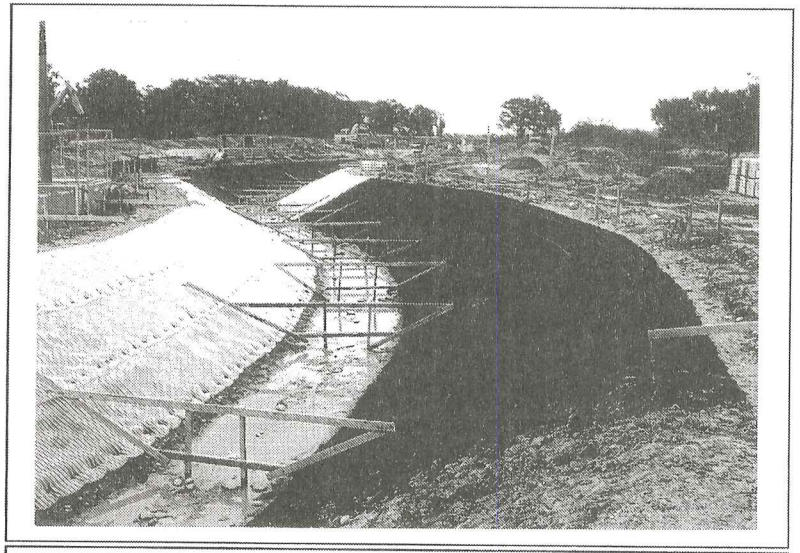
D. 地点より下流



B. 地点より下流

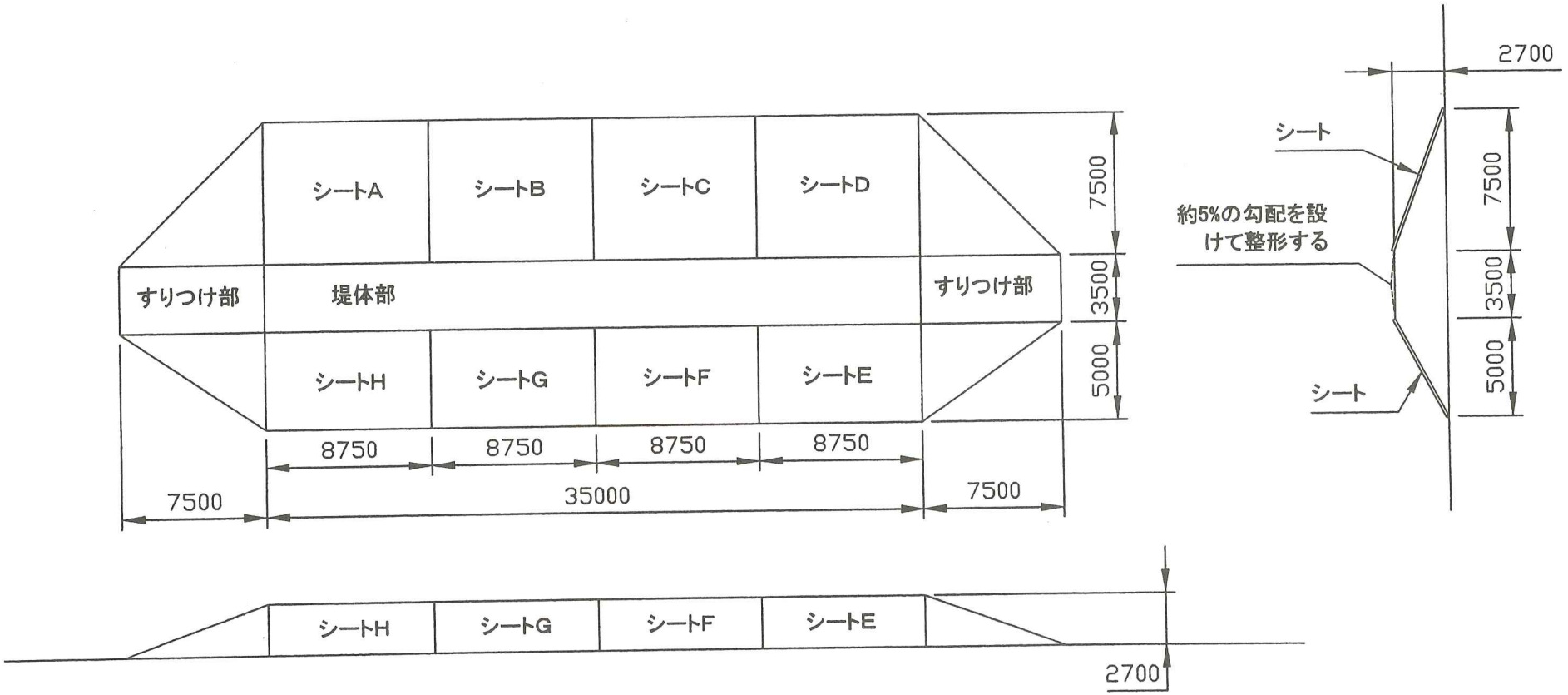


C. 地点より下流

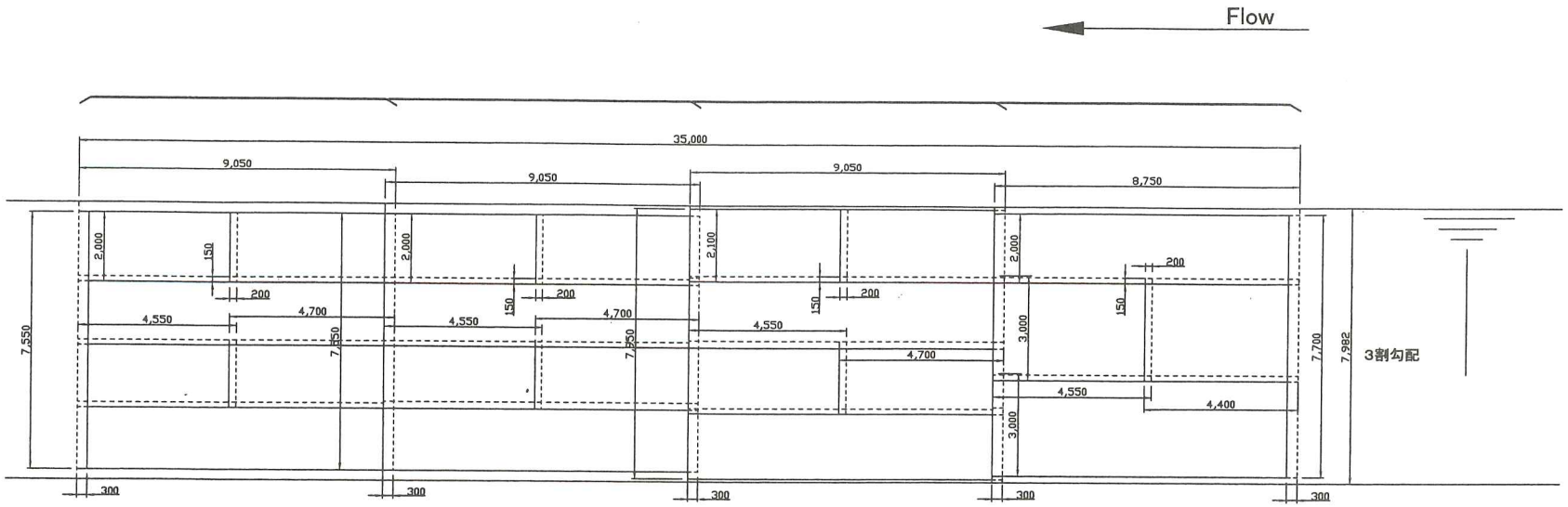


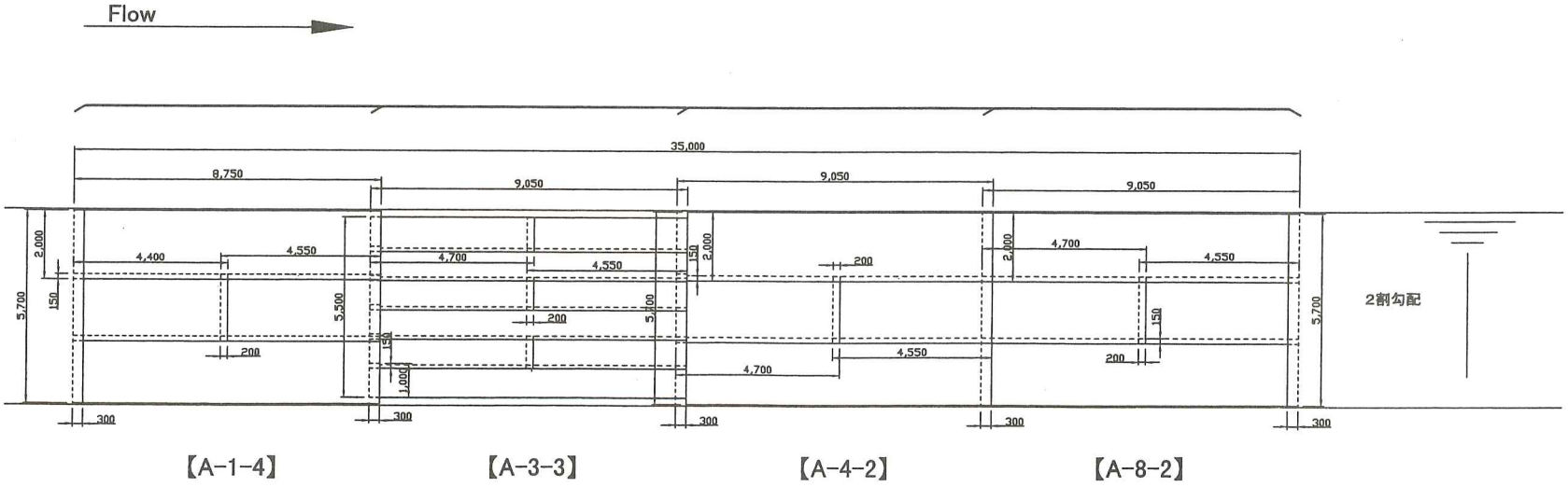
A. 地点より下流

写真－6.1　自然共生研究センターにおけるシート敷設状況

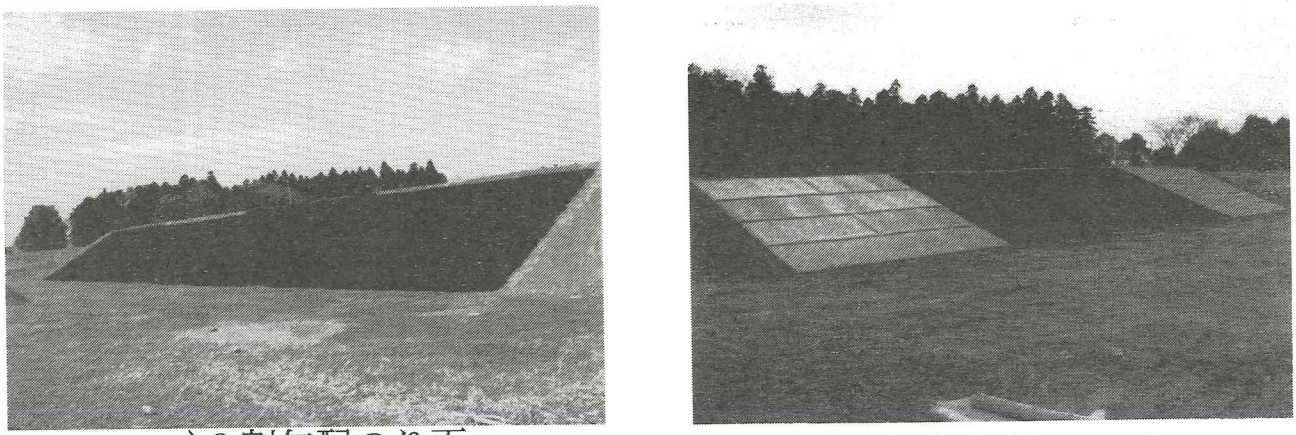


図－6.2(1)　土木研究所における実大施工実験概要





図－6.2(2)　土木研究所における実大施工実験概要



a) 2割勾配のり面　　b)3割勾配のり面

写真－6.2　土木研究所における盛土のり面へのシート敷設状況

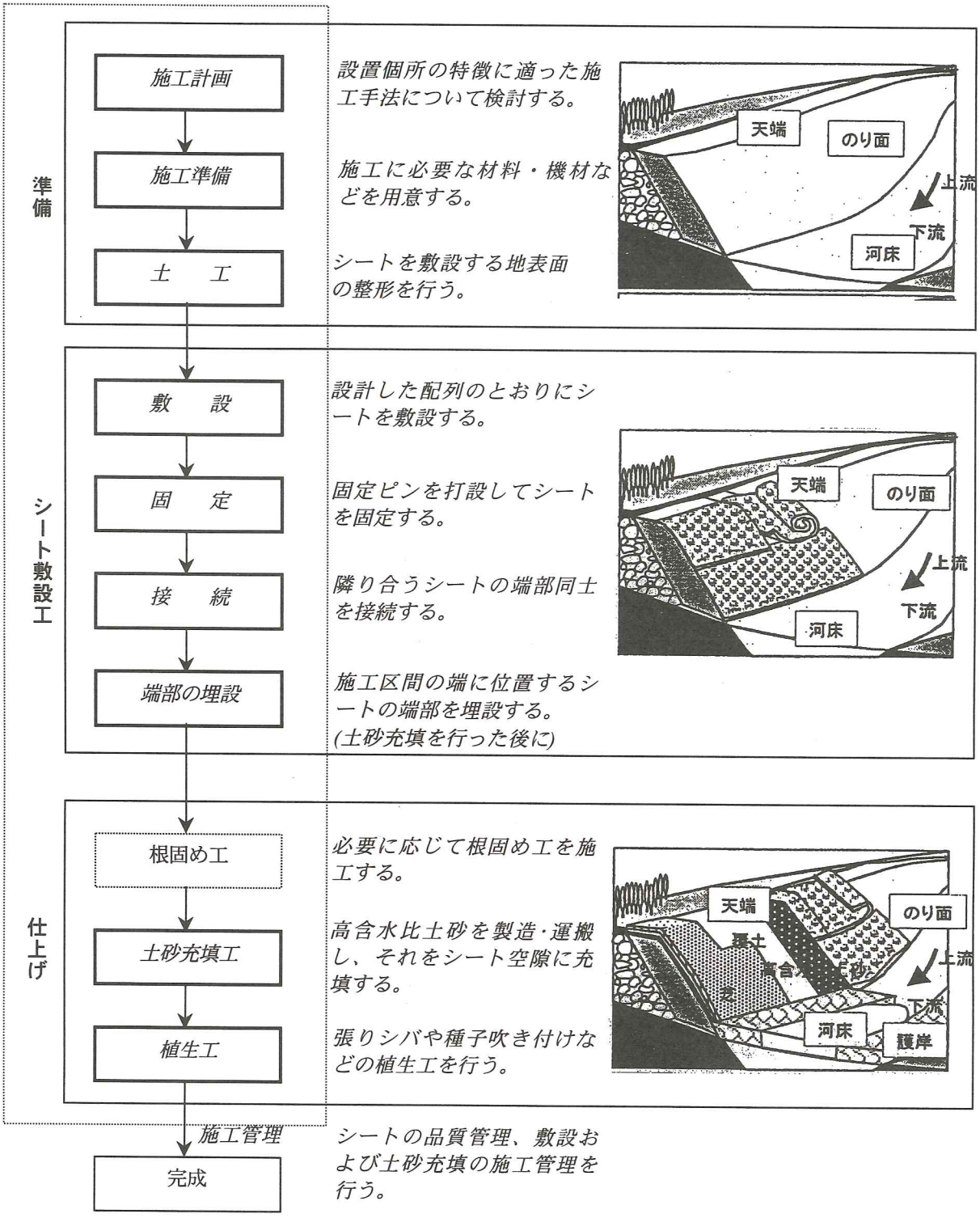
シートを用いた侵食防止工の工程を図－6.3に示す。各工程で見られたシートの損傷および施工上の不具合を表－6.1にまとめて示す。損傷のタイプとしては，切断または破断するなどでシートに穴が開くものと，延びや圧縮による変形が挙げられる。前者は穴となった場所で明らかに侵食防止効果が失われてしまうので「損傷」であることが容易に理解できよう。後者のタイプは，侵食防止効果が完全には失われないが減少すること，その程度が大きく設計上見込んだ侵食防止効果が得られない場合を「損傷」と判定できる。

また，不具合については，延び変形とシート面の滑りが主原因であった。その不具合の程度が僅かであったため表－6.1には示さなかったものとして，ピン打設後にシート端部が浮かび上がるため作業員が移動する際に足に引っ掛かりやすくなる状況が見られた(打設間隔が小さいほど顕著であった)。この原因は，ピンを打設すると隣り合う2本のピンの間のシートに引っ張り力が作用し，そのためシートがアーチ状に変形するためである。このように変形した場所でもシートに土砂を充填すると，土砂の重さで地面に密着するようになる。シートの浮かび上がりは，シートの材料力学的特性を調整することでも解消できる問題であるが，それが実際の施工上大きな問題とならなかったこと，また土砂を充填すれば直ること，ピン打設間隔を広げれば浮かび上がりも小さくできるなどのため，ここでは不具合として取り上げないこととした。

⑵　供用時(出水時を除く)

シートの強度に関する研究実施段階では，実堤防に施工して実際の供用状況下にシートを置くことができなかったため，実状の観察に基づいた損傷・不具合発生状況の解明が行えなかった。そこで，シートの第一の適用箇所と選定した堤防のり面に焦点を絞り，損傷・不具合が発生すると懸念される状況を，以下のような考え方で推定することとした。

シートを設置したのり面は，写真－1.1に示したようにシートが地面に露出していないので，見た目やのり面上での人や機械など移動性は，シートがない植生が繁茂するだけの通常の堤防のり面とほとんど差異がない。そのため，維持管理作業や河川利用者の利用状況なども，シートの有無による差異がほとんどないことが期待できる。したがって，人為によるのり面損傷についてはシートの有無によらず同様な原因で生じると考えて良いであろう。河川管理者による維持管理行為以外での人為的なシート損傷の発生が懸念される状況として，各工事事務所が毎年行っている堤防点検の報告書に掲載されているのり面損傷状況



図－6.3　シートを用いた侵食防止工法の工程(概略)

をリストアップすることとした。また，維持管理行為，特にのり面の草刈り・集草については，シートの有無に関わりなく同様に行うと想定される。そこで，草刈り・集草作業によってシートが損傷する可能性が高い状況を，植生管理作業の実態について河川管理担当者へヒアリングおよびアンケート調査して明らかにすることとした。

以上の調査結果を表－6.2にまとめて示す。植生管理については，最近の主流である自走式機械を用いた方法を対象として，草刈りおよび集草時にシートが損傷するか，また損傷を防止するために機器の操作

表－6.1　施工時のシート損傷および施工作業上の不具合の発生状況

工　程	作業状況	シートの侵食防止効果の損失原因	施工上の不具合の原因
敷設	搬入時にロール状にしておいたシートを広げて所定の敷設位置に収まるようにシートを移動させる際、作業員がシート端部を強く引っ張る。	・シートの破断 作業員が掴んだ場所周辺で破断する場合が多い。 ・シートの延び変形 シートが延びきってしまいそのまま戻らなくなる。シートが過度に延びると、厚さ･空隙率も大きく変化するので、侵食防止効果が低下する場合がある。	・シートの延び変形 シートの位置を調整しようとして端部をひっぱても、シートが延びるばかりで、位置がほとんど変わらない。そのため敷設に要する作業時間が極端に増加してしまう。
	作業員がシート上を歩行して移動する。		・シートの延び変形 シートが延びてのり尻方向にずり落ち、シート端部の重ね長が確保できなくなる。それを防止するために、ピン間隔を小さくする、つまりピンの打設本数を増加させなければならない。
端部埋設	シート端部埋設を行う際に掘削面に沿うようにシートを屈曲させる。	・シートの割れ 屈曲部でシートが割れる。構成材が堅い(変形性が小さい)シートで顕著	
固定	シートを固定するためのピンを打設する。	・シートの圧壊 ピンがシートを貫通する際、またハンマーを誤ってシートに打ち付けた際に、シートが押しつぶさるとともに、その周縁で破断される。破断の程度がひどいものは、ピンからシートがとれてしまう。	
端部埋設 土砂充填	スコップを用いた作業をしている際、不意にスコップをシートに衝突させてしまう。	・シートの切断 スコップの先がシートに刺さったり、引っ掛かってシートが切断される。切断箇所が多く見られたシートがあり、作業員が切断しないように注意して施工をすることだけでは、切断発生をなくすことが困難なようである(つまりシートが切断され易すぎた)。	
土砂充填	作業員がシート上を歩行して移動する。		・シート面の滑りやすさ シート面の凹凸が少ない滑らかなシートでは、特に作業靴が高含水比土砂などで湿った状態になると、歩行が困難なほど滑りやすくなり、施工が難しくなる。
全行程	・施工の効率	・シートの幅、長さ シート 1 枚の幅、長さが小さいとシートの接続箇所が多くなる。接続箇所は、侵食に対する弱点箇所になりやすい場所であり、その箇所数をできるだけ減らすべきである。また、施工性から考えても、接続作業や接続部への土砂充填作業(シート重ね合わせ部は充填性が落ちる、第５章参照)の軽減のため、減らすことが好ましい。	
	・シート上での作業員の作業全般	・シートの圧縮変形(厚さ方向) シート上に作業員が載ると踏まれた部分が圧縮されるが、そのまま圧縮されて凹んだままになる。	

表－6.2　供用時(出水時を除く)でのシート損傷および維持管理作業上の不具合が発生すると想定される状況

項　目	作業状況	シートの侵食防止効果の損失	維持管理上の不具合
植生管理	自走式の草刈機および集草機を直進走行させる。	・シートの圧縮変形または断裂？ 機械の接地圧による。接地圧の大きさは以下のとおり(括弧内の数値はデータ数)。 草刈機(31) 0.09 ～ 0.18kgf/cm^2 平均 0.15kgf/cm^2 集草機(8) 0.11 ～ 0.21kgf/cm^2 平均 0.17kgf/cm^2	左記のような損傷を防止するため、自走式の機械が使用できない、またはかなり非効率な使い方をしなければならないという懸念がある。
	自走式の草刈機および集草機を方向転換させる。	・シートの断裂？ キャタピラが地面を激しくせん断するため、その力でシートが断裂する懸念がある。	
	自走式の草刈機のカッターを作動させて草刈りを行う。	・シートの切断？ カッターがシートを切り刻む懸念がある。	
のり面利用	自動車の乗り入れ	・シートの圧縮変形または断裂？ 轍の形成に伴って発生する懸念がある。	これらを完全に防止する管理を行うのは困難
	たき火または火事	・シートの燃焼・変形 熱可塑性樹脂を主素材としたシートであるため、熱によって変形しやすいまたは燃焼するという懸念がある。	
	のり面の掘削？スコップなどで地面を掘り返した様な状況	・シートの切断・露出	
その他	降雨によるガリ侵食		・シートの露出 埋め戻す維持管理作業を行う必要がある。
	モグラなどの動物による地面の掘削	・シートの破断？ 動物の掘削力でシートが破断するという懸念がある。	そのような動物を完全に除去するのは困難

に制約が生じるかが問題として挙げられた。また，維持管理以外では，のり面上への自動車の乗り込みが主体であることが分かった。最も多く見られた乗り込みのパターンは，堤防のり尻から天端にほぼ真っ直ぐ向かってある高さまで深い轍が形成されたものである。上記に次いで顕著であったのが，のり面上でのたき火または火事である。これについては8.2の耐燃焼性で取り扱うこととする。最後にごく僅かであったが掘削によると思われるのり面の窪みが見られた。

また，堤防点検には人為以外と思われる損傷も見られたので，それらを表－6.2に併記している。のり面のガリ侵食は，雨水が集まってまとまった表面流となり，それがのり面を流れ落ちる場所で形成されると予想される。そのような場所があれば，例えシートを敷設してあってもガリが形成されるであろう。ただし，侵食深がシートの効果で低減される可能性はある。いずれにせよシートが露出するので，補修が必

要ということではシートの有無による差異はない。したがって，シートを敷設したことで特に管理労力が増加するわけでもなく，同様な維持管理を行えばよいと判断できるので，ここで問題としている維持管理上の不具合としては取り扱わないこととした。

モグラなどの動物がのり面を掘削することは，従前から堤防管理上の問題として取り上げられている。そのような動物がシートを破って掘進することができるかについては，現時点では不明である。これについては，シートを敷設した実堤防での現地調査を今後，行わなければならない。ただし参考になる情報として，モグラの前足には5kgの石を動かす力があるという阿部の報告[1]がある。そこで，モグラによる損傷防止が可能なシートの強度を考える上で一つの目安として，モグラがシートを貫通して掘削しようとしたとき，前足をシートに引っかけて5kg程度の力で破ろうとすると考えることにする。

⑶　出水時

埋設したシートが地表面の侵食の進行に伴って洗い出されて露出すると，シートが流体力を受けるようになる。この最大値に対してシートが破損しないだけの耐力が必要とされる。ここで問題となるのは，どのような露出状況(破損が生じやすい条件)までを上記の検討対象とするかという設定である。これについては，第3章に示した侵食実験で観察されたシートの流水中の挙動を勘案して以下のように考えることとした。

シートが地面に密着している状態を想定すると，シートには流れ方向への引っ張り力が主に作用する（もう一つはシートを地面から引き離す方向に作用する揚力)。シートの粗度は露出厚さに伴って増大する



1)シート上の表土･植生を剥ぎ取る



2)シートを剥ぎ取る



3)土砂を振り落とした後、搬出する

写真－6.3　バックホウを用いたシート撤去の状況

(第3章参照)ことを考慮すると，引っ張り力に対する耐力の検討にあたってはシート内に充填されていた土砂が全て流失した状態を対象とすれば良いと考えられる。しかし，ここで懸念されるのは，土砂の洗い出されたシートでは想定したように地面に密着した状態が実際に保たれるのかということである。シートをピンのみで固定した(流下方向のピン間隔は実施工とほぼ同じ70～100cm程度)侵食実験(第4章参照)では，シート内から完全に土砂が流失して，更に局所的にであるが地面とシート下面との間に3cm程度の隙間が生じるような状態になっても，シートが浮かび上がって流れに対して大きく突出するような形状にまで変形することがなかった。また，シート上にチガヤを繁茂させた場合(第4章参照)では，根茎によってシートが固定されており，手で引っ張り上げても僅かに持ち上がる程度であった。以上の結果より，シートは地面に密着した状態をほぼ保つと考えることとし，上記の想定のとおりシート内に充填されていた土砂が全て流失した状態で引っ張り力に対する耐力について検討することとした。

⑷　維持修繕時

何らかの理由により破損したシート箇所を修繕する作業が対象である。維持修繕法は**巻末資料2**に示すとおりに実施する。修繕時には⑴に示す施工時と同様な問題が生じると考えられたが，試験的に修繕を実際に行ったところ，大きな問題は生じなかった。したがって，施工時に見られる問題がクリアできれば，問題がないと考えて良い。

⑸　撤去時

耐用年数を過ぎたシートの張り替えなどの理由によって，シートを撤去する場合がある。この工法の一例として実際に試験的に行った状況を**写真－6.3**に示す。まず幅の広いバケットを有するバックホウを用いて，バケット先端部をシート上面に到達するまで刺し入れて，シート上の土壌と植生を剥ぎ取る。次にバケットをシート下面まで刺し込んだ後に，シートを地面からはぎ取るようにバケットをのり面に沿って移動させることでシートを地中から取り出す。最後に**写真－6.3**に示すような「はさみ」を有する機械でシートを掴み，振動を加えて付着する土砂を落とした後に運搬車に積載する。この工法による撤去を，⑴に示した土木研究所の盛土のり面に敷設した8種類のシートに対して行ったところ，以下のような問題が見られた。シートの強度が小さい場合にはシートを剥ぎ取る際にシートが小片化するほどの破損が進む場合があり，その場合小片が土中に散乱してしまい回収が実作業上かなり非効率になった。取り除くのをあきらめて土砂ごと撤去，処分しなければならないが（河川環境上などの理由で，小片を多く混入した状態のまま放置することはできないとの前提での判断），産廃処理の量が土の分だけ増え，費用的観点で問題が生じる予想される。したがって，撤去時にバケットの端部で**写真－6.3**に見られるように破断するのはしょうがないとしても，小片化しない強度をシートに持たせておくことが望まれよう。

小片化が顕著でなかったシートは，地中から取り出したシートをはさみで掴んで持ち上げる力を作用させても，破断することが少なかった。剥ぎ取ったり，持ち上げられたシートには土砂が充填されているので，その荷重によってシートが破断するのが，小片化の主要因と思われる。ここでは上記の状態を想定して，容易に破断しない耐力について検討することとした。

6.1.2　要求性能の整理と試験方法の選定方針

⑴　要求性能の整理

6.1.1に示した各状況をシートの損傷または変形に関する強度特性の観点から再整理した結果を**表－**

表－6.3　強度特性の種類による要求性能の整理

目　的	材料力学的特性	時　期	状況の概要	該当するJISの試験方法	備　考
侵食防止効果の確保	引っ張りに対する破壊耐力	施工時	●シートの敷設	引っ掛け試験(JIS L1043) または 引っ張り試験 (JIS L1096,JIS L3204)	各試験によって測定される特性値で、損傷発生の有無を適切に判別できるか確認する必要あり。 上記ができない場合、新たな試験方法を考案する必要あり。
		供用時	・自走式草刈･集草機の走行･方向転換 ・自動車の乗り入れ ×人為によるのり面の掘削 ×草刈り機のカッターによる切断 ・モグラなど動物による掘削		
		出水時	●洪水流による流体力(抗力)		
		撤去時	●土砂充填されたシートを地面から持ち上げる		
	引っ張りによる変形の復元性	施工時	●シートの敷設	伸長回復試験(JIS L1096)	
	圧縮による変形の復元性	施工時	●作業員の歩行など	圧縮復元率(JIS L1096)	
		供用時	・自走式草刈･集草機の走行、方向転換 ・自動車の乗り入れ		
	衝撃による破壊に対する耐力	施工時	●ピンの打設 ●土砂充填(スコップの先端による切断) ●シート端部の埋設	適切な試験方法なし	実際の状況を再現できる試験方法を考案する必要あり
施工性の確保	引っ張りによる変形の生じにくさ	施工時	●シートの敷設		
	折り曲げができる	施工時	●シート端部の埋設		
	ピンによって固定できる	施工時	●ピンの打設		
	シート面の滑りにくさ	施工時	●シート上での作業全般		
両方	シートの幅、長さ	施工時 出水時	●シートの接合箇所数を極力減らすため	試験は不要	実情に応じて最低値のみ設定すればよい。

凡例

●：該当する作業内容時に確実に損傷が生じる→実大実験による破壊実験と各種特性試験値との関係の解明

・：条件によっては損傷が生じるか不確定→実大再現実験による損傷発生の有無の確認

×：明らかに損傷が生じるが、シートの耐力のみによって防止が不可能なもの

6.3に示す(ただし，耐燃焼性については8.2で取り扱うものとして省略した)。要求項目は全9項目となった。そのうち，引っ張りと衝撃による切断，および引っ張りと圧縮による変形に対する耐力･復元性(全4項目)が，侵食防止効果の損失防止に関わるものである。残りの5項目は主に施工性確保に関連している。

上記9項目のうち,表－6.3に示した上から8項目までに対して,「状況の概要」として示した状況下(詳細については6.1.1参照)で，損傷および不具合を防止するのに十分な性能を有することが，シートに要求される(強度特性に関する要求性能)。上記から除外した「シートの幅，長さ」については，特に試験が必要で

はなく，施工の実状に合わせて最小限の確保すべき大きさを設定すればよい。

6.1.1に詳細を示した状況下であっても，損傷が生じる際の条件が絞られていて要求性能がクリアに設定できる項目(「作業概要」において“●”で示した項目)と，様々な条件(例えばシートへの土砂充填の有無)が考えられ，かつその条件が違うと損傷や変形の有無または程度が大きく変化する項目がある（「作業概要」において“・”で示した項目)。後者については，まずその条件を変化させて損傷および変形の有無や程度について調査し，その結果から要求性能とする条件の範囲を定める必要がある(6.2において行う)。

また，その状況下で損傷を防ぐことを要求するのは，事実上無理なものがある（「作業概要」において“×”で示した項目)。これらは刃先のような鋭利なものでシートが切れないことを要求するものである。シートは熱可塑性樹脂を素材とすることを前提とした（第１章参照)。一般的に流通している樹脂では，シート用の細い構成材に加工した場合，切断を防ぐことができない。したがって，これらは維持管理によって修繕することを前提として，要求性能とはしないこととした（シート損傷部の修繕については**巻末資料２**参照)。

⑵　試験法選定の考え方

要求性能を満たすことを具体的に判定できるようにするためには，1)対象とした損傷の発生機構が模擬できる試験方法と，2) それによって測定される指標を用いた評価方法を提案する必要がある。1)については，普及しておりかつ信頼性の高いものであることも重要であるので，JIS 規格として提案されている試験方法の活用が妥当である。そこで，化学繊維から構成されるネット，シート，マットなど（ジオシンセティック）を対象とした試験方法から，今回開発したシートに適用可能であり，実際に損傷や変形が生じる状況や機構(**表－6.3**の作業概要参照)を模擬できるものを選定した結果を**表－6.3**に併記した。「侵食防止効果の確保」を目的とした項目では，「衝撃による破壊に対する耐力」を除いて，上記の条件を満たす試験方法を選定することができた(試験方法の詳細にいては6.2参照)。「引っ張りに対する耐力」については，２種類の試験方法を選定したが，これらについては6.2において，**表－6.3**の備考に示したように適正を判断して，どちらか一つに絞り込むこととした。適切な試験方法がないものについては，「作業概要」で見られた状況をそのまま再現するような試験方法を新たに考案することとした。

表－6.3を参照すると，JIS の試験方法を用いるのは「侵食防止効果の確保」に分類される項目のみであり，新たな試験方法を作成するとしたのは「施工性の確保」に多いという傾向が見られる。これは意図的に行ったものである。つまり「侵食防止効果の確保」というシートを用いた侵食防止工の実現の根幹に関わる重要な項目については，定量的にはっきりとした基準を設けるという方針としたため，その基準値の測定に主観が入らない JIS の試験方法を極力用いることとした。施工性については，そもそも定量化の難しい「施工しやすさ」が評価対象となっていることから，実際の施工状況を再現できる試験によって定性的に評価を行うこととした。

6.2　供用時に損傷が発生する条件とその強度設定における取り扱い

供用時については，**表－6.2**に示したようにシートの「損傷」が発生すると懸念される状況は絞り込めたが，発生する条件が明確ではない。そこで本節では，まず実際に生じうる範囲で条件を変化させて，**表－6.2**に示した状況を再現した実大実験を行い（6.2.1参照)，損傷の発生状況および維持管理作業上の不具合の有無について調査を行った結果をまとめて示す（6.2.2,6.2.3参照)。その結果から，強度特性の設定にあ

たっての供用時の損傷・不具合の発生状況の取り扱いについて考察した結果をまとめて示す(6.2.4参照)。

6.2.1 実験概要

本実験では，草刈り・集草機，自動車，重機(バックホウ)を対象とした。実験に用いた機械および重量などを**写真－6.4**に示す。草刈り機は，写真で見られる草刈り用のユニットを集草用ユニットに交換することで，集草機になる。また実験に用いた草刈り機の接地圧(0.208kgf/cm^2)は，現地で使用されている草刈り・集草機の接地圧の範囲(河川管理担当者を対象としたアンケート調査から得られた結果：**表－6.2**参照)の最大値とほぼ一致している。自動車については，のり面への登坂性が優れているRV車を用いることとした。重機は，シートの施工に用いるバックホウを使用し，誤ってシート上を走行してしまった場合についても，どの程度の損傷が生じるか確認することとした。

実験は，a)シートを敷設した盛土のり面(シート上に厚さ約3 cmの覆土と張り芝が行われている)に実際の走行状況を模擬して走行させる場合(**写真－6.5**参照)と，b)水平な地面に多種のシートを並べてその上を走行させる場合(**写真－6.6**参照)の2種類を走行状況に対して，シート損傷の有無について目視による観察とシートの変形量や強度低下について測定を行った。

実験に用いたシートは，a)の実験は第一次プロトタイプ8種，b)については**表－6.4**に示すように全31種類(a)と同じ8種と第二次プロトタイプの23種)である。

6.2.2 草刈り機の走行に対する損傷

実験a)の走行状況として，**写真－6.5**に示したように草刈り・集草を行いながら河道縦断方向に走行(以下，直線走行と呼ぶ)する場合と，草刈り・集草の実施場所を変えるために旋回する場合を行った。直線走行では，草刈り機のキャタピラがほぼ同じ場所を踏みつけるようにして100回走行した。なお，10回走行につき1回のみ草刈りを行いながら走行した。走行終了後には，**写真－6.7**に示すようにのり尻に近い側ではっきりと轍が形成された。また，同じ場所を短時間で繰り返し草刈りしたため，シバが所々剥げるとともに，草刈り時に地表面の砂や小石がはじき飛ばされる状況となった。しかし，シートは地表面に露出することがなく，また掘り返してシートを見たところ損傷は全く認められなかった。

旋回させる場合も，シートが露出してなければ全く損傷が認められなかった。そこで**写真－6.5**に示すようにシートを露出させた状態にして，同じ場所で5回続けて旋回させたところ，**写真－6.7**に見られるように深くそしてキャタピラで強くせん断されたのり面状況となった。このようになったとき，ヘチマタイプ(B－2－2)のシート表面で構成材が解れたり，ネットタイプ(A－8－2)ではネット材が破断する状況が確認された。以上より，シートが露出している場所で繰り返し旋回を行わなければ，草刈りによってシートが破損することはないと考えられる。

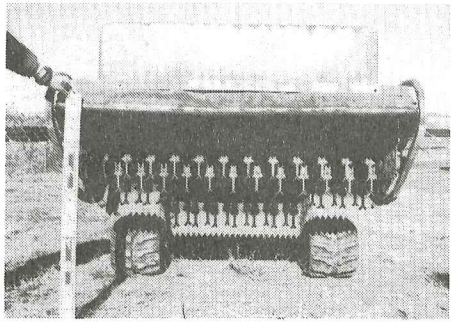
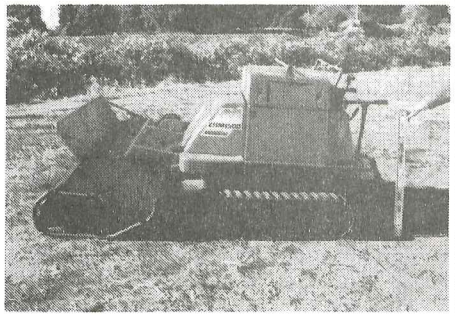
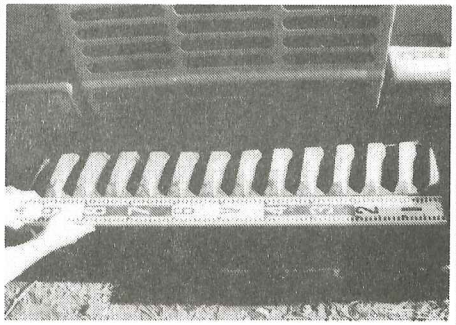
以上の結果が他のシートにも同様に見られるかどうかを実験b)を行って確認した。土砂充填ありと土砂充填なしの2種類の状態について，実験a)と同じく100回走行させた。損傷状況を観察した結果を**表－6.4**に併記した。観察項目は，切断の程度と厚さ変化の程度の2つであり，**表－6.4**に注記したようにA～Dの4段階に評価した。土砂充填した場合には，やはりほとんど損傷が見られなかった。しかし，土砂充填なしの場合には，50回走行した時点で引っ掛け強度の小さい(15kgf以下)シートで連続した長い切断(C評価)が見られた。100回走行を終えた時点では更に損傷が進み，シートが圧縮されたまま元の厚さに戻ら

<table>
<tr><td colspan="3">－ 草刈り機 －</td><td rowspan="2">機械質量：1,500kg

全長：2,690mm
全幅：1,310mm
全高：1,340mm

クローラ全長：1,500mm
クローラ設置長：1,200mm
履帯幅：300mm

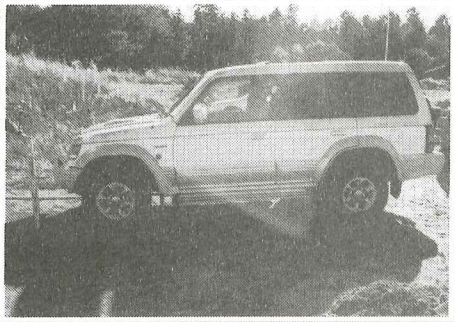
接地圧：20.4kPa（0.208kgf/cm²）

実験時走行速度：約 0.81m/s</td></tr>
<tr><td>  </td><td>  </td><td>  </td></tr>
<tr><td>正面（刈刃部持ち上げ状態）</td><td>側面</td><td>クローラ表面</td></tr>
<tr><td colspan="3">－ オフロード車（4WD） －</td><td rowspan="2">機械質量：2,255kg

全長：4,735mm
全幅：1,875mm
全高：1,855mm
ホイールベース：2,545mm

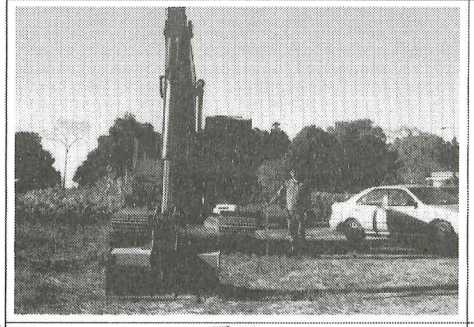
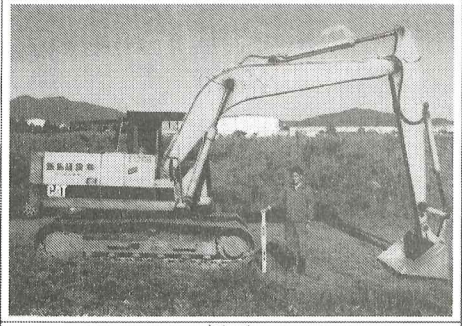
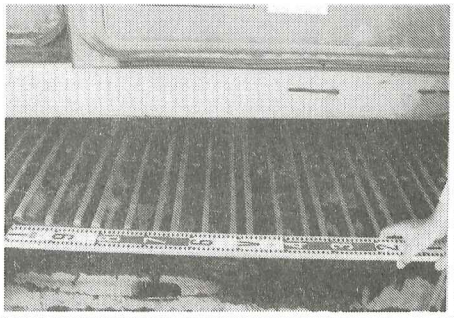
タイヤ幅：265mm（設置長約 20cm）

接地圧：104.27kPa（1.064kg/cm²）

実験時走行速度：約 1.18m/s</td></tr>
<tr><td>  </td><td>  </td><td>  </td></tr>
<tr><td>正面</td><td>側面</td><td>背面</td></tr>
<tr><td colspan="3">－ 重機 －</td><td rowspan="2">機械質量：14.04t

キャタピラ全長：3,530mm
キャタピラ設置長：2,930mm
キャタピラ幅：700mm

接地圧：33.54kPa（0.342kgf/cm²）

実験時走行速度：約 0.42m/s</td></tr>
<tr><td>  </td><td>  </td><td>  </td></tr>
<tr><td>正面</td><td>側面</td><td>キャタピラ部</td></tr>
</table>

写真－6.4　実験に用いた草刈り機，自動車，重機

― 草刈り機走行 ―



草刈り機走行状況



草刈り機走行状況（接地部）

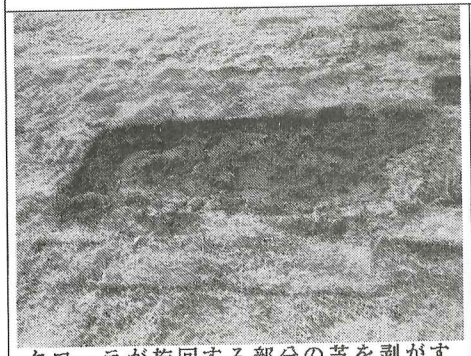


草刈り状況

◇試験方法
堤防のり面の上部において 50 往復、10 回に 1 回は実際に草刈りを行いながら走行

◇試験後状況
・多少轍が生じる。
・草刈りを行うことにより表面の土や小石が飛ぶが、シートへの引っ掛かり等は見受けられなかった。

― 草刈り機旋回 ―



クローラが旋回する部分の芝を剥がす



草刈り機旋回



草刈り機旋回

◇試験方法
安全側の評価を行うため、シートが露出している状態で草刈り機が旋回した場合を想定した。実験ではクローラ設置面積程度の芝を外し（左側写真）、この位置に旋回時外力が最大となるのり尻側のクローラが乗り上げるように走行した。走行回数は 5 回とした。

― オフロード車乗り入れ ―



オフロード車乗り入れ状況



オフロード車乗り入れ状況

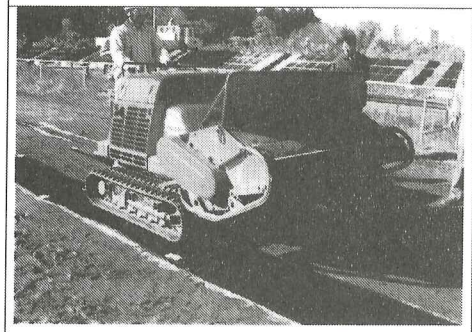


オフロード車乗り入れ状況

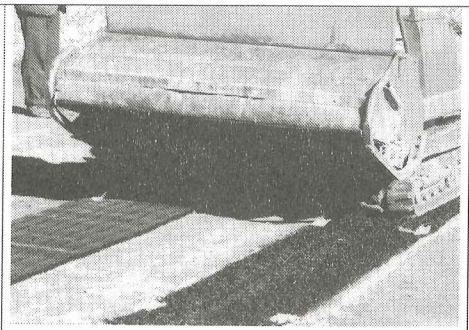
◇試験方法
のり面に対して垂直に 10 回乗り上げを行った。
乗り上げの程度は、前後輪とものり面に乗り上げるまでとした。

写真−6.5　盛土のり面上での走行状況

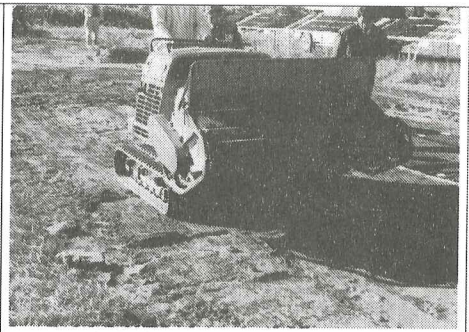
－ 草刈り機走行ゾーン －



土砂未充填シート上走行状況



土砂未充填シート上走行状況（接地部）



土砂充填シート上走行状況

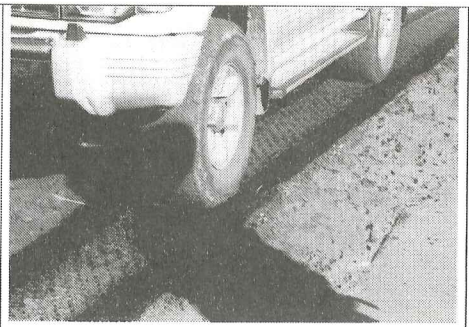
土砂未充填シート走行状況
●シート端部通過時に多少シートが持ち上がる。

土砂充填シート走行状況
●走行後、シート上の土にクローラのパターン跡が残る程度で安定した走行可能
●何回も繰り返し走行すると、若干轍が出来る。

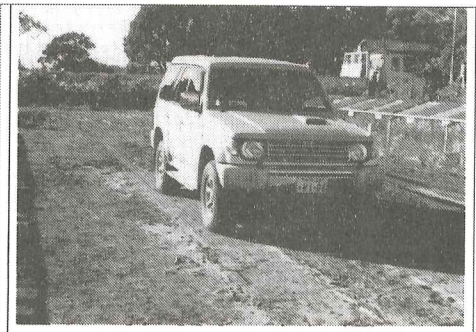
－ オフロード車（4WD）走行ゾーン －



土砂未充填シート上走行状況



土砂未充填シート上走行状況（接地部）

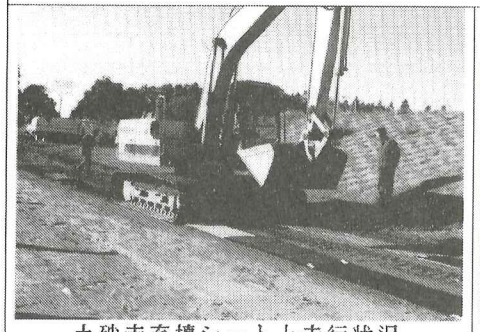


土砂充填シート上走行状況

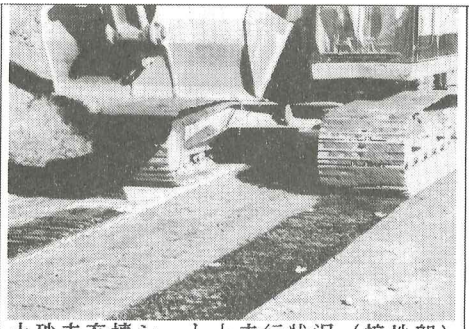
土砂未充填シート走行状況
●繰り返し走行により轍が生じる。
●タイヤの載荷によりシートが凹む

