

土木研究所資料

吹雪、吹溜り対策に関する調査研究報告書

(その1)

平成3年7月

建設省土木研究所

新潟試験所

Copyright © (1991) 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。

吹雪、吹溜り対策に関する調査研究報告書

(その1)

新潟試験所 所 長 下村 忠一※

主任研究員 石平 貞夫

要 旨

本調査は、多雪地域の吹雪、吹溜り対策手法を確立することを目的として実施しているものである。本報告書では試験地における吹雪実態調査から、北陸地方としての吹雪の特徴をまとめると共に日本各地で発生する吹雪の特徴と北陸地方の吹雪の違いを気象統計から分類し、検討した結果をまとめた。

また、試験地における吹雪観測結果をもとに、対策等の計画を進める上で必要な吹溜り形状を予測するための、シュミレーションプログラムの基本的な考え方と応用範囲についてまとめた。

キーワード：吹雪・吹溜り実態・対策・2次元シュミレーションの開発

※現（社）雪センター企画調整部兼研究調査部

まえがき

雪寒地域における吹雪、吹溜りの発生は、道路交通の安全確保を図る上で非常に大きな阻害現象となる。北陸地方においても吹雪が発生すると視程障害あるいは吹溜りが発生し、車両の走行が阻まれ車内に閉じこめられて起こる重大な、あるいはそれに相当する危機感を与えることが非常に多い。また、道路敷内に吹溜ることによってそれが圧雪されて道路断面がすり鉢状に変形し、走行の自由が失われ対向車両との衝突等事故が発生する。このような吹雪による交通障害を克服するために建設省をはじめ、北海道開発局、科学技術庁、大学等の試験調査機関で基礎理論、現地実験等を行なっている。土木研究所でも昭和25年から3年間にわたって吹溜り防除のための実験を行なっており、その結果を昭和27年に土木研究所報告第84号-5「道路の吹溜り防除工法に関する実験的研究(1)」から昭和31年12月の同報告100号-2にまとめて報告されている。しかしながら、各界における今日に至るまでの吹雪現象の解明、対策工の調査研究は北海道、東北の寒冷地域での乾いた雪質で比較的少雪地域の吹雪に対応するものが主であったため、北陸地方のような温暖で多雪地特有の横方向からの降雪をともなった吹雪となる形態の現象解析、あるいは対策工法については確立されていなかった。したがって本調査は、北陸地方のように積雪深が多く、気温の高い湿った雪の地域に発生する吹雪、吹溜り実態を把握し、それをもとに多雪地での湿り雪の吹雪、吹溜り対策を解明し、吹溜り防止対策、視程障害対策などの冬期道路交通の安全管理指針を作成するために調査研究を実施しているものである。

本報告は、主として大洞原試験地における湿雪地としての吹雪、吹溜り実態調査結果と吹雪の地域的特徴についてのまとめと、上記の実験データをもとにして対策工の効果的な設置計画を立案することを目的として開発した吹溜り形状推定2次元シミュレーションの考え方と応用範囲についてまとめたものである。

目 次

まえがき	
1. 調査目的	1
2. 調査の概要	1
2.1 全体計画	1
2.2 これまでの調査概要	1
3. 吹雪の概要	3
3.1 吹雪の種類	3
3.2 気象月報による吹雪の事例	4
3.3 吹雪に関する国内での調査事例	4
4. 吹雪対策の現状	5
4.1 対策工の種類	5
4.2 恒久対策と仮設対策工	6
4.3 現状の問題点	8
5. 大洞原試験地における吹雪実態調査	8
5.1 試験地の地形・気象概要	8
5.2 調査方法	9
1) 調査項目	9
2) 調査内容	10
5.3 調査結果	11
5.3.1 吹雪発生時の気象	11
1) 吹雪発生時の気温と風速	11
2) 吹雪時の風速と気温の分布	12
3) 吹雪発生分類	12
5.3.2 吹溜りの実態と特性	13
1) 吹溜り形状	13
2) 飛雪空間密度と吹溜り量	15
5.3.3 対策工効果の実験	16
1) 対策工と吹溜り効果の実態	16
2) 湿雪地における対策工のあり方	19
5.3.4 吹雪時の視程特性	20
1) 飛雪空間密度と視程	20
6. 大洞原試験地と北海道、東北の吹雪について	21
6.1 地域的分類	21
6.1.1 使用した資料	21

6. 1. 2	各地の再現確率積雪深	22
6. 1. 3	各地の降雪日日数	23
6. 1. 4	降雪日の気温	25
6. 1. 5	降雪日の日平均風速	26
6. 1. 6	気象分類からみた地域的な特徴	26
6. 1. 7	吹雪対策の概念	27
7.	吹溜り形状シミュレーション手法の開発	28
7. 1	開発目的	28
7. 2	開発概要	28
7. 3	吹雪の発生機構	28
7. 3. 1	跳躍	28
7. 3. 2	浮遊状態における雪粒子の拡散	29
7. 3. 3	地吹雪量の推定	30
7. 4	シミュレーションモデルの基本	31
7. 5	シミュレーションの計算過程	31
7. 5. 1	風速分布	31
7. 5. 2	雪粒子の拡散	33
7. 5. 3	飛雪拡散の地表面境界条件	34
7. 5. 4	吹溜り量の算定式	35
7. 6	2次元シミュレーションの解析結果	37
7. 6. 1	気流の検討	37
1)	盛土道路における気流の検討	39
2)	切土道路における気流の検討	39
3)	中央分離帯と路側にガードレールがある場合の比較	40
7. 6. 2	飛雪空間密度の検討	41
7. 6. 3	吹溜り形状の検討	42
7. 6. 4	視程の検討	43
7. 7	シミュレーション結果の信頼性	44
8.	吹溜りシミュレーションの応用範囲	44
8. 1	柵形式と吹溜り形状	44
8. 2	盛土形状における吹溜り形状	45
8. 3	切土部における吹溜り形状	46
8. 4	柵密度(空隙率)と吹溜り形状	47
8. 5	柵の設置位置と吹溜り形状	47
8. 6	高規格道路に対する吹溜り形状	48

あとがき

..... 50

参考文献

..... 51

1. 調査目的

積雪寒冷地域において、道路交通の安全を阻害する吹雪の発生は吹溜りによる車両の走行不能、飛雪による視程障害等により、重大な事故等の発生要因になりうる現象である。そのため、本調査では北陸地方のような温暖、多雪で湿り雪の吹雪における特性を解明するために、吹溜り発生実態、および防雪施設設置による吹溜り、視程障害対策などの安全管理基準を作成するための基礎資料を得ることを目的に実施した。

2. 調査の概要

2.1 全体計画

本調査は昭和56年度を初年度に新潟県新井市土田地内において対策工効果に関する調査を開始し、59年度より吹雪多発地の妙高村大洞原に試験地を移して、気象観測、吹溜り状況等の調査を実施している（表-1）。

一般的に冬期の自然現象の場では、定量化が難しいため、解析する時にパターン化が行えるようデータ数を多くすることが精度向上を図るために必要なことと考えられる。このようなことをふまえて本調査は図-1に示す項目および手順により調査を進めている。この中で調査の柱は、吹雪発生特性に関する調査、吹溜りに関する調査、吹溜り防止対策に関する調査の3項目として最終目的である合理的な吹雪、吹溜り対策、道路管理手法（案）を確立するために調査を鋭意実施している。

2.2 これまでの調査概要

図-1に示す吹雪の地域特性に関する調査では、北陸地方の吹雪特性を解明するために大洞原試験地での飛雪の空間濃度、気象（主として風速、気温）等の調査データをもとに吹雪形態の分類および吹溜り形態の分類の検討を行なっている。また、この気象データと吹溜り形状の実測値をもとにして文献調査により理論的考察を行ない、吹溜り形状シミュレーションモデルの基本型を作成した。このような吹溜りの現象解析の他に道路走行車両の安全確保あるいは交通規制の面から吹雪時の視程について飛雪空間濃度との関係を把握することに努めており、特に夜間走行時に車両のライトによって雪片で乱反射が起こり劣悪となる視程限界について現地実験を行なっている。

表-1 各年度における調査項目

調査項目	年 度									
	56	57	58	59	60	61	62	63	H1	H2
文献調査	○				○					
吹雪発生調査	(土田試験地)	○								
	(大洞原試験地)			○	○	○	○	○	○	○
防雪機能調査	(土田試験地)	○	○	○	○					
	(大洞原試験地)					○	○	○		
吹溜り形状調査	(妙高試験地)		○							
	(大洞原試験地)			○	○	○	○			○
視程に関する調査 (大洞原試験地)				○	○	○	○	○		○
吹雪、吹溜りシミュレーションの検討					○	○	○	○	○	○

年度 項目	目的	方法	元年度	2年度	3年度
1. 吹雪の地域性に関する調査	<ul style="list-style-type: none"> 地域的発生頻度の把握 雪害地域の吹雪特性の解明 	<ul style="list-style-type: none"> 試験地に於ける実態観測 各地の既存資料の収集 	<ul style="list-style-type: none"> 吹雪、風雪発生実態のまとめ 吹雪、風雪の判別方式のまとめ 吹雪、風雪発生頻度特性 	<ul style="list-style-type: none"> 北陸地方の吹雪発生に関する調査 吹雪、風雪発生頻度のまとめ 危険度評価の検討 	<ul style="list-style-type: none"> 雪害地域における吹雪特性に関するまとめ 危険度評価手法のまとめ 北海道、東北における吹雪、風雪発生頻度のまとめ 北陸との吹雪形態の違いについての検討
2. 視程に関する調査	<ul style="list-style-type: none"> 飛雪輸送量からの視程特性の解明 	<ul style="list-style-type: none"> 吹雪時の現地観測 (吹雪補雪量と視程の関係) 	<ul style="list-style-type: none"> 飛雪輸送量と視程の実験 昼間視程のまとめ 夜間における視程の基本的特性の把握 	<ul style="list-style-type: none"> 飛雪輸送量と視程に関する解析 夜間における視程のまとめ 吹雪強度と視程分類 	<ul style="list-style-type: none"> 視程に関するまとめ 吹雪強度と視程に関する算定式の作成
3. 防雪施設の設置計画に関する調査	<ul style="list-style-type: none"> シミュレーションによる設置計画手法の作成 	<ul style="list-style-type: none"> 吹溜りの調査結果を2次元、3次元プログラム作成の基本データとする 	<ul style="list-style-type: none"> 吹溜りシミュレーションの応用に関するまとめ (2次元モデル) 防雪施設の適正配置 防雪構工法の選択 視程シミュレーション 	<ul style="list-style-type: none"> 吹溜りシミュレーションの3次元モデルの検討 解析手法の確立 	<ul style="list-style-type: none"> 3次元モデルの検証実験とまとめ 防雪施設の有効範囲の検証
4. 対策工の構造に関する調査	<ul style="list-style-type: none"> 最速効果を得るための防雪施設の基本形式 	<ul style="list-style-type: none"> 多雪地域における実験結果を基礎資料として検討する 	<ul style="list-style-type: none"> 湿雪地域の吹雪に適した対策工構造の検討 シミュレーションによる基本構造のまとめ(空隙率等) 多雪地用施設の現地実験による効果判定 	<ul style="list-style-type: none"> 検証実験 最速構造の検討 	

図-1 吹雪、吹溜り対策に関する試験調査

3. 吹雪の概要

3.1 吹雪の種類

吹雪の種類は一般に表-2のように定義されている。そのなかで地吹雪の飛雪は図-2に示すように雪粒子の付着力や、結合力が積雪表面に作用する風の力（雪粒子間のせん断力や浮き上がるための揚力）が大きくなってバランスがくずれそれによって、雪粒子の転動、跳躍、浮遊が始まる。その時に飛雪量は風速に比例して強くなる。このため雪粒子は増加しながら成長する。また、転動は雪面を転がりながら風下側に移動する現象であり、跳躍は雪粒子がはね上がり、落下して雪面との衝突によるはね返りを繰り返しながら移動する現象である。これらの落下した雪粒子は雪面の雪粒子をはじき飛ばし移動する雪粒子の量を増加させていく。この時の雪粒子の跳躍高は10cm以下が多いと言われている。また、浮遊現象は風速が大きくなって跳躍した雪粒子が乱流の上昇気流に乗って上方へ運ばれ移動するもので空中を雪粒子が漂う現象であり寒冷地域、特に北海道で非常に多く発生する。以上の運動形態は吹雪の中の地吹雪と呼ばれる運動である。この他に多雪地では上空からの降雪雪片の落下に風が伴って起こる横方向からの風雪も吹雪の種類に分類される。

表-2 吹雪の定義

名称	分類 および 定義		降雪有無	飛雪の運動形
吹雪	積雪表面の雪粒子が風によって飛び跳ねながら移動する現象。	低い地吹雪	無	転動・滑動・跳躍
		高い地吹雪	無	転動・滑動・跳躍・浮遊
(総称) 吹雪	強い風で地表に積った雪が舞い上がり、同時に雪が降っているため視程が悪くなる現象。舞い上がる雪で降雪の有無がはっきりしない場合もいふ。		有	転動・滑動・跳躍・浮遊
風雪	飛雪の有無には関係なく強い風によって横なぐりに雪の降る現象。		有	—

注 ここでは、吹雪・地吹雪・風雪を総称して吹雪とする。

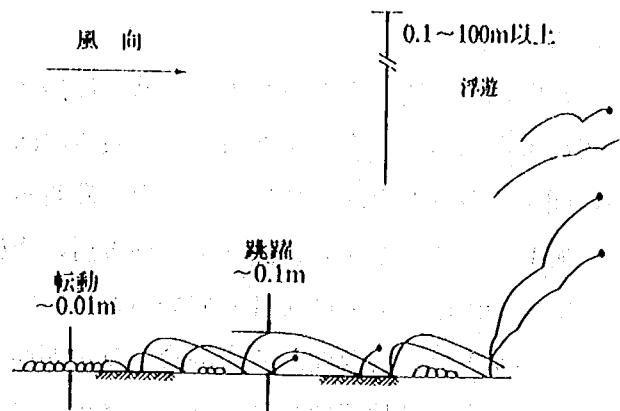


図-2 飛雪の運動形態

3. 2 気象月報による吹雪の事例

気象月報から、各地の気象台、測候所の月表に吹雪という文字がみられるのは山形県の酒田測候所以北であり、新潟県より南の測候所の月表には吹雪の文字はみられない。例えば富山気象台では、「吹雪は局部的（海岸地方の盛土構造の道路）に発生することはあるが、富山地方全域で吹雪となることはない」とのことで月表に記載されない。吹雪として記載される場合の根拠として一般に次のような基準（一例）により行われている。

①吹雪現象が少なくとも3時間以上継続した場合に吹雪と記載する（酒田測候所）

②周辺の吹雪の発生状況も参考にする（酒田測候所）

③吹雪発生時の視程の状況より吹雪の強さとして分類する（高田測候所）

新潟県の場合は、富山県と同様に局所的な発生のためか吹雪現象に関するものは少ない。例えば、昭和56年2月26日午前10時頃に始まり14時頃まで続いた吹雪は、上、中越地方の道路交通に大きな障害をもたらしたが、当日の高田測候所の天気概況（日報の記録）は単に雪となっているにすぎない。このように公表される吹雪は少ないが、実際には毎冬何回か吹雪が発生しているのが実状である。このような北陸地方の新聞発表に対して、北海道の新聞記事には吹雪に関する記事が多く、全道的にみれば局所的ではあるかも知れないが、どこかで吹雪となっているという状態である。今回の情報収集の範囲内だけでも表-3に示すように岩見沢周辺、札幌周辺の吹雪に関する記事の掲載日数は過去10年間で132日であり、札幌、岩見沢の過去10年間の降雪日数のそれぞれ31.1%、28.5%に相当する（ここでいう降雪日数は、札幌管区気象台の降雪量が0cm以上の日を積算したもの）

表-3 札幌、岩見沢の年度別記事回数

北海道新聞の吹雪記事掲載回数

年度		52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	合計
記事回数		10	17	11	10	19	16	16	10	13	10	132
降雪 日数	札幌	58	70	39	39	38	38	38	33	36	36	425
	岩見沢	53	76	47	38	42	40	41	37	45	44	463

3. 3 吹雪に関する国内での調査事例

我が国では昭和15年頃から旧国鉄の研究者を中心として吹雪に関する調査が実施された。現在は、北海道大学、弘前大学、北海道開発局開発土木研究所、科学技術庁防災科学研究所新庄支所等の学官で現象解明および対策に関する調査を実施している。また、建設省でも土木研究所の他、東北、北陸地方建設局で調査を実施している。しかし、開発土木研究所、土研、地建以外の大学等における調査は理学的見知からの吹雪発生機構を主に研究しているため、行政上の対策等に直接反映すると言う点からは利用しにくい面が多い。行政面からの調査では、開発土木研究所が吹雪に関する調査の先導的立場にあり、その調査方法は他機関の基本となって現在に至っている。土木研究所の歴史としては昭和25年度から東北地方建設局の冬期交通確保に関する技術開発に対処するため、道路

の吹溜り防除工法に関する実験的研究の課題を設定し、国道 7号線（現、秋田県秋田市金足）において谷藤、小川氏らが現地実験を行ないその成果を土木研究所報告として発表したのが最初といえる。以後、昭和56年度まで吹雪に関する調査は行われていなかった。しかしながら、これまでの調査研究は実験の場が寒冷地域であり吹雪となる雪が雪温 0℃以下の乾き雪に分類される地域で実施されている。したがって、新潟試験所が調査している湿り雪のものと雪自体の性質が大きく異なるものである。また、それぞれの機関では地吹雪時の吹溜り特性、視程について調査しており、新潟試験所では、これらの地域での調査、研究成果を参考にして、湿雪地域における吹雪特性および吹溜り対策を解明しようとするものである。

4. 吹雪対策の現状

吹溜り防止および、視程障害緩和のために施設等の対策を施さなければならないが、まず吹雪の発生しやすい地形的条件としては広範囲の吹雪となる風雪を除くと、

- ①風の通り道となる地形で田畑等平原が広い範囲となる地形
- ②切、盛土道路などの勾配が変化する地形
- ③路側に雪堤が発達している道路

等がある。

このように何れの条件からみても道路は吹溜り、視程障害の発生する条件を十分満足していることから道路の維持管理の効率化と安全性を確保するための対策を行わなければならない。

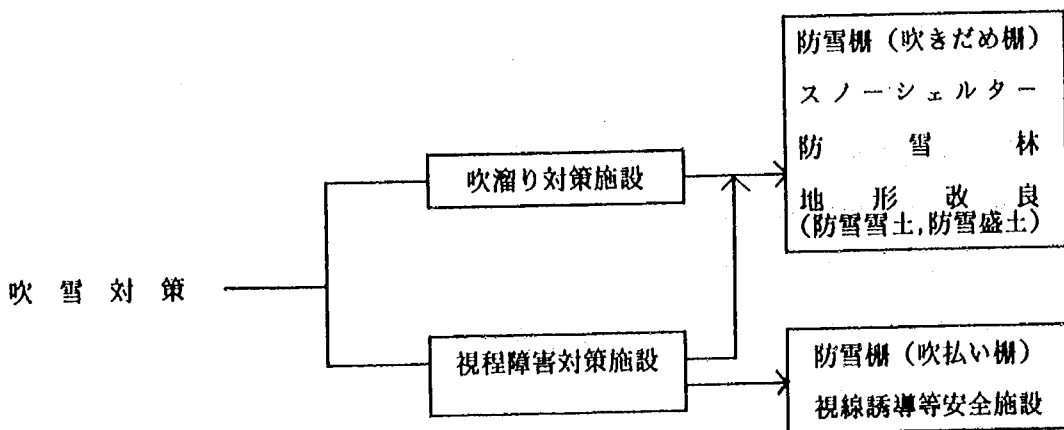


図-3 対策工の種類

4.1 対策工の種類

吹雪から道路を守るため、道路沿線には様々な工夫をこらして吹溜り防止、視程確保を図ろうとしている。この対策工の種類は一般的には図-3に示すように分類される。この中で防雪柵は図-4に示す3種類の構造が基本となっている。それぞれの特徴は道路に対して道路に至るまでの間に吹溜らせるための柵、柵と積雪表面の間に隙間を与えて風を収束させ、道路の手前に吹溜らせ路面上の吹溜り防止を図る考え方のも、また、道路の路肩あるいは道路直近に柵を設置し傾斜を付し、

風を収束させ路面上の雪を吹き払う方式の柵がある。その他には吹雪誘導柵、スノーシェルター、防雪林等が対策工としてある。北海道では防雪林帯の造成がさかんとなっている。

