ISSN　0386 － 5878
土木研究所資料 第4232号

土 木 研 究 所 資 料

特殊土壌における暗渠排水の
長期機能診断と維持に関する研究

平成 24 年 7 月

独 立 行 政 法 人　土 木 研 究 所
寒地土木研究所
寒地農業基盤研究グループ 資源保全チーム

Copyright © (2012) by P.W.R.I.

All rights reversed. 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 Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は, 独立行政法人土木研究所理事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，独立行政法人土木研究所理事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。

土 木 研 究 所 資 料
第4232号 2012年7月

特殊土壌における暗渠排水の長期機能診断と維持に関する研究

寒地農業基盤研究グループ資源保全チーム 上席研究員 横濱 充宏
総括主任研究員 大深 正徳
主任研究員 中山 博敬
研究員 大岸 譲
研究員 岡村 裕紀

要 旨

疎水材型暗渠の施工の歴史は浅く、機能診断のノウハウと長期的機能維持手法は未確立である。このため、これらの新しい暗渠排水の機能状況の的確な診断手法の開発とこれに基づく長期的な機能維持手法の提案が求められている。

そこで、北海道の泥炭農地において使用実績が多い、ホタテ貝殻、埋木チップ、石灰石、火山礫を疎水材に用いた暗渠の機能調査を実施した。約 10 年が経過したホタテ貝殻、埋木チップ、火山礫暗渠は排水機能を損なうことなく、また、これら資材の耐久性も十分に確保されていた。石灰石暗渠については、施工後 3 年が経過した排水機能のみの確認であったが、これについても他の資材と同様に機能が維持されていることがわかった。また、地表面に近い箇所のコーン指数や含水比の計測値を用いた重回帰式から地下水位推定の可能性が確認できた。

キーワード：暗渠、機能、疎水材、耐久性、泥炭土

まえがき

北海道は積雪寒冷な気候のため、耕作可能期間が短く、地温も低い。また、大規模機械化農業が盛んであり、圃場にはより大きな地耐力が求められる。このため、融雪後や降雨後に速やかに地温や地耐力が回復して営農作業が行えるよう、迅速な圃場排水機能の維持が求められている。

そのため、過去、北海道では、暗渠管を土壌掘削部底面に敷設した後に暗渠管敷設のために掘削した現地土を土壌掘削部にそのまま埋め戻す型式の暗渠施工を行っていた。しかし、排水効果が十分でなく[1)、2)]、近年は、掘削土の代わりとして、土壌掘削部に、粗粒火山灰、カラマツチップ、ホタテ貝殻等の透水性に優れた地域特産の資材を疎水材として埋め戻す暗渠が施工されるようになってきた[3)、4)]。また、北海道に広く分布する泥炭土地帯では、酸化鉄が沈殿することで暗渠管を閉塞させたり、さらに下流域にシジミ漁場を有する場合、暗渠から流出した鉄分が赤サビとなってシジミに付着して商品価値を低下させたりする現象が一部の地域で認められたことから、これらの地域では、疎水材に鉄分の溶出を抑制する石灰岩やホタテ貝殻が利用されるようになってきている。

しかし、これらの疎水材を用いた暗渠の施工の歴史は浅く、機能診断のノウハウと長期的機能維持手法は未確立である。このため、これらの新しい暗渠排水の機能状況の的確な診断手法の開発とこれに基づく長期的な機能維持手法の提案が求められている[5)]。

そこで、独立行政法人土木研究所寒地土木研究所では、一般研究として「特殊土壌における暗渠排水の長期機能診断と維持に関する研究」を立ち上げ、平成 20 年度～平成 22 年度にかけて下記の項目について研究を実施してきた。

1) 機能良好暗渠･機能不良暗渠の実態解明
2) 暗渠機能の長期維持のための機能診断手法の提案
3) 暗渠機能の長期維持手法の提案

本資料はこれらの研究成果を報じるものである。本資料が、農地保全に資する技術資料として地域にとって有効に活用されれば幸甚である。

目　次

まえがき 1
１　機能良好暗渠･機能不良暗渠の実態解明..... 3
1．1.　疎水材にホタテ貝殻や埋木チップを用いた暗渠..... 3
1．1．1．調査手法..... 3
1．1．2　調査結果..... 7
1．1．3　小括 15
1．2　疎水材に石灰石を用いた暗渠..... 17
1．2．1．調査手法..... 17
1．2．2．調査結果..... 19
1．2．3　小括 22
1．3．疎水材に火山礫を用いた暗渠..... 23
1．3．1．調査手法..... 23
1．3．2．調査結果..... 25
1．3．3　小括 28
２　暗渠機能の長期維持のための機能診断手法の提案..... 29
2．1．調査方法 29
2．1．1．調査圃場の概要..... 29
2．1．2．調査項目..... 29
2．2．調査結果 30
2．2．1．地下水位とコーン指数、及び地下水位と含水比との相関関係..... 30
2．2．2．コーン指数を用いた地下水位推定式を活用した暗渠排水工の機能診断手法の提案... 30
３　暗渠機能の長期維持手法の事例整理..... 32
3．1．暗渠管内の清掃..... 32
3．2．疎水材の補充..... 34
3．3．補強暗渠の導入..... 35
あとがき 36
参考文献 37

１　機能良好暗渠･機能不良暗渠の実態解明

1．1．　疎水材にホタテ貝殻や埋木チップを用いた暗渠

1．1．1．調査手法

北海道北部･浜頓別町の市街地より南東に約 2.5km離れた採草牧草地で調査を実施した（図 1、写真 1）。この調査圃場では平成 8 年 8～10 月に暗渠を施工し、雪解け後に圃場の仕上げとして約 10cmの置土を敷均した。その後、施肥及び播種を実施し、平成 9 年 6 月末までに草地更新を完了した。平成 8 年の暗渠施工時に宍戸ら[3] により、圃場中央部の幅約 120m、奥行き約 90mの範囲に、暗渠の施工方法が異なる 3 つの試験区が設けられた。平成 20 年に筆者らは、宍戸ら[3] の調査項目、方法を参考に、施工方法の異なる暗渠の排水状況、土壌や疎水材の性状の施工後 11 年目の経年変化を調査した（図 2）。暗渠の詳細は下記及び図 3 のとおりである[3] 。なお、暗渠施工後の初回調査は、草地更新が完了した平成 9 年に実施しており、これを施工直後として整理した。

(1) ホタテ貝殻タイプ：暗渠管上部約 60cm をホタテ貝殻で覆い、その上部約 30cm を泥炭土（掘削土）で埋戻したタイプ。このタイプの暗渠を施工した調査範囲をホタテ貝殻区と称す。

(2) チップタイプ:暗渠管上部約 20cm をホタテ貝殻で覆い､その上部約 40cm を埋木チップで埋戻し、さらにその上部約 20cm を泥炭土（掘削土）で埋戻したタイプ。このタイプの暗渠を施工した調査範囲をチップ区と称す。

(3) 慣行タイプ：従来からある慣行的な工法である。暗渠管上部約 4 cm までをササで覆い、その上部約 70cm を泥炭土（掘削土）で埋戻したタイプ。このタイプの暗渠を施工した調査範囲を慣行区と称す。

暗渠管にはいずれの施工タイプでも内径 50mm のコルゲート多孔管が使用された。また、暗渠間隔は 15m、平均埋設深は約 1 m である。

図 1　調査圃場位置図

※　この背景地図等データは、国土地理院の電子国土 Web システムから配信されたものである。

写真 1　調査圃場

このような調査圃場において、排水状況、土壌や疎水材の性状の施工後11 年目の経年変化を明らかにするにあたって以下に示す調査を行った。なお、施工直後、施工後 1 年目、2 年目、5 年目にも同様の調査を実施してきた[3)、6)、7)]。施工後 11 年目の調査は、これら過年度のデータと比較できるように実施した。

1）地下水位調査

施工後 2 年目[3)]と施工後 11 年目に、圃場内の地下水位を把握するために地下水位観測を行った。

施工後 2 年目は各試験区において、附帯明渠法肩から圃場内へ向かって約 21～28m の位置で、暗渠管より 2.0m 離れた地点に自記水位計（仕様不明）を設置した[3)]。地下水位計の設置箇所にバラツキがあるのは圃場内の湛水している窪地を避けたためである。施工後 11 年目は各試験区において図 2、図 4 に示すように附帯明渠法肩から圃場内へ向かって約 18～25m の位置で、両暗渠管より 0.5m、

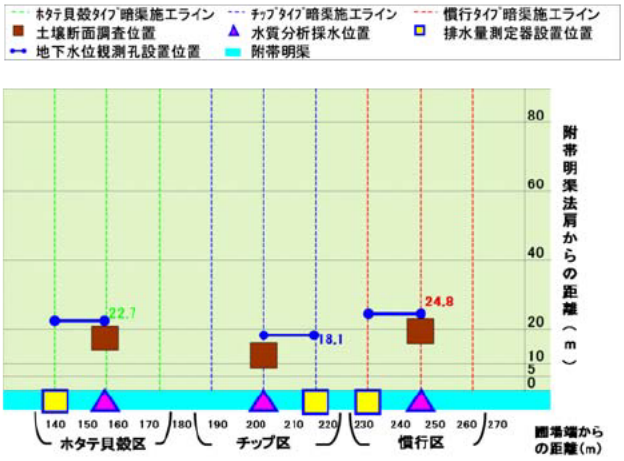


図 2　調査圃場内詳細（施工後 11 年目調査時）

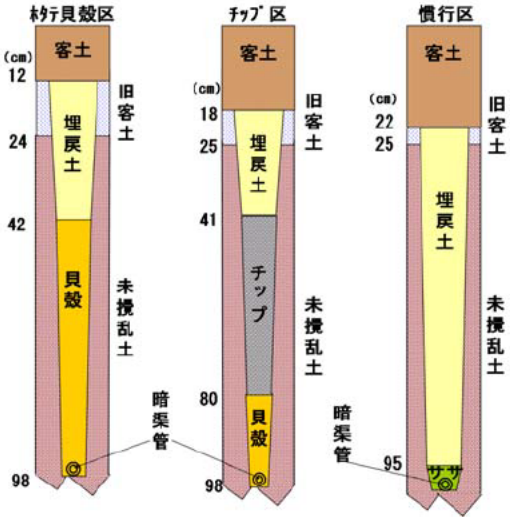


図 3　暗渠施工断面（施工直後[3)]）

＊図中の数字は地表面からの深さを表す。

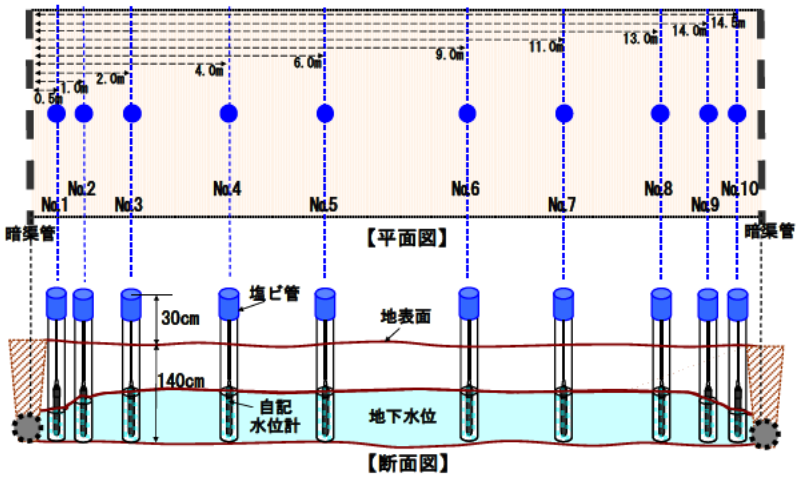


図 4　地下水位観測孔設置詳細

1.0m、2.0m、4.0m、6.0m の地点に合計 10 個の自記水位計（OYO S&DLmini）を設置した。なお、施工後 11 年目の設置位置は、過年度の調査で乱れた土壌及び窪地を避けるため、施工後 2 年目の設置位置より附帯明渠側に 1～3m 移動した位置とした。

地下水位観測は平成 20 年 8 月中旬から 11 月中旬にかけて行った。ただし、8 月中旬から 9 月上旬にかけては№1～5 地点の片側 5 箇所のみで観測を行ったが、9 月中旬以降は暗渠間の地下水位の左右対称を確認するため合計 10 箇所の観測とした。

2) 暗渠管からの排水量調査

試験区ごとの暗渠落口の一つに暗渠排水量測定器[8] を設置し（図 2）、平成 20 年 7 月上旬から 8 月下旬まで暗渠管からの排水量を測定した。また、水質分析用試料を採水する際に手動でも排水量を確認し、暗渠排水量測定器の測定値の精度を検証した。

この暗渠排水量測定器とは、電子式水道メーターを用いた暗渠排水量測定装置である（図 5）。既設暗渠管にストレーナーを介して電子式水道メーターを接続し、排水量を測定する。測定データは地上部に設置したデータローガーに蓄積するシステムになっている。排水量の測定間隔はデータローガーの設定により 1，2，5，10，15，20，30 秒、1，2，5，10，15，20，30，60 分の 15 とおりから選択できる。この調査では測定間隔を 1 分間隔に設定した。電子式水道メーターは周辺からの水の影響を避けるため、防水ボックスに収納した。