土砂充填シート走行状況
●繰り返し走行により轍が生じる。

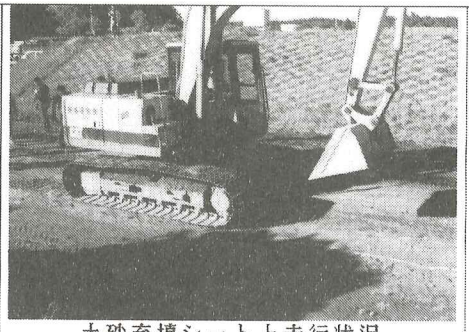
－ 重機走行ゾーン －



土砂未充填シート上走行状況



土砂未充填シート上走行状況（接地部）

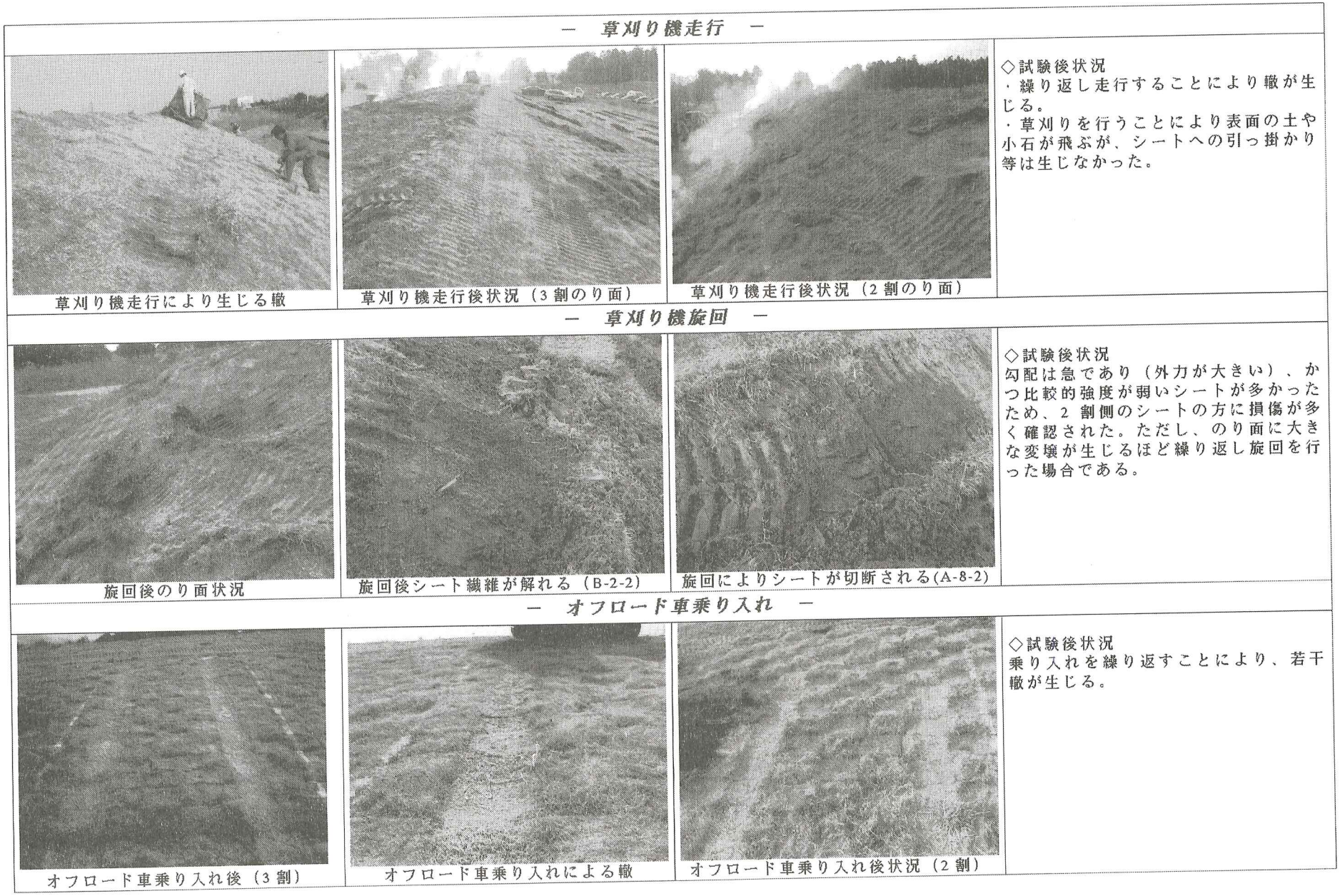


土砂充填シート上走行状況

土砂未充填シート走行状況
●シート端部の通過時に端部のめくれ上がりが生じた。

土砂充填シート走行状況
●走行後、覆土にキャタピラの跡が残る。

写真－6.6　水平な地面に敷設したシート上で走行状況



写真－6.7　草刈り機・自動車の走行で形成された轍

表－6.4　供用時実験に用いたシートの種類と実験結果

	グループ	シート名	試験前の厚さ(mm)	厚さ測定結果(mm)			厚さ回復率(%)			土砂未充填		土砂充填	土砂未充填		土砂充填	土砂未充填		土砂充填	備考
				土砂無	土砂無	土砂無	土砂無	土砂無	土砂無	重機１往復後	重機３往復後	重機３往復後	ＲＶ５往復後	ＲＶ１０往復後	ＲＶ１０往復後	草刈り機25往復後	草刈り機50往復後	草刈り機50往復後	
				重機3往復	RV10往復	草刈50往復	重機3往復	RV10往復	草刈50往復	損傷程度	損傷程度	損傷程度	損傷程度	損傷程度	損傷程度	損傷程度	損傷程度	損傷程度	
第一次	ヘチマ	A-1-4	12.9	11.5	11.5	10.5	89.1	89.1	81.4	A	A	A	A	A	A	A	A	A	
		A-3-3	22.2	23.5	21.5	20.0	105.9	96.8	90.1	A	A	A	A	A	A	A	A	A	
		B-2-2	34.8	29.0	27.5	29.0	83.3	79.0	83.3	A	A	A	A	A	A	A	A	A	
	ネット	A-4-2	28	27.0	22.5	27.5	96.4	80.4	98.2	C	B	D	C	C	C	C	C	A	
		A-8-2	42.8	26.5	28.5	29.0	61.9	66.6	67.8	C	B(圧着部ほつれ)	B	A	A	A	C	B(圧着部ほつれ)	A	
	編み物	C-3-2	31.4	33.0	31.5	33.0	105.1	100.3	105.1	A	A	A	A	A	A	A	A	A	
	織物	D-1-4	25.8	27.0	29.5	26.5	104.7	114.3	102.7	A	A	A	A	A	A	A	A	A	
		D-3-3	14.3	8.5	10.5	7.0	59.4	73.4	49.0	A	A	A	A	A	A	A	A	A	
第二次	ヘチマ	A-1（B）	28.00	29.0	27.5	24.0	103.6	98.2	85.7	B（ほつれる）	B	A	A	A	A	A	A	A	
		A-1(B改)	16.00	15.0	16.5	18.0	93.8	103.1	112.5	B	B	A	A	A	A	A	A	A	
		A-1（A）	28.00	29.5	26.5	30.5	105.4	94.6	108.9	B	B	A	A	A	A	A	A	A	
		A-1(特A-2)	28.00	35.0	35.5	32.5	125.0	126.8	116.1	B	B	A	A	A	A	A	A	A	
		A-1(特A-3)	28.00	32.0	36.0	31.5	114.3	128.6	112.5	A	B	A	A	A	A	A	A	A	
		A-2（改）	15.00	12.5	17.5	15.5	83.3	116.7	103.3	D	D	A	A	A	A	B	C	A	
		A-3-5	25.00	22.0	24.0	23.0	88.0	96.0	92.0	A	A	A	A	A	A	A	A	A	
		A-6	27.76	24.5	25.5	23.5	88.3	91.9	84.7	A	A	A	A	A	A	A	A	A	
		B-A1	21.00	23.5	24.0	23.0	111.9	114.3	109.5	A	A	A	A	A	A	A	A	A	
		B-A2	30.00	33.0	26.0	25.0	110.0	86.7	83.3	A	A	A	A	A	A	A	C	A	
		B-B	21.00	17.5	19.5	19.0	83.3	92.9	90.5	A	A	A	A	A	A	A	C	A	
	ネット	A-4-2a	26.70	27.5	29.5	25.0	103.0	110.5	93.6	A	A	A	A	A	A	A	A	A	
		A-4-2b	26.70	26.0	27.0	25.5	97.4	101.1	95.5	A	A	A	A	A	A	A	A	A	
		A-4-4a	27.50	29.5	28.0	29.5	107.3	101.8	107.3	A	A	A	A	A	A	A	A	A	
		A-4-4b	28.40	29.5	27.5	28.0	103.9	96.8	98.6	A	A	A	A	A	A	A	A	A	
		A-8-3	29.00	30.5	31.5	31.0	105.2	108.6	106.9	C	B(圧着部ほつれ)	B(圧着部ほつれ)	A	B(圧着部ほつれ)	B	B(圧着部)	B(圧着部ほつれ)	B	
		A-8-4	29.00	24.0	14.5	35.0	82.8	50.0	120.7	C	B(圧着部ほつれ)	A	A	B(圧着部ほつれ)	A	B(圧着部)	B(圧着部ほつれ)	A	
	編み物	C-1（改）	30.00	26.5	30.0	24.0	88.3	100.0	80.0	A	A	A	A	A	A	A	A	A	
		C-3-5	24.90	24.5	20.5	26.5	98.4	82.3	106.4	A	A	A	A	A	A	A	A	A	
		C-3-6	24.40	25.0	25.5	24.0	102.5	104.5	98.4	A	A	A	A	A	A	A	A	A	
		C-3-7	24.60	25.5	25.0	25.0	103.7	101.6	101.6	A	A	A	A	A	A	A	A	A	
	織物	D-3(1)	18.01	16.0	12.5	9.0	88.8	69.4	50.0	A	A	A	A	A	A	A	A	A	
		D-3(2)	17.97	10.5	11.5	8.0	58.4	64.0	44.5	A	A	A	A	A	A	A	A	A	

凡例：　A:損傷なし、B:構成材が部分的に切断する、C:構成材が連続して孔が開く、D:孔が開くとともに切断部が変形する

ないシート(A－4およびD－3)が見られた。

以上の実験結果から，シートに土砂が充填されていれば，草刈り機の走行による損傷は防止できると判断される。また，シートが一部露出していても繰り返し多くの走行回数を加えなければ，ほとんど損傷しないようである。

6.2.3　自動車および重機の走行に対する損傷

自動車を用いた実験a）では，**写真－6.5**に示したようにのり尻からのり面の途中まで登坂して戻るという往復走行を，車輪がほぼ同じ場所を踏みつけるようにして10回繰り返した。走行終了後には，**写真－6.7**に示すように草刈り機の場合よりは浅いものの轍が形成された。轍の場所を掘り返してシートを目視したところ，損傷は全く認められなかった。しかし，轍がより深くなる状態やシートが露出した状態では損傷が生じる可能性があるので，実験b）によって確認することとした。この実験でも10回繰り返して走行したが，その結果**写真－6.6**に示したように深い轍が形成された。草刈り機の走行実験と同様に切断の程度と厚さ変化の程度について観察した結果を**表－6.4**に併記した。実験結果は草刈り機走行実験と同様であり，シートに土砂が充填されていれば損傷は防止できると判断される。

また，重機を用いた実験b）では6回走行させたが，土砂充填してあれば草刈り機および自動車と同様に損傷はほとんど見られなかった（**表－6.4**参照）。土砂充填なしの場合には，走行終了後にはシートがピンからはずれてしまう場合が多かった。これは重機の走行によってシートが地面にめり込むように大きく変形するとともに，キャタピラにひっぱられって大きく移動するため，ピンの部分でシートが破断したからである。また，シート表面にはキャタピラが積載した場所で切断や変形も多く見られた。以上の結果より，轍が非常に深くならなければ土砂充填されている場合にのみ重機を走行させても損傷はないと考えられるが，充填なしの状態(施工時など)では走行を避けるべきと判断される。

6.2.4　強度設定での取り扱い

再現実験の結果より，土砂充填さえしてあれば重機が走行してもシート損傷が生じないこと，また草刈り・除草作業にも支障がないことが明らかとなった。この結果を受けて，**表－6.3**に要求性能としてあげた「供用時に損傷しない」ことは，他の要求性能に比較して重要度が低くいと判断できる。すなわち，本節で対象とした供用時以外の損傷発生状況によって決定される強度を有していれば，供用時の損傷は防止できると考えることとする。

6.3　施工・撤去実験に基づく強度・加工性の試験法の提案

第一次プロトタイプシート(**表－6.5**，**写真－2.1**参照)を実験対象として，施工・撤去実験を行って損傷程度および施工性を調査した。その結果と**表－6.3**に示したJIS規格または新規に提案する試験法によって測定した指標とを比較することで，シートの強度・加工性に対する要求性能の有無を確認できる試験法を提案する。

6.3.1　引っ張り力に対する損傷防止に必要な強度

最初に**表－6.3**に示したように選定した引っ張り試験と引っ掛け試験の試験法とその差異について調べ

表－6.5　施工・撤去実験に関する実験に用いたシートとその結果

シート		小規模施工実験				耐衝撃性実験		シート撤去	シート敷設	摘　要
種類	名称	折目の損傷	ピン周り破損	ピン固定性	滑り易さ	ハンマー衝撃	スコップ衝撃	破損の程度	(kgf/60cm)	
ヘチマ	A-1-1	A	D	B	A	B	D	D	5	
	A-1-2	A	D	B	A	B	D	C	10	
	A-1-3	A	D	A	A	B	D	C	15	
	A-1-4	A	D	A	A	D	D	A	30	大型施工実験
	A-2-1	A	D	D	A	A	B	D	0	
	A-2-2	A	D	B	A	B	C	D	0	
	A-2-3	A	A	B	A	B	D	D	0	
	A-2-4	D	D	A	A	B	C	D	0	
	A-3-1	A	A	B	A	A	C	D	20	
	A-3-2	A	A	A	A	C	A	C	18	
	A-3-3	A	A	A	A	A	A	C	20	大型施工実験
	A-3-4	B	D	A	A	A	A	A	30	
	A-6-1	A	D	B	A	D	D	C	10	
	A-6-2	A	D	B	A	D	D	C	5	
	A-6-3	D	D	A	B	D	D	D	5	
	A-6-4	D	D	A	B	D	D	D	10	
	A-7-1	A	D	D	B	B	C	D	25	
	A-7-2	A	D	B	B	C	C	C	25	
	A-7-3	B	D	D	D	D	D	C	23	
	A-7-4	D	D	A	D	D	D	D	5	
	A-9-1	A	D	B	D	D	D	D	10	
	A-9-2	A	D	B	D	D	D	D	15	
	A-9-3	A	D	A	D	D	D	C	7	
	A-9-4	D	D	A	D	D	D	D	7	
	B-1-1	A	A	A	A	A	C	A	30	
	B-1-2	A	A	A	A	A	A	A	30	
	B-1-3	A	A	A	A	A	A	A	30	
	B-1-4	A	A	A	A	A	A	A	30	
	B-2-1	A	A	B	A	B	C	A	30	
	B-2-2	A	A	A	A	B	C	A	30	大型施工実験(25mm)
	B-2-3	A	A	B	A	A	A	A	30	
	B-2-4	A	A	B	A	A	A	A	30	
	B-3-1	A	D	B	A	B	C	A	30	
	B-3-2	A	D	A	A	C	C	A	30	
	B-3-3	A	D	A	A	C	C	A	30	
ネット	A-4-1	A	D	B	D	D	D	A	30	
	A-4-2	A	D	B	D	D	D	A	30	大型施工実験(96%)
	A-4-3	A	D	A	D	D	D	A	30	
	A-4-4	A	D	B	D	D	D	A	30	
	A-4-5	A	D	A	D	D	D	A	30	
	A-4-6	A	D	A	D	D	D	A	30	
	A-5	A	A	B	B	C	C	A	30	
	A-8-1	A	A	B	B	A	A	A	30	
	A-8-2	A	A	B	B	A	A	A	30	大型施工実験
編み物	C-1-1	A	A	B	D	A	A	A	30	
	C-1-2	A	A	B	D	A	A	A	30	
	C-2-1	A	A	B	B	A	A	A	30	
	C-2-2	A	A	B	B	A	A	A	30	
	C-3-1	A	A	B	B	A	A	A	30	
	C-3-2	A	A	A	B	A	A	A	30	大型施工実験
	C-3-3	A	A	A	B	A	A	A	30	
	C-3-4	A	A	B	B	A	A	A	30	
織物	D-1-1	A	A	B	D	A	A	A	30	
	D-1-2	A	A	B	D	A	A	A	30	
	D-1-3	A	A	B	D	A	A	A	30	
	D-1-4	A	A	B	D	A	A	A	30	大型施工実験
	D-1-5	A	A	B	D	A	A	A	30	
	D-1-6	A	A	B	D	A	A	A	30	
	D-2	A	A	B	B	A	A	A	30	
	D-3-1	A	A	B	D	A	A	A	30	
	D-3-2	A	A	B	D	A	A	A	30	
	D-3-3	A	A	B	D	A	A	A	30	大型施工実験
	D-3-4	A	A	B	D	A	A	A	30	

凡例：　折れ目の損傷：A:損傷が認められない、B:折り曲げた凸側で一部切断する、D:折り曲げ部にそって完全に切断される
ピン周り破損：A:損傷なし、D:切断にともなって孔が開く
ピンによる固定性：A:ピンを打ち込んだ孔が広がらずがたつき無く固定できる、B:ピン周りでシートが浮かび上がるが固定できる
D:シートがピンから容易に離脱する
滑り易さ：A:滑りにくく歩きやすい、B:多少滑るが歩行に支障はない、D:滑りやすく歩行するのに注意を要する
耐衝撃性実験：A:損傷が認められない、B:破断はないがシートが凹む、C:構成材が切断するが貫通しない、D:貫通する
シート撤去：A:切断なし、C:一部切断、D:破断

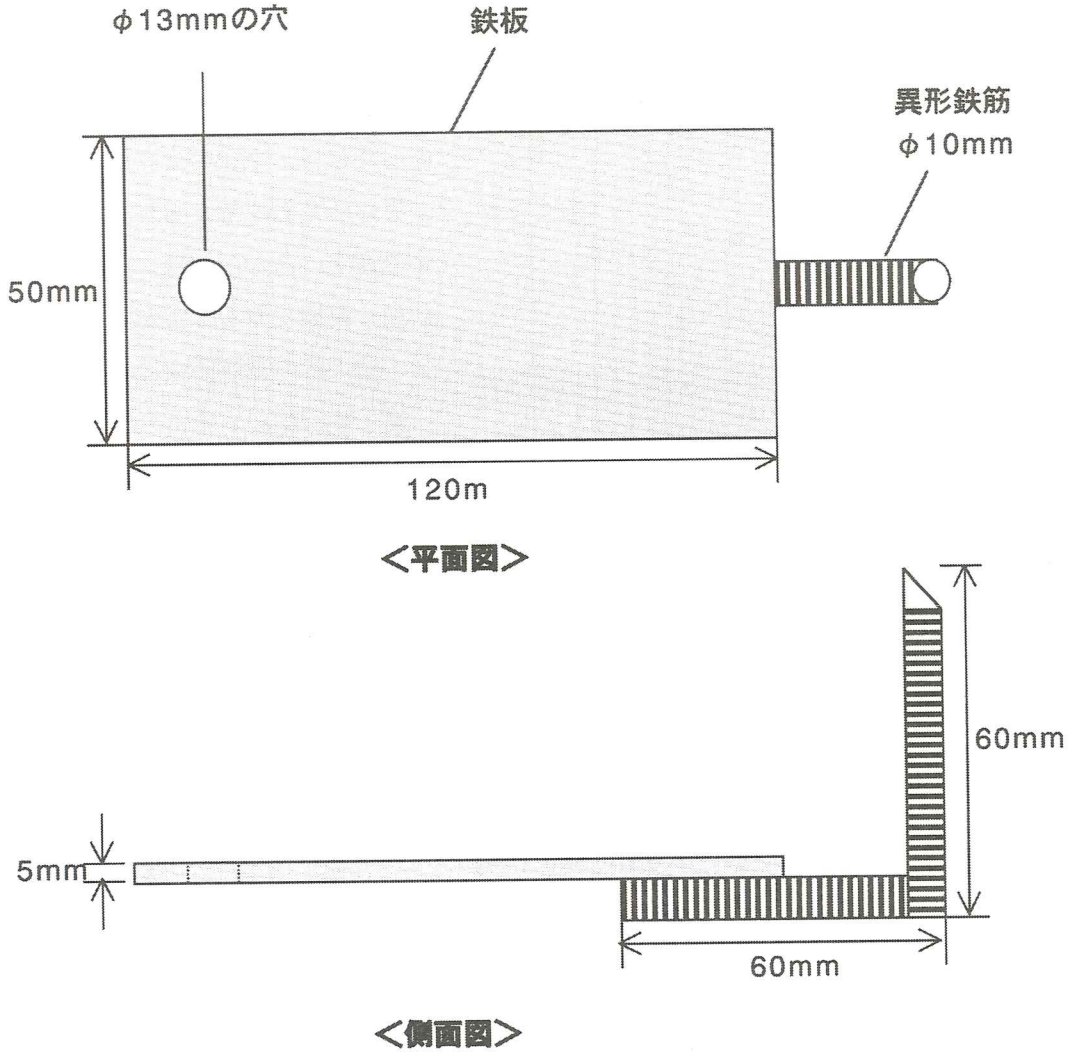
る((1)参照)。次に最も大きな引っ張り力が作用すると予想される施工時および撤去時に必要とされる強度を明らかにするとともに ((2),(3)参照)，その強度で出水時および供用時に生じる引っ張りによる損傷が防げるか確認する((4)参照)。最後に以上の結果をまとめて引っ張りに対する損傷防止に必要な強度とその試験・評価法を示す((5)参照)。

(1) 引っ張り試験と引っ掛け試験の差違

引っ張り試験と引っ掛け試験の試験条件を表－6.6に示す。両試験とも一定速度で伸ばしていくところは同じであるが，供試体の固定法が異なる。すなわち，引っ張り試験では供試体の全幅に等しく引っ張り

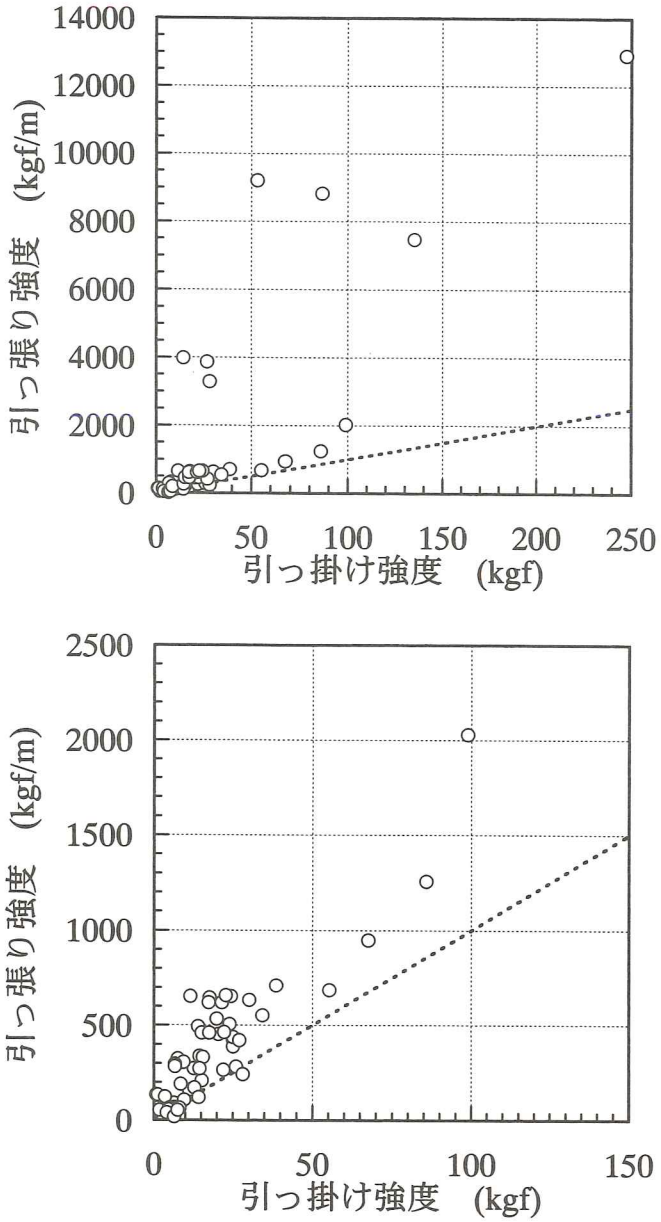
表－6.6　引っ張り試験(JIS L1096, JIS L3204)と引っ掛け試験(JIS L1043)の試験条件

項　　目	引っ張り試験	引っ掛け試験
試験機	定速伸長型引っ張り試験機	
試験温度	20±2℃	
試験湿度	65±2%	
試験方法	JIS L 1096, JIS L 3204	JIS L 1043
試験片	幅 50mm	幅100mm,長さ200mm
チャック(フック)間隔	100mm	
引っ張り速度 (歪み速度)	100mm/min (100%/min)	200mm/min (200%/min)
試験体の数	3個	



図－6.4　引っ掛け試験に用いるフック(金具)

応力が作用するように，試験体全幅を万力で挟むことによって固定するが，引っ掛け試験では図－6.4に示す諸元を有するフックにシートを引っ掛けて固定する。そのため引っ掛け試験では，フックに引っ掛け



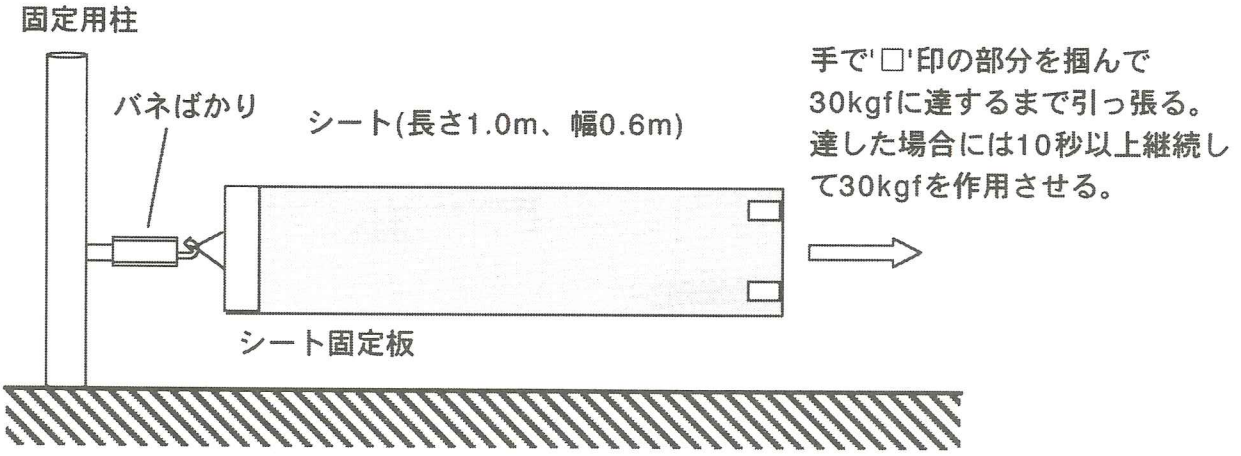
図－6.5　引っ張り強度と引っ掛け強度の比較

るためシートに設けた孔周辺に応力集中が生じ，フックに引き裂かれるようにしてシートが破損する。上記の差異に基づいて両試験が表しうる現地の状況を想定すると，引っ掛け試験はピンや根茎などの周りからシートが引き裂かれる場合に，引っ張り試験は前記のような応力集中が生じている部分から離れた場所で破断する場合に相当する。

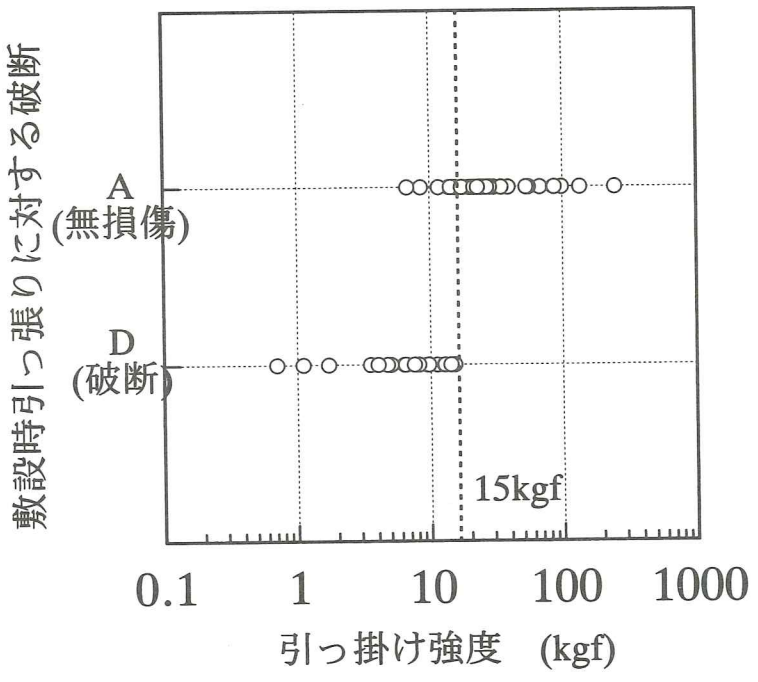
引っ張り試験と引っ掛け試験によって測定した最大強度（以下，引っ張り強度と引っ掛け強度と呼ぶ）を比較した結果を図－6.5に示す。引っ掛け強度の増加に伴って引っ張り強度が増加する傾向が見られるが，引っ張り強度（kgf/m）＞引っ掛け強度（kgf）×10となる範囲でばらついている。このような結果となったのは，上記のようにシートの破断形態が異なるためと考えられる。したがって試験法の選定にあたっては，実際の破壊機構をより良く模擬できることが重要となる。

⑵　施工時の破断防止に必要な強度

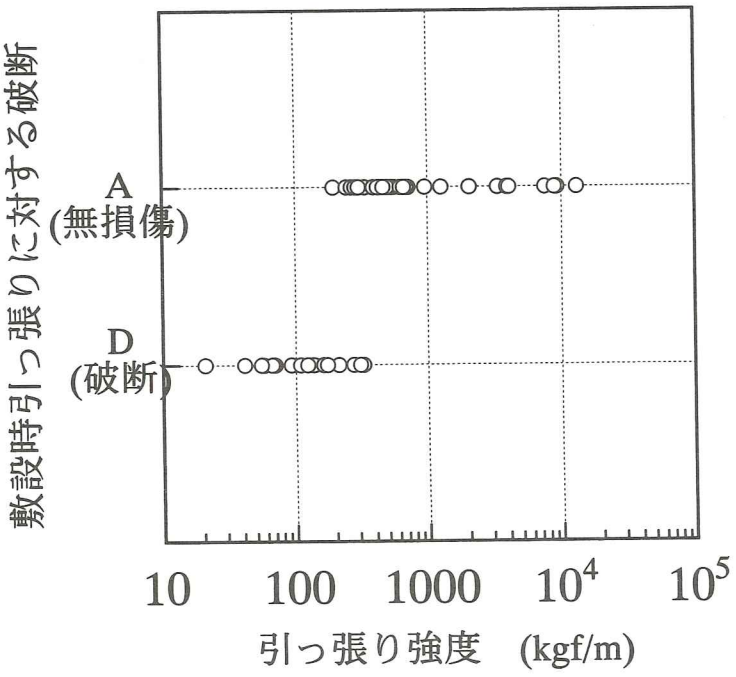
施工時には，シートを所定の場所に移動させるためにシートを強く引っ張ることがあり，場合によってはシートが破断する場合が見られた（表－6.1参照）。この作業状況を図－6.6に示すように再現する実験を行い，引っ張り



図－6.6　引っ張りによるシート破断現象を調べるための再現実験の状況



図－6.7　最大30kgfまで引っ張り力を作用させた場合のシート破断の有無と引っ掛け強度の関係



図－6.8　最大30kgfまで引っ張り力を作用させた場合のシート破断の有無と引っ張り強度の関係

力の大きさと破断状況について調査した。実際の施工では幅2m程度のシートを用いるが，この実験では幅60cmとした。この幅は，作業者がシートを強く引っ張る際にシートを掴む両手の間隔(肩幅程度)にほぼ等しい。シートを掴んだ手の前方周辺で上記の幅程度の範囲でシートが大きく延びて破断しやすくなること，更に引っ張り力の測定の容易性(図－6.6に示したようにバネ秤で測定するための装置の構造など)も考慮して決めた幅となっている。

まず，実際にシートを引っ張る作業をしてみてたところ，作業者が腕を伸ばすとともに体を少し反らして背面側に体重をかけながら引っ張る状況だと，概ね30kgfの力になった。実際の施工でも作業者が強くシートを引っ張るには上記のような姿勢であったこと，また実際に引っ張ってみた感触としてもシートを所定の位置に移動させるためにこれ以上の力を掛ける必要性を感じなかったことから，引っ張り力を最大30kgfまで作用させてシートの破断の有無と形態を調べた。

破断形態としては，シートを掴んだ手の周辺で引き裂かれる場合が多くみられた(表－6.1に示したように実際の施工でも同様)。この発生原因は手周辺での応力集中による引き裂きと考えられることも考慮すると，引っ掛け試験の試験状況と似ている。そこで，最大30kgfまで引っ張り力を作用させる場合のシートの破断の有無と引っ掛け強度の関係を図－6.7に示すように整理したところ，引っ掛け強度が15kgfを境にして破断の有無が分けられることが分かった。この値は，片手の引っ張り力に等しい。このことも，引っ掛け試験が実際の破断現象を再現しうることを裏付けるものである。

また，引っ張り強度について同様の整理を図－6.8に示す。引っ掛け強度の場合と同様に，破断ありの

最大値（約400kgf/m）を境とすると，概ね損傷の有無を判別できそうである。しかし，境界とした値以下に含まれる無損傷であったシートの数を比較すると，引っ掛け試験の方が引っ張り試験より少なく，すなわち評価法として優れていることが分かる。

以上の結果より，施工時の破断防止に必要な耐力は，引っ掛け強度15kgf 以上として与えられる。

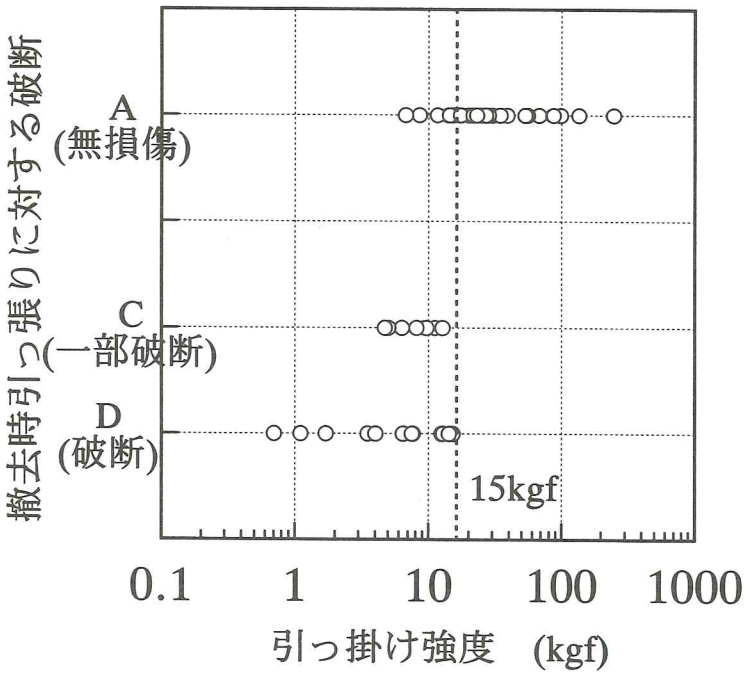
⑶　撤去時の破断防止に必要な耐力

6.1.1⑸に示したように土砂の振り落としやトラックへの積載のために，土砂充填されたシートの一部をつまみ上げるようにして持ち上げる際に破断しないだけの耐力がシートに求められる。地中からシートを剥ぎ取る際，バケットの幅（約1.6m）にシートが切断される。したがって，持ち上げた際にぶら下がるシートの長さは概ね１m程度となった。このような状況でもシートが切断されない場合には，小片化の問題が見られなかった。



写真－6.8　シートの小規模撤去実験の様子

以上の観察状況を考慮して，**写真－6.8**に示すように地面に敷設した状態で土砂充填されている幅60cm のシートを約１m程度人力によって持ち上げるという小規模な撤去実験を行った。この実験で観察された破断形態は，⑵と同様に手元での破断（最も多くみられた）と，**写真－6.8**に見られるように引っ張り方向と平行に幾筋にも裂断する場合の２種であった。また破断には至らないものの，シートが部分的に大きく延びて一部切断する場合も見られた。これらの破断状況は実大の撤去実験で見られたものとよく似ている。



図－6.9　撤去時の破断の程度と引っ掛け強度の関係

上記の破断状況をA：切断なし，C：一部切断，D：破断の３段階に分けて評価し（**表－6.5**参照），それと引っ掛

け強度との関係を調べた結果を図－6.9に示す。施工時と同様に（図－6.7参照），引っ掛け強度15kgfを境にして切断発生の有無が分けられる。施工時と同様な強度になったのは，撤去実験でも両手でシートを引っ張り上げる力が以下のように概算されるように最大で30kgf程度になっていたためと推察される。

（両手で引き上げるのに必要な力）≒（充填土砂の単位体積重量）×（幅）×（持ち上げた長さ）×（厚さ）

$= 2000\text{kgf/m}^3 \times 0.6\text{m} \times 1.0\text{m} \times 0.02 \sim 0.03\text{m}$

$= 24 \sim 36\text{kgf}$

表－6.7　実大撤去実験での小片化の有無と引っ掛け強度の関係

シート名	引っ掛け強度(kgf)	小片化の有無
A-1-4	10	あり
A-3-3	11	あり
A-4-2	10	あり
A-8-2	15	あり
B-2-2	27	なし
C-3-2	29	なし
D-1-4	30	なし
D-3-3	25	なし

注)引っ掛け試験は、施工後約1年経過した時点で簡易試験法(写真-7.1参照)で測定した値である。試験の詳細については7.1.2(2)参照。

また，表－6.7に6.1.1.⑸に示した実大の撤去実験での小片化の有無とそのシートの引っ掛け強度の関係を示す。この場合にも15kgfを境にして，小片化の有無が区分できそうである。

以上の結果より，想定したような撤去を行う際には，破断を防止する耐力として引っ掛け強度15kgfが少なくとも必要とされると考えられる。

⑷　供用時および出水時に対する耐力

供用時における破断防止の耐力の検討対象としては，6.1.1⑵に示した考察および6.2.4に示した取り扱いを受けて，表－6.3に示したモグラなど動物による掘削のみとした。さらに6.1.1⑵で阿部の報告[1]を参考にして，モグラがシートを貫通して掘削しようとしたとき，前足をシートに引っ掛けて5 kgf程度の力で破ろうとすると推定した。この推定に基づけば，⑵,⑶に示した検討のとおり引っ掛け強度を15kgf以上有するシートであれば，掘削時の切断が防止できると思われる。したがって，現段階では供用時に必要な耐力は施工時および撤去時と同値として考えることとする。なお供用時の必要耐力については今後，実堤防にシート施工して実態調査を行なって明らかにする必要がある。

出水時の場合には6.1.1⑶に示したように，シートには地面に密着して平坦面を保つとともに充填されていた土砂が全て流失した状態で，シートを流れ方向に引っ張る流体力（せん断力）が作用すると考えられる。このような状態で作用する最大のせん断力τ_{max}は，最大流速（4 m/s：留意事項（1.4.3⑵参照）に露出頻度を抑えることを目的として示した値）から以下のように概算できる。

τ_{max} =（水の密度）×（適用流速の上限値/流速係数）^{2}

$= 1000\,(\text{kg/m}^3) \times (4\ (\text{m/s})/10)^2$

$= 160\,(\text{N/m}^2) \fallingdotseq 16\,(\text{kgf/m}^2)$

全く植生が繁茂していない状態でシートにτ_{max}が作用したと想定すると，シートの流失を防ぐのはピンに対するシートの引っ掛け強度である。ピンは1 m間隔で打設する（巻末資料1参照）こととしたので，ピン1本あたりには約16kgf（$= \tau_{max} \times 1\ \text{m}^2$）が作用することになる。この値は，施工・撤去時の必要耐力15kgfとほぼ同値である。上記の概算値の算出にあたっては流速係数として小さめの値を用いたこと，また植物の根茎による固定を無視していることなどを考慮すると，施工・撤去時の必要耐力で十分にシート

の切断を防げると考えられる。なお，シートには約16kgf/m（$= \tau_{max}$ ×流れ方向のピン間隔1m）の引っ張り力が作用することになるが，シートの引っ張り強度は引っ掛け強度の10倍以上ある（図－6.5参照）ので，破断することはないと考えられる。

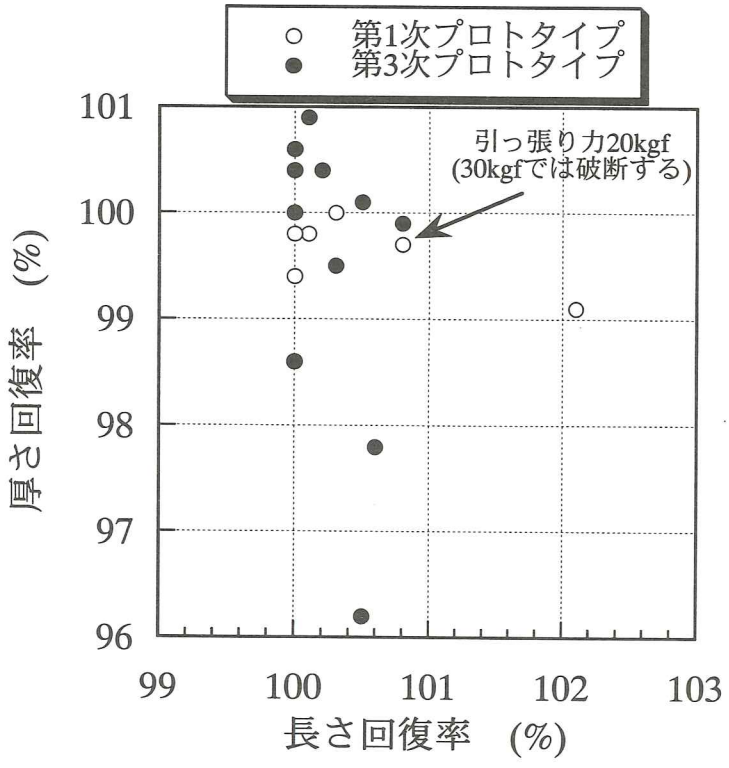
⑸　まとめ

シートの引っ張りに対する破断防止に必要とされる強度としては，表－6.6に示す試験条件で測定した引っ掛け強度が15kgf 以上であることとする。

6.3.2　引っ張りに伴う変形の回復

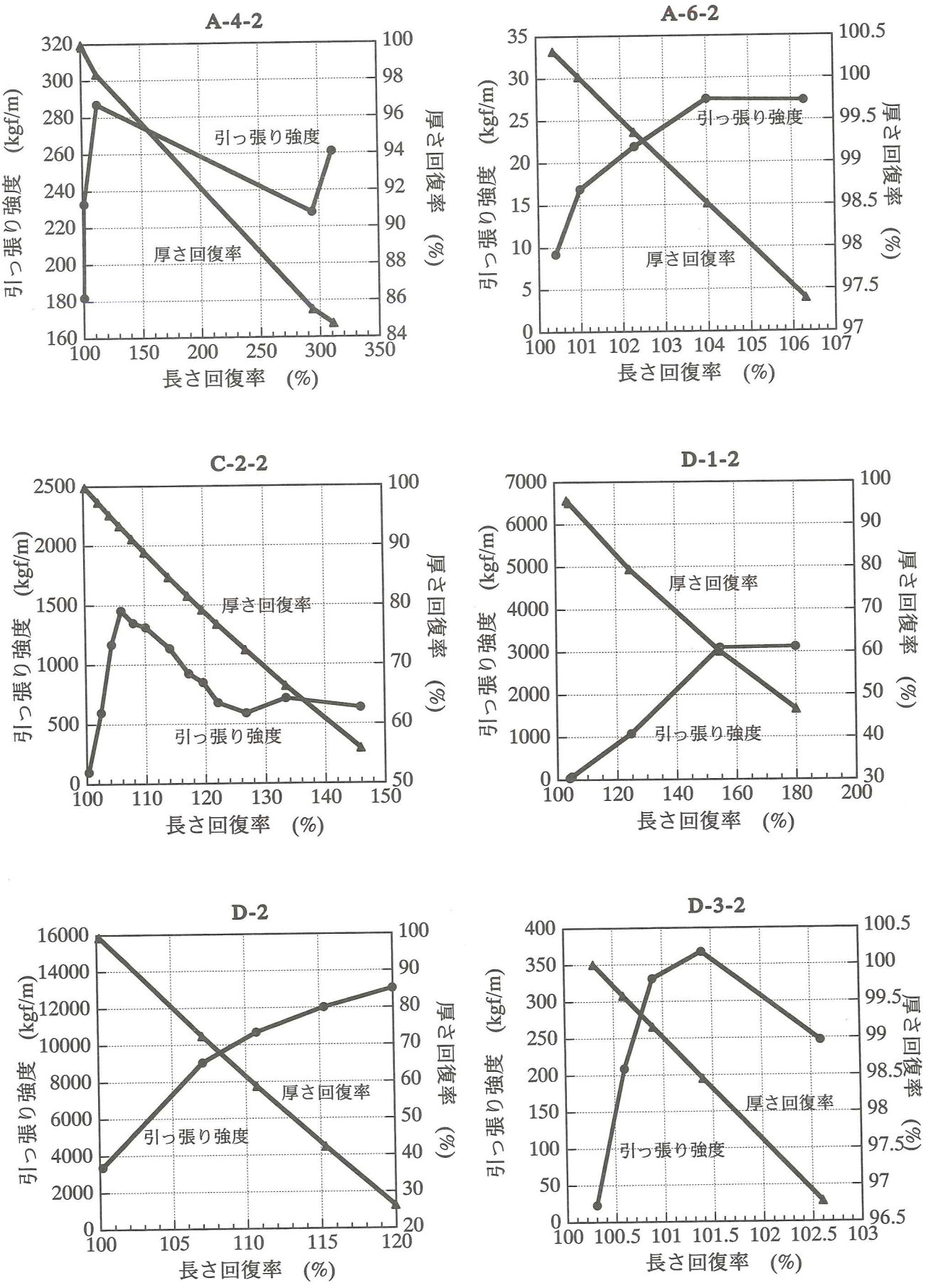
施工時にシートを強く引っ張ると破断には至らないものの，大きく延び変形して除荷しても変形が回復しない場合が考えられる。その場合，延び変形に伴ってシート厚および空隙率の低下が生じて侵食防止効果が低下することが懸念される。また，シートを敷設する際にも延びきったシートを元の長さに戻すことができず，所定の敷設範囲内に収めることができなくなる問題が生じる。以上の理由でシートが大きく延びきった状態になることをシートの「損傷」として取り扱う（6.1.1⑴参照）。したがって，引っ張りによる損傷防止は6.3.1に示した破断と本項での変形の両方が対象であり，どちらも同時に防止できる（破断せずまた延びきらない）ことがシートに求められる。

上記のようなシートの延び変形が生じる実際の施工状況は，6.3.1⑵に示した状況と同様である。そこで，その施工状況を再現する実験として，シートの破断再現実験（6.3.1⑵参照）と同様に60cm 幅のシートに30kgf の引っ張り荷重（引っ張り強度で50kgf/m）を作用させた。シート中央部の長さ50cm の範囲を測定範囲として，引っ張り荷重を10秒間作用させた後，除荷した状態で1分間放置して伸びを回復させてから，シートの長さと厚さを測定した。これらの値の荷重作用前の長さと厚さに対する比を百分率で表したのが回復率である（100%が作用前と同値であることを表す）。上記の実験によって長さと厚さの回復率の関係を図－6.10に示す。長さと厚さの回復率の関係は，シートの種類（構造）によって異なることとが分かる。



図－6.10　再現実験で測定した長さ回復率と厚さ回復率の関係

この結果について以下のような考えに基づいて評価することとした。第3章に示したシートの侵食防止効果の評価では，上記のようにシートが変形するなどの影響を考慮して，シート厚および空隙率を実物の値より割り引いて与えている。その割り引きの条件は，ここで検討対象としているシートの伸び変形の場合に当てはめると，厚さ回復率が90%以上，伸び回復率が105%以下であれば満たされる。



図－6.11　伸長回復試験による長さ回復率と荷重の関係と簡易試験による長さ回復率と厚さ回復率の関係

したがって，上記の回復率の条件を満たすシートは「設計上見込んだ侵食防止効果が保持できる」という観点で問題なしと評価することとした。図－6.10に示した実験結果では，引っ張り強度50kgf/m を作用させる以前で破断したA－6－2を除いて全て問題なしとなる。

上記の再現実験に代わって，JIS 規格試験である伸長回復試験(JIS L1096)によっても評価可能であるか確認する。伸長回復試験とは，表－6.6に示した引っ張り試験と同じ条件で所定の荷重に達するまで引っ張り強度を増加した後，その荷重を１分間作用させ続けてから除荷し，完全に除荷してから３分後にシートの伸びを測定することを繰り返し行い，引っ張り強度と長さ回復率の関係を測定するものである。この試験結果を図－6.11に示す。なお，図－6.11には伸長回復試験と同一の供試体について，長さと厚さの回復率の関係を別途測定した結果を併記した。同図に示すように，再現実験と同じ引っ張り強度(50kgf/m)を作用させた場合の長さ回復率と厚さ回復率を読みとることができる。この読みとり値について，再現実験について行ったのと同じ評価を行い，再現実験に対する評価と比較した結果を表－6.8に示す。なお，第３次シートでは，上記の試験法を簡略化して，繰り返し引っ張り強度を作用させるのではなく，１回だけ引っ張り強度50 (kgf/m) を作用させて，その後試験片を取り出して厚さおよび長さの回復率を測定することとした。両結果は同様な判定結果となっており，伸長回復試験を用いても判定が可能と判断される。

試験法の簡略化の狙いは，シートの性能評価に必要な50(kgf/m)のみの試験に切り替えるだけではない。JIS 規格どおりの試験では試験片を取り出して厚さの測定を行うことが不可能であった（同じ試験片に繰り返し引っ張り力を同じ条件で作用させるため)。そのため，上記したように厚さ回復率と長さ回復率の関係について別途試験を行い，明らかにしておかなければならなかった。50(kgf/m)のみの試験だと，除荷後に試験片を取り出して厚さと長さの測定が行えるようになるため，厚さと長さの回復率について同時

表－6.8　再現実験と伸長回復試験に基づく評価結果の比較

シート名称	実施工の再現実験			伸長回復試験		
	長さ復元率 (%)	厚さ復元率 (%)	判定	長さ復元率 (%)	厚さ復元率 (%)	判定
A-4-2	100.1	99.8	○	100.1	100.0	○
A-6-2	破断		×	破断		×
C-2-2	100.3	100.0	○	100.2	100.0	○
D-1-2	100.0	99.4	○	104.2	95.4	○
D-2-2	100.0	99.8	○	100.0	100.1	○
D-3-2	100.0	99.8	○	100.3	99.9	○
A-1-F	100.3	99.5	○	100.0	99.6	○
A-4-3F	100.0	100.4	○	100.0*	100.0*	○
A-4-5F	100.0	98.6	○	100.0*	100.0*	○
A-8-F	100.0	100.6	○	100.7	94.7	○
B-F	100.6	97.8	○	101.0	97.7	○
C-1-F	100.1	100.9	○	101.6	99.6	○
C-3-F	100.2	100.4	○	100.0*	100.0*	○
D-1-F	100.0	100.0	○	100.0*	100.0*	○
D-3-F	100.5	96.2	○	101.7	99.7	○

*)データシートに「変化なし」と記載されていた

に測定できるようになるメリットも生じるためである。

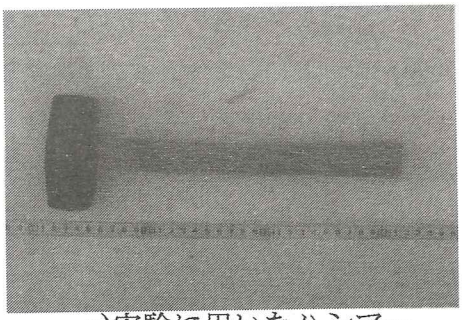
なお，上記の基準を満たすシートであれば，シート長を５％まで伸ばして敷設しても設計時に見込んだ侵食防止効果が維持できる。ただし，あくまでも施工時などの不可抗力でシートが伸びてしまった場合に対する侵食防止効果の確保を第一の目的としたものであるので，故意に伸ばして使用するのは湾曲した堤防ののり面などに敷設する場合を除いて行ってはならない。また，故意に伸ばす場合でも，元の長さの５％未満にしなければならない（詳細については**巻末資料１**参照のこと）。なお，幅２mのシートは５％伸ばすことで曲率半径40m で湾曲したのり面に敷設することができる。

6.3.3　衝撃力に対する破断防止に必要な強度

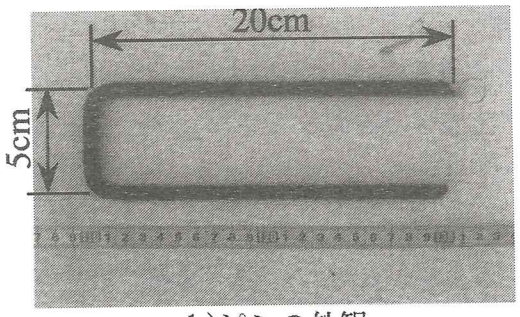
施工時において土砂が充填されていないシートは，ピンの打設や土砂充填の作業中にシートに衝撃力が加わると破断しやすい。そのような衝撃力が加わる状況を再現する実験を行うとともに（(1),(2)参照），破断防止に必要な強度を明らかにする簡易な試験・評価法を提案する。

(1)　ピン打設に関する実験

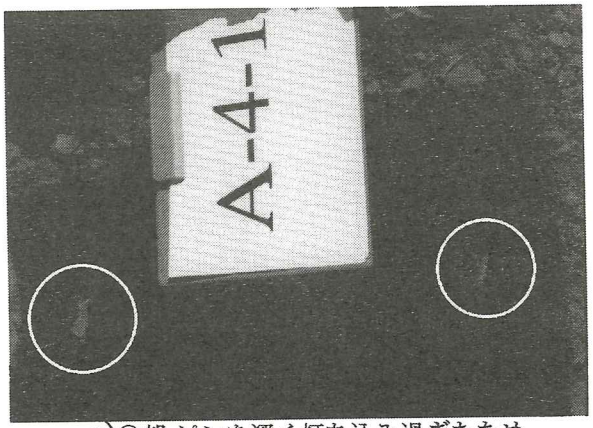
シートの固定には，**写真－6.9**に示すようなピンを金属性ハンマーを用いて打ち込む。打ち込むにあたっては，ピンがシート表面をほとんど凹ますことがなく，かつシート面に接するような適度な打ち込み深さになるようにすることとしている。しかし，実際の施工では誤ってピンを深く打ち込んでしまったり，またピンを打ちそこねてハンマーでシートを打ち付けてしまうことがあり，その際にシートが破断する場合が見られた。



a)実験に用いたハンマー



b)ピンの外観

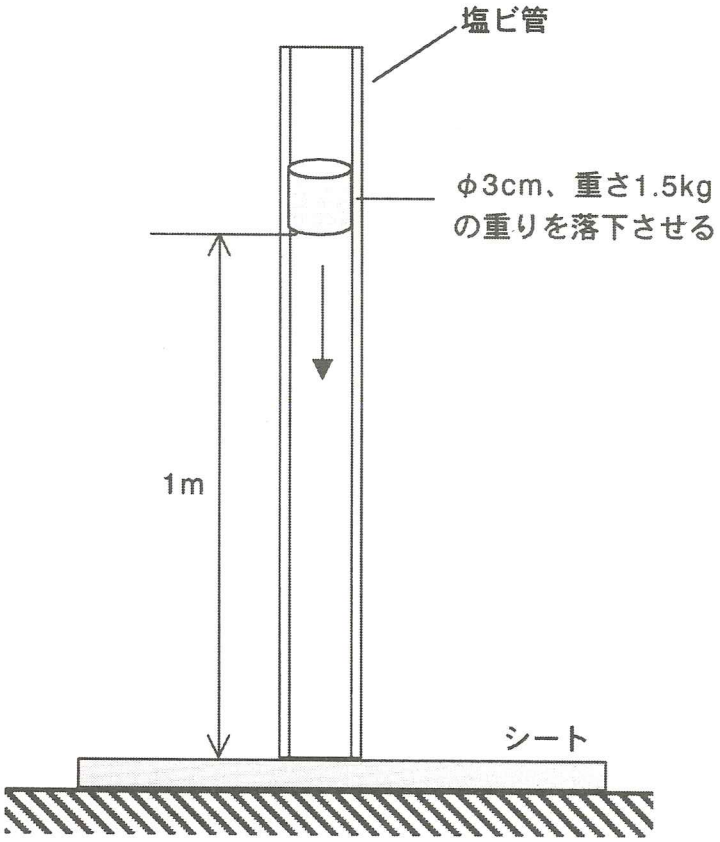


c)○部:ピンを深く打ち込み過ぎたため、
シートが破損している状況

写真－6.9　シート固定に用いるピンとハンマーの一例とピン打設による破損状況

表−6.9　ピン打ち込みとハンマー打ち付けによる損傷ランクの比較

		ピン打ち込み	
		A	D
ハンマー打ち付け	A	29	2
	B	3	7
	C	2	3
	D	0	17



図−6.12　ハンマーの打ち付け実験の方法

これらの状況を再現する実験を以下のように行った。ピンを深く打ち込む場合は，**写真−6.9**に示したように故意にピンを深く打ち込んでみて，損傷の状況を観察することとした(**写真−6.9**に示したシート敷設実験については6.3.5において詳細を示す)。また，ハンマーでシートを打ち付ける場合は，**写真−6.9**に示したハンマーの金属部とほぼ同一の直径3 cm，重量（1.5kgf）を有する金属製重錘を**図−6.12**に示すようにシート上に鉛直に立てた長さ1 mの塩化ビニル管内を自然落下させて，シート面に衝突させる実験を行った。なお上記の落下高さは，重錘がシートに衝突する際の衝撃力が，作業員がハンマーを打ち付けた衝撃と同程度になるように配慮して設定した。以上のような衝撃を加えた後，シートの損傷状況を観察して，損傷程度をA：損傷が認められない，B：破断はないがシートが凹む，C：構成材が切断するが貫通しない，D：貫通するとランク付けした。なお，ピンを深く打ち込む実験では，損傷の有無がはっきり分かれたので，A：損傷なしとD：切断にともなって孔が開くの2ランクの分類とした。以上の評価結果を**表−6.5**に併記した。