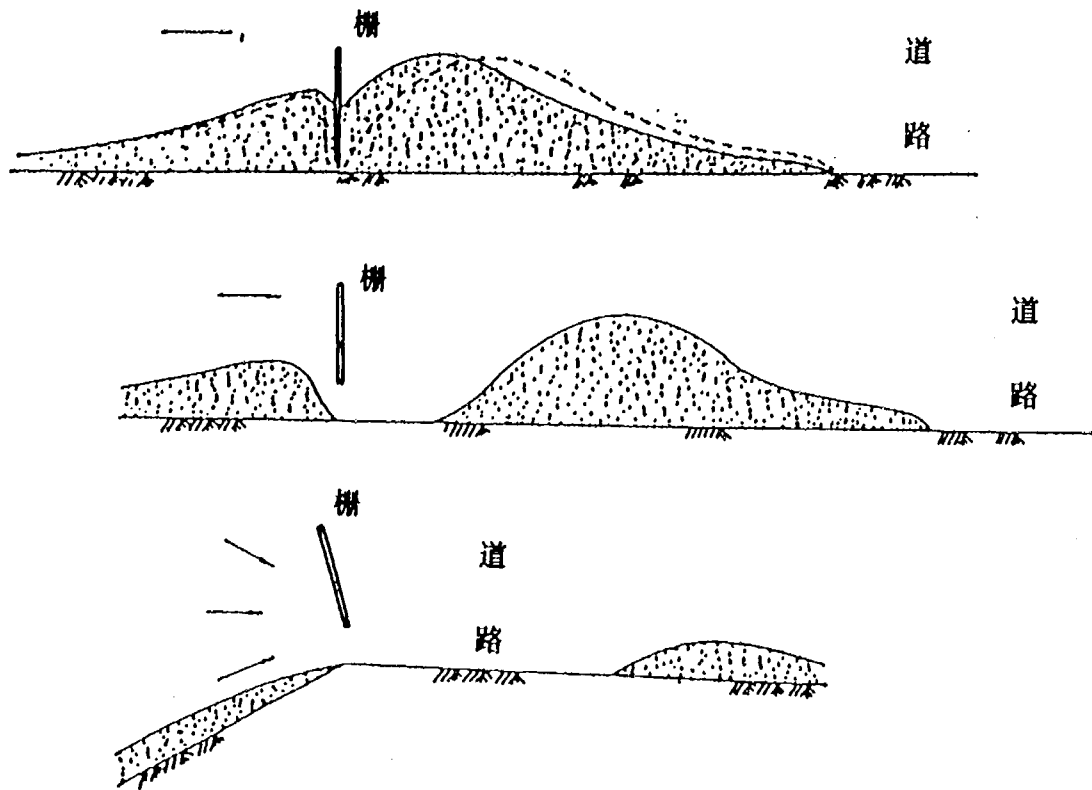


図-4 吹溜り対策工の基本形式

4.2 恒久対策と仮設対策工

防雪施設としての恒久対策には写真-1に示すように、

- ①鋼材、板材を基本とした防雪柵
- ②植林造成による防雪林帯の造成
- ③スノーシェルター
- ④道路横断形状の改良

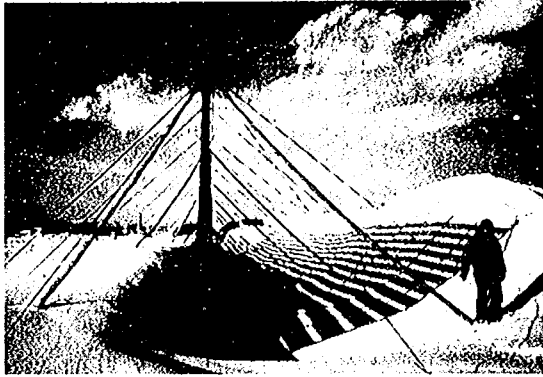
等があり、それぞれ対策施設としてすでに設置されたり実験的に試行設置されている。

①の防雪柵には、吹溜め柵、吹払い柵がある。個々の機能として吹溜め柵は道路の風上側に設置し、その前後に吹溜りをつくり道路上への吹溜りを防止する施設であるが、設置場所が道路から離れた位置になるため用地確保が難しく吹抜け柵を設置することが多い。

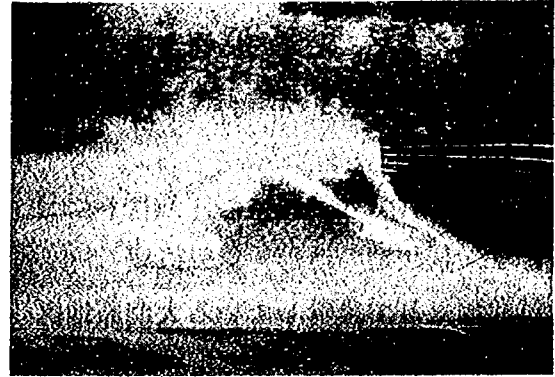
②については、旧国鉄が吹雪常襲地の造林に着手し効果を挙げた。現在、北海道開発局では道路沿線に植樹し、吹溜り防止対策と視程障害緩和を中心にした実験を行なっている。

③のスノーシェルターは、トンネルの坑口、切土道路などの吹溜りの発生しやすい場所を覆うものであり、局所的には設置されているが走行上の問題としてはシェルター内が暗いためドライバーに圧迫感を与えることもある。

④の道路横断形状の改良については切土法勾配を緩くし、法面上に吹溜りをつくる工法であるが用地巾を多く取らなければならないことから、現状では遊休地の多い北海道の国道において実験が行われており、1:3以上の緩い勾配であればその効果が高いことを確認している。また、仮設対策は鋼管枠組みに防風ネットを取り付けたもの、鋼板製横ビームを取り付けた構造のもの



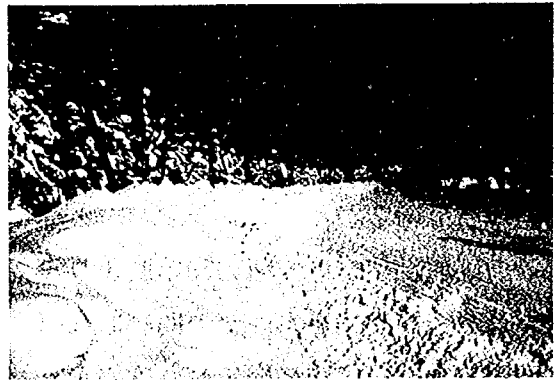
(1) 吹溜め柵



(2) 吹抜け柵



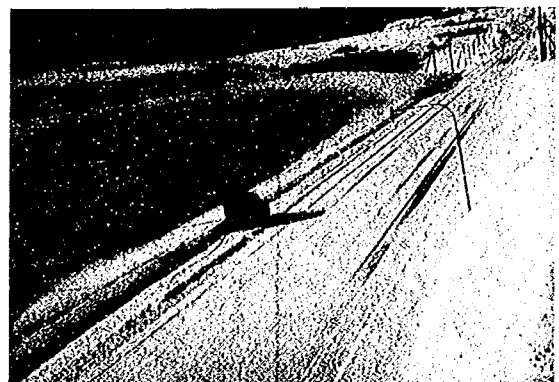
(3) 吹雪誘導網



(4) 防雪林



(5) スノーシェルター



(6) 防雪切土

写真-1 対策工の事例

(写真(1),(2),(4),(6)は開発土木研究所提供)

で、取付、取り外しが容易となっているのが仮設対策で融雪以後撤去を行うものであるが、民地の借用と防雪柵撤去後の格納方法が、今後の防雪対策工の設置延長の増加を考えた時に問題となろう。

4.3 現状の問題点

現在の主流をしめる対策工法は吹溜め柵、吹抜け柵である。この構造は少雪地域の防雪施設としては下部間隔を大きく開ける必要がないので柵高も低くすむが、多雪地域の吹雪対策として効果を持続させるためには、年平均積雪深以上の下部間隔をあけなければ埋まって効果がなくなる。また、湿雪と乾雪では、同じメッシュ間隔あるいは柵密度（空隙率）では効果が異なるなどについて経験的にはいえるが、定量的に構造物の効果を決定することができないのが現状である。よってこれらを総合的にまとめる対策工マニュアル等の早期作成が望まれている。

5. 大洞原試験地における吹雪実態調査

5.1 試験地の地形・気象概要

試験地として設営している大洞原地区は、図-5、6に示すように新潟県中頸城郡妙高村の妙高山（標高2446m）のふもとに位置し、標高500m付近のNW方向が600~1000mにわたって開けた丘陵上にある。また、新潟県内でも有数の豪雪地であるとともに吹雪等の発生頻度の高い場所である。

この試験地において昭和59年度より実態調査を実施してきた。その間、昭和61年度までの3年の間に発生した吹雪形態別の発生時間をまとめると表-4のようになる。この間に発生した地吹雪現象は

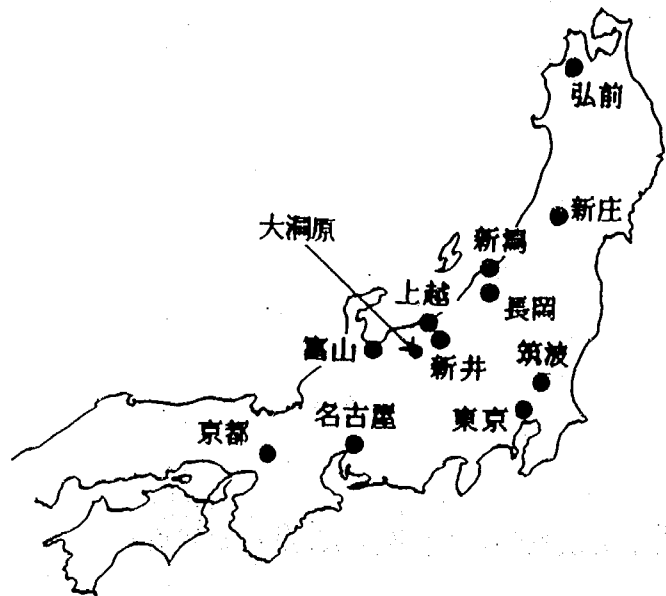


図-5 本州における試験地の位置

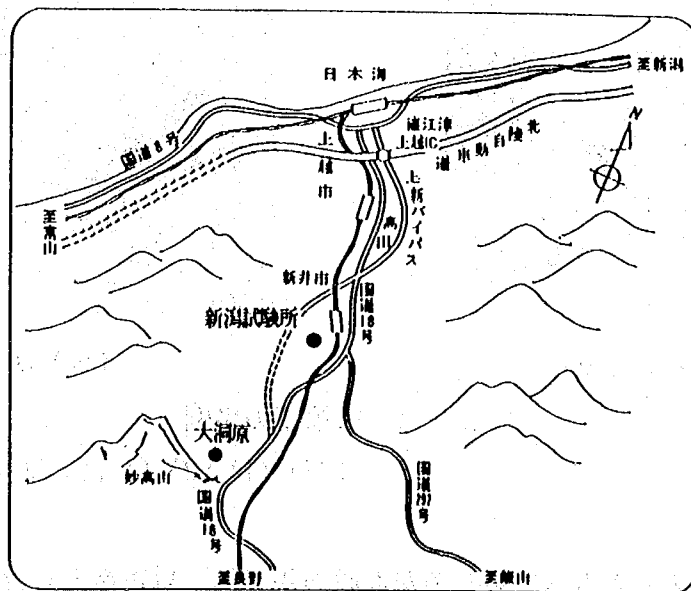


図-6 大洞原試験地位置図

通算24時間である。それに比べ横方向からの風雪は 100時間となっている。また、気象について概略示すと表- 5のような環境の地域であり多雪地でありながら寒冷に近い温度条件の地域でもあることから、吹雪観測場としては北陸地方の特徴を代表できる地域といえるであろう。

5. 2 調査方法

表- 4 吹雪の発生時間

大洞原試験地では次の項目と方法で調査を行った。

1)調査項目

- (1) 気象観測
- (2) 視程観測
- (3) 吹雪物理観測

①飛雪観測

②吹溜り観測の発生時間

状 況	発生回数	発生頻度
吹 雪	24	14.4
風 雪	100	60.0
降 雪	43	25.6
合 計	167	100.0

表- 5 大洞原の冬期気象の平均

形 態	平均気温	標準偏差
吹 雪	-6.0	1.79
風 雪	-3.9	2.27

形 態	平均風速	標準偏差
吹 雪	3.24	0.83
風 雪	2.40	1.26

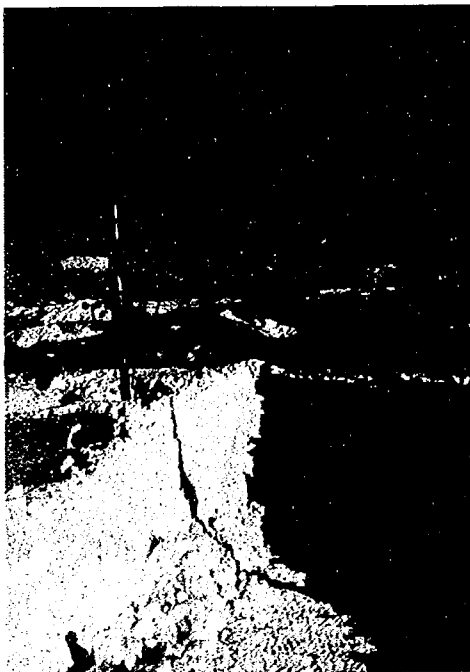


写真-2 気象観測 (風速、気温)



写真-3 降雪検知機器

2) 調査内容

(1) 気象観測は、写真-2および写真-3に示す支柱に気象観測計器を設置してデータを収集し、データロガー・パソコンに記録した。測定は1分間隔で行い、10分間の平均値とした。

- ①風速 風速の測定は吹溜り供試体脇の測定柱に風向風速計：1台（4m）、風速計：3台（3m、2m、1m）を設置して測定を行った。
- ②気温 写真-3に示す測定柱に気温センサーを固定して測定を行った。
- ③降雪パルス 降雪状況の測定は、測定柱に落下あるいは飛雪する降雪の雪片数を検知できるセンサー（降雪検知器）を取付け、降雪強度、降雪持続時間等の測定を行った。

(2) 視程観測

視程観測は、観測小屋の風上側に標識（青い鋼板にランドルト視環）を10m、20m、30m、40m、50mから最大1000mまでの位置に設置して観測を行った。この標識の配置は、大洞原の吹雪発生時の卓越風向（N～NW）に向かって配置してある。視程観測は、夜間視程と昼間視程の調査を行い、夜間の観測時には車両用ライトを点灯して観測を行った。

(3) 吹雪観測

吹雪の定量化をはかるため、観測は飛雪量の測定と吹溜り観測の2項目について行った。

- ①飛雪量測定 飛雪の測定は写真-4に示す捕雪箱（受口部10×10cm）を各々積雪表面から0.6m、1.0m、2.0mの高さに設置して1時間当りの飛雪量を測定した。捕雪箱はブリキ製の箱に通気性の布を取り付けたものである。
- ②吹溜り観測 吹溜りの観測は、村道上に断面を開削し（卓越風向にほぼ直角）、1時間ごとに雪面に油性スプレーを幅20cm程度散布し、断面観測によって形状を測定した（写真-5）。

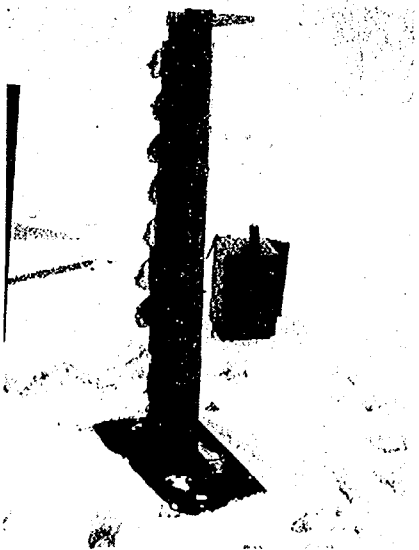


写真-4 捕雪箱

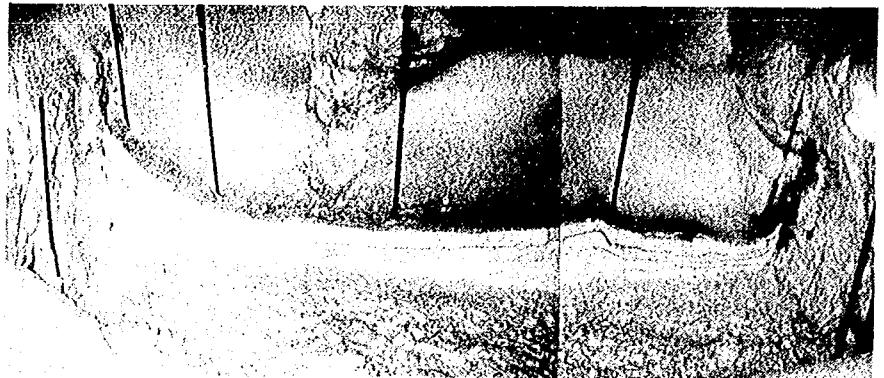


写真-5 散布状況

5.3 調査結果

5.3.1 吹雪発生時の気象

これまでの観測結果から大洞原試験地の吹雪発生時の特徴をまとめると次のとおりである。

1) 吹雪発生時の気温と風速

吹雪の発生時の特性についてそれぞれの形態を分類するには吹雪が発生しているときの気温と風速の関係から求められる。

そこで、大洞原試験地において、昭和61年度までの3年間での目視による吹雪観測から吹雪形態別の発生分布を気温と風速の関係からプロットすると図-7のようになる。このなかで地吹雪のように雪が飛雪する現象と降雪が複合している吹雪は、表-3に示したように3年間の調査では通算24時間発生している。それに比べ降雪をともなう横方向からの風雪は100時間となっている。図からみられるように試験地では、氷点下-2℃以下、風速4m/s以上、風雪は0℃以上、風速2m/s以上で観測されているが、データのなかには気温が-9℃と低いときには1.0 m/s以下でも弱いながら風雪状態と判断されている。このような分布状況から吹雪と風雪の発生境界を判別するとプロットされたデータの範囲からその下限条件は次の式で近似することができる。

① 北海道の地吹雪¹⁾

$$V=7.06e^{0.069T}$$

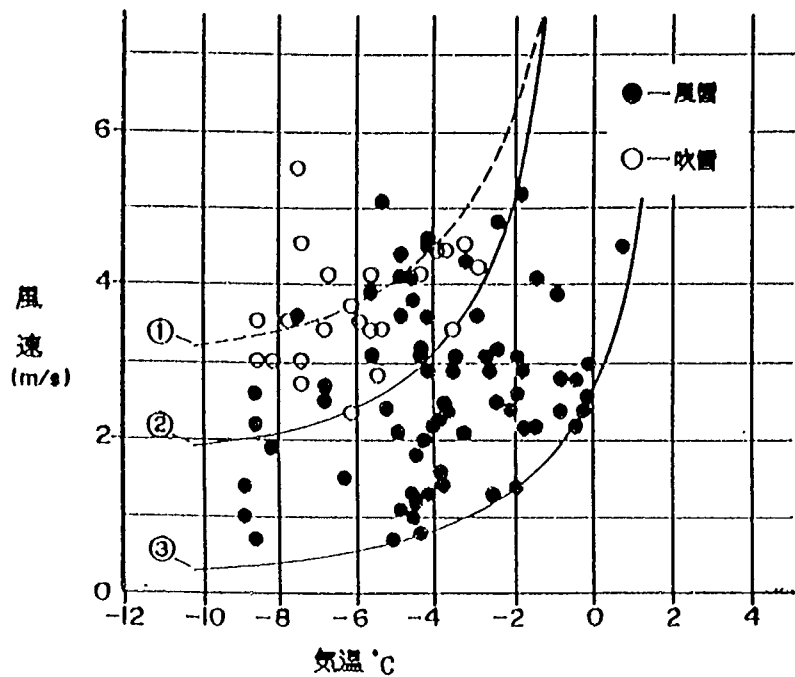
② 大洞原の吹雪

$$V=4.82e^{0.1046T}$$

③ 大洞原の風雪

$$V=2.27e^{0.2147T}$$

ただし、V:風速(m/s)、T:気温(℃)



- 注：① 北海道における地吹雪発生の下限值
 ② 大洞原における吹雪発生の下限值
 ③ 大洞原における風雪発生の下限值

図-7 吹雪発生時の気温と風速の関係
 (気温、風速は1時間平均値)

2) 吹雪時の風速と気温の分布

以上のような関係から吹雪と風雪発生時の個々の気象の特徴について図-8の風速の正規分布の例からまとめると風速では表-6に示すような平均値と標準偏差になる。この風速からみても吹雪時と風雪時では異なる。これらは風の特徴として、自然の状態で定常的に連続するものでなく強弱の繰り返しがあるので、平均風速で分類したものである。この風速の平均は気象月報からの平均値で比べると吹雪時は北海道の範囲、風雪時では北陸の範囲としての特徴を表している。表-7に示すように気温についても吹雪と風雪では明確な気温の差があらわれている。この気温と風速の関係は、吹雪と風雪の発生予測を検討する際の基本的な資料となろう。

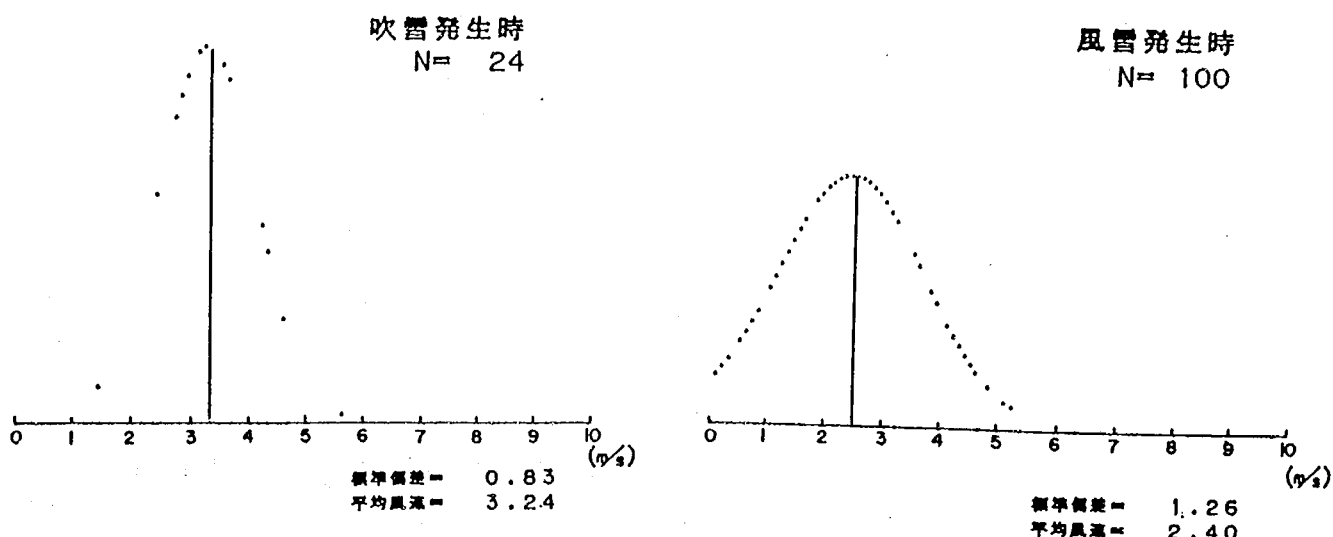


図-8 風速の正規分布例

表-6 風速の平均値 (m/s)