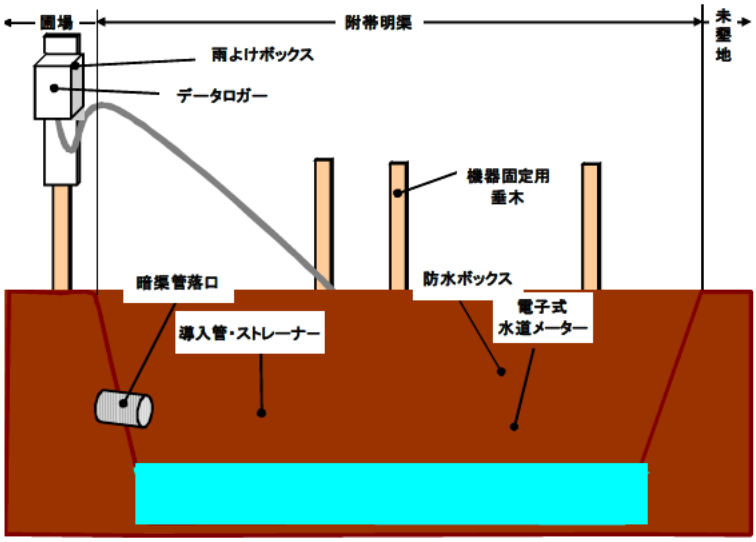


図 5　暗渠排水量測定器

3) 暗渠管からの排水の水質調査

試験区ごとの暗渠管から採水し、その水質を分析した。採水は平成 20 年 7 月に 2 回、8～11 月は各月 1 回、計 6 回行った。分析項目は次のとおりである(【　】内は試験方法を示す)。なお、施工直後は 8～11 月、施工後 1 年目は 5～10 月、施工後 2 年目は 5～11 月、施工後 5 年目は 7 月に各月 1 回採水し分析した[3)、7)]。

pH（H_2O）【ガラス電極法】、EC(電気伝導度)【電気伝導度計法】、Ca(カルシウム)【原子吸光度法】

4) 土壌断面及び土壌理化学性調査

試験区ごとの暗渠施工断面の土壌断面調査を施工直後、施工後 5 年目、施工後 11 年目に実施するとともに、暗渠の埋戻部や未撹乱部から土壌を採取し、これらの土壌理化学性について分析した。分析項目及び方法は次のとおりである(【　】内は試験方法を示す)。

容積重・三相比【実容積法】、飽和透水係数【変水位法】、孔隙分布【砂柱法＋遠心法】、pH（H_2O）【ガラス電極法】、強熱減量【電気炉熱焼法：550℃･17 時間】、腐植【乾式熱焼法】

5) 疎水材性状調査

疎水材の耐久性等を調査するため、平成 9 年に、あらかじめ重量測定したホタテ貝殻をナイロン製ネットの袋に入れてホタテ貝殻区とチップ区のそれぞれの疎水材部の中に埋設し、さらに付近の附帯明渠にも同様に重量測定したホタテ貝殻を浸漬した。また、埋木チップも附帯明渠に浸漬した。

袋に入れて埋設または浸漬した試料とチップ区の埋木チップの一部を表 1 に示す位置で採取した。また、これら採取した試料に対して、石田ら[9] 及び佐藤ら[10] の方法を参考に以下に示す測定及び成分分析を行った(【　】内は試験方法を示す)。

ホタテ貝殻 ; 外観【目視による】、重量、密度【水銀置換法】、載荷強度【載荷強度試験】、成分分析【蛍光 X 線分析】

埋木チップ ; リグニン【Effland 法】、C/N【CHN コーダー法】、多糖類【HPLC 法】

表 1　疎水材試料採取箇所

疎水材	採取箇所	埋設深度 (cm)	採取数量		
			施工後 2 年目[3]	施工後 5 年目[6]	施工後 11 年目
ホタテ貝殻	ホタテ貝殻区	30-52 ※1	－	5 枚	10 枚
		52-62 ※2	10 枚	6 枚	14 枚
		52-62 ※1	－	5 枚	10 枚
		62-81 ※1	－	5 枚	10 枚
	チップ区	75-93 ※1	－	7 枚	10 枚
	附帯明渠	浸漬 ※2	10 枚	10 枚	10 枚
埋木チップ	チップ区	43-75 ※1	50~100g	50~100g	50~100g
	附帯明渠	浸漬 ※3	50~100g	50~100g	－

※1　疎水材として使用されており、ナイロン製の袋に入れていないもの

※2　番号を記して重量測定しナイロン製の袋に入れたもの

※3　重量測定しナイロン製の袋に入れたもの

6) 圃場地盤高（地盤沈下量）調査

調査圃場を 10m メッシュに区切り、水準測量で圃場の地盤高を測定した。暗渠施工時、施工後 2 年目、5 年目にも同様の水準測量を行っており、これらと比較して経年変化を整理した。なお、平成 20 年度の調査では、ホタテ貝殻区及びチップ区で暗渠施工ラインの沈下が著しかったことから、これらの暗渠施工ラインについては概ね 1m 間隔で水準測量を行った。

1．1．2　調査結果

1）地下水位

本項では、地下水位観測結果を用いて、①施工後 2 年目[3] から施工後 11 年目までの 9 年間における排水機能の低下の有無（図 6）、②施工後 11 年目における排水機能の良否について（図 7）検討した。①は、降雨後の地下水位ピーク時から 3 日後までと、3 日後から 7 日後までのそれぞれの地下水位変化量を求め、両年を比較した。②は、施工後 11 年目に 2 本の暗渠管間で測定した 10 地点のうち、地下水位が最も高い地点のデータを用いて、農林水産省の計画基準に示されている地下水位の基準[11]（以後、計画基準「暗きょ排水」と称す）を満たしているかどうかで判定した。

施工後 2 年目[3] と施工後 11 年目において、同様の降雨が観測された時の地下水位変動を示す（図 6）。なお、前述のとおり、施工後 2 年目の調査では暗渠管より 2.0m離れた位置でのみ地下水位を測定していたため、施工後 11 年目の値も暗渠管より 2.0m離れた位置のデータのみを示す。ホタテ貝殻区の施工後 2 年目では、ピーク時から 3 日後までに地下水位が約 26cm低下し、3 日

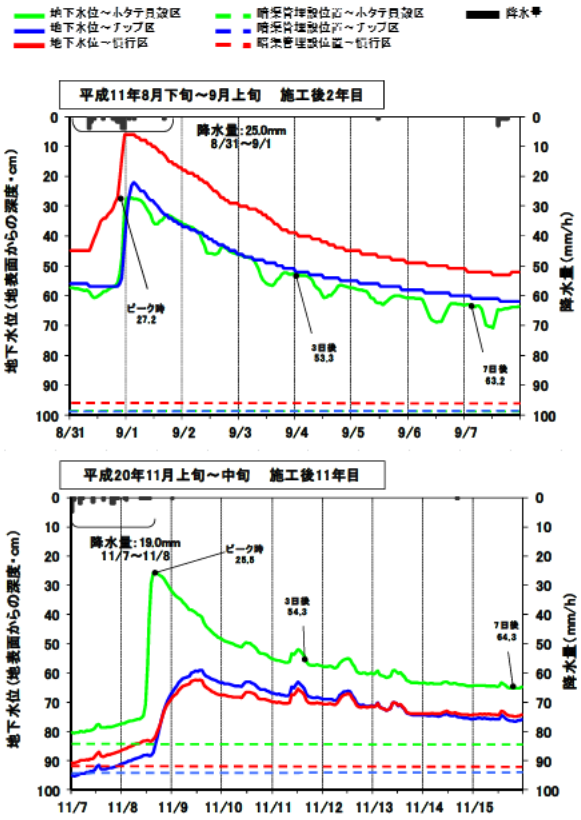


図 6　地下水位変動
（暗渠管から 2.0m 離れた地点）

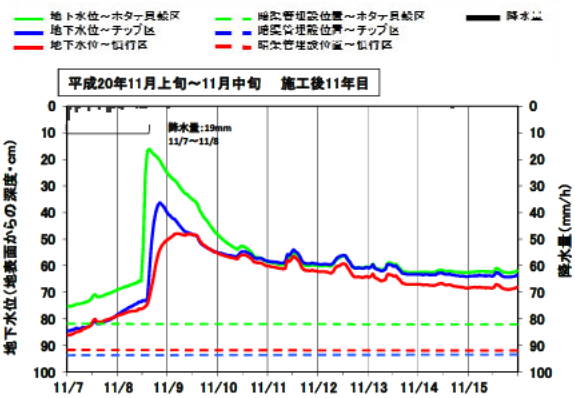


図 7　地下水位変動
（地下水位が最も高い地点）

後から 7 日後までに地下水位が約 10cm低下している。また、施工後 11 年目ではピーク時から 3 日後までに約 29cm低下し、3 日後から 7 日後までに 10cm低下している。すなわち、ホタテ貝殻区においては、施工後 2 年目から 9 年間経過した時点でもピーク時から 3 日目までの水位低下量も、また、3 日後から 7 日後までの水位低下量もほぼ同じであり、排水機能の低下は見られなかった。一方、チップ区と慣行区については、施工後 11 年目の降雨後の地下水位の上昇が緩慢であったため、排水機能の低下の有無は明らかにできなかった。

次に、施工後 11 年目の各区において、2 本の暗渠管間の 10 地点で測定した地下水位のうち、地下水位が最も高い地点の降雨後の地下水位変動を図 7 に示す。降水量が 19.0mmとやや少ないが、ホタテ貝殻区の降雨後の地下水位は十分に上昇している。一方、他の 2 つの試験区については降雨後の地下水位の上昇が十分ではないが、降雨後 2 日目以降の地下水位はホタテ貝殻区と同様に推移している。他にまとまった降雨がなかったことから、これらのデータを用いて計画基準「暗きょ排水」に示されている「整備目標の基本的な指標となる、作物生育にとって望ましい土地利用区分別地下水位（計画地下水位）」[11] を満たしているかどうかの判定を行った。

圃場内の地下水位は、計画基準「暗きょ排水」では降雨の 2～3 日後の地下水位が地表面下 40～50cm、降雨後 7 日以降の地下水位が地表面下 50～60cmにあることが作物の生育に望ましいとされている[11]。ここでは、降雨後の地下水位のピーク時を基準として、その 3 日後に地下水位が地表面下 40cm以下で、7 日後に地表面下 50cm以下であれば暗渠が良好に機能していると判定した。

図 7 より、いずれの試験区においても地下水位のピーク時より 3 日後には、地下水位が地表面下 40cm 以下となっており、7 日後には 50cm 以下となっている。したがって、いずれの試験区も施工後 11 年目の暗渠の排水機能は良好であると考えられた。

2） 暗渠管からの排水量

図 8 に平成 20 年 7 月上旬から平成 20 年 7 月下旬にかけての排水量の観測結果を示す。7 月下旬から 8 月下旬にかけてまとまった降雨がなかったため、排水量変動が大きく表れた期間の排水量の観測結果を示す。なお、チップ区の排水量データ回収に不備があったため、図 8 にはチップ区のデータを記載していない。

観測開始直後に 63.5mm/day の降雨があった。その時の排水状況

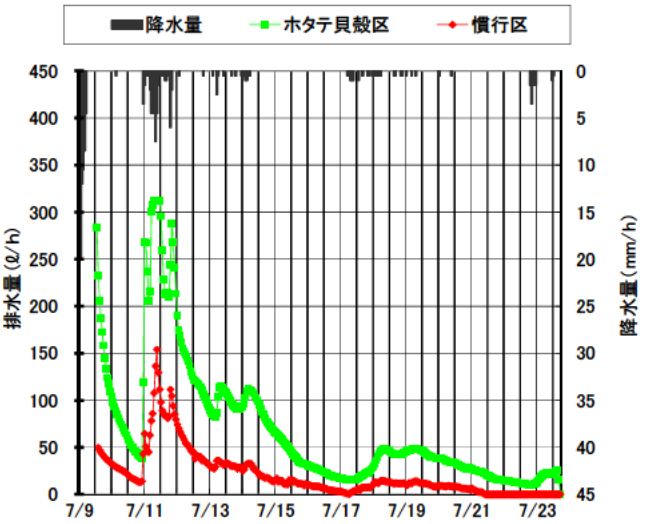


図 8　排水量推移

を見ると、明らかにホタテ貝殻区からの排水量の多さが確認できる。施工後 11 年が経過したホタテ貝殻暗渠の排水機能が低下していないと推察される。

3) 暗渠管からの排水の水質

図 9 に暗渠管からの排水の水質結果を示す。

pH は慣行区では概ね 6 以下で推移した。一方、ホタテ貝殻区及びチップ区では 6 以上と慣行区より高い値で推移した。

Ca 濃度は慣行区では 20mg/ℓ 以下と低い値で推移した。一方、ホタテ貝殻区及びチップ区では大部分が 50mg/ℓ 以上であり、慣行区より高い値で推移した。泥炭土中は酸性成分が多いためにホタテ貝殻の Ca が溶出する [3]と言われており、施工後 11 年を経過しても Ca の溶出が続いていることが明らかとなった。

EC は Ca 濃度の推移とほぼ同じ動きをしており、無機イオンである Ca 濃度の影響を強く受けていると推察される。

4) 土壌断面及び土壌理化学性

図 10、写真 2 に施工後 11 年目の暗渠断面を示す。また、図 11～13 に施工直後[3]、施工後 5 年目[6]、施工後 11 年目の各試験区における未撹乱部（客土、旧客土、未撹乱土）と埋戻部（客土、埋戻土）の飽和透水係数を示す。

埋戻土の経年に伴う飽和透水係数の変化を見ると、ホタテ貝殻区で透水性が高くなっている。一方、チップ区では大きな変化がなく、慣行区では下層において透水性が低くなっている。未撹乱部では、いずれの区においても施工後の経過