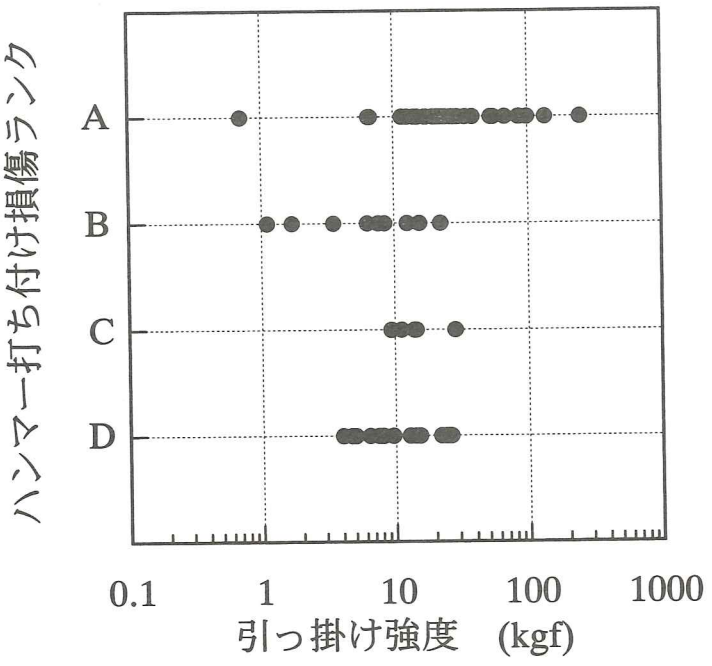
ピン打ち込みとハンマー打ち付け実験によるランク付けの結果を**表−6.9**に示す。ハンマー打ち付けについてA，Bランクがピン打ち込みのAに，またC，DがDに相当すると考えると，全体的な傾向としては両実験とも同様なランクになることが分かる。詳細に見ると，ピン打ち込みのランクの方が低くなる傾向が認められる。この原因は，ピン打ち込み実験ではシート表面近くまで打ち込んだピンを更に深くまで打ち込むために複数回ピンを打つ，すなわちシートに複数回衝撃力が作用するのに対して，ハンマー打ち付け実験では1回しか重錘を打ち付けないためと推察される。

シートの特性と衝撃耐力の関係を調べることを目的として，引っ掛け強度およびシートの主素材とハンマー打ち付け実験結果の関係を**図−6.13**，**表−6.10**に示す。ランクと引っ掛け強度には明確な関連性が見られないが，ポリプロピレンを主素材とするシートではランクが低い場合が多いことがわかる。ポリプロピレンは他の素材に比べて衝撃に対して脆いと言え，その改善のためには，弾性を増加させるような素材の加工を行うこと(例えばエラストマーの添加)を行えば良いことが分かっている。

表−6.10　シートの主素材とハンマー打ち付けによる損傷ランクの比較

		ハンマー打ち付け			
		A	B	C	D
シート主素材	PE	0	0	1	0
	PET	8	3	0	0
	PP	17	4	2	17
	PVDC	6	3	2	0

PE:ポリエチレン、PET:ポリエステル、PP:ポリプロピレン
PVDC:ポリ塩化ビニリデン



図−6.13　引っ掛け強度とハンマー打ち付けによる損傷ランクの比較

表−6.12　スコップ打ち付けとハンマー打ち付けによる損傷ランクの比較

		ハンマー打ち付け			
		A	B	C	D
スコップ打ち付け	A	28	0	1	0
	B	1	0	0	0
	C	2	6	4	0
	D	0	4	0	17

表−6.11　スコップ打ち付けとピン打ち込みによる損傷ランクの比較

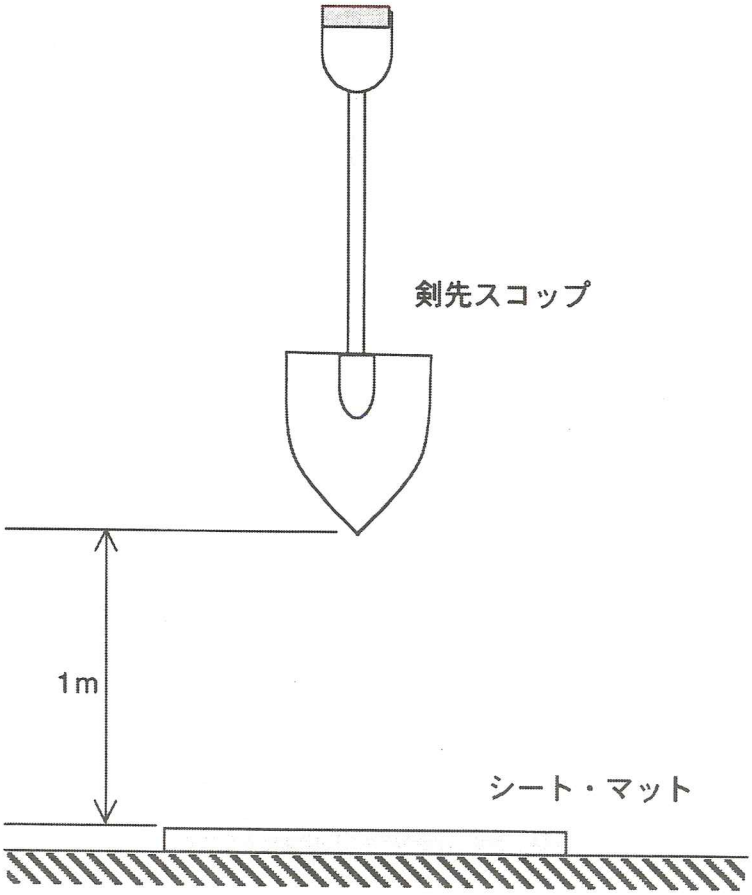
		ピン打ち込み	
		A	D
スコップ打ち付け	A	28	1
	B	0	1
	C	5	7
	D	1	20

⑵　スコップの打ち付けに関する実験

シート端部処理(シート端部の埋設)や土砂充填の工程では，作業員がスコップを用いてシート上で土工を行う機会がある。その際，スコップをシートに打ち付けて損傷しないように極力配慮すべきであるが，シートにスコップが全くあたらないように施工するのも不可能である。したがって，ある程度のスコップの打ち付けに対して損傷しないだけの強度を有するシートであることが，施工を容易にする上で求められる。

スコップ打ち付けによる損傷の程度を明らかにすることを目的として，実際に打ち付けられる状況を模擬した図−6.14に示す実験を行った。地面に敷設したシート上高さ１mの位置から，土工作業で用いられる標準的な剣先スコップ（重量約1.7kgf）を自然落下させて，シート面に衝突させる。なお上記の落下高さは，⑴と同様に作業員が打ち付けた衝撃と同程度になるように配慮して設定した。以上のような衝撃を加えた後，⑴と同様に損傷程度を表−6.5に示したようにランク分けした。

スコップ打ち付けとピン打ち込み実験によるランクの比較結果を表−6.11に示



図－6.14　スコップの打ち付け実験の方法

す。(1)と同様にスコップ打ち付けについてA，Bランクがピン打ち込みのAに，またC，DがDに相当すると考えると，全体的な傾向としては両実験とも同様なランクになることが分かる。また，スコップ打ち付けとハンマー打ち付け実験によるランクの比較結果を表－6.12に示すが，大まかにはピン打ち込みと同様な傾向が見られるが，スコップ打ち付け実験のランクの方が低くなる場合が多いようである。以上の結果より，スコップ打ち付け実験によるランク評価をもって，ハンマー打ち付けとピン打ち込みによる損傷の発生（C，Dランク）を概ね予測できることが分かった。

(3)　まとめ

衝撃力に対する破断防止に必要な耐力の試験・評価法として，(2)に示したスコップ打ち付け実験によるランク評価を行えばよい。また，ポリプロピレンを主素材とするシートは衝撃に対する強度が不十分となりやすいので，エラストマーの添加などによって弾力性を向上させるなどの対策を行う必要がある。

6.3.4　圧縮による変形の回復

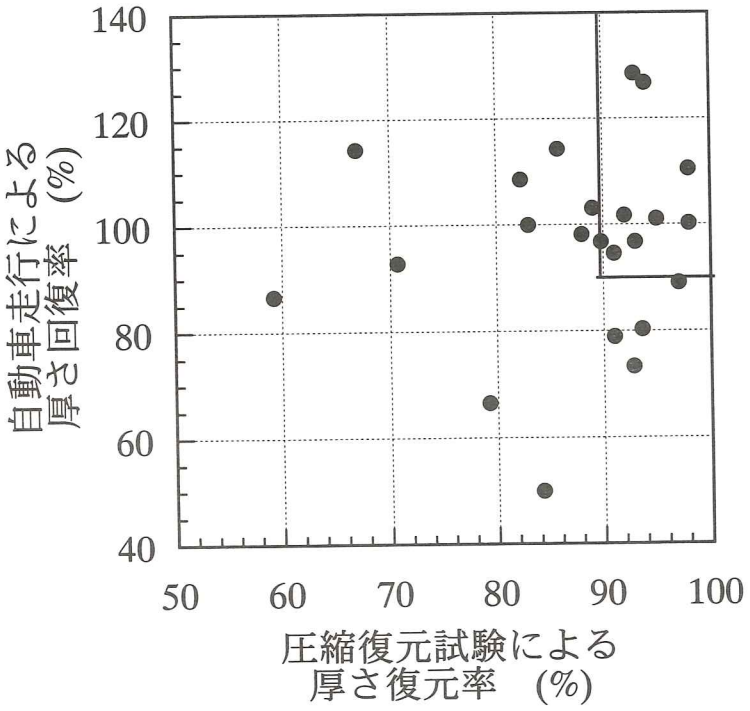
土砂が充填されていないシート上でシートの敷設・固定や土砂充填作業などを行うが，その際シートが作業員に踏みつけられることによって圧縮変形する。踏みつけ荷重が除かれると厚さが回復するが，6.3.2に示した引っ張りによる変形の場合と同様に，設計時に見込んだ侵食防止効果を保持するためには厚さ回復率が90%以上とならなければならない。

作業員による踏みつけによる圧縮荷重は，最大規模でも1 (kgf/cm^2)程度と推定される(片足でシート上に立つ状態を想定すると，靴の長さ25cm　平均的な幅を4 cmと見積もっても100kgfの体重となる)。この圧縮荷重と同程度の荷重が作用する実験としては，6.2.3に示したシート上への自動車乗り入れ実験を行っている。この実験を行った際，走行前後にシート厚を測定して厚さ回復率を求めた（表－6.4参照)。厚さ回復率が90%以下となっているシートでは，実際にシート上を歩行してみると，少し長い間立ち止また後に移動すると，他のシートに比べて踏みつけた場所が凹みとなってやや目立った。

このような圧縮変形の回復を測定するための既存の試験法として，表－6.3に示したように圧縮復元率（JIS L1096）が挙げられる。圧縮復元試験の試験条件を表－6.13に示す。この試験では，20cm四方の試験片中央に面積25cm^{2}の円盤で約1 (kgf/cm^2)の荷重を30秒加えた終わった1分後の厚さの測定を行う。こ

表－6.13 圧縮復元率(ＪＩＳ Ｌ1096)の試験条件

項　目	内　容
試験温度	20±2℃
試験湿度	65±2%
押圧荷重	100kPa(1.02kgf/cm^2)
押圧時間	30秒間
試験方法	押圧前、押圧時、押圧除荷 1 分後の厚さを測定



図－6.15 圧縮復元試験と自動車乗り入れ実験による厚さ復元率の比較

の試験での圧縮荷重は作業員や自動車の踏みつけ時に作用すると想定される圧縮荷重，約1（kgf/cm^2）とほぼ同程度になっている。この試験と表－6.4に示した自動車乗り入れ実験による厚さ復元率を比較した結果を図－6.15に示す。圧縮復元率試験で測定した厚さ復元率が90%以上であれば，自動車を乗り入れの結果もほぼ回復率が90%以上となる結果が得られた。

以上の結果より，圧縮復元試験で90%以上の復元率となる場合に，圧縮による変形の回復に対する要求性能を満たすとする。

6.3.5 施工･維持修繕の作業性確保のための強度・加工性

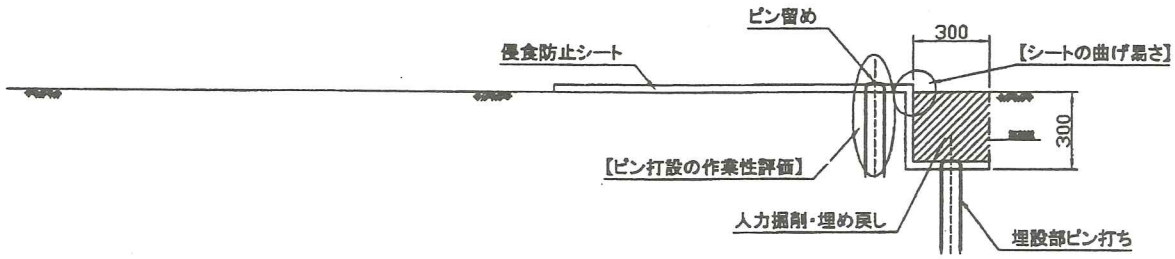
作業性については，「作業しやすさ」という定量的指標化が困難な「特性」が評価対象となっているため，実際のシート敷設工を小規模ながら再現できる実験を行って定性的評価を行うこととした（6.1.2(2)参照）。ここでは，そのような施工性評価の対象とする事項と方法を提案する((1),(2)参照)。また，6.1.1(1)に詳細を示したシート施工の経験から，施工性が良好なシート幅，長さを定めた結果を示す((3)参照)。

(1) シートの可屈曲性，ピンによる固定性，シート面の滑りにくさ

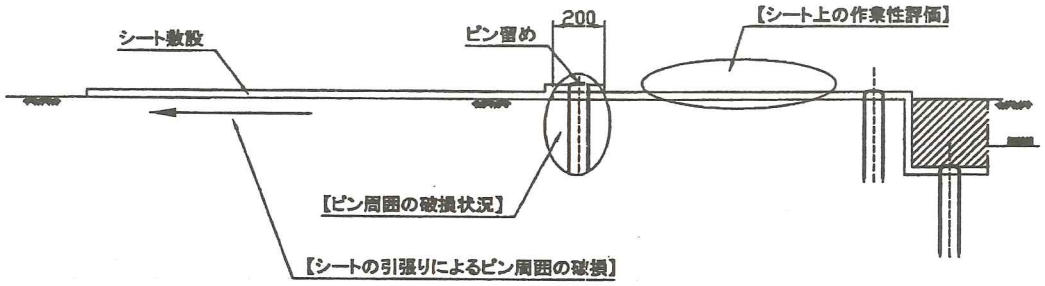
幅60cm，長さ2mのシートを2枚使用して，2割勾配ののり面上に図－6.16に示す順番でシートを敷設，固定するとともに，施工性を以下のように観察，評価する。

まず，最初に端部処理（下流側）の施工を写真－6.10に示すように行う。この際，シートを折り曲げ，ピンを打ち付けて固定した後，折り曲げ部のシートの損傷状況を観察する。今回の実験では，写真－6.10a）に示したようにシート面が裂けることなく屈曲できる場合，写真－6.10b）に示すようにシートが折れ目に沿って割れる場合，および上記の中間的な損傷状況，例えば部分的に割れたり，山折り側のシート面（折れ目に引っ張り力が作用する側）に折れ目に沿って割れ目（谷折り側に当たるシート裏面まで引き裂かれていない）が生じる状況が見られた。これらの状況を表－6.14に示すようにランク分けして第1次プロトタイプについて評価を行った結果を表－6.5に併記した。B，Dランクとなるシートは，ポリプロピ

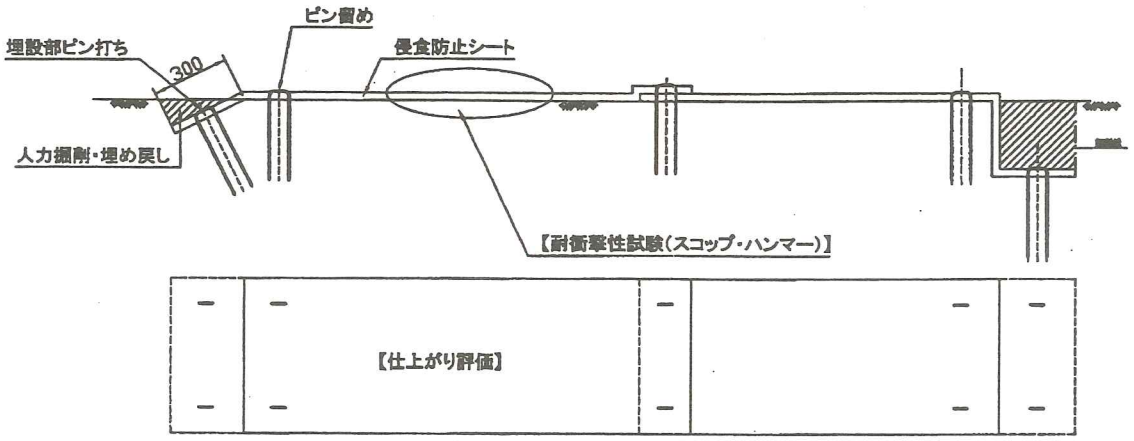
■端部処理(下流側)



■重複部処理

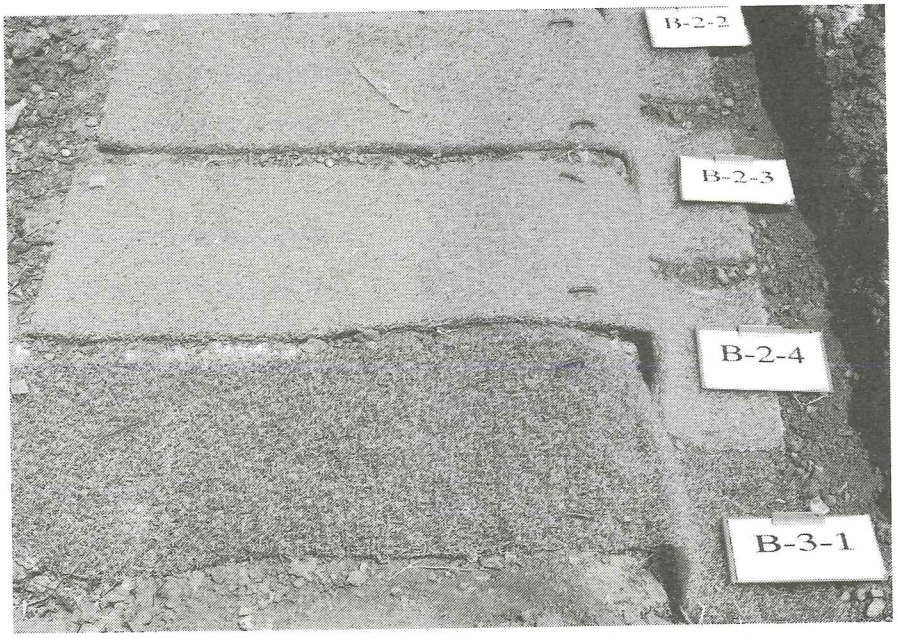


■端部処理(上流側)

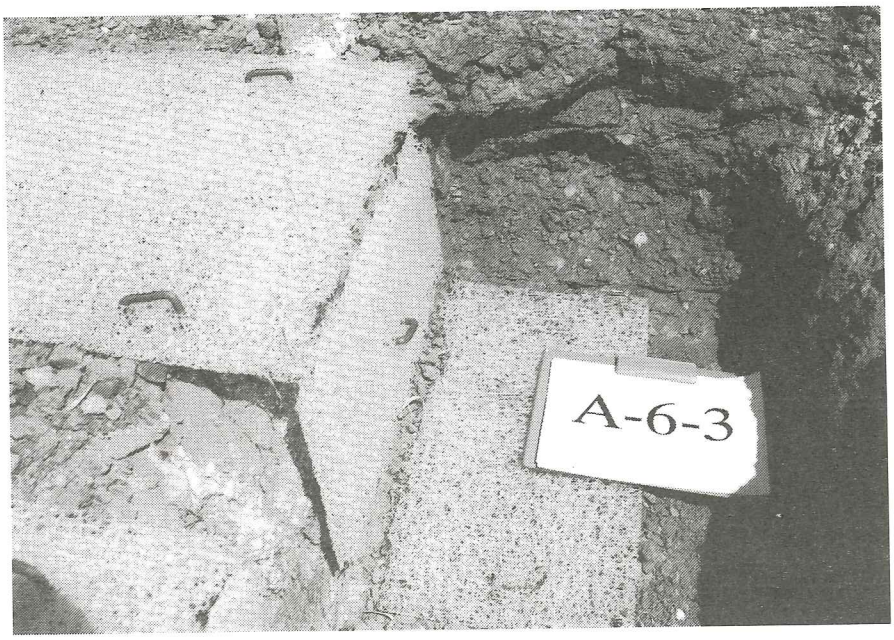


図－6.16　シートの小規模敷設実験と施工性評価の手順

レンを主素材とするヘチマタイプに多いことが分かる。このようなシートは，構成材の弾力性が小さく，また構成材同士が部分的にしか接合されていないため（写真－2.1参照），接合部周辺において構成材が断裂しやすいようである(そのため引っ掛け強度も小さめになり易い)。A 以外はシートが損傷するので可屈



a）われない



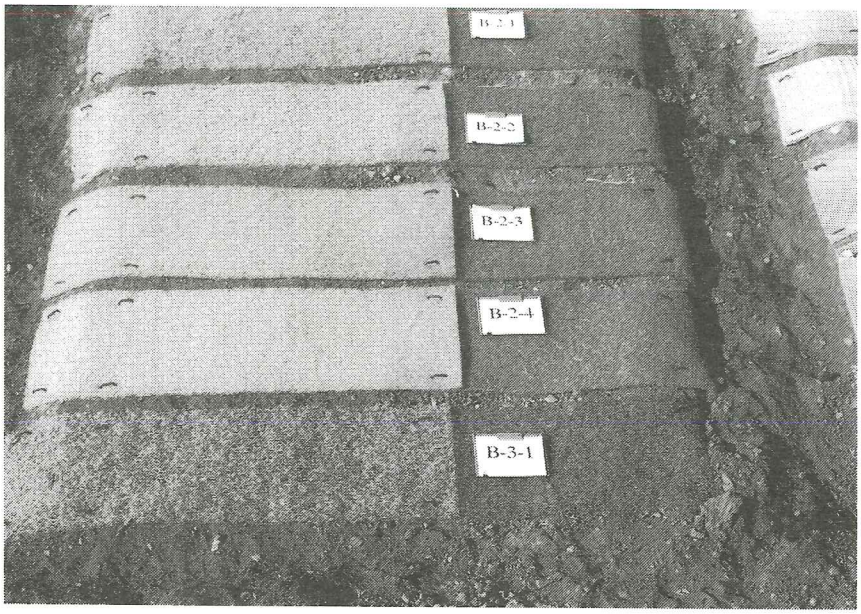
b）割れる

写真－6.10　シート敷設実験(下流側)の状況

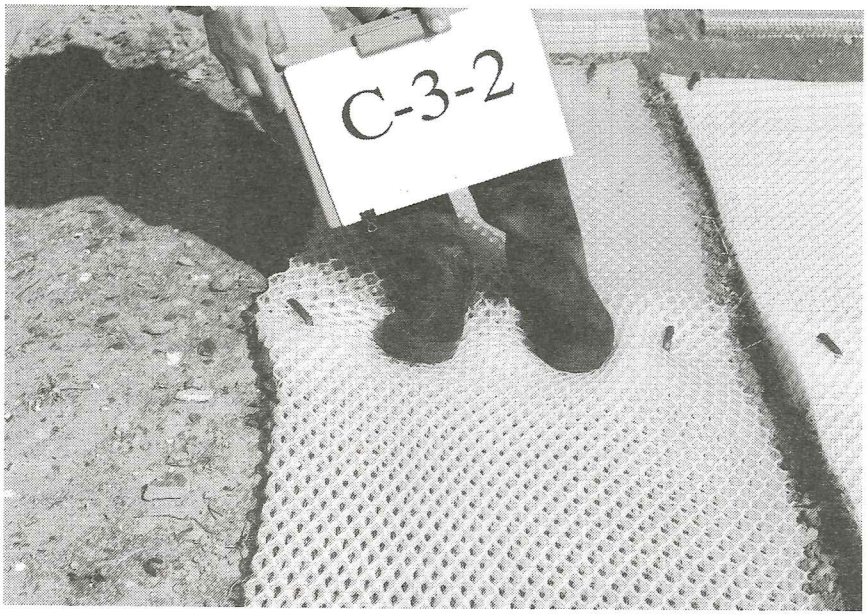
曲性が十分ではなく，不適と判断することとした。

次に，端部処理（上流側）の施工を**写真－6.11a)** に示すように行う。そしてシート上を歩行したり，**写真－6.11b)** に示すようにのり尻方向にシートを滑らせるように体重を掛けた後，ピンによるシートの固定状況を観察して**表－6.14**に示したようにランク分けする。本研究の範囲(つまり**表－2.3**に示した全プロトタイプの場合）では，引っ掛け強度が15kgf 以 上（6.3.1参照）かつピン打設時に対する耐衝撃性（6.3.3参照）が確保されているシートは，ピンによってシートが問題なく固定できることを確認している(例えば第１次プロトタイプについては**表－6.5**参照)。したがって，ピンによる固定性に関する評価は，実際と同一の固定状況を見て，確実に固定できることを再確認することを目的として行うという位置づけとする。

最後に，シート面に水を散布するとともに作業靴の靴底を湿らせた状態でシート上を歩行し，滑りにくさを**表－6.14**に示すランクで評価する。滑りにくさが不十分と判断されるＤランクの状況は，靴底に平均的に体重をかけるようにするなどの配慮をしないと，滑って転倒する危険性を感じる場合である。第１次プロトタイプについて評価した結果を**表－6.5**に併記したが，シート表面に凹凸差が小さい(または踏みつけて圧縮変形した場合に小さくなる)(Ａ－4，Ｃ－1，Ｃ－2，Ｃ－3，Ｄ－３)，または凹凸はあるものの靴底との設置面積が小さい(Ａ－7，Ａ－9，Ｄ－１)場合に滑りやすくなる傾向が見られた。



a）完成状況



b）体重かけ

写真－6.11　シート敷設実験(上流側)の状況

以上のように，小規模の敷設実験を行うことで概ね施工性が評価できる。より確かに評価する必要がある場合には，シートの幅，長さを大きくして敷設実験を行い，上記と同じ評価を行えばよい。

⑵　引っ張りに対する難伸長性（重ね長の調整しやすさ）

シートの敷設作業を細かく見ると，まずロール状に巻かれたシートを広げて，次に既に敷設・固定されたシートと決められた重ね長（流れ方向には20cm，それ以外は15cm：**巻末資料１**参照）が確保できるようにシートを引っ張って位置をずらして重ね長の調整を行う。そのような調整を行う際，シートが非常に伸びやすい場合だと，手でシートを引き寄せても，シートが伸びるだけで位置がほとんど変わらない。そのため更に引っ張る距離を大きくする

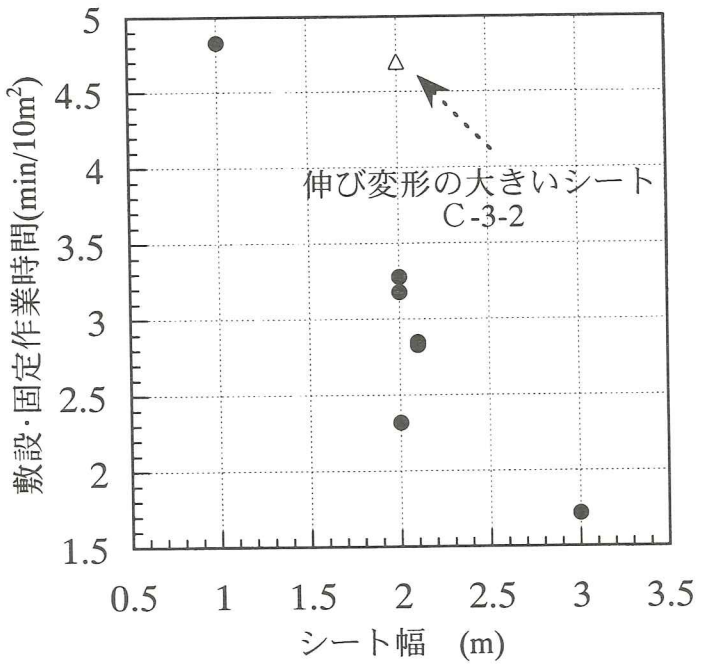
表－6.14　施工性の評価ランク一覧

試験項目	評価	損傷の程度
ピン固定性	A	ピン周りでのシートの変形なく、良好に固定できる
	B	ピン周りでシートが浮かび上がるが、固定できる
	D	シートがピンからはずれる
シートの屈曲性	A	損傷なし
	B	一部破断する
	D	折り目に沿って破断する
シート上での作業性(滑りにくさ)	A	滑りにくく歩きやすい
	B	多少滑るが歩行に支障はない
	D	滑りやすく歩行するのに注意を要する

ためには，作業員が後ろに下がってもう一度引っ張り直す必要がある。そのようにして重ね長が調整できた後にも，伸びたシートを元の長さに戻す作業が伴う。以上のように伸びやすいシートだと施工効率が低下する。

その一例として，図－6.2に示した盛土のり面への実大施工実験時にシートの敷設･ピン固定に要する作業時間（10m²あたり）を測定した結果を図－6.17に示す。幅が約２mのシートに着目すると，他のシートに比較して非常に伸びやすかったシートＣ－３－２では４分以上で，他のシートが２～３分台であったのに比較して1.5～２倍の作業時間となっている。なおこの敷設実験では，幅２mのシートの場合には図－6.2に示したようにシートの配置が同じであるため，作業時間の差違がシートの変形しやすさに主に依存すると考えて良い。シートの伸び易さを表す一つの指標として，伸び率10%（元の長さの10%の長さだけ伸ばす）となる引っ張り強度を用いることとし，引っ張り試験(JIS L1096, JIS L3204)の測定結果から求めた結果を表－6.15に示す。なお，A－8－3のみ数値が括弧書きとして参考値扱いとした。その理由は，A－8－3の引っ張り試験用の供試体としては，写真－2.1に示したような形状を有するシートの一部を切り出したものを用いておらず，袋体を構成するネット材のみを用いたこと，そのためネット材を袋状に加工する際に用いた糸が引っ張り変形を抑制する効果が含まれていない結果となったためである。つまり，実際のシートは表－6.15に示した引っ張り強度ではほとんど伸びず，伸び率10%には達しない。以上を考慮して比較を行うと，シートＣ－３－２のみが他のシートより１オーダー小さい30kgf/m程度となっており，人力によって容易に引き延ばせる程度の値であることが分かる。

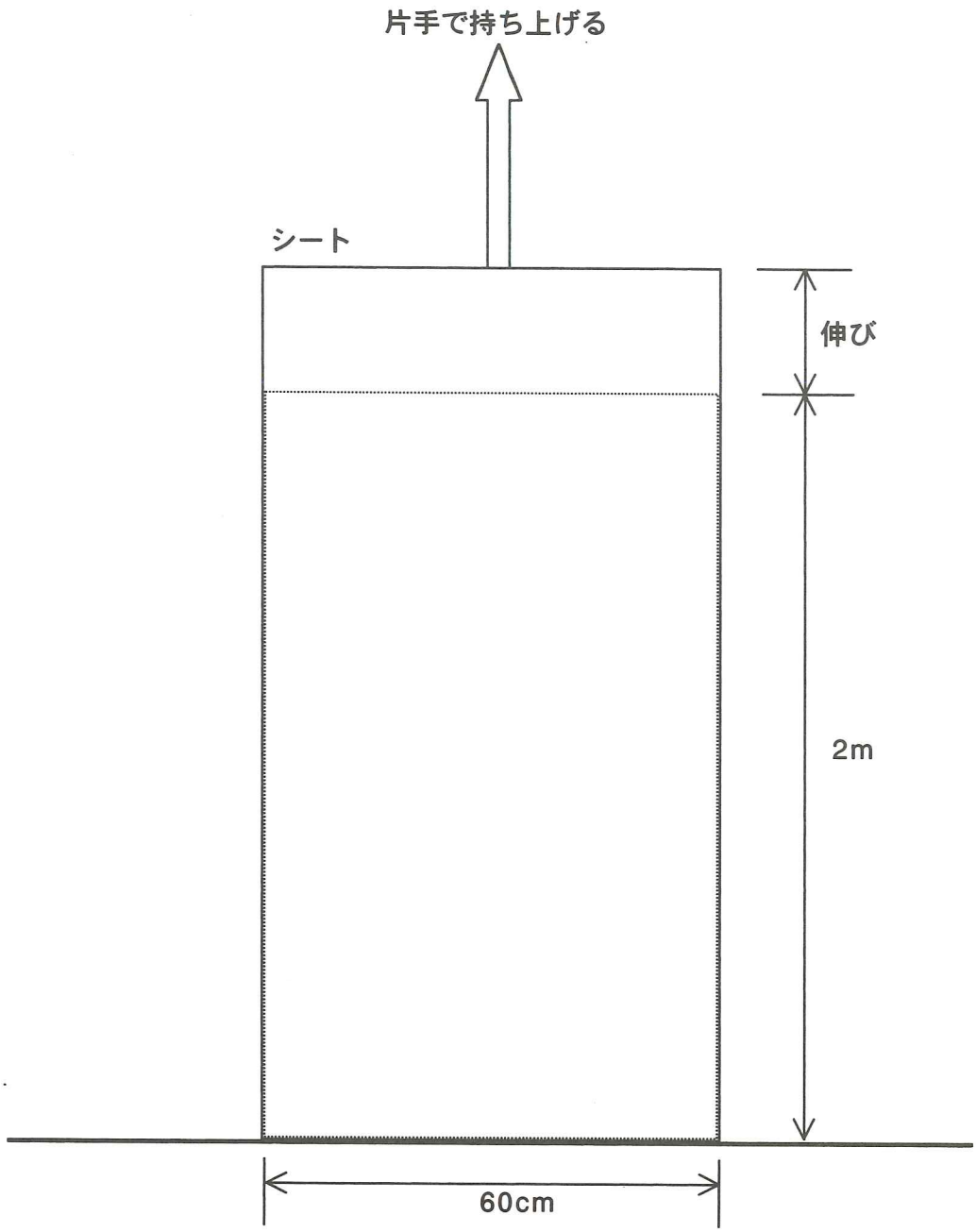
ある程度引っ張りによる変形が生じにくいシートとすることが，作業効率の低下を防ぐために必要である。どの



図－6.17 シートの幅と敷設・固定に要する時間(10㎡あたり)の関係

表－6.15 盛土のり面へのシート敷設ピン固定に要した時間とシート諸元

シート名称	幅(m)	伸び率10%時の引っ張り強度(kgf/m)	敷設･固定時間 (min/10m²)
A-3-3	1	221	4.83
A-1-4	2.1	357	2.85
B-2-2	2	115	2.32
A-4-2	2	415	3.28
A-8-2	2	(4.2)	3.18
C-3-2	2	30.7	4.70
D-1-4	2.1	3115	2.83
D-3-3	3	285	1.72



図－6.18　引っ張りに対する難伸長性に関する試験

程度にするかは，上記の施工時の経験も参考にした以下に示す考え方に基づいて定めた。シートを天端側から引っ張って位置をずらすという作業に必要な力の大きさを決める要因としては，シート自重とシートと地面間の摩擦力が考えられる。このうち摩擦力は自重に比較して無視しうる程度の大きさと考えられる(施工上の経験より)。したがって，シート自重が引っ張り力の大きさの目安となる。また，伸びについては手で引き寄せられる距離(腕の長さ程度)で，シートの位置調整が十分可能なだけの移動距離が得られる程度とする必要があると考えられる。具体的には，手で約50cm引き寄せた際に，伸び分が20cm，シート移動分が30cmになるようにすることとした。

以上の考えに基づいて，図－6.18に示す引っ張りによる変形のしにくさを明らかにする試験を考案した。幅60cm，長さ２mのシートを片手で掴んでつり下げ，掴んだ場所からシート最下端の距離を測定する。

この距離がつり下げ前のシート長さ(2m)の110%以内であればA(問題なし), 110～120%はB(やや調整しにくい), 120%以上はD(調整に時間がかかり施工性が劣る)と評価することとした。

⑶ シートの幅, 長さ

ある同じ面積にシートの幅, 長さが小さいシートと大きいシートをそれぞれ敷設・固定を行う場合を想定する。シートの幅, 長さが小さいシートは, 大きいシートに比較してシート枚数が多くなるので, シート位置の調整とピン打設に関わる作業量が多くなり施工効率が低下すると考えられる。その一例が⑵と同じく, 盛り土のり面への実大施工実験時に見られた。この実験では図－6.2に示したように, 幅が1, 2, 3mと異なるシートを, 長さ方向には同じ配置で敷設・固定した。この作業に要した時間($10m^2$あたり)を表－6.15に示したが, 作業時間と幅の関係として再整理して図－6.17に示した。伸びやすいため施工効率が劣ったC－3－2を除くと, 幅が小さい, すなわち単位面積あたりのシート枚数が多いほど施工時間が大きくなる傾向が認められる。

以上の結果と現地施工の経験から, シートは幅2m, 長さ10m以上とするのがよいと考えている。上記の諸元はロール状に巻いたシートを人力で運搬できる程度の重さにすること(シート$1m^2$あたりの重量は最大2kgf程度である), そのロールの寸法がトラックの荷台に無駄な隙間なく並べられて, 1台あたりにより多くのロールが積み込めることができるように配慮して提案したものである。したがって, 上記の配慮事項に問題がなければ, できるだけ幅, 長さを大きくするのが好ましい。そうすることで, 侵食に対する弱点箇所となり易いシートの重ね部の総延長が減少するので, 侵食防止に対する安全性の向上にも貢献できる。

参考文献

1) 阿部 禎：モグラの話(その1)－土木技術者のための基礎知識－, 雑誌河川, No.447, pp44～51, 1983.

第7章　シートの耐久性

本章では2.2.1(4)に示した方針にしたがって，耐久性に関する試験法を提案する。まず，熱可塑性樹脂を主素材とする既往の土木資材について耐久性に関する試験項目と試験法を調査するとともに，シート特有の劣化要因について考察し，それらの試験法を提案する（7.1参照）。次に各試験を実施し，シート改良のポイントおよび今回の提案した暫定的な試験・評価法によってどの程度の耐久性を有するシートが開発できたのかについて，考察した結果をまとめて示す(7.2参照)。

7.1　試験項目の選定と試験・評価法

7.1.1　既往の土木資材の試験項目を参考にしての選定

試験項目の選定のために参考にした既往の土木資材は，以下の4種類である。

- 盛り土補強材(ジオテキスタイル)

のり面の滑り破壊に対する耐力を増加させる盛り土補強工に用いるシートで，地中に埋設したシートの引っ張り耐力が盛り土の滑り変形を妨げる。

- 遮水シート(ジオメンブレン)

表面水の地中への浸透を防止するために用いるシートで，地表面に敷設またはその近傍に埋設して使うことが多い。

- 河川吸い出し防止シート(ジオテキスタイル)

のり覆工とその設置地表面との間に敷設して，のり覆工の隙間から地表面の構成材が流失するのを防止するために用いる。

- 袋型根固工法用袋材(ネット)

砕石などの石材を詰めこめる袋状のネット材で，石材を詰めたネット材を河岸のり尻の水中～水際にかけて隙間なく並べるようにして設置する。

いずれも屋外の自然環境に曝されて使用されるシートまたはネット状の製品である。これらの土木資材については(財)土木研究センターが技術審査作業を行っている「土木系材料技術・技術審査証明」(民間開発建設技術の技術審査証明事業認定規定に基づく）の審査対象であり，その作業の一貫として耐久性に関する試験が行われている。その試験の項目と目的を表−7.1にまとめて示す。全てに共通して行われてる試験は，耐候性試験と耐薬品性試験である。試験の目的から，耐候性試験は土木資材が主に紫外線への暴露に，耐薬品性は土木資材が水中または地中での化学的な変質に対する耐久性試験であることが分かる。供用時には，シートは基本的に地表面近傍に埋設した状況である。しかし，埋設するのは地表から深さ3cm程度のごく地表面近傍の位置であるから，何らかの不可抗力でシートが地面に露出した状態になると考えておくべきである。以上のような状況を考慮すると，上記の2試験ともシートの試験項目とするのが妥当である。

上記以外の試験項目として，耐寒・耐熱性試験と耐腐食土性試験がある。シートの設置される地表面近傍では大気温の変化や日射を受けるなどで比較的大きな温度変化が生じると考えられること，またシート上には必ず植生を繁茂させることを考慮すると，これらの試験もシートの試験項目とすべきである。

表－7.1　既往の土木資材に対する耐久性に関わる試験の項目・目的・方法の概略

試験項目		測定項目	試験の狙い	備考
耐候性試験	ジオテキスタイル(盛り土補強工法)	引張強度 強度保持率(%)	共用時、連節ブロック間の隙間など、長時間にわたり直射日光(紫外線)、雨雪に曝されるなど、自然条件の影響を受け時間とともに強度劣化が進む可能性がある。劣化は透水性、強度の性能低下を引き起こす原因となることから、耐候性試験を実施する。(吸い出し防止シート)	サンシャインウエザメータ (JIS A1415) 屋外暴露試験
	ジオメンブレン			
	河川吸い出し防止シート			
	袋型根固工法用袋			
耐薬品性試験	ジオテキスタイル(盛り土補強工法)	引張強度 強度保持率(%)	・河川ｐＨ値、塩、硫黄等の化学的作用に対して十分な耐久性があることが重要となる。一般河川ではｐH5～9 間に分布しているが、一部河川においてはｐH最大値 10 以上、ｐH最低値 4 以下の河川も存在していることから、試験条件を「一般試験：5<ｐH<9」と「特殊条件：ｐH≦4、ｐH≧10」に分けて実施する。(吸い出し防止シート) ・また、一般的な土のｐH値は 5～9 の範囲にあり、温泉地帯(ｐH1.0～9.95)やセメント系固化材による改良地盤(ｐH10～13)の特殊条件下においても長期的に機能を有する必要があるため耐薬品性試験を行う。(盛り土補強工法)	一般条件と特殊条件 一般条件で評価をおこない。 特殊条件は＋αで考える。 JIS　k7114　(吸い出し防止材) JIS　k6773　(河川遮水シート)
	ジオメンブレン			
	河川吸い出し防止シート			
	袋型根固工法用袋			
耐寒性 耐熱性試験	ジオテキスタイル(盛り土補強工法)	各温度における引張強度 強度保持率(%)	特殊な現場条件(温度条件)において使用する場合は、想定される温度条件下で引張強度試験を行い強度試験を行い強度保持率を求める。(吸い出し防止シート)	温度依存性試験 温度変化試験
	ジオメンブレン			
	河川吸い出し防止シート			
	袋型根固工法用袋			
耐腐食土試験	ジオテキスタイル(盛り土補強工法)	引張強度 強度保持率(%)		園芸用腐葉土を使用
	ジオメンブレン			
	河川吸い出し防止シート			
	袋型根固工法用袋			
燃焼性	ジオテキスタイル(盛り土補強工法)	難燃性 (炭化距離)	河川の維持管理を目的に草刈りを行い集草・燃却することから、仮に連節ブロック(シート)付近で燃却した場合を想定し、燃焼性試験を行う。(吸い出し防止シート)	・屋外試験 ・JIS　L1091(参考評価)
	ジオメンブレン			
	河川吸い出し防止シート			
	袋型根固工法用袋			

7.1.2　シートに特有な環境条件を想定しての選定

シートに特徴的な環境条件として，シートが地表のごく近傍に埋設されていることが挙げられる。そのような環境化で特有の劣化現象を推定し，検討対象とする必要がある。また，覆土や土砂充填によって劣化の進行緩和が期待できる要因については，その緩和効果に頼りきることができ，シートに対して特別に要求性能を設けなくても良いのか，十分に検討する必要がある。それらについて検討した結果を以下にまとめて示す。

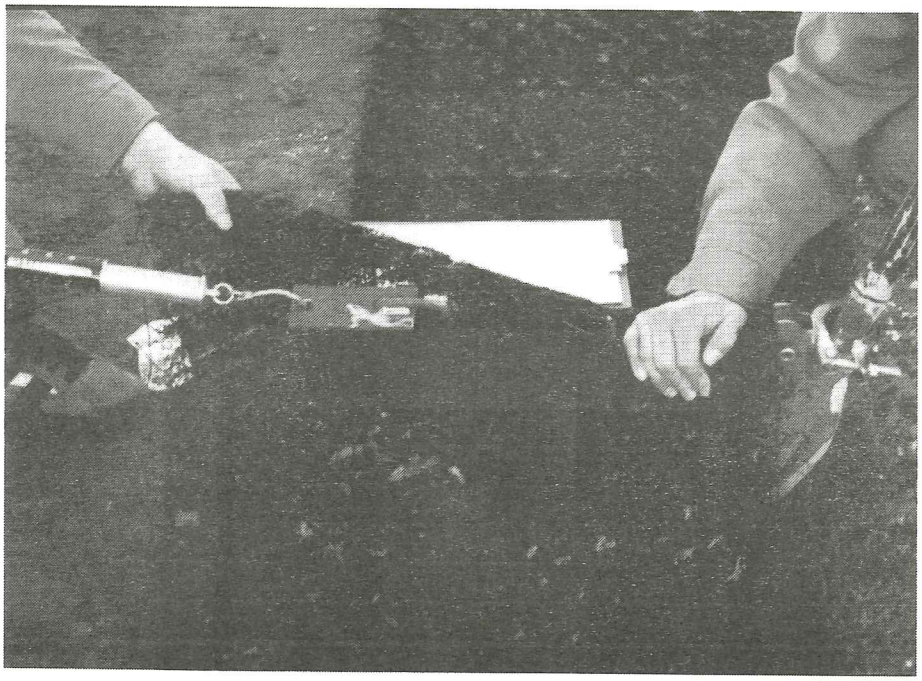
⑴　凍結～融解の繰り返しを受けての劣化

地表面近傍は，敷設した場所の気候によっては，冬季に凍結～融解を繰り返すことが想定される。覆土にはそのような温度変化を緩和する効果があるが，シートのようにごく地表近傍に敷設する場合にはその効果が期待できない。シート内に充填した土砂が凍り付き，空隙を膨らませるようになり，シートを損傷することが懸念される。さらに，繰り返し低い温度になることで，素材自体が劣化し，強度や耐衝撃性が劣化することも懸念される。**表－7.1**に示した耐寒試験では，繰り返し凍結～融解を作用させるものではないので，上記した懸念について検討することができない。上記のような劣化が果たして生じうるか，簡易的な試験を行ってまず，確認する必要がある。

⑵　草刈り・集草機および自動車乗り入れなどによる繰り返し載荷による劣化

シートを敷設したのり面上を草刈機および集草機が定期的に走行する（**表－6.2**参照）。それに対して，シートの強度に対する要求性能について検討を加えた第６章では，土砂充填されたシートであれば草刈り機の走行や旋回によって損傷が生じないことを明らかにしている。しかし，繰り返し同じような場所を走行するとシートに徐々にダメージが蓄積されて，劣化することが懸念される。同様なことが，自動車の乗り入れや重機の走行にも当てはまる。したがって，のり面上での走行によって繰り返し加わる変形力もシート特有の劣化要因と考えられる。

6.2に土砂を充填したシート上に草刈機・自動車・重機を走行させてシートの損傷の有無を確認する実験結果についてまとめて示した。その実験の際，損傷の有無の確認とともに，走行前後のシートの引っ掛け強度を簡易引っ掛け試験により測定を行って，強度低下の程度を明らかにした。簡易引っ掛け試験とは，**写真－7.1**に示すように6.3.1に示した引っ掛け試験と同じ引っ掛け金具（**図－6.4**参照）を用いるが，引っ張り力を人力で作用させるとともに，バネば



写真－7.1　簡易引っ掛け試験の実施状況

かりで引っ張り力を測定するものである。したがって，6.3.1に示した標準試験に比較して，引っ張り力を増加させる速度や引っ張り方向などが一定させにくく，そのための実験誤差が大きくなっている。以上ような試験の結果を表−7.2，7.3に示す。表中に示した強度保持率とは，走行前の引っ掛け強度S_0を基準（100%）として，ある所定回数の走行を繰り返した後の引っ掛け強度S_1の大きさを百分率で表した（$S_1/S_0\times100$）値である。まず，表−7.2に示した草刈機の試験結果について着目すると，平坦面上に敷設したシートに土砂充填をして100回繰り返し走行を行った場合，土砂充填なしの場合に損傷が認められた

表−7.2　草刈り機の繰り返し走行による引っ掛け強度の低下

	タイプ	シート名	簡易引掛け強度（kgf）				強度保持率（%）		
			新品	土砂無		土砂有	土砂無		土砂有
				草刈25往復	草刈50往復	草刈50往復	草刈25往復	草刈50往復	草刈50往復
第一次	ヘチマ	A-1-4	7.33	7.7	5.3	7.0	104.5	72.7	95.5
		A-3-3	6.33	6.0	4.7	6.7	94.7	73.7	105.3
		B-2-2	17.00	18.7	12.0	15.3	109.8	70.6	90.2
	ネット	A-4-2	16.33	19.7	13.7	10.3	120.4	83.7	63.3
		A-8-2	13.67	11.3	15.0	11.0	82.9	109.8	80.5
	編み物	C-3-2	18.33	17.3	19.3	17.0	94.5	105.3	92.7
	織物	D-1-4	30.00	30.0	30.0	30.0	100.0	100.0	100.0
		D-3-3	22.33	15.3	17.0	17.0	68.7	76.1	76.1
第二次	ヘチマ	A-1（B）	30.00	30.0	30.0	30.0	100.0	100.0	100.0
		A-1(B改)	30.00	30.0	30.0	30.0	100.0	100.0	100.0
		A-1（A）	30.00	30.0	30.0	30.0	100.0	100.0	100.0
		A-1(特A-2)	30.00	30.0	30.0	30.0	100.0	100.0	100.0
		A-1(特A-3)	30.00	30.0	30.0	30.0	100.0	100.0	100.0
		A-2（改）	23.00	15.3	17.0	26.3	66.7	73.9	114.5
		A-3-5	13.33	10.0	12.7	13.7	75.0	95.0	102.5
		A-6	18.33	11.3	11.3	15.7	61.8	61.8	85.5
		B-A1	24.33	19.7	20.0	19.3	80.8	82.2	79.5
		B-A2	11.33	7.7	8.7	10.7	67.6	76.5	94.1
		B-B	18.33	12.3	13.0	14.7	67.3	70.9	80.0
	ネット	A-4-2a	28.67	28.3	30.0	30.0	98.8	104.7	104.7
		A-4-2b	28.33	27.0	30.0	30.0	95.3	105.9	105.9
		A-4-4a	30.00	30.0	30.0	30.0	100.0	100.0	100.0
		A-4-4b	30.00	30.0	30.0	30.0	100.0	100.0	100.0
		A-8-3	27.00	25.7	29.3	27.7	95.1	108.6	102.5
		A-8-4	28.00	26.3	25.0	24.3	94.0	89.3	86.9
	編み物	C-1（改）	30.00	30.0	30.0	30.0	100.0	100.0	100.0
		C-3-5	24.00	16.0	16.3	16.0	66.7	68.1	66.7
		C-3-6	17.67	15.3	12.0	14.0	86.8	67.9	79.2
		C-3-7	18.00	19.0	20.7	23.3	105.6	114.8	129.6
	織物	D-3(1)	30.00	30.0	30.0	30.0	100.0	100.0	100.0
		D-3(2)	30.00	30.0	29.3	27.7	100.0	97.8	92.2

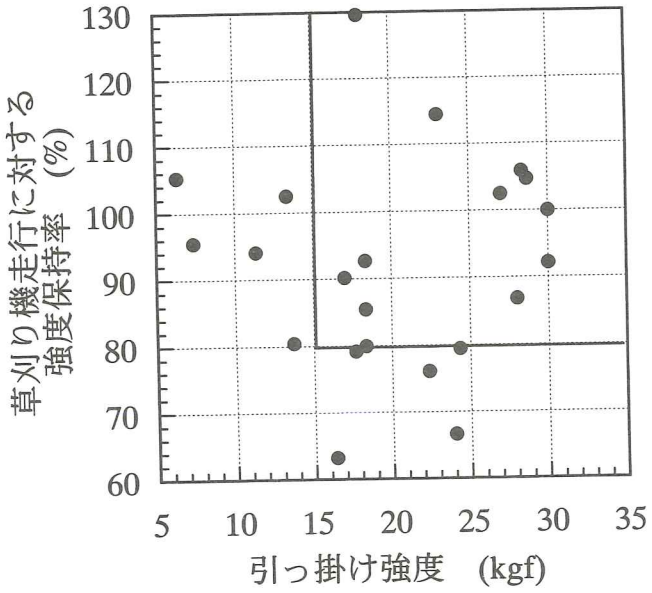
注)黒に着色した欄のシートは、表-6.4に示したランク分けでBが2つ以上かCまたはDが1つ以上あったものである。