形態	平均風速	標準偏差
吹雪	3.24	0.83
風雪	2.40	1.26

表-7 気温の平均値 (°C)

形態	平均気温	標準偏差
吹雪	-6.0	1.79
風雪	-3.9	2.27

3) 吹雪発生分類

図-7の曲線①、②、③の境界式をもとに昭和60年度から63年度までの少雪年を含む4ヶ年間における現地観測時の気温、風速、降雪パルスから吹雪、風雪、降雪の発生状況をまとめると図-9となる。その結果、図に示す観測期間中の全サンプル(428時間)を年平均で発生分布の頻度を分類すると表-8となり、北海道の吹雪発生限界を満足する地吹雪の発生時間は1.2時間、吹雪、風雪の発生時間は67時間、風雪が31時間に分類される。また、寒冷豪雪年の58年度の観測では吹雪発生時間が39時間、風雪発生が23時間と吹雪が非常に多い冬期もある。この表をもとに札幌での発生時間と比較すると、札幌では地吹雪12時間、風雪を含む吹雪は250時間と多く大洞

原試験地について札幌と比較すると地吹雪で1/10、吹雪で 1/4になり、吹雪発生頻度は少ないことがわかる。

以上のように、吹雪の発生と種類はその地域における冬期の気象に左右されるといえる。

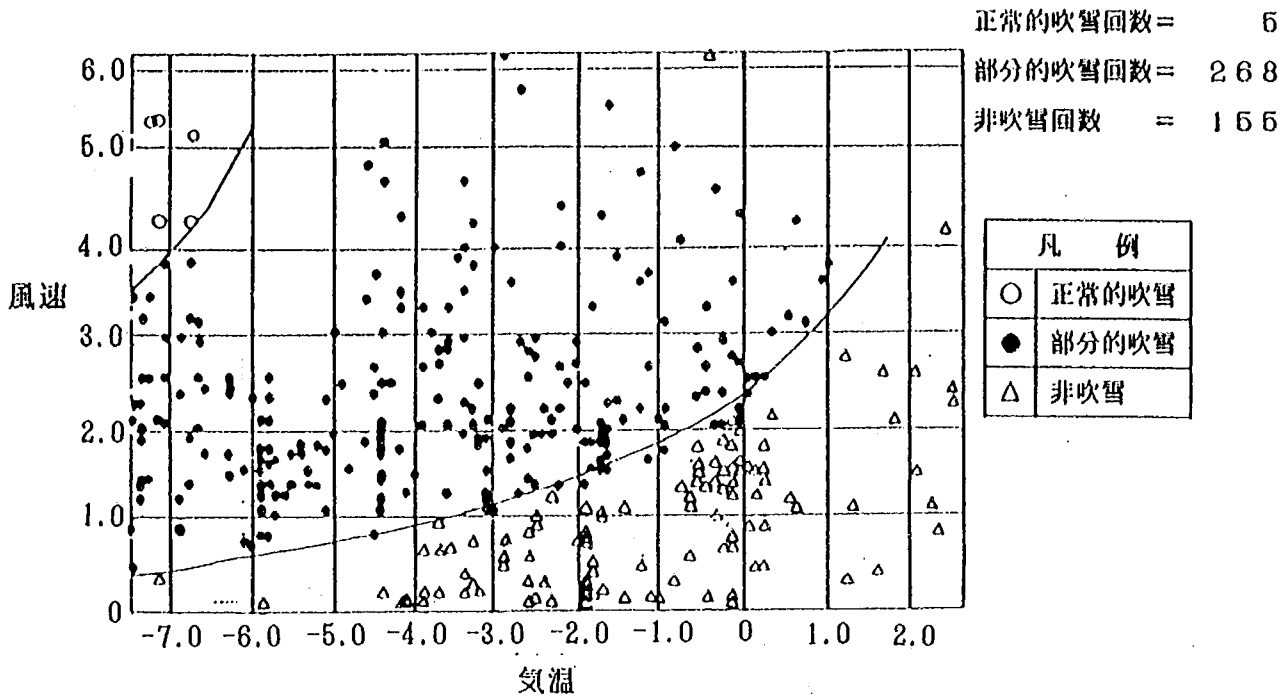


図-9 吹雪等発生時の気温と風速

表-8 吹雪形態別の発生頻度

項目	地吹雪	吹雪風雪	風雪
札幌	12	250	—
大洞原	1.2	67	31

(時間)

5.3.2 吹溜りの実態と特性

実際の吹雪によって吹溜りがどのような形状、量であるかその特性を把握するために実施したものであり、以下にそれらの特徴についてまとめた。

1) 吹溜り形状

溝内に吹溜る形状は実験結果から分類すると図-10に示すように風速の度合によって異なる。このような形状に対し実態調査から風速によって溝のどちら側に吹溜りが分布するかについて特徴をまとめると次のようになる。この調査は湿雪地等で多く見られる吹雪（風雪を主体）とその時の吹溜り状況を把握し、今後の吹溜り対策の基礎資料を得ることを目的とし、吹溜り量と気象（気温、風速）の関係について調査を行ったものである。

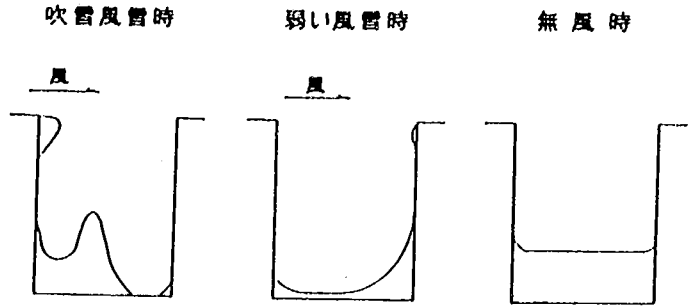
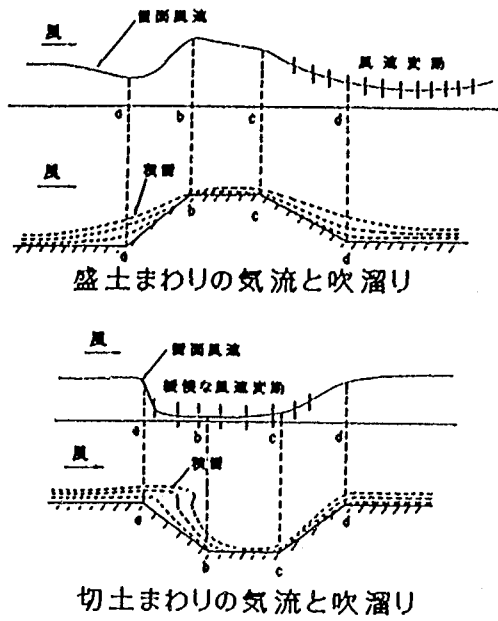
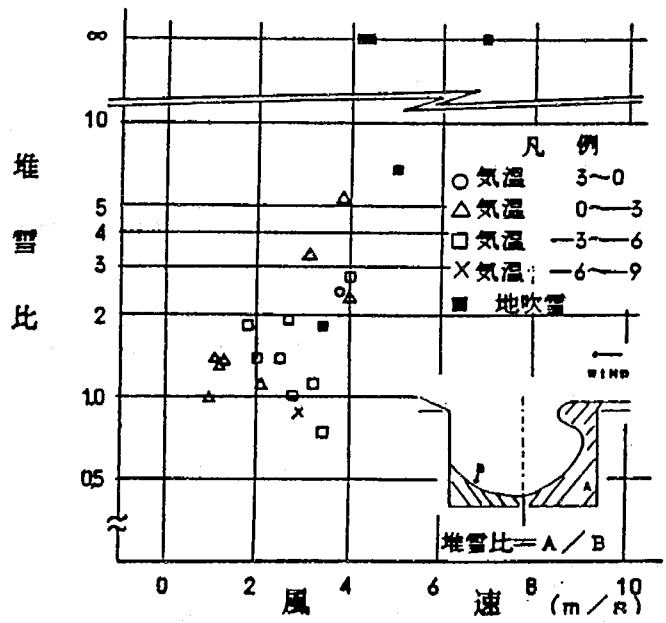


図-10 吹溜りの基本形状

図-11は溝の吹溜り形状断面から求めた吹溜り形状について堆雪比（風上側の堆雪断面面積／風下側の堆雪断面面積）で表したものである。これによると風速2m/s前後から堆雪比が1.0を越え、風速が増加するにつれその値は図-11に示すように指数的に増加している。このように北陸地方で多発する風雪による吹溜り量は地吹雪に比べかなり少ないが、風速が弱い（2m/s前後）時でも図中B側に片寄った堆雪形状を示す結果となった。このような吹溜りの形状が風が弱く湿り雪の地域の特徴といえよう。図-12には吹溜りの時系列に増加する結果を示したが、このように長く続く地吹雪は北陸では年に1～2回程度発生する現象である。この図から地吹雪による吹溜りは幅員によって形状あるいは量が異なることがわかる。これらの発生件数は5、3、1、3）で述べたように北海道に比べて、地吹雪は少ないが風雪がかなり多くいずれの状況でも道路交通に対しての被害が発生することにはかわりない。



(A、Bは堆雪断面面積)

図-11 風速と堆雪比

2) 飛雪空間密度と吹溜り量

雪が風によって空中を移動することをあらわす量として、飛雪空間密度がある。飛雪空間密度は風速の強弱によってその量が増減する。吹雪現象を解析するための一つとして空中を浮遊する

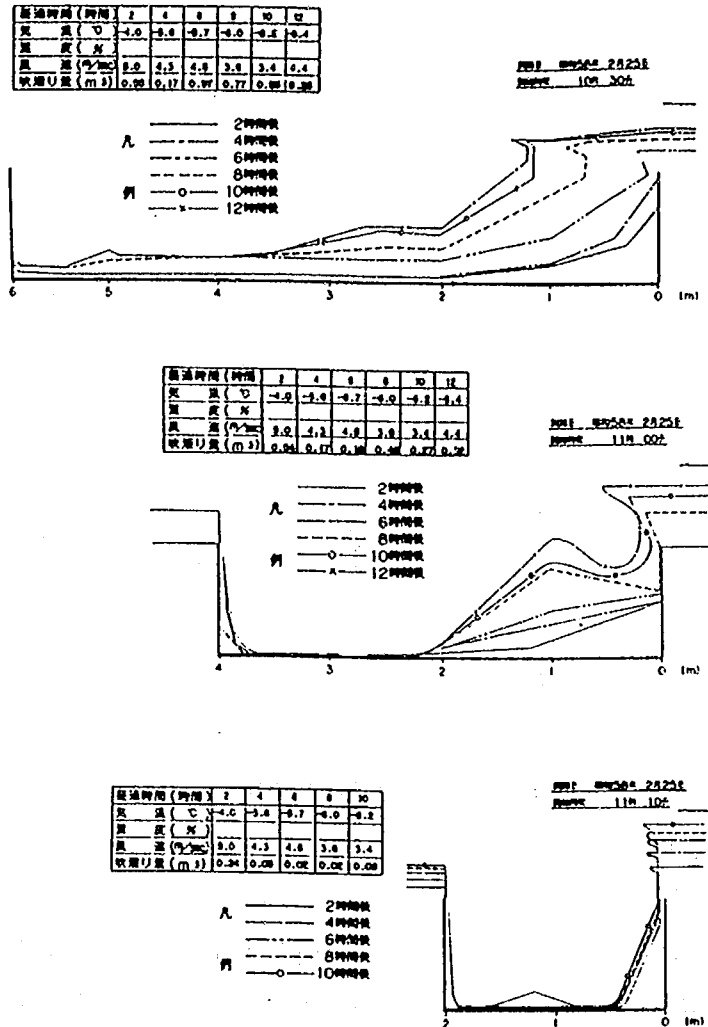


図-12 吹溜り形状の観測例

雪粒子の量を把握する雪移動量の測定を行わなければならない。この測定は写真-4に示す補雪箱を用い、高さ別の移動する雪の量をはかるものであり、吹雪強度および視程、吹溜り量等を定量化するのに用いられる。図-13は吹雪と風雪時の飛雪空間密度と吹溜り量(堆雪量)の特徴についてまとめたものである。この図より、当然吹雪時の飛雪空間密度が多いことがわかる。しかしながら、吹溜り量をみると吹雪時の飛雪空間密度が少ないにもかかわらず風雪状態の 때가、吹溜りやすい場合もあることがわかる。これは吹雪、風雪と判断した図-7の風速の境界条件で示すように、風が強く搬送力の大きい地吹雪、吹雪よりも、風雪でも湿った重い雪のため雪粒子の落下速度が早いことから堆雪量が多くなる傾向を示すものと考えられる。

この結果から吹雪に分類された堆雪量の特徴は、飛雪空間密度が多いにもかかわらず一般的に非常に多く吹溜るといわれているのに対し、異なる場合もあることがわかった。

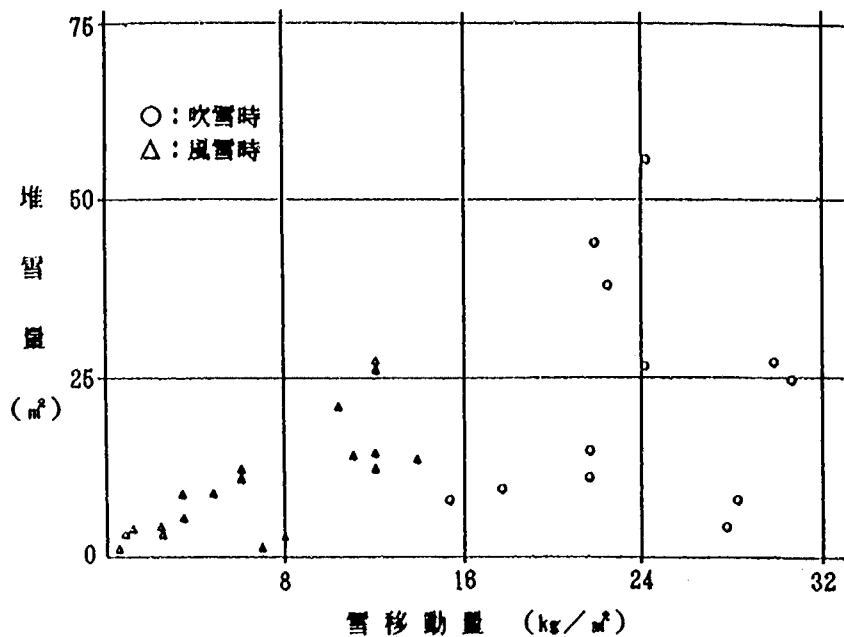


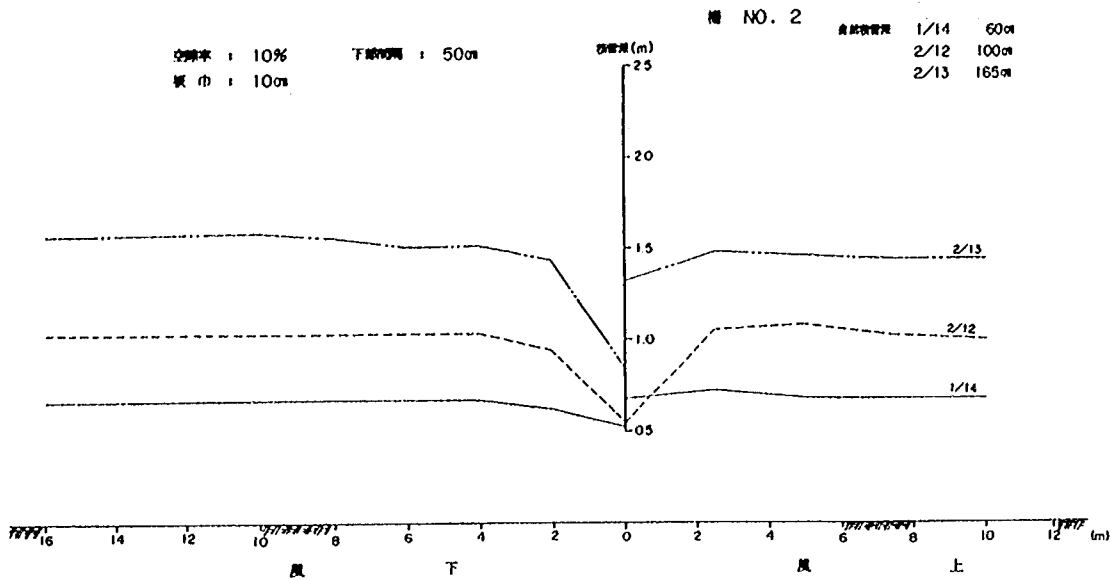
図-13 飛雪空間密度と堆雪量(吹溜り量)

5. 3. 3 対策工効果の実験

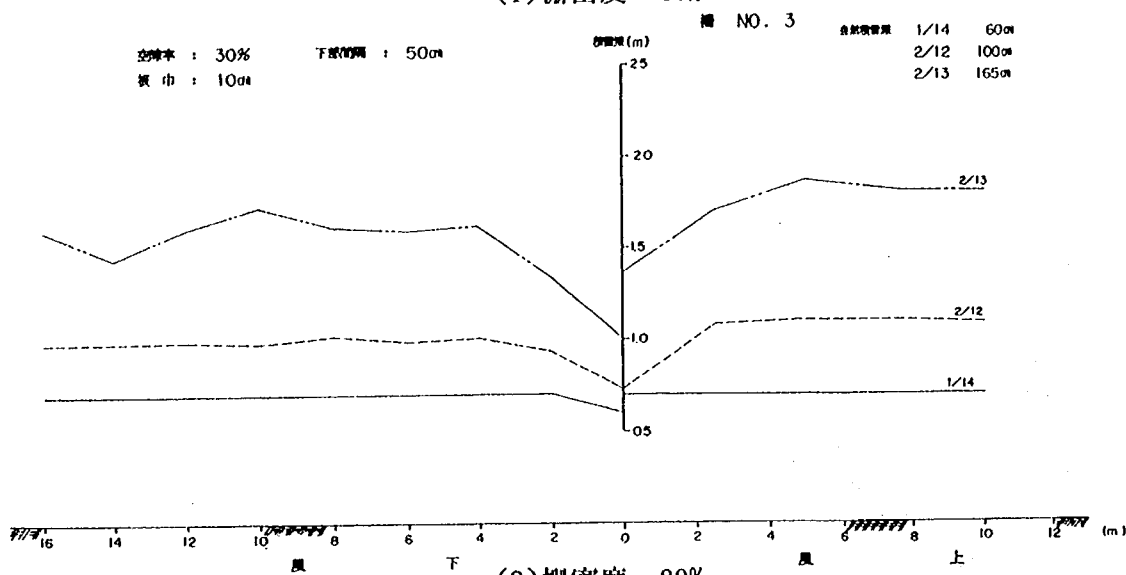
防雪柵の防雪効果に関する試験調査は、寒冷地域(北海道、東北)で進められ、形状、設置方法でもその工法が固まりつつある。しかし、北陸地方等の湿雪多雪地では、防雪柵を設置しても柵面に雪が付着したり、積雪中に埋没することが多いため、柵の効果は期待できない場合が多い。この調査では、湿雪多雪地に適した防雪施設の開発等を目的とし、実施しているものである。これらの対策工について、現地実験より実態を把握し、どのような対策が望ましいか、対策の基本的なあり方を検討するために実施しているものである。

1) 対策工と吹溜り効果の実態

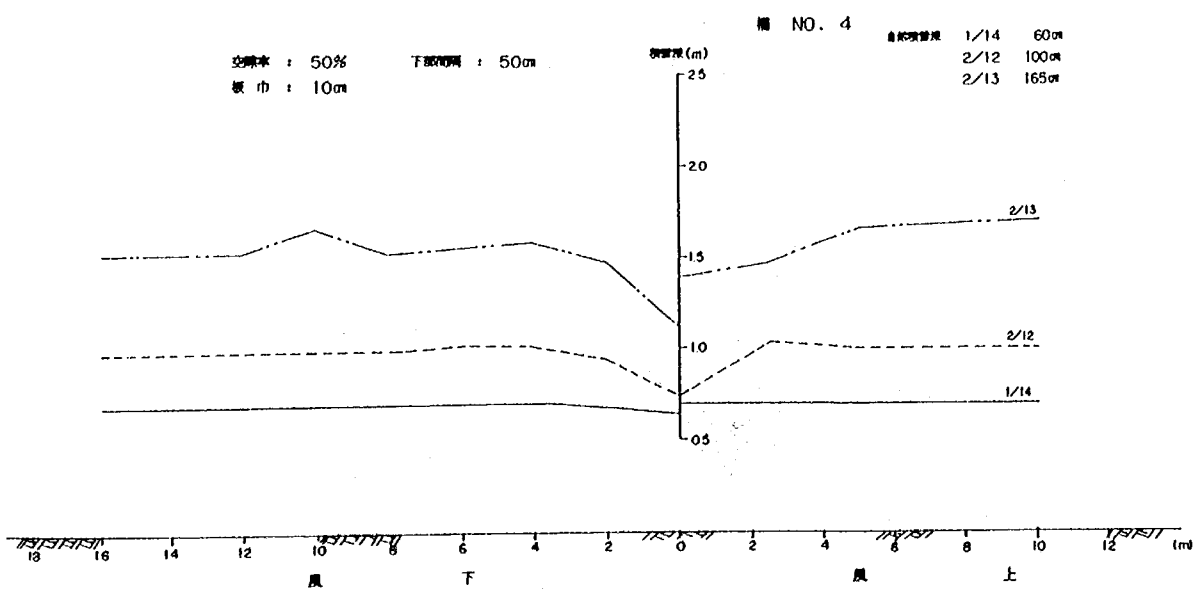
図-14の例では柵密度(空隙率)を変えた場合の吹き払い用の横ビーム方式の防雪柵について防雪効果を調査した結果である。この調査は、新井市郊外の平坦地において、柵密度をかえて柵前後の吹溜り形状の最適効果を求めるために1冬期3回断面観測を実施し、その形状変化をとらえようとしたが、寒冷地域で効果的な柵の下部を開けた構造でも、変化は柵前後の直近のみで、全体としての効果は認められない結果となった。この形状は多雪地の一般的な現状と考えられるが、多雪地で効果を高めるには、その地域の平均積雪深以上の下部間隔がなければ効果は低いといえる。また、図-15に示すように道路に対する防雪効果について実施した実験では、各対策方法での風上側に対して柵前後の堆雪量(写真-6の例)と溝への吹溜り量を比較すると図-16に示すような結果となる。この実験は既設の対策工法が固定式のため実験地のような多雪地では積雪中に埋没して、効果がなくなる。それを解決するために高さを自在に変えることのできる構造として、ネットの種類と設置位置を変えてその効果を判定したものである。その結果、道路に吹溜らせない方法とし路肩に三角形の箱を設置して風を上方へジャンプさせ溝内に雪粒子を落下させずに吹雪流を上方へ向けて対象となる道路敷を通過させる方法が吹溜り量が比較的少なく、他のネットと効果を比較すると2倍の吹溜り防止効果があることがわかる。このような実験結果から道路内への吹溜り防止は吹雪流を上向きに変え、風速を少しでも加速することによって路外へ吹溜ることがわかった。