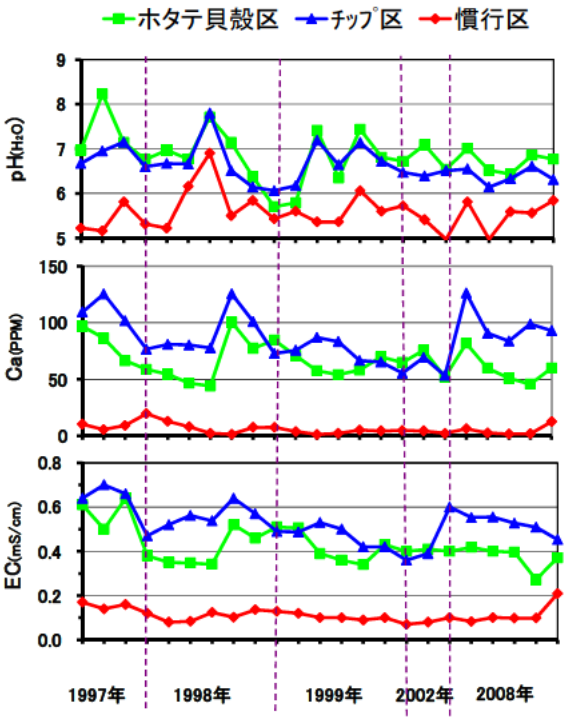


図 9　暗渠管からの排水の水質

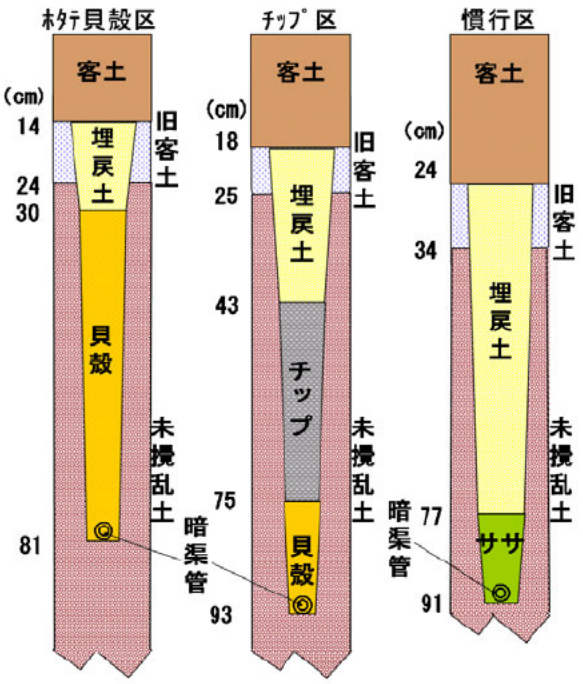


図 10　暗渠施工断面(施工後 11 年目)

※図中の数字は地表面からの深さを表す。

年数と飽和透水係数との間に相関は見られなかった。また、データは表記していないが、飽和透水係数以外の分析項目では、いずれの区においても未撹乱部及び埋戻部ともに施工後の経過年数と分析項目との間に相関が見られなかった。したがって、ホタテ貝殻区と慣行区における埋戻部の透水性の経年による変化が疎水材の違いによるものかどうかは判然としなかった。

また、目視観察ではホタテ貝殻、埋木チップともに施工直後の記録[3] と比較して疎水材の断面形状、色調等に大きな変化は見られなかった。

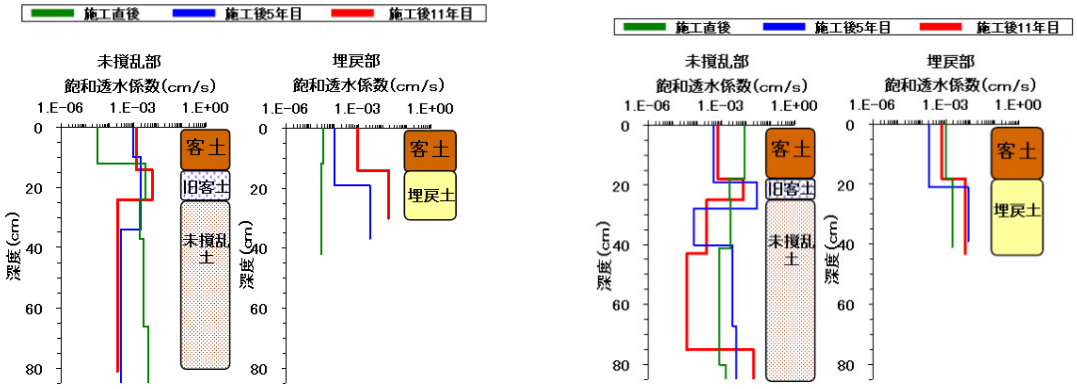
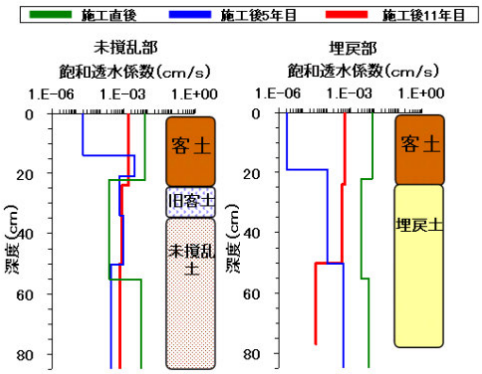


図 11　飽和透水係数(ホタテ貝殻区)

※図中の柱状図は施工後 11 年目の柱状図である。



5)　疎水材性状

ホタテ貝殻は二枚貝であり、形状がほぼ平らな殻を左殻、大きく膨らんでいる殻を右殻と呼んでいる。埋設前の新鮮なホタテ貝殻の強度は、左殻が右殻よりも大きな値を示したため、埋設後では、ホタテ貝殻の外観、重量変化、密度、強度を右殻と左殻とに分けて調

査した。

施工後 11 年目に回収したホタテ貝殻の状態を写真 3 に示す。目視観察ではホタテ貝殻区のホタテ貝殻は損傷が若干見られた。チップ区及び附帯明渠に浸漬したホタテ貝殻はホタテ貝殻区に比べ、損傷したものが多かった。また、各試験区では、右殻と左殻での状態に大きな差異は見られなかった。

写真 4 は施工後 11 年目にホタテ貝殻区の下層より採取したホタテ貝殻の表面を拡大したものである。施工後 11 年目では施工後 5 年目までの観察では見られなかった虫喰いの様な小さな孔が多くのホタテ貝殻で見られた。ホタテ貝殻区ではホタテ貝殻の埋設深度の浅い位置と深い位置及びその中間でホタテ貝殻を採取したが、埋設深度が深くなるほど孔のあるホタテ貝殻の枚数の割合が多く観察され、1 枚当たりの孔の数も深いほど多くなる傾向にあった。また、各試験区を比較すると孔の空いたホタテ貝殻の枚数の割合は附帯明渠へ浸漬したものが最も多く、次いで多いのがチップ区であった。ホタテ貝殻区は、深い位置から採取したホタテ貝殻と比較しても、他の 2 つの試験区より孔の空いたホタテ貝殻の枚数の割合が少なかった。また、ホタテ貝殻 1 枚当たりの孔の数も附帯明渠へ浸漬したものが最も多く、次いでチップ区、ホタテ貝殻区（深い位置から採取したホタテ貝殻）の順であった。

写真 3　施工後 11 年目のホタテ貝殻外観

上段左：ホタテ貝殻区左殻、上段右：ホタテ貝殻区右殻
中段左：チップ区左殻、中段右：チップ区右殻
下段左：附帯明渠浸漬左殻、 下段右：附帯明渠浸漬右殻
※ホタテ貝殻区の貝殻は貝殻区下層部より採取したものである（表 1 参照）。

前述のとおり水質分析結果から、ホタテ貝殻を埋設した暗渠ではCaの溶出が継続していることが明らかとなっている。すなわち、今回観測された多数の小さな孔は長期にわたるCa溶出により発現したものと推察される[12]。また、埋設位置が深いほど孔が多いことと、附帯明渠に浸漬したホタテ貝殻の孔の数が最も多いことから、水に浸漬している時間

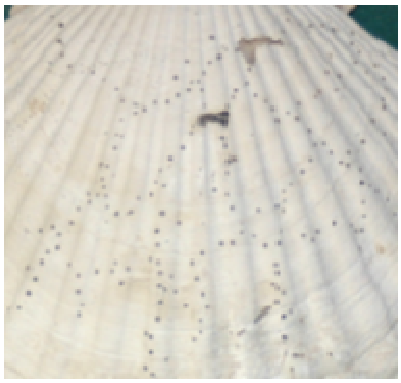


写真 4　採取ホタテ貝殻の表面
（ホタテ貝殻区下層）

が長いほどCaの溶出が多くなると考えられる。さらに、孔の周辺部は指で強くつまむ程度でも崩れ、また、後述する載荷強度試験時には、孔の周辺でホタテ貝殻が割れていることから、孔部分のホタテ貝殻の強度は低下しているといえる。

図 14 に、施工後 5 年目[6] と施工後 11 年目にホタテ貝殻区、チップ区及び附帯明渠で回収したホタテ貝殻の成分構成を示す。なお、成分構成は、試験区の違いによる差、採取深度の違いによる差、左殻、右殻による差のいずれも見られなかった。

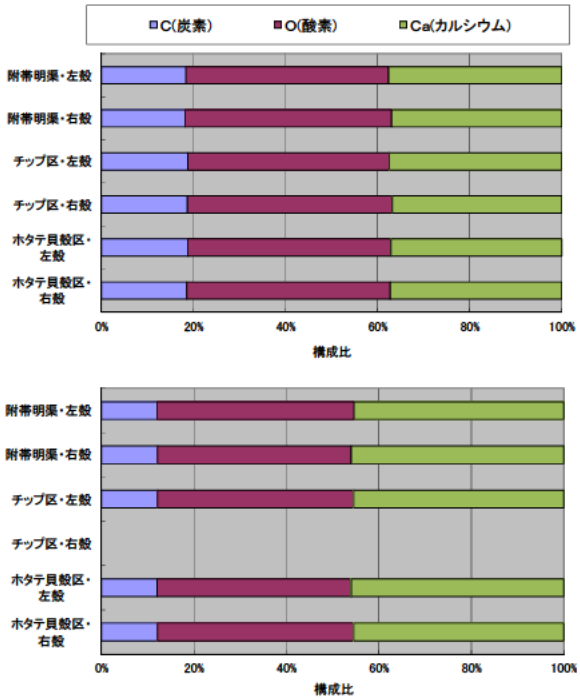


図 14　X 線分析によるホタテ貝殻の成分構成
（上；施工後 11 年目、下；施工後 5 年目）
※5 年目のチップ区・右殻は未計測

施工後 11 年目では施工後 5 年目[6] に比べ、Caの占める割合が減少している。ホタテ貝殻は殻本体（炭酸カルシウム〔$CaCO_3$〕、コンキオリン〔タンパク質〕）と殻皮（キチン質〔$(C_8H_{13}NO_5)_n$〕）から構成されている[13]。炭酸カルシウムは、泥炭の土壌酸性分と反応して溶出するが、キチン質の殻皮は難溶性のため溶出しにくい[14]。このため、施工後 11 年目ではCaの割合が減少し、炭素の割合が増加したものと推察される。

次に、ホタテ貝殻の重量の経年変化として残存率を図 15 に表す。この残存率とは、埋設当時のホタテ貝殻重量を 100%とした場合の経年変化後の重量との比率を表す。

附帯明渠に浸漬していたホタテ貝殻は損傷が多く、浸漬開始時と比べて 11 年目のホタテ貝殻は 5～6 割ほどの重量になっていた。一方、ホタテ貝殻区に埋設していたホタテ貝殻は施工後 11 年目でも 98%と高い残存率を示した。水に浸されている時間の長短に伴う Ca 溶出の違いにより差が生じたと推察される。

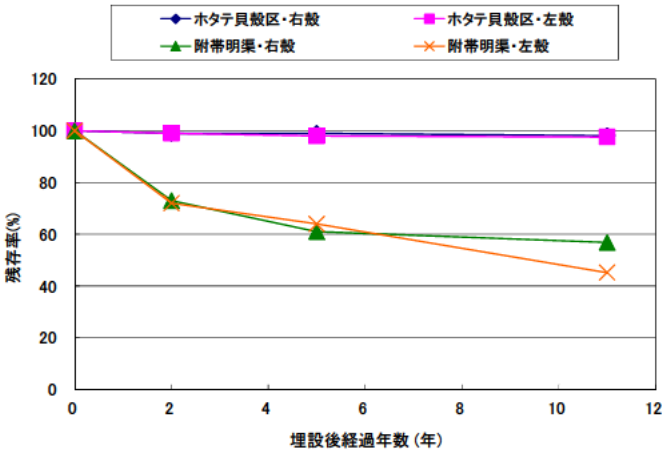


図 15　ホタテ貝殻の重量の経年変化

図 16 にホタテ貝殻の密度の経年変化を示す。密度は、施工後 5 年目に一時、値が下がったものの、ほぼ安定していた。ホタテ貝殻の主成分である炭酸カルシウム分の溶出に伴う密度の低下が懸念されたが、埋設、あるいは浸漬後に残存するホタテ貝殻の密度は、11 年が経過しても新鮮時と比べて顕著な差として表れるほど大きく低下しなかった。

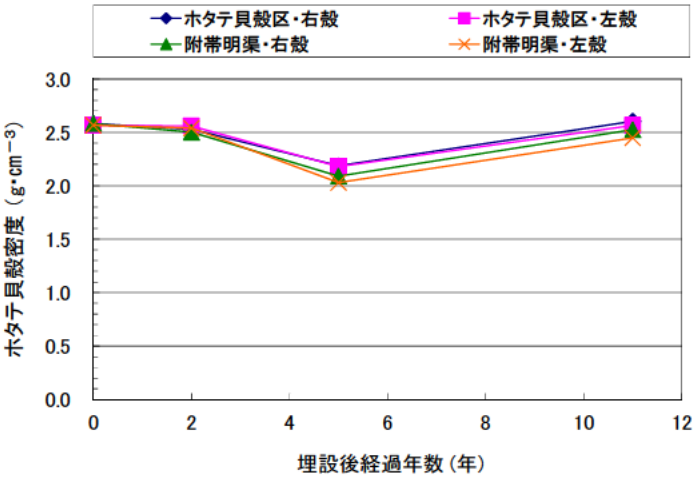
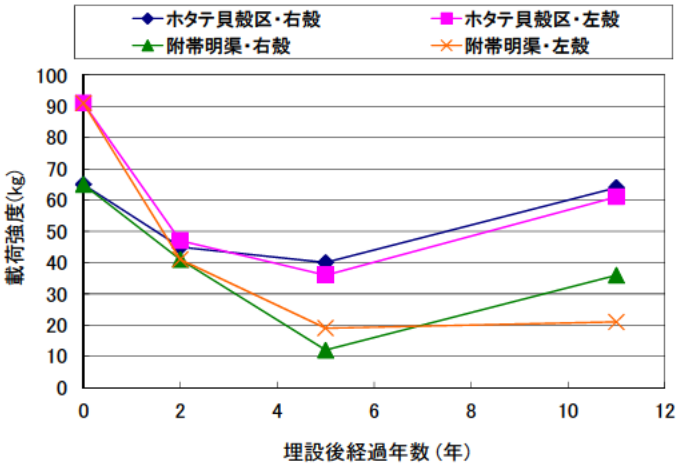


