

Controlling Blowing and Drifting Snow with Snow Fences and Road Design

(抄)

**Prepared for  
National Cooperative Highway Research Program  
Transportation Research Board  
of the National Academies**

**Ronald D. Tabler  
Tabler and Associates  
Niwot, Colorado**

**2003.6**

日本語訳  
道路雪氷広場 勉強会参加有志  
**2011.4**

## 翻訳にあたって

和訳したのは、タブラー博士著の合衆国の「吹雪対策のガイドライン」で、2003年に TRB（合衆国運輸交通研究会）から出版されたものである。彼の研究は貴重で日本でも、新編防雪工学ハンドブックや道路吹雪対策マニュアルなどに引用されてきた。

筆者はタブラー氏から原著を見せられた時に、自分自身も多く学んだことから、日本の吹雪の研究者や防雪技術者の教科書にしたいと考えた。その場で日本語に翻訳したいと願った。快諾を得ていた。しかし、全7章 286 ページとボリュームも多く一旦は着手したもの一人では手に負えないでいた。同じ考えをもった者どうしの発案で、「道路雪氷広場」（雪氷研究者や技術者が勉強し合う場、2009年12月から始まる）の勉強会の題材にすることになった。2010年5月から10月にかけて、参加者24名の分担で計7回、各2時間半の勉強会で全体の約半分138ページを翻訳した。残りは2011年4月から始めることになっている。慣れない仕事を最後までやり抜いた参加者全員、特に独立行政法人土木研究所 寒地土木研究所の事務局担当者には深く感謝している。一般の方々にも役立ててもらえるように公表することにしたので、内容紹介を兼ねてタブラー博士のことなどを紹介する。

タブラー氏の吹雪の研究は米林野庁ロッキー山系森林研究所ララミー支所（ワイオミング州）のプロジェクトリーダー（水理学者）として、半乾燥地における水源涵養に防雪柵で雪を集めて利用することから始まった。ワイオミング州の降雪量は少ないが、強風地帯では防雪柵で大量の吹きだまり（柵1m当たり300トン）を捕捉できる。雪を捕捉することは吹雪をコントロールすることでもあった。その研究がやがてアメリカの吹雪対策を大きく変えることになった。なかでも、吹雪（視程障害）や吹きだまりで交通途絶が続いていた州際道路 I-80 を甦えらせた防雪柵システムの目覚ましい成功で世界的に知られるようになった。タブラー氏は日本との関係も深く、1980-81年に招聘研究員として土木試験所（寒地土木研究所の前身）に在席し、その間多くの講演、学会発表や吹雪対策の現地調査を行っている。その間の活動は、北海道の吹雪対策への提言を含めて土木試験所報告 81 号にまとめている。その後も吹雪対策の研究活動の場を広げ且つ深め、アメリカの吹雪対策のガイドラインとして集大成したのが原著である。家族を挙げての親日家であり、暖かいおもてなしを受けた日本の雪氷研究者も少なくない。酒をこよなく愛した暖かい人間性で親しまれたが、2010年3月に永眠した。タブラー博士のはなむけとしてこの日本語訳を捧げる。

2011年3月

訳者を代表して・・・

特定非営利活動法人 雪氷ネットワーク  
理事 竹内 政夫

## 目次

翻訳にあたって.....	2
1 はじめに.....	6
1.1 読者対象.....	6
1.2 目的.....	7
1.3 内容と構成.....	7
1.4 参考文献.....	8
2 効果的な防雪対策.....	9
2.1 要約.....	9
2.2 防雪対策の重要性.....	10
2.3 吹雪対策が見過ごされてきた背景.....	11
2.3.1 防雪柵利用の歴史.....	11
2.3.2 吹きだまり制御対策が下火になった理由.....	13
2.4 ワイオミングの事例.....	13
2.5 2.5 雪氷上での防雪柵の効果.....	19
2.6 異なる事例.....	20
2.7 防雪柵の費用対効果.....	22
2.8 道路設計の効果.....	24
2.9 結論.....	24
2.10 参考文献（第一著者名のみ翻訳）.....	24
3 雪の移動と吹きだまりの形成.....	27
3.1 概要（範囲）.....	27
3.2 要点（ハイライト）.....	27
3.3 雪粒子の特徴.....	29
3.4 吹雪量.....	29
3.4.1 定義.....	29
3.4.2 雪の輸送の形態.....	29
3.4.3 風速の高度分布.....	34
3.4.4 吹雪量率と垂直分布.....	35
3.4.5 吹雪時の視程について.....	37
3.4.6 吹雪の昇華（訳者注：主に昇華蒸発）について.....	38
3.4.7 吹雪量と吹送距離及び飛ばされた雪の関係について.....	42
3.4.8 雪面の形状.....	43
3.5 雪の浸食と堆積の過程.....	45