(1) 欄密度 10%



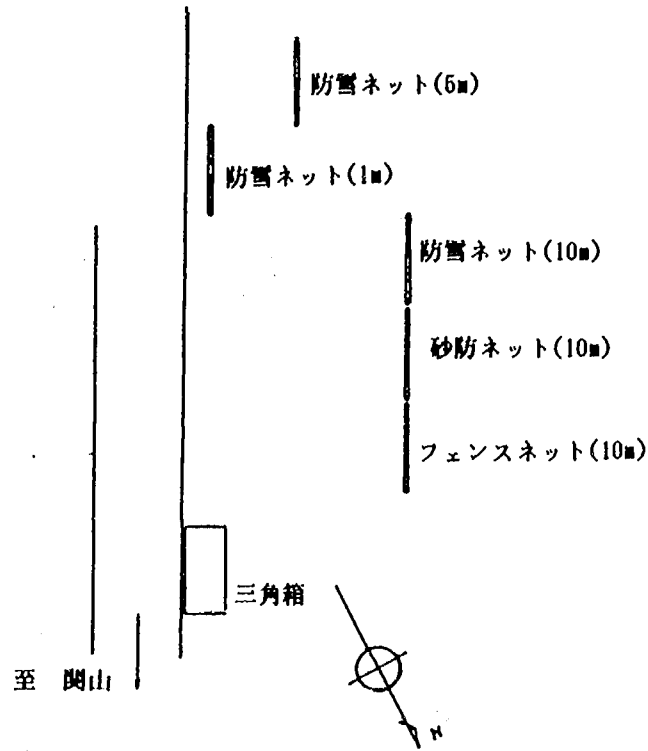
(2) 欄密度 30%



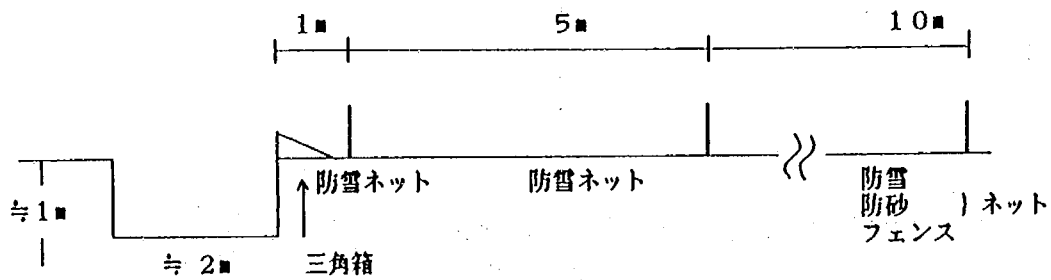
(3) 欄密度 50%

図-14 試験地における防雪施設の吹溜り実態

至 観測小屋



(平面図)



(断面図)

図-15 実験施設の配置

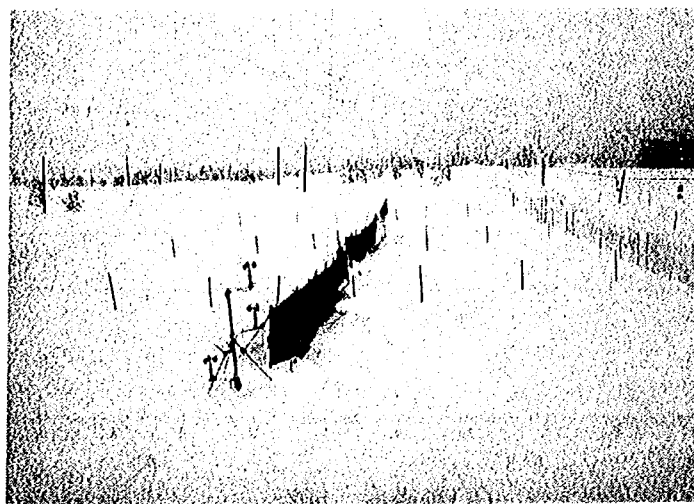


写真-6 防雪ネット前後の吹溜り形状

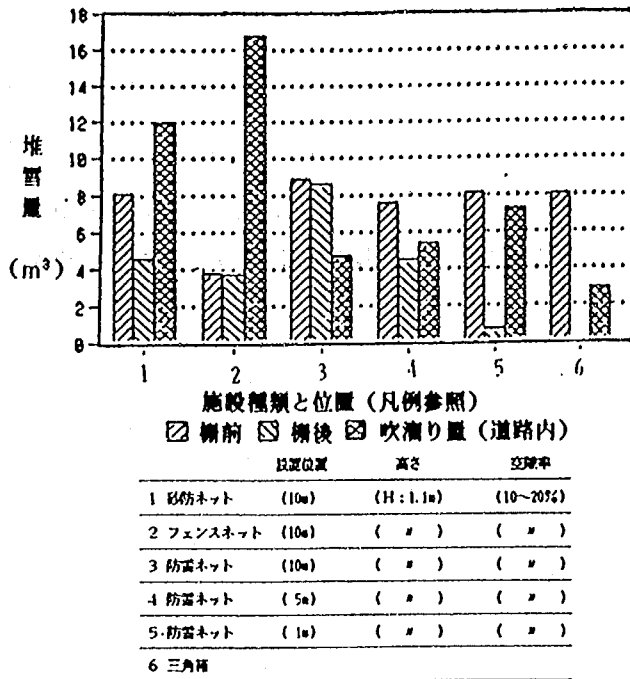


図-16 防雪効果の比較 (種類別)

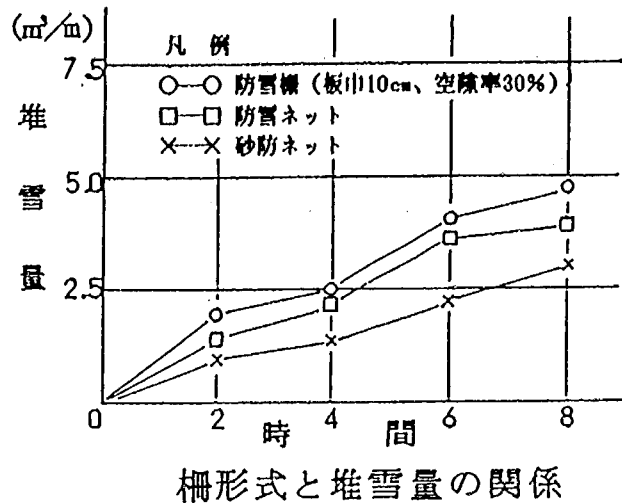


図-17 防雪効果比較 (時間別)

しかしながら、実際の工法としては設置時期、方法等実用化には難しい面もある。また、ネット類の設置位置からみると、ネット類は吹溜め柵の工法であるため、道路からある程度離す必要がある。その結果、実験では10mはなれたネットが吹溜め効果が高い結果が得られた。また、ネットの種類の効果比較では、防砂用、樹脂フェンス等に比べ防雪ネットの捕捉量が多く効果が高い結果が得られた。次にネット系統と板柵による効果の違いについては、図-17に示すように時間増加量からみても横ビーム方式の板柵がネットよりも効果が高いことがわかる。

2) 湿雪地における対策工のあり方

前に述べた雪丘形状の比較からもわかるように、湿雪地では雪粒子の付着力が強いことと降雪が多いため、現状の構造物では効果は期待できない。一般的に吹雪濃度は雪片粒子が、細かいほど吹雪時の走行には危険であり、ホワイトアウトというような前面が真っ白な状態が発生するが、北陸地方では、降雪時の気温が高いことから、雪片が大きいためよほどの寒気団が流入しないと細かい粒子状態は起ることが少ない。北陸地方でも地吹雪時の気象のみを考えた場合、強風、寒冷時が多いため北海道、東北のような対策工の考え方で十分通用するといえるが、強風に降雪が伴う風雪現象が非常に多い北陸では、湿った付着力の強い雪であることからネット等で柵密度を設定しても、網目をふさぎ柵密度 100%の吹溜め柵となってしまうことが多いため簡易型の工法は比較的効果は高いが、恒久対策の場合はやや疑問が残る。また、図-17の実験結果を総合的にみると、横ビームタイプで柵密度に幅を持たせた防雪柵タイプが、効果的であるといえよう。しかしながら、恒久的施設では積雪沈降力の大きい多雪地では効果を得ようとする場合は柵の全高が非常に高くなり、設計上の無駄も考えられる。このため多雪地においては、ある程度の積雪状

態になったときに簡易タイプを用いることにより、積雪による破損を少なくすることが可能になる。

5.3.4 吹雪時の視程特性

吹雪時における視程障害は、日中でも発生するホワイトアウトと呼ばれる危険な状態から夜間にライトの光が雪片に乱反射して全面が真っ白になるような状況まで幅広くにわたっている。その視程には動視程と静視程の2 ケースがあるが交通からは動視程の特性を解明する必要がある。しかし、夜間においてはライトの照射によって、落下する雪片が視覚に残像として残るため走行速度の低下を強いられる現象など、動視程については生理的条件の分野あるいは走行速度との関係等難しい問題があるので、現在、飛雪量との関係について実態を把握するために調査を進めている。

1) 飛雪空間密度と視程

雪は気温が低ければ水分のないサラサラとした細かい状態で降る。逆に気温が高ければ湿り気が多く粒子同士が付着しやすくなるため雪片の大きな雪となって降る。この特徴をふまえ図-18は平均風速2m/s以下での時間をとらえると全降雪量（無風に近い状態）とその時間における平均視程を気温で分類すると、降雪量が多くなれば視程は50mというような

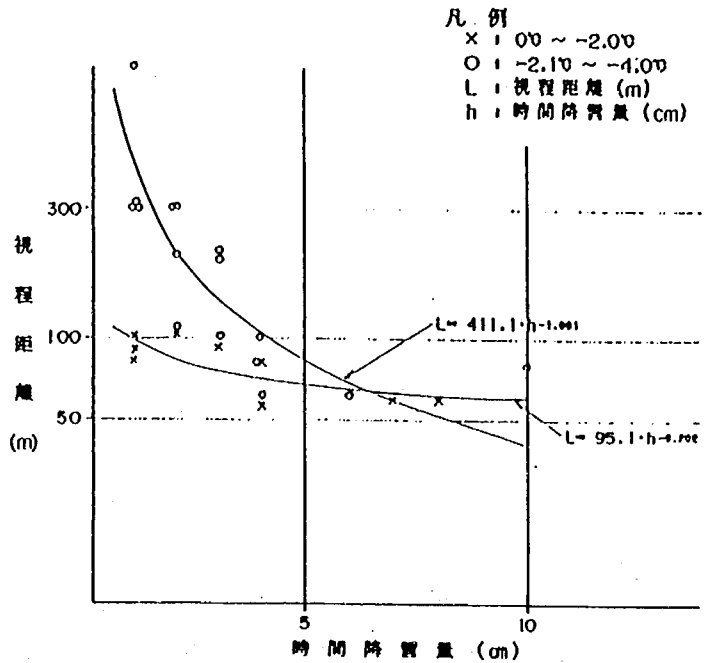


図-18 時間降雪量と視程の関係

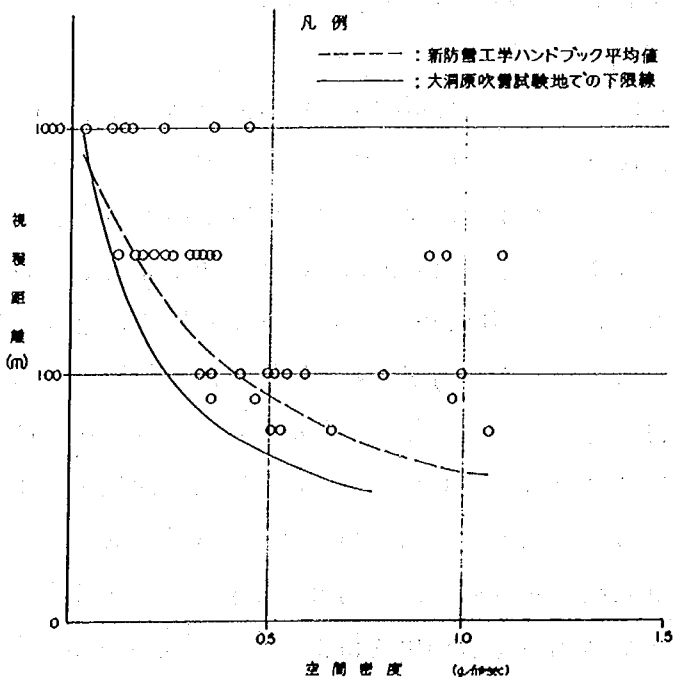


図-19 飛雪空間密度と視程の関係

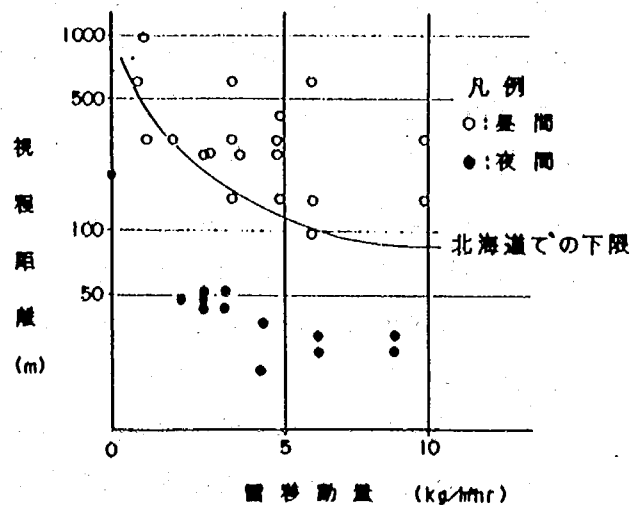


図-20 昼間と夜間の視程の比較

状況になり、降雪量が少なければ視程は良くなる。この傾向は図中からもわかるように気温の低い条件の降雪時に顕著である。しかし、気温が $0\sim-2^{\circ}\text{C}$ の分類では、この地域の特徴として降雪量が少ない時の気温の高い状態では、ガス等が発生することもあり、降雪量に関係なく視程が悪くなる現象も含まれている。この現象は北陸以南の温暖地では2月頃からよくみられる降雪と混ざった複合現象である。図-19は平均風速 3m/s 以上の吹雪時における視程観測の結果を、北海道で観測された視程と試験地で観測された視程を飛雪空間密度で比較した結果であるが、地域、気象が異なっても吹雪の強度と視程はほぼ同じ条件にあり、視程からみるといずれの地域においても条件は同じといえよう。また、図-20には昼間の静視程と夜間の動視程についての観測結果の一例を飛雪空間密度で比較した。この結果、夜間で降雪が 0Cm （雪移動量 $0\text{g/m}^2\text{s}$ ）の場合は標識の反射によりロービームでも 200m 程度の視程は確保されるが、降雪、吹雪が強くなり、飛雪空間密度が多くなっても視程の低下に対してあまり関係なくなる傾向にある。これは進行方向前面の雪片にライトが反射し、雪片が視覚上の残像として残るため雪移動量に関係なく視程が短くなるものと考えられる。

6. 大洞原試験地と北海道、東北の吹雪について

ここでは北陸を代表する都市と吹雪の多い北海道（札幌、岩見沢）、東北（酒田）との冬期気象について気温、風速、降雪日数の吹雪発生に関係する項目の特徴を把握することを目的として実施したものであり、今後の吹雪の発生予測等に寄与するための基礎データとしてまとめたものである。

6.1 地域的分類

本章では、吹雪発生の地域性を分類するために気温、風速等の気象統計資料よりまとめたものである。吹雪現象は、基本的には気温、風速、降雪の3条件がある。このうち風速の強弱によって吹雪、風雪等が発生するものといえるが、経験的にみるとその発生には地域の特徴があり、それによって対策などもおのずと変えなければならなくなる。以下、それらの特徴をまとめたものである。

6.1.1 使用した資料

本統計解析に用いた資料は札幌、岩見沢、酒田、新潟、長岡、高田、富山の各地方気象台が発表している気象月報と大洞原試験地および新井市の気象データよりまとめた。気象月報での統計年は観測期間の長い観測所もあるが、解析には52年～61年度の10年間を用いた（62年度～H1年度は少雪のためデータとしては用いない）。

札幌	10年 (S.52 ~ S.61)	岩見沢	10年 (S.52 ~ S.61)
酒田	28年 (S.34 ~ S.61)	新潟	27年 (S.35 ~ S.61)
長岡	27年 (S.35 ~ S.61)	高田	65年 (T.11 ~ S.61)
新井	26年 (S.36 ~ S.61)	関山	17年 (S.45 ~ S.61)
富山	35年 (S.27 ~ S.61)		

6. 1. 2 各地の再現確率積雪深

多雪地で吹溜り対策工の基本計画をたてる場合、何年に一回起こる積雪深で対処するかを検討するため各地の再現積雪深を求めその特徴をまとめた。再現確率を求める方法としては、分布関数式により確率計算を行うもので、対数正規分布による計算方法、対数ポアソンⅢ型分布による計算方法、などがある。

ここでは、ワイブプロット法を用い確率紙による簡略法で求めた。

この計算法のもととなる非超過確率と積雪深分布の関係を高田の65年間のデータからプロットすると図-21のように直線に近い関係となった。

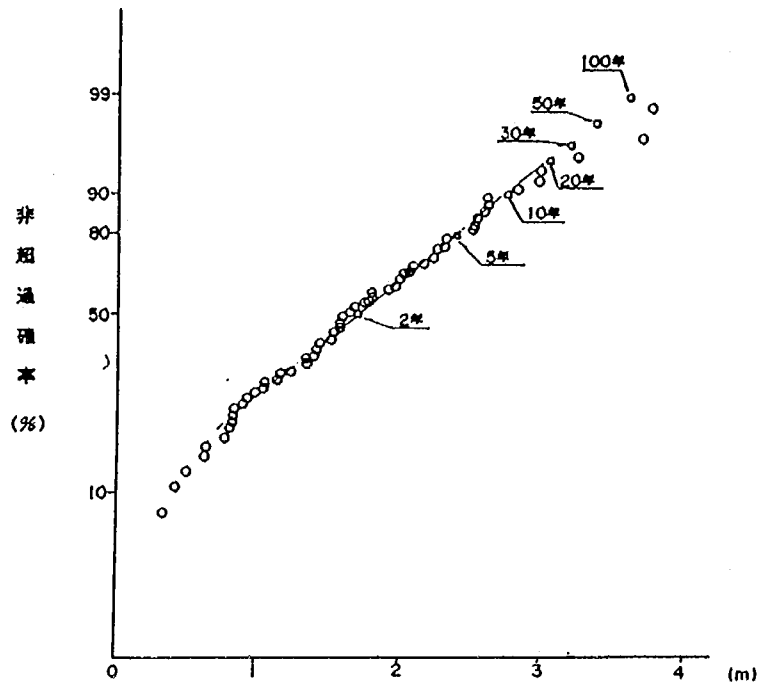


図-21 ワイブプロットによる積雪深の分布
(上越市高田)

この分布をもとに再現確率年と非超過確率の関係から期間再現値を求めた。

表-9は各地の再現期間毎の最大積雪深をまとめた結果である。表-9のように、多雪地帯である北陸地方の2年再現値と100年再現値の比が1:3程度であるのに対し、北海道での比は1:1.5以下となっていかに北陸地方の積雪深の変動が大きいかがわかる。同様の比較として、積雪深の最大と最小の観測値で比較すると、表-10に示すようにさらに値は大きく新潟、高田、長岡で

表-9 再現最大積雪深一覧表

観測点名	2年	5年	10年	20年	30年	50年	100年
札幌	106.1	117.0	123.8	130.1	133.7	138.1	143.9
岩見沢	123.0	140.8	150.6	159.1	163.6	169.0	175.8
酒田	33.6	52.0	64.5	76.6	83.7	92.6	104.9
新潟	35.4	58.9	77.0	98.6	111.6	129.1	154.8
長岡	132.0	196.5	237.3	275.2	296.6	323.1	358.5
高田	161.9	234.3	279.9	322.4	346.3	375.9	415.5
新井	194.1	287.8	345.7	398.8	428.5	464.9	513.2
富山	73.2	111.9	138.5	164.5	179.9	199.4	226.2

表-10 積雪深の最大・最小極値比較 (Cm)

観測地点名	最大極値	最小極値	比
札幌	127	92	1.4
岩見沢	161	98	1.6
酒田	76	11	6.9
新潟	87	20	4.4
長岡	318	33	9.6
高田	377	34	11.1
関山	362	70	5.2
富山	186	25	7.4