図 17 にホタテ貝殻の載荷強度の経年変化を示す。新鮮なホタテ貝殻の左殻と右殻には有意な強度差があったが、埋設後 2 年目以降はその強度差はなくなった。埋設後 2 年目以降のホタテ貝殻の載荷強度は、ホタテ貝殻区では 36～64kg、附帯明渠に浸漬したものでは 12 ～41kg の範囲にあり、ホタテ貝殻区の方が附帯明渠に浸漬したものに比べて大きい値で推移した。



ホタテ貝殻区の暗渠断面は、施工後 11 年目でも施工直後の断面[3] とほぼ同じであったことを鑑みると、少なくとも施工後 11 年目までは断面を保持するのに必要な疎水材としての強度は維持されていると考えられる。

また、施工後 2 年目[3] 及び施工後 11 年目にチップ区から採取した埋木チップの状態を写真 5 に示す。なお、附帯明渠に浸漬したチップについては、ナイロン製の袋は回収したものの中身は消失していた。袋の破損は認められなかったことから、施工後 11 年目までにチップが分解、あるいは細片化して溶出したものと推察される。

施工後 11 年目の目視観察では表面の一部に焦げたような跡が見られたほか、表面は軟化していた。この特徴は木材腐朽菌の一つである軟腐朽菌による腐朽の特徴と一致する[15]。

また、施工後 11 年目のチップは施工後 2 年目におけるチップ[3] と比較して細片化は進んでいなかった。

写真 5　埋木チップの状態

左：施工後 2 年目 [3]、中：施工後 11 年目拡大図、右：施工後 11 年目

埋木チップの成分分析結果を表 2 に示す。C/N比の低下は腐朽が進んでいることを意味する[16]。施工後 11 年目にC/N比が大きく低下していることから、腐朽が進んでいることが示唆される。また、リグニンの割合は施工後 11 年目に増加しており、逆にセルロースやヘミセルロースが含まれる多糖類の割合は低下している。このことは、軟腐朽菌による腐朽の特徴[16] と一致している。したがって、施工後 11 年目の埋木チップは腐朽が進行しているものの、材の強度低下が他の腐朽形態より遅い[16] 軟腐朽であることが明らかになった。

表 2　埋木チップの成分分析結果

成分	施工直後	施工後 2 年目 [3]	施工後 5 年目 [6]	施工後 11 年目
リグニン ※1	25	34	35	39
C/N	166	220	262	59
多糖類　※1	54	44	61	47

※１　対絶乾試料（%）

6）圃場地盤高（地盤沈下量）

施工直後と施工後 11 年目の調査圃場の地盤高を図 18 に示す。なお、施工直後のデータは 10m メッシュのデータしかないので、データのない箇所を近傍のデータで補間して図化した。

暗渠施工ライン直上の埋戻部で若干の沈下が 5 年目には確認されはじめていた(ホタテ貝殻区 9cm、チップ区 3cm、慣行区 5cm)。11 年目になるとどの試験区でもさらに沈下が進行し、平均でホタテ貝殻区 13cm、チップ区 13cm、慣行区 12cm であった。特定の試験区の沈下量が大きかったわけではなく、圃場全体が均等に沈下していた。ただし、ホタテ貝殻区やチップ区では暗渠施工ライン上の沈下量が暗渠間に比べて著しく大きかった。施工直後（図 3）と施工後 11 年目（図 10）の暗渠施工断面を見ると、ホタテ貝殻区では暗渠管直上の埋戻土部が、チップ区ではチップ部が圧密したためと考えられた。施工後 11 年目においてホタテ貝殻区、チップ区ともに排水機能に支障は認められていないが、今後、継続

的に排水機能を維持していく上で、ホタテ貝殻区では埋戻土部、チップ区ではチップ部の土壌物理性の変化の経過観察が重要と考えられる。

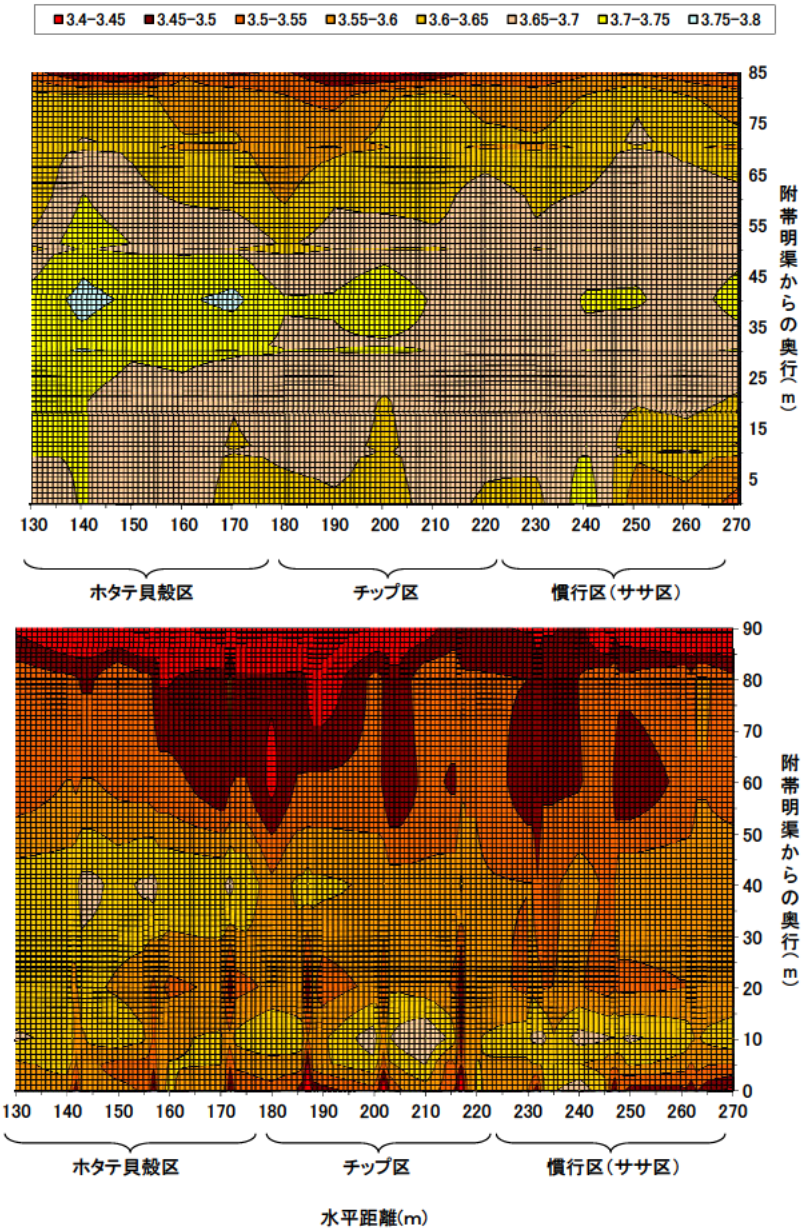


図 18　調査圃場の地盤高（上；施工直後、下；11 年目）

※　凡例の数字は地盤高の範囲を標高で表している。単位は m である。

1．1．3　小括

ホタテ貝殻及び埋木チップを疎水材とする暗渠を施工した泥炭農地において、施工後 11 年目における排水機能及び疎水材性状について調査を実施した。また、過年度の調査結果

を加えた考察を行い、疎水材を用いた暗渠の長期供用後の排水機能の持続性及び疎水材の性状保持に関する検討を行った。その結果、次のことがわかった[17)～19)]。

1) ホタテ貝殻を疎水材に用いた暗渠については、施工後 11 年目においても、排水機能の低下はなかった。埋木チップを疎水材に用いた暗渠については、排水機能の経年変化の有無は判断できなかった。施工後 11 年目のホタテ貝殻区及びチップ区ともに計画基準「暗きょ排水」で要求される地下水位を満たしており、両区の暗渠排水は良好に機能していると言えた。
2) ホタテ貝殻は、ホタテ貝殻区、チップ区とも、貝殻成分の Ca 溶出が続き、貝殻の表面には無数の孔が見られた。また、附帯明渠に浸漬したホタテ貝殻では特に多くの孔が見られ、強度低下が著しかった。泥炭地特有の酸性地下水に長時間、浸かる状態にすることはホタテ貝殻の劣化を促進するものと思われる。ホタテ貝殻区及びチップ区の疎水材下層部のホタテ貝殻は損傷も少なく、疎水材の断面形状の変化もホタテ貝殻の強度低下もほとんどなかった。
3) 埋木チップは木材の強度低下が比較的遅いといわれている軟腐朽菌による腐朽が進行中であった。施工後 11 年目の時点で埋木チップの細片化はほとんど見られず、形状は維持されていた。
4) 以上のことから、ホタテ貝殻及び埋木チップを疎水材に用いた暗渠の排水機能と疎水材性状は、施工後 11 年を経ても維持されていることが確認された。
5) そのほかに、ホタテ貝殻区やチップ区では暗渠施工ライン上の沈下量が暗渠間に比べて大きいことが確認された。今後、継続的な排水機能を維持していく上で暗渠管直上の土壌物理性の変化の経過観察が重要と考えられる。

1．2　疎水材に石灰石を用いた暗渠

1．2．1．調査手法

(1)　調査圃場の概要

調査は北海道天塩郡天塩町の牧草地で平成 21 年 7 月中旬から 11 月中旬にかけて実施した。調査圃場の位置を図 19 に、暗渠施工断面図を図 20 に示す。なお、ここでは、疎水材に石灰石を用いた暗渠（以後、石灰石暗渠と称す）が施工されていた圃場を、№1 圃場及び№2 圃場と称す。

№1 圃場、№2 圃場ともに低位泥炭土であった。また、両圃場の石灰石暗渠は 10m 間隔、平均埋設深 90cm で施工されており、いずれの暗渠管も内径 60mm のコルゲート多孔管が使用されていた。

なお、本調査は、これらの石灰石暗渠の施工後 3 年目に当たる。

図 19　調査圃場の位置

※　この背景地図等データは、国土地理院の電子国土 Web システムから配信されたものである。

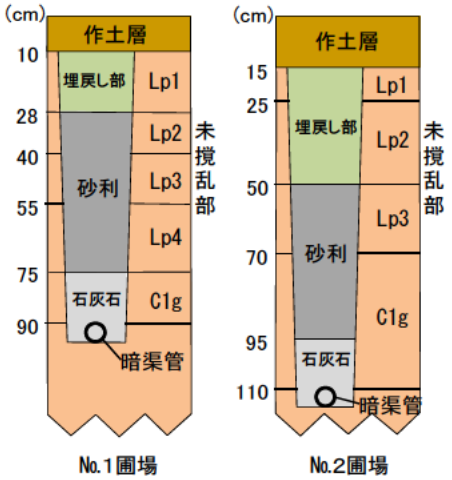


図 20　暗渠施工断面図

（左：№1 圃場、右：№2 圃場）

※ 図中の数値は地表面からの深度を示す。

(2)　調査項目･方法

各調査圃場で下記の調査を行った。地下水位観測孔と暗渠排水量測定器の設置位置及び、土壌断面調査位置は図 21 に示すとおりである。

1)　地下水位調査

図 21 に示すとおり、両圃場の暗渠と暗渠の施工線の間に水位計観測孔を設け、地下水位の測定を行った。水位計には、絶対圧水位計（S&DL mini、5m レンジ）を用い、平成 21 年 7 月中旬から 11 月中旬まで地下水位測定を実施した。測定のインターバルは 15 分間隔

である。なお、「1.2.2.調査結果」以降の中で表す地下水位は、地表面から地下水面までの深度で表す。

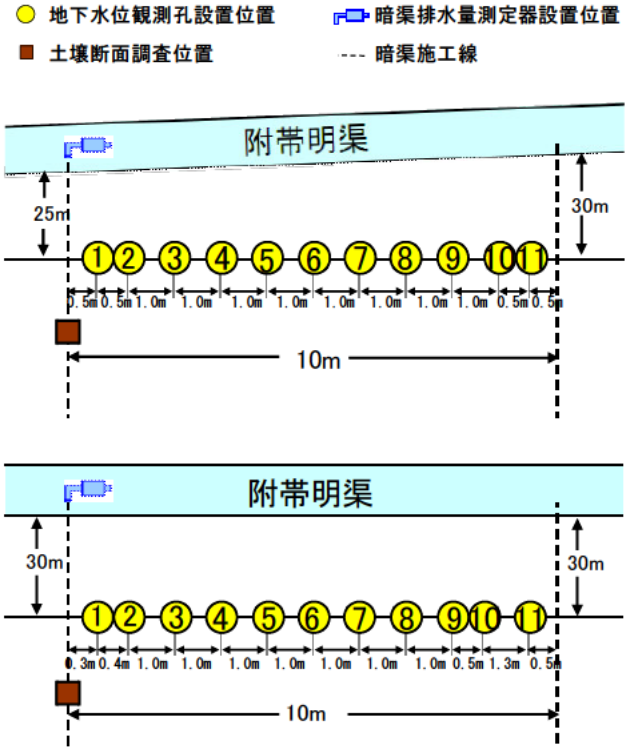


図 21　地下水位観測孔と暗渠排水量測定器の設置位置、及び土壌断面調査位置
（上：№1 圃場、下：№2 圃場）

2）降水量調査

降水量は、アメダスデータ（天塩）を用いた。

3）暗渠管からの排水量調査

暗渠管の落口に暗渠排水量測定器を設置し、平成 21 年 7 月中旬から 11 月中旬までの暗渠管からの排水量を測定した。この暗渠排水量測定器とは、電子式水道メーターを用いた暗渠排水量測定装置である。ここでは、暗渠管からの排水量を 5 分間隔で測定することとした。また、既設暗渠管と電子式水道メーターの間にはストレーナーを設置し、目詰まり防止を図った。