表－7.3　自動車および重機の走行による引っ掛け強度の低下

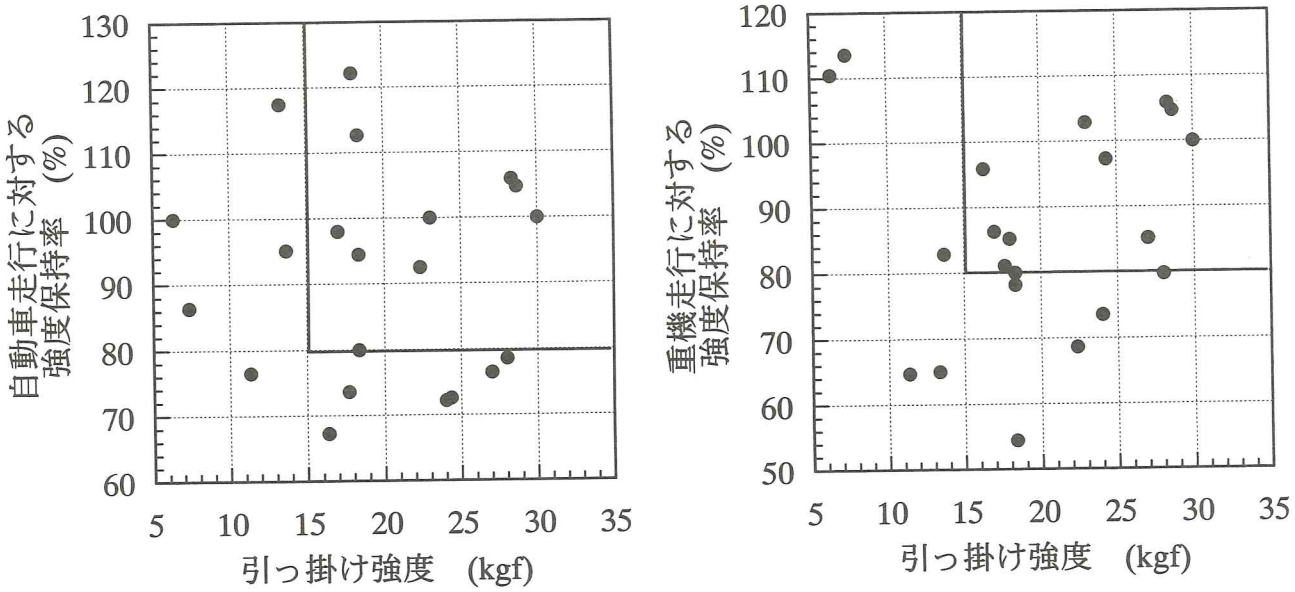
	タイプ	シート名	簡易引掛け強度（kgf）							強度保持率（%）					
				土砂無		土砂有	土砂無		土砂有	土砂無		土砂有	土砂無		土砂有
			新品	重機１往復	重機3往復	重機3往復	RV5往復	RV10往復	RV10往復	重機１往復	重機3往復	重機3往復	RV5往復	RV10往復	RV10往復
第一次	ヘチマ	A-1-4	7.33	8.1	8.0	8.3	6.3	5.3	6.3	110.5	109.1	113.6	86.4	72.7	86.4
		A-3-3	6.33	8.7	6.3	7.0	5.7	9.0	6.3	136.8	100.0	110.5	89.5	142.1	100.0
		B-2-2	17.00	20.3	18.7	14.7	16.2	16.0	16.7	119.6	109.8	86.3	95.3	94.1	98.0
	ネット	A-4-2	16.33	16.0	15.3	15.7	12.3	15.0	11.0	98.0	93.9	95.9	75.5	91.8	67.3
		A-8-2	13.67	14.3	14.3	11.3	15.5	17.0	13.0	104.9	104.9	82.9	113.4	124.4	95.1
	編み物	C-3-2	18.33	16.0	17.3	14.7	16.8	17.0	20.7	87.3	94.5	80.0	91.6	92.7	112.7
	織物	D-1-4	30.00	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
		D-3-3	22.33	20.0	20.3	15.3	19.6	20.7	20.7	89.6	91.0	68.7	87.8	92.5	92.5
第二次	ヘチマ	A-1（B）	30.00	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
		A-1(B改)	30.00	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
		A-1（A）	30.00	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
		A-1(特A-2)	30.00	30.0	30.0	30.0	28.0	30.0	30.0	100.0	100.0	100.0	93.3	100.0	100.0
		A-1(特A-3)	30.00	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
		A-2（改）	23.00	14.2	14.7	23.7	20.3	25.3	23.0	61.7	63.8	102.9	88.4	110.1	100.0
		A-3-5	13.33	12.3	8.3	8.7	10.0	10.0	15.7	92.5	62.5	65.0	75.0	75.0	117.5
		A-6	18.33	18.3	13.0	10.0	11.0	12.3	17.3	100.0	70.9	54.5	60.0	67.3	94.5
		B-A1	24.33	15.7	17.3	23.7	22.7	21.0	17.7	64.4	71.2	97.3	93.3	86.3	72.6
		B-A2	11.33	8.0	9.0	7.3	8.3	8.0	8.7	70.6	79.4	64.7	73.5	70.6	76.5
		B-B	18.33	10.7	11.7	14.3	14.3	14.0	14.7	58.2	63.6	78.2	78.2	76.4	80.0
	ネット	A-4-2a	28.67	30.0	30.0	30.0	27.0	30.0	30.0	104.7	104.7	104.7	94.2	104.7	104.7
		A-4-2b	28.33	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	105.9	105.9	105.9	105.9	105.9	105.9
		A-4-4a	30.00	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
		A-4-4b	30.00	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
		A-8-3	27.00	30.0	24.0	23.0	25.3	26.3	20.7	111.1	88.9	85.2	93.8	97.5	76.5
		A-8-4	28.00	30.0	23.7	22.3	17.0	24.0	22.0	107.1	84.5	79.8	60.7	85.7	78.6
	編み物	C-1（改）	30.00	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
		C-3-5	24.00	17.3	16.0	17.7	12.3	18.0	17.3	72.2	66.7	73.6	51.4	75.0	72.2
		C-3-6	17.67	16.0	16.0	14.3	11.0	15.3	13.0	90.6	90.6	81.1	62.3	86.8	73.6
		C-3-7	18.00	15.7	16.7	15.3	16.0	16.3	22.0	87.0	92.6	85.2	88.9	90.6	122.2
	織物	D-3(1)	30.00	30.0	30.0	30.0	27.0	30.0	30.0	100.0	100.0	100.0	90.0	100.0	100.0
		D-3(2)	30.00	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

注)黒に着色した欄のシートは、表-6.4に示したランク分けでBが2つ以上か、
CまたはDが1つ以上あったものである。

シート（欄を黒色に着色したもの）も含めて大部分のシートで強度保持率が80%以上である。表－7.3に重機と自動車を繰り返し走行を行った場合の結果を示したが，この場合には損傷が認められたもの以外にも，80%以下となった場合が多く認められる。また，図－7.1，7.2に走行前の引っ掛け強度と強度保持率（土砂充填あり）の関係を示す。シートの必要最小強度とした引っ掛け強度15kgf（6.3.1参照）より大きな強度を有するシートにのみ着目しても，草刈り機の走行に対しては土砂充填されていれば80%を大きく下まわる場合がほとんどないと判断される。草刈り機の100回走行は年２回の草刈り・集草を想定すると25年分であり，目標耐用年数(30年)にほぼ相当する。したがって，草刈り・集草の繰り返し走行によって20%程度の強度低下が生じる可能性があるが，引っ掛け強度15kgf 以上のシートであれば耐久性は実用上十分であると判断する。ただし，自動車や重機の繰り返し走行に対しては，強度低下がやや顕著に生じているので，そのような場所については必要に応じて補修をする必要がある。



図－7.1　走行前の引っ掛け強度と強度保持率の関係(草刈り機の繰り返し走行)



図－7.2　走行前の引っ掛け強度と強度保持率の関係(自動車,重機の走行)

7.2　試験・評価法の整理とシートへの適用に関する留意事項

最終的に選定したシートの耐久性試験項目とその方法を表－2.2にまとめて示した。これらの試験は2.2.1(4)に示したように暫定であり，今後，現地施工を行うとともに耐久性に関する現地調査を行い，その結果を受けて改善すべきものである。以下ではこれらの試験をプロトタイプシートに対して実施した結果について示すとともに，その結果からシートへの適用上の留意事項について説明を加える。

7.2.1　促進暴露および屋外暴露試験

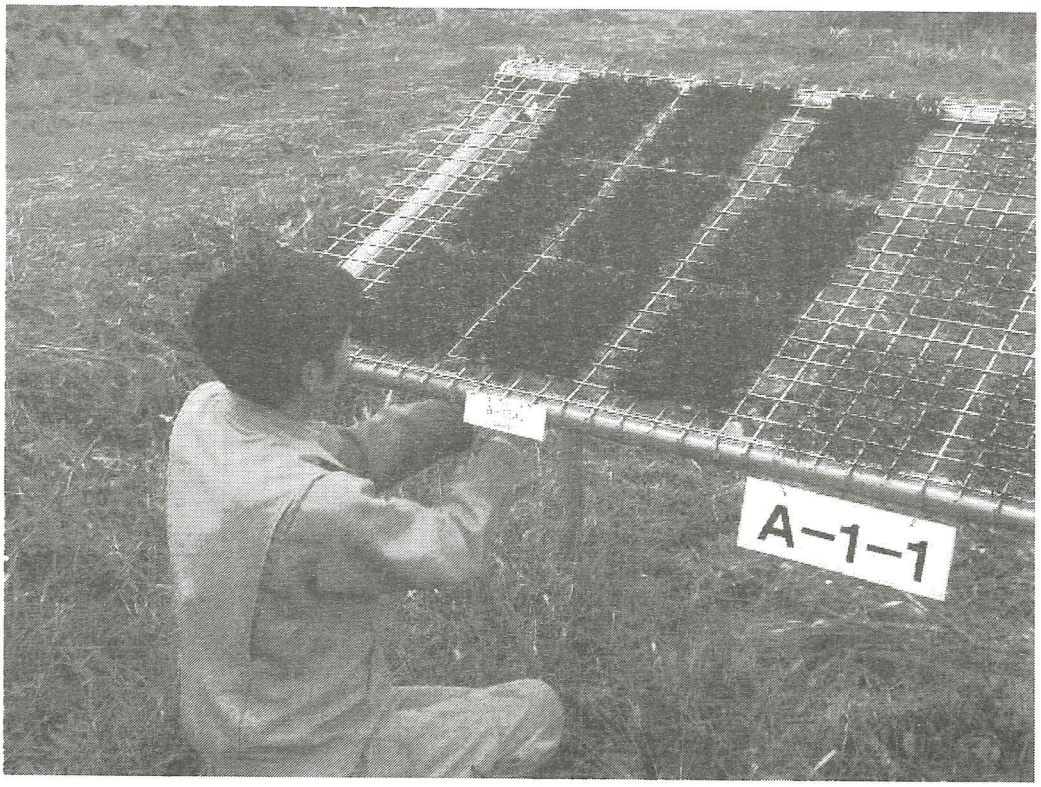
(1)　促進暴露試験による耐用年数の評価

同一のシートに対して促進暴露試験と屋外暴露試験を行い，両者の試験結果を比較して「屋外暴露１年で生じうる劣化が，促進暴露試験の何時間に相当するか」を明らかにすることを試みた。いずれの試験ともJIS規格となっている試験法(促進暴露はJIS A1415，屋外暴露はJIS A1410）に準じて行った。試験条件を表－7.4に示す。促進暴露試験では，キセノンアークランプによって一定の照射強度で光線を照射するとともに，試験片の温度（ブラックパネル温度)を一定に保ったまま，湿度を周期的に50%と100%に変化させる。また，屋外暴露試験では，日射を遮る構造物が周囲にない屋外に写真－7.2に示すように架台を設けて，その上にシートを固定して暴露させる。試験対象としたのは，表－7.5に示す第１～３次プロトタイプシートである。最大の試験期間は，促進暴露では4000時間(約166日)，屋外暴露では２年間である。

表－7.4　促進暴露試験の試験条件

試験機	キセノンアークランプ式耐候性試験機	
試験条件	2 時間を 1 サイクルとして、下記の条件の照射と前面降雨を繰り返す	
照射	照射強度(W/m^2)	30
	ブラックパネル温度(℃)	63
	湿度(%)	50
	試験時間(min)	102
前面降雨	照射強度(W/m^2)	30
	ブラックパネル温度(℃)	63
	湿度(%)	100
	試験時間(min)	18

屋外暴露試験では，太陽の日射時間や高度などの条件が季節によって変化するため，厳密には日々の紫外線の照射強度が一定していない。しかし，第一次プロトタイプの屋外暴露試験を行った期間に波長400



写真－7.2　屋外暴露試験の試験状況

表－7.5　促進暴露試験および屋外暴露試験の試験結果

プロトタイプ世代	タイプ	シート名	引っ掛け強度 (kgf)	引っ張り強度 (kgf/m)	促進暴露試験（強度保持率(%)） 100hr	400hr	1000hr	2000hr	屋外暴露試験（強度保持率(%)） 2ヶ月	4ヶ月	8ヶ月	1年	1.5年	2年	備考
第一次	ヘチマ	A-1-1	1.7	54.4	－	－	－	－	73.8	82.8	67.4	61.7	62.2	78.4	
		A-1-2	6.3	92.4	－	－	－	－	107.3	180.7	116.7	139.0	131.5	131.8	
		A-1-3	12.6	274.7	80.3	102.0	88.1	49.5	94.4	171.8	83.6	133.7	－	120.1	
		A-1-4	14.4	338.8	100.5	93.8	121.2	90.3	110.1	140.3	110.6	155.8	134.0	139.9	
		A-2-1	0.7	137.4	－	－	－	－	37.5	－	－	－	－	－	
		A-2-2	1.1	136.8	－	－	－	－	192.6	153.7	107.4	107.4	74.1	81.5	
		A-2-3	3.5	124.4	－	－	－	－	216.7	185.9	158.3	158.3	117.9	114.1	
		A-2-4	12.5	136.2	203.3	170.7	96.7	－	128.9	153.8	139.1	139.1	59.8	60.3	
		A-3-1	6.5	69.4	－	－	－	－	77.5	79.0	98.5	89.4	85.3	4.7	
		A-3-2	11.2	161.2	56.4	71.9	71.4	67.0	148.6	160.5	144.9	170.0	124.1	8.0	
		A-3-3	12.7	274.6	－	－	－	－	164.7	179.0	208.0	166.0	197.9	9.7	
		A-3-4	19.9	535	113.8	74.8	120.2	65.6	136.8	143.5	229.7	93.8	152.1	6.0	
		A-6-1	5.0	66.4	－	－	－	－	64.0	44.4	－	－	－	－	
		A-6-2	4.7	57.3	－	－	－	－	169.4	98.9	－	－	－	－	
		A-6-3	15.2	211.4	56.1	－	－	－	108.3	99.0	－	－	－	－	
		A-6-4	12.8	172.9	102.0	－	－	－	117.4	78.7	－	－	－	－	
		A-7-1	7.6	324.8	－	－	－	－	19.6	15.2	81.3	92.3	－	－	
		A-7-2	9.4	308	－	－	－	－	64.2	140.3	84.8	80.4	－	－	
		A-7-3	9.6	108.3	82.4	84.5	87.0	67.7	85.2	65.6	81.4	92.1	－	－	
		A-7-4	14.2	122.8	－	－	－	－	95.0	107.7	80.6	81.3	－	－	
		A-9-1	4.0	40.8	－	－	－	－	100.0	90.9	81.8	81.8	79.1	－	
		A-9-2	6.4	20.6	－	－	－	－	94.0	89.0	85.1	83.2	83.0	－	
		A-9-3	8.1	66	97.0	90.3	－	－	95.6	97.0	87.3	86.4	85.0	－	
		A-9-4	7.5	54.8	－	－	－	－	94.9	87.8	81.0	79.4	78.0	－	
		B-1-1	20.4	454	90.2	84.6	58.7	40.5	79.7	75.8	61.0	66.4	63.4	63.0	○
		B-1-2	30.2	634	－	－	－	－	99.1	83.0	50.6	55.1	53.4	60.6	
		B-1-3	38.7	712	73.7	60.9	47.4	52.3	152.2	128.4	84.0	82.9	73.6	54.2	
		B-1-4	67.5	950	－	－	－	－	132.8	127.6	89.2	110.7	98.1	93.9	
		B-2-1	15.5	334	－	－	－	－	81.4	74.3	68.0	62.5	69.3	75.4	
		B-2-2	22.2	464	59.0	56.7	44.1	24.1	87.1	81.5	57.2	34.5	56.9	56.0	○
		B-2-3	34.3	554	－	－	－	－	94.9	85.2	54.8	43.4	67.3	69.7	
		B-2-4	55.2	688	58.8	38.0	40.2	47.3	135.8	77.6	54.1	67.7	53.4	50.0	
		B-3-1	8.5	194	－	－	－	－	149.5	126.8	133.6	103.9	99.1	90.7	
		B-3-2	14.5	274	67.3	80.3	60.4	19.1	97.1	92.0	71.6	78.1	75.2	73.7	○
		B-3-3	28.1	244	－	－	－	－	110.7	103.3	92.0	88.1	89.8	95.1	
	ネット	A-4-1	25.0	424	－	－	－	－	98.8	109.9	103.0	124.3	91.8	102.6	
		A-4-2	24.0	507	107.8	112.5	103.5	137.8	81.9	102.0	116.4	121.3	93.6	90.0	○
		A-4-3	22.0	267	－	－	－	－	117.2	114.4	114.8	140.9	119.7	114.3	
		A-4-4	25.0	390	－	－	－	－	99.7	101.5	80.2	95.9	81.4	77.9	
		A-4-5	25.0	438	94.4	90.4	89.8	128.7	88.6	105.9	100.7	117.8	96.7	106.7	○
		A-4-6	26.0	283	－	－	－	－	108.1	112.0	107.8	134.5	103.0	107.0	
		A-5	14.0	494	81.4	99.8	62.8	74.1	101.4	74.9	154.7	105.4	85.2	74.9	
		A-8-1	6.7	297	109.9	159.5	99.2	51.6	95.7	106.7	26.7	53.2	48.9	1.4	
		A-8-2	6.7	285.3	－	－	－	－	95.5	107.5	27.0	50.7	34.7	1.3	

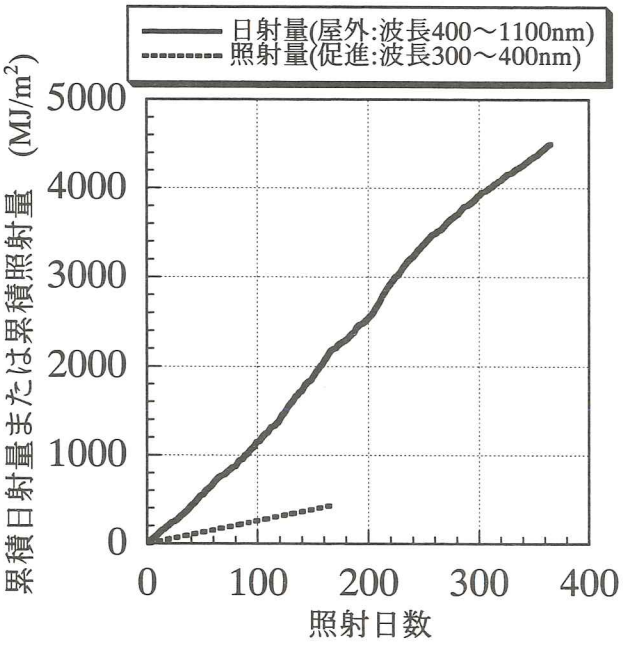
プロトタイプ世代	タイプ	シート名	引っ掛け強度 (kgf)	引っ張り強度 (kgf/m)	促進暴露試験（強度保持率(%)） 100hr	400hr	1000hr	2000hr	屋外暴露試験（強度保持率(%)） 2ヶ月	4ヶ月	8ヶ月	1年	1.5年	2年	備考
第一次	編み物	C-1-1	85.7	1257	129.6	126.8	129.4	104.4	81.7	93.8	78.5	73.9	89.1	87.5	
		C-1-2	98.8	2031	－	－	－	－	72.4	89.4	71.1	67.5	79.3	86.8	
		C-2-1	27.0	421.6	53.9	46.4	28.3	20.4	－	65.5	46.8	39.7	42.8	1.3	○
		C-2-2		302	－	－	－	－	94.9	97.1	69.1	58.0	62.6	2.4	
		C-3-1	11.6	654.6	－	－	－	－	94.1	84.4	61.6	62.7	62.2	－	
		C-3-2	15.2	462	85.8	79.9	－	－	97.8	94.0	82.0	79.2	76.9	－	
		C-3-3	17.5	462	－	－	－	－	96.5	82.5	74.1	73.4	69.9	－	
		C-3-4	24.4	654.6	98.7	96.0	－	－	97.8	88.9	70.0	70.5	70.2	－	
	織物	D-1-1	28.1	3294	－	－	－	－	119.4	123.2	112.3	100.0	105.1	－	
		D-1-2	135.0	7481	－	－	－	－	108.6	102.5	97.4	95.3	94.9	－	
		D-1-3	26.8	3875	－	－	－	－	142.0	139.8	139.1	122.6	118.3	－	
		D-1-4	53.0	9207	－	－	－	－	115.6	123.0	106.3	107.4	98.8	－	
		D-1-5	14.3	3997	－	－	－	－	90.2	86.2	79.2	74.6	72.9	－	
		D-1-6	86.5	8835	108.0	104.4	100.6	91.2	147.1	129.1	119.0	126.3	111.5	－	
		D-2	247.3	12925	－	－	－	－	102.1	102.4	30.7	25.9	21.4	3.1	
		D-3-1	17.6	646.6	－	－	－	－	151.4	114.5	37.2	32.5	－	－	
		D-3-2	17.3	621.7	－	－	－	－	105.8	88.1	37.5	31.4	－	－	
		D-3-3	21.5	621.7	130.9	63.7	19.0	－	80.3	90.4	58.8	55.8	－	－	
		D-3-4	22.8	659.2	－	－	－	－	82.7	131.1	90.7	94.6	－	－	
第二次	ヘチマ	A-1（A）	13.4	640.0	154.1	128.9	118.1	84.1	159.4	160.9	124.4	－	－	－	○
		A-1(特A-2)	29.3	576.0	96.0	73.8	78.5	157.6	78.8	108.0	216.7	－	－	－	
		A-2（改）	94.4	323.8	109.0	96.5	83.4	－	93.5	－	－	－	－	－	○
		A-3-5		324.8	110.6	332.4	116.7	87.2	78.3	69.5	－	－	－	－	
		A-6		256.6	96.6	103.8	93.0	－	99.3	－	－	－	－	－	
		B-A2	18.5	242.9	103.0	97.4	62.1	28.1	96.9	90.6	89.5	－	－	－	
	ネット	A-4-4a	40	1157.0	82.3	91.2	98.4	131.6	99.0	127.1	107.0	－	－	－	
		A-4-4b	33	691.0	85.7	106.4	114.0	132.7	78.7	129.2	93.1	－	－	－	
		A-8-4	25.9	1929.4	94.0	93.7	101.0	103.8	104.3	114.9	－	－	－	－	
	編み物	C-1（改）	105	2212.0	97.4	83.5	102.1	103.0	98.2	96.8	92.9	－	－	－	
	織物	D-3(2)	17.65	650.6	98.4	100.5	101.0	－	100.7	－	－	－	－	－	

					400hr	1000hr	2000hr	4000hr	2ヶ月	4ヶ月	8ヶ月	1年	－	－	
第三次	ヘチマ	A-1-F	32.6	－	89.6	94.2	84.7	105.8	120.6	126.1	116.0	－	－	－	
		A-2-F	16.0	－	118.8	109.4	87.5	90.6	106.3	100.0	96.9	－	－	－	
		A-3-F	20.3	－	103.3	95.0	94.6	81.1	102.7	111.4	98.1	－	－	－	
		B-F	17.2	－	123.3	104.7	194.2	168.6	104.1	115.7	154.1	－	－	－	
	ネット	A-4-3F	58.0	－	65.5	60.3	67.2	65.5	84.5	70.7	67.2	－	－	－	
		A-4-5F	43.0	－	81.4	83.7	81.4	79.1	107.0	97.7	102.3	－	－	－	
		A-8-F	32.8	－	77.1	88.7	77.4	84.5	99.4	100.6	109.8	－	－	－	
	編み物	C-1-F	80.6	－	92.2	73.1	80.3	75.8	99.8	99.4	94.0	－	－	－	
		C-3-F	26.5	－	103.0	105.7	84.9	81.1	105.3	99.6	－	－	－	－	
	織物	D-1-F	97.3	－	117.4	97.1	91.5	91.5	133.1	130.1	126.6	－	－	－	
		D-3-F	18.6	－	101.6	84.4	81.2	81.7	88.7	98.4	89.8	－	－	－	

注）第1,2次は引っ張り強度、第3次は引っ掛け強度によって強度保持率を求めた。

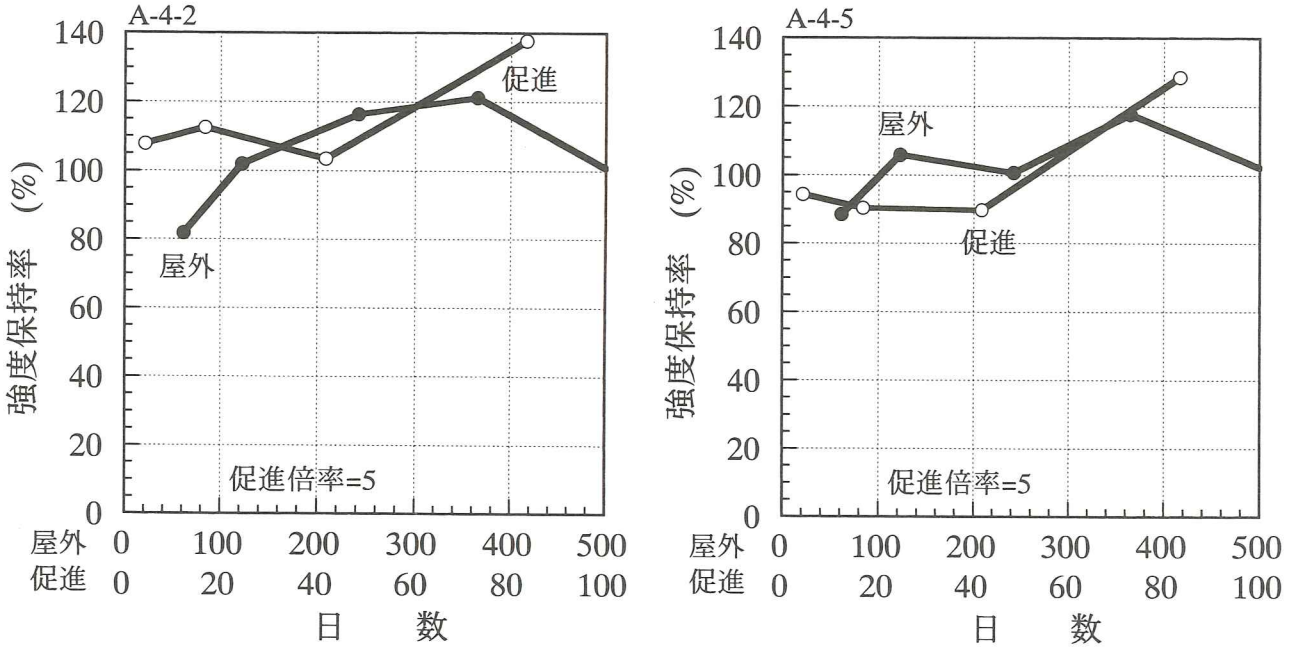
～1100nmの照射量の測定結果を示した図－7.3に見られるように，累積日射量は時間の増加に伴ってほぼ直線的に増加している。したがって図－7.3に併記した促進暴露試験（波長300～400nm）と同じように，試験期間を通じてほぼ一定の照射量と近似して考えて良い。

劣化の促進倍率は，同一のシートについて屋外暴露を行う（または現地で実際に供用する）とともに促進暴露も行い，着目したシート特性値（例えば引っ張り強度など）の劣化に伴う変化量と時間の関係を比較して，促進暴露試験での劣化の進行速度が屋外暴露試験の結果と同一とするための時間倍率として求められる。なお，このようにして求めた倍率は，促進暴露試験の条件によってのみ変化するのではなく，主素材の種類，構造，構成材の太さ，素材の色などといった劣化対象物の特性によっても変化する。したがって，既往の他製品について計測された促進倍率をシートにそのまま適用することもできない。

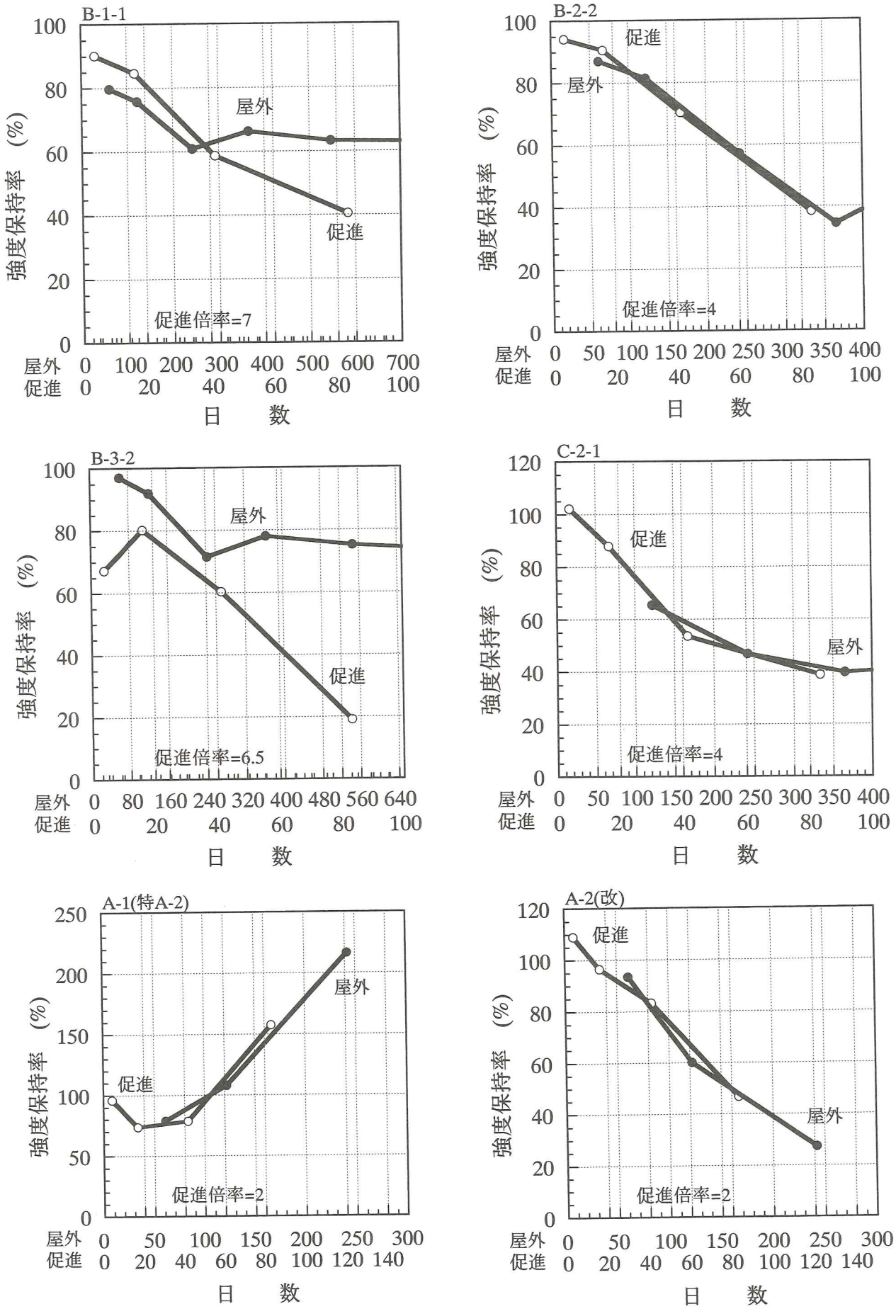


図－7.3　屋外暴露試験時の累積日射量と促進暴露試験の累積照射量

第１～３次プロトタイプについて強度保持率の時間変化を測定した結果を表－7.5に示す。なお，第1，2次では引っ張り試験，第３次は引っ掛け試験によって強度保持率を求めている。また，表－7.5の備考欄に○を付けたシートについて，促進暴露と屋外暴露試験の強度保持率の時間変化を図－7.4に示す。同図では，促進暴露試験による強度保持率の時間変化傾向が屋外暴露試験によるものと同様になるように，促進暴露試験の時間を図中に示す倍率（つまり促進倍率）で引き延ばしている。なお，図示しなかったシートは，プロットのばらつきが大きく促進倍率を求めることができなかった。図示したシートの場合でも促



図－7.4(1)　促進暴露と屋外暴露試験の強度保持率の時間変化



図－7.4(2)　促進暴露と屋外暴露試験の強度保持率の時間変化

進暴露と屋外暴露試験の強度保持率の時間変化傾向が良好に一致しないので精度が低い評価であるが，促進倍率が２～７倍程度，平均では約4.5倍になることが分かった。

以上の結果からシートの場合，2000時間(83日間)の促進暴露試験によって，屋外での約１年間に相当する劣化状況が再現できると推定される。**表－2.2**に示したように，今回の暫定案では4000時間の促進暴露試験を行うこととしたが，この結果から「シートが露出した状態となる累積時間が約２年間以内であれば，シートの侵食防止効果が確保できるだけの耐久性を有する」ことを確認できると考えられる。

シートは，地表近傍に埋設されるとともに，その埋設された地上部には植物が繁茂した状態で供用される。その状態からシートが露出する(例えば降雨による表土の流失などによって)ということはどれくらい発生しやすいのか，またシートが露出してから維持管理によってシートが再度埋められるまでに要する時間はどの程度であるのかが分かれば，促進暴露試験の評価結果を用いて，大まかに耐用年数が推定できる。例えば，露出してから再埋設するまでの時間が１年であるとする。その場合，「約２年間の露出に対して耐久性が維持できる」と評価されたシートは，2回の露出まで耐えられることになる。さらに10年に１回程度の頻度で露出するのであれば，2回まで露出できるので，耐用年数は約20年となる。

上記の試算から分かるように，露出頻度と露出継続時間が見積もれれば，紫外線暴露に対する「耐用年数」を確保するための促進暴露試験の試験時間が明確になる。このような調査を今後，施工後に行っていく必要がある。

⑵　強度保持率と侵食防止効果を発揮するシート部分の劣化の関連性

シートの種類によっては，主に施工時に必要とされる強度を発揮する部分と，侵食防止効果を発揮する部分にシートの構造を２分できるものがある。その場合，強度発揮部分はほとんど劣化しないものの，侵食防止に関わる部分の劣化が非常に進行し，侵食防止効果が失われる場合があると懸念される。このような劣化が生じる場合，他の土木資材と同様に強度保持率のみによる耐久性の評価は不十分であり，以下に例示するような観察も同時に行わなければならない。

• 織物－テープ材編み付けタイプの場合

このタイプのシートは，**写真－7.3**に示すように白色に見える基布と呼ばれる織布部分が強度を発揮し，緑色のテープ材が侵食防止効果を発揮する。この写真は2000時間の促進暴露試験を行った後のシートであるが，光線に暴露したテープの頂部が劣化して切れている。

• ネット－折り曲げタイプの場合

このタイプのシートは，**写真－7.4**に示すように凹凸を付けた複数のネット材が侵食防止効果を発揮し，それらが熔着されて強度が発揮される。暴露するとネット材の強度は大きく減少しないものの，熔着部が劣化してネット材が分離していた。

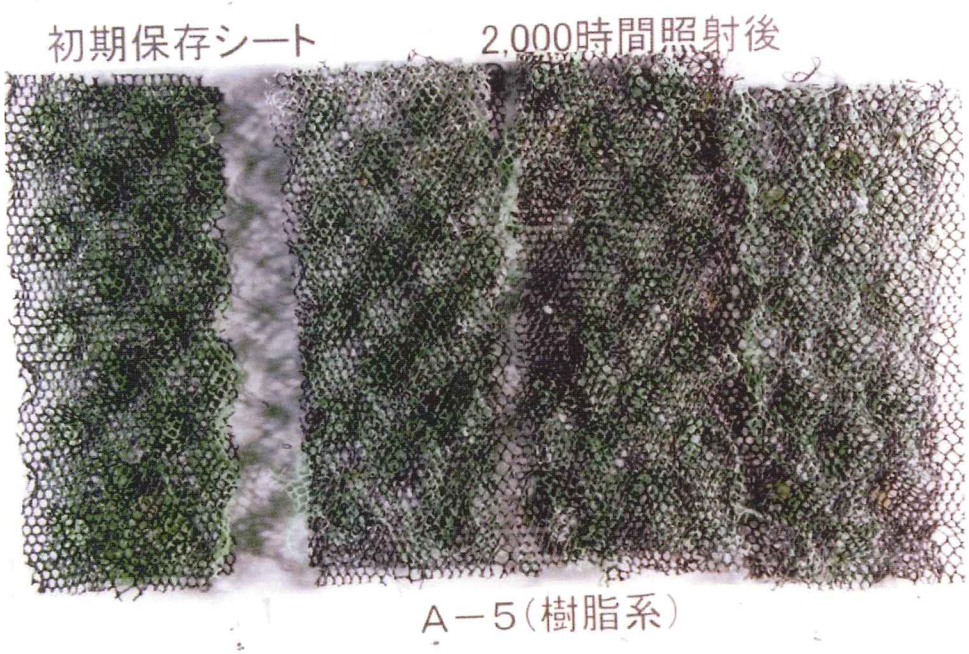
以上のような劣化状況では，出水時に十分な侵食防止効果が発揮できないと考えられる。このような状況の有無も確認して，耐久性を評価しなければならない。

⑶　シートの解れ易さ

⑵に示したようにシートの侵食防止を発揮する部分が劣化し，シートを構成する材料が指で引っ張るとぽろぽろと取れるような状態まで解れやすくなることが懸念される。今回のプロトタイプの範囲では，7.2.6に示す評価基準を満たすものであれば，特に問題がなかった。今後新たなタイプのシートも考案されることもあると思われるが，その際はシートの解れ易さについて，8.1に示す試験を行って解れ易さを



写真－7.3　織物－テープ材編み付けタイプの促進暴露試験後の劣化状況



写真－7.4　ネット－折り曲げタイプの促進暴露試験後の劣化状況

評価する必要がある。

7.2.2　耐薬品性試験

中性（pH＝7），酸性（pH＝2），アルカリ性（pH＝12）に対する試験結果を表－7.6にまとめて示す。ここで強度保持率とは，上記の pH に調整した溶液中に浸漬する前に対する浸漬後の強度を百分率で表したものである。まず，中性の場合について，引っ張り強度と強度保持率をシートのタイプごとに比較した結果

表－7.6　耐薬品性試験結果

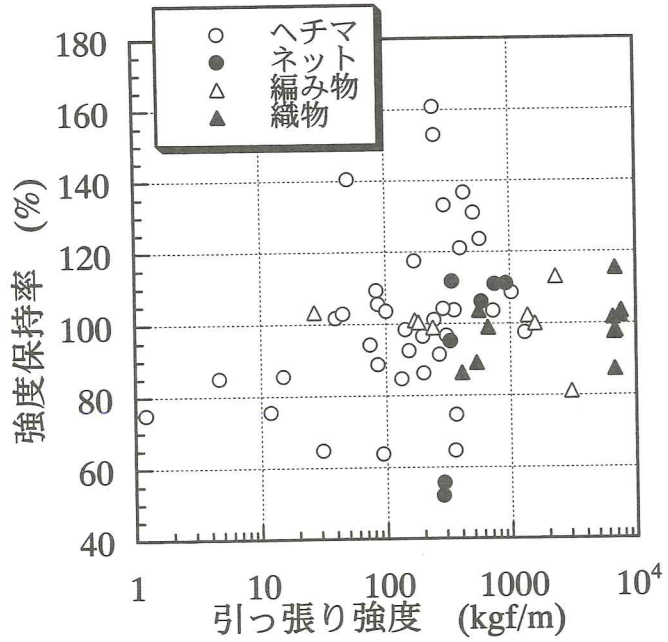
プロトタイプ世代	タイプ	シート名	引っ掛け強度 (kgf)	引っ張り強度 (kgf/m)	強度保持率(%) 耐水性	耐酸性	耐アルカリ性
第一次	ヘチマ	A-1-1	1.7	54.4	85.3	82.8	101.8
		A-1-2	6.3	92.4	53.1	65.3	63.9
		A-1-3	12.6	274.7	150.8	138.4	86.4
		A-1-4	14.4	338.8	173.6	130.7	133.2
		A-2-1	0.7	137.4	62.5	62.5	75.0
		A-2-2	1.1	136.8	51.9	74.1	85.2
		A-2-3	3.5	124.4	56.4	85.9	75.6
		A-2-4	12.5	136.2	56.5	92.9	64.9
		A-3-1	6.5	69.4	196.1	101.8	109.4
		A-3-2	11.2	161.2	164.7	91.7	105.6
		A-3-3	12.7	274.6	132.0	73.7	84.8
		A-3-4	19.9	535	102.7	99.0	91.6
		A-6-1	5.0	66.4	83.7	116.9	88.9
		A-6-2	4.7	57.3	111.8	163.2	94.4
		A-6-3	15.2	211.4	109.9	109.9	121.1
		A-6-4	12.8	172.9	93.5	119.3	103.8
		A-7-1	7.6	324.8	148.6	197.1	85.7
		A-7-2	9.4	308	132.5	118.9	140.6
		A-7-3	9.6	108.3	156.5	89.3	117.6
		A-7-4	14.2	122.8	82.6	69.6	64.7
		A-9-1	4.0	40.8	98.9	99.5	103.0
		A-9-2	6.4	20.6	99.6	100.0	103.7
		A-9-3	8.1	66	97.0	99.2	98.5
		A-9-4	7.5	54.8	99.9	8.4	101.2
		B-1-1	20.4	454	98.7	101.3	96.8
		B-1-2	30.2	634	105.6	114.3	131.1
		B-1-3	38.7	712	101.4	100.6	103.7
		B-1-4	67.5	950	100.9	94.7	97.7
		B-2-1	15.5	334	146.8	128.6	161.0
		B-2-2	22.2	464	84.8	114.5	104.3
		B-2-3	34.3	554	73.9	75.1	74.7
		B-2-4	55.2	688	113.4	127.6	123.7
		B-3-1	8.5	194	115.9	108.5	92.7
		B-3-2	14.5	274	132.5	139.8	153.0
		B-3-3	28.1	244	136.7	121.5	136.7
	ネット	A-4-1	25.0	424	120.4	101.3	111.8
		A-4-2	24.0	507	105.5	114.2	106.2
		A-4-3	22.0	267	110.6	127.2	111.3
		A-4-4	25.0	390	100.0	99.4	95.3
		A-4-5	25.0	438	98.7	110.8	111.1
		A-4-6	26.0	283	118.5	125.3	108.7
		A-5	14.0	494	88.7	99.5	96.6
		A-8-1	6.7	297	54.8	49.8	55.8
		A-8-2	6.7	285.3	54.0	52.8	52.2
第一次	編み物	C-1-1	85.7	1257	85.1	74.1	81.2
		C-1-2	98.8	2031	102.1	81.7	113.1
		C-2-1	27.0	421.6	88.0	101.8	102.4
		C-2-2		302	92.2	99.7	100.1
		C-3-1	11.6	654.6	99.5	100.1	101.0
		C-3-2	15.2	462	14.4	15.4	14.8
		C-3-3	17.5	462	100.1	101.5	100.4
		C-3-4	24.4	654.6	99.8	100.0	99.0
	織物	D-1-1	28.1	3294	102.7	115.2	101.7
		D-1-2	135.0	7481	91.9	107.9	98.1
		D-1-3	26.8	3875	99.8	90.9	87.4
		D-1-4	53.0	9207	113.8	101.5	103.5
		D-1-5	14.3	3997	121.7	117.9	115.4
		D-1-6	86.5	8835	120.2	108.6	102.3
		D-2	247.3	12925	75.8	94.8	97.7
		D-3-1	17.6	646.6	117.9	89.2	103.6
		D-3-2	17.3	621.7	79.5	99.3	99.0
		D-3-3	21.5	621.7	111.4	78.0	89.2
		D-3-4	22.8	659.2	110.5	108.5	86.4
第二次	ヘチマ	A-1（B）	22	702.0	131.9	118.8	119.9
		A-1(B改)	25.4	930.0	96.1	90.3	105.8
		A-1（A）	13.4	640.0	134.4	140.9	134.1
		A-1(特A-2	29.3	576.0	89.2	91.7	102.1
		A-1(特A-3	35	1044.0	72.6	79.5	107.9
		A-2（改）	94.4	323.8	117.0	70.9	63.8
		A-3-5		324.8	94.2	80.7	92.0
		A-6		256.6	98.6	104.4	95.9
		B-A1	21.1	327.7	89.7	88.0	74.7
		B-A2	18.5	242.9	99.3	97.8	76.9
		B-B	25.6	462.1	87.7	72.4	73.6
	ネット	A-4-2a	31	648.0	106.8	88.3	112.5
		A-4-2b	28	496.0	112.9	108.5	100.8
		A-4-4a	40	1157.0	93.6	90.8	96.1
		A-4-4b	33	691.0	115.8	111.9	89.1
		A-8-3	26.1	1824.1	101.0	102.3	95.1
		A-8-4	25.9	1929.4	113.3	105.0	115.7
	編み物	C-1（改）	105	2212.0	101.5	102.0	101.4
	織物	D-3(1)	17.35	755.3	98.1	97.9	101.5
		D-3(2)	17.65	650.6	103.9	104.6	103.7
第三次	ヘチマ	A-1-F	32.6		112.0	110.1	116.3
		A-2-F	16.0		121.9	81.3	68.8
		A-3-F	20.3		113.0	110.6	98.4
		B-F	17.2		107.0	95.9	120.3
	ネット	A-4-3F	58.0		79.3	86.2	82.8
		A-4-5F	43.0		88.4	95.3	104.7
		A-8-F	32.8		101.5	94.2	85.4
	編み物	C-1-F	80.6		103.5	103.2	93.8
		C-3-F	26.5		124.9	107.9	113.6
	織物	D-1-F	97.3		135.1	147.7	142.4
		D-3-F	21.0		78.1	72.9	76.7

注）第1,2次は引っ張り強度、第3次は引っ掛け強度によって強度保持率を求めた。

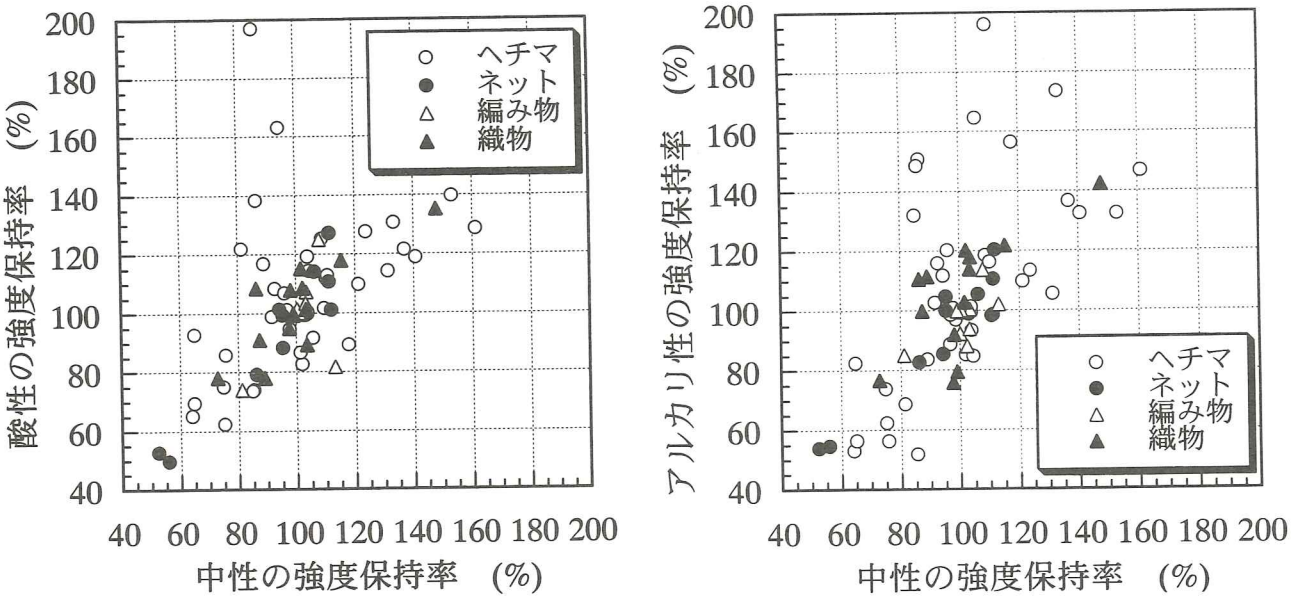
を図－7.5に示す。表－2.2に示したように強度保持率が80%以下または120%以上となるシートは耐久性が不十分であると判断される。そのようなシートは，図－7.5よりヘチマタイプに多いことが分かる。またその傾向は引っ張り強度の大きさに依存していない。したがって，ヘチマタイプには強度保持率の変化が生じやすい傾向があると判断される。次に，中性と酸性およびアルカリ性の強度保持率を比較した結果を図－7.6に示す。ばらつきがあるものの，中性とほぼ同じ強度保持率となる傾向が見られる。ただし，中性では強度保持率が80～120%と良好であるが，酸性とアルカリ性のいずれかに対して強度保持率が120%以上になるシートが幾つかある。したがって，耐久性はpHに対して特に強い依存性はないが，酸性，アルカリ性においてシートの硬化（強度保持率120%以上になる）が顕著に表れる可能性があるので，やはりpHに対しても試験を行う必要があると言える。

なお，強度以外にシートの外観（構成材の割れ，変色）を目視により観察したが，特に異常は見られなかった。

以上より，シートによっては耐薬品性が不十分になる場合があるので，必ず事前に試験を行って十分な



図－7.5　中性の場合の引っ張り強度と強度保持率の関係



図－7.6　中性と酸性およびアルカリ性の強度保持率の比較結果

耐久性があることを確認する必要がある。特にヘチマタイプシートは，耐薬品性が劣る傾向があるのでシート作成にあたっては十分な配慮が必要である。

7.2.3　耐熱・耐寒性試験

耐熱（70℃）および耐寒（－20℃）に対する試験結果を表－7.7にまとめて示す。ここで強度保持率とは，シート常温時（約20℃）の強度に対する温度を変化させた後の強度を百分率で表したものである。シートタイプごとに耐熱性および耐寒性試験による強度保持率を比較した結果を図－7.7に示す。表－2.2に示したように強度保持率が80%以下または120%以上となるシートは耐久性が不十分であると判断される。耐寒

表－7.7　耐熱・耐寒性試験結果

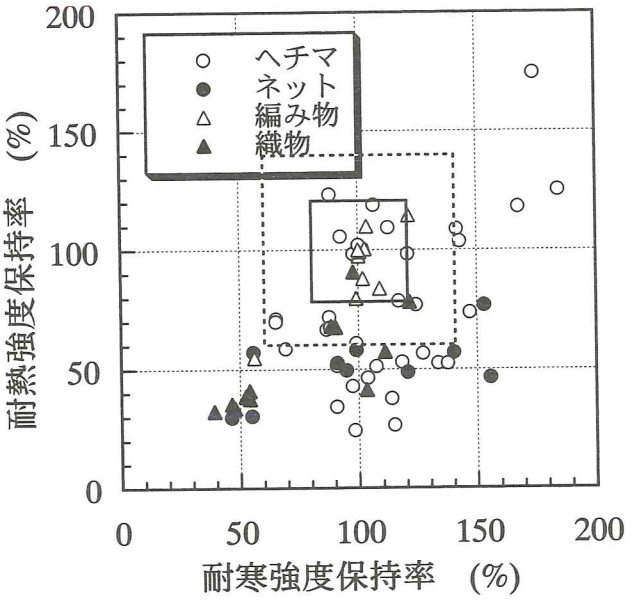
プロトタイプ世代	タイプ	シート名	引っ掛け強度 (kgf)	引っ張り強度 (kgf/m)	強度保持率(%) 耐寒性	耐熱性
第一次	ヘチマ	A-1-1	1.7	54.4	86.4	66.8
		A-1-2	6.3	92.4	87.5	72.0
		A-1-3	12.6	274.7	88.0	67.7
		A-1-4	14.4	338.8	141.5	108.8
		A-2-1	0.7	137.4	75.0	668.8
		A-2-2	1.1	136.8	63.0	194.4
		A-2-3	3.5	124.4	85.9	125.6
		A-2-4	12.5	136.2	76.6	69.9
		A-3-1	6.5	69.4	118.0	53.1
		A-3-2	11.2	161.2	90.7	51.5
		A-3-3	12.7	274.6	107.2	51.3
		A-3-4	19.9	535.0	113.6	37.7
		A-6-1	5.0	66.4	65.1	71.3
		A-6-2	4.7	57.3	174.4	174.6
		A-6-3	15.2	211.4	106.4	118.9
		A-6-4	12.8	172.9	92.5	105.6
		A-7-1	7.6	324.8	88.0	123.4
		A-7-2	9.4	308.0	142.8	103.6
		A-7-3	9.6	108.3	167.6	118.1
		A-7-4	14.2	122.8	65.0	70.1
		A-9-1	4.0	40.8	100.0	101.1
		A-9-2	6.4	20.6	101.7	100.6
		A-9-3	8.1	66.0	97.8	98.3
		A-9-4	7.5	54.8	99.9	102.0
		B-1-1	20.4	454.0	126.8	56.7
		B-1-2	30.2	634.0	133.2	52.6
		B-1-3	38.7	712.0	97.1	42.9
		B-1-4	67.5	950.0	98.0	24.5
		B-2-1	15.5	334.0	146.8	74.0
		B-2-2	22.2	464.0	103.6	46.4
		B-2-3	34.3	554.0	90.5	34.4
		B-2-4	55.2	688.0	114.7	26.7
		B-3-1	8.5	194.0	98.8	61.0
		B-3-2	14.5	274.0	124.1	77.1
		B-3-3	28.1	244.0	137.3	52.5
	ネット	A-4-1	25.0	424.0	153.0	77.0
		A-4-2	24.0	507.0	90.9	52.7
		A-4-3	22.0	267.0	98.8	58.1
		A-4-4	25.0	390.0	55.5	57.3
		A-4-5	25.0	438.0	94.8	49.6
		A-4-6	26.0	283.0	69.1	58.7
		A-5	14.0	494.0	116.7	78.8
		A-8-1	6.7	297.0	54.7	30.6
		A-8-2	6.7	285.3	46.3	29.9