の変動は10倍近くになっている。図-22は表-9の年間再現値の分布の比較を行なったものであり、積雪深の増加傾向を表したものである。このような結果から、北陸地方では最大再現期間を何年とするかが対策工計画で大きな問題であり、対策工法の構造、形式も一律では地域によって最適効果を期待できないといえる。

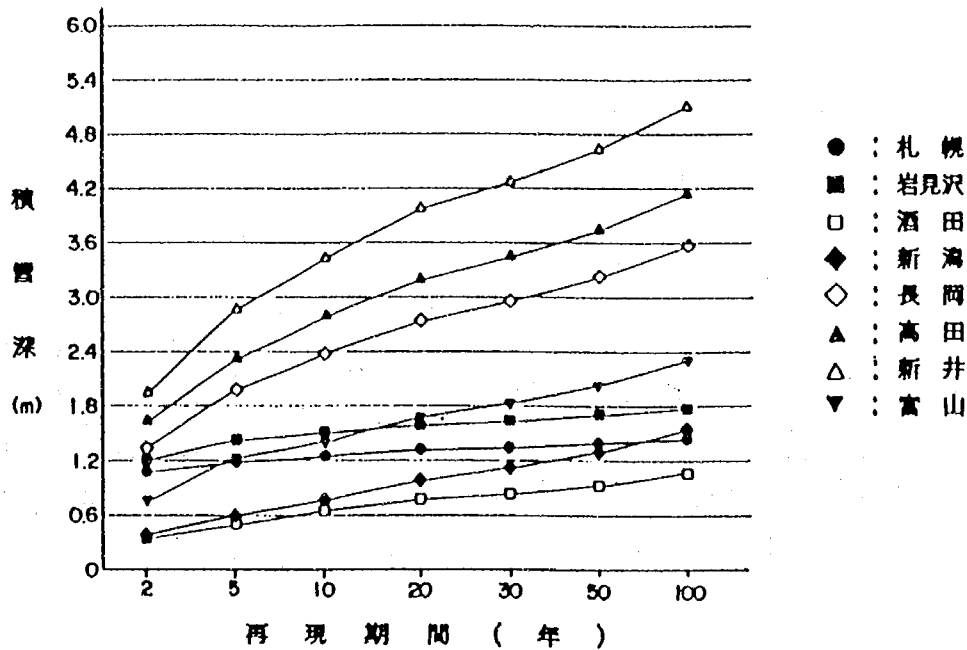


図-22 再現最大積雪深の比較

6. 1. 3 各地の降雪日数

表-11に示す各地の一覧表は、上空からの降雪のみであるため吹雪回数には直接関係しないとも考えられるが、吹雪の直接原因となる新雪であることには変わりなく、吹雪発生環境の基礎回数としてとらえることは可能ではないかと考えられる。なお、降雪日は0cm以上で雪がチラつく程度でも気象月報に0cmと記載されている日を降雪日1回とカウントしている。この中で当然のことながら各地とも1、2月に多く12月3月は少ないが、特に本州の日本海側の気象変化の激しさを表していると考えられる。

表-11 各地の年別降雪日一覧表

札幌

年度	12	1	2	3	合計
52	13	25	20	—	58
53	14	22	17	17	70
54	7	12	17	6	42
55	7	15	6	11	39
56	11	15	8	4	38
57	11	10	11	6	38
58	5	9	15	9	38
59	6	15	8	4	33
60	9	12	10	5	36
61	8	12	7	9	36
合計	91	147	119	71	428

岩見沢

年度	12	1	2	3	合計
52	10	25	18	—	53
53	14	22	21	19	76
54	9	16	10	12	47
55	10	14	10	4	38
56	12	13	11	6	42
57	15	10	9	6	40
58	11	11	12	7	41
59	8	13	9	7	37
60	15	12	11	7	45
61	11	15	11	7	44
合計	115	151	122	75	463

酒田

年度	12	1	2	3	合計
52	14	30	25	21	90
53	18	22	18	19	77
54	17	24	27	20	88
55	23	31	24	15	93
56	15	22	26	25	88
57	18	25	25	16	84
58	25	31	28	29	113
59	19	31	22	14	86
60	20	28	28	9	85
61	12	29	20	18	79
合計	181	273	243	186	883

新潟

年度	12	1	2	3	合計
52	—	26	25	12	63
53	12	20	14	14	60
54	10	23	24	15	72
55	18	31	24	11	84
56	14	23	22	10	69
57	11	24	11	19	65
58	19	31	27	20	97
59	28	18	10	20	76
60	20	28	27	12	87
61	16	26	20	15	77
合計	148	250	204	148	750

高田

年度	12	1	2	3	合計
52	—	28	27	13	68
53	13	20	13	17	63
54	13	22	26	14	75
55	17	31	22	13	83
56	15	25	22	9	71
57	13	21	10	—	44
58	25	30	27	19	101
59	19	28	20	12	79
60	19	28	27	14	88
61	12	26	18	14	70
合計	146	259	212	125	742

富山

年度	12	1	2	3	合計
52	9	26	19	5	59
53	9	21	24	14	68
54	8	10	7	3	28
55	2	16	22	2	42
56	17	29	20	12	78
57	10	22	17	8	57
58	6	18	20	7	51
59	7	17	27	25	76
60	16	23	15	7	61
61	10	22	18	13	63
合計	94	204	189	96	583

6. 1. 4 降雪日の気温

表-12は各地の気温の項目別平均値をまとめた結果である。この結果から見ると吹雪常習地である札幌、岩見沢の降雪時の平均気温の平均値は-4~-5℃であるのに対し、酒田以南の観測点の平均気温の平均値は 1.0℃前後となり、北海道との地域差が明確である。また、この分類によって特に本州では吹雪の発生が頻繁な酒田の降雪時平均気温より富山、長岡の気温が低くなっていることは注目し値するとともに、札幌、岩見沢の標準偏差の値が大きく異なるのも特徴の一つである。このことは図-23に示す正規分布図からもわかる。また、北陸地方では観測点の中で標高が高く降積雪が最も多い関山の標準偏差が酒田、新潟、高田、富山よりも大きくなっている。この傾向は、最高気温、最低気温の場合にも同様となっている。

表-12 降雪日の気温

最高気温の平均値 (°C)			最低気温の平均値 (°C)			平均気温の平均 (°C)		
観測地点名	平均値	標準偏差	観測地点名	平均値	標準偏差	観測地点名	平均値	標準偏差
札幌	-1.13	4.28	札幌	-7.53	13.46	札幌	-4.24	8.03
岩見沢	-2.21	5.41	岩見沢	-9.41	16.24	岩見沢	-5.47	9.87
酒田	3.46	2.94	酒田	-1.49	2.49	酒田	1.00	2.32
新潟	4.36	3.52	新潟	-0.55	2.21	新潟	1.81	2.14
長岡	3.07	3.17	長岡	-1.28	2.27	長岡	0.83	2.27
高田	4.29	3.08	高田	-0.93	2.08	高田	1.38	2.06
関山	3.11	3.98	関山	-2.51	2.74	関山	-2.33	3.09
富山	3.53	3.20	富山	-1.35	2.12	富山	0.84	2.08

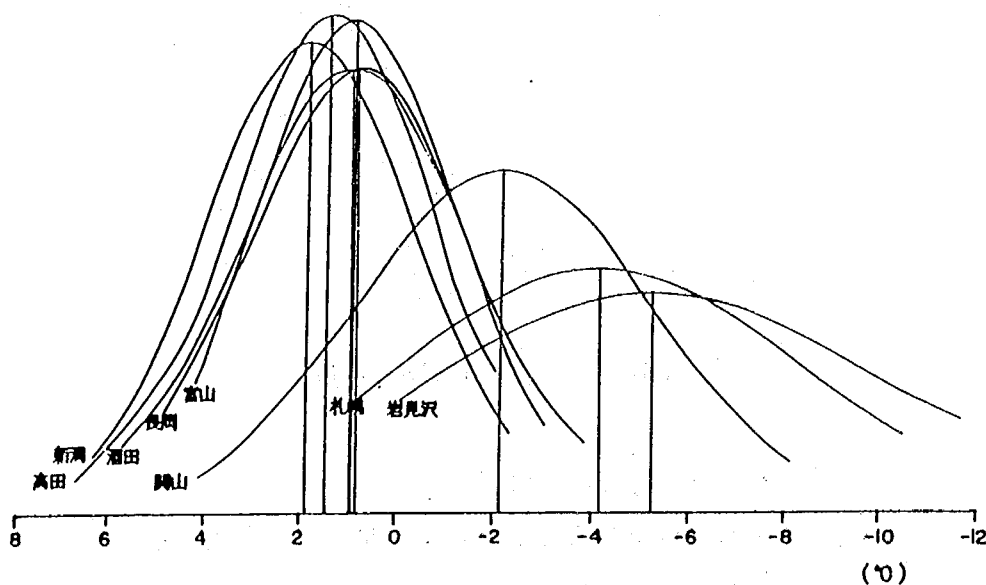


図-23 平均気温の正規分布

6. 1. 5 降雪日の日平均風速

気温の項と同一の資料を用いて吹雪発生の一方向の要因である風速の特徴を日平均風速について図-24、表-13にまとめた。この結果、図-24の正規分布からもわかるように新潟市を除く北陸地方と酒田市と札幌、岩見沢の3区分に分けられる分布を示している。

この中で札幌、岩見沢、新潟はピーク値のない風速分布となり平均風速の特徴は見られないが、分布範囲からは風の強い地域であるといえる。また、新潟以外の北陸地方の3都市では寒気団の襲来が風を伴うものであり、日平均風速の平均値は2.1~2.4m/sとほぼ同じ風速である。また、吹雪に起因する風速からみると札幌、岩見沢は酒田よりも1~2m/s弱い吹雪の常習地として考えられることは、吹雪となる雪が低温で密度が小さく、さらに乾き雪であることから飛雪になりやすい状態の雪質であるといえる。一方、北陸地域の風速は、札幌、岩見沢とさほどかわらないにもかかわらず、地吹雪が少ないのは、雪温が0℃付近の付着力の強い飛雪しにくい湿り雪であることから、吹雪発生件数に差がでるものと考えられる。また、酒田と新潟では日本海側に面している地形的特徴で風速が強い条件の中で差があるのは、酒田は積雪深が少ない割りに降雪日数が多いため新潟よりも吹雪の発生数が多いものと考えられる。

表-13 各地の平均風速一覧表

冬期平均風速の平均 (m/s)		
観測地点名	平均値	標準偏差
札幌	2.08	1.63
岩見沢	3.04	2.10
酒田	4.93	2.20
新潟	4.80	4.18
長岡	2.22	1.49
高田	2.43	1.31
関山	1.34	0.68
富山	2.10	1.20

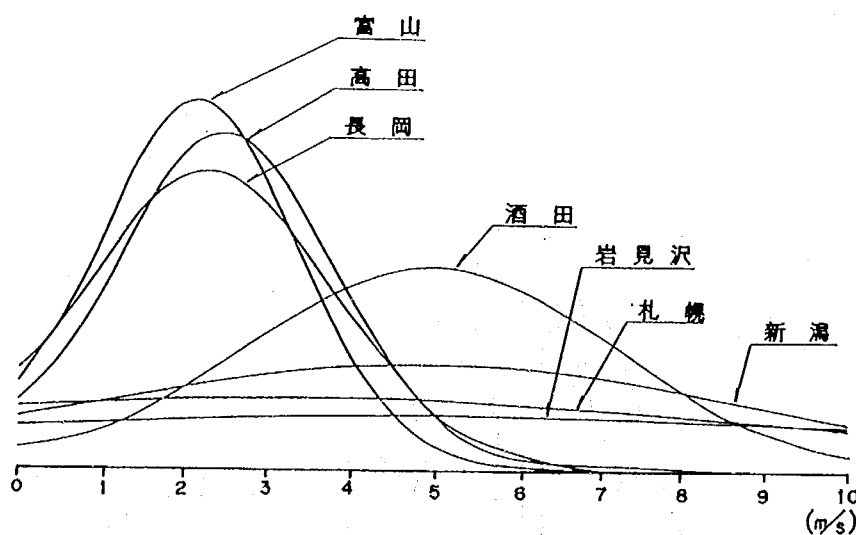


図-24 降雪日風速の正規分布

6. 1. 6 気象分類からみた地域的な特徴

以上の気温、風速の地域的分類からみると各々、北海道、東北、北陸において様々な特徴を持つことがわかった。その特徴としては、

- (1) 北海道は相対的に気温が低いために、雪粒子の焼結が遅く、パウダースノーと呼ばれるよ

うにサラサラしていて雪粒子が細かいことから、風が発生することによって吹雪、特に地吹雪が発生しやすい気象条件にある。

- (2) 東北の酒田については海岸に近いという地形環境もあるが他の地域に比べ風速が強く降雪日数も多く、気温は北海道と北陸の中間の値であるが、風速が北陸地方に比べ倍近いことと北海道と同様に広大な水田地帯であることから地吹雪の発生環境が整っている地域といえるであろう。
- (3) 北陸地方では降雪日数が多い地域であり、長岡以西では気温が一般的に高いことから雪の性質は湿り雪で重く、これによって雪粒の焼結が進むため吹雪状態が非常に多い。しかし、強い寒気団が来襲することによって、水田地帯、海岸部を中心に地吹雪が発生する地域である。

以上のことから地域的な分類をすれば、北海道、東北の両地域とも地吹雪が主流であるが、北陸はそれらの地域と異なる風雪を含んだ吹雪が多いことがわかった。

6. 1. 7 吹雪対策の概念

吹雪、吹溜りの発生は地上における交通体系（道路、空港、鉄道）のいずれにおける形態の中でも円滑な機能を阻害している。これまでの検討結果をもとに吹雪形態を、積雪深と気温から地域別に発生区分の概念図をまとめると図-25のようになる。本調査の対象とする道路交通をみても吹雪の形態は、局所的な吹雪と区間的な長さを有する吹雪の2種類がある。この吹雪は地形、気象の特徴から毎年、何回か発生する特定地域と、その冬期における気象特性によつての突発的な吹雪発生地域がある。前者のような吹雪の常習地についての対策は場所が限定できるため、対策工法の選択は比較的方法を見つけやすいといえる。しかしながら、局所的な発生および気象条件に左右されて発生するような吹雪は突発的であることから、対応は極めて難しく管理上困難なこ

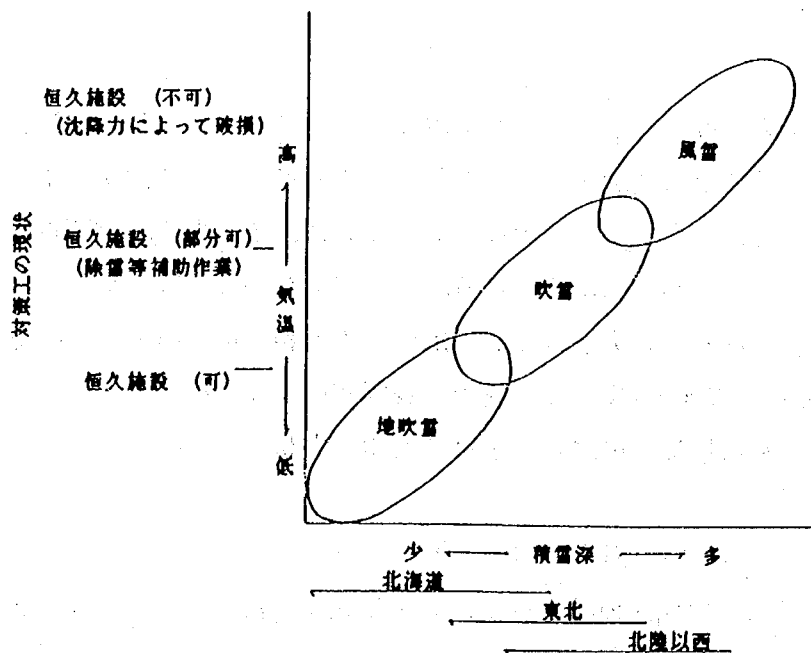


図-25 吹雪の地域性と対策の概念図

とが多い。このように道路を管理する上では吹雪の情報をいかに早く入手し、道路利用者への情報伝達、吹溜り防除等を行い安全確保のための機能低下を最小限に防ぐかが問題となっている。このような管理者が必要とする情報要素（吹雪強度、持続性、視程、吹溜り量等）についてその特性を解明し、道路交通の機能維持を図るための管理運用手法を確立しなければならない。

7. 吹溜り形状シミュレーション手法の開発

7. 1. 開発目的

吹雪、吹溜りの発生機構を解明し、形態、規模等を予測することは道路の安全対策を実施する上で重要な課題となっている。現在、防雪施設の設置計画は、新編防雪工学ハンドブック等を基本として道路管理者が独自のマニュアルを設定して施工を行っている。しかし、それは経験によるものであり、設置位置等については十分な効果を得られるまでになっていないのが実状と考えられる。

そこで、大洞原試験地における実測データをもとに吹雪、吹溜りシミュレーションを開発することを目的として着手した。吹溜り対策を効果的な施設とするために理論式を基に経験がなくとも、その計画する地域の気象特性がわかれば、道路に対する設置位置、規模の基本計画を策定することが可能となる。その結果を基に技術者が判断して最適効果を得るための基礎資料となるものである。

7. 2 開発概要

吹溜りシミュレーションを開発するための基礎データは、大洞原試験地を主として溝内に吹溜る雪の量、形状等の実態調査と、その時の気象データを収集した結果をもとにした。基本的な理論の導入に際しては流砂および吹溜りに関する研究成果等を参考にし、モデルの構築についての検討と解析を行った。その結果をもとに2次元シミュレーションの開発を進め、開発→データ検証→改良を繰り返し、2次元シミュレーションをほぼ完成するに至ったものである。詳細については以下の各節で内容を説明する。

7. 3 吹雪の発生機構

7. 3. 1 跳躍

吹雪における雪粒子の移動形態を転動または滑動、跳躍（サルテーション）、浮遊（サスペンション）の3種類に分けている（図-2）。これらの移動形態のうち浮遊は空中の雪粒子の運動形態であり、地吹雪の発生に関与するものについては主に跳躍である。跳躍現象についてはBagnold、河村、Owenらが行った飛砂の研究がある。その研究結果によれば跳躍に関係する物理量は、雪粒子の大きさ d 、密度 σ 、重力加速度 g 、風による雪粒子の剪断応力 τ_0 であって無次元量 $\tau_0/\sigma \cdot g \cdot d$ がある限界値 y_s を超えた場合に跳躍が始まる。Bagnoldはその限界値 $y_s=0.0064$ としている。一方、乱流境界層の理論によれば剪断応力は

$$\tau_0 = \rho u_*^2 \quad (1)$$

但し、 ρ ：空気密度、 u_* ：摩擦速度（m/s）

で与えられる。さらに u_* は風速の鉛直分布に関する式から決定することができる。

$$u(z) = \frac{u_*}{k} \ln(z/z_0) \quad (2)$$

但し、 $u(z)$: 高さ z における風速 (m/s)

k : カルマン定数 (≈ 0.4)

z_0 : 粗度長 (m)

ここで z_0 は吹雪の状態において一般的には 0.01~1mm の値をとっているが、高さ別に風速が多く観測されていれば u_* とともに最小二乗法で決めることができる。このような考え方から地吹雪を発生させる跳躍運動は風速の鉛直分布、雪粒子の大きさと密度によって決まることがわかる。

7. 3. 2 浮遊状態における雪粒子の拡散

地吹雪の発生運動は跳躍から始まり、さらに空気中への浮遊運動に変化する。Owenによれば跳躍で移動するのは $\tau_0 / \sigma \cdot g \xi$ が 0.01~1 の範囲でそれを超えると浮遊がはじまる。雪の場合、この考え方では風速 22m/s 以上に相当するが、北海道大学の小林教授によれば北海道では 8m/s 程度の風速でも全体量の 20~30% が浮遊状態とされている。この浮遊運動においては風の乱流による拡散項が重要な役割を果たす。すなわち、雪粒子の落下速度が w_p 、乱流拡散係数が ε_z の時、飛雪密度 n が定常となる条件として次式が求められる。

$$w_p \cdot n - \varepsilon_z \frac{\partial n}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

乱流境界層理論により

$$\varepsilon_z = K u_* z \quad (4)$$

を用いれば飛雪空間密度の鉛直分布として次式が得られる。

$$\frac{n}{n_1} = \left(\frac{z}{z_1} \right)^{-w_p / (k u_*)} \quad (5)$$

しかし、この式は時間的、空間的に定常な場合に成り立つものであり、現実的な問題として、道路のように風速が変動する場については拡散方程式は鉛直 2 次元では次のように拡大される。

$$\begin{aligned} \frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\partial n}{\partial x} + (w + w_p) \frac{\partial n}{\partial z} = & \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_x \frac{\partial n}{\partial x} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_z \frac{\partial n}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

この拡散方程式は、雪面直近を除く全空間に存在する飛雪に対し適用できる。一方、この拡散方程式に含まれる雪粒子の落下速度 (w_p) は雪粒子の運動方程式により決定される。すなわち、空気中を落下する質量 m の粒子運動は Stokes の法則により

$$m \frac{dw_p}{dt} = -mg - 3\pi \cdot \eta \cdot D \cdot w_p \quad (7)$$

ここに g : 重力加速度

η : 空気の粘性率

D : 粒子の直径

上式から終端速度 ($dw_p/dt = 0$) の時の速度は次のようになる。

$$w_p = \frac{mg}{3\pi \cdot \eta \cdot D}$$

一般的に雪粒子の落下速度は -0.3 m/s 程度 (- は下向き速度) といわれこの速度は、粒子の浮遊時間の長い吹雪において成り立つが雪面付近の跳躍運動では上向きの速度を有する雪粒子が多いことから、地吹雪ではこの速度値は用いられない。