4）土壌断面及び土壌理化学性調査

暗渠施工断面の土壌断面調査を実施するとともに、暗渠施工断面の埋戻部と未撹乱部から土壌を採取し、理化学性について分析した。分析項目及び分析方法は次のとおりである。

① 容積重…実容積法による。

② 強熱減量…電気炉熱焼法（550℃・17 時間）による。

③　腐植…CN コーダー法による。

④　飽和透水係数…変水位法による。

5)　暗渠管からの排水の水質調査

暗渠管の落口から採水し、石灰石の主成分である Ca のほか、pH（H_2O）を分析した。

1. 2. 2. 調査結果

(1)　地下水位

暗渠管付近及び暗渠間中央付近の地下水位の変動状況を調査圃場ごとに示す（図 22）。また、日降水量、暗渠の埋設位置も同図に併せて示す。なお、暗渠管付近の地下水位のデータには、№1 調査圃場では図 21 上段の①の水位計データを、№2 調査圃場では図 21 下段の②の水位計データを用いた。暗渠間中央付近の地下水位データには、№1 調査圃場では図 21 上段の⑦の水位計データを、№2 調査圃場では図 21 下段の⑥の水位計データを用いた。

降雨により、暗渠間中央付近の地下水位が最も上昇したのは、№1 調査圃場では 7 月 28 日の 22cm、№2 調査圃場では 10 月 21 日の 25cmであった。これらの観測日から 3 日後の地下水位は、№1 調査圃場では 47cm、№2 調査圃場では 42cmまで低下していた。降雨後 2～3 日の畑の地下水位の指標を、計画基準「暗きょ排水」では地表面下 40cm～50cmとしており[11]、№1、№2 調査圃場ともに、この指標を満足していた。よって、暗渠の排水機能が維持されていると判断された。

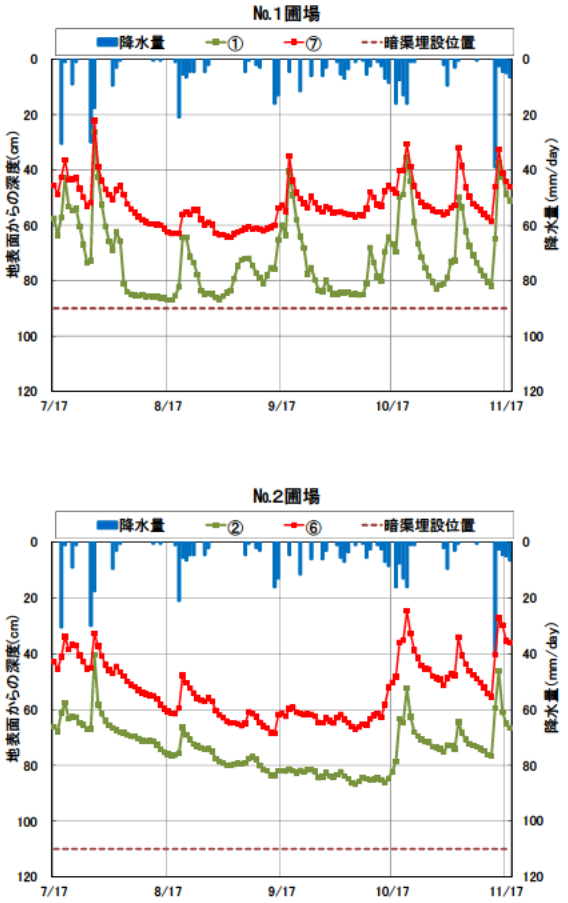


図 22　地下水位の変動

（上：№1 圃場、下：№2 圃場）

(2)　暗渠管からの排水量

図 23 に 1 日あたりの暗渠管からの排水量と日降水量を示す。なお、暗渠管からの排水量

は、各圃場で暗渠排水の影響範囲が異なるため、単位面積あたりの排水量に換算して整理した。

No.1 調査圃場では暗渠管からの排水量は観測期間を通して常に変動していた。一方、No.2 調査圃場では、7 月下旬と 10 月中旬以降においてはNo.1 圃場と同様に暗渠管からの排水量は大きく変動していたが、8 月上旬から 10 月中旬にかけては変動が確認されなかった。No.2 調査圃場では、8 月中旬から 10 月中旬にかけては地下水位の上昇が小さかったことが原因となって（図 22)、暗渠管からの排水量も少なくなったと考えられる。どちらの圃場でも、降雨に伴う地下水位の上昇が暗渠管からの排水量に影響を及ぼしていた。

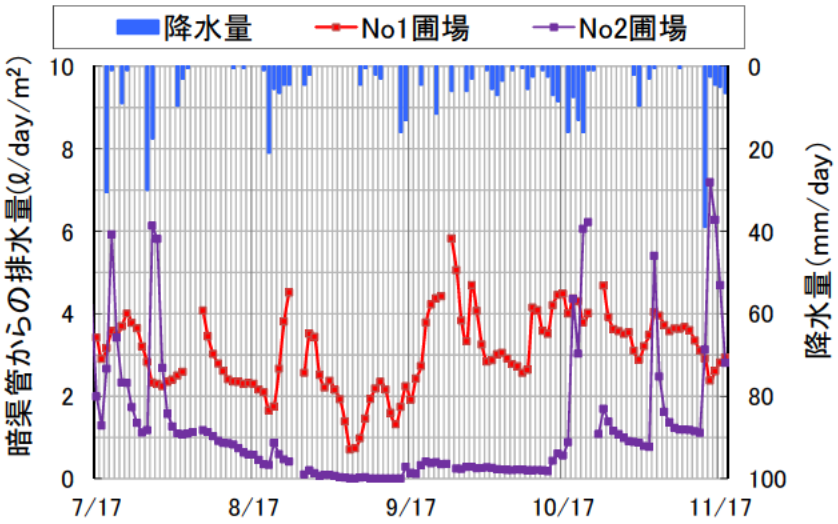


図 23　暗渠管からの排水量の変動

(3)　土壌断面及び土壌理化学性

暗渠施工断面は図 20 に示したとおりである。土層区分は、No.1、No.2 両調査圃場ともに、表層より作土層、その下にヨシを主体とした泥炭土層、さらにその下部に泥炭混じりの粘土層となっている。また、暗渠管の管頂より上方に 15cm 厚で石灰石が、さらにその上部に砂利が疎水材として埋戻されていた。土壌断面調査のため掘削した箇所における暗渠の埋設深は、No.1 調査圃場では 90cm、No.2 調査圃場では 110cm であった。

No.1、No.2 両圃場の暗渠施工断面付近の未撹乱部から採取した土壌の容積重、腐植、強熱減量の分析値を図 24～26 に示す。No.1、No.2 調査圃場ともに強熱減量や腐植が大きく、また、容積重が小さい値を示しており、どちらの圃場でも泥炭土壌の特徴を示していた。

図 27、図 28 は、容積重と飽和透水係数を埋戻部と未撹乱部でそれぞれ比較した図である。埋戻部の容積重はNo.1、No.2 調査圃場ともに、未撹乱部と同程度の値であった。また、埋戻部の飽和透水係数は、No.1 調査圃場では 1×10^{-3}cm/sのオーダー、No.2 調査圃場では 1×10^{-2}～1×10^{-3}cm/sのオーダーであり、それぞれ未撹乱部より大きいか同程度の値であった。地

下水位を所定の時間内に所定の深さまで低下させるためには、土壌の物理性が適正なものでなくてはならず、また、必要な地耐力と浸透量を確保するためには、亀裂等の土壌構造が発達し、良好な透水性を保持していることが必要とされている。この目標となる土壌条件として、飽和透水係数は、畑の場合、計画基準「暗きょ排水」では、1×10^{-4}cm/s程度が望ましいとされている[11]。埋戻部の飽和透水係数は、No.1、No.2 調査圃場ともにこの値を満足していたことから、暗渠管上方からの排水ルートが確保されていると推測された。

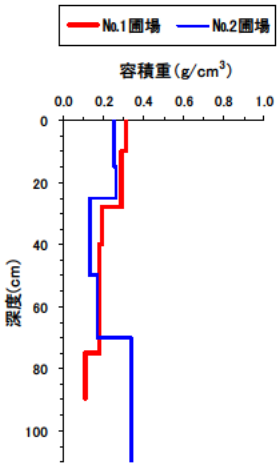


図 24　容積重

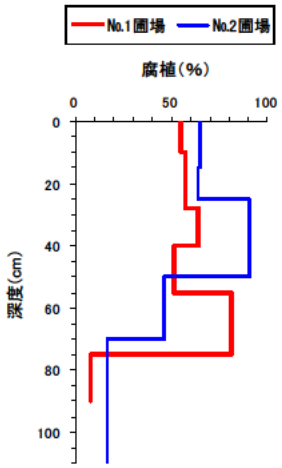


図 25　腐植

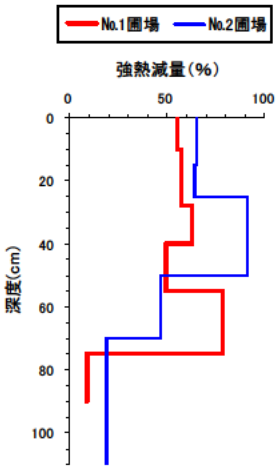


図 26　強熱減量

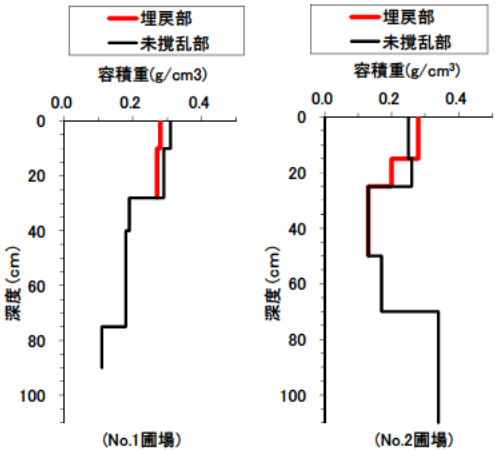


図 27　容積重の埋戻部と未撹乱部との比較
(左：No.1 圃場、右：No.2 圃場)

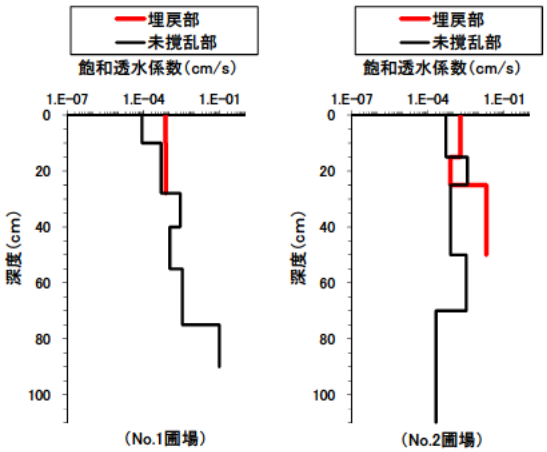


図 28　飽和透水係数の埋戻部
未撹乱部との比較
(左：No.1 圃場、右：No.2 圃場)

(4)　暗渠管からの排水の水質

暗渠排水のCa濃度は、No.1、2 調査圃場ともに、従来型暗渠のCa濃度よりも高い値を示し

た（表 3)。一般に泥炭土壌から侵出する水は酸性を呈している[20]。この酸性の土壌水が石灰石と反応し、石灰石からCa成分が溶出したと考えられる。また、このことにより調査圃場の暗渠排水のpHは高い値を示したと推測された。

表 3　疎水材に石灰石を用いた暗渠管からの排水の水質

調査項目	調査圃場№		参考値[20]
	№1	№2	
pH（H_2O）	6.5～6.8	6.3～6.4	4.6～6.9
Ca(mg/ℓ)	55～56	123~127	0.7～6.5

1. 2. 3　小括

石灰石を疎水材に用いた暗渠の排水機能の実態が次のとおり明らかになった[21]、[22]。

1) 石灰石暗渠を施工して 3 年が経過した圃場では、降雨後 3 日目の地下水位は 40cm 以下に低下していた。また、暗渠の埋戻し部の飽和透水係数は、1×10^{-2}～1×10^{-3}cm/s のオーダーであったことから、暗渠管上方からの排水ルートが確保されていると推測された。これらのことから、施工後 3 年が経過した石灰石暗渠は適正な排水機能を維持していることがわかった。

2) 今回の調査結果は、石灰石暗渠の施工後 3 年目に得られたデータであることから、今後、石灰石暗渠の機能状況を把握するためには、長期に渡る経年変化の追跡が重要であると考えられた。

1．3．疎水材に火山礫を用いた暗渠

1．3．1．調査手法

(1) 調査圃場の概要

調査圃場は北海道空知郡南幌町の水田転換畑（平成 22 年は秋まき小麦を栽培）であり、A～F の 6 圃場とした（図 29）。調査期間は、営農と天候に配慮し、秋まき小麦の収穫後の平成 22 年 8 月から積雪前の 11 月までとした。

これら調査圃場には、疎水材に火山礫を用いた暗渠（以後、火山礫暗渠と称す）が施工されており、暗渠の施工後 3～9 年が経過していた（表 4）。いずれの圃場でも、暗渠管には内径 80mm のコルゲート多孔管が使用されており、暗渠管と暗渠管の間隔は 10m であった。