注）第1,2次は引っ張り強度、第3次は引っ掛け強度によって強度保持率を求めた。

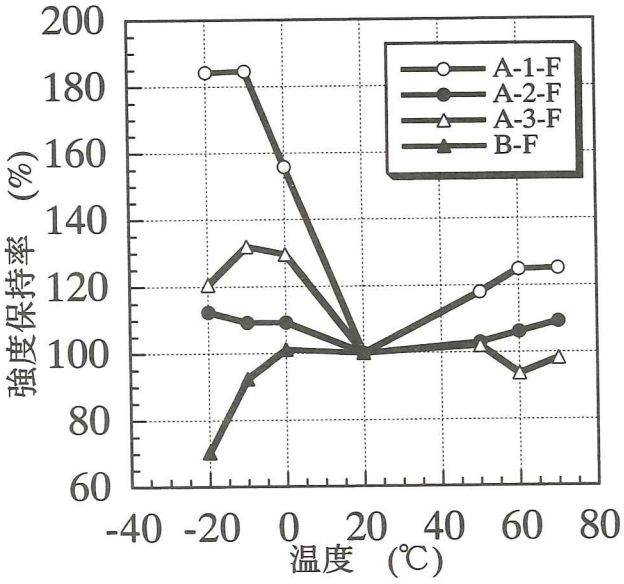
プロトタイプ世代	タイプ	シート名	引っ掛け強度 (kgf)	引っ張り強度 (kgf/m)	強度保持率(%) 耐寒性	耐熱性
第一次	編み物	C-1-1	85.7	1257.0	55.9	54.9
		C-1-2	98.8	2031.0	121.2	114.4
		C-2-1	27.0	421.6	98.9	79.7
		C-2-2	－	302.0	108.9	83.8
		C-3-1	11.6	654.6	100.1	97.3
		C-3-2	15.2	462.0	14.7	14.4
		C-3-3	17.5	462.0	100.4	99.1
		C-3-4	24.4	654.6	100.0	99.9
	織物	D-1-1	28.1	3294.0	52.5	38.7
		D-1-2	135.0	7481.0	46.5	35.5
		D-1-3	26.8	3875.0	39.1	32.5
		D-1-4	53.0	9207.0	47.8	33.8
		D-1-5	14.3	3997.0	54.0	41.0
		D-1-6	86.5	8835.0	54.1	37.6
		D-2	247.3	12925.0	109.3	測定不能
		D-3-1	17.6	646.6	111.0	57.3
		D-3-2	17.3	621.7	90.4	67.7
		D-3-3	21.5	621.7	88.5	68.1
		D-3-4	22.8	659.2	121.6	78.3
第二次	ヘチマ	A-1（B）	22.0	702.0	177.5	67.5
		A-1(B改)	25.4	930.0	131.2	62.2
		A-1（A）	13.4	640.0	182.2	64.4
		A-1(特A-2)	29.3	576.0	192.7	99.5
		A-1(特A-3)	35.0	1044.0	99.4	40.4
		A-2（改）	94.4	323.8	74.7	90.0
		B-A1	21.1	327.7	116.0	99.5
		B-A2	18.5	242.9	130.1	83.2
		B-B	25.6	462.1	94.4	70.1
	ネット	A-4-2a	31.0	648.0	174.1	41.5
		A-4-2b	28.0	496.0	181.5	41.9
		A-4-4a	40.0	1157.0	170.8	44.4
		A-4-4b	33.0	691.0	145.6	44.1
		A-8-3	26.1	1824.1	126.1	57.1
		A-8-4	25.9	1929.4	127.2	61.7
	編み物	C-1（改）	105.0	2212.0	171.8	44.9
	織物	D-3(1)	17.4	755.3	104.3	53.1
		D-3(2)	17.7	650.6	120.6	61.1
第三次	ヘチマ	A-1-F	32.6	－	184.4	125.2
		A-2-F	16.0	－	112.5	109.4
		A-3-F	20.3	－	120.7	98.3
		B-F	17.2	－	70.3	－
	ネット	A-4-3F	35.0	－	140.0	57.1
		A-4-5F	39.0	－	120.5	48.7
		A-8-F	32.8	－	155.5	46.6
	編み物	C-1-F	80.6	－	103.6	109.9
		C-3-F	26.5	－	101.9	87.9
	織物	D-1-F	90.2	－	97.9	90.7
		D-3-F	21.0	－	103.3	41.4

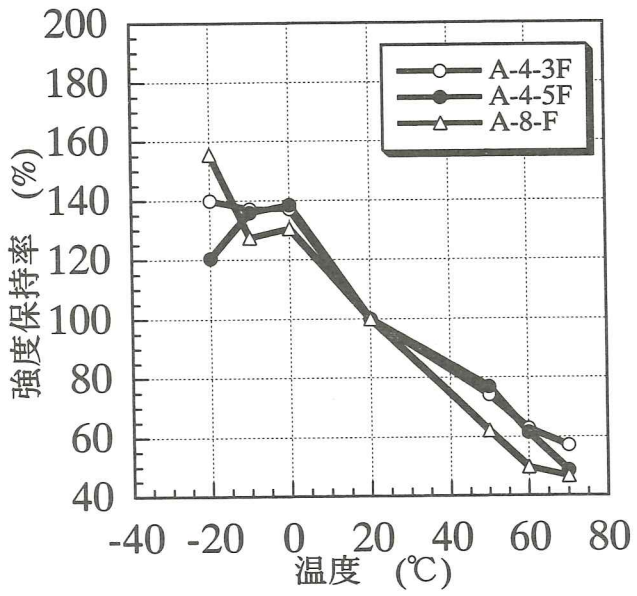
性は十分であるが，耐熱性の強度保持率が80%以下となって不十分になる場合が多く見られる。熱可塑性樹脂は加熱されると軟化する特性があり，そのため強度保持率が低下したと考えられる。

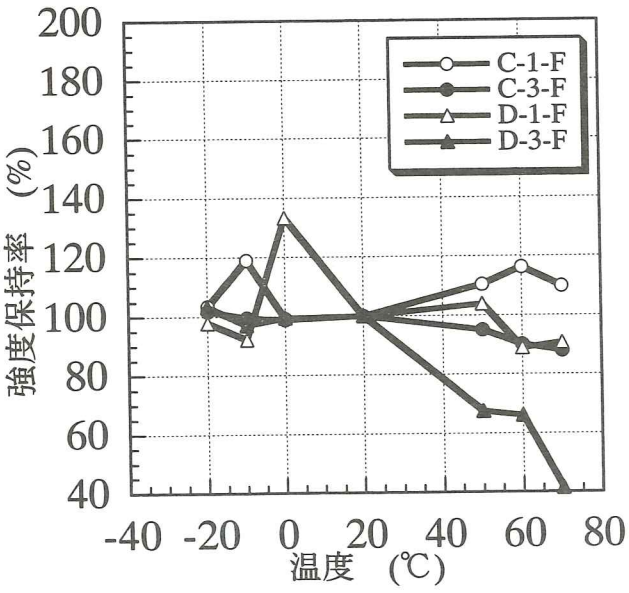
上記の試験結果は地表の最大または最低温度をそれぞれ70℃および－20℃と想定した試験であるが，それらの温度が極端であったため上記のような結果になった懸念がある。それについて確認するため，耐寒性について－20℃，－10℃，0℃，耐熱性について50℃，60℃，70℃に温度を変えて試験を行った結果を表－7.8および図－7.8に示す。大まかには，温度が下がるに伴って硬化，上がるに伴って軟化する傾向が見られる。しかし，－20℃と0℃，50℃と70℃で強度保持率が大きくは違わない。したがって，－20℃と70℃という設定が極端すぎて，急激な強度保持率の変化をもたらすということはない。さらに，実際に現地で生じる地表面の温度測定例などを参照すると，－20℃または70℃程度になっていることも考慮すると，試験の温度設定は過剰ではないと判断される。なお，強度以外にシートの外観(構成材の割れ，変色)を目視により観察したが，特に異常は見られなかった。



図－7.7　耐熱性および耐寒性試験による強度保持率の比較結果



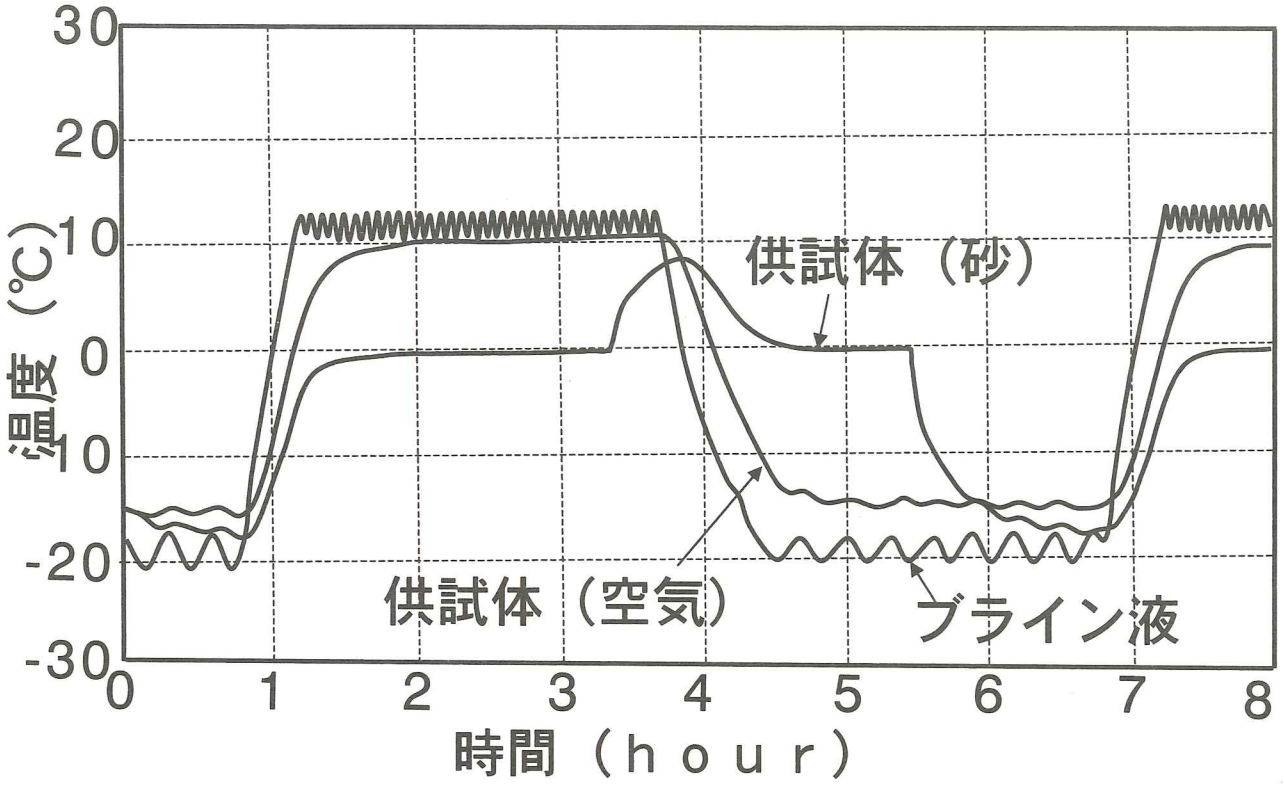




図－7.8　耐寒性(－20℃, －10℃, 0℃), 耐熱性(50℃, 60℃, 70℃)試験による強度保持率の比較結果

表－7.8　温度を段階的に変化させた耐熱・耐寒性試験の結果

タイプ	シート名	ブランク(20℃)		-20℃		-10℃		0℃		50℃		60℃		70℃	
		強度(kgf)	伸度(%)	強度(kgf)	伸度(%)	強度(kgf)	伸度(%)	強度(kgf)	伸度(%)	強度(kgf)	伸度(%)	強度(kgf)	伸度(%)	強度(kgf)	伸度(%)
ヘチマ	A-1-F	32.6	108.2	60.1	416.0	60.2	455.0	50.8	376.0	38.5	118.0	40.7	111.0	40.8	124.0
	A-2-F	16.0	42.0	18.0		17.5		17.5		16.5	45.0	17.0	42.0	17.5	40.0
	A-3-F	20.3	85.9	24.5		26.8		26.3		20.7		19.0		20.0	
	B-F	17.2	110.0	12.1		15.9		17.4							
ネット	A-4-3F	35.0	286.0	49.0	141.0	48.0	180.0	48.0	220.0	26.0	318.0	22.0	325.0	20.0	322.0
	A-4-5F	39.0	192.0	47.0	109.0	53.0	129.0	54.0	193.0	30.0	320.0	24.0	324.0	19.0	297.0
	A-8-F	32.8	204.0	51.0		41.8		42.8		20.4		16.3		15.3	
編み物	C-1-F	80.6	182.7	83.5	283.0	95.9	310.0	80.0	272.0	89.1	257.0	93.8	155.0	88.6	193.0
	C-3-F	26.5		27.0		26.4		26.2		25.2		23.9		23.3	
織物	D-1-F	90.2		88.3		83.2		120.3		93.8		80.2		81.9	
	D-3-F	21.0		21.7	103.5	20.4	97.3	20.9	99.9	14.2	67.8	13.9	66.3	8.7	41.7



図－7.9　供試体中央部およびブライン液の1サイクル中での温度変化

以上より，シートは耐熱性が不十分となる傾向があるので，前もって試験によって確認しておく必要がある。

7.2.4　凍結～融解試験

試験片を繰り返し凍結～融解させる試験は，表－7.9に示すようにコンクリートやタイルなどについてJIS規格などの試験法が提案されている。大まかに見ると，凍結させる温度は約－20℃，融解では5～20℃，凍結～融解のサイクルは2～6時間程度の試験が多い。なお，上記の温度は，試験片の温度ではなく，試験片に温度を加える媒体(今回の試験の場合はブライン液)の温度である。今回の試験では，一槽式凍結融解装置(土木研究所コンクリート研究室所有)を用いて，上記の試験条件を参考にして，以下のような試験を行った。

表－7.9　既存の凍結・融解試験の一覧

凍結・融解法	試験体の設置条件	既規格	前処理条件	凍結・融解の条件		サイクル	
				凍結条件	融解条件	1サイクルの所有時間	前サイクル数
水中凍結・水中融解	試験体全体を同一環境おく	JIS A6204 付属書2(ｺﾝｸﾘｰﾄ)	20±2℃水槽中14日間養生	水中－18℃	水中+5℃	3～4時間	200
		ASTM C－666A法 (ｺﾝｸﾘｰﾄ)	水中で14日間養生	水中－17.8℃	水中+4.4℃	2～4時間	300
水中凍結・水中融解	同 上	原型ｽﾄﾚｰﾄ和形 (屋根)	15～20℃水中24時間浸漬	水中－20℃ 2時間	水中+20℃ 2時間	4時間	200
水中凍結・水中融解	同 上	カラーベスト (屋根)	同 上	水中－20℃ 2時間	水中+20℃ 2時間	3時間	300
水中凍結・水中融解	同 上	RILEM TC51(ALC)	所定の含水量に調整し、封緘処理	ﾊﾟﾗﾌｨﾝ中－15℃ 2時間 温度ﾋｽﾄ 3℃／hr	ﾊﾟﾗﾌｨﾝ中+5℃ 2時間 温度ﾋｽﾄ 3℃／hr	約24時間	<当時者決定>
水中凍結・水中融解	同 上	EN202 (1986) (ﾀｲﾙ)	15℃水中 3 日間浸漬 (1/5 垂直して毛細管吸水させる)	水中－15℃ 2時間	水中+15℃ 2時間	6時間	50
		BS 6341(Part 22) (ﾀｲﾙ)	同 上	同 上	同 上	同 上	同 上
気中凍結・水中融解	同 上	JMC委 B法 (ｺﾝｸﾘｰﾄ)	20±2℃水槽中14日間養生	気中－18℃	水中+5℃	3～4時間	200
		ASTM C－666B法 (ｺﾝｸﾘｰﾄ)	水中で14日間養生	気中－17.8℃	水中+4.4℃	2～4時間	300
		JIS A6701 (炭ﾏｸﾞ)	15～25℃水中24時間浸漬	気中－20℃ 2時間	水中+20℃ 1時間	3時間	300
		JIS A5209 (ﾀｲﾙ)	水中24時間以上	気中－20℃ 8時間以上	水中常温16時間以上	24時間以上	10
		JIS A5208 (粘土瓦)	15～20℃水中24時間浸漬	気中－20℃ 8時間以上	水中+15～20℃ 6時間以上	14時間以上	<当事者決定>
		BS 4624 (石綿ｾﾒﾝﾄ製品)	10～20℃水中24時間浸漬	気中－20℃ 12時間以上	水中+20℃ 12時間	24時間	25
		DIN 52104 (天然石材)	110℃、24時間乾燥後、15℃水中24時間浸漬	気中－15℃ 2時間以上	水中+15℃ 2時間	4時間	25
		ISO 393/1 (波形石綿ｾﾒﾝﾄ板)	5℃以上水中48時間浸漬	気中－20℃	水中+20℃	地域の条件によって時間とサイクルを決める。	
		ISO 880 (石綿ｾﾒﾝﾄｻｲｼﾞﾝｸﾞ)	23℃水中48時間浸漬	気中－20℃	水中+20℃	地域の条件によって時間とサイクルを決める。	
気中凍結・水中融解	同 上	カラーベスト (屋根)	15～20℃水中24時間浸漬	気中－20℃ 2時間	水中+20℃ 2時間	4時間	300
気中凍結・気中融解	試験体表面の片面より吸湿状態におく	― (石綿ｾﾒﾝﾄ製品)	試験体表面の片面より吸水24時間	気中－18℃ 2~3時間	気中+10℃ 2~3時間	4～6時間	100
気中凍結・気中融解	試験体の半分を水中で支持した状態におく	カラーベスト (屋根) モデール瓦 (屋根)	常温水中24時間浸漬	気中－20℃ 2時間	気中+20時間 2時間	4時間	300
気中凍結・気中融解	低温・高温の境を仕切るように試験体をおく	― (石綿ｾﾒﾝﾄ製品)	気乾状態に含水率を調整した試験体を 20±10℃ 60±15%RHの室内で3日間保存	気中－20℃ 3時間 +20℃ 1時間	気中5℃ 80%RH 3時間 20℃ 1時間	6時間	150
気中凍結・温水ｽﾌﾟﾚｲ融解	試験体全体を同一環境におく	― (ﾀｲﾙ)	常温水中24時間浸漬	気中－20℃ 80分間	温水ｽﾌﾟﾚｲ+30℃ 20分間	100分間	500
気中凍結・温水ｽﾌﾟﾚｲ融解	同 上	北工試法 (ﾀｲﾙ)	毛細管吸水	気中－20℃ 135分間	温水ｼｬﾜｰ+30℃ 45分間	180分間	300
水中凍結・水中融解 又は気中凍結・水中融解	試験体の上面より吸水状態におく	RILEM (ｺﾝｸﾘｰﾄ)	110℃で恒量乾燥したものを一定時間吸水させ、封緘処理	ASTM C－666のA法およびB法にて行う。			

シートの試験片（幅10cm，長さ20cm）を，一辺が10cm，深さが60cmの直方体のケースに入れ，そのままのものが供試体１（シートが露出して気中で凍結・融解する場合を想定した試験），0.5～0.6mmの標準砂を充填した後，砂が飽和するまで水を加えたものを供試体２（土中を想定した試験）とした。これらの供試体をブライン液が満たされた槽内に設置し，凍結時には－20±２℃を３時間，融解時には10±２℃を３時間ずつ（すなわち１サイクル６時間）となるように温度条件を設定して，凍結・融解させた。上記の温度および時間は試験片が確実に凍結および融解するように，図－7.9に示す予備実験結果に基づいて設定している。図－7.9は供試体中心とブライン液の温度の経時変化を示したものであり，土中を想定した供試体２でも約１時間は完全に凍結している（温度が約－15℃になっている）ことが確認できる。以上のサイクルを50および100回繰り返した後，常温において引っ掛け試験（6.3.1参照）とスコップ衝撃試験（6.3.3参照）を行った。試験片に用いたのは第３次シートであり上記の試験結果を表－7.10および図－7.10に示す。

供試体1，2とも凍結～融解試験前後で引っ掛け強度の保持率が80%を大きく下まわったり，スコップ衝撃による損傷の程度が大きく低下しているような傾向は見られない。したがって，シートの性能試験として凍結～融解試験を行う必要は，この時点では無い（耐寒性試験による評価で十分）と判断する。

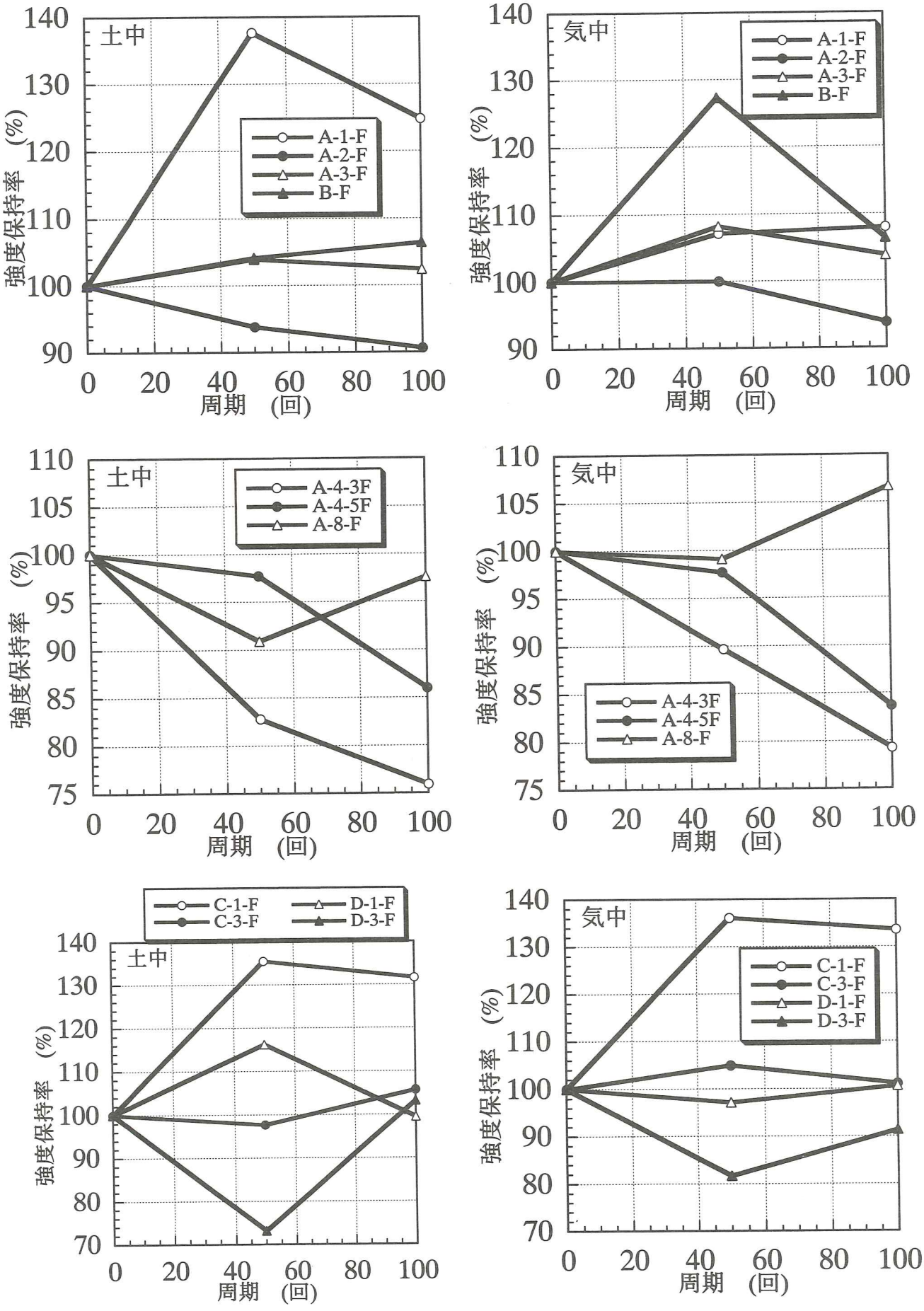
7.2.5　耐土壌性試験

腐食土中にシートが設置された場合の劣化の有無について，表－7.1に示した河川吸い出し防止シートなどと同様な方法で，シートの耐土壌性試験を実施した。園芸用として市販されている腐植土を厚さ５cmで敷設し，その上にシートを敷設した後，さらにシート内に充填しながら厚さ３cmの覆土を行った。この状態で３，６，９ヶ月間，屋外に放置した後，シートを取り出し，引っ掛け試験を行って引っ掛け強度の低下の有無を確認する。第三次シートについて測定した結果を表－7.11に示す。何れのシートも特に強度の低下が見られていない。したがって，土壌は他の要因に比較してシートの劣化を促すことはないと思われ，試験項目とする必要がないように思われる。しかし，2.2.1⑷に示したように劣化現象自体がまだ未解明である部分が多いこと，および今回の試験対象としたシート数も限られていること等を考慮すると，試験項目としておくほうが安全確保のため無難であると判断される。

7.2.6　各試験結果に基づく評価方法

シートを劣化させる主要因と考えられる日射への暴露に対しては，「シートが露出した累積時間が約２年間」までの耐久性を評価できることが分かった。また，上記より劣化が顕著ではないと予想される耐熱・耐寒性，耐薬品性，耐土壌性については，既往の方法で耐久性を評価することとしたが，上記のような耐久期間を推定することができていない。このような結果となったのは，2.2.1⑸に示したように現状の技術的な限界と，研究期間が十分で無かったことが原因である。しかしながら，実際に現地で使用できるだけの最低限の耐久性を持たせ，現地で活用してもらうとともに，目標とした耐用期間30年を満たすシートへの改善点を明らかにする必要がある。本研究では，7.1に示した既往の試験法を参考にして，以下の基準をもって「現地で使用できるだけの最低限の耐久性」を有すると判断することとした。

供用時および撤去時の必要強度は「引っ掛け強度15kgf以上」とした（6.3.1参照）。この強度を保持できる耐久性がまず必要とされよう。ところで，引っ掛け強度15kgf以上が保持できるならば，強度保持率はどのような値であっても良いと考えて良いであろうか？この強度を維持できれば，確かに損傷は防げると



図－7.10　凍結融解試験による強度保持率の測定結果

表－7.10　凍結融解試験による強度保持率およびスコップ衝撃試験の結果

タイプ	シート名	ブランク	気中状態				土中状態			
		引っ掛け強度(kgf)	引っ掛け強度(kgf)		強度保持率(%)		引っ掛け強度(kgf)		強度保持率(%)	
			50周期	100周期	50周期	100周期	50周期	100周期	50周期	100周期
ヘチマ	A-1-F	32.6	34.9	35.2	107.1	108.0	44.9	40.7	137.7	124.8
	A-2-F	16.0	16.0	15.0	100.0	93.8	15.0	14.5	93.8	90.6
	A-3-F	20.3	22.0	21.1	108.2	103.8	21.1	20.8	103.9	102.4
	B-F	17.2	21.9	18.3	127.3	106.4	17.9	18.3	104.1	106.4
ネット	A-4-3F	58.0	52.0	46.0	89.7	79.3	48.0	44.0	82.8	75.9
	A-4-5F	43.0	42.0	36.0	97.7	83.7	42.0	37.0	97.7	86.0
	A-8-F	32.8	32.5	35.0	99.1	106.7	29.8	32.0	90.9	97.6
編み物	C-1-F	80.6	109.7	107.7	136.1	133.6	109.2	106.1	135.5	131.6
	C-3-F	26.5	27.8	26.8	104.9	101.1	25.9	28.0	97.7	105.7
織物	D-1-F	97.3	94.6	98.0	97.2	100.7	113.1	96.8	116.2	99.5
	D-3-F	18.6	15.2	17.0	81.7	91.4	13.6	19.2	73.1	103.2

タイプ	シート名	スコップ衝撃試験(ブランク)				スコップ衝撃試験(100周期)							
		縦方向		横方向		縦方向		横方向		縦方向		横方向	
		1回目	2回目	1回目	2回目	1回目	2回目	1回目	2回目	1回目	2回目	1回目	2回目
ヘチマ	A-1-F	A	C	A	C	A	A	A	A	A	A	A	A
	A-2-F	D	D	B	B	D	D	C	B	D	D	C	B
	A-3-F	A	A	A	B	A	A	A	A	A	A	B	A
	B-F	A	A	A	A	A	C	A	A	C	C	A	A
ネット	A-4-3F	B	B	B	A	B	B	A	A	B	B	A	A
	A-4-5F	B	C	B	C	B	B	B	A	B	B	B	B
	A-8-F	A	B	A	A	A	A	A	B	A	B	A	B
編み物	C-1-F	B	A	A	A	A	B	A	A	B	A	A	A
	C-3-F	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
織物	D-1-F	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
	D-3-F	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B

表－7.11　耐土壌性試験の結果

タイプ	シート名	引っ掛け試験						保持率(%)			
		ブランク値		3ヶ月		6ヶ月		3ヶ月		6ヶ月	
		強度(kgf)	伸度(%)	強度(kgf)	伸度(%)	強度(kgf)	伸度(%)	強度	伸度	強度	伸度
ヘチマ	A-1-F	32.6	108.2	37.2	89.8	40.2	103.2	114.1	83.0	123.3	95.4
	A-2-F	16.0	42.0	16.0		16.0		100.0		100.0	
	A-3-F	20.3	85.9	22.9	75.9			112.6	88.3		
	B-F	17.2	110.0	28.5	125.3			165.7	113.9		
ネット	A-4-3F	58.0	199.0	37.0	138.0	46.0	173.0	63.8	69.3	79.3	86.9
	A-4-5F	43.0	168.0	46.0	146.0	46.0	143.0	107.0	86.9	107.0	85.1
	A-8-F	32.8	204.0	32.3				98.5			
編み物	C-1-F	80.6	182.7	99.5	146.2	99.6	124.1	123.4	80.0	123.6	67.9
	C-3-F	26.5		30.5				115.1			
織物	D-1-F	97.3		100.2				103.0			
	D-3-F	18.6		18.4		17.1		98.9		91.9	

考えて良いであろう。しかし，シートに要求されているのは引っ掛け強度だけでなく，加工性として示したような柔軟性(6.3.5参照)や，耐燃焼性(8.2参照)などが挙げられる。これらの性能については，劣化する前の状態についてのみ試験・評価し，その評価結果が耐用期間中に大きく変化しない（より正確には許容範囲を超えるような変化がない）ことが求められる。したがって，上記した引っ掛け強度のみでなく，'シートの質的劣化'に対しても何らかの基準をさらに設ける必要がある。

強度保持率は，強度特性の観点から試験前後のシート構成材の質的劣化の程度を指標化したものであると考えられる。つまり，強度保持率が大きく変化しないシートは，質的な変化が小さい（ほとんど劣化していない）ことが期待できる。そこで，既往の試験法を参考にして，質的劣化に対しては強度保持率を用いて判定することとし，具体的には強度保持率が90～110%の範囲であれば優良，80～120%であれば良と判断し，「現地で使用できるだけの最低限の耐久性」があるとする。

繰り返しになるが，上記の評価は，今後，試行錯誤を行いながら耐久性の改善が行えるような（つまり現行の試験･評価技術で現地施工することが可能と判断しうるだけの耐久性を有する）シートを開発することを目標として設定しており，したがって試験法や評価の考え方は暫定的なものである。目標耐用年数を満たす耐久性の有無を完全に確認できるものではなく，それについては今後，現地調査を行う必要があることに留意されたい。

第８章　シートの安全性

シートの安全性として，シートの解れ，耐燃焼性，燃焼時の発生ガス，環境ホルモンについて検討することとした(2.2.1⑸参照)。本章では，1)シートの解れについて解れ易さの事前評価と解れやすい場合の解れ防止策，2)「燃焼範囲が拡大することがない」という要求性能を具体的に評価するための試験法と燃焼によって生じるガスが人体に対して安全であることの確認手法，3)環境ホルモンの含有量および溶出量に関する情報を得るための試験法を提案する。

8.1　解れ易さの評価と解れ防止法

8.1.1　解れ易さの評価

第１～３次プロトタイプシートを切断し，その切断面の構成材を指でつまみ，様々な方向に引っ張ることで構成材が解れ易いかどうかを定性的に確かめる実験を行った。その結果，構成材が一体整形してあるネット(例えば，A－４シリーズ)，構成材が接着または熔着されているシート(例えばヘチマタイプ)では，損傷防止のために必要な引っ掛け強度15kgf（6.3.1参照）以上の強度を有していれば，十分に解れにくい状態であった。しかし，構成材を編んだり，織ったりして形成した編み物タイプ，織物タイプや，一体整形したネットを細断して袋に詰めたシート(ネット－袋詰めタイプ)では，たとえ15kgf 以上の引っ掛け強度であっても，構成材が解れやすい(袋に詰めた細断ネットが引き出せる)ことがわかった。

以上の結果を踏まえると，解れ易さの評価としては，上記した解れやすいシートのように部分的にでも接着や熔着などで固定されてないシート構造である場合には，「解れやすい」と評価することとする。ただし，構成材同士を完全に結びつけるなど解れにくくするような工夫がしてあれば，実際に指でつまんで引っ張ってみてその程度を確認し，構成材が取れにくければ「解れにくい」と判断して良い。取れにくさは，接着や熔着したシートとの相対的比較から評価する。

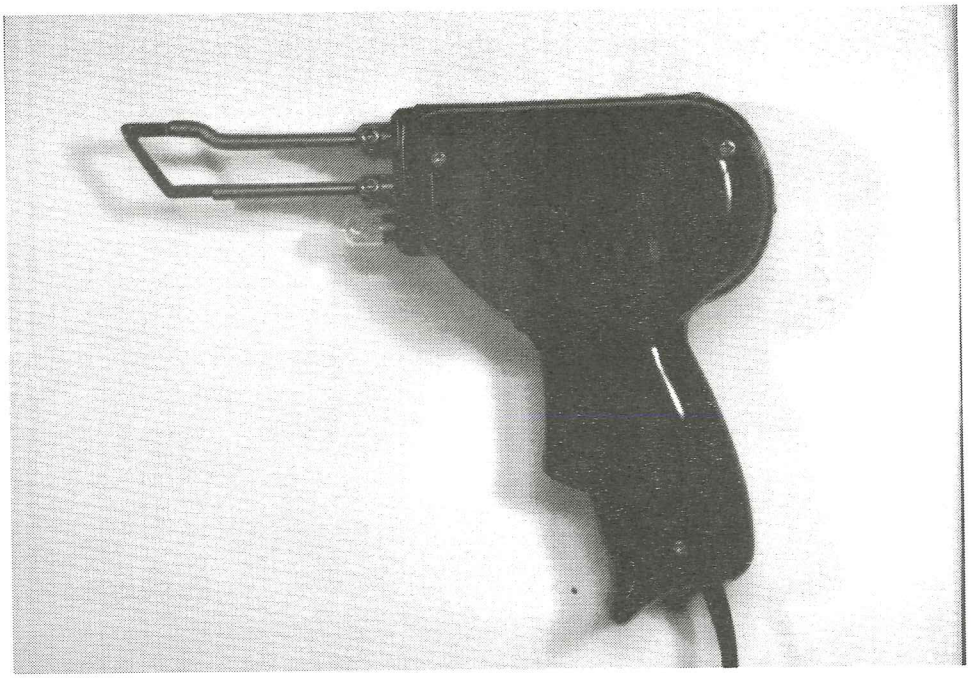
8.1.2　施工時における解れ防止

解れ易いシートは，熱可塑性樹脂の特性を利用して，シート切断面の構成材同士を焼き付ける（つまり熔着させる）方法が実際的であった。焼き付けながらシートを切断する専門的な機器として，例えば**写真－8.1**に示すヒートカッターが市販されている。ヒートカッターは電熱器によって刃が加熱され，その熱でもってシートの切断と構成材の熔着を同時に行う。幾つかのシートで試したところ，切断は容易にできたが，完全に熔着させるためには切断速度をかなり遅くしなければならない場合があった。切断効率を上げたい場合には，刃物でシートを切断した後に，バーナーによって切断面を焼き付けるのが効果的であった。

解れやすいシートでは，上記のいずれかの方法で焼き付けを行うものとする。

8.1.3　シート製造時での解れ防止加工

焼き付けによって切断面からの解れは防止できるが，供用時にシートが何らかの理由によって切断される懸念もあることから，極力解れ防止加工を行っておくのが好ましい。そのような加工の一例を以下に示



写真－8.1　ヒートカッターの一例

す。

A－8－F(ネット－袋詰めタイプ)：袋内に小片ネットを詰めた後，袋と小片ネットを熱熔着させる‘ポイント’を格子状に一定間隔で設けることで，小片ネットの抜け出しを防止した。

C－1－F(編み物タイプ)：編み上がったシートを樹脂で固めて，編み目が解けないようにした。ただしこの方法では，接合点だけでなく，流れの抵抗となる複数の構成材がひとかたまりになってしまうので，抵抗が小さくなりやすいという欠点がある。

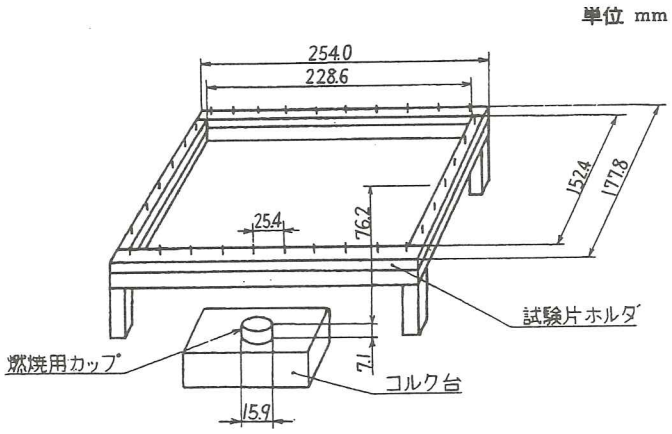
D－3－F(織物タイプ)：構成材が交差する織り目部分で熱熔着することで，解けないようにした。

8.2　耐燃焼性の試験方法と評価

シート単体だとかなり燃焼しやすいこと，そして土砂充填を行うと燃焼範囲の拡大を防止できることを実験に基づいて示す（8.2.1参照）。次に，シートの耐燃焼性を調べるために用いる標準的な試験法として新たに開発した小規模燃焼試験の概要を説明した後，その試験の妥当性について実験的に調べた結果をまとめて示す（8.2.2参照）。最後に小規模燃焼試験を用いた耐燃焼性の評価法についてまとめて示す(8.2.3参照)。

8.2.1　シートの燃焼性と土砂充填による燃焼防止効果

まず，今回開発したシートにどの程度の耐燃焼性があるかを把握するために，シートの燃焼実験を行った。実験方法は繊維製品の燃



図－8.1　繊維製品の燃焼性試験（JIS L1091）水平法の実験装置

表－8.1　繊維製品の燃焼性試験(JIS L1091)水平法による実験結果

タイプ	シート名	主素材	燃焼状態	煙	シートへの引火	燃焼後の状態	炭化距離(cm) 1回目	2回目	3回目	平均	実大燃焼実験
ヘチマ	A-1-1	PP	D D D	C C C	C C C	C C C	全焼	全焼	全焼	-	
	A-1-2	PP	B D D	B C C	A C C	B C C	2.9	全焼	全焼	2.9	
	A-1-3	PP	D D D	C C C	C C C	C C C	全焼	全焼	全焼	-	
	A-1-4	PP	D D D	C C C	C C C	C C C	全焼	全焼	全焼	-	○
	A-2-1	PET	B C C	B B B	A A A	B B B	3.3	3.7	3.3	3.4	
	A-2-2	PET	B B C	B B B	A A A	B B B	2.7	2.6	2.7	2.7	
	A-2-3	PET	B B B	B A B	A A A	B B B	3.5	3.1	3.3	3.3	
	A-2-4	PET	C C C	A A B	A A A	B B B	4.2	3.9	4.8	4.3	
	A-3-1	PP	D D D	C C C	C C C	C C C	全焼	全焼	全焼	-	
	A-3-2	PP	D D D	C C C	C C C	C C C	全焼	全焼	全焼	-	
	A-3-3	PP	D D D	C C C	C C C	C C C	全焼	全焼	全焼	-	○
	A-3-4	PP	D D D	C C C	C C C	C C C	全焼	全焼	全焼	-	
	A-5	PE	D D D	C C C	C C C	C C C	全焼	全焼	全焼	-	
	A-6-1	PP	D D D	C C C	C C C	C C C	全焼	全焼	全焼	-	
	A-6-2	PP	D D D	B B B	C C C	C C C	全焼	全焼	全焼	-	
	A-6-3	PP	D D D	C C C	C C C	C C C	全焼	全焼	全焼	-	
	A-6-4	PP	D D D	C C C	C C C	C C C	全焼	全焼	全焼	-	
	A-7-1	PP	D D D	B B B	C C C	C C C	全焼	全焼	全焼	-	
	A-7-2	PP	D D D	C C C	C C C	C C C	全焼	全焼	全焼	-	
	A-7-3	PP	D D D	C C B	C C C	C C C	全焼	全焼	全焼	-	
	A-7-4	PP	D D D	C C C	C C C	C C C	全焼	全焼	全焼	-	
	A-9-1	PP	D D D	B B B	C C C	C C C	全焼	全焼	全焼	-	
	A-9-2	PP	D D D	B B B	C C C	C C C	全焼	全焼	全焼	-	
	A-9-3	PP	B D D	B B C	A C C	B C C	2.4	全焼	全焼	2.4	
	A-9-4	PP	D D D	C C C	C C C	C C C	全焼	全焼	全焼	-	
	B-1-1	PVC	B B B	B B B	A A A	B B B	3.5	4.5	5.7	4.6	
	B-1-2	PVC	B B B	B C B	A A A	B B B	4.0	4.1	3.4	3.8	
	B-1-3	PVC	C C C	C C C	A A A	B B B	5.3	6.0	5.5	5.6	
	B-1-4	PVC	B B B	C C C	A A A	B B B	5.2	4.8	5.1	5.0	
	B-2-1	PVC	A B B	A B B	A A A	A B B	2.2	4.1	3.7	3.3	
	B-2-2	PVC	B B B	B B B	A A A	B B B	4.0	3.2	3.9	3.7	○
	B-2-3	PVC	B B B	B B B	A A A	B B B	3.8	4.0	3.7	3.8	
	B-2-4	PVC	B B B	B B B	A A A	B B B	3.5	3.2	2.7	3.1	
	B-3-1	PVC	A B A	A B A	A A A	B B A	1.1	4.0	0.0	1.7	
	B-3-2	PVC	A B B	B B B	A A A	B B B	2.4	3.2	3.5	3.0	
	B-3-3	PVC	B B B	B C C	A A A	B B B	3.7	4.0	4.5	4.1	

タイプ	シート名	主素材	燃焼状態	煙	シートへの引火	燃焼後の状態	炭化距離(cm) 1回目	2回目	3回目	平均	実大燃焼実験
ネット	A-4-1	PP	D D D	C C C	C C C	C C C	全焼	全焼	全焼	-	
	A-4-2	PP	D D D	C C C	C C C	C C C	全焼	全焼	全焼	-	○
	A-4-3	PP	D D D	C C C	C C C	C C C	全焼	全焼	全焼	-	
	A-4-4	PP	D D D	C C B	C C C	C C C	全焼	全焼	全焼	-	
	A-4-5	PP	C D D	C C B	C C C	C C C	全焼	全焼	全焼	-	
	A-4-6	PP	D D D	C C B	C C C	C C C	全焼	全焼	全焼	-	
	A-8-1	PP	B B B	B B B	A A A	B B B	4.4	4.5	4.3	4.4	
	A-8-2	PP	B B D	B A C	A A C	B B C	5.0	5.0	全焼	5.0	○
編み物	C-1-1	PET	B B B	B B B	A A A	B B B	5.5	4.5	4.5	4.8	
	C-1-2	PET	B B B	B B B	A A A	B B B	5.0	3.5	3.7	4.1	
	C-2-1	PET	C C D	B B B	A A A	B A B	3.5	2.2	6.5	4.1	
	C-2-2	PET	C C C	B B B	B B B	B B B	4.1	4.5	5.0	4.5	
	C-3-1	PET	B B B	A A B	A A A	A A B	2.9	2.3	2.7	2.6	
	C-3-2	PET	B B B	B B B	A A A	B B A	3.1	3.2	2.8	3.0	○
	C-3-3	PET	B C C	B B B	A A A	B B B	2.3	3.5	3.4	3.1	
	C-3-4	PET	C C B	B B B	A A A	B B B	3.2	3.0	2.7	3.0	
織物	D-1-1	PP(+PET)	B B B	A A A	A C A	C C B	5.4	全焼	4.5	5.0	
	D-1-2	PP(+PET)	C B B	B B B	C A A	C B B	全焼	4.5	5.5	5.0	
	D-1-3	PP(+PET)	B B B	B A B	A A C	B B C	3.8	4.1	全焼	4.0	
	D-1-4	PP(+PET)	B B B	B B A	A C A	B C B	4.0	全焼	3.8	3.9	○
	D-1-5	PP(+PET)	B B C	A A B	A A C	B B C	3.3	5.0	全焼	4.2	
	D-1-6	PP(+PET)	B B B	B A B	B A A	B B B	2.5	3.2	3.8	3.2	
	D-2	PET	B C C	A A A	A A A	B B B	3.5	3.0	3.5	3.3	
	D-3-1	PP	B B B	A A A	A A A	B B B	5.0	5.1	5.2	5.1	
	D-3-2	PP	B B B	A A A	A A A	B B B	3.7	4.3	4.1	4.0	
	D-3-3	PP	B C C	B B B	A B B	B C C	4.5	全焼	全焼	4.5	○
	D-3-4	PP	B D D	B B B	B C C	C C C	全焼	全焼	全焼	-	

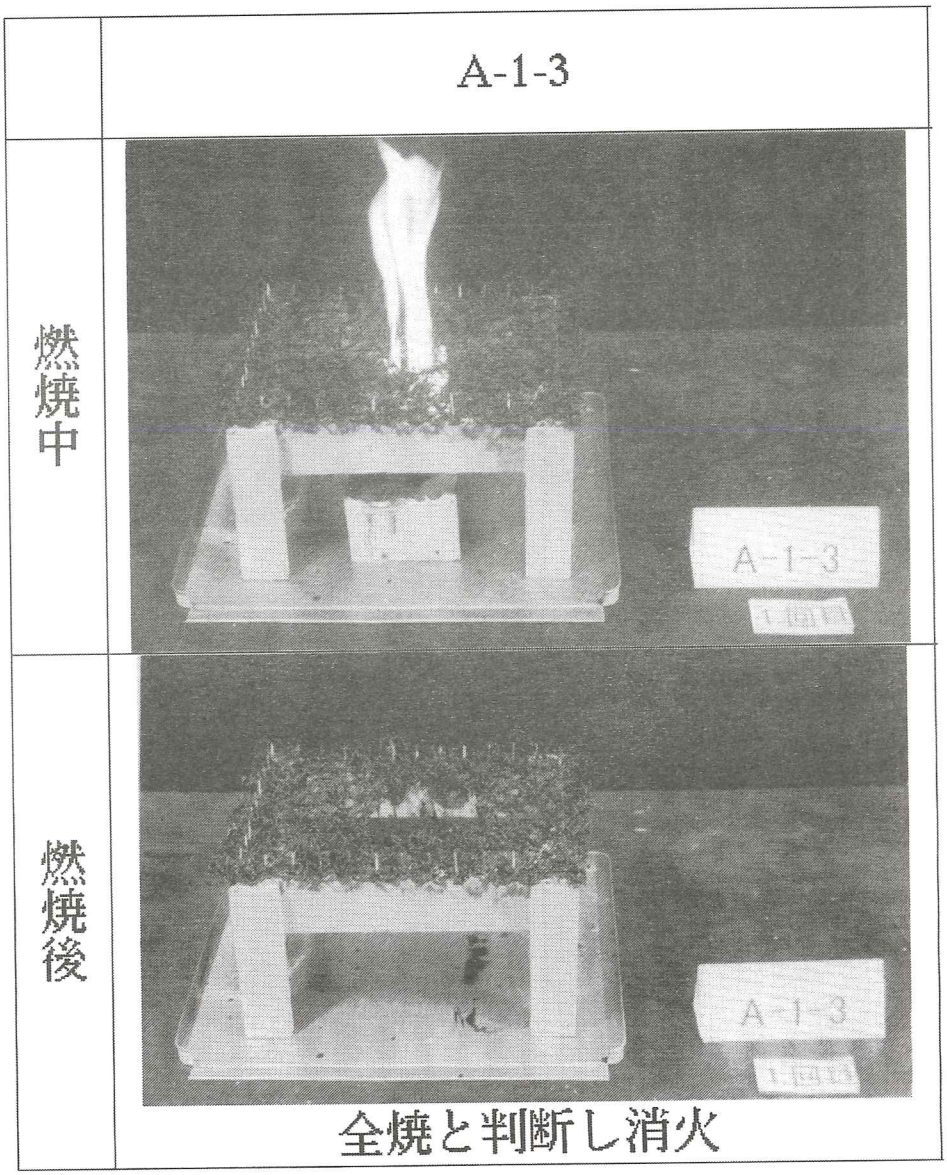
＜評価基準＞

【燃焼状態】
A：余り溶けない
B：溶けるが下に落ちない
C：溶けた物が少し下に落ちる
D：溶けた物がボタボタと落ちる

【煙】
A：煙が殆ど出ない
B：煙が少し出る
C：煙がたくさん出る

【シートへの引火】
A：引火しない
B：多少引火する
C：引火し燃え広がる

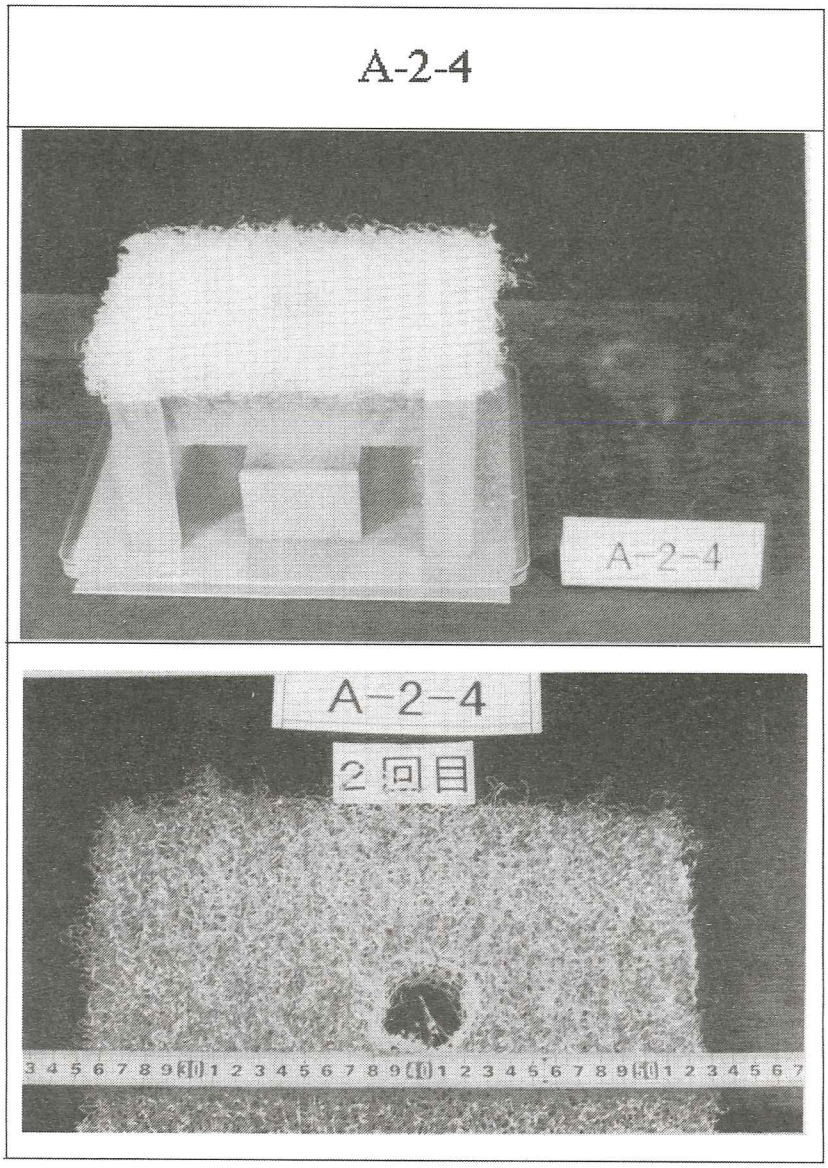
【燃焼後の状態】
A：表面まで広がらない
B：円形に溶ける
C：全焼する
D：その他



写真－8.2　完全燃焼する試験片の実験状況

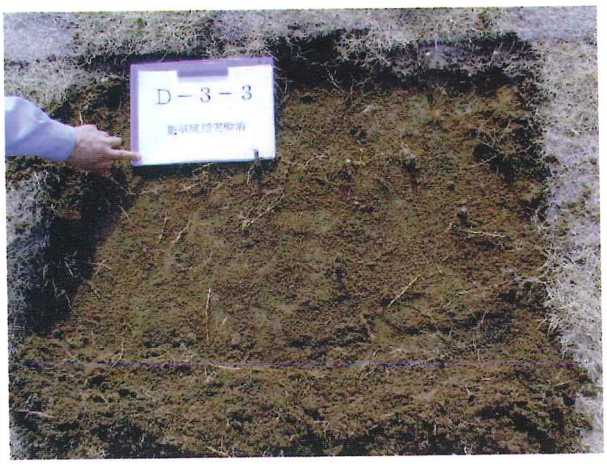
焼性試験（JIS L1091）としてJIS規格化されている水平法によって行うこととした。実験装置を図－8.1に示す。試験片を試験片ホルダー上に水平に取り付け，燃焼用カップと試験片中央部との距離が76.2mmになるように調節する。次に，燃焼用カップにエタノール（一級）を0.3mℓ注入して，無風状態のもとで点火し，エタノールが完全燃焼して消火するまで試験片を燃焼させる。自然消火後，試験片に燃焼によってできた穴の大きさ(最大値)(以下，炭化距離と呼ぶ)を測定する。１種類のシートについて３回の試験を行った。試験対象としたシートは第１次プロトタイプ(写真－2.1参照)である。

各シートの諸元，主素材とともに試験結果を表－8.1に示す。主素材がポリプロピレン(PP)であるものは大部分の試験片が全焼であり，その他の素材でも３ cm以上の炭化距離となっているものが多い。全焼する試験状況の一例を写真－8.2に示す。エタノールの燃焼中には，シートに引火して激しく燃焼するとともに，熔解した素材が垂れ落ちる状況が見られた。また，全焼せずに炭化距離の測定が行えた試験片の燃焼状況の一例も写真－8.3に示す。シートに引火しないため，写真－8.2に見られるようなシート上に炎が燃え上がる様子は見られない。また，シート素材は熔けているようであるが，ほとんど垂れ落ちない。