7. 3. 3 地吹雪量の推定

地吹雪量の推定式は、これまでの国内外の研究者によって多くの式が提案されているが、その基本としては小林教授の式のように風速の3乗との比例関係である。

$$Q = 0.03 V^3 \quad (8)$$

但し、Q : 地吹雪量 ($\text{g/m}\cdot\text{s}$) , V : 1 m の高さの風速 (m/s) , Q は雪面上の風向に垂直な単位幅の上を単位時間に通過する全高度の地吹雪量である。このときの地吹雪密度、すなわち空気中の風向に垂直な単位断面を単位時間に通過する飛雪量を q ($\text{g/m}^2 \cdot \text{s}$) とすれば

$$Q = \int_0^h q \cdot dz \quad (9)$$

の関係がある。但し、h は地吹雪の高さである。また、地吹雪量が V^3 との関係にあることはエネルギーフラックスすなわち単位断面を単位時間に通過するエネルギーが

$$E = \frac{1}{2} \rho \cdot V^3 \quad (10)$$

で与えられることに関連している。しかし、単位面積当りのエネルギー流に比例するものは Q よりも q と考えられる。

$$q \propto V^3$$

(9) 式で q の定義式は、

$$q = n \cdot u \quad (11)$$

であるが、これに (2) 、 (5) 式を用いると次の式となる

$$q = n_1 \left(\frac{z}{z_1} \right)^{-w/(ku)} \cdot \frac{u}{k} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (12)$$

これを z について積分すると

$$Q = \int_0^\infty q dz = \frac{n_1 u}{k} \cdot \frac{z_0}{1 - k \frac{w_p}{u}} \quad (13)$$

ここで高さ z_1 における飛雪密度 n_1 が u^2 に比例すると仮定すれば

$$n_1 = c \cdot u^2 \quad (14)$$

(これは雪面における剪断応力 $\tau = \rho u_*^2$ (ρ は空気密度) によって雪粒子が上方へ舞い上がることから類堆される)

さらに式を変換すると

$$Q = \frac{c \cdot z_0 \cdot k^2}{\left\{ \ln \frac{z}{z_0} \right\}^3} V_1^3 \left(\frac{1}{1 - \frac{w_p}{k \cdot u_*}} \right)^3 \quad (15)$$

となる。この結果 (11) 式に風速の鉛直分布式 (2) および飛雪空間密度の鉛直分布式 (5) を用い、飛雪密度と雪面剪断応力の関係を仮定すれば

$$Q \propto V^3$$

となり吹雪量は風速の関係によって解析条件が満たされることになる。

7. 4 シミュレーションモデルの基本

昭和60年度より吹溜り実態調査で測定された吹溜り形状と気象観測データをもとに既往の吹雪、地吹雪に関係する理論式をモデルとして検討を行っている。このモデル式の基本は、気流と飛雪拡散現象により行うこととし、用いる基本式の考え方は次のとおりである。

- ① 気流モデルの基礎方程式は Navier-Stokes の運動方程式および連続方程式であるが、現在のシミュレーションモデルでは動粘性係数は小さいので無視して、Boussinesq によって Reynolds 応力を乱流拡散で近似する手法を用いている。
- ② 飛雪拡散モデルの基礎方程式は拡散方程式および雪粒子の鉛直運動方程式であり、与えられた落下速度、飛雪密度等の初期条件、境界条件より求める。

以上のモデル式による、数値解析はいずれも差分法を用いて行っている。

7. 5 シミュレーションの計算過程

吹雪、吹溜りシミュレーションの基本構成は次の通りである。

- (1) 吹雪、吹溜りシミュレーションでは盛土、切土断面などの地形によって変動する風速分布の再現
- (2) 風速分布の中で浮遊する雪粒子拡散の再現

このモデル構成は、自動車排気ガスの拡散モデル (APPS 等) と基本的には同じであるが自動車排気ガスモデルと異なる固有の問題として次の点が挙げられる。

- 1) 跳躍により雪面から空中に雪粒子が舞上げられること
- 2) 雪粒子の落下速度

この2つのうち1)については雪面付近の飛雪密度が雪面の乱流剪断応力に比例するという仮定を用いることによって可能となる。この仮定は河川の掃流砂に関する土研公式と同様なものである。また、2)については大気拡散における粉塵等の浮遊粒子状物質と同様の手法が適用できるが、この場合、落下速度として終端速度を用いると雪面における跳躍による上向きの速度を持つ雪粒子の運動が再現されないため鉛直方向の雪粒子の運動方程式を考慮する必要がある。

7. 5. 1 風速分布

初期の自動車排気ガスモデルでは、地形による風の変化をポテンシャル流れによって与えてい

るものであるが、ポテンシャル流れはうずなしの層流であって、吹雪のような乱流が主要流れには適切ではない。このため、流れの基本方程式として、Navier-Stokes 方程式を用いる必要がある。切土断面に横から風が吹く場合に適用される鉛直2次元のNavier-Stokes 方程式は次の通りである。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (16)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (17)$$

また、連続方程式は次の通りである。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (18)$$

ここで p は気圧、 ν は動粘性係数である。

これらの方程式は通常差分法、有限要素法などの数値解析によって解かれる。しかし、これらをそのまま差分化しても本来の乱流場を求めることはできない。これは、差分化によって差分格子間隔より小さいスケールの変動成分が消されるためである。これをみるために、式(15)において u , w , p を格子内での平均成分

\bar{u} , \bar{w} , \bar{p} および格子スケール以下の変動成分 u' , w' , p' に分ける。

$$u = \bar{u} + u'$$

$$w = \bar{w} + w'$$

$$p = \bar{p} + p'$$

そこで式(16)は次のようになる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial u'}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial u'}{\partial x} + \bar{u} \frac{\partial u'}{\partial x} + u' \frac{\partial u'}{\partial x} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \bar{w} \frac{\partial u'}{\partial z} + w' \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + w' \frac{\partial u'}{\partial z} \\ = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial (\bar{p} + p')}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 (\bar{u} + u')}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 (\bar{u} + u')}{\partial z^2} \right) \end{aligned}$$

ここで、この方程式の格子内での平均をとれば、

$$\bar{u}' = 0, \bar{w}' = 0, \bar{p}' = 0$$

であることを考慮して

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial z^2} \right) \\ - \frac{\partial}{\partial x} \overline{(u')^2} - \frac{\partial}{\partial z} \overline{(w' \cdot u')} \end{aligned}$$

すなわち、もとの方程式(15)にくらべて $\overline{(u')^2}$ および $\overline{(w' \cdot u')}$ の項がふえる。こ

これらの項は Reynolds応力と呼ばれるが、Navier-stokes方程式の数値解法ではReynolds応力を合理的に評価することが重要である。近年、乱流のシミュレーションモデルとして、k-εモデル、LESモデルなどが開発され、ここでは上記のReynolds応力を流れの基本量(u, wなど)とともに基礎方程式から解くことがなされている。しかし、これらのモデルは計算量がきわめて多くただちに適用し難い。そこでシミュレーションでは、Boussinesq に従いReynolds 応力を乱流拡散で近以する手法を用いることとする。

$$\overline{u'^2} = k_x \frac{\partial \bar{u}}{\partial x}$$

$$\overline{w'u'} = k_z \frac{\partial \bar{u}}{\partial z}$$

動粘性係数νは乱流拡散に比べて十分小さいので無視し、平均値を表す $\bar{\quad}$ を省略すれば式(16)に変わる方程式として次式が得られる。

$$\frac{u}{t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (k_x \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z} (k_z \frac{\partial u}{\partial z}) \quad (19)$$

式(20)も同様に

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (k_x \frac{\partial w}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z} (k_z \frac{\partial w}{\partial z}) \quad (20)$$

ここに u : 風速水平成分
w : 風速垂直成分
K_x : 渦拡散係数水平成分
K_z : 渦拡散係数鉛直成分

Reynolds応力に対するこのような仮定は、方程式を簡単にし、比較的少ない計算時間で一応妥当な解を求めるための現実的手法であるが、吹雪シミュレーションの将来展望としては、前述した乱流モデルの適用も検討されるべきであろう。

7.5.2 雪粒子の拡散

浮遊する雪粒子の拡散は、次の拡散方程式による。

$$\frac{\partial n}{\partial t} + u \frac{\partial n}{\partial x} + (w + w_p) \frac{\partial n}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} (\epsilon_x \frac{\partial n}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z} (\epsilon_z \frac{\partial n}{\partial z}) \quad (21)$$

n : 飛雪密度

w_p : 雪粒子の落下速度

ε_x、ε_z は乱流拡散係数で、前項に示した K_x、K_zと同様に、Reynolds応力からBoussinesq近以により導かれる。雪粒子個々の落下速度w_pは運動方程式(7)から求められる。しかし、吹雪時の膨大な数の雪粒子についてこれを行うことは不可能であり、また式(21)においては個々の粒子の落下速度を知る必要もない。むしろ Euler座標系で記述されている拡散方程式(21)

に用いるためには、 w_p もEuler系における“場”として、すなわち、空間に固定された座標の各点において、その周辺に存在する雪粒子の平均的な落下速度として与えられることが必要である。このようなEuler系における w_p の表式は以下のようにして得られる。雪の粒子密度を σ 、単位体積中の雪粒子を N とすれば、飛雪空間密度 n は次のように表される。

$$n = Nm = N\sigma \frac{\pi}{6} D^3 \quad (22)$$

また、式(7)中の空気抵抗の項は次のように表される。

$$3\pi\eta Dw_p = 18m \frac{\eta}{\sigma D^3} w_p \quad (23)$$

N 個からなる雪粒子全体の運動方程式は、式(7)に N を乗じて得られるが、これに(22)、(23)を用いれば、

$$\frac{dQ}{dt} = -ng - KQ \quad (24)$$

ただし、

$$Q = n \cdot w_p \quad Q: \text{鉛直雪移動量} \quad (25)$$

$$K = 18 \frac{\eta}{\sigma D^2}$$

式(24)において常微分を実質微分で置き換えれば Euler座標系における運動方程式が得られるが、ここでも乱流拡散項を考慮すれば次のようになる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial t} + u \frac{\partial Q}{\partial x} + (w+w_p) \frac{\partial Q}{\partial z} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial Q}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial Q}{\partial z} \right) - ng - K \cdot Q \end{aligned} \quad (26)$$

(26) および (25) が雪粒子の落下速度 w_p を決定する方程式である。

7. 5. 3 飛雪拡散の地表面境界条件

飛雪拡散方程式の地表面における境界条件は地吹雪と風雪で異なる。

a) 地吹雪

地吹雪においては雪面からの雪粒子の舞い上げが重要な関心事となるが、この量は雪面における剪断応力

$$\tau = \rho \cdot u_{*1}^2$$

に関係している。従って雪面に最も近い格子点における飛雪密度 n_{1j0} は

$$n_{1j0} = c \cdot u_{*1}^2$$

と考えられる。ただし、 u_{*1} はその地点の局所的な摩擦速度で、次式により求められる。

$$u_{*1} = k \cdot u_{1j0} / \ln(z_{j0}/z_0)$$

比例係数 c は雪質などによって異なると考えられるので、実験結果との照合によって求める。

b) 風雪

地吹雪がなく風雪のみの場合は雪面からの舞上げはない。この場合、雪粒子は雪面で反射し、次の境界条件が成り立つ。

$$\frac{\partial n}{\partial z} = 0$$

これは差分式では次のようになる。

$$n_{i j_0} = n_{i j_0+1}$$

c) 地吹雪+風雪

一般の場合は、雪面から舞上げすなわち地吹雪と、風雪が混合しているものと考えられる。従って境界条件は両者を線形結合したものとなる。

$$n_{i j_0} = a \cdot c \cdot u_{i+1}^2 + (1-a) n_{i j_0+1}$$

この場合、 a は $0 < a < 1$ の範囲である。

$a = 1$ は地吹雪、 0 は風雪

d) 雪粒子鉛直運動方程式

雪粒子の鉛直運動方程式の雪面境界条件は、雪面を通過する雪移動はないので

$Q = 0$ とする。

7. 5. 4 吹溜り量の算定式

雪面直上の格子点 (i, j_0) 、 $(i+1, j_0)$ 、 (i, j_0+1) 、 $(i+1, j_0+1)$ で囲まれる領域について、飛雪の収支を考える。この領域に他の領域から流入する雪量は

$$(\bar{n}_i u_{i j_0} - \bar{n}_{i+1} u_{i+1 j_0}) \Delta z - \bar{n}_{j_0+1} w_{i j_0+1} \Delta x$$

ここに

$$\bar{n}_i = (1/2) (n_{i j_0} + n_{i j_0+1})$$

$$\bar{n}_{i+1} = (1/2) (n_{i+1 j_0} + n_{i+1 j_0+1})$$

$$\bar{n}_{j_0+1} = (1/2) (n_{i j_0+1} + n_{i+1 j_0+1})$$

一方、雪面から単位時間に上方へ運ばれる雪量は

$$a \cdot c \cdot u_{i+1}^2 / \Delta t \quad (\text{下流 } i+1 \text{ の格子へ運ばれる})$$

従って単位時間に溜る量は

$$\frac{d Q_0}{d t} = (n_i \bar{u}_{i j_0} - \bar{n}_{i+1} u_{i+1 j_0}) \Delta z - \bar{n}_{j_0+1} w_{i j_0+1} \Delta x - a c u_{i+1}^2 / \Delta t$$

吹雪時間 T に溜る量は

$$Q_0 = \int_0^T \frac{d Q_0}{d t} d t \quad (g/m)$$

T 時間における堆雪量を h (m) とすれば

$$\sigma \Delta x h = \int_0^T \frac{d Q_0}{d t} d t = \frac{d Q_0}{d t} \cdot T$$

ここに σ : 堆雪密度 $[g/m^3]$

$$h = \frac{\overline{\frac{dQ_G}{dt}} \cdot T}{\sigma \Delta x} = c_g \frac{\overline{\frac{dQ_G}{dt}}}{\sigma \Delta x}$$

ここに

$$c_g = \frac{T}{\sigma \Delta x}$$

いま $T = 1$ (時間) = 3600 (sec)

$\sigma = 0.1$ $[g/m^3] = 105$ $[g/m^3]$

$\Delta x = 0.2$ (m)

とすれば

$$c_g = 0.18$$

ここに c_g は堆雪量 h を単位時間当りに変換するための変換係数。

となるが、これは風速や堆雪量が一定の場合の理論値である。実際に解析を行うときにはこの値にこだわらず実験時の堆雪状態を最もよく再現する手法で解析を行っている。

以上の基本式をもとに、図-26に示すフローによって計算を実行する。

計算フロー

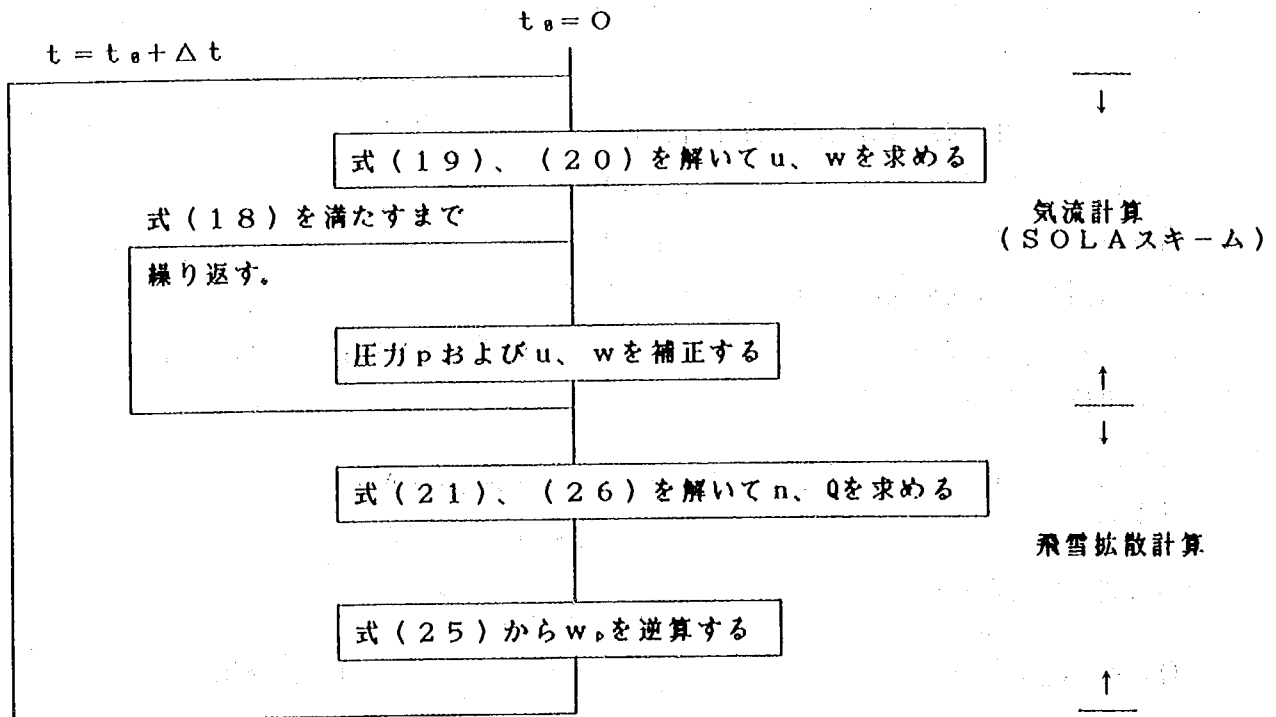


図-26 解析フロー

7.6 2次元シミュレーションの解析結果

2次元シミュレーションは、気流分布、飛雪空間密度、吹溜り形状、視程について各々の結果を表示できる。なお、図中で表示している条件等についての説明は次のとおりである。

U10：高さ10mの位置における風速 (m/sec)。これから対数則で地上までの風速を推定する。

Z0：粗度長 (m) で雪表面における渦の生成と間接的には拡散係数にも関係する。

ZK：渦拡散係数を決定する代表長さ (m) で風速分布、渦の大きさ、流れの性質を決める。

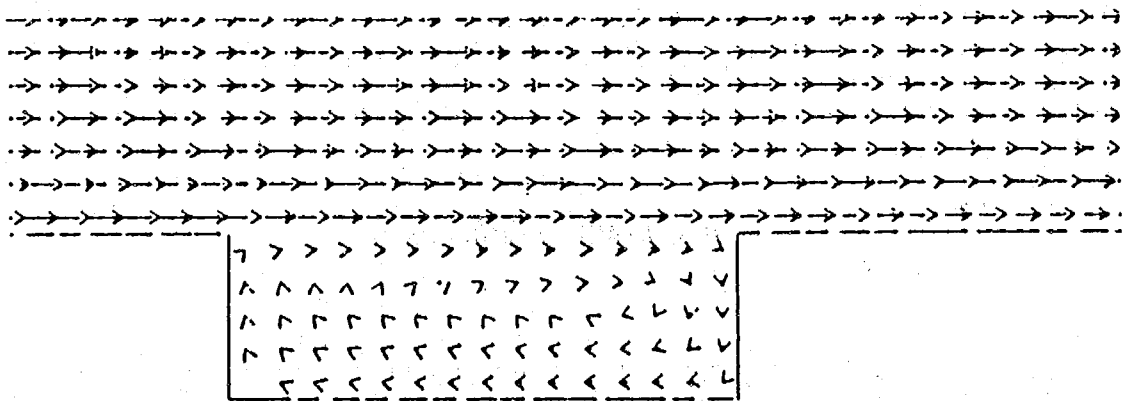
A：飛雪拡散において雪粒が転動して吹雪となっている時の雪粒衝突時の反射率。

C：雪面付近の飛雪密度と摩擦応力の比例係数で単位は($g \cdot sec^2 / m^6$)で表す。

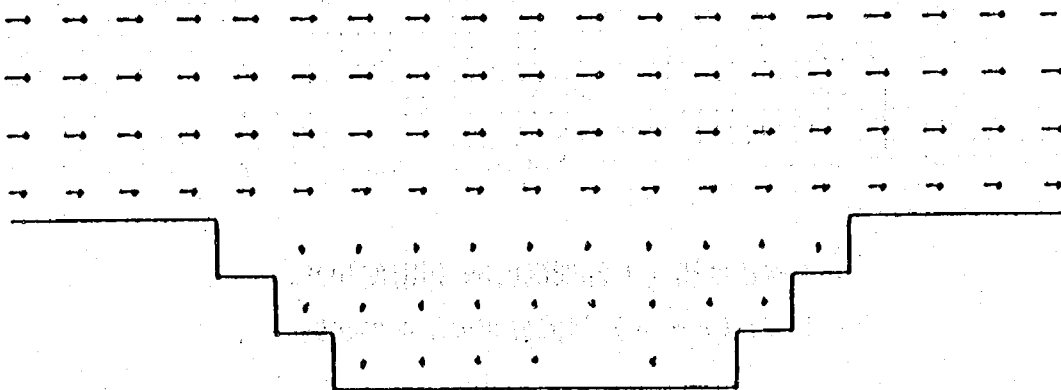
R：防雪柵の柵密度 (%)