また、どの調査圃場の土壌とも地表面から、耕起による影響が見られた作土層、グライ化が見られた盛土層（従来の表土）、ヨシ混じりの泥炭層で構成されていた。

図 29　調査圃場位置

※　この背景地図等データは、国土地理院の電子国土 Web システムから配信されたものである。

表 4　暗渠施工後の経過年数

圃場名	経過年数
A 圃場	9 年
B 圃場	9 年
C 圃場	6 年
D 圃場	6 年
E 圃場	3 年
F 圃場	3 年

(2) 調査項目・方法

1) 地下水位調査

降雨後の地下水位の低下状況を確認するために、各圃場の暗渠と暗渠の施工線の間に水位計観測孔を設け、地下水位の測定を行った（図 30）。観測期間は平成 22 年 8 月から 11 月までである。地下水位観測孔は、1 圃場あたり 3 箇所設置した。調査結果で示す地下水位は、3 箇所から得られたデータの平均値とした。なお、水位計には絶対圧水位計（水位測定範囲 4m）を用い、水位計の測定間隔は 60 分とした。

計画基準「暗きょ排水」では、地下水位は降雨後 2～3 日で 40～50cm、降雨後 7 日で 50～60cmまで低下することが、作物の生育にとって望ましいとされている[11]。ここでは、地下水位のピーク時を基準として、2～3 日後、及び 7 日後の地下水位をもって暗渠の機能を評価することとした。

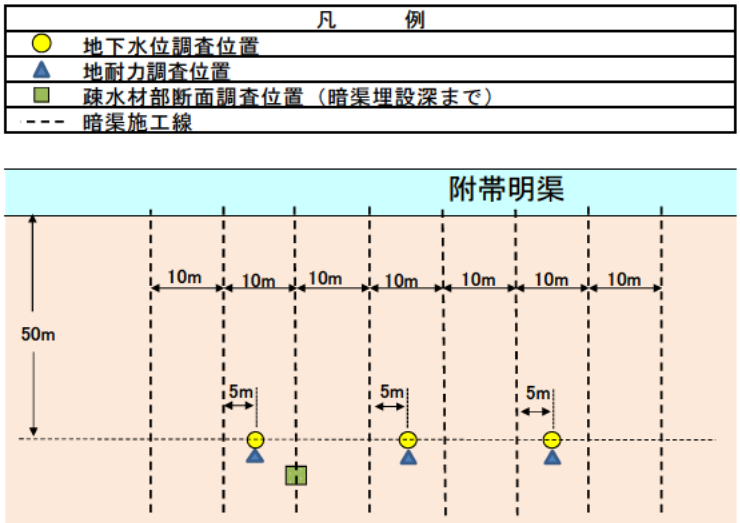


図 30　調査位置の概要

2）地耐力調査

降雨後の地耐力を確認するために、貫入式土壌硬度計（コーンの先端角度：30°、コーンの断面積：2cm²）を用いてコーン指数を測定した。各圃場の調査箇所は地下水位を計測した箇所である（図 30）。30mm/day以上の降水量が計測された日の翌日から 3 日間、午前と午後に地耐力調査を実施した。したがって、30mm/day以上の降水量が計測された場合、その日の翌日から 1 圃場あたり 3 地点、それぞれの地点ごとに 3 日間、午前、午後の合計 6 回の地耐力調査を実施した。各圃場の 1 回あたりの地耐力調査結果は 3 地点で得られたデータの平均値とした。なお、計画基準「暗きょ排水」では、農業機械が走行するためには降雨後 7 日目に地表面から 15cmまでのコーン指数の平均値が 0.39MPa以上が確保されていることとしている[11]。本調査ではこの指標をもって地耐力調査結果を評価することとした。降水量の計測には、転倒ます型雨量計を用いた。

3）疎水材部断面調査

1 圃場あたり 1 カ所、暗渠の埋設深まで掘削し、疎水材部の断面形状を確認した（図 30）。本調査圃場では、疎水材部と作土が接続するように火山礫暗渠が施工されていたことから疎水材部断面の形状変化に着目した。

4）疎水材性状調査

疎水材部断面調査時に疎水材の火山礫を採取し、飽和透水係数、及び疎水材に含まれている粒径 0.075mm 以下のシルトと粘土の合計量(以後、シルト･粘土含量と称す)を求めた（表 5）。

表 5　疎水材性状調査の試験項目及び方法

試験項目	試験方法
飽和透水係数	50cc 採土管で未撹乱の試料を採取し、変水位法で飽和透水係数を計測。
シルト・粘土含量	ビニール袋に採取した撹乱試料を 0.075mm 以下にふるい分けをし、重量を計測。

1. 3. 2. 調査結果

(1) 地下水位

平成 22 年 8 月 23 日から 24 日までの期間で合計 63mm の降雨が確認され、8 月 24 日の地下水位が観測期間中で最も高くなった。そこで、8 月 24 日から 2～3 日後、及び 7 日後の地下水位が、計画基準「暗きょ排水」に示されている地下水位の目安を満たしているかどうかを確認した。

A～F のいずれの圃場においても、地下水位は降雨後 2～3 日目には地表面より 40～50cm 以下に、降雨後 7 日目には 50～60cm 以下に低下しており（図 31）、暗渠の排水機能は良好であると考えられた。

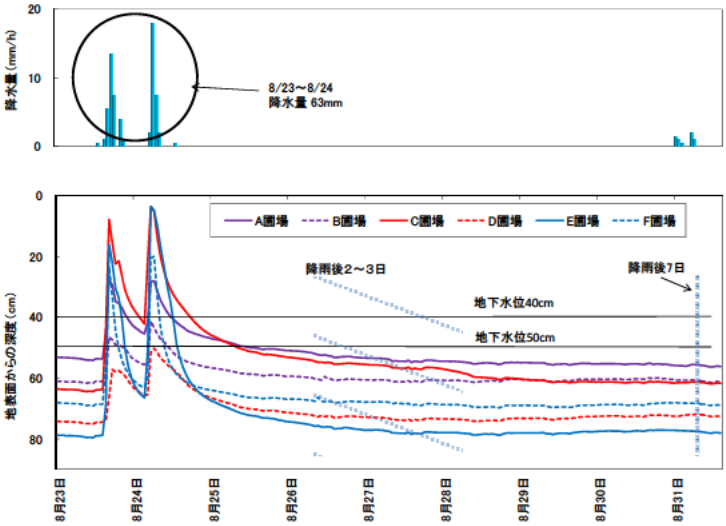


図 31　地下水位の変動

(2) 地耐力

地下水位調査と同様に、8 月 24 日以降の地耐力の回復をもって、暗渠の機能を評価することとした。いずれの圃場も、降雨後 2～3 日目には農業機械の走行に必要なコーン指数である 0.39MPa 以上が確保されていた（図 32）。したがって、暗渠の排水機能は良好であると考えられた。

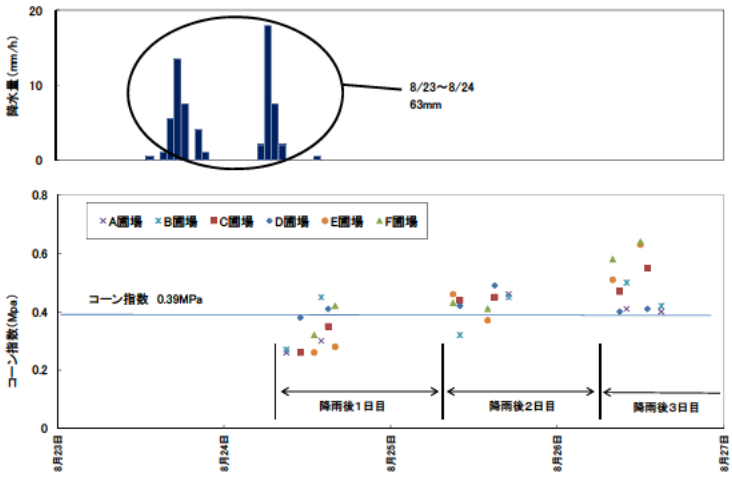


図 32　降雨後のコーン指数の推移

(3) 疎水材部断面

A 及び B 圃場では、暗渠施工時の暗渠溝の深さは地表面より 90cm に、また、地表面より 25cm が作土層となるように暗渠施工がなされていた。また、C～F 圃場では、暗渠溝の深さが 100cm に、作土層の施工厚さについては A、B 圃場と同様に 25cm が確保されるように暗渠施工がなされていた。疎水材の埋設幅は全ての圃場で 15cm を設計値としていた。

表 6　疎水材部の断面（単位：cm）

圃場名	疎水材部の深さ (b)※1	疎水材部の幅 (a) ※1
A 圃場	53 (65) ※2	14.4 (15.0) ※2
B 圃場	57 (65) ※2	14.0 (15.0) ※2
C 圃場	64 (75) ※2	13.7 (15.0) ※2
D 圃場	58 (75) ※2	13.6 (15.0) ※2
E 圃場	79 (75) ※2	13.6 (15.0) ※2
F 圃場	80 (75) ※2	13.1 (15.0) ※2

※1　測定箇所(a)、(b)は図 33 を参照

※2　(　　)の数値は設計値を示す

暗渠施工断面を掘削し、実際に疎水材部の断面形状を確認したところ、表 6 に示すように、営農による耕起深の違いのため、疎水材部の深さにはバラツキが見られ、A、B、C、及び D 圃場では設計値と比較して疎水材部の深さの減少が見られた。E、F 圃場の疎水材部の深さが設計値より大きくなった理由は、暗渠管の埋設位置が施工時に比べて深くなったためと考えられる。また、疎水材部の幅は設計値と比較すると、平均して 1～2cm 程度の縮小が見られた。なお、後述の疎水材性状の結果で示すとおり、どの断面においても所定の計画排水量を排水するだけの幅を有していた。

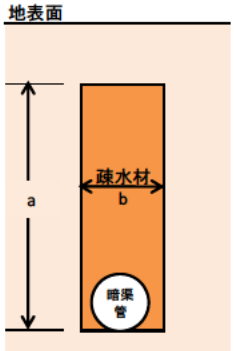


図 33　疎水材部断面測定箇所

※ a の値は、作土層以深で確認された疎水材部の深さを示す。

b の値は、疎水材部の深さ方向の浅部、中間部、深部の 3 箇所で計測した疎水材部の幅を平均した値である。

(4) 疎水材性状

疎水材の飽和透水係数は、1×10^{-2}～1×10^{-1}cm/s のオーダーであった（表 7）。

計画基準「暗きょ排水」では、作土層等から暗渠溝へ流下する排水量を速やかに暗渠管へ通水するために十分な断面（幅）を持っていなければならないとされている。そのため、暗渠溝の幅（すなわち疎水材部の幅）は下記の式を満たすことが条件として示されている[11]。

$$\text{暗渠溝の幅（疎水材部の幅）} > \frac{\text{計画暗渠排水量}\times\text{暗渠間隔}}{\text{疎水材部の透水係数}} \quad \cdots（式 1）$$

したがって、疎水材部の透水係数は次式（式 2）によって導くことができる。

$$\text{疎水材部の透水係数} > \frac{\text{計画暗渠排水量} \times \text{暗渠間隔}}{\text{暗渠溝の幅（疎水材部の幅）}} \quad \cdots \text{（式 2）}$$

式 2 によって、表 6 に示す疎水材部の幅を前提条件に、暗渠間隔 10m、計画暗渠排水量 50mm/day を流すために必要な飽和透水係数を求めると、調査結果で得られた飽和透水係数の値（実測値）は必要な飽和透水係数の値（計算値）よりも大きかった（表 7）。すなわち、いずれの圃場においても、疎水材部は、計画排水量を排水するために必要な機能を維持していると考えられた。

表 7　疎水材部の透水係数（単位：cm/s）

圃場名	飽和透水係数（実測値）(a)	必要な飽和透水係数（計算値）(b)
A 圃場	1.2×10^{-1}	4.0×10^{-3}
B 圃場	6.9×10^{-2}	4.1×10^{-3}
C 圃場	2.2×10^{-1}	4.2×10^{-3}
D 圃場	3.3×10^{-1}	4.3×10^{-3}
E 圃場	1.5×10^{-1}	4.3×10^{-3}
F 圃場	1.7×10^{-1}	4.4×10^{-3}

また、疎水材のシルト・粘土含量は、いずれの圃場でも 5～6%であった（図 34）。既往の文献には、疎水材として使用するためのシルト・粘土含量の目標値として 10%以下が示されている[23]。いずれの圃場でもこの目標値を満足しており、また前述の飽和透水係数の値や地下水位の挙動を鑑みると疎水材は目詰まりしていないと考えられた。

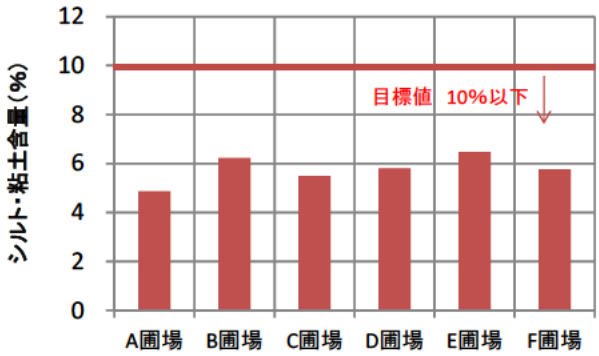


図 34　シルト・粘土含量

1. 3. 3　小括

長期供用後の火山礫暗渠の機能発現実態として、次のことが明らかになった。

1)　施工後 3、6、9 年目のいずれの圃場においても、地下水位、地耐力はともに計画基準「暗きょ排水」の値を満足しており、暗渠の機能低下は認められなかった。

2)　疎水材のサンプルを採取し、飽和透水係数、シルト・粘土含量を調査したところ、いずれの圃場の疎水材も、目詰まりを示すような兆候は認められなかった。

3)　これらのことから、疎水材に火山礫を用いた暗渠は長期供用後においても機能持続性が確保されていると考えられる。なお、暗渠の機能低下の要因を解明していくためには、さらに長期にわたる調査が必要になると考えられる。