写真－8.3　完全燃焼しない試験片の実験状況

以上の実験から分かるようにシートは燃焼しやすい性質がある。次にこれらのシートを土中に埋設するとどの程度燃焼しにくくなるかを確認する実験を行った。実験対象としたのは6.1.1(1)に示した土木研究所における試験施工で盛土のり面へ敷設した８種類のシート(**表－8.1**の「実大燃焼実験」の欄に○印をつけたもの)に対して行った。実験状況を**写真－8.4**に示す。燃焼させる材料は稲藁束を用いることとし，一回の燃焼に３kgずつ用いた。燃焼させる状況としては，埋設したシート上の張り芝および土を取り除いてシート表面と地表面が同一の平面上に見られる状態(１m四方)とし，その上に上記の藁を広げて載せて着火し，自然に燃え広がらせた。藁が完全に燃焼して自然消火した後，シートの燃焼状況の観察および燃焼前後での引っ掛け強度の測定を行なった。なお，引っ掛け強度は**写真－7.1**に示したバネばかりを用いた簡易試験法(詳細については7.1.2(2)参照)によって測定した。以上の実験結果を**表－8.2**に示す。いずれのシートも，**写真－8.4**に示したように，シートは地面上に露出したところが部分的に燃焼した程度であった。また引っ掛け強度を見ても燃焼によって大きく低下するものがない。なお，上記の実験に先立って，シート上のシバおよび土を取り除かないで藁を燃焼させた実験を行ったが，シートには燃焼などの変擾が



実験前のり面状況（1m×１ｍ範囲の芝を剥がしシート表面を露出）



シート露出時の燃焼状況



藁の燃焼状況



露出させたシートの実験後の状況
シート表面の一部が溶ける(A-4-2)

写真－8.4　シートの実大燃焼実験の状況

表－8.2　実大燃焼実験後の簡易引っ掛け試験の結果

タイプ	シート名称	引っ掛け強度　(kgf)		強度保持率 (%)
		燃焼実験前	燃焼実験後	
ヘチマ	A-1-4	9.7	8.7	89.7
	A-3-3	11.3	15.3	135.4
	B-2-2	27.3	24.3	89.0
ネット	A-4-2	10.3	14.0	135.9
	A-8-2	15.3	10.3	67.3
編み物	C-3-2	29.3	28.7	98.0
織物	D-1-4	30.0	30.0	100.0
	D-3-3	24.7	21.3	86.2

全くが見られなかった。以上の結果で特に注目すべき点として，上記したJIS規格による燃焼試験で全焼したシート(A－１－4，A－３－3，A－４－２)も，全焼しなかったシートと同程度の燃焼状況になったことである。つまりシートに土砂が充填されていると，シートの燃焼しやすさによらず，燃焼をほぼ防ぐことができると判断できる。この結果は，2.2.1⑸に示した方針（埋設することを燃焼防止対策の基本とする)が現実的であることを裏付ける。

8.2.2　試験方法の検討

試験法としては，8.2.1に示した実大燃焼実験と同様にシート表面から燃焼させる方法がよい。そのような既往のJIS規格試験法として，シート表面に火種を設置して燃焼させるものがある（JIS L1091)。しかし，この試験法で定められている火種の大きさがシートの空隙より小さく，そのため火種がシート内に落ちてしまう場合がある。そこで，火種の大きさをより大きくして，シート面上での燃焼が行える試験として**写真－8.5**に示すような試験法を考案した。試験片として幅20cm，長さ27.5cmのシートを用意する。容器内に敷き均した乾燥砂上に試験片を置き，1)シート面と砂面が一致するまで(シート厚と同じ高さま

表－8.3　小規模燃焼試験の結果

試験の種類	タイプ	シート名	素材	燃焼状態			煙			シートへの引火			燃焼後の状態			炭化距離(cm)			
																1回目	2回目	3回目	平均
充填なし	ヘチマ	A-1-4	PP	D	D	D	B	B	B	C	C	C	C	C	C	全焼	全焼	全焼	-
		A-3-3	PP	D	D	D	B	B	B	C	C	C	C	C	C	全焼	全焼	全焼	-
		A-4-2	PP	D	D	D	C	C	C	C	C	C	C	C	C	全焼	全焼	全焼	-
		B-2-2	PVC	B	B	B	B	A	B	A	A	A	B	B	B	2.0	1.5	1.5	1.7
	ネット	A-8-2	PP	C	C	C	B	B	B	C	C	C	C	C	C	(全焼)	(全焼)	(全焼)	-
	編み物	C-3-2	PET	C	C	D	B	B	B	B	B	B	B	B	B	5.5	3.5	4.5	4.5
	織物	D-1-4	PP(+PET)	D	D	D	B	B	B	C	C	B	C	C	B	全焼	全焼	2.0	2.0
		D-3-3	PP	B	B	B	A	A	A	A	A	A	B	B	B	1.5	1.0	2.5	1.7
シート厚半分まで充填	ヘチマ	A-1-4	PP	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A				
		A-3-3	PP	B	B	B	B	B	B	A	A	A	B	B	B	1.7	1.9	1.8	1.8
		A-4-2	PP	D	D	D	B	B	B	C	C	C	B	B	B	13.9	14.0	14.1	14.0
		B-2-2	PVC	D	D	D	B	B	B	C	C	C	B	B	B	18.4	18.6	18.5	18.5
	ネット	A-8-2	PP	B	B	B	B	B	B	A	A	A	A	A	A				
	編み物	C-3-2	PET	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	2.2	2.0	1.8	2.0
	織物	D-1-4	PP(+PET)	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	0.8	0.7	0.6	0.7
		D-3-3	PP	B	B	B	B	B	B	A	A	A	B	B	B	2.1	2.0	1.9	2.0
完全に充填	ヘチマ	A-1-4	PP	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A				
		A-3-3	PP	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A				
		A-4-2	PP	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A				
		B-2-2	PVC	B	B	B	A	A	A	B	B	B	D	D	D				
	ネット	A-8-2	PP	B	B	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A				
	編み物	C-3-2	PET	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A				
	織物	D-1-4	PP(+PET)	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	1.8	2.0	2.1	2.0
		D-3-3	PP	B	B	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A				

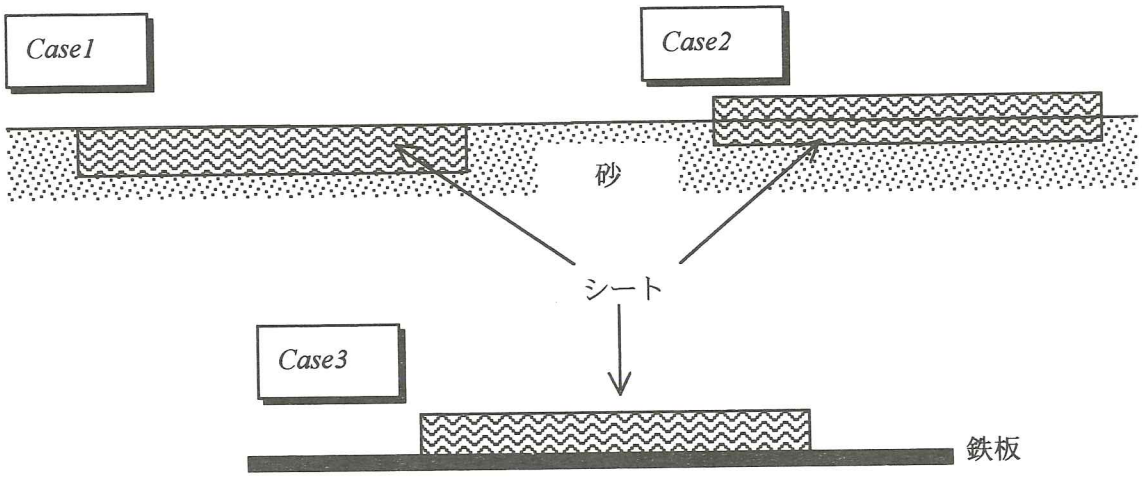
＜評価基準＞

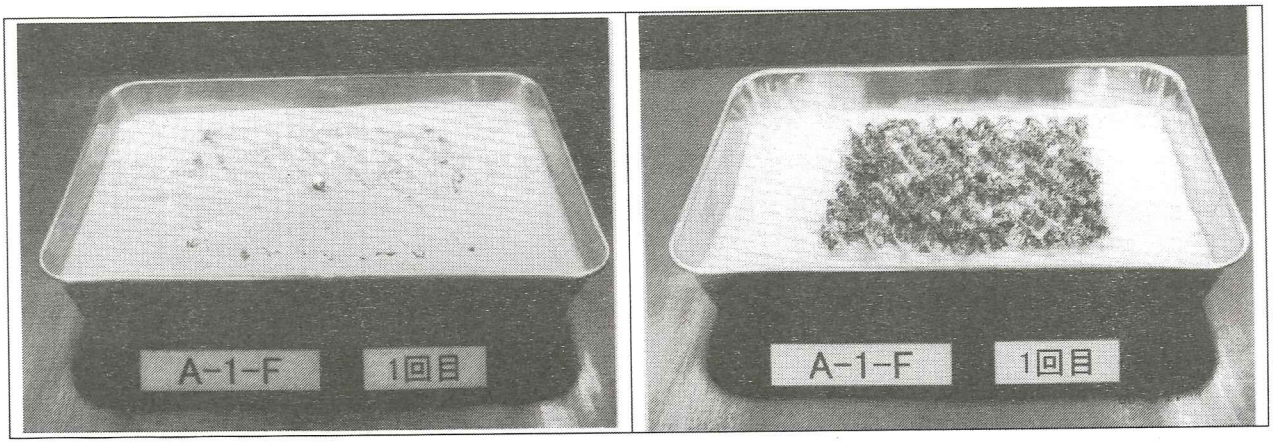
【燃焼状態】
A：余り溶けない
B：溶けるが下に落ちない
C：溶けた物が少し下に落ちる
D：溶けた物がボタボタと落ちる

【煙】
A：煙が殆ど出ない
B：煙が少し出る
C：煙がたくさん出る

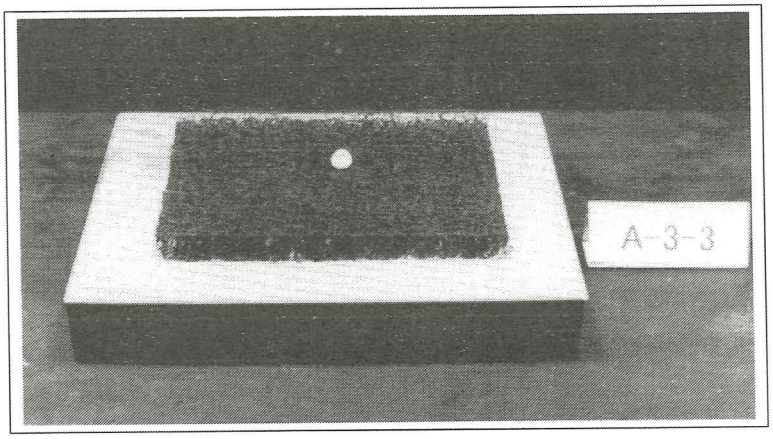
【シートへの引火】
A：引火しない
B：多少引火する
C：引火し燃え広がる

【燃焼後の状態】
A：表面まで広がらない
B：円形に溶ける
C：全焼する
D：その他





Case1　　Case2



Case3

写真－8.5　シートの小規模燃焼試験の実施状況

で)乾燥砂を充填する(全充填),2)シート厚の半分まで乾燥砂を充填する(半分充填),3)充填なし(シート単体)という3ケースの試験条件を作成する(**写真−8.5**参照)。この後,エタノール(一級)を0.3mℓ染み込ませた直径1cmの脱脂綿からなる火種をシート面に載せて点火する。脱脂綿が全焼し,自然消火した後に炭化距離の測定を行う。

このような小規模試験法の結果を**表−8.3**に示す。この試験が上記した目的の検討に十分なものであることを確認する必要がある。具体的には,火種の火力がシートを燃焼するのに十分であるのかを,他の試験法による結果と比較して明らかにしなければならない。そこで実大燃焼実験を行った8種類シート(**表−8.2**)を用いて上記について検討を行った。まず,シート単体を燃焼しうる最低限の火力があったことを確認する。上記の小規模試験での充填なしの結果と**表−8.1**に示したJIS規格による燃焼試験の結果を比較すると,JIS規格試験で3回とも全焼したシートは小規模試験でも全焼するという結果が得られた。また,3回の試験うち1〜2回全焼する結果となったシートについては,JIS規格試験と小規模試験による全焼回数が完全に一致しない。さらに,JIS規格試験で3回とも全焼しなかったシートは,小規模試験でも同様な結果となった(ただし炭化距離は一致しない)。以上の結果から,小規模試験は,充填なしの条件で全焼させるだけの十分な火力があるだけでなく,JIS規格試験と同様な結果が得られることが分かった。

次に,実大燃焼実験で見られたような燃焼状況を再現しうる(火力が大きすぎない)ことを確認する。全充填の結果(**表−8.3**参照)と実大燃焼実験の結果を比較すると,両者とも地表面に露出した部分のみが燃焼するという同様な結果が得られた。つまり実大試験と同等の結果が得られる火力であると思われる。

以上の試験結果より,ここで提案した小規模燃焼試験法は,土砂充填の有無によるシートの燃焼範囲拡大を調べるのに用いることができると判断される。

8.2.3 耐燃焼性の評価

表−8.3に示した小規模燃焼試験の結果に見られるように,シートの土砂充填の程度によって燃焼状況が大きく異なる。耐燃焼性を評価するにあたっては,土砂充填の程度を実状に合うように設定しなければならない。全く土砂充填されていない状態では,8.2.2に示した小規模燃焼試験の結果から分かるように土砂による燃焼抑制効果がなく,主にシート素材の耐燃焼性に帰因する炭化距離の差異のみしか見られない。つまり,充填なしの状態まで露出した場合には燃焼範囲が拡大すると考えなくてはならない。したがって2.2.1⑸に示した方針で「シートを常に埋設した状態に保つ維持管理を行う」とした。その場合,「万が一シートが露出した部分」というのは,ある程度まで土砂充填がされているが,シート面が地上に露出している部分と言うことになる。この充填状況に対応する試験条件として,1)全充填と2)半充填とを想定することとする。

耐燃焼性の評価は,上記2条件で小規模燃焼試験を行い,2)半充填では炭化距離が10cm以下であること,1)全充填では火種直下を除いて燃焼しない(炭化距離が火種の直径と同じ1cm程度)ことを基準とする。

8.3 人体および生態系に対する安全性に関する事前調査法

熱可塑性樹脂と呼ばれる化学物質を主素材とするシートの安全性の確保・確認については,1.4.3⑵に箇条書きした「基本対応方針」に基づいて行うこと対応を基本とすることを示した。この方針に基づいた現時

点での具体的対応は以下のとおりである。

- 方針1)，2)，3)については，シートの製品化にあたって本研究で提案する暫定的試験法で調査を行い，その結果を資料としてまとめて提示できる用意をする。
- 方針4)については，水質に関しては，環境庁告示59号「水質汚染に係る環境基準について」に示された方法に基づいて，土壌に関しては，環境庁告示46号「土壌の汚染に係る環境基準について」に示された方法に基づいて追跡調査を行う。
- 方針5)に関連して，内分泌撹乱作用が疑われる物質に関して基準・試験方法が新たに確立された場合には，速やかにそれらを基準・試験方法に取り入れて試験を実施する。

本章では，方針2)，3)対応する1)燃焼時に発生するガスの有害性と2)外因性内分泌撹乱化学物質（いわゆる環境ホルモン）と疑われる物質の含有量および水への溶出量についての試験法を提案する。これらの試験法は今後必要に応じて見直されるべきものであり，その際の参考となるように試験法を決めるにあたって考えた事項について整理しておく。また環境ホルモンについては，シート作成時に意図的に加えていない種類の環境ホルモンが高い濃度で含有されることがあり，その原因について調査した結果も併せて示す。その原因からシートの環境ホルモン含有に対して，上記方針に基づいて対応する際の基本的考え方を示す。

8.3.1　燃焼時に発生するガスの成分試験法と有害性の評価

試験法の選定のために参考にした既往土木資材とは，袋型根固工法用袋材（7.1.1参照）である。この資材に対して，（財）土木研究センターが審査作業を行っている「土木系材料技術・技術審査証明」（民間開発建設技術の技術審査証明事業認定規定に基づく）に，発生ガスの安全性が評価項目の一つとなっている。その評価方法を参考にして，シートのガス成分試験法と有害性の評価法を提案する。

⑴　試験の適用性

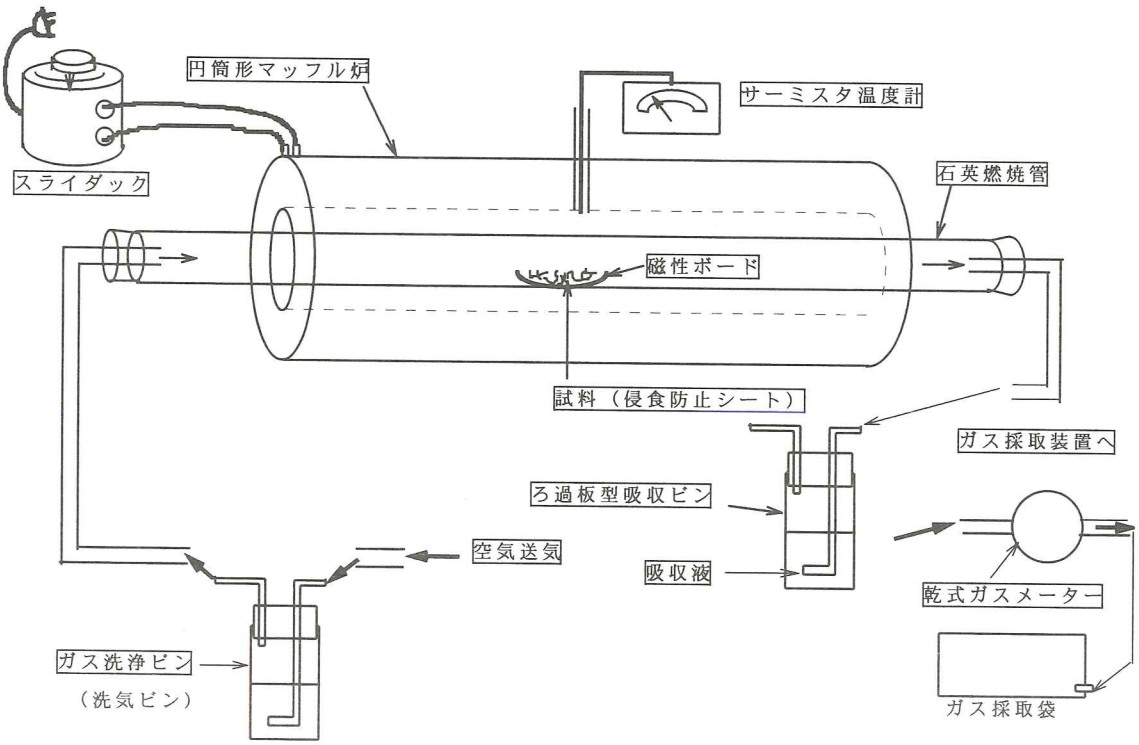
実際に生じうるシートの燃焼状況としては，1)施工時にシート切断面を燃焼させて構成材を焼き付ける，2) 供用時に不審火によって燃焼する，3) シートを焼却処分する場合などが考えられる。上記の燃焼条件（燃焼の温度，シートと一緒に燃焼する他物質の種類など）は各状況ごとに異なる。そのため，実際にはガスの成分とその発生量も異なると予想される。したがって，以下に提案する「ある決まった燃焼条件のもとで発生するガス成分の分析法」は，上記の各状況を厳密に再現するものではない。シート単体の燃焼という最も基本的な燃焼状況での安全性を確認する便宜的な手法であることに留意されたい。

⑵　試験法

「土木系材料技術・技術審査証明」に示されている試験法を一部（ダイオキシンの分析）改善した試験法を以下に示す。

●発生ガス成分試験（ダイオキシン類を除く）

図－8.2に示す円筒型小型電気炉を用いて50mgのシートを燃焼させ，その際に発生するガスを採取・成分分析を行う。分析対象とする成分は，シートの主素材で概ね決まることが知られているので，参考文献1) に掲載されている主素材（ポリプロピレン，ポリエステルなど）とガス成分の関係を参考にして，表－8.4に示すように定めた。まず，5mm以下に細断したシートを磁性ボードに入れ，それを円筒型燃焼炉の中央部に設置する。次にスライダック（電圧可変器）を調節して，室温から700℃まで図－8.3に示すように

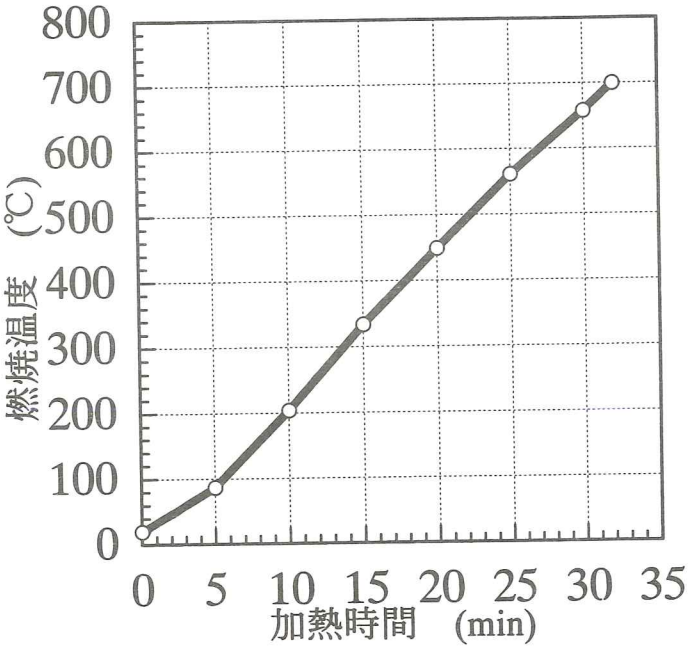


図－8.2　円筒型小型電気炉を用いた燃焼ガス成分試験

温度を上昇させた。温度上昇開始とともに，燃焼炉に空気を500（mℓ/分）供給する。この供給方法は，燃焼炉の排気口に乾式ガスメータ（空気流量の測定用）と真空ポンプを接続し，空気吸引によって行った。吸引する空気は，洗気ビンを通して洗浄することとした。図－8.3に示したように温度を上昇させている時間内に連続して，各成分の分析に適した方法で燃焼ガスを採取した。すなわち，CO_2，CO，C_nH_m，アルデヒド類ではガス採取袋にガスを直接採取した。それ以外ではろ過板型吸収ビンを用いて吸収液に吸収させて採取した。吸収液の種類は成分によって表－8.5に示すように変更している。採取したガスの分析は，

表－8.4　シートの主素材と分析対象とするガス成分およびその分析法

ガス成分名	主素材がPP,PE,PET	主素材が塩化ビニル系	分析方法
炭酸ガス	○	○	TCDおよびFID ガスクロマトグラフ法
一酸化炭素	○	○	
炭化水素ガス	○	○	
アルデヒド類	○	○	
塩素ガス	×	○	比色法(o-トリジン吸光光度法)
塩化水素ガス	×	○	イオンクロマトグラフ法
窒素酸化物	○	○	
硫黄酸化物	○	○	
シアン化水素ガス	○	○	比色法(4-ﾋﾟﾘｼﾞﾝｶﾙﾎﾞﾝ酸-ﾋﾟﾗｿﾞﾛﾝ吸光光度法)
ダイオキシン類 (ｺﾌﾟﾗﾅPCB類を含む)	○	○	ガスクロマトグラフ-高分解能質量分析機(GC/MS法)



図－8.3　円筒型小型電気炉内の燃焼温度の経時変化

表－8.5　ガス成分の採取に用いた吸収液

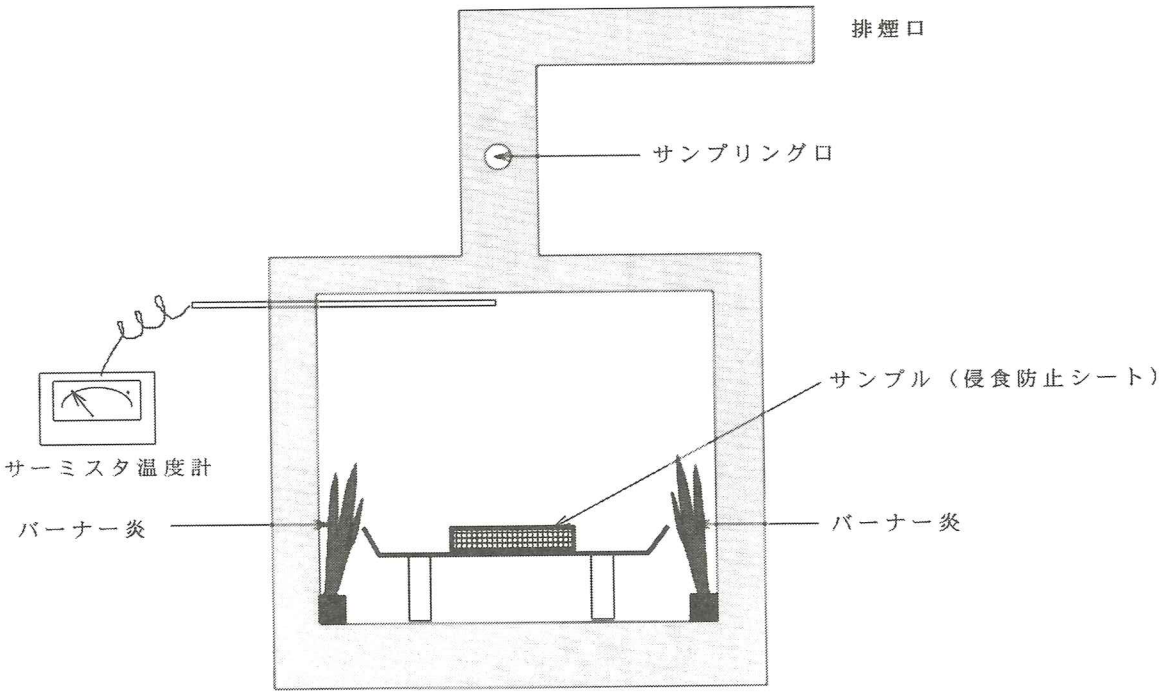
ガス成分名	吸収液
塩化水素ガス 窒素酸化物 硫黄酸化物	過酸化水素水
塩素ガス	オルトトリジン水溶液
深化水素ガス	水酸化ナトリウム水溶液

表－8.4に併記した方法で行った。

●ダイオキシン類の試験法

上記の試験では燃焼させるシートは50mgであったが，この程度の燃焼量ではダイオキシンが極微量にしか発生せず，例え発生していたとしても分析精度以下となり検出されない可能性が高い。そこで，燃焼量を100gに増加させることとしたが，このような大量のシートを円筒型小型電気炉で燃焼させることができない。そのため，燃焼装置を図－8.4に示す灯油を燃料とする小型陶芸釜を用いることとした。この装置では直火のため温度コントロールが困難なため，上記の試験のように温度上昇を一定条件に制御しながらでの燃焼ガス採取ができなかった。そのため，燃焼ガスの採取は，着火後から700℃まで上昇する間(この間の温度上昇のパターンが試験ごとに異なる)に発生するガスを連続採取することとした。

まず，100gのシートをホーロー性パッドに入れ，小型陶芸釜内に設置する。この状態で燃焼させ，排気口にガスのサンプリング口を設けて，図－8.5に示す装置で採取（JIS K 0311に規格化された排ガス試

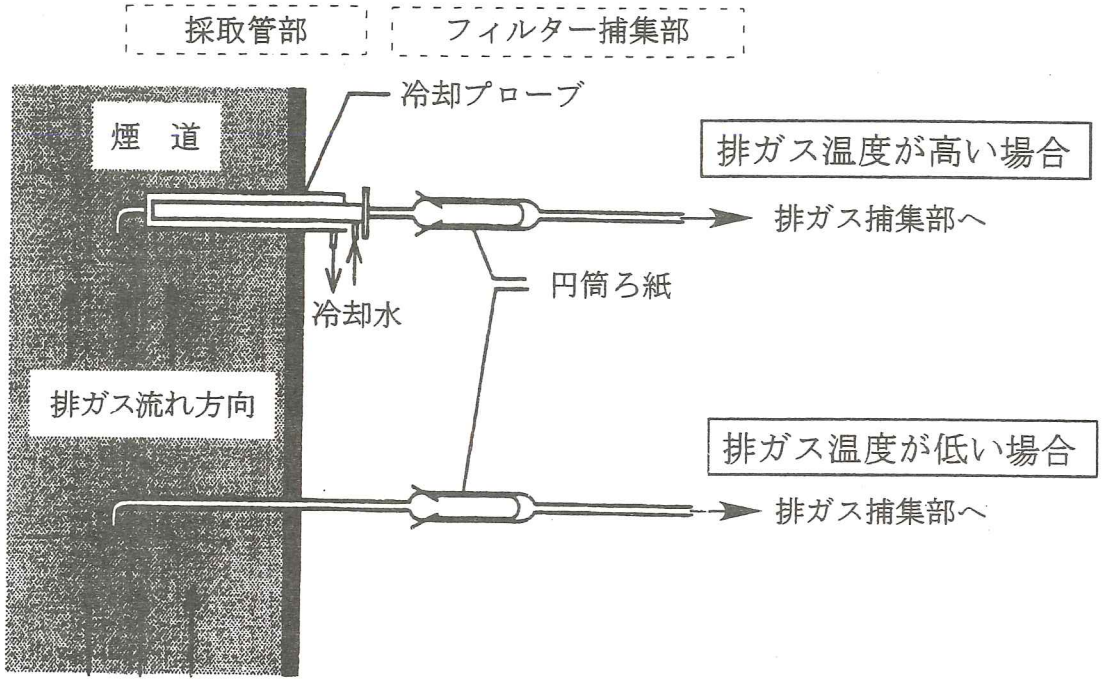


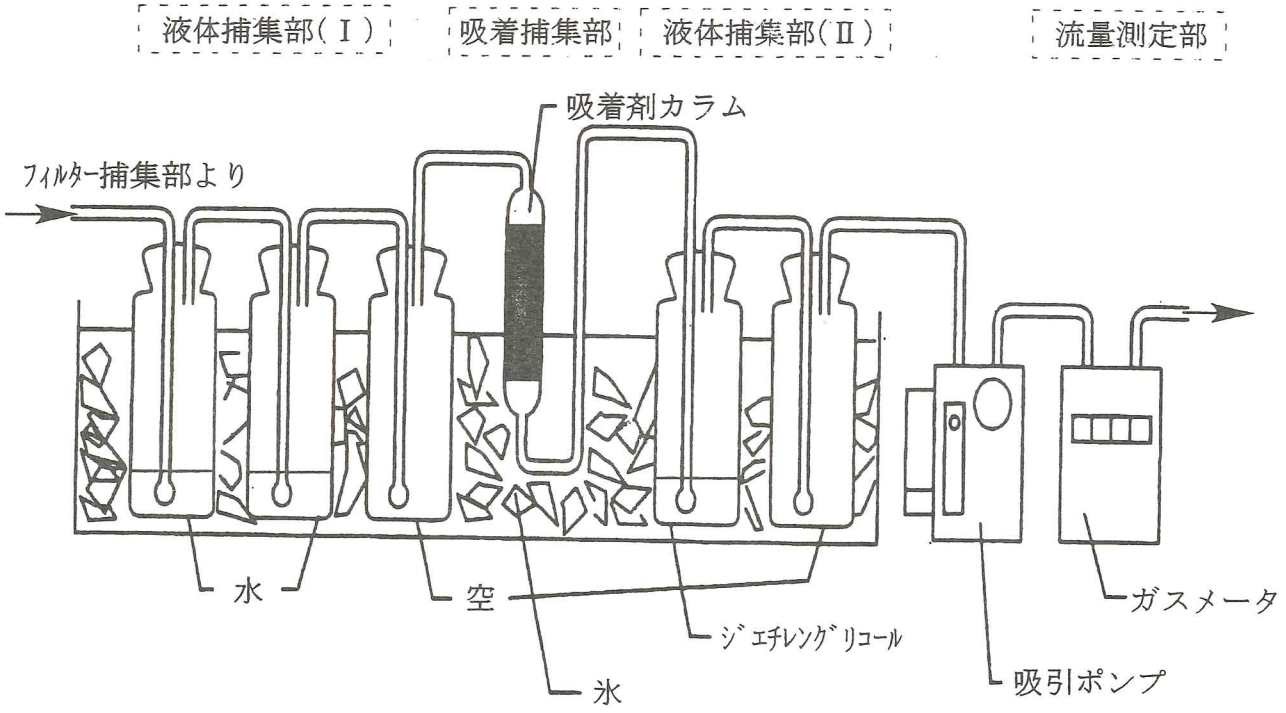
図－8.4　小型陶芸釜を用いたダイオキシン類の発生量試験

ダイオキシン類の測定分析方法

（JIS K 0311　排ガス中のダイオキシン類及びコプラナーＰＣＢの測定方法）

排ガス試料採取装置





図－8.5　ダイオキシン類の採取に用いた装置概要

表－8.6　第3次シートのガス成分分析結果

タイプ		ヘチマ				ネット		編み物		織物	
シート名		A-1-F	A-2-F	A-3-F	B-F	A-4-5F	A-8-F	C-1-F	C-3-F	D-1-F	D-3-F
炭酸ガス	(CO_2)	244	399	92	769	107	68	523	436	261	135
一酸化炭素	(CO)	303	266	122	322	149	165	281	267	180	171
炭化水素ガス	メタン (CH_4)	155	111	179	124	185	102	443	161	337	140
	エチレン (C_2H_4)	27.3	12.1	7.0	<1	16.0	13.2	13.5	5.8	15.8	11.6
	エタン (C_2H_6)	2.6	<1	<1	<1	2.0	2.1	1.3	<1	1.4	1.4
	プロピレン (C_3H_6)	14.7	2.8	21.4	<2	36.7	31.3	3.0	<2	32.6	20.2
	プロパン (C_3H_8)	2.5	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2
	イソブタン (C_4H_{10})	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
	ﾉﾙﾏﾙﾌﾞﾀﾝ (C_4H_{10})	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
アルデヒド類	ﾎﾙﾑｱﾙﾃﾞﾋﾄﾞ (HCHO)	1.7	3.2	0.6	1.5	2.2	0.7	0.9	3.4	1.5	1.5
	ｱｾﾄｱﾙﾃﾞﾋﾄﾞ (CH_3CHO)	0.4	0.9	<0.5	1.2	<0.5	<0.5	3.0	0.5	<0.5	<0.5
塩化水素ガス	(HCl)	－	－	－	690	－	－	－	－	－	－
塩素ガス	(Cl_2)	－	－	－	<1	－	－	－	－	－	－
シアン化水素ガス	(HCN)	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
窒素酸化物	(NO_2)	0.10	0.16	0.09	0.01	0.13	0.03	0.12	0.05	1.0	0.36
硫黄酸化物	(SO_2)	1.9	1.5	1.3	1.6	1.7	0.6	1.2	0.5	4.8	2.8
ダイオキシン類	ダイオキシン	0.068	0.050	0.035	4.2	0.058	0.071	0.097	0.031	0.062	0.046
	ジベンゾフラン	0.11	0.15	0.032	8.2	0.14	0.095	0.15	0.11	0.093	0.068
	コプラナーＰＣＢ	1.1	0.94	0.090	0.85	0.47	0.36	0.68	0.5	0.42	0.26
ダイオキシン類　合計		1.3	1.1	0.16	13	0.67	0.53	0.93	0.62	0.58	0.37

備考1: 単位について、ダイオキシン類は単位体積あたりのガスに含まれる質量(ng／m^3)
それ以外は単位質量あたりのシートからの発生する質量(mg/g)
備考2: 表中の＜印は、定量下限値以下を示す。

表－8.7　CO，NO_2，SO_2の環境基準と分析結果の比較

分析結果(ppm)	ヘチマ				ネット		編み物		織物	
	A-1-F	A-2-F	A-3-F	B-F	A-4-5F	A-8-F	C-1-F	C-3-F	D-1-F	D-3-F
窒素酸化物(NO_2)	0.09	0.26	0.07	0.01	0.07	0.02	0.20	0.09	0.58	0.33
硫黄酸化物(SO_2)	0.82	1.2	0.47	0.89	0.49	0.18	0.96	0.51	1.3	1.2
一酸化炭素(CO)	31	27	8.6	27	11	13	28	17	17	13
環境基準	基　準　値									
窒素酸化物(NO_2)	1時間値の1日平均値が0.04～0.06ppm内、またはそれ以下であること。									
硫黄酸化物(SO_2)	1時間値の1日平均値が0.04ppm以下であり、かつ1時間値の平均値が0.1ppm以下であること。									
一酸化炭素(CO)	1時間値の1日平均値が10ppm以下であり、かつ1時間値の8時間平均値が20ppm以下であること。									

表－8.8　ダイオキシン類の環境大気中の環境基準と廃棄物処理施設からの排出基準値

基準の種類		排出基準値
環境大気中の環境基準		0.6(pg-TEQ/m^3)
廃棄物焼却炉の排出基準	大型：焼却能力4,000(kg/hour)以上	1(ng-TEQ/m^3)
	中型：焼却能力2,000～4,000(kg/hour)	5(ng-TEQ/m^3)
	小型：焼却能力2,000(kg/hour)未満	10(ng-TEQ/m^3)

料採取装置と同一)し，これについて表－8.4に示す方法で分析を行った。

⑶　試験結果と有害性の評価

第3次プロトタイプシートに対して，⑵の試験を実施した結果を表－8.6に示す。ダイオキシン類以外では，単位質量あたりのシートからの発生する質量（mg/g）として，ダイオキシン類では採取した単位体積あたりのガスに含まれる質量(ng/㎥)として測定結果を示している。

ダイオキシン類以外についてまず着目すると，有害性が認められている成分は，CO, HCN, HCℓ, NO_2, SO_2である。これらを評価対象として，評価にあたっては下記のような判断を行うこととした。

CO, NO_2, SO_2には，大気中の濃度に対して環境基準が表－8.7に示すように設けられている。したがってこれらの成分については，環境基準との比較から評価を行う(1.4.3⑵に示した方針に基づく)。その際，今回の分析結果は，発生源の濃度であり，それが大気中に拡散・希釈された後の濃度ではないことを考慮する必要がある。つまり上記の基準値は希釈された後の基準であって，それを発生源でのガス濃度にそのまま適用するのではなく，拡散・希釈の効果を勘案することである。

CO, NO_2, SO_2のガス中の濃度（ppm）の測定結果を表－8.7に併記した。⑴に示したような施工中や供用時におけるシートの燃焼時間は，比較的短時間であると想定されることから，表－8.7に示した環境基準値のうち，最も短時間の基準(すなわち最大値)を今回の評価に用いる基準値とする。この基準値と測定結果とを比較すると，最大濃度はNO_2，SO_2では基準値の10～15倍程度，COでは1.5倍程度となっている。環境基準は超えているものの，この程度の濃度であれば，燃焼するシート量が大きくないこと，ガス発生後の拡散・希釈が期待できることから，大きな問題が無いと判断することとした。

表－8.9　ダイオキシン類の発生量の測定結果(TEQ 換算値)

タイプ		ヘチマ				ネット		編み物		織物	
シート名		A-1-F	A-2-F	A-3-F	B-F	A-4-5F	A-8-F	C-1-F	C-3-F	D-1-F	D-3-F
ダイオキシン類	ダイオキシン	<0.01	<0.01	<0.01	43.00	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
	ジベンゾフラン	<0.01	<0.01	<0.01	110.00	1.00	0.90	0.50	<0.01	<0.01	<0.01
	コプラナーＰＣＢ	0.14	0.11	<0.01	0.10	0.05	0.04	0.08	0.05	0.04	0.03
ダイオキシン類　合計		0.14	0.11	<0.01	153.10	1.05	0.94	0.58	0.05	0.04	0.03

備考: 単位(pg-TEQ／m³):ダイオキシン類のうち最も毒性の強い2,3,7,8-四塩化ｼﾞﾍﾞﾝｿﾞ-ｼﾞｵｷｼﾝ(2,3,7,8-TeCDD)と毒性が等しくなるように濃度換算した値

有害性が認められているHCN，HCℓについては，上記のように今回の試験結果に適用可能な環境基準が無かった。したがって，現時点では，これらの成分について濃度的観点から有害性を判断することができない。ただし，HCNは全てのシートで検出下限値以下であり，発生量が極微量であることから，有害性について大きな問題がないと考えられる。

ダイオキシン類については，環境大気中の環境基準と，廃棄物処理施設からの排出基準値が表－8.8に示すように設定されている。ここで，基準値の濃度の単位についてであるが，TEQとはダイオキシン類のなかで最も毒性の高い2,3,7,6－四塩化ジベンゾ－パラージオキサン（2,3,7,6－TeCDD）の毒性を基準として，毒性が同等となるように各ダイオキシン類の濃度を2,3,7,6－TeCDDの濃度に換算した濃度（TEQ換算値と呼ぶ）であることを表す。各シートの測定結果に対してTEQ換算を行った結果を表－8.9に示す。環境大気中の環境基準値と比較すると，ダイオキシン類の発生が大きいことが知られている塩化ビニル系の素材を用いたＢ－Ｆを除き，環境基準の2倍以下となっている。これらについてはCO，NO_2，SO_2の場合と同様にガス発生後の拡散・希釈を考慮すると，大きな問題はないと考えられる。なお，袋型根固工法用袋材に関する「土木系材料技術・技術審査証明」において，COについて環境基準値の100倍の濃度である場合にも，上記と同様な判断がなされている事例がある。

Ｂ－Ｆについては，環境大気中の環境基準値より2オーダーも大きな値となっており，注意を要する。しかし，シートの燃焼をガスの発生源と考え，それに相当する廃棄物焼却炉の基準と比較すると，最も基準が厳しい大型焼却炉の排出基準値以下であることが分かる。したがって，燃焼時に発生するガスに至近距離で長時間暴露しないようにする必要がある。Ｂ－Ｆのシートは，施工時に焼き付けを行う必要が無く(8.1参照)，また耐燃焼性も比較的高い（8.2.2参照)。以上の結果より，Ｂ－Ｆは燃焼しやすい状況であるシート露出をこまめに補修することを前提として使用できると判断する。

以上に示したように，実際の測定結果に基づいてある一定の評価基準を示した。しかし，まだ一般的でない部分も残されている。これは，主に環境基準と今回の測定値の比較の仕方（つまり比較にあたってベースとする状況が異なるもの同士をどのように比較すれば，「人体に無害である」という判断が可能となるのか）に曖昧な部分が残っているからと考えている。これについては，今後も事例を重ね，検討していく必要がある。

8.3.2　環境ホルモンと疑われる化学物質の含有量および水への溶出量に関する試験法

外因性内分泌撹乱化学物質(いわゆる環境ホルモン)と疑われる物質の含有量および水への溶出量についての試験法を提案する。これらの試験法は今後必要に応じて見直されるべきものであるが，以下ではその際の参考となるように試験法を決めるにあたって考えた事項について整理しておく。さらに，今回行った

試験によってシート作成時に意図的に加えていない種類の環境ホルモンが高い濃度で含有される場合があることが明らかとなった。その原因について調査した結果も併せて示す。最後にその原因からシートの環境ホルモン含有に対して，上記方針に基づいて対応する際の基本的考え方を示す。

⑴　留意事項

2.2.1⑸に示した狙いに沿った利用が可能な情報を提供するためには，ある決まった試験法を用いて各種シートごとに環境ホルモンの含有量を測定することとして，測定結果が相互比較できるようしておく必要がある。しかし，シート開発を行った時点では，シートのような熱可塑性樹脂を主素材とする製品に適用可能な試験法が複数提案されているが，公定されたものはもちろん，それに相当するような扱いを受けている試験法もない状況であった。試験法についても今なお研究段階であると言えよう。今回，シートの試験法として採用したのは，上記の既往の試験法のなかから一つを選択したに過ぎない（試験法や試験条件の設定のための検討については⑶を参照のこと）。また，試験対象とした８種類の環境ホルモンと疑われている化学物質名を表－8.10に示す。この８種類は他の同様な物質に比べて，シートの主素材とした熱可塑性樹脂に含有される可能性が高いものであることから選定した。したがって，今回採用した試験法や試験対象とした化学物質は，1.4.3に示した方針に基づいて，今後より的確な基準や試験法が提案されたならばそれに変更されるべきである，ごく暫定的なものであることに留意されたい。

表－8.10　試験対象とした環境ホルモンと疑われる化学物質名

4-n-オクチルフェノール
4-t-オクチルフェノール
ノニルフェノール
フタル酸ジ-2-エチルヘキシル
フタル酸ブチルベンジル
フタル酸ジ-n-ブチル
アジピン酸ジ-2-エチルヘキシル
ビスフェノールA

⑵　試験項目と目的

試験は，環境ホルモンの含有量と水への溶出量の２種類に大きく分けられる。含有量試験は，シートに含まれる環境ホルモンの全量を明らかにすることを目的とした試験である。それに対して溶出量試験は，含有される環境ホルモンのうち，シート供用時に河川水へ溶出する量の目安を得ることを目的とした試験である（試験法の詳細は⑶に示す）。

溶出量試験としては，精製水に５分間浸漬する「付着物溶出試験」と，pH＝2,7,10に調整した水に７日間浸漬する「含有物溶出試験」を行った。付着物溶出試験は，ごく短時間で溶出するシート構成材の表面などに付着した環境ホルモンの溶出量を明らかにすることを目的としている。それに対して含有物溶出試験は，シート構成材の表面～内部に含有されている環境ホルモンの溶出量を測定するものである。付着物溶出試験では溶出が認められなかった環境ホルモンでも，含有物溶出試験では認められるものは，比較的溶出しにくい形態でシートに含有されていると判断できる。

⑶　試験法および試験条件の設定に関する実験的検討

含有量試験では，シートの試験片に含まれている環境ホルモンの全量を有機溶媒に溶出させる試験とするのが理想である。実際には，樹脂の種類などによって完全に溶出させるのが難しい。そこで，現在提案されている３種類の試験法で同一のシートに対して試験を行い，最も溶出量が多い試験法を暫定の試験法として用いることとした。

また，溶出量試験では水に溶出させる条件（水温，pH，浸漬時間）の設定をどのようにするかが問題で

ある。試験の目的から，実際の供用時と同様な溶出が生じる条件とするのが理想である。しかし，現地の条件は多様であり，また溶出量を増減させる主要因も明らかとなっていないため，試験条件を絞り込むことができない。そこで，既往の試験法を参考にして水温，pHを設定したのち，その条件での溶出がほとんど終了する浸漬時間を実験によって明らかにすることとした。上記について検討した結果を以下にまとめて示す。

a) 含有量試験法に関する検討

実験の対象とした3種類の試験法の手順をフローチャート化したものを図－8.6に示す。ソックスレー法は，有機溶媒を循環させて試験片からの溶出を促進させる効果がある。底質用試験法は，環境庁[2]が提案した(1997年)河川や湖沼の底質に含有される環境ホルモンの測定を目的としたものである。包装プラスチック用試験法は，河村ほか[3]が提案した(1998年)食品包装用の容器に含まれる環境ホルモンの測定を目的としたものである。これらの試験法は，図－8.6に示すように試験片からの環境ホルモンを溶出させる仕方のみが異なり，溶媒中に溶出した環境ホルモンの測定にはガスクロマトグラフを用いた同一の方法で行われている。したがって試験結果の差異は，環境ホルモンの測定機器によるのではなく，溶出法に起因する。

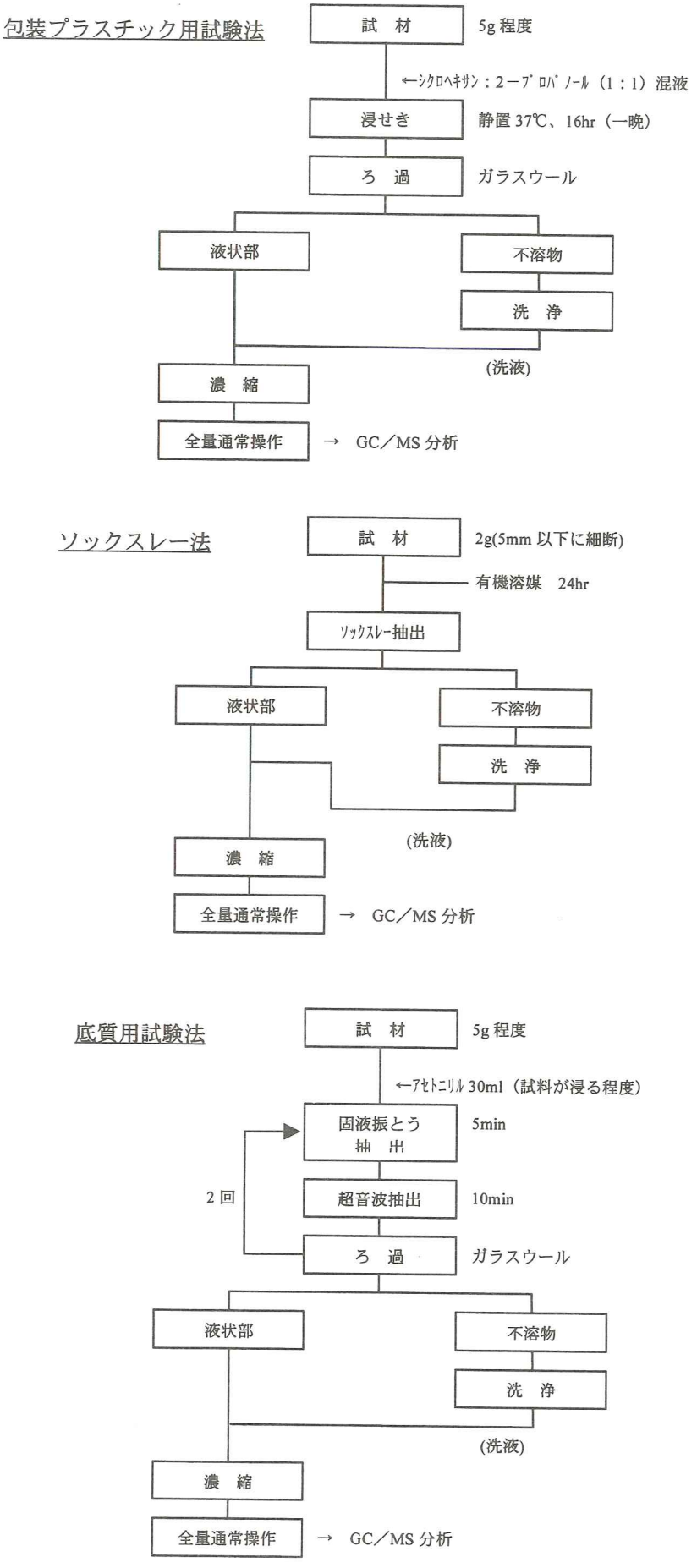
上記の試験法を主素材が異なる3種類のシートに対して試験を行った結果を表－8.11に示す。なお，ブランク値とは上記の各試験法を試験片なしで行い，試験中に大気中などから混入する環境ホルモンの検出量を示したものである。ポリエステルおよび塩化ビニリデンを主素材としたシートでは，各試験法とも同程度の結果となっており，顕著な差異が認められない。しかし，ポリプロピレンを主素材としたシートでは，底質用試験法による測定値が他の試験法に比較して明らかに小さくなっており，溶出法として不適であると判断される。包装プラスチック用試験法と底質用試験法によって測定した含有量を比較した結果を図－8.7に示す。何れの環境ホルモンについても，包装プラスチック用試験法による結果が底質用試験法と同等またはそれ以上となっており，明らかに環境ホルモンを溶出させる性能が高いことが確認できる。

また，ソックスレー法と包装プラスチック用試験法には，結果に有意な差が認められない。しかしソックスレー法は溶媒を循環させる際に汚染されやすく，ブランク値を小さくするのに苦労した。したがって，包装プラスチック用試験法のほうが試験法の簡便性が高いうえ，測定値の安定性が高いと考えられる。以上の結果より，含有量試験法としては，包装プラスチック用試験法を用いることとした。

b) 溶出量試験法に関する検討

供用時にシートが水に浸かった状態となるのは，降雨時にシートに充填した土が水で飽和するときか，出水時に冠水するときのいずれかである。後者の状況では，水量が非常に多いためごく微量の環境ホルモンが溶出しても希釈され，さらに流下してしまうので，溶出に伴う問題が生じにくいと思われる。前者では，浸透水に溶出した環境ホルモンが土に吸着するなどしてその場にとどまる可能性が考えられる。そこで，試験法としては，前者をイメージしてシートを常温(約20℃)の静水中に浸漬することとした。水質については，7.2.2に示した耐薬品性試験を参考にして，pHが約2，7，10(厳密には緩衝剤としてしゅう酸塩 pH＝1.68，中性リン pH＝6.86，炭酸塩 pH＝10.02)に調整した3種類の溶液を用いることとした。浸漬した溶液の分析にあたっては，環境庁[2]が提案した(1997年)河川や湖沼の水に含有される環境ホルモンの測定法と同一とした(付着物試験も同様である)。

a) と同一のシートを用いて，どのくらいの期間浸漬すべきかをあきらかにするため，浸漬時間を変え



図－8.6　実験対象とした含有量試験法の概要(ソックスレー法,底質用試験法,包装プラスチック用試験法)

た溶出量試験を実施した。浸漬時間に伴う溶出量の変化の測定結果を図－8.8に示す。いずれのシートにおいても，7日以降では溶出量の増加がほとんど認められない，または7日でほぼ最大値に近い溶出量となる傾向が見られる。以上の結果より，浸漬時間は7日間とした。