7.6.1 気流の検討

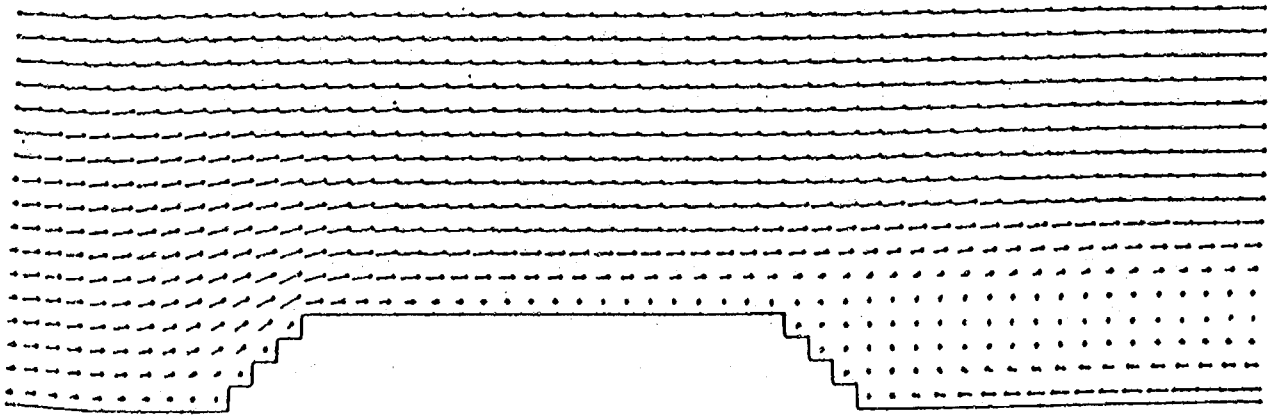
気流の表示は図-27 (a~e) に示すように初期の条件 (ある高さの風速) を与えたときの風の流れ方向の変化を表すようになっており、構造物、地形によって風の減衰、収束、増幅等を表現するようになっている。この流れによって雪粒子が落下して吹溜りとなる。この結果は、図-28~30に示すように文献による気流分布とシミュレーション出力結果を比較すると近似した気流形状といえることから、実際に近い吹溜り形状を出力するシミュレーションと考えてよいであろう。



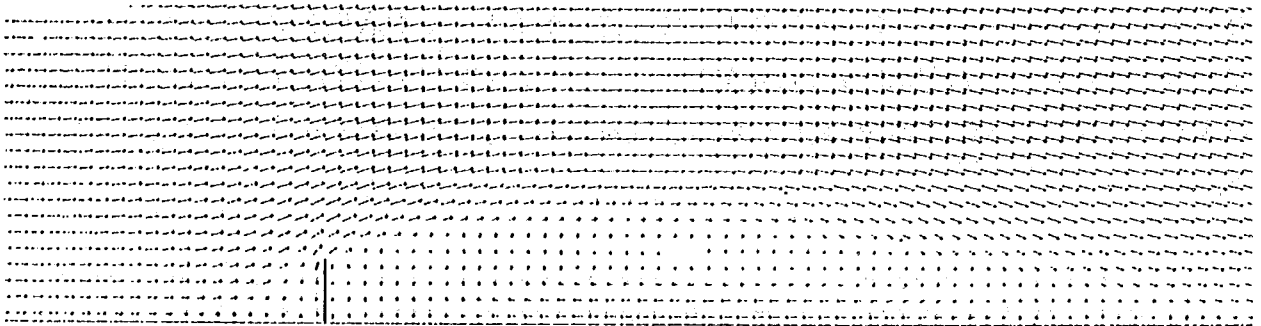
a：矩形断面の気流



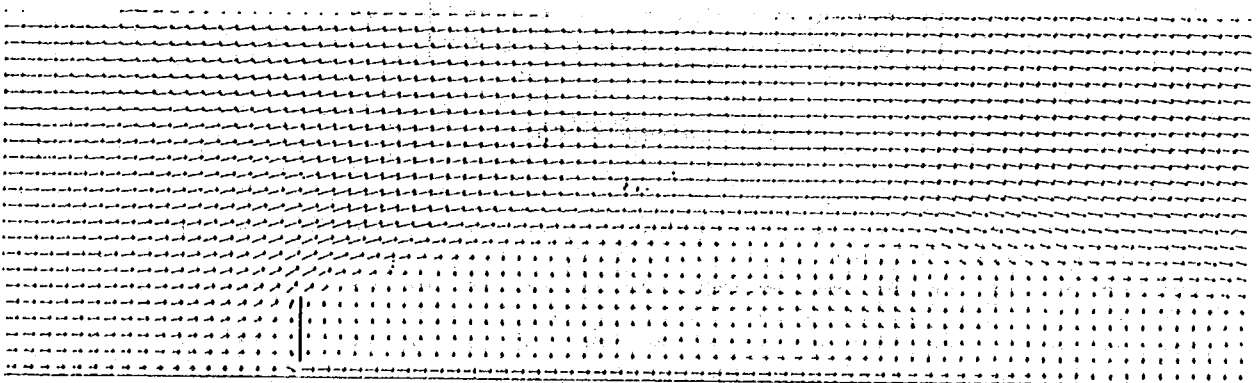
b：切土の気流



c : 盛土の気流



d : 吹溜柵 (柵密度100%)

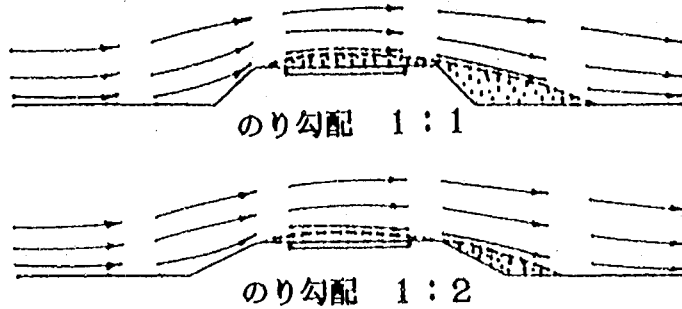


e : 吹抜け柵 (下部間隔0.5m、柵密度100%)

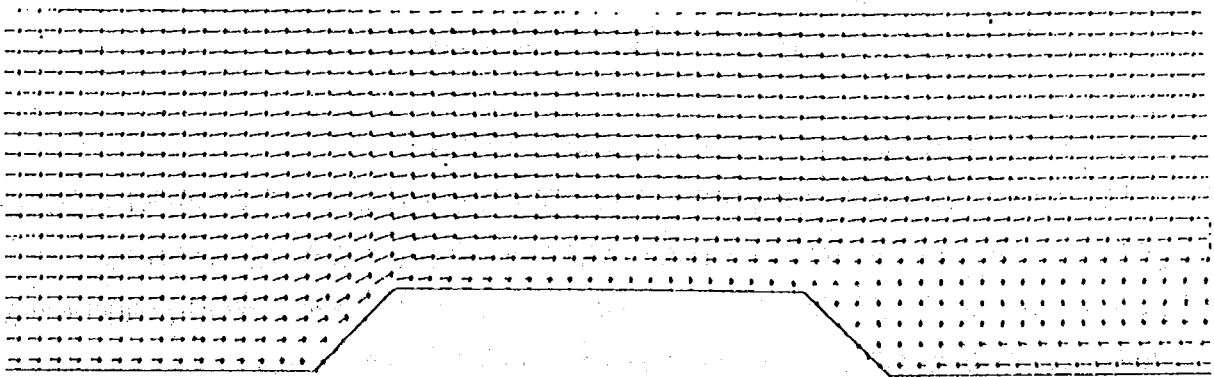
図-27 (a~e) 気流分布の基本形状例

1) 盛土道路における気流の検討

図-28に示す盛土道路を想定したシミュレーションでは風下側に気流分布の滞留ができることを表示しており、その滞留によって風下側に吹溜りとなることを意味している。図-28の下図に示すaでは風下側の流れを細かくは示していないが、風下側には吹溜りが発生することを表示していることから、実際に近似するものとして評価できると考える。



(a)一般的な気流形態



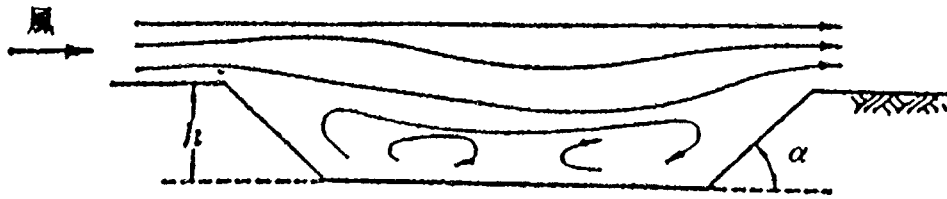
盛土: 2m幅10m間なし

(b)計算結果

図-28 盛り土形状の気流比較

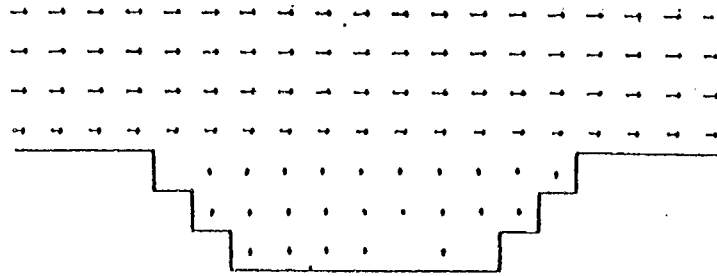
2) 切土道路における気流の検討

図-29(a)に示す切土内の気流の渦巻は、模式図からみると二つの渦が表示されている。シミュレーションでも明確ではないが風下側と風上側で気流がことなっていることがみられることから切土形状でも実際に近似するものとして評価できると考える。



$$\tan \alpha = \frac{1.0}{1.0} \quad (\text{通常})$$

(a)一般的な気流形態

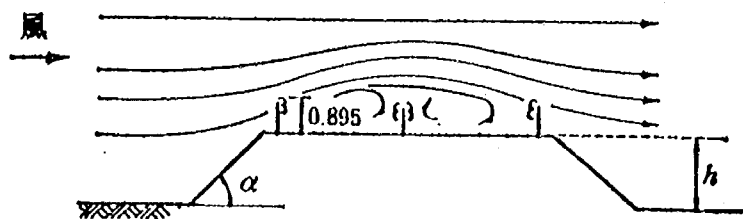


(b)計算結果

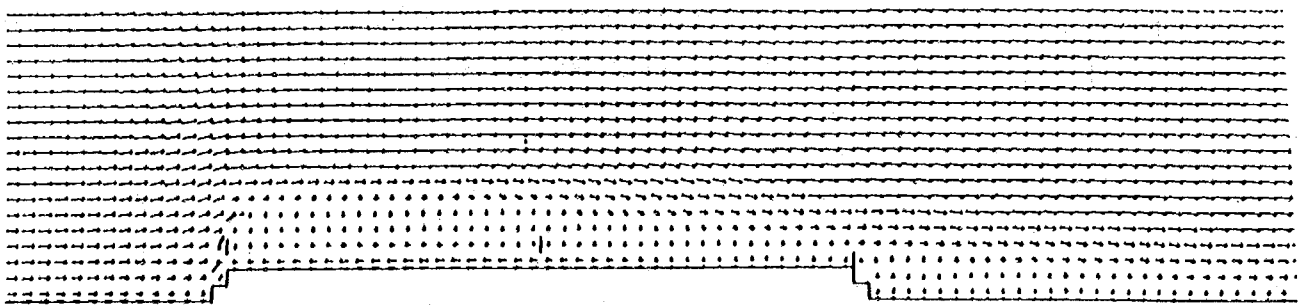
図-29 切土内の気流渦巻比較

3) 中央分離帯と路側にガードレールがある場合の比較

図-30(a)に示すような道路中央に分離帯等を設置するような高規格道路上の気流の模式図では中央のガードレールによって個々の車線で渦が発生するような形状である。これに対しシミュレーションでは、車線個々の風の滞留と風下にいたるときの気流の下降傾向まで表現していることから非常に良く、その形状をあらわしているといえる。



(a)一般的な気流形態



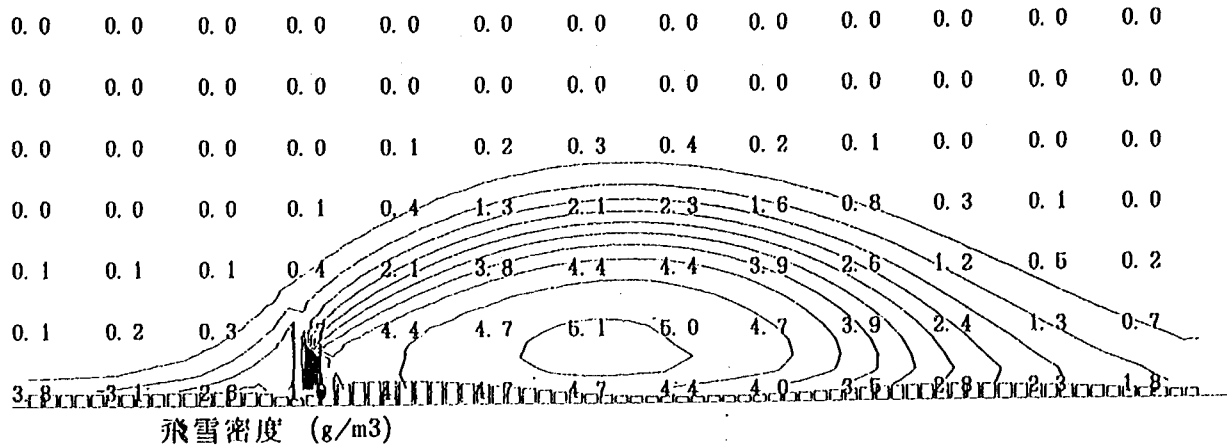
(b)計算結果

盛土 20m

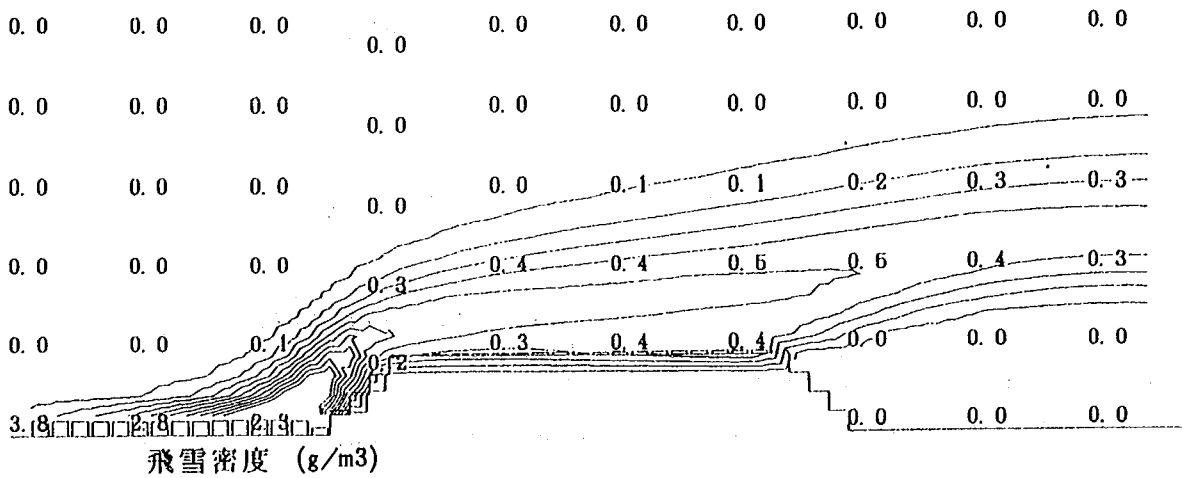
図-30 高規格道路での気流比較

7. 6. 2 飛雪空間密度の検討

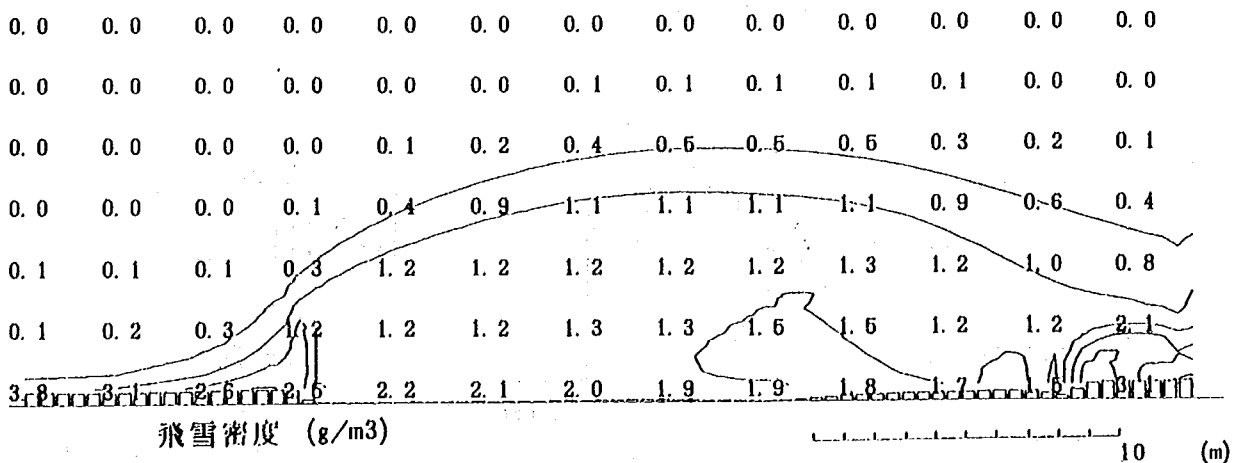
空中で浮遊あるいは飛雪している雪粒子の量を表す飛雪空間密度の分布については、図-31 (a、b、c)に示すように数字で空間密度を表示し、さらに等線図で濃度範囲を表示するようになっている。この方法は捕雪箱で採取された飛雪密度をもとに気流拡散方程式で平面的な飛雪濃度分布を表示するようにしている。



(a)吹溜め柵の分布形状例 (柵密度: 100%)



(b)盛土上の分布形状例

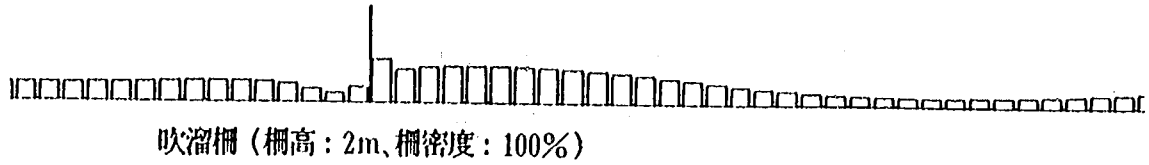


(c)吹抜け柵の分布形状例 (下部間隔: 0.5m、柵密度: 100%)

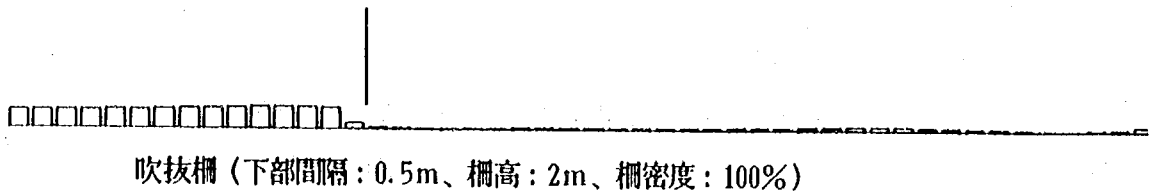
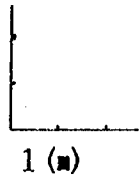
図-31 飛雪空間密度分布形状

7. 6. 3 吹溜り形状の検討

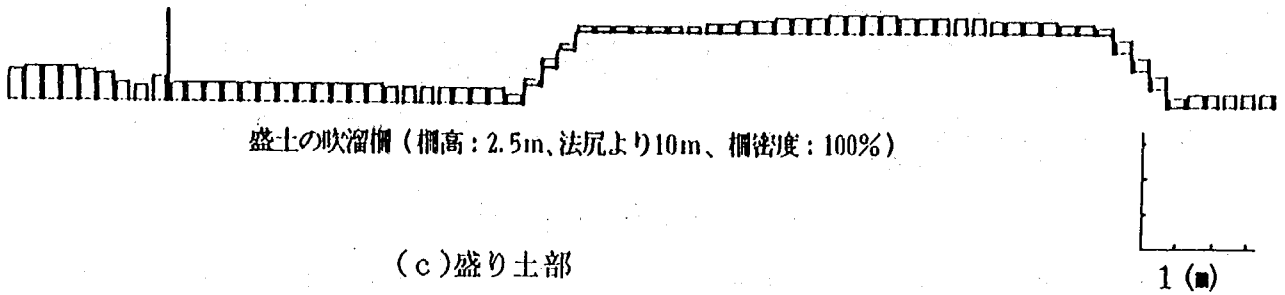
吹溜り形状については、図-32(a、b、c、d、e)に示すように地形、位置、別に棒グラフで、その深さを表示する。



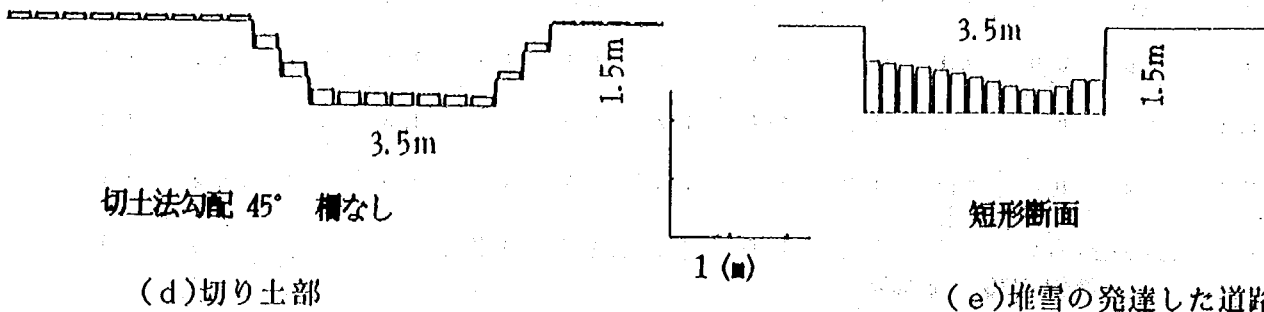
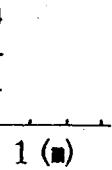
(a)平坦部