２　暗渠機能の長期維持のための機能診断手法の提案

暗渠排水工の機能を診断する際には、降雨後の地下水位の低下や地耐力の回復を確認するために、地下水位調査や地耐力調査が実施されている。この地下水位調査は、圃場に地下水位観測孔を設置して計測を行うため、設置に手間がかかり、また、営農に支障をきたす場合がある。

一方、地耐力調査は、貫入式土壌硬度計を用いてコーン指数を測定する簡易な調査法であり、営農に支障をきたす事はない。そこで、地耐力調査の結果から地下水位を推定することによる、簡易な暗渠排水工の機能診断手法を提案するための調査及び検討を行った。

2．1．調査方法

2．1．1．調査圃場の概要

調査は北海道空知郡南幌町の圃場で実施した。この調査圃場は、「1．3．疎水材に火山礫を用いた暗渠」に示すA～Fまでの6圃場である。

2．1．2．調査項目

(1)　地下水位調査

「1．3．疎水材に火山礫を用いた暗渠」で示した地下水位調査結果を用いた。

(2)　地耐力調査

地下水位の計測箇所付近で、貫入式土壌硬度計（コーンの先端角度:30°、コーンの断面積 2cm^2）を用いて、地表面から 5、15、25cm の深さのコーン指数を測定した。この地耐力調査は、30mm/day 程度の降雨後、1 日目と 3 日目に実施した。各圃場の測定回数の内訳を表 8 に示す。

表 8　地耐力調査の実施期間

圃場名	地耐力調査の実施日						計
	8/24 (1日目)	8/26 (3日目)	9/8 (1日目)	9/10 (3日目)	10/5 (1日目)	10/7 (3日目)	
A圃場	1	1	1	1	1	1	6
B圃場	1	1	1	1	1	1	6
C圃場	1	1	1	1	－	－	4
D圃場	1	1	1	1	－	－	4
E圃場	1	1	－	－	1	1	4
F圃場	1	1	－	－	1	1	4
計	6	6	4	4	4	4	28

(3)　土壌分析

地耐力調査の実施時に、地表面から 5、15、25cm の深さの試料を採取し、含水比を求めた。

2. 2. 調査結果

2. 2. 1. 地下水位とコーン指数、及び地下水位と含水比との相関関係

A～F圃場で得られた地下水位とコーン指数（地表面から 5、15、25cmの平均値）、及び、地下水位と含水比（地表面から 5、15、25cmの平均値）のそれぞれの 1 次関数は、t検定を行った結果、どちらとも危険率 5%で相関が確認された（図 35、図 36）。また、この 2 変数と地下水位の重回帰式を求めた（式 3）[24]。

これらの相関式を比較した結果、重回帰式の相関係数が最大であった。地下水位を推定するにあたっては、単にコーン指数のみ、あるいは含水比のみで地下水位を推定するより、コーン指数と含水比を併せて地下水位を推定する方が推定値の精度を高められると考えられる。

しかし、今回得られた地下水位の推定式である、コーン指数と含水比による重回帰式の相関係数は 0.64 と高くない。また、図 35、図 36 を見てもデータのバラツキが大きい。これらの相関から求められる推定式のままでは精度に問題があり、地下水位の推定方法としての実用性に欠く。データがばらつく要因としては、同一地域内の近傍の圃場であっても土壌の種類、粒度、容積重等の違いが考えられる。今後、推定式の精度の向上のためには、これらの要因も考慮し、数多くの因子に基づく多変量解析が重要と考えられる。

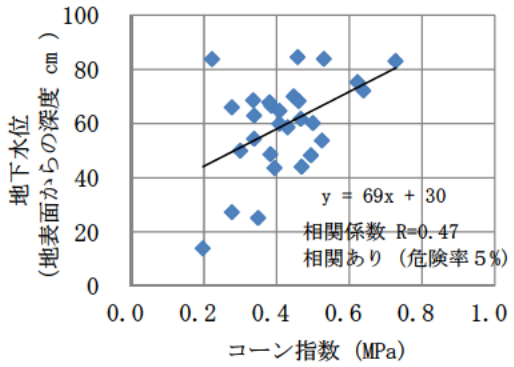


図 35　地下水位とコーン指数との相関関係

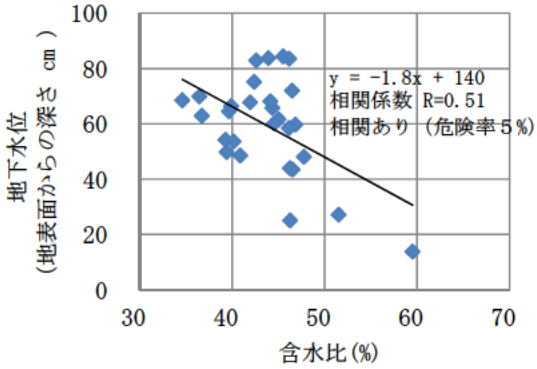


図 36　地下水位と含水比との相関関係

$$Y = 110 + 57X_1 + 1.6X_2 \cdots \text{（式 3）} \qquad \text{（相関係数 R=0.64）}$$

$$\begin{cases} Y & \text{：地下水位(cm)} \\ X_1 & \text{：コーン指数（MPa）} \\ X_2 & \text{：含水比(%)} \end{cases}$$

2. 2. 2. コーン指数を用いた地下水位推定式を活用した暗渠排水工の機能診断手法の提案

図 37 は図 35 と同じであり、地下水位とコーン指数との関係を示している。前述のとおり、地下水位とコーン指数との間には危険率 5%で相関が認められるものの、高い相関係数ではない。相関による推定式では地下水位の実用的な推定に耐えられない。

そこで、同一のコーン指数の値に対して地下水位が最も高い点を結んだ直線(以後、最高水位を求める推定式と称す)を図上に求めた。最高水位を求める推定式と現地で測定したコーン指数を用いると、実際の地下水位は把握できないが、最も高くなった場合の地下水位を想定できる。A～F 圃場では降雨後 3 日目に 0.45Mpa 以上のコーン指数が確認できれば、図 37 に基づき、少なくとも地下水位が地表面より 40cm 以深にあると想定できる。

計画基準「暗きょ排水」には、暗渠整備目標の基本的な指標として、降雨後 2～3 日目に地下水位が地表面より 40～50cm以下まで低下することが示されている[11]。図 37 の最高水位を求める推定式を活用すると、地下水位 40cm相当のコーン指数の値は、0.45MPaである。このように、事前に判断指標となるコーン指数を地域ごとに、あるいは圃場ごとに把握しておくことは暗渠の簡易な機能診断に繋がると考えられる。

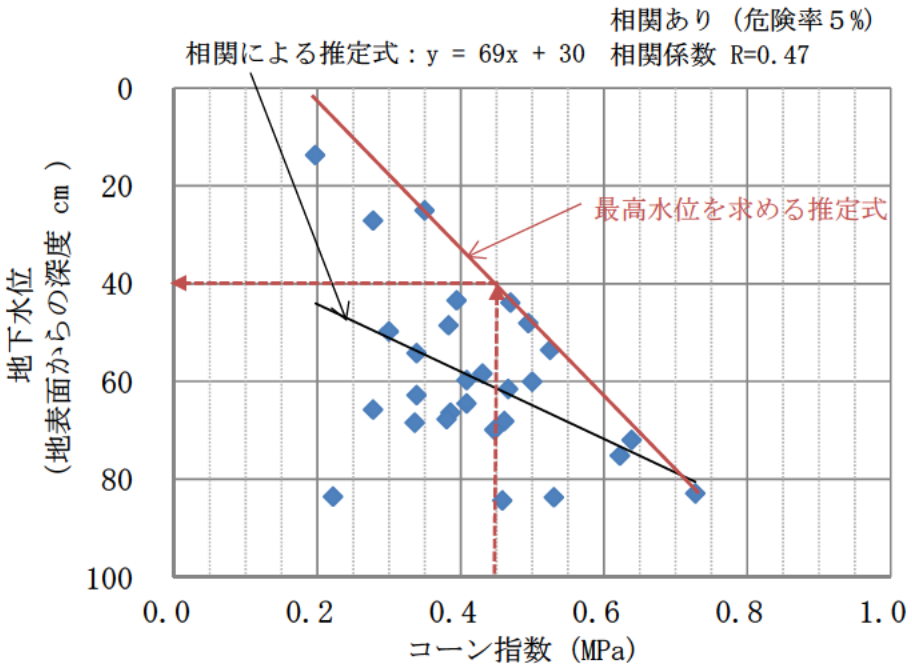


図 37　地下水位とコーン指数の関係

3　暗渠機能の長期維持手法の事例整理

暗渠管の排水口から水の流出が見られず、暗渠の機能が低下していると想定される時には、以下の①～③に示す現象が発生している場合がある[11]。

① 暗渠管内の閉塞による排水不良

② 疎水材の目詰まり

③ 疎水材投入不足による透水性の不良

このため、暗渠の機能を長期にわたり維持するためには、上記①～③に対する対策が必要となる。これらの対策として、実用及び試験的な施工事例を整理した。このうち、3.1.(1)に示す事例については現地で効果を確認した。

3．1．暗渠管内の清掃

(1) 用水路からの注水による暗渠管内の清掃

暗渠管内に用水路からの水を直接注入することが可能な場合、この用水の注入によって暗渠管内の堆泥を除去する方法を採用している例がある（図 38)。この作業はフラッシングと呼ばれている。近年の水田整備では、フラッシングに対応した暗渠が整備されてきている[25]、[26]。

このフラッシングシステムには、用水路から暗渠管へ接続しているパイプに水甲が装着されており、フラッシングを行う時には、この水甲をオープンにすることで、用水路から暗渠管へ注水される。なお、この水甲は耕作道路沿いに設けることで、車両で移動しながら、効率的にフラッシング作業を行うことができる。

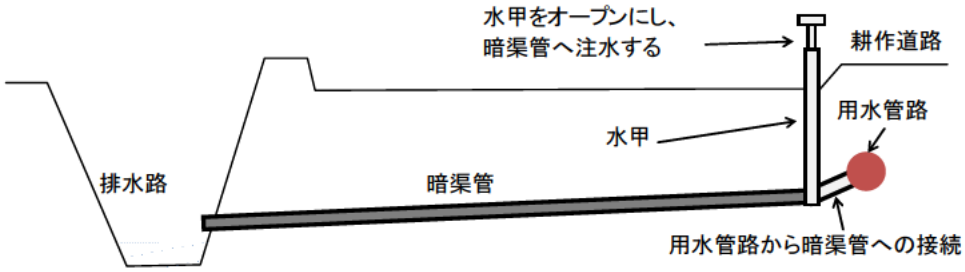


図 38　暗渠管のフラッシングシステムの概念図
（用水管路から暗渠管へ注水する場合）

フラッシングシステムの効果を確認するために、前述の「1．3．疎水材に火山礫を用いた暗渠」に示した、北海道空知郡南幌町の調査圃場において小型のビデオカメラを火山礫暗渠の管内に挿入して堆泥状況を観察した（写真 6～8)。なお、このビデオカメラの挿入可能延長は、暗渠管落口から 30m である。

観測の結果、いずれの圃場においても、通水を阻害するような堆泥は認められなかった。

土砂の付着量が少なかったのは、暗渠の施工後 6 年が経過していたものの毎年 1 回、春先にフラッシングを実施していた圃場であった（写真 7）。このことから、定期的なフラッシングが暗渠管の通水性の確保に有効であることが確認された。

写真 6　暗渠管内の観測結果
(暗渠施工後経過年数；3 年、フラッシング状況；暗渠の施工後 1 年目のみ実施)

写真 7　暗渠管内の観測結果
(暗渠施工後経過年数；6 年、フラッシング状況；暗渠の施工後毎年 1 回、春先に実施)

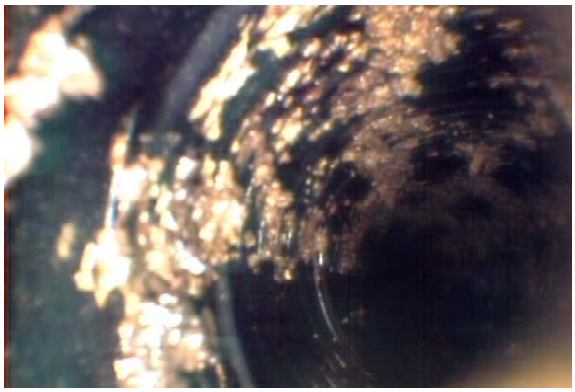


写真 8　暗渠管内の観測結果

（暗渠施工後経過年数；9 年、フラッシング状況；暗渠の施工後 1 年目のみ実施）

(2) スポット孔による清掃

甲谷らは、スポット孔による暗渠管内の清掃試験を実施している[27]。これは、暗渠の管頂付近までオーガーで径 10cmの孔（以後、スポット孔と称す）を施工し、その孔に注水することで、暗渠管を清掃する方法である（図 39）。

このスポット孔からの注水によって暗渠管内の泥土が流れ出し、清掃完了後には、降雨に対してほとんど排水が見られなかった暗渠から排水が確認されたと報告されている。

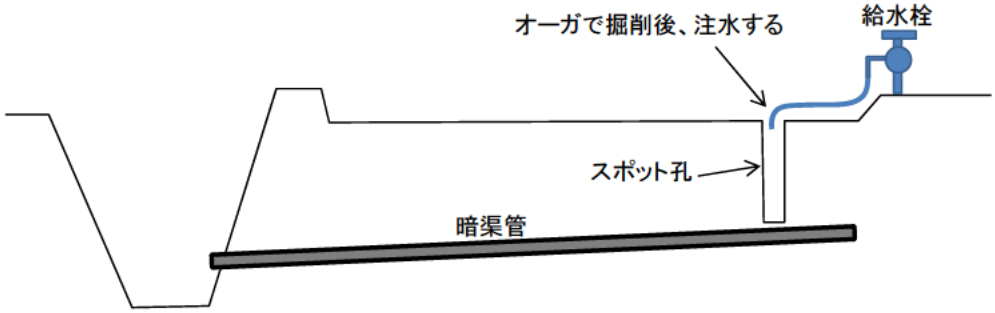


図 39　スポット孔による暗渠の清掃の概念図

(3) 動力噴霧機を用いた清掃

計画基準「暗きょ排水」には、暗渠管に洗管ノズルを挿入し、管内の泥土を除去する方法が示されている[11]。用水路の水を高圧で洗管ノズルから噴出するために、動力噴霧機が用いられている。洗管ノズルの挿入方法には、①暗渠立上り管から挿入する方法、②暗渠の排水口から挿入する方法がある。①の場合には、用水路の水を流入させながら、洗管ノズルを暗渠管内へ送り込むことが可能である。一方、②の場合では、用水路の水を送り込みながらの作業は不可能であるが、暗渠立上り管が設置されていない圃場で清掃が可能な方法である。