⑷　環境ホルモンの混入原因

a）環境ホルモン混入の実態

第2，3次プロトタイプを試験対象として表－8.12に結果を示すように含有量試験を行なったが，それに先立ってシートの原材料に環境ホルモンが含有されているか調査したところ，表－8.12に併記したように大部分のシートで使用していないとの結果が得られた。しかし，原材料にない環境ホルモンが比較的高濃度で含有されていることが分かった。なお，含有量試験法として第2次プロトタイプシートには底質用試験法を，第3次には包装プラスチック用試験法を用いている。試験法が異なるのは，第2次シートについて試験を行った(1999年)後に，包装プラスチック用試験法を知り，第3次について試験を行った2000年より⑶に示した試験を行って導入を決定したからである。

また，溶出量試験と含有量試験を比較した結果を図－8.9に示す。この結果に着目すると，付着物溶出量が含有量とほぼ同じ値になる場合，すなわちシート構成材のごく表面に付着している場合があることが分かる。この場合，シートを梱包したり運搬するなどの際に，環境ホルモンが付着したことも考えられる。しかし，濃度が極端に大きな値となる場合がある。また，各試験ではシートの異なる部分を試験片として用いている。したがって，シート全面的に比較的高濃度で付着するということを，梱包，運搬時の付着だけで説明するのはやや難しいと思われる。このことは，さらに含有物溶出試験結果に着目するとさらに疑問が深まる。図－8.9に再度着目すると同じシートでも，表面付着と思われる(付着物溶出量≒含有量となる)物質とそれより溶出しにくい(付着物溶出量のみが小さく含有物溶出量と含有量がほぼ同値となる)物質がある。このように溶出しやすさが大きく異なる物質は，シートへ含有形態（付着物であるか，構成材内に含まれているか)が違うためとも考えることができる。

以上のように，シートの原材料に含まれていない環境ホルモンが，シート製造後の梱包や運搬のみで付着したと断定するのはきわめて困難である。製造過程での混入も考える必要があることを指摘できる。

b）混入原因に関する調査例

混入した環境ホルモンはシートの製造に不必要であり，そのような物質は2.2.1⑸に示したように，極力排除すべきであろう。その対策を検討する場合，製造後での付着であるのか，それとも製造過程での混入であるのかをまずはっきりさせる必要がある。そこで，製法が異なる3種類のシート（ヘチマ－接着タイプ，編み物タイプ，織物タイプ)について，原材料とシート加工直後の環境ホルモンの含有量を測定し，製造過程における混入の程度を明らかにすることを試みた。その結果を以下にまとめて示す。

●ヘチマ－接着タイプシートの場合

このシートは塩化ビニリデンを主素材とする繊維状の構成材をラテックスと呼ばれる接着剤で結合して作成されたものである。工程の概略を図－8.10に示す。カールさせた繊維状の主素材がベルトコンベアの上に配置され，そこにラテックスを吹き付け乾燥，熱整形をしてシートが完成する。通常，図－8.10に示した加工装置は，原材料の成分が異なる多種多様な製品の製造に使われている。今回開発したシートもそれら製品の一種として製造されたものである。したがって，他製品の素材が加工装置に残留しており，それがシート作成時に混入したことが考えられる。

表－8.11(1)　含有量試験法の比較試験結果

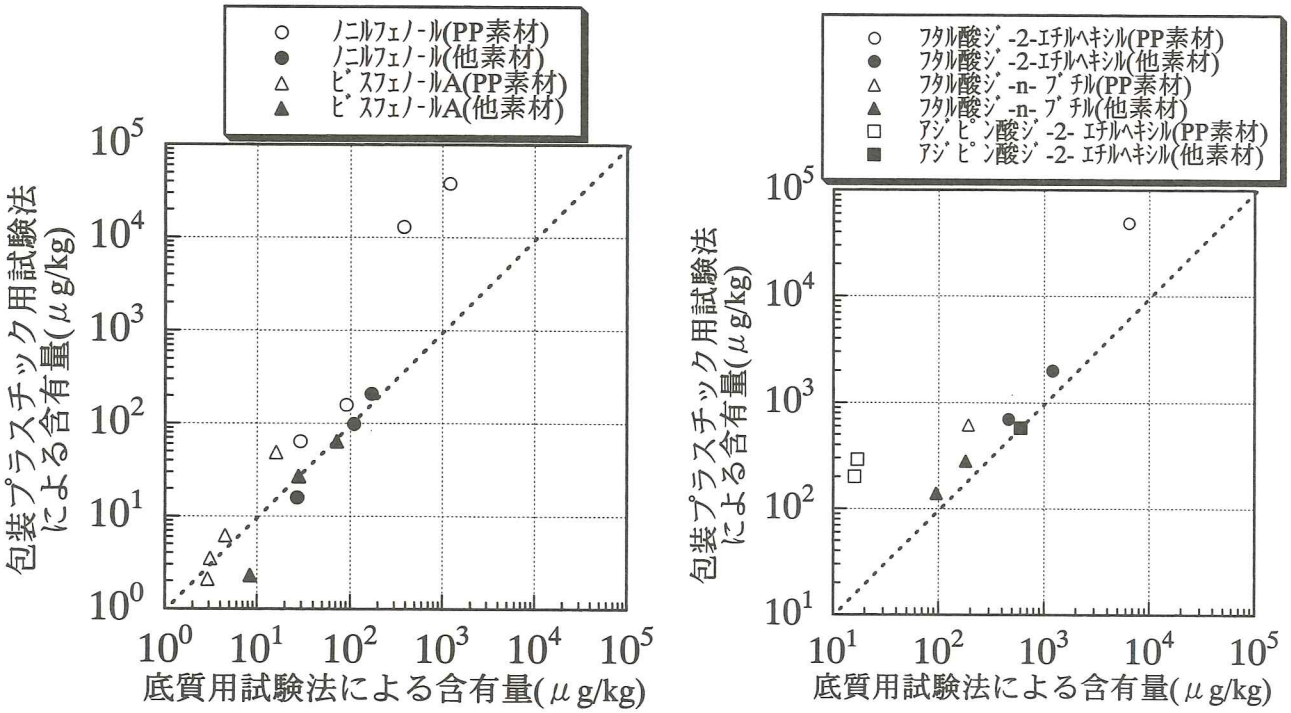
シート名	主素材	4-t-ｵｸﾁﾙﾌｪﾉｰﾙ			ﾉﾆﾙﾌｪﾉｰﾙ			ﾋﾞｽﾌｪﾉｰﾙA		
		底質用	ｿｯｸｽﾚｰ	包装ﾌﾟﾗ用	底質用	ｿｯｸｽﾚｰ	包装ﾌﾟﾗ用	底質用	ｿｯｸｽﾚｰ	包装ﾌﾟﾗ用
ブランク		ND	0.49	ND	9.1	2.7	9.3	0.75	0.78	0.94
B-A2	PVDC	3.7	3.2	3.1	92	110	180	27	40	26
C-3-6	PET	2.9	5.8	1.8	290	330	350	8.3	7.8	6.1
A-8-4	PP	11	1800	2600	300	2700	2300	3.7	2.2	2.7
D-3(2)		0.25	11	----	8.7	240	----	6	8.9	----

備考:　PVDC:塩化ビニリデン、PET:ポリエステル、PP:ポリプロピレン
単位(μg/kg)：シートの単位質量あたりの含有量
ND：検出下限値以下

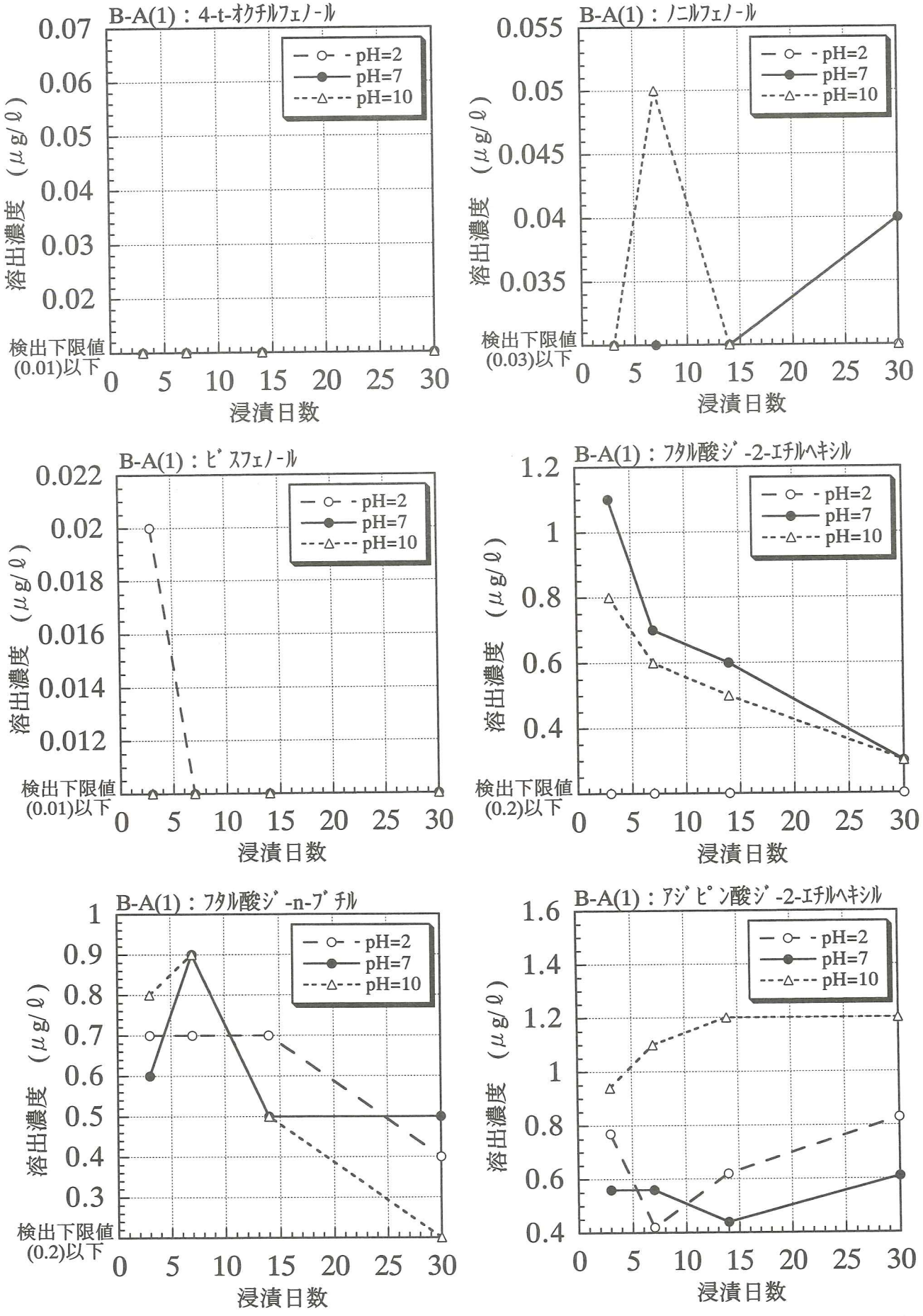
表－8.11(2)　含有量試験法の比較試験結果

シート名	主素材	4-n-ｵｸﾁﾙﾌｪﾉｰﾙ		4-t-ｵｸﾁﾙﾌｪﾉｰﾙ		ﾉﾆﾙﾌｪﾉｰﾙ		ﾋﾞｽﾌｪﾉｰﾙA		ﾌﾀﾙ酸ｼﾞ-2-ｴﾁﾙﾍｷｼﾙ		ﾌﾀﾙ酸ｼﾞ-n-ﾌﾞﾁﾙ		ﾌﾀﾙ酸ﾌﾞﾁﾙﾍﾞﾝｼﾞﾙ		ｱｼﾞﾋﾟﾝ酸ｼﾞ-2-ｴﾁﾙﾍｷｼﾙ	
試験法		底質用	包装用	底質用	包装用	底質用	包装用	底質用	包装用	底質用	包装用	底質用	包装用	底質用	包装用	底質用	包装用
A-4-3F	ポリプロピレンを主素材とする	ND	ND	ND	15	1200	38000	4.5	6.2	----	----	----	----	----	----	----	----
A-4-5F		ND	ND	ND	ND	380	13000	3.1	3.5	----	----	----	----	----	----	----	----
D-1-F		ND	ND	ND	ND	90	160	16	49	6400	49000	190	620	ND	ND	----	----
D-3-F		ND	ND	ND	ND	29	64	2.9	2.1	----	----	----	----	----	----	17	290
A-8-F		----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	16	200
B-F	しない	ND	ND	ND	ND	170	210	28	27	1200	2000	180	280	ND	ND	----	----
C-1-F		ND	ND	ND	ND	110	99	72	64	----	----	----	----	----	----	600	580
C-3-F		ND	ND	ND	ND	27	16	8.4	2.3	460	700	95	140	ND	ND	----	----

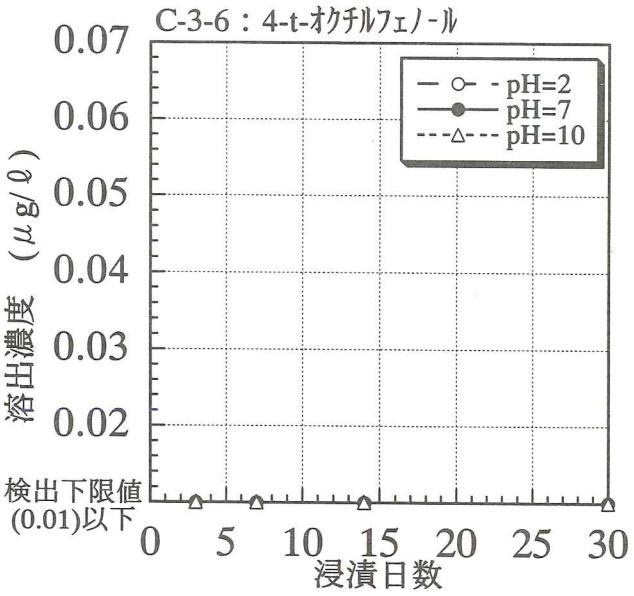
備考:　単位(μg/kg)：シートの単位質量あたりの含有量
ND：検出下限値以下

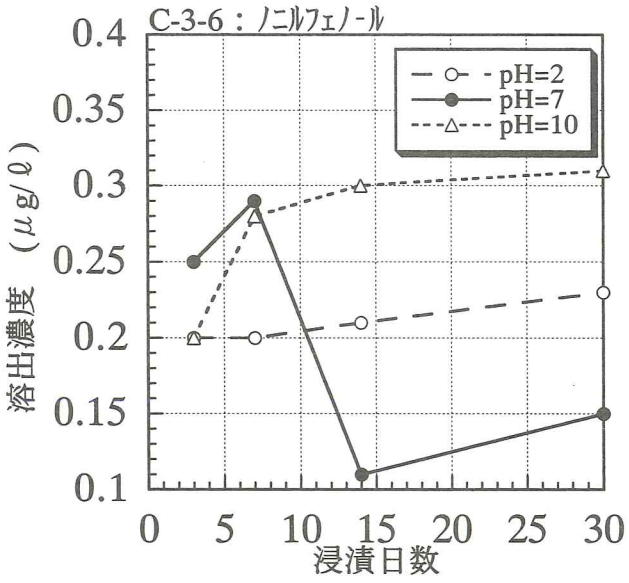


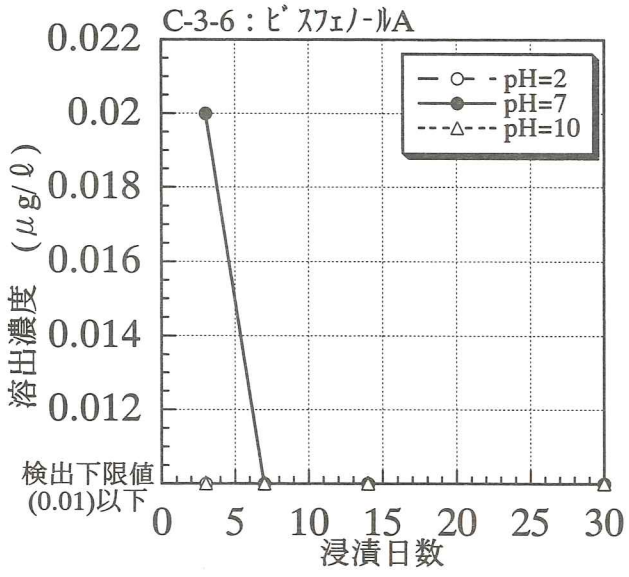
図－8.7　底質用試験法と包装プラスチック用試験法の溶出量の比較

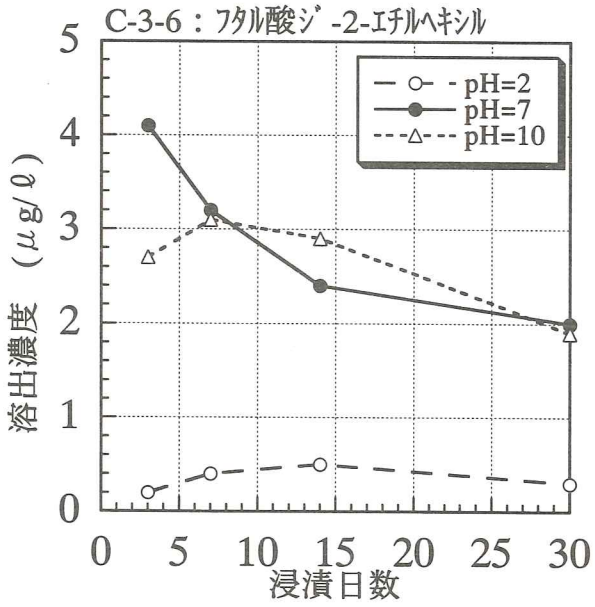


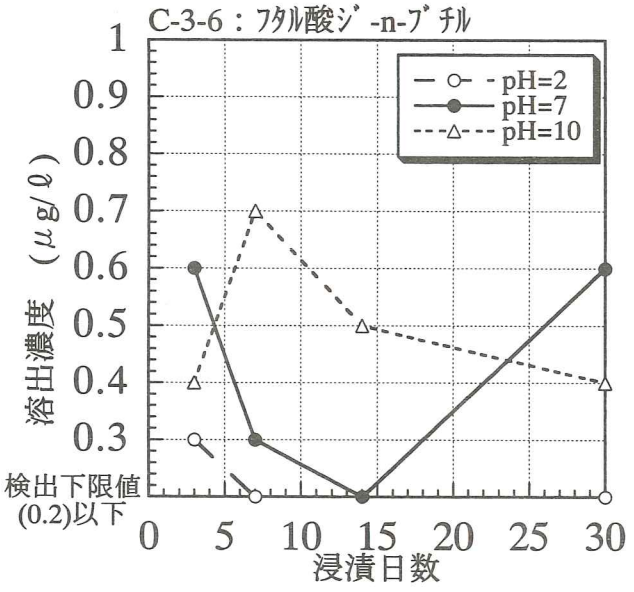
図－8.8(1)　浸漬時間と溶出量の関係



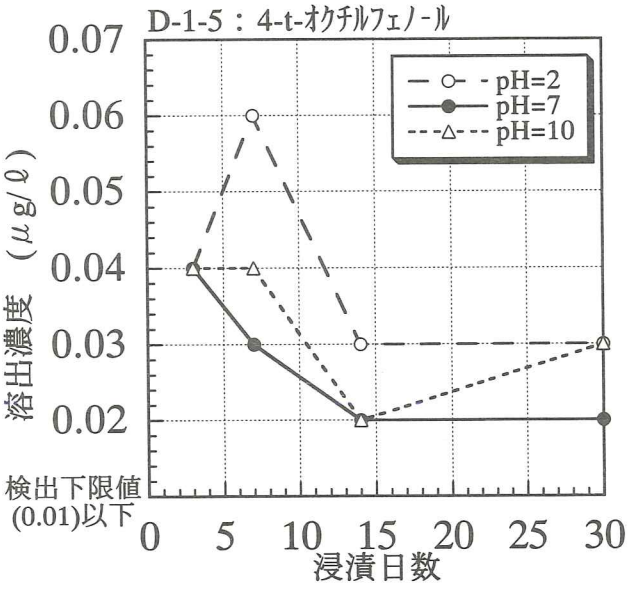


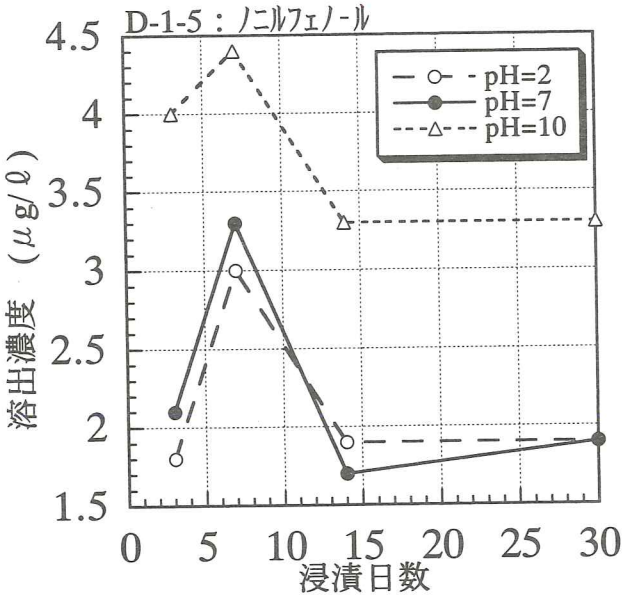


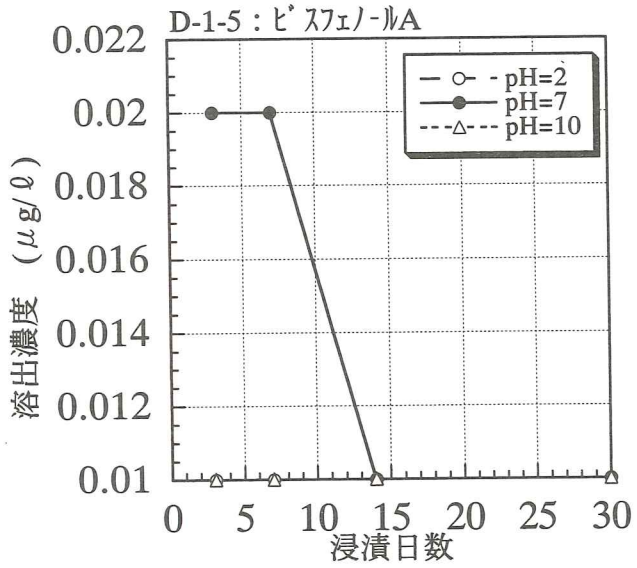


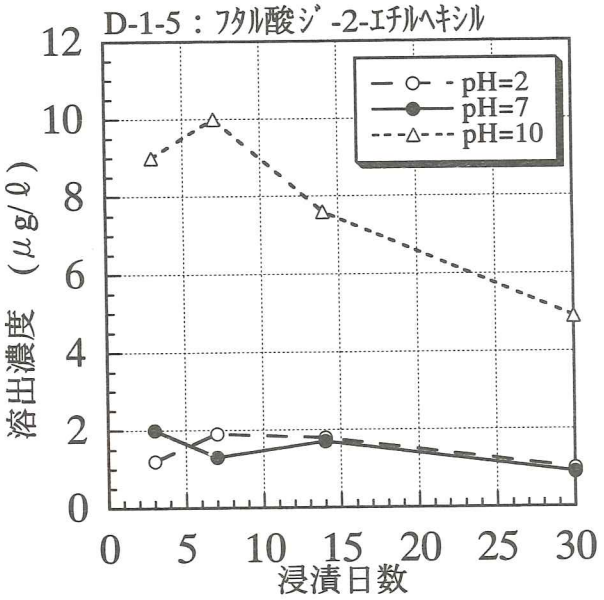


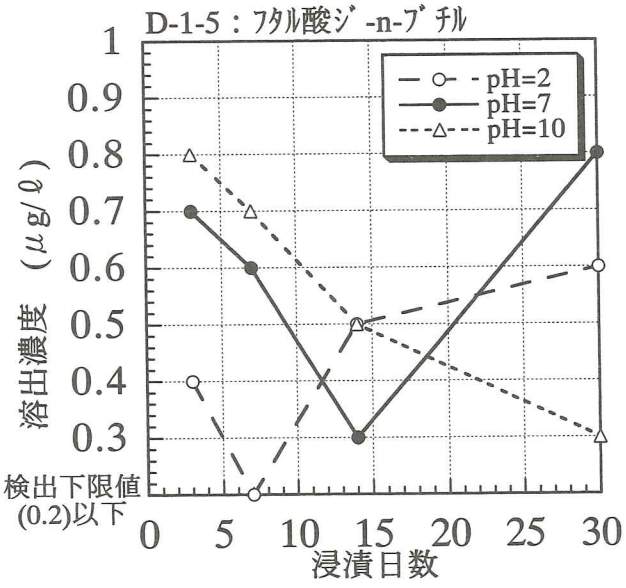
図－8.8(2)　浸漬時間と溶出量の関係











図－8.8(3)　浸漬時間と溶出量の関係

表－8.12(1)　環境ホルモンの含有量および溶出量の測定結果と原材料での使用の有無に関する調査結果

●含有量試験

シートの世代	タイプ	シート名	4-n-ｵｸﾁﾙﾌｪﾉｰﾙ	4-t-ｵｸﾁﾙﾌｪﾉｰﾙ	ﾉﾆﾙﾌｪﾉｰﾙ	ﾋﾞｽﾌｪﾉｰﾙA	ﾌﾀﾙ酸ｼﾞ-2-ｴﾁﾙﾍｷｼﾙ	ﾌﾀﾙ酸ｼﾞ-n-ﾌﾞﾁﾙ	ﾌﾀﾙ酸ﾌﾞﾁﾙﾍﾞﾝｼﾞﾙ	ｱｼﾞﾋﾟﾝ酸ｼﾞ-2-ｴﾁﾙﾍｷｼﾙ	環境ホルモン使用に関する事前調査
第2次	下限値		5	5	15	1.0	250	250	10	10	----------
	ブランク		ND	ND	9.1	0.75	511	82	ND	12	
	ヘチマ	A-1(A)	ND	(0.44)	(11)	1.4	(48)	(72)	ND	(32)	なし
		A-2(改)	ND	(0.46)	(9.3)	1.6	(240)	(30)	ND	(21)	なし
		A-3-5	ND	(0.42)	78	3.2	t.r	(42)	ND	(14)	ﾌﾀﾙ酸ｴｽﾃﾙ(3.8ppm)
		A-6	ND	(0.31)	220	1.6	(100)	(170)	ND	(50)	ﾌﾀﾙ酸ｴｽﾃﾙ(極微量)
		B-A2	ND	(3.7)	92	27	6200	3200	ND	2200	なし
	ネット	A-4-4a	ND	(0.25)	(8.3)	2.4	t.r	(120)	ND	(61)	ﾌﾀﾙ酸ｼﾞ-2-ｴﾁﾙﾍｷｼﾙ(1ppm以下)
		A-8-4	ND	(0.25)	(8.7)	6	t.r	460	ND	(24)	なし
	編み物	C-1(改)	ND	96	3700	7.5	10000	1700	ND	(60)	なし
		C-3-6	ND	(2.9)	290	8.3	11000	1500	ND	(26)	なし
	織物	D-1-5	ND	19	2400	5.1	3800	530	ND	(32)	ﾉﾆﾙﾌｪﾉｰﾙ(150μg/kg)
		D-3(2)	ND	11	300	3.7	2500	900	ND	(38)	なし
第3次	下限値		5	5	15	1.0	10	10	10	10	----------
	ブランク		ND	ND	7.5	0.85	9.2	20	ND	13	
	ヘチマ	A-1-F	ND	ND	58	1.4	2500	500	ND	41	なし
		A-2-F	ND	ND	ND	ND	420	10	ND	11	不明
		A-3-F	ND	ND	110	1.6	800	750	ND	64	ﾌﾀﾙ酸ｴｽﾃﾙ(3.8ppm)
		B-F	ND	ND	210	27	2000	280	ND	3800	なし
	ネット	A-4-3F	ND	17	35000	6	960	740	ND	140	ﾌﾀﾙ酸ｼﾞ-2-ｴﾁﾙﾍｷｼﾙ(1ppm以下)
		A-4-5F	ND	ND	13000	3.5	340	390	ND	62	
		A-8-F	ND	ND	80	7.0	550	2500	ND	200	
	編み物	C-1-F	ND	ND	99	64	2500	480	ND	580	なし
		C-3-F	ND	ND	16	2.3	700	140	ND	41	不明
	織物	D-1-F	ND	ND	160	49	49000	620	ND	68	ﾉﾆﾙﾌｪﾉｰﾙ(150μg/kg)
		D-3-F	ND	ND	64	2.1	1300	640	ND	290	なし

備考1:　単位(μg/kg)：シートの単位質量あたりの含有量

備考2:　ND：検出下限値以下

t.r：ブランクより小さい値となった

()：検出下限値以下であったが、値が測定された場合(その値を括弧内に示した)

備考3:　第2次は底質用試験法、第3次は包装プラスチック用試験法によって試験を行った。

表－8.12(2)　環境ホルモンの含有量および溶出量の測定結果と原材料での使用の有無に関する調査結果

●付着量試験

シートの世代	タイプ	シート名	4-t-ｵｸﾁﾙﾌｪﾉｰﾙ	ﾉﾆﾙﾌｪﾉｰﾙ	ﾋﾞｽﾌｪﾉｰﾙA	ﾌﾀﾙ酸ｼﾞ-2-ｴﾁﾙﾍｷｼﾙ	ﾌﾀﾙ酸ｼﾞ-n-ﾌﾞﾁﾙ	ｱｼﾞﾋﾟﾝ酸ｼﾞ-2-ｴﾁﾙﾍｷｼﾙ
第2次	ヘチマ	A-3-5	ND (0)	2.8 (4)	1 (31)	68 (27*)	24 (57)	0.1 (1)
		A-6	ND (0)	3 (1)	0.9 (56)	68 (65)	55 (12)	0.2 (0)
		B-A2	ND (0)	0.9 (1)	0.3 (1)	52 (1)	78 (2)	1.8 (0)
	ネット	A-8-2	ND (0)	1.2 (14)	0.9 (15)	120 (48*)	210 (7)	1.2 (5)
	編み物	C-1(改)	ND (0)	2.4 (0)	0.1 (1)	36 (4)	50 (3)	ND (0)
		C-3-6	2.5 (86)	210 (72)	2 (24)	2000 (18)	66 (4)	ND (0)
	織物	D-1-5	ND (8)	130 (5)	0.9 (18)	1300 (34)	550 (104)	10 (31)
		D-3(2)	0.33 (3)	7.9 (3)	0.7 (19)	80 (3)	28 (3)	ND (0)
第3次	ヘチマ	A-1-F	- (-)	ND (0)	0 (0)	ND (0)	ND (0)	25 (62)
		A-2-F	- (-)	- (-)	- (-)	20 (5)	20 (172)	ND (0)
		A-3-F	- (-)	ND (0)	0 (0)	40 (5)	20 (3)	9 (13)
		B-F	- (-)	ND (0)	0 (0)	ND (0)	ND (0)	6 (0)
	ネット	A-4-3F	0 (0)	8 (0)	2 (36)	20 (2)	10 (2)	ND (0)
		A-4-5F	- (-)	ND (0)	0 (0)	20 (5)	10 (3)	12 (20)
		A-8-F	- (-)	ND (0)	3 (48)	20 (3)	30 (1)	6 (3)
	編み物	C-1-F	- (-)	ND (0)	0 (0)	50 (2)	ND (0)	3 (0)
		C-3-F	- (-)	ND (0)	2 (95)	20 (3)	40 (28)	22 (54)
	織物	D-1-F	- (-)	ND (0)	2 (5)	190 (0)	50 (8)	7 (11)
		D-3-F	- (-)	ND (0)	4 (201)	40 (3)	20 (4)	4 (1)

備考1: 単位(μg/kg)：シートの単位質量あたりからの溶出量、括弧内の数値は溶出率(%)(溶出量/含有量×100)

備考2: ND：検出下限値以下

*：含有量がt.rの場合、含有量を250(μg/kg)（検出下限値)と仮定して算出した。

表－8.12(3)　環境ホルモンの含有量および溶出量の測定結果と原材料での使用の有無に関する調査結果

●pH=2溶出量試験

シートの世代	タイプ	シート名	4-t-ｵｸﾁﾙﾌｪﾉｰﾙ	ﾉﾆﾙﾌｪﾉｰﾙ	ﾋﾞｽﾌｪﾉｰﾙA	ﾌﾀﾙ酸ｼﾞ-2-ｴﾁﾙﾍｷｼﾙ	ﾌﾀﾙ酸ｼﾞ-n-ﾌﾞﾁﾙ	ｱｼﾞﾋﾟﾝ酸ｼﾞ-2-ｴﾁﾙﾍｷｼﾙ
第2次	ヘチマ	A-3-5	ND (0)	74 (95)	4 (125)	- (-)	- (-)	- (-)
		A-6	ND (0)	180 (82)	2 (125)	- (-)	- (-)	- (-)
		B-A2	ND (0)	ND (0)	3 (11)	ND (0)	350 (11)	210 (10)
	ネット	A-8-2	- (-)	- (-)	- (-)	320 (128*)	110 (3)	- (-)
	編み物	C-1(改)	ND (0)	160 (4)	2 (27)	ND (0)	2000 (119)	- (-)
		C-3-6	ND (0)	180 (62)	12 (145)	160 (1)	150 (10)	- (-)
	織物	D-1-5	6 (32)	860 (36)	2 (39)	130 (3)	350 (66)	- (-)
		D-3(2)	ND (0)	ND (0)	2 (54)	ND (0)	610 (67)	- (-)
第3次	ヘチマ	A-1-F	- (-)	ND (0)	ND (0)	100 (4)	210 (42)	60 (146)
		A-2-F	- (-)	- (-)	- (-)	ND (0)	ND (0)	10 (91)
		A-3-F	- (-)	ND (0)	ND (0)	100 (13)	170 (22)	15 (23)
		B-F	- (-)	ND (0)	5 (19)	50 (3)	40 (13)	85 (2)
	ネット	A-4-3F	0 (0)	140.00 (0)	ND (0)	ND (0)	70 (9)	30 (21)
		A-4-5F	- (-)	80.00 (1)	ND (0)	190 (56)	80 (21)	10 (16)
		A-8-F	- (-)	ND (0)	5 (71)	20 (4)	550 (22)	25 (13)
	編み物	C-1-F	- (-)	ND (0)	5 (8)	550 (22)	170 (34)	5 (1)
		C-3-F	- (-)	ND (0)	5 (217)	120 (17)	100 (71)	5 (13)
	織物	D-1-F	- (-)	ND (0)	5 (10)	300 (1)	340 (54)	5 (7)
		D-3-F	- (-)	ND (0)	5 (238)	20 (1)	130 (22)	5 (2)

備考1: 単位(μg/kg)：シートの単位質量あたりからの溶出量、括弧内の数値は溶出率(%)(溶出量/含有量×100)

備考2: ND：検出下限値以下

*：含有量がt.rの場合、含有量を250(μg/kg)（検出下限値)と仮定して算出した。

表－8.12(4)　環境ホルモンの含有量および溶出量の測定結果と原材料での使用の有無に関する調査結果

●pH=7溶出量試験

シートの世代	タイプ	シート名	4-t-ｵｸﾁﾙﾌｪﾉｰﾙ	ﾉﾆﾙﾌｪﾉｰﾙ	ﾋﾞｽﾌｪﾉｰﾙA	ﾌﾀﾙ酸ｼﾞ-2-ｴﾁﾙﾍｷｼﾙ	ﾌﾀﾙ酸ｼﾞ-n-ﾌﾞﾁﾙ	ｱｼﾞﾋﾟﾝ酸ｼﾞ-2-ｴﾁﾙﾍｷｼﾙ
第2次	ヘチマ	A-3-5	ND (0)	88 (113)	ND (0)	- (-)	- (-)	- (-)
		A-6	ND (0)	180 (82)	6 (375)	- (-)	- (-)	- (-)
		B-A2	ND (0)	ND (0)	ND (0)	210 (3)	250 (8)	280 (13)
	ネット	A-8-2	- (-)	- (-)	- (-)	ND (0)	85 (3)	- (-)
	編み物	C-1(改)	ND (0)	160 (4)	ND (0)	ND (0)	1600 (97)	- (-)
		C-3-6	ND (0)	140 (47)	1 (12)	740 (7)	170 (11)	- (-)
	織物	D-1-5	6 (32)	1000 (42)	ND (0)	640 (17)	300 (57)	- (-)
		D-3(2)	10 (91)	43 (14)	ND (0)	ND (0)	560 (62)	- (-)
第3次	ヘチマ	A-1-F	- (-)	ND (0)	ND (0)	ND (0)	110 (22)	25 (61)
		A-2-F	- (-)	- (-)	- (-)	ND (0)	ND (0)	10 (91)
		A-3-F	- (-)	ND (0)	5 (313)	280 (35)	270 (35)	5 (8)
		B-F	- (-)	ND (0)	5 (19)	160 (8)	150 (52)	45 (1)
	ネット	A-4-3F	15 (100)	180 (0)	ND (0)	150 (15)	180 (24)	5 (4)
		A-4-5F	- (-)	60 (0)	ND (0)	160 (46)	150 (37)	30 (47)
		A-8-F	- (-)	ND (0)	5 (71)	ND (0)	320 (13)	30 (15)
	編み物	C-1-F	- (-)	ND (0)	5 (8)	270 (11)	210 (43)	15 (3)
		C-3-F	- (-)	ND (0)	5 (217)	170 (24)	110 (79)	5 (13)
	織物	D-1-F	- (-)	ND (0)	10 (20)	350 (1)	410 (66)	5 (7)
		D-3-F	- (-)	ND (0)	5 (238)	20 (1)	140 (23)	15 (5)

備考1:　単位(μg/kg)：シートの単位質量あたりからの溶出量、括弧内の数値は溶出率(%)(溶出量/含有量×100)

備考2:　ND：検出下限値以下

表－8.12(5)　環境ホルモンの含有量および溶出量の測定結果と原材料での使用の有無に関する調査結果

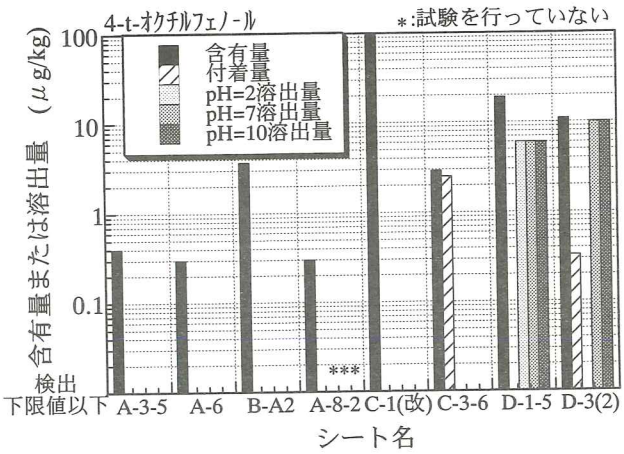
●pH=10溶出量試験

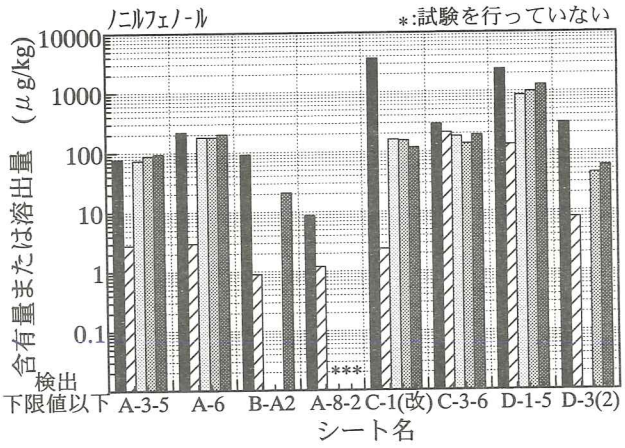
シートの世代	タイプ	シート名	4-t-ｵｸﾁﾙﾌｪﾉｰﾙ	ﾉﾆﾙﾌｪﾉｰﾙ	ﾋﾞｽﾌｪﾉｰﾙA	ﾌﾀﾙ酸ｼﾞ-2-ｴﾁﾙﾍｷｼﾙ	ﾌﾀﾙ酸ｼﾞ-n-ﾌﾞﾁﾙ	ｱｼﾞﾋﾟﾝ酸ｼﾞ-2-ｴﾁﾙﾍｷｼﾙ
第2次	ヘチマ	A-3-5	ND (0)	95 (121)	2 (63)	- (-)	- (-)	- (-)
		A-6	ND (0)	200 (91)	ND (0)	- (-)	- (-)	- (-)
		B-A2	ND (0)	21 (23)	ND (0)	240 (4)	290 (9)	550 (25)
	ネット	A-8-2	- (-)	- (-)	- (-)	460 (184*)	130 (4)	- (-)
	編み物	C-1(改)	ND (0)	120 (3)	1 (13)	ND (0)	1300 (78)	- (-)
		C-3-6	ND (0)	190 (65)	4 (48)	990 (9)	260 (17)	- (-)
	織物	D-1-5	6 (32)	1300 (54)	1 (20)	3400 (89)	420 (79)	- (-)
		D-3(2)	10 (91)	58 (19)	1 (27)	ND (0)	590 (65)	- (-)
第3次	ヘチマ	A-1-F	- (-)	ND (0)	ND (0)	ND (0)	370 (73)	25 (61)
		A-2-F	- (-)	- (-)	- (-)	130 (30)	20 (200)	ND (0)
		A-3-F	- (-)	ND (0)	ND (0)	30 (3)	210 (27)	ND (0)
		B-F	- (-)	ND (0)	5 (19)	90 (5)	100 (34)	25 (1)
	ネット	A-4-3F	20 (133)	180 (0)	5 (81)	ND (0)	240 (32)	10 (7)
		A-4-5F	- (-)	80 (1)	ND (0)	130 (38)	90 (23)	70 (109)
		A-8-F	- (-)	ND (0)	5 (71)	160 (28)	800 (32)	80 (40)
	編み物	C-1-F	- (-)	ND (0)	5 (8)	350 (14)	110 (23)	15 (3)
		C-3-F	- (-)	ND (0)	5 (217)	60 (9)	150 (107)	10 (25)
	織物	D-1-F	- (-)	ND (0)	5 (10)	880 (2)	530 (85)	ND (0)
		D-3-F	- (-)	ND (0)	5 (238)	210 (17)	290 (48)	5 (2)

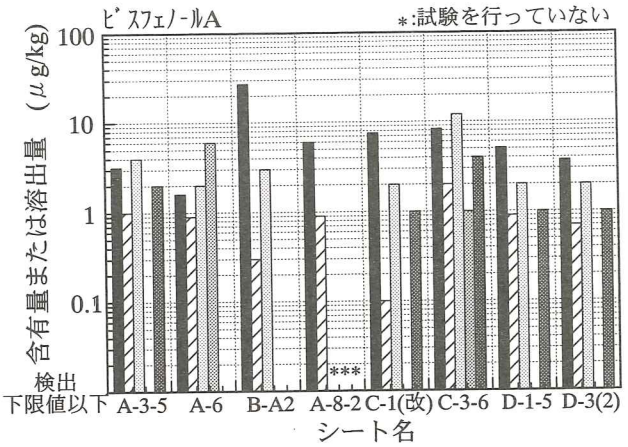
備考1: 単位(μg/kg)：シートの単位質量あたりからの溶出量、括弧内の数値は溶出率(%)(溶出量/含有量×100)

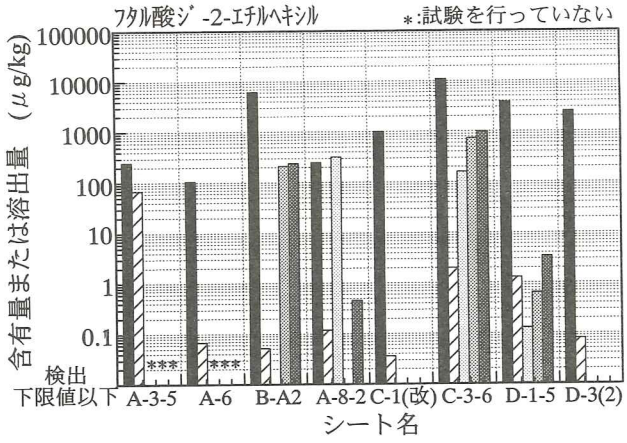
備考2: ND：検出下限値以下

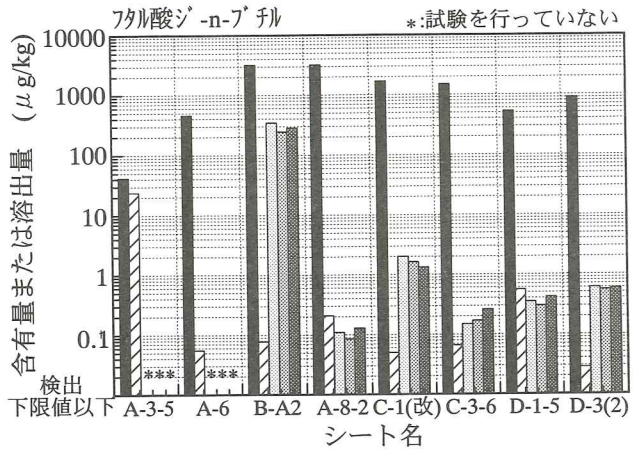
*：含有量がt.rの場合、含有量を250(μg/kg)（検出下限値)と仮定して算出した。

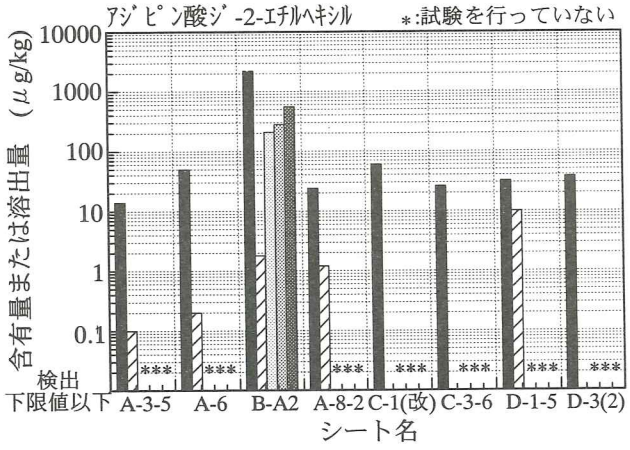




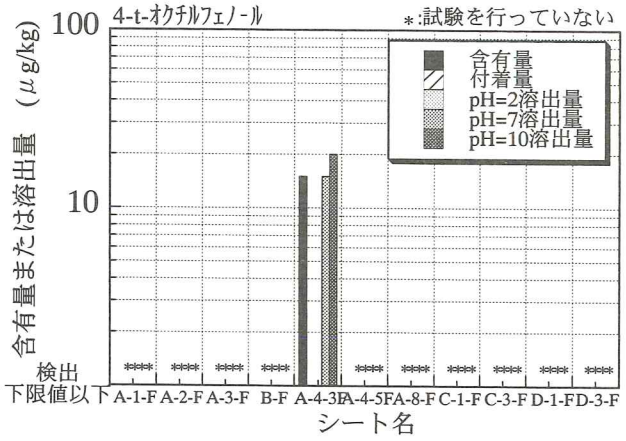


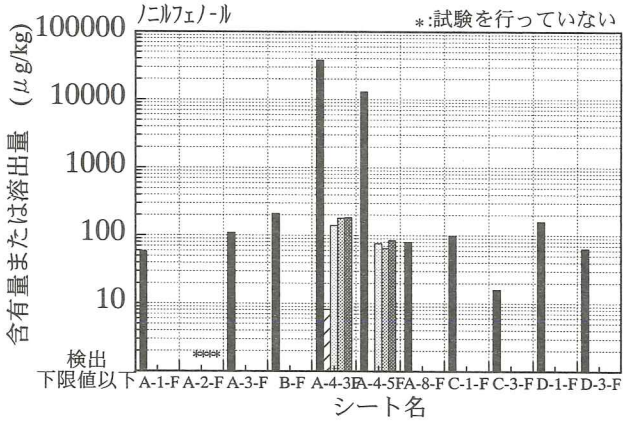


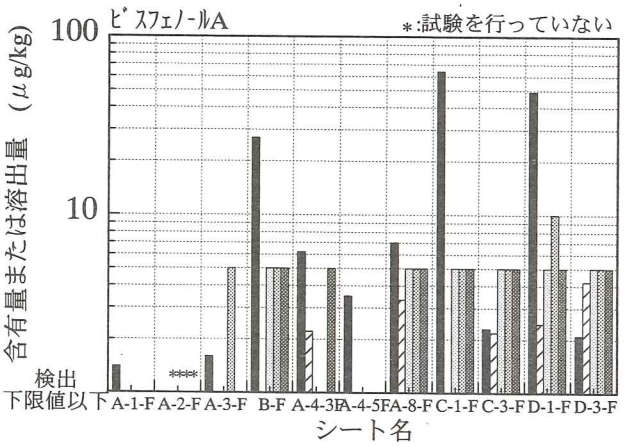


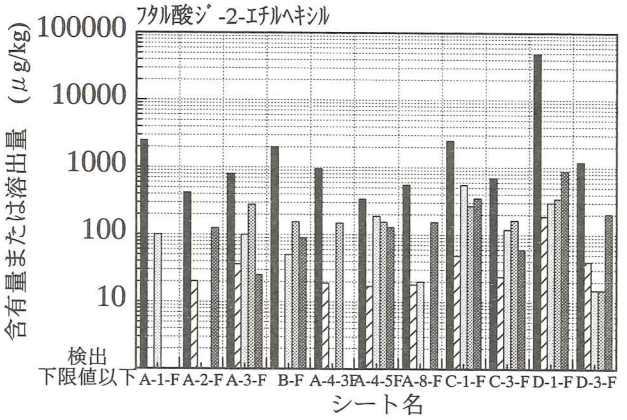


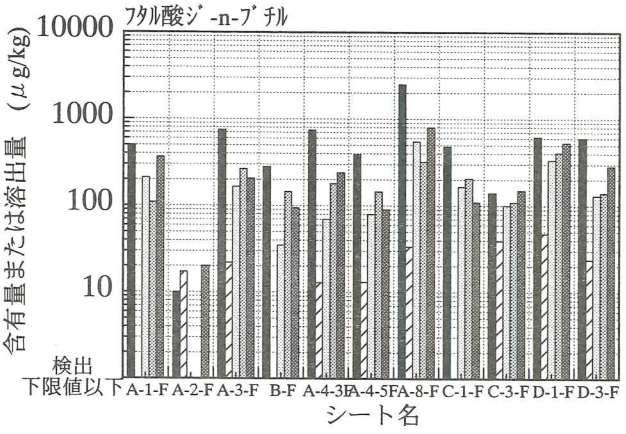
図－8.9(1)　含有量と溶出量の比較

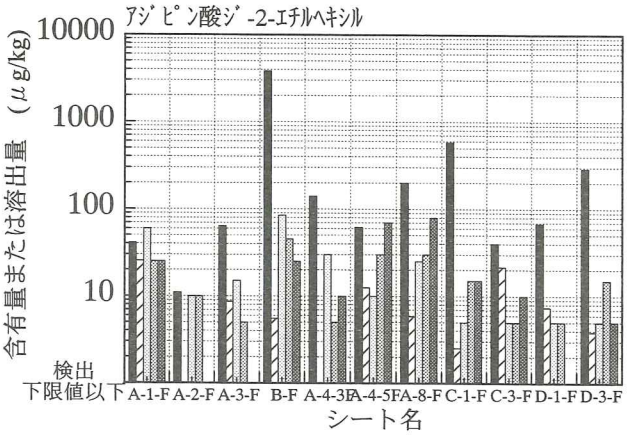




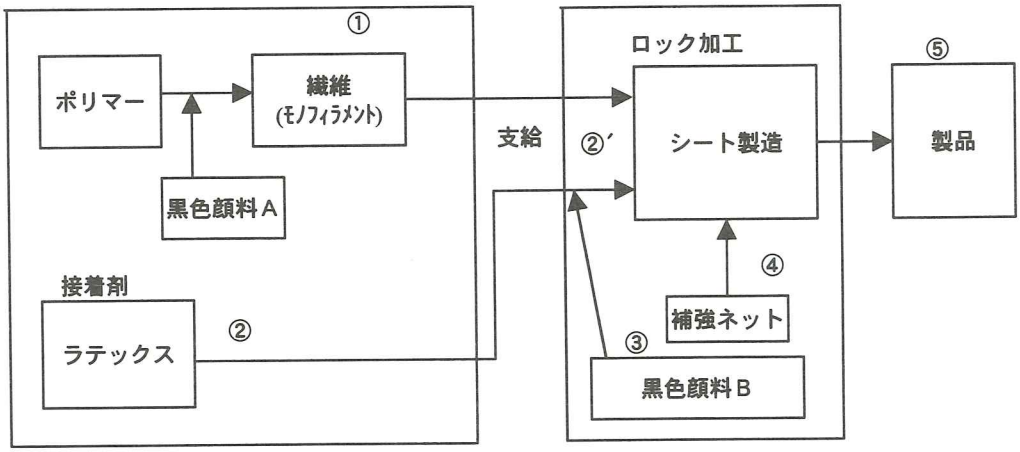




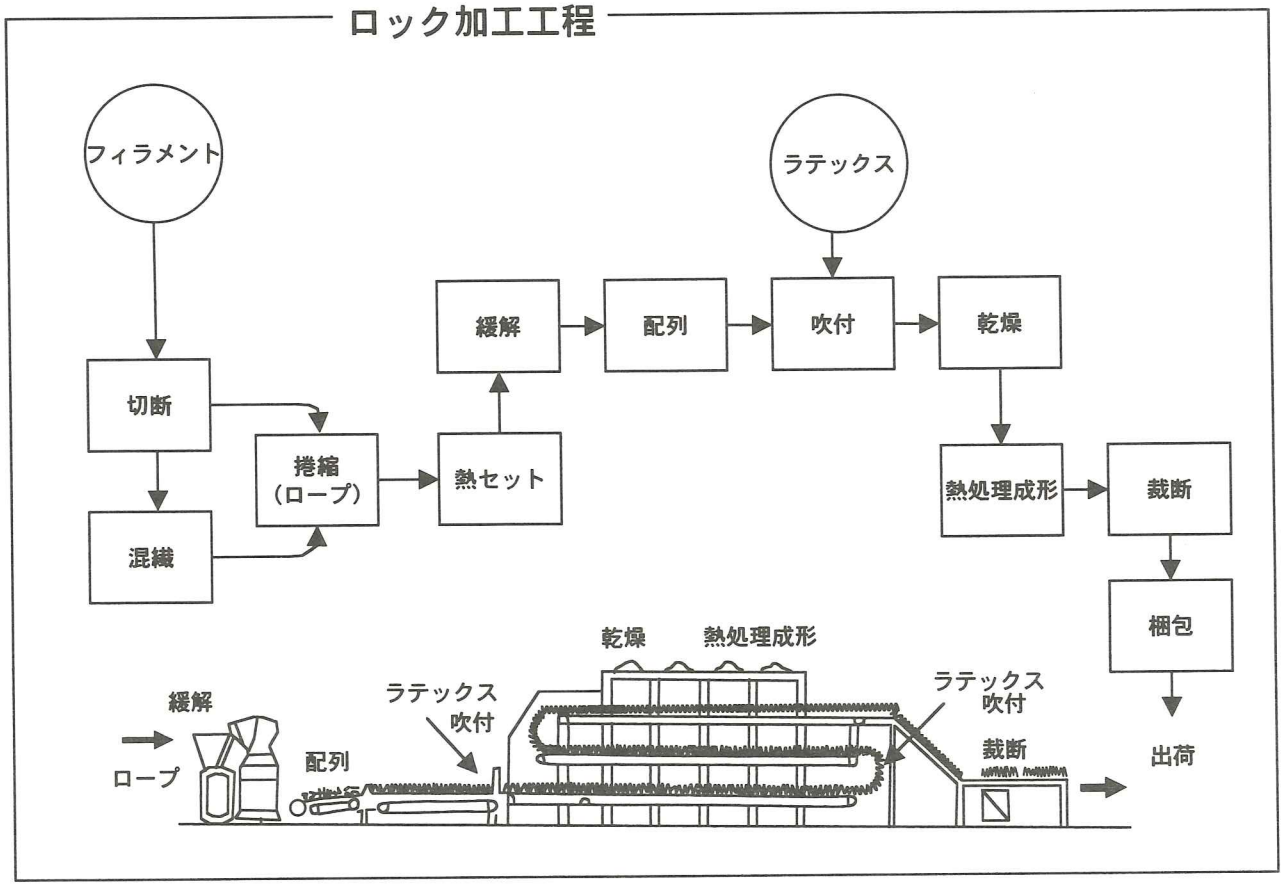




図－8.9(2)　含有量と溶出量の比較



図中の丸囲み数字の工程で含有量調査を実施した



図－8.10　ヘチマー接着タイプシートの加工装置および加工過程

ヘチマー接着タイプシートは第２次と第３次のプロトタイプの原材料および加工に用いた装置は全く同一である。表－8.12に示した第２次と第３次のプロトタイプの含有量を比較すると，フタル酸類の２種(ジ－２－エチルヘキシル，ジ－ｎ－ブチル)とアジピン酸(ジ－２－エチルヘキシル)がいずれでも特に多く(1000(μg/kg)のオーダーで)含有されている。また，第３次シートを新品(他の製品を加工したことがない）の加工装置で製作した場合と，ハンドメイドによって作成した場合について，上記３物質について含有量試験を行って結果を表－8.13に示す。フタル酸ジ－ｎ－ブチル以外の２物質は，含有量が１桁小さい