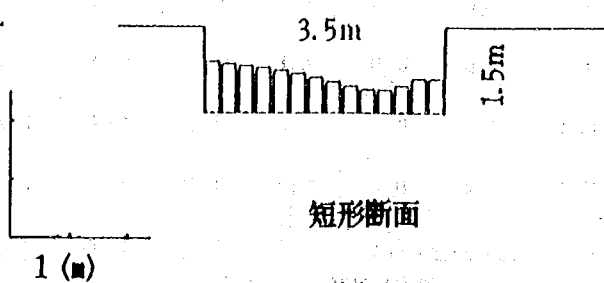
(b)平坦部



(c)盛り土部



(d)切り土部



(e)堆雪の発達した道路

図-32 吹溜り形状例

7.6.4 視程の検討

視程については、吹溜りを表現することと同様に吹雪発生時にどの位の視程状況であるかが、走行の安全性を検討する上で重要なことになる。この視程の求め方を竹内（土木試験所報告第74号、昭和55年8月、北海道開発局土木試験所）は、飛雪空間密度よりも図-33に示す飛雪輸送量（飛雪空間密度×風速）によく対応するとしている。

そこで、図-33の結果をもとに視程（次式）を求めることとした。

$$V = 208.5M^{-0.762}$$

ここに V : 視程 (m)

M : 飛雪輸送量 ($g \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)

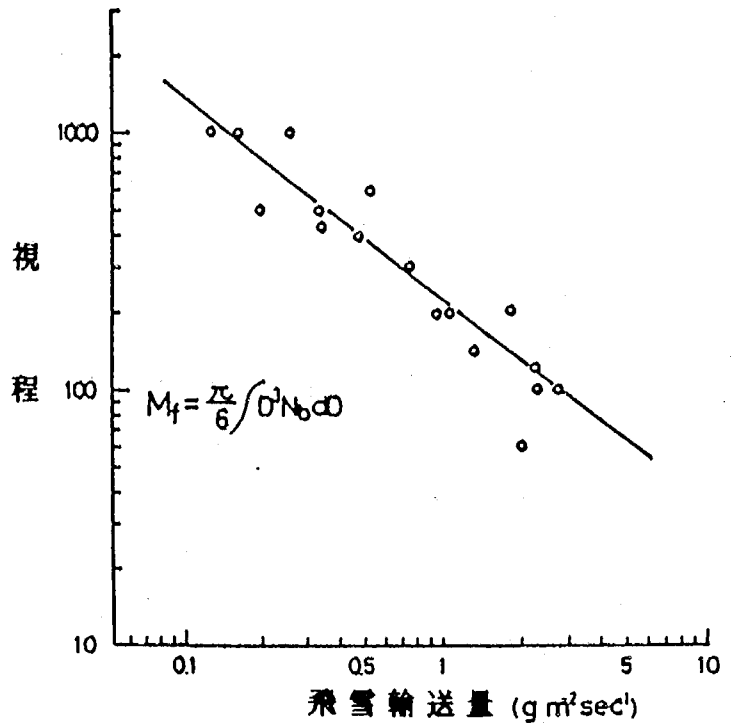


図-33 視程と飛雪輸送量

この式で得られた視程を図-34のように数値で表すようにしている。このときの飛雪輸送量は飛雪密度を時間的に変動する視程としてその瞬間値を求めている。

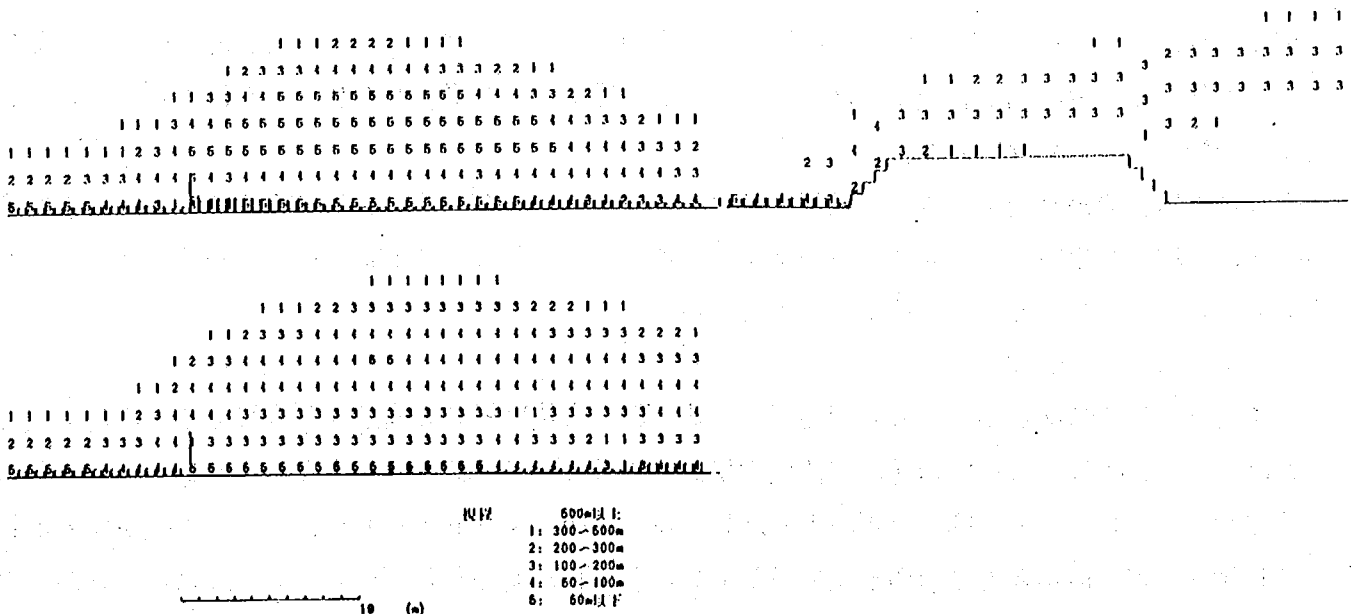


図-34 視程の表現方法

7. 7 シミュレーション結果の信頼性

(1) 気流

気流については一般的にいわれている気流分布とシミュレーションによる計算結果を比較すると大勢として近似した気流形状といえる。その例としては図-26の盛土勾配での風の流線、風下側斜面の渦、切土内における滞留の解析結果等から気流形状については信頼性の高いシミュレーションといえる。

(2) 飛雪密度の表示

空中で浮遊、あるいは飛雪状態の時の雪の量を表す数字として飛雪空間密度がある。この量を測定するための方法として、高さ別の捕雪箱によって直接採取するものである。この方法で得られた飛雪密度を基に気流拡散方程式で平面的な飛雪濃度分布を表示することが可能となった。

(3) 吹溜り形状

吹溜りの形状についてはそれぞれの構造物、施設の形状によってその特徴をあらわす出力結果を示している。

(4) 視程分布の表示

飛雪空間密度を時間単位に変換し、これを飛雪輸送量で表し視程として瞬間値を求めた。この視程を表現することにより運転時の目の高さにおける視程分布を知ることが可能になった。これにより対策工設置位置等の効率的計画に結び付くものといえる。

また、表示方法としては図中に数字で表示し、各々について幅をもった視程として表示する。

8. 吹溜りシミュレーションの応用範囲

前章では、吹溜り形状、飛雪空間密度等の基本出力について述べたが、ここでは応用例として気象を同一条件として道路構造、設置位置等についてどの様に吹溜り形状が変化するかについて比較し、実用の可能性について検討した。

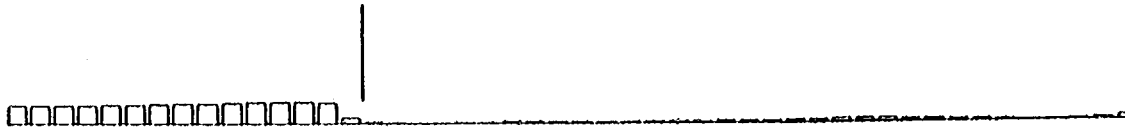
実際の吹雪、吹溜り現象は均一な状態ではないことから、吹溜り量の真値を得ることは困難であるが、道路管理上の施設を計画する場合の基本とするための資料として形状、範囲を知ることができればシミュレーションとしての機能は十分と考える。

8. 1 柵形式と吹溜り形状

防雪柵の形式は前述のとおり吹溜り柵、吹抜け柵、吹払い柵の3種類が基本である。この形式はこれまでの経験等から道路の防除工法の効果的な施設として設置されてきたものである。それらの機能をシミュレーション解析で平坦地で比較すると、図-35(a~c)の例のように吹溜りの形状がわかり、どの柵がどんな道路形状に適しているか、また道路からどのくらい離れたらよいかなどを推定することができる。



(a)吹溜り柵、高さ：2m、柵密度：0%



(b)吹抜け柵、高さ：2m、柵密度：0%、下部間隔：0.5m



(c)吹き払い柵、高さ：2m、柵密度：0%、下部間隔：0.5m、傾角：75°

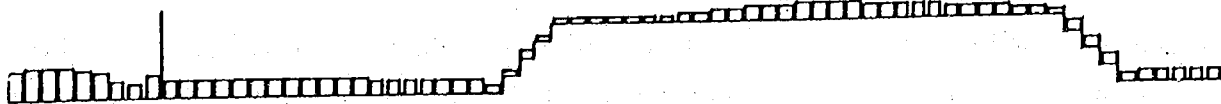
(柵が階段状で表現されているがこれについては解析が差分法によっているためである。)

図-35 基本的な吹溜り形状

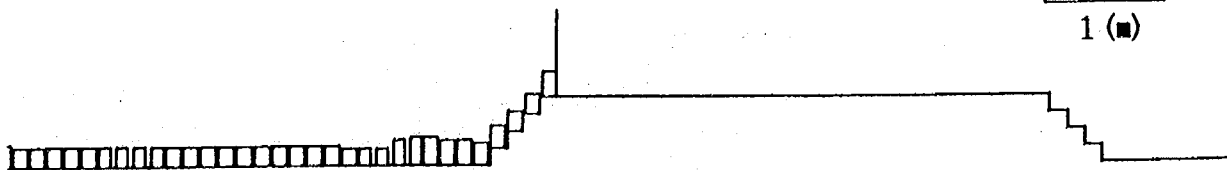
8.2 盛土形状における吹溜り形状

盛土形状となっている地形に施設を計画する場合、吹溜り柵は図-36(a)で判るように道路から離れた場合、風の全体的な流れの変化は影響せず、吹溜りが形成される。

しかし、(b)のように法肩に計画すれば防音壁の様な形式でも吹溜り量は少なくなることがいえる。これは盛土法面を上昇加速してくる風速が、柵によってさらに上方に向くために、道路上に雪が溜りにくい現象を表わしている。また、下部に空隙のある吹抜け柵を設置した場合にも、法面に沿っての風の上昇と下部の隙間に収束された風によって、路面を吹き払う効果を図-37に示した。また、

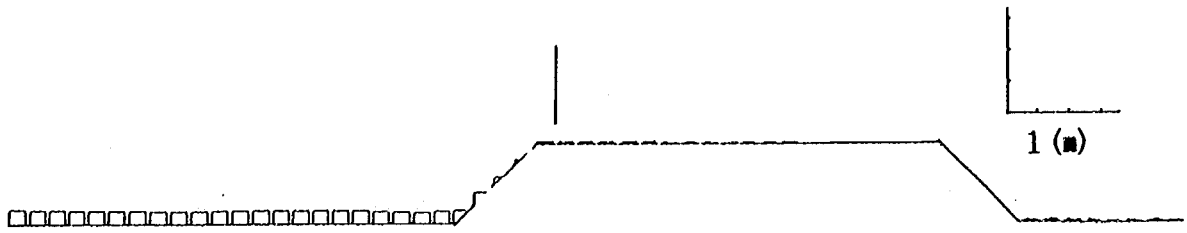


(a)吹溜り柵 H:2.5m 法尻より10m



(b)吹溜り柵 H:2.5m 法肩

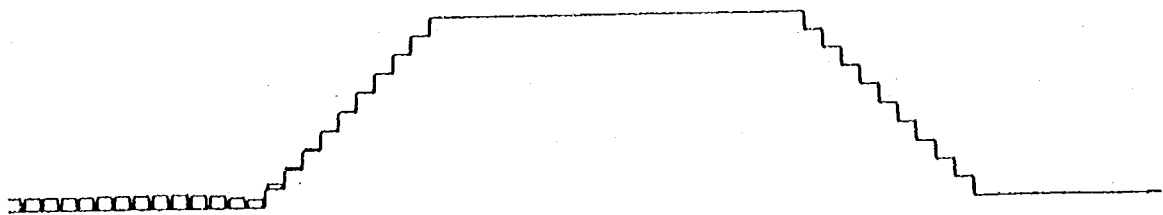
図-36 盛土に対する設置効果



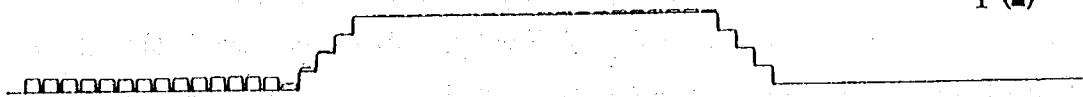
盛土高：2m、道路幅：10m、柵高：2.5m、下部間隔：0.5m

図-37 吹抜け柵による吹溜り防止効果

防雪盛土として盛土高が高ければ吹溜り量が少ないという現象に対しても図-38(a、b)に示すような比較が可能であり、吹溜りに対して高さで対処する工法についての検討も、有効な工法の一つとなろう。



(a)盛土高：5m、道路幅：10m、柵なし



(b)盛土高：2m、道路幅：10m、柵なし

図-38 防雪盛土に関しての効果比較

8.3 切土部における吹溜り形状

防雪切土の法面長についても図-39(a、b)の例では、勾配が急であれば道路上に多く溜る実態と、法面が緩ければ法面上に溜り、道路に溜る量は比較的少ないという実際の観測結果を再現できる。



(a)切土法勾配：45°、道路幅：m、深さ：m、柵なし



(b)切土法勾配：20°、道路幅：m、深さ：m、柵なし

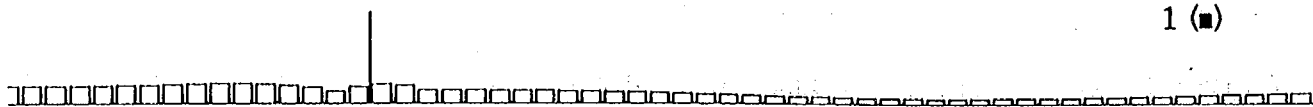
図-39 防雪切土に関する効果比較

8. 4 柵密度（空隙率）と吹溜り形状

柵の空隙を変えた場合の効果を判定するためには、密閉状の100%から順次柵投影面上の空隙の比率を変え、最適な吹溜り防止位置を決定するためにもちいることができる。例えば、図-40に示すようにその効果が顕著にあらわれる吹溜り柵について同一条件で100%と50%を比較すると、50%では、空隙部からの風の通過によって飛雪され平均化した少ない吹溜り量となる。この柵密度変化の表現についても実際と近似していることから考え方を構造形式を含めた最適設計方法に反映できると思われる。



(a)吹溜り柵、柵密度：0%、柵高：2.5m



(b)吹溜り柵、柵密度：50%、柵高：2.5m

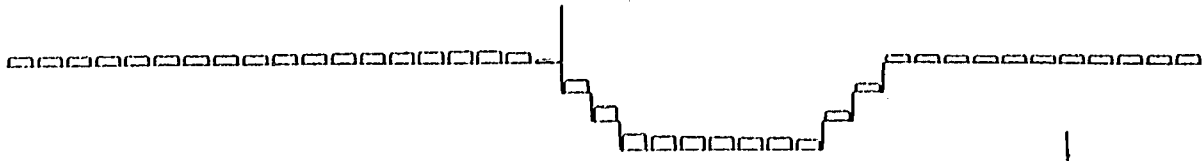
図-40 柵密度による防雪効果の比較

8. 5 柵の設置位置と吹溜り形状

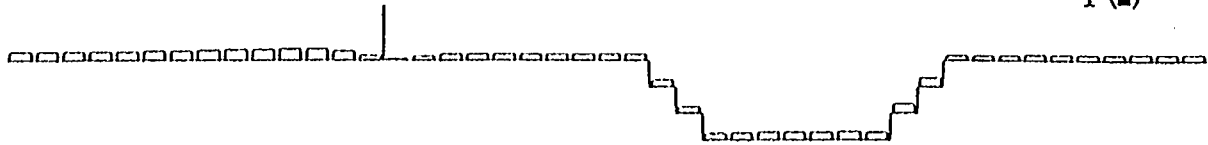
道路形状に対し、柵を設置した場合の吹溜り形状の比較を各々について示したが、いずれの道路を想定しても吹溜りの少ない位置があることが判る。この基本的な特性を知ることによって用地等の関係を配慮し、設置位置を決めることができる。他の設置位置の例として、防雪切土を計画しても法勾配を緩くできない場合には、図-41に示すように柵で補助的に防止しようとするほどの位置が効果的であるかの検討が可能である（道路形状は図-39と同じ）。



(a)切土法勾配：45°、柵無し、



(b)切土法勾配：45°、柵高：1m、柵密度： %、法肩

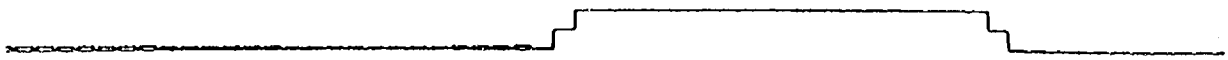


(c)切土法勾配：45°、柵高：1m、柵密度： %、法肩より10m

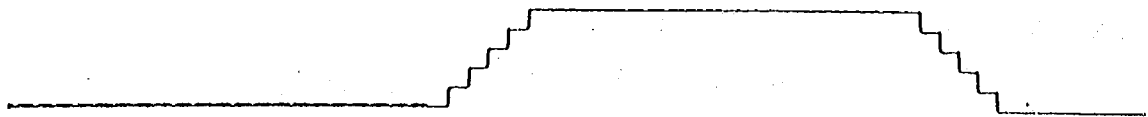
図-41 防雪柵の設置位置による効果

8.6 高規格道路に対する吹溜り形状

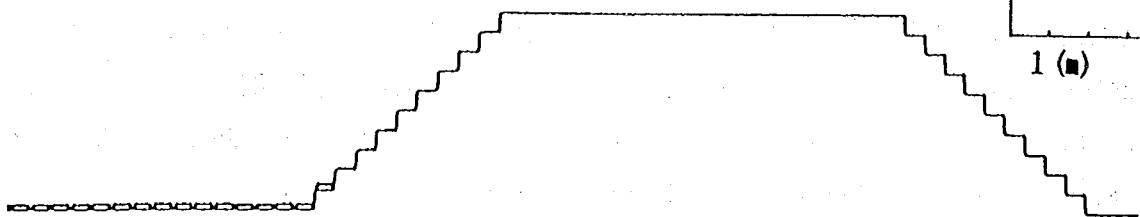
今後の高規格道路を想定した場合についても図-42のように道路幅20mで盛土高、柵高等の比較検討、あるいは図-30に示したように中央線に防護柵、植樹帯、堆雪等を勘案した構造についてもシミュレーションによる計画策定の基礎資料を得ることができる。



(a)盛土高：2m、道路幅：20m、法勾配：45°、柵なし



(b)盛土高：5m、道路幅：20m、法勾配：45°、柵なし



(c)盛土高：10m、道路幅：20m、法勾配：45°、柵なし

図-42 広幅員と盛土高での吹溜り形状

以上のように実施した何れのケースについても詳細の検討を行う場合には、計算メッシュを細かくすることにより可能である。また、50cmメッシュの例で計算に要するおおよその計算時間は、大型計算機（土研の例）ではcpu使用時間は数分で終了する。また、32kb程度のパーソナルコンピュータであれば、データの入力から結果の出力まで約8時間で終了するので計算サイクルを効率的にすればパソコンでも十分である。

あとがき

本報告は大洞原試験地で発生する吹雪、風雪の調査、研究と気象統計資料から各地の吹雪発生に関わる降雪日数、気温、風速の地域的特徴について概要と、試験地で実施した吹雪時の気象と吹溜り実態調査をもとにした吹溜り形状シミュレーションのの開発についての手法の応用例についてまとめたものである。しかし、本報告で使用した各地のデータは日単位の資料であることから、吹雪発生時の気象と直接結び付かない点が問題点としてあるので、さらに小規模範囲の地域気象等を含めたデータの収集と詳細な分析を行い、吹雪発生時の危険度評価手法の検討および吹雪の発生頻度マップの作成等を行う予定である。また、2次元シミュレーションについては、検証を進め応用手法の確立を図ると共に、さらに防雪施設端部の吹溜りおよび道路線形に対応した設置計画に反映するため利用範囲の大きい3次元シミュレーションの構築を進め事業計画への応用にむけて信頼性の向上を図って行く。

以上のことから、今後吹雪の安全対策への管理、運用方法に対処するため調査、研究を進める予定である。

参考文献

- 1、道路防雪便覧 (社)日本道路協会 丸善(株) 平成2年5月
- 2、新編防雪工学ハンドブック (社)日本建設機械化協会 森北出版 1988年3月
- 3、新防雪工学ハンドブック (社)日本建設機械化協会 森北出版 1977年12月
- 4、気象月報 気象庁 昭和52年～昭和61年
- 5、竹内 他 北海道における吹雪の地域性 日本雪氷学会講演予稿集 昭和50年10月
- 6、竹内政夫 吹雪時の視程に関する研究 土木試験所報告第74号 北海道開発局土木試験所 昭和55年8月

I S S N 0386-5878

土木研究所資料 第3004号

平成3年7月 (1991)

吹雪、吹溜り対策に関する調査研究報告書 (その1)

新潟試験所 所 長 下村 忠一*
主任研究員 石平 貞夫

要旨

北陸地方の吹雪発生特性と試験地における吹雪観測結果をもとに対策等の計画を進める上で必要な吹溜り形状を予測するための2次元シミュレーションについてまとめたものである。

キーワード：吹雪・吹溜り実態・対策・2次元シミュレーションの開発

*現 (社) 雪センター企画調整部兼研究調査部