3. 2. 疎水材の補充

疎水材にもみ殻を用いた暗渠で、もみ殻の腐朽が進んだ時には、暗渠直上付近まで掘削し、新しい疎水材を補充する方法（図 40）が提案されている[28]。この方法は、既設の暗渠管をそのまま残すため、暗渠管を新たに埋設

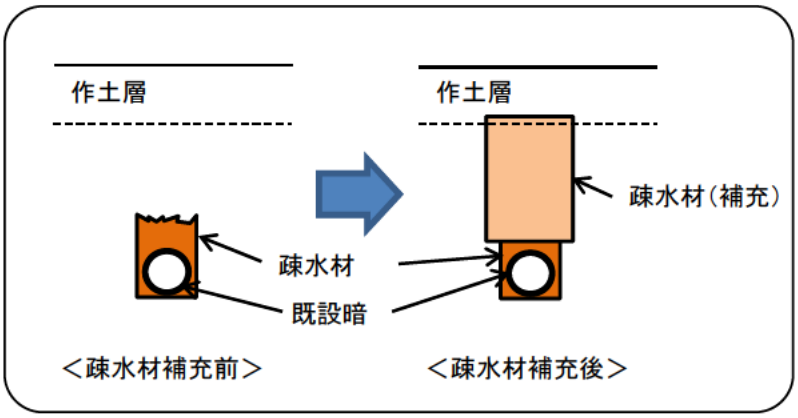


図 40　疎水材の更新の概念図

するよりも、工事費の縮減が可能である。

甲谷らの試験結果[27] によると、暗渠疎水材の更新施工前(田畑輪換栽培を 6 作続けた)の暗渠排水の状況は、暗渠排水率（暗渠からの排水量/全降水量）12.7%と必ずしも良好とはいえなかったが、更新施工後に測定した 5 年間の平均暗渠排水率は 24.4%と更新施工前の約 2 倍に上昇したとある。また、村島らの試験結果[28] では、既設の暗渠が蛇行している場合があり、既設暗渠の直上に疎水材を投入するためには熟練した掘削操作が必要になると報告されている。

上記の工法は、トレンチャーもしくはバックホウを用いて掘削する。一方、簡易にもみ殻を充填する工法として、切削部とホッパー部で構成される安価な機械を農業用トラクターに装着し、もみ殻の充填を行う方法が岩佐らによって考案されている[29] 。

3. 3. 補強暗渠の導入

暗渠疎水材に用いられているもみ殻の腐朽が進み、暗渠の排水機能が低下した圃場に、「補強暗渠」とよばれる別の暗渠を新設することによる、排水機能の回復効果を千葉らが検証している(図 41)。この補強暗渠の暗渠疎水材には腐朽しない砕石が利用されている[30]。

補強暗渠の効果の検証結果として、疎水材のもみ殻が腐食した暗渠に補強暗渠を追加した圃場(以後、試験区と称す)、疎水材のもみ殻が腐食した暗渠の圃場(以後、腐食区と称す)、疎水材のもみ殻が腐食していない暗渠の圃場(以後、対照区と称す)を設定し、それぞれの圃場における降雨後の暗渠排水量、地下水位が地表面下 40cm 深に低下するまでの日数を比較した結果を報告している。試験区の降雨後の暗渠排水量、地下水位が地表面下 40cm 深に低下するまでの日数は対照区と比べて遜色がなく、腐食区と比べると明らかに効果があることを示している。

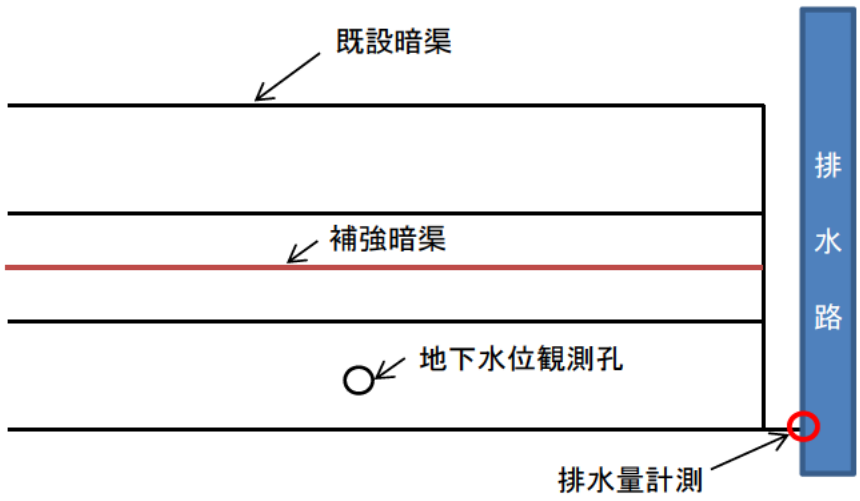


図 41　補強暗渠の配置の概念図

あとがき

ホタテ貝殻や埋木チップを疎水材に使用した、長期供用後の暗渠工の排水機能に関して次のことが明らかになった。

ホタテ貝殻や埋木チップを疎水材に使用した暗渠工の排水機能は慣行的な工法と比べて11 年経過した時点でも差異がなく、ホタテ貝殻、埋木チップともに排水機能が維持されていた。また、疎水材としてのホタテ貝殻は、強度、密度等の変化を見る限り特に経年劣化を示す現象が認められず、11 年目でも十分に耐久性を有していると考えられる。ただし、ホタテ貝殻成分のカルシウム分の溶出の兆候が伺われることから、今後も経過観測が必要と考えられる。

石灰石を疎水材に用いた暗渠の排水実態が次のとおり明らかになった。

石灰石暗渠を施工して 3 年が経過した圃場では、降雨後 3 日目の地下水位は 40cm 以下に低下していた。また、暗渠の埋戻し部の飽和透水係数は、1×10^{-2}～1×10^{-3}cm/s のオーダーであったことから、暗渠管上方からの排水ルートが確保されていると推測された。これらのことから、施工後 3 年が経過した石灰石暗渠の排水機能は、維持されていることがわかった。また、酸性を呈している排水の水質も改善が認められた。

ただし、今回の調査結果は、石灰石暗渠の施工後 3 年目に得られたデータであることから、今後、石灰石暗渠の機能状況を把握するためには、長期に渡る経年変化の追跡が重要であると考えられた。

火山礫を疎水材に用いた暗渠を対象として、暗渠機能の低下要因の解明を試みたところ、次のことが明らかになった。

施工後 3、6、9 年、いずれの圃場も、地下水位、地耐力ともに計画基準「暗きょ排水」の値を満足しており、暗渠の機能低下は認められなかった。また、疎水材のサンプルを採取し、飽和透水係数、シルト・粘土含量調査を行ったところ、いずれの圃場の疎水材も、目詰まりは認められなかった。暗渠の機能低下の要因を解明していくためには、さらに長期に渡る調査が必要であると考えられた。

また、地表面に近い箇所のコーン指数や含水比の計測値を用いた重回帰式から地下水位を推定できる可能性が確認できたことから、圃場の排水性の簡易的な判断手法としてこれらを指標とすることが有効と考えられた。

さらに、今後、暗渠機能の長期維持手法を提案していくための基礎資料として、これまでに施工されてきた暗渠管の清掃、疎水材の更新方法について、既往の文献を参照して整理した。

参考文献

1) 石渡輝夫、横堀将、横濱充宏、高宮信章：暗渠排水の機能不良要因の解明とその改善対策（その 1)、開発土木研究所月報№498、pp2～9、開発土木研究所、1994

2) 石渡輝夫、横堀将、横濱充宏、高宮信章：暗渠排水の機能不良要因の解明とその改善対策（その 2)、開発土木研究所月報№499、pp.3～11、開発土木研究所、1994

3) 宍戸信貞、森川俊次、中村和正、岡本隆、石渡輝夫：暗渠排水の疎水材として用いた貝殻及び埋木チップの効果と耐久性、開発土木研究所月報№574、pp.18～28、2001

4) 北川巌：圃場の総合的な排水改良技術の確立に関する研究、北海道立農業試験場報告第 113 号、pp.1～42、北海道立中央農業試験場、2007

5) 三坂直樹、長尾諭、今川幸久：泥炭土壌における鉄分流出抑制に有効な暗渠排水疎水材の検討、水と土　第 153 号、pp.91～95、農業土木技術研究会、2008

6) 独立行政法人北海道開発土木研究所農業開発部：泥炭土壌の農地整備に必要な置土工法、排水工法に関する調査・検討　貝殻暗渠等の耐久性調査報告書、平成 14 年度受託研究報告書　北海道における国営土地改良事業に係る技術研究、2003

7) 土壌保全研究室：平成 15 年度独立行政法人北海道開発土木研究所現地講習会資料、2003

8) 石田哲也、山田章：暗渠排水量の自動計測記録装置の開発、第 50 回北海道開発局技術研究発表会、2006

9) 石田哲也、山田章：暗渠疎水材に使用したホタテ貝殻の劣化状況に関する報告、寒地土木研究所月報 №666、pp.20～24、寒地土木研究所、2008

10) 佐藤真由美、三浦真由己、関一人、斎藤直人、北川巌：木質チップの暗渠用疎水材としての利用、林産試験場報第 17 巻 第 1 号、pp.1～6、林産試験場、2003

11) 農林水産省構造改善局：土地改良事業計画設計基準 計画「暗きょ排水」基準書 技術書、p21, p37, p39, p81, p83, p130, pp.161～164、社団法人農業土木学会、2000

12) 松井信行、道脇綾子：環境の立場から見た炭酸カルシウム、東京外国大学留学生日本語教育センター論集 33、pp.85～96、2007

13) 木下尚子：正倉院伝来の貝製品と貝殻ーヤコウガイを中心にー、正倉院紀要 第 31 号、pp.37～60、2009

14) 日本キチン・キトサン学会：「キチン・キトサンとは」、<http://www.jscc.jp/chitin/chitin_chitosan.html>（最終アクセス 2010 年 1 月 4 日）

15) 北海道立林産試験場：特集「木の家」百年持たせます、林産試だより、pp.6～7、1986

16) 窪田實：暗渠用疎水材としてのカラマツチップーその適応性についてー、林産試だより、pp.6～10、1996

17) 岡村裕紀、大深正徳、中山博敬、山田章：泥炭農地における疎水材を用いた暗渠の長期供用後の排水機能の持続性と疎水材の性状保持に関する検討、独立行政法人土木研

究所寒地土木研究所月報№682、pp.6～7、独立行政法人土木研究所寒地土木研究所、2010
18）岡村裕紀、大深正徳、中山博敬：長期供用後の疎水材型暗渠の排水機能持続性と疎水材の性状変化、第 53 回北海道開発技術研究発表会論文集、2010
19）岡村裕紀、大深正徳、中山博敬：泥炭農地における長期供用後の暗渠疎水材性状変化、平成 21 年度農業農村工学会大会講演会、2009
20）北海道開発局：サロベツ総合調査報告書（泥炭地の変遷）、p47～62、1978
21）大岸譲、大深正徳、松里浩二：疎水材に石灰石を用いた暗渠排水の排水性について、第 53 回北海道開発技術研究発表会論文集、2010
22）大岸譲、大深正徳、松里浩二：石灰石を疎水材に用いた暗渠の排水機能、平成 22 年度農業農村工学会大会講演会、2010
23）北川巌、横井義男、後藤元、守屋明：北海道における各種暗渠疎水材の理化学性－暗渠排水の機能向上に関する研究（Ⅳ）－、第 47 回農業土木学会北海道支部研究発表会講演集、pp128～129、農業土木学会北海道支部、1998
24）根岸卓郎：理論応用統計学、pp140～145、養賢堂、1972
25）長土居智直、武下和幸、福田学：農地再編整備事業における効果発現に関する調査手法の紹介、第 54 回北海道開発技術研究発表会論文集、2011
26）藤井幸基、小野健太郎、橋本諭：国営農地再編整備事業　妹背牛地区における地下水位制御システムの構造と利用状況を踏まえた検証、第 53 回北海道開発局技術研究発表会論文集、2010
27）甲谷潤、川戸義行、足立建夫：暗渠疎水材の更新法とスポット孔による暗渠管の清掃法、農業土木学会誌 Vol.57、pp41～45、社団法人農業土木学会、1989
28）村島和夫、臼池秀紀、池登志幸、中田芳夫：石川県における暗渠排水機能の更新に関する試み、水土の知 Vol.78、pp11～14、社団法人農業農村工学会、2010
29）岩佐郁夫、菅原強、千田智幸：暗渠もみ殻疎水材の開削充填機および作業方法の考案、水土の知 Vol.76、pp.46～47、社団法人農業農村工学会、2008
30）千葉克己、柴田三郎、小池知巴、神谷慶一、冠秀明：暗渠排水の機能回復工法の検討、平成 22 年度農業農村工学会大会講演会、2010

土木研究所資料
TECHNICAL NOTE of P.W.R.I.
No.4232 July 2012

編集・発行 ©独立行政法人土木研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは

独立行政法人土木研究所
寒地土木研究所　寒地技術推進室
〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1 番 34 号 電話 011-590-4046