表－8.13　新品の加工装置およびハンドメイドで作成した第3次ヘチマー接着タイプシートの環境ホルモン含有量

工程No.	試料名	ﾌﾀﾙ酸ｼﾞ-2-ｴﾁﾙﾍｷｼﾙ	ﾌﾀﾙ酸ｼﾞ-n-ﾌﾞﾁﾙ	ｱｼﾞﾋﾟﾝ酸ｼﾞ-2-ｴﾁﾙﾍｷｼﾙ	ﾋﾞｽﾌｪﾉｰﾙA
①	繊維	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
②	ラテックス	----	<100	----	----
②'	黒色顔料B+ラテックス	<100	2600	<100	----
③	黒色顔料B	----	950	----	----
④	補強ネット	<100	<100	<100	----
⑤	シート	<100	1900	470	----
----	シート(ハンドメイド)	<100	2700	<100	----

備考1:　単位(μg/kg)：シートの単位質量あたりの含有量
備考2:　＜：検出下限値(<の後の数字)以下
備考3:　底質用試験法によって測定した

100(μg/kg)のオーダー以下まで減少した結果となった。また，減少が認められないフタル酸ジ－ｎ－ブチルは表－8.13に測定結果を併記したようにラテックス(正確には着色に使用した黒色顔料Ｂ)に含有されていたため，シートの原材料にもともと含有されていたことが判明した。以上の結果より，フタル酸ジ－２－エチルヘキシルとアジピン酸ジ－２－エチルヘキシルは，シートを加工する工程で混入したことが明らかとなった。また，混入防止対策としてシート専用の加工装置を用いれば良いことも明らかとなった。

●編み物タイプシート(Ｃ－３シリーズ)の場合

このシートはポリエステルを主素材とする繊維を写真－2.1に示したようにシート表面がハニカム形状になるように編み，更に熱を加えてハニカムを広げた状態で固定する(熱セットと呼ぶ)ことで作成されたものである。このシート場合も，加工装置がシート以外の他製品の製造に使われており，ヘチマー接着タイプシートと同様な原因での環境ホルモンの混入が考えられる。

編み物タイプシートは第２次と第３次のプロトタイプの原材料は同一であるが，第３次では熱セットに用いた装置の洗浄を行っている点が異なる。表－8.12に示した編み物タイプシートの第２次と第３次のプロトタイプの含有量を比較すると，第２次ではフタル酸ジ－２－エチルヘキシルとフタル酸ジ－ｎ－ブチルが１ppm (1000 (μg/kg)) を越える高濃度で含有されいるが，第３次では１オーダー以上も含有量が小さくなっている。ノニルフェノールでも同様な減少傾向が認められる。このような含有量減少が行えたのは，熱セットを行う装置内の洗浄によって，上記の物質の混入が防止できたためと考えられる。

熱セット装置内で環境ホルモンが混入した原因について以下のような調査を行った。熱セットを行う装置には，高温になった装置内の空気を排出する排気装置が設置されている。その排気ダクトに熱セット装置の潤滑油が付着していた。これはシートを加熱するための熱で，潤滑油が気化したためである。この付着した潤滑油の成分を分析した結果を表－8.14に示すが，編み物タイプシートに高い濃度で混入していた上記２種類のフタル酸が多く混入していることがわかる。なお，付着物溶出試験結果によると，上記２種類のフタル酸は表面付着であることが分かっている（図－8.9参照)。以上の結果より，この潤滑油がシートを熱セットする際に気化するなどしてシートに混入したと推定される(混入経路は依然不明である)。

表－8.14　熱セット装置の排気ダクトに付着していた潤滑油の成分分析結果

物質名	組成率(%)
鉱物油	98.5
フタル酸エステル類 フタル酸ジ-2-エチルヘキシル フタル酸ジ-n-ブチル	1.0
アジピン酸エステル類	0.3
フェノール類 オクチルフェノール類 ノニルフェノール類	0.1
ビスフェノールA	0.1

潤滑油にフタル酸類をはじめとする環境ホルモン物質が混入したのは，他製品の熱セットを行う際に，その製品から気化して排出されたためと考えられる。特に，シートを加工した熱セット装置には塩化ビニル樹脂を主成分とする製品の加工を行っている。そのような製品には，上記２種のフタル酸類をはじめ，アジピン酸エステル類，フェノール類が可塑剤として，またビスフェノールＡは添加剤として用いられることがあることがわかった。なお，表－8.14に示した潤滑油の成分分析は，塩化ビニルを主成分とする製品の加工を行った直後のダクト付着油分を分析対象としたものである。以上から主に塩化ビニル製の製品から上記の物質が排出された結果として，潤滑油に混入したと考えられる。

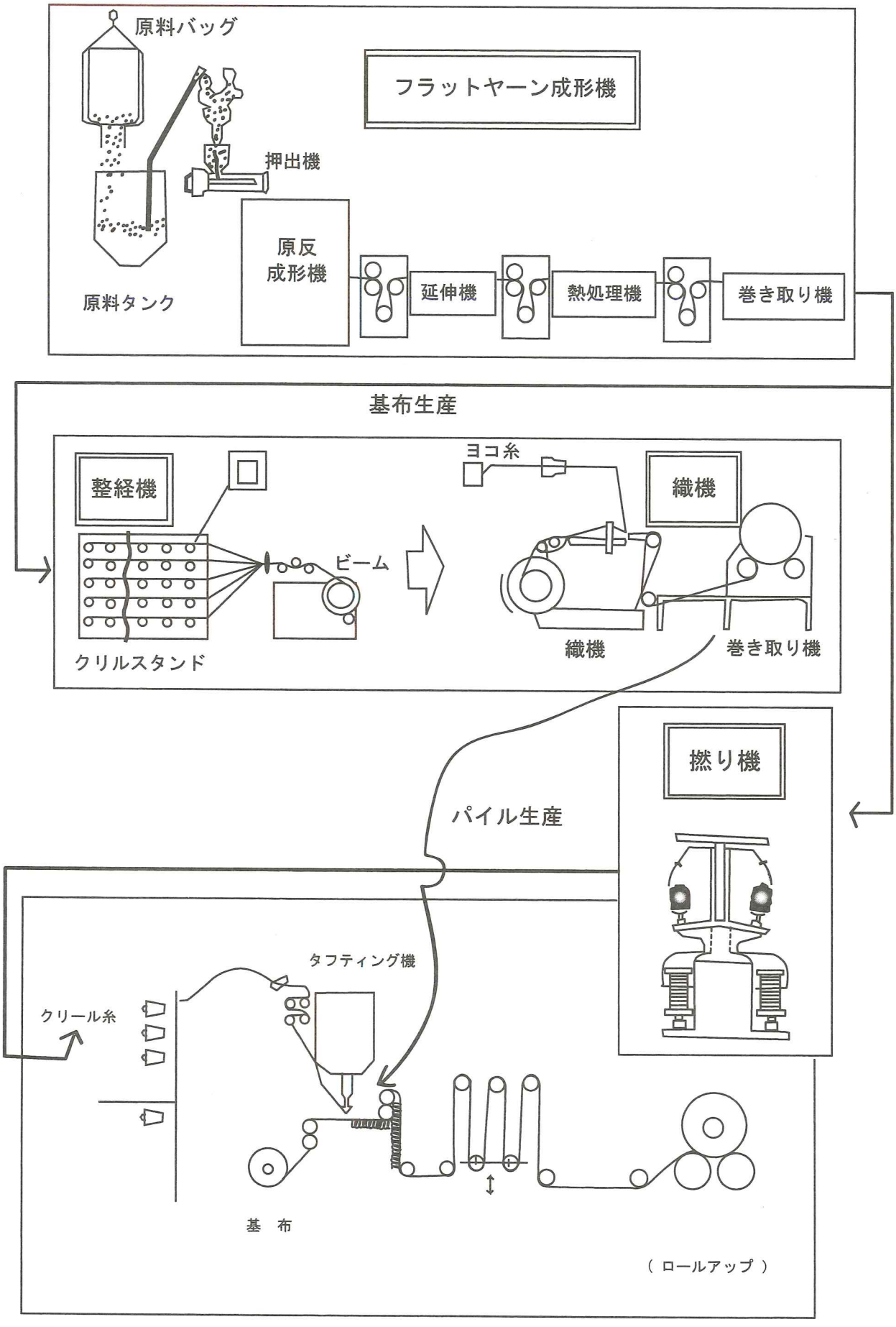
以上の結果より，高濃度でシートに含有していたフタル酸類は熱セット加工工程でシート混入したことが明らかとなった。また，混入防止対策として熱セット加工装置の洗浄を行えば良いことも明らかとなった。

●織物シート(D－３シリーズ)の場合

このシートはポリエチレンを主素材とする織物(基布)に，ポリプロピレンを主素材とするテープ材を編み込んで写真－2.1に示すようなパイル地に作成したものである。このシートの製作工程は，図－8.11に示すように原材料から基布およびテープ材を製作するまでの工程Ⅰと，基布にテープ材を編み込んでシートを完成させる工程Ⅱから成る。

第３次プロトタイプのシートについて，原材料，基布およびテープ材，シート完成品について環境ホルモンの含有量を測定した結果を表－8.15に示す。まず，全項目に共通しているのはフタル酸ジ－２－エチルヘキシルとフタル酸ジ－ｎ－ブチルが多く含有されていることである。つまり，シートに含有される上記２種のフタル酸類の一部は，原材料にもともと含有されていたものである。次に，フタル酸類の製造工程での混入量について調べてみる。各原材料を表－8.15に示した重量比で混合して基布およびテープ材を作成している。各原材料の重量比に含有量を乗じた値を総和することで求められる基布およびテープ材の含有量(以下，推算含有量)と，加工後に測定した含有量(以下，実測含有量)を比較すると(表－8.15参照)，実測含有率が１オーダーも大きな値となった。この結果から，工程Ⅰにおいて原材料のもともとの含有量より１オーダーも大きい量の混入が生じたことがわかる。同様に，シートの実測含有量と基布とテープ材の重量比および実測含有量から求められる推算含有量を比較すると，両者の値がオーダー的にはほぼ同じであることから，工程Ⅱでは工程Ⅰほどの混入がないことが分かる。

以上より，織物シート(Ｄ－３シリーズ)の場合には環境ホルモン混入が製造工程で主に生じることが明確に分かった。しかし，具体的な混入経路が編み物シートのように解明することができていない。あくまでも推定であるが，1)加工装置の一部パーツにフタル酸エステル類を含有する塩化ビニル樹脂が使われており，それに原材料などが接触するために混入すること，また２）加工工場内にある上記樹脂が使われて



図－8.11　編み物－テープ材編み付けタイプシートの加工装置および加工過程

表－8.15　原材料，基布およびテープ材，シート完成品の環境ホルモンの含有量（D－3－F）

		重量配合比 (%)	フタル酸ジ-2-エチルヘキシル	フタル酸ジ-n-ブチル
基布原料	主原料	74.3	85	240
	原料A	18.7	140	160
	原料B	0.9	190	140
	原料C	1.9	87	10
	原料D	4.2	53	12
基布(計算値)		100	95	210
①基布(実測値)		10	3000	810
テープ原料	主原料	85.7	130	130
	原料A	9.5	130	92
	原料B	2.9	87	10
	原料C	1.9	53	12
テープ(計算値)		100	130	120
②テープ(実測値)		90	4100	210
製品(①と②から)			4000	270
製品(実測値)			2800	820

いる間仕切りカーテンや椅子などから空気中に放出されたフタル酸エステル類が混入したこと，などが混入経路として考えられる。いずれにしろ，表－8.13～8.15に示したような多量の混入が説明できることを立証するためには，さらなる調査が必要である。

⑸　試験結果の扱い方　～製造過程で混入することを踏まえて～

⑷に示したいずれの調査例とも，製造過程で原材料にもともと含有されていた量より１オーダー程度も大きな量の混入が生じることを明らかにしている。また，主たる混入原因がシート製造後の梱包や輸送を行う際の付着ではなく，製造工程での混入であることが定量的に示されている。以上の結果からシートの場合，混入の主原因の一つとして製造工程での環境ホルモンの大量混入が挙げらる。

製造工程での混入は，1)同じ製造装置で他製品を加工した際に残留した物質の混入や2)製造装置のパーツとして使用されている樹脂製品からの混入の可能性があることが分かった。前者については，製造装置の洗浄によって混入量を減少させることが可能である。しかし，シートを加工する前に，どのような成分を有する他製品を製造したかで，混入する環境ホルモンの種類や量が変化すると考えられる。また，後者の場合では製造装置が変われば当然，上記と同様な変化が生じるであろう。つまり，シートの環境ホルモンは製造するたびに異なっていると考えるべきである。

上記のような特徴があることを前提として，環境ホルモンの含有量試験結果をどのように扱うべきか考察する。環境ホルモンの含有量については，施工に先立って試験を行いその資料を示すこととした。しかし，その資料に示された値は，いつもその値のとおり製造されていることを保証するものではなく，含有する物質名とその量のオーダーを示した参考データであると解釈する。この程度の概略なデータでは，

1.4.3に示した基本方針に沿った作業や2.2.1⑸に示した検討が行えない場合には，再度,「実際に使用する予定のシートそのもの」に対して含有量および溶出量試験を行ってより正確な測定値を明らかにする必要がある。

参考文献

1）東京消防庁科学研究所(財)東京連合防災協会：火と煙と有害ガス

2）環境庁水質保全局水質管理課編：外因性内分泌撹乱化学物質調査暫定マニュアル（水質・底質・水生生物），1998.

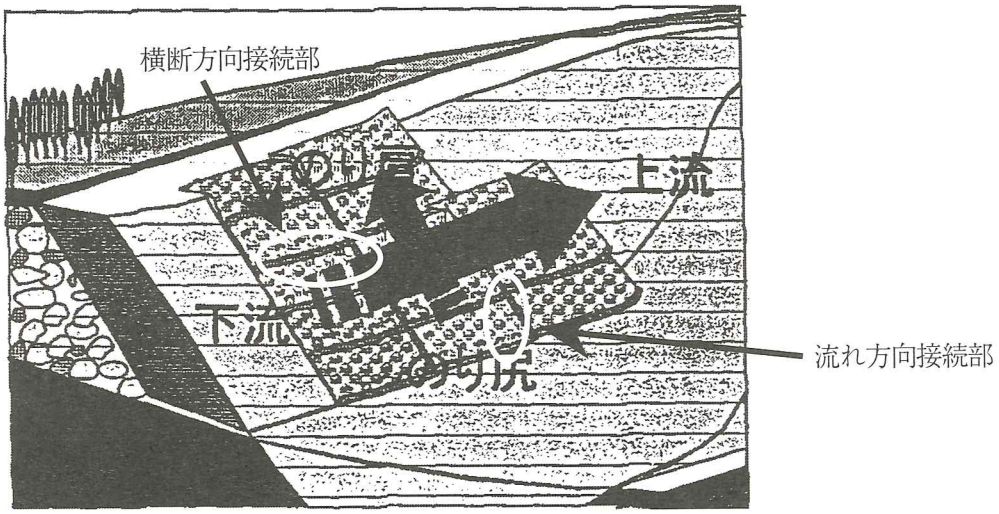
3）河村ほか：食品用ポリスチレン製品に残存する未知物質の同定，食衛誌，Vol.39，No.2，1998.

巻末資料１　シートの施工法

1. シート敷設・固定

1.1　シートの敷設

シートの敷設は，下流側から上流側へ，またのり尻から天端方向の順に行うと，シートの接続箇所での重ね合わせが容易にできる(図－1参照：後から敷くシートを既に敷かれているシートの上に載せればよいため)。しかし，敷設範囲の基準が天端側や上流側にある場合（例えば計画高水位を基準とする場合），それに合わせてシートを敷設し始めるほうが，敷設範囲内にきっちりとシートを敷設しやすくなる。このようにどのような敷設順番にも一長一短があるので，各設置個所の特徴と合わせて最適な敷設順番を決定する。



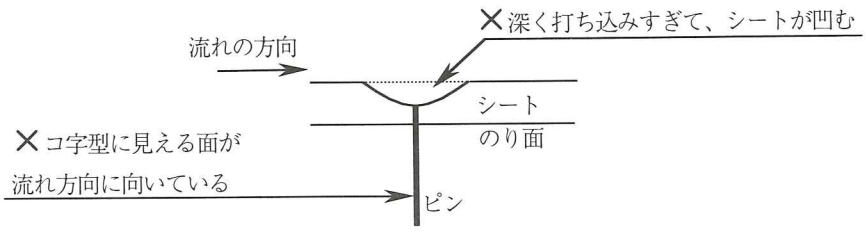
図－1　シートの敷設順番の一例

1.2　シートの固定

シート固定用のピンの打設間隔は１ｍを基本とする。また全てのピンは，流れの方向と直交する方向から眺めた際にコの字型に見えるようにして，シートを凹ませないようにシート表面にかるく触れる程度まで打設する。

●解説

図－2に示すようなピンの打設は，ピン周辺でのシートの侵食防止効果を低減させる原因となるので，行ってはならない。



図－2　ピン打設の悪い例

1.3　シートの接続

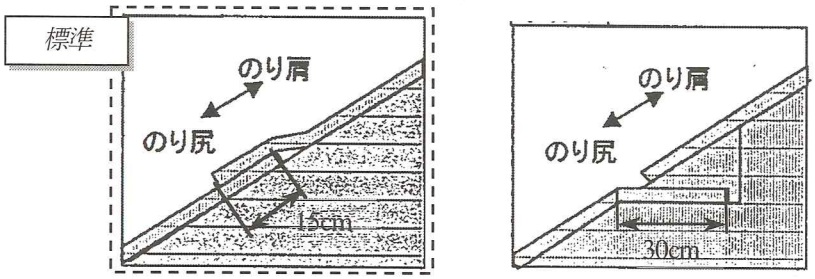
出水時に流れを受けてシート接続部からシート端部が捲れ上がらないように，かつ接続部とその周辺で局所洗掘が生じないように配慮して，シート同士を接続する。

●解説

シートの接続部には，図－1に示すように流れ方向とシート端部が直交する「流れ方向接続部」と，平行である「横断方向接続部」がある。特に流れ方向接続部は，接続の仕方によっては局所洗掘が生じやすく，また流れをまともに受けてシートが捲れ上がりやすい部分である。そのため，以下に示す方法を参考として，適切に接続すること。

(1)　横断方向接続部

のり面上段(のり肩)側のシート端部を下段(のり尻)側のシート上に重ね合わせることを標準とした2種類の接続法がある。横断方向の標準的な接続は，図－3に示すタイプ1のように行う。シート重ね合わせ長は，15cmを基準とし，これより小さくしてはならない。特にのり面を下る強い流れが生じる場合(例えば，高水敷から低水路への戻り流れが生じる範囲の河岸など)には，タイプ2によって接続を行うことを勧める。

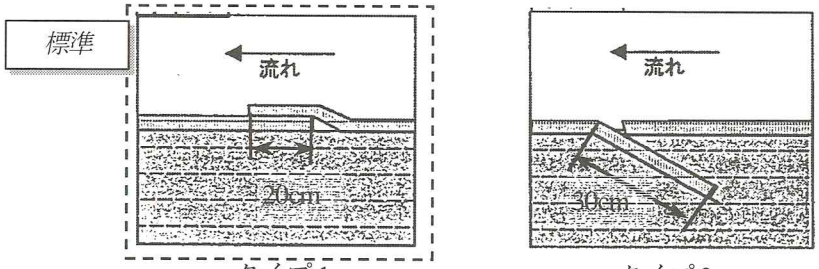


タイプ1　　タイプ2

図－3　横断方向接続タイプ

(2)　流れ方向接続部

上流側のシート端部を下流側のシート上に重ね合わせることを標準とした図－4に示す2種類の接続法がある。標準的な接続法としてはタイプ1を用いる。この場合，シートの重ね合わせ長は20cm以上とする。タイプ2はかなり確実にシートを接続したい場合に用いるが，堤防法線が湾曲している場合などには接続が困難になるので適していない。

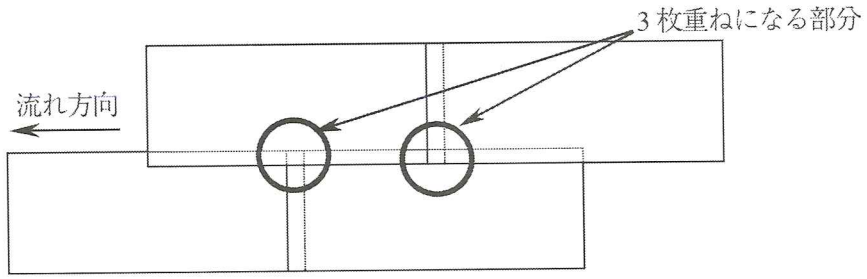


タイプ1　　タイプ2

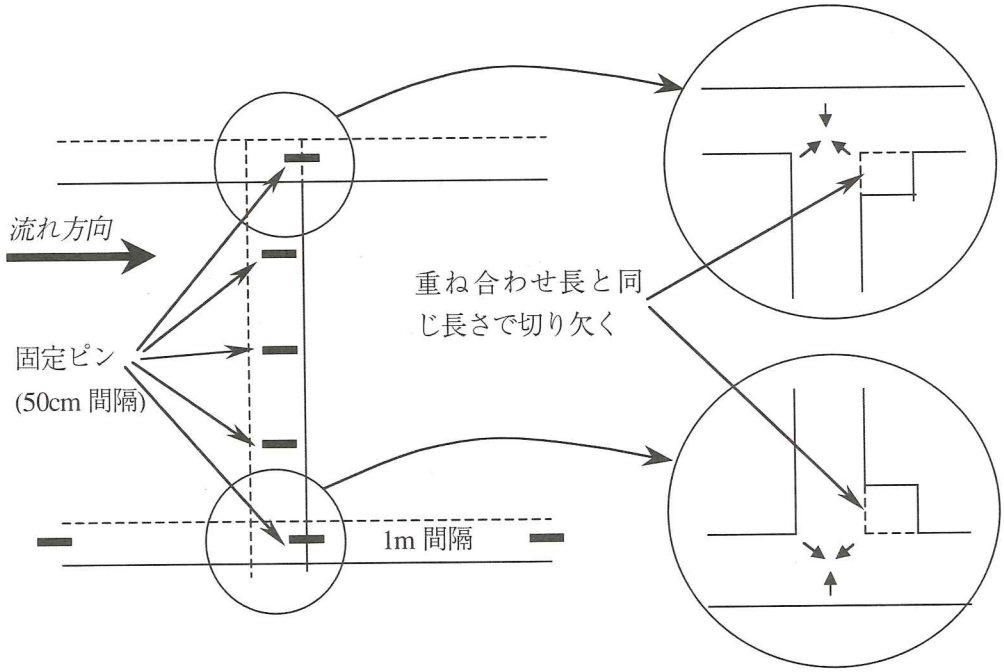
図－4　流れ方向接続タイプ

⑶　シートが３枚重なる接続部

シート配列は図－5に示すように流れ方向接続部が互い違いになるようにする。この場合，最高で３枚のシートが重なる接続部が生じる。この部分では，図－6に示すように３枚のうち１枚のシートを切り欠き，2枚だけが重なるように加工する。なお，切断面から解れやすいシートでは，構成材を焼き付けるなどの解れ防止を実施すること。



図－5　シート３枚が重なる接続部



図－6　３枚重なる接続部の切り欠きとピン固定の方法

⑷　接続用シート片を有するシートの接続

シートの種類によっては，シート本体と同様の強度を有するが，本体より薄い接続用シート片がシート外縁に沿って取り付けられているものがある。その場合，接続用シート片のみを図－3～6のように重ね合わせて固定すればよい。ただし，シート本体の端部がしっかり密着させ，隙間を形成しないようにしなければならない。

1.4　シート端部の埋設

出水時に流れを受けてシート敷設範囲の端部からシートが捲れ上がらないように配慮して，シート端部を埋設する。

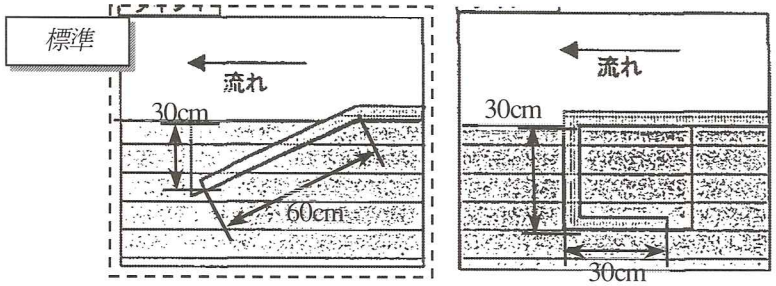
●解説

シート敷設範囲の上流端，下流端，のり尻側の端部は，隣接するシートなしの地面が深く洗掘されシート下部に空洞が生じるなどして，流れをまともに受けてしまうと特にシートが捲れ上がりやすくなる部分である。そのため，以下に示す方法を参考として，適切に埋設を行うこととする。なお，埋設されるシート端部にも土砂を充填する必要がある。 2.3に示す方法により土砂を充填した後に，シートを埋めることを怠らないようにする。

(1)　下流端の埋設

下流端では，図－7に示す２種類の埋設法がある。標準的な埋設法としてはタイプ１を用いる。この場合，シートの埋設長は60cm 以上とする。シート敷設（1.1参照）に先だって，図－7に示す諸元でのり面を掘削しておき，そこにシートを敷設した状態(埋め戻さない)で土砂充填を行う。

下流側に他の河川構造物(例えば護岸の小口止め)がある場合には，タイプ２のように埋設を行う。その場合，シートと構造物とを密着させる。

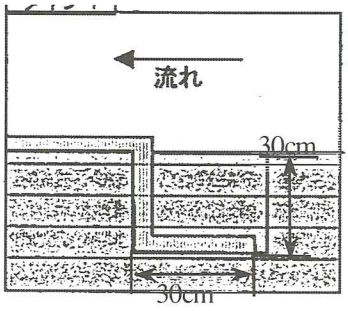


タイプ1　　タイプ2

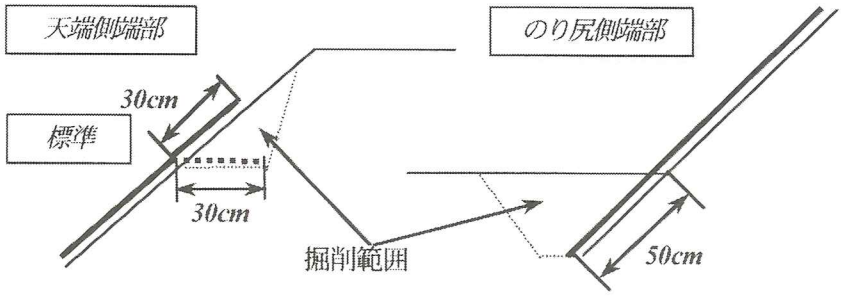
図－7　下流端埋設タイプ

(2)　上流端の埋設

上端部は，万が一シートが捲れ上がるなどするとダメージが最も大きくなるので，その防止のために確実に埋設する必要がある。標準的には，図－8に示すようにシート端部60cm の部分を深さ30cm 程度まで埋設することとする。上流側の埋め戻し土を良く締め固め，かつ植生工を必ず行うこと。



図－8　上流端埋設タイプ



図－9　天端側およびのり尻側端部の埋設タイプ

⑶　天端およびのり尻側の端部埋設

標準的な埋設法を図－9に示す。天端側は，実線で示す標準タイプとする。特にのり面を下る強い流れが生じる場合(例えば，高水敷から低水路への戻り流れが生じる範囲の河岸など)には，破線で示す埋設タイプとする。またのり尻側は，のり尻近傍での高水敷の局所洗掘によってもシート端部が露出しにくいようにやや深めの50cm まで埋設する。上流端の埋設と同様に，掘削範囲を良く締め固めて埋め戻し，かつ植生工を必ず行うこと。

2. 土砂充填工

土砂充填工では，①シートへの土砂充填と②土砂によるシートの被覆を行う。土砂充填はシートの侵食防止効果を発揮させるために，また土砂による被覆はシートの損傷および劣化を防止するために不可欠である。そのため土砂充填は，植物の根茎の伸長を妨げず，かつシートと地面の間に隙間が生じないように実施しなければならない。また土砂による被覆では，シート下の地中まで根茎が比較的に密に伸長するのを妨げない適度な土厚で実施しなければならない。

●解説

土砂充填の標準的な工法として流動性を有する高含水比土砂を圧送ポンプ（グラウトまたはスクイズポンプ）でシート上に圧送し，それを振動装置によって加振することで液状化させ，シート内に流し込むように充填する圧送方式を採用している。

2.1　充填用土砂

シートに充填する土砂は以下に示す性質を有するものが最適である。

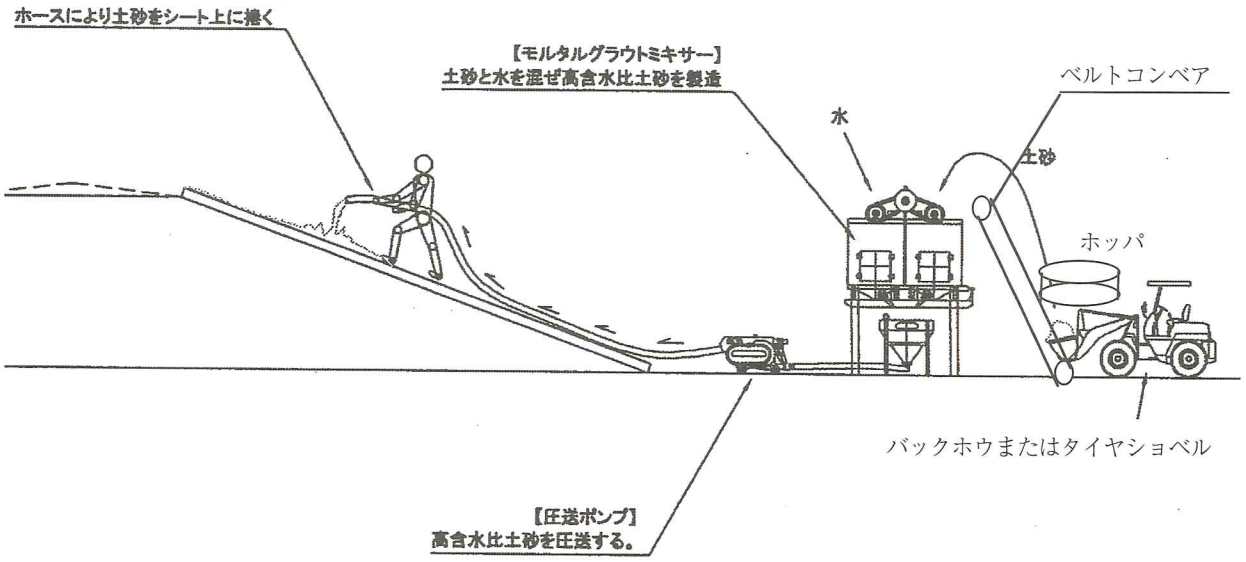
- 粘着力があり，そのためシートの侵食防止効果を向上させる耐侵食力を発揮できる
- シートの空隙径より大きい礫や土塊を含んでいない。
- コンクリートのスランプ試験と全く同様な方法で測定したスランプ値が23～27cm となる高含水比にしてシートに充填した後，水分が自然乾燥しても収縮ひび割れなどの形成に伴って，シートと地面の間に隙間が生じない。
- 植物の生長(特に根茎の伸長)を阻害しない。

●解説

上記した性質を有する土砂として，砂質土(細粒分[粘土およびシルト]含有率15～50%)を標準として用いる。充填用の土砂は，植物の根茎発達を阻害しない性質のものである必要がある。この観点からも，また充填しやすさの観点からも空隙径より粒径が大きい礫は不適であり，礫が混入しない砂質土が最適である。山砂では細粒分が大きな塊となっている場合があり，これも礫と同じ理由で好ましくない。礫や細粒分の塊は充填に先立って除去しておく必要がある。また塊は高含水比土砂の製造時に撹拌時間を長めにすることで砕いてしまうこともできる。この場合，充填する土砂に細粒分が良く混ざるので優れた粘着力，すなわち耐侵食力の発揮が期待できる。

2.2　高含水比土砂の製造・運搬(圧送方式)

圧送方式による高含水比土砂の製造・運搬の一般的な作業状況を図－10に示す。まず，モルタルグラウトミキサーによって高含水比土砂を製造し，それを圧送ポンプによってシート上へ圧送する。このような本施工に先立って，水と土砂の混合量および撹拌時間を決めるための試験製造を行う。試験的に製造した高含水比土砂(適切な含水比でない)は，シートの埋設部(2.3参照)へ運搬・充填して良い。



図－10　高含水比土砂の製造・運搬の作業状況

(1)　高含水比土砂の製造

高含水比土砂の製造に必要な水として一般的には河川水を汲み上げて使用する。あらかじめ水槽に汲み上げておいた水をまずモルタルグラウトミキサーに入れておき，水だけを撹拌しながらバックホウ(またはタイヤショベル)とベルトコンベアを用いて充填用土砂をモルタルグラウトミキサーに徐々に投入していく。なお，投入量をホッパによって測定し，常に同量の投入が繰り返し可能なように作業管理すること。以上を繰り返して，敷設したシート全範囲に充填するために必要な量の高含水比土砂を製造する。

(2)　高含水比土砂の運搬

モルタルグラウトミキサーの吐出口から圧送ポンプの貯留槽に高含水比土砂を移す際には，網目1.5～2cmの鋼製網によって礫などの異物を除去する。次に圧送ポンプにより貯留槽からシート上に高含水比土砂を圧送する。ホースの出口を作業員が持ち歩いて，シート上にまんべんなく積載する。その際，シート接続部で重ね合わせた下側のシートへの充填性が良好でないシートでは，上側のシートをめくり挙げ，下側のシートの上にも高含水比土砂を積載することを勧める。

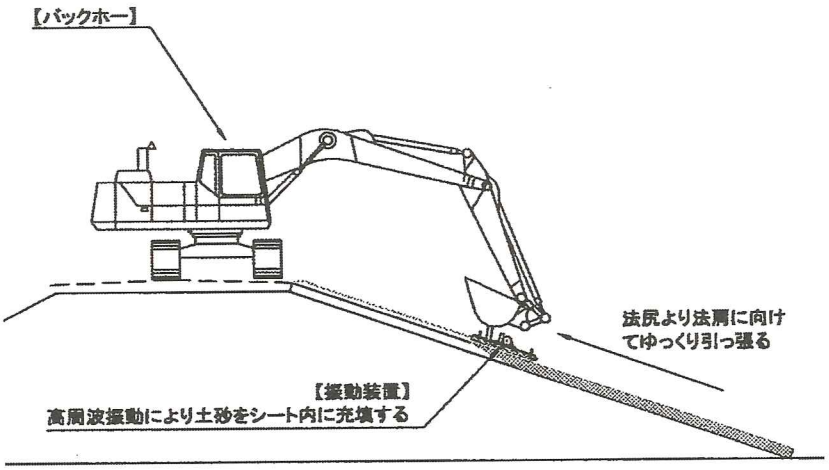
なお，埋設されるシート端部のうち，上下流端は高含水土砂を特に積載しなくて良い。多くの場合，振動装置による土砂充填を行うと余分となった高含水比土砂が埋設部に溜まるからである。その状況をまず観察し，十分に充填できないようであったら不足分を後から積載すること。

2.3　高含水比土砂の充填およびシートの被覆

高含水比土砂をシート上に積載した後，図－11に示すように土砂充填装置によってシートへの土砂充填を行う。シート埋設部では，のり尻側と天端側は上記と同様に行うが，上下流端側はトンボによって充填を行う。

(1)　土砂充填装置による充填

シート上に積載された高含水比土砂を，シート厚の約1.5倍の土厚になるようにトンボにより敷き均す。振動装置をのり尻まで移動してゆっくりのり面に載せる。振動機を稼働させ，高含水比土砂を加振して液状化させながら，図－11に示すように振動装置板をのり尻より天端に向かってゆっくり引き上げていく。その速度の目安は，平均0.15(m/s)程度(一カ所の振動時間が約7秒)である。その際，鋼製振動板がシート表面と密着した状態を保たなければならない。天端側のシート端部にまで達したら，特にシート接続部に土砂が十分に充填されているか確認する。不十分であったらその部分の充填をやり直す。最後に充填されずにシート上に余った土砂をトンボで敷き均してシートを覆い隠す。以上の作業を繰り返し，全敷設範囲(上流側，下流側の埋設部を除く)に充填する。



図－11　土砂充填作業(バックホウの場合)

(2)　シート埋設部の土砂充填

シート埋設部のうちのり尻側および天端側は，埋設部から(1)に示した方法で充填を行うので特別な方法で充填を行う必要はない。充填装置をシートに密着させるのが困難な上下流端側の埋設部（天端側を埋設タイプとした場合はそれも含む）では，シートに積載された高含水比土砂をトンボなどで押しつけるようにして敷き均すことでシート内に充填する。この方法では充填できないシートの場合には，コンクリートの型枠を振動させ締め固めるために用いられるハンドバイブレータなどによって高含水比土砂を液状化させると，良好に充填できる。

充填土砂が自然乾燥し，靴で踏みつけても足跡が付く程度で充填土砂がシートから押し出されない状態になった後，埋設部を埋め戻し，十分に締め固める。

3. 植生工

土砂充填工を終えた後に充填土砂が自然乾燥し，靴で踏みつけても足跡が付く程度で充填土砂がシートから押し出されない状態になった後，通常のシートなしののり面と同様な工法で植生工を行う。

●解説

堤防のり面に一般的に使用されている張りシバ工や種子吹き付け工など，どのような工法でも用いて良い。しかし，シートの土砂による被覆をより確実にすることを狙うとすると，張りシバ工が最適である。張りシバの裏には根茎とともに土壌が付いており，また張りシバの目地には目土を入れるので，これらがシートを被覆する土層の役割をするためである。

植生工を実施している最中にシートが土砂で被覆されていない場所を確認したら，そこに撒き土を行ってシート上に１～２ cm 程度の土層を被せてから，植生工を行うこと。

巻末資料２　損傷部の修繕方法

シート損傷箇所の修繕方法の一例を以下に示す。この方法を参考にして，損傷の程度および範囲に応じて，シートの耐侵食力が適切に発揮できるような修繕を行うこと。

①表土と植生をスコップ等※1 により取り除き、損傷箇所とその周囲のシートを露出させる。

↓

②電動丸鋸※2 などを用いて損傷部を切り取る。

↓

③切り取った範囲に新しいシートを敷設し、ピンで固定する。

↓

④土砂充填、覆土、張りシバを行って完成

※1) 電動丸鋸であると，土砂と植物で被覆されている状態のままシートを切断できる。

※2) シートの切断には，電動丸鋸(小型)を用いると迅速かつ損傷が少なく切り取ることができる。ただし，薄く柔らかいシートや損傷箇所の周囲に凹凸が生じていると電動丸鋸の適用が困難な場合があり，その場合にはカッターやハサミなどで切断すると良い。

●解説

シートの接続，固定や土砂充填の方法は，**巻末資料１**に示した施工法に準じて行う。そのような修繕を試験的に行った例を以下に示す。

(1)　損傷部の切除

損傷部を取り囲むように矩形範囲を設定し，切除する。矩形範囲の設定では，切断する位置を損傷部の端部から10cm 以上離すようにする。そして**写真－1**に示すように型枠(ベニア板などを用いる)を用いて，カッターまたはグラインダーで真っ直ぐ切断する（新しいシートをこの範囲にはめ込む際に隙間が生じないようにするため)。さらに，**図－1**に示すように上流側に長さ20cm の切り込みを入れる。



a) カッターの場合



b) 電動丸鋸の場合

写真－1　損傷部の切除

⑵　張り替え用シートの製作

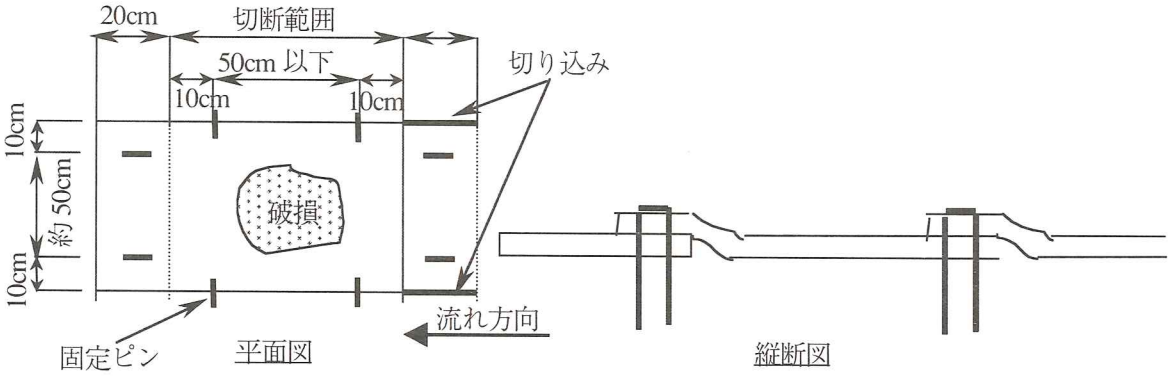
シートの長手方向を流れ方向に合わせて，切除した範囲と同じ幅，かつ長さは重ね合わせに必要な長さ40cmを加えた長さで切断し張り替え用シートを製作する。幅は若干大きめにし，切除した切り口とぴったり密着させられるようにしておく。

⑶　張り替え用シートの敷設・固定

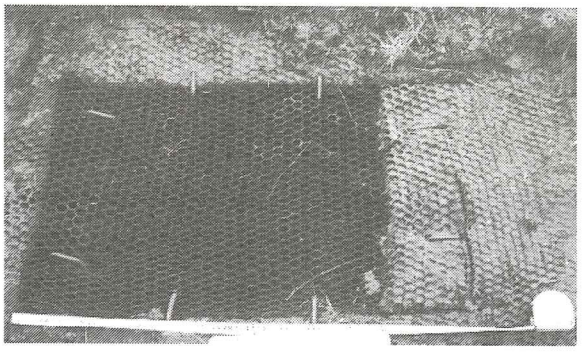
切り込みを入れたシート上流端をめくり上げ，張り替え用シートを**図－1**に示すように既設シートと重ね合わせて敷設する。重ね合わせた部分は**巻末資料1**に示した方法に準じて固定する。また流れ方向に沿うシート接続部は，重ね合わせないで切断面どうしを密着させるようにし，その状態を保つように固定ピンを打設する。その際，**図－1**に示すようにシート端部のめくれ上がりを押さえ込むように，流れ方向にコ字型に見える面を向けて打設して良い。ピンの打設位置は重ね合わせ部から10cmは離し，またピン間隔も50cm以下になるようにする。以上までの作業を終えた状態の一例を**写真－2**に示す。

⑷　土砂充填工と植生工の実施

シート修繕部に土砂充填工と植生工を行い，完成する。



図－1　シートの修繕例



写真－2　張り替え用シートを敷設・固定した状況

あ と が き

シート工法の開発には，以下に列挙するように多岐に渡る分野の知見と多大なる援助を必要とした。明治大学農学部の輿水肇教授，日本大学理工学部の巻内勝彦教授，愛媛大学農学部の江崎次男教授，早稲田大学理工学部の関根正人教授には，ご専門の立場から的確なご指導を戴いた。河川局治水課および河川計画課には，この研究に対するご理解を戴くとともに，最高流速5（m/s）にも達する大型矩形管水路とレーザー流速計を用意していただいた。さらに各地方整備局ならびに北海道開発局には，現地での試験施工を可能とすべく便宜を図っていただいた。シートの侵食防止効果と施工法を検討する上で，いずれも絶対不可欠なものであった。また，関東地方整備局関東技術事務所には，歩掛調査票を作成していただいた。この成果については本報告書に含まれていないが，歩掛案を作成するのに必要な貴重なデータを収集することができた。机上のみで施工法を作成し，それを試しに使って大がかりな試験施工を実施したのは，自然共生センターが最初であった。このような機会を与えてくれたのは土木研究所河川環境研究室長の島谷幸宏氏である。また，工事にこぎ着けるまでに非常な苦労があったが，それを一手に引き受けてくださったのは，同研究室の萱場祐一氏である。さらに，環境ホルモンに関する分析手法についても同研究室の薗田顯彦氏からアドバイスを戴いた。屋外暴露および促進暴露試験については化学研究室の西崎到氏に基礎的なことを懇切丁寧にご教示いただくとともに，同研究室所有の促進暴露試験機を快く貸していただいた。凍結・融解試験においてはコンクリート研究室の片平博氏に同研究室所有の試験機を貸していただくとともに，試験法についての説明をしていただいた。シート上での植生繁茂については，緑化生態研究室の温室を使わせてもらうとともに，同研究室の松江正彦氏には著者の植物に関する初歩的な質問にも詳細に分かりやすく答えていただいた。また，その実験とデータ整理は，当時，交流研究員であった堀謙吾氏および渡辺敏氏によって行なわれた。その他，実験などの業務の請け負っていただいた方々とも実のある協議ができ，特に施工法に関して共同での特許申請に至ることができた。以上の方々のご援助が無くてはここまで開発を進めることはできなかったであろう。ここに記して謝意を表する。

本研究で得た知見は，上記のように特許申請のかたちでも結実した。その全てを以下に示す。

緑化可能な侵食防止シート・マット（特許番号：第2963987号）

施工・撤去可能で緑化可能な侵食防止シート・マット（出願番号：特願2000－047324）

浸食防止マット，及びその製造方法（出願番号：特願2000－066059）

侵食防止用網状シート及びそれを用いた法面保護工法（プリーツタイプ）
（出願番号：特願2000－065874）

侵食防止用網状シート及びそれを用いた法面保護工法（エンボスタイプ）
（出願番号：特願2000－065875）

侵食防止用マット（出願番号：特願2000－065953）

侵食防止用シート及び同シートによる地盤面侵食防止方法（出願番号：特願2000－065863）

侵食防止用マットとその敷設方法（出願番号：特願2000－065839）

侵食防止シートの土砂充填方法（出願番号：特願2000－047705）

土砂充填用振動加圧装置（出願番号：特願2000－047706）

本研究で開発した個別のシート構造および製造法については，上記資料に詳細が示されている。これらの有効活用を期待したい。

ところで，シート工法の開発にあたっているときに，時折ふっと気に掛かり，ページをめくった書籍があった。橋本規明氏の「新河川工法」(森北出版：昭和31年発行)である。本書を知ったのは当時，土木研究所の上司であられた山本晃一氏（現：河川環境管理財団）の紹介による。山本氏は，時折，研究室に立ち寄って室員の皆に何気なく話しかけてくださった。そのあまりの「何気なさ」に甘えて気軽になにやら会話をさせていただくと，たいていの場合には川に関する話題に行きつき，そのたびに様々な興味深いお話しをご自身の考えかたを交えてしていただけた。その際，シート工法についても，いろいろとアドバイスを戴け，大変感謝している。そう言った個別の技術や水理学などの学術的な話題だけでなく，タイトルを付けるとすれば「多自然型川づくりにおいて河岸防御はいかにすべきか」というような理念・方針に関する話題は，特に興味深く拝聴させていただいた。そのようなお話しの中で研究室の書庫の片隅に隠れるようにあった上記書籍を紹介していた戴いたと記憶している。

本書は，近年では最も河川が荒廃していた昭和初年～戦後にかけて河道改修を手がけた橋本氏が，開発・創意工夫を加えたコンクリートブロックによるのり覆工法と特に力を入れられた根固工法について解説されたものである。それら工法のコンセプトから始まり，具体的なブロック形状と用例，歩掛まで，実務に必要な情報を網羅している。根固工法については今日見られるものと大きな差異はなく，いまだに有用な技術書であると思われる（荒廃河川の改修に関する部分も非常に読み応えがある)。コンクリートブロックが「新河川工法」として用いられるようになって，現場でたたき上げて改良を加えてきた様子がよく分かり，それを見ているだけでシート工法開発の刺激になった。それだけでなく，著者のように橋本氏の時代の河川改修を伝え聞く程度のものにとっては，当時の河道，山間部崩壊地，河川構造物などの写真を眺めながら，工事の作業状況に関わる綿密な記載部分を読むと，デスクワークから離れて気分転換も兼ねてその当時に川巡りをしたような錯覚を覚え，新鮮な気分にもなれたことも良かった。

本書の冒頭には，当時の河岸防御工としてのり覆工に石張り，根固工として木工沈床と粗朶沈床が一般的であったこと，それらが「希有の大洪水で　…中略…　ないのに，わずかの出水でいたるところ堤防･護岸･水制などを破損，欠壊され」るような状況であったことが示されている(「　」は引用文である)。橋本氏は，「これを災害災害とさわいでいるのは一体なにを原因とすべきであろうか」と自問し，その一要因として上記工法の欠陥，技術的な貧困さを認めざるを得ないとし，河川技術者として技術的な責任を感じておられる。そのような反省に立脚して生まれた「新河川工法」は，昨今では環境というキーワードのもとで評価を落とし，むしろそれ以前の工法を「伝統工法」と呼んで珍重するような気配がある。そのような状況を端から否定する気はないが，伝統工法の使われ方を見ていると，橋本氏が感じられたような危機感を忘れているのではと危惧するような場合も見受けられるのも事実である。また，環境的観点から特に評判を落としているブロックによるのり覆工だが，橋本氏の示された工法には，のり面を全てコンクリートで覆い尽くさずに適度な隙間を設け，その隙間から植物(シバ，ヨシ，カヤ，ヤナギ)を繁茂させるものが標準断面図付きで紹介されている。見たところ現在使っている多自然型ブロックと本質的に同じものである。そのようなブロックが当時提案されながら，著者はそれを川で見ることなく，新製品として新たに工夫されたものとして知った。これらは一体，どういう事情があってのことなのだろうか。

同じく本書の冒頭で橋本氏は，新工法が全国的に普及したが誤った使用例もあること，工法の良否だけでなくそれを使いこなすだけの実力が河川技術者に必要だと述べられている。今まさにそのことが問われ

直しているのではないだろうか。第１章に「新しい体系」として，伝統工法，ブロック工法，そしてシート工法といった様々な工種を各工法の長所・短所を十分に理解して「使い分け」をすると言ったことは，橋本氏にすればなにも新しくないであろう。また「使い分け」だけでなく日々，改良して使いこなしていくことも河川技術者として重要である。

シート工法には特にそのことを期待したい。開発していてブロック工法のように現場の経験を積んでたたき上げていくことができなかったことが，今なお心細く感じている。モデルを使った計算などしていると，頭でっかちになっているように思うこともあった。その経験不足にあせりを覚えると「新河川工法」を見ていたのかもしてない。上下流端の埋設処理はこれで良いか？流れ方向に連続してつなぎ合わせることにしているが，横帯工を設けて一定間隔で「縁切り」をする必要はないか？など考え出すときりがない。シート工法が普及して設置箇所数も増加すれば，そのうち残念ながら被災する場所もあるかもしれない。そのような場合には，現地調査を行って原因を明らかにし，シート工法をたたき上げていきたいと強く思っている。そのような機会がありましたら，河川研に必ずご一報頂けますようにお願い申し上げることを最後として，シート工法開発の第一段階を終わりとしたい。