3.5.1	浸食 .....	45
3.5.2	堆積 .....	46
3.5.3	粒子間の結合 .....	46
3.5.4	雪の圧密 .....	47
3.6	植生による雪の堆積と保持 .....	48
3.7	道路切土と窪地の堆雪 .....	49
3.7.1	堆雪の進行課程 .....	49
3.7.2	平衡斜面 .....	50
3.7.3	捕捉率 .....	51
3.8	防雪柵での堆雪 .....	52
3.8.1	防雪柵の高さ、間隔、下部間隙の定義 .....	52
3.8.2	風と吹雪粒子について空隙のある防雪柵の効果 .....	53
3.8.3	空隙のある防雪柵での吹きだまり雪丘の成長過程 .....	54
3.8.4	空隙の無い防雪柵での吹きだまり雪丘の成長 .....	58
3.8.5	平衡雪丘 .....	59
3.8.6	空隙のある防雪柵の捕捉率 .....	79
4	吹雪に関する課題の定量化 .....	84
4.1	範囲 .....	84
4.2	ハイライト .....	84
4.3	課題の特定 .....	85
4.4	問題点の分析 .....	86
4.4.1	問題の構成 .....	86
4.4.2	問題点と影響の把握 .....	86
4.4.3	吹雪の発生源 .....	87
4.4.4	これらの問題を引き起こす原因 .....	88
4.5	候補となる吹雪対策 .....	91
4.6	データと情報の収集 .....	91
4.6.1	冬期野外観測 .....	91
4.6.2	航空写真の撮影 .....	94
4.6.3	気象データの収集 .....	96
4.6.4	地理的情報 .....	99
4.6.5	道路構造 .....	100
4.6.6	その他の情報 .....	100
4.7	年平均吹雪量の見積もり .....	101
4.7.1	手順の概要 .....	101
4.7.2	吹きだまり発達期間の日数の決定 .....	103

4.7.3	風速値からの潜在吹雪量の計算 .....	107
4.7.4	降雪に基づく潜在的吹雪量の決定.....	112
4.7.5	無限の吹走距離下の潜在吹雪量の決定 .....	114
4.7.6	年平均吹雪量の推定 .....	115
4.8	設計吹雪量の決定.....	117
4.8.1	年吹雪量の分布確率 .....	117
4.8.2	設計係数による除雪費用の変化の程度 .....	119
4.8.3	設計常数のための費用対効果の評価基準.....	121
4.9	設計データ要約シート.....	124
4.10	参考文献 .....	125
5	訳者 .....	128

## 1 はじめに

吹きだまりは、運転を困難にし、カーブや交差点の見通し距離を低下させ、標識を見にくくし、氷を生長させ、道路の有効幅員を減少させ、視線誘導施設の効果を減少することにより、交通安全に深刻な危険を生させ、冬期メンテナンスのコストの増大を招く。吹きだまりは、排水溝、排水管、カルバートを塞ぎ、舗装路盤への浸透水の供給源になり、舗装の損傷の原因になる。道路の吹雪と視程障害はさらに大きな結果をもたらす。吹きさらしの道路における路面凍結の主因は、舗装と路盤に蓄えられた昼間の太陽の放射熱が吹雪いた雪を融解する事により生じる。地吹雪による吹きだまりの量は降雪量の何百倍も大きい場合がある。Interstate Highway 80 in Wyoming の 10 年にわたる吹雪による交通事故調査結果では、吹雪時の交通事故の内、防雪柵を設置していない箇所では 25%にまで達しているが、防雪柵を設置した箇所では 11%であった事を報告している(Tabler 2002)。

本報告は、適正に計画・設計された防雪対策の成果の記録であり、風による雪輸送と堆積のプロセスの解説、防雪柵と防雪植栽の設計ガイドライン及び吹きだまりの出来ない構造の道路設計について述べた。

本報告は過去に出版された、Strategic Highway Research Report (SHRP-H-381) と Design Guidelines for the Control of Blowing and Drifting Snow (Tabler 1994)の 2 つの文献のデータを基に、最近 10 年間に得られた新たな知見を包含したものである。

### 1.1 読者対象

雪の制御は技術的に複雑なので、効果的な防雪対策は慎重に行わなければならない。本論文は技術者が必要とする詳細な技術データが記述されているが、著者の意向は専門知識のない誰もが理解でき、かつ使用できる情報を提供することである。このために、本論文は 200 以上の図と最も重要なコンテンツとガイドラインを含み、それぞれの章の初めには〈要約〉を提示し、それぞれの章の概要を記している。第 5 章に 21 ページに渡って防雪柵と道路デザインの両方のための、より重要なガイドラインをまとめている。

過去の防雪柵の簡易型ガイドラインは Snow Fence Guide (Tabler 1991)(Snow and Ice Pooled Fund Cooperative Program(SICOP)のインターネットサイト <http://www.sicop.net/>により入手できる)があるが、本論文はそれに替わるものである。

## 1.2 目的

この論文の主な目的は、防雪対策のための利用実績のある有効な指針を作ることであり、新たな研究を促すと共にコンピュータ支援の雪制御技術の開発を促進することである。多くの吹雪対策のためのアプリケーションがコンピュータに組み込まれつつあるが、本論文には多くのロジックやアルゴリズム作成のためのデータを示している。例えば、New York State Department of Transportation (NYSDOT)の State University of New York-Buffaloが開発したエキスパートシステム SNOWMAN、Brookhaven National Laboratory の Kaminski and Mohan (1991)が開発した PASCON の発展型。1998 年以来開発中であるどちらのプログラムも NYSDOT インターネットサイトで発表される (<http://www.dot.state.ny.us/>)。

この報告では Minnesota Department of Transportation と University of Minnesota が開発したインターネットサイトの論理的根拠も表す。

[http://climate.umn.edu/snow\\_fence/Components/Design/locationb.asp](http://climate.umn.edu/snow_fence/Components/Design/locationb.asp)

<http://www.livingsnowfence.dot.state.mn.us/index.html>

これらのサイトは計算プログラムや事例集であり、本論文の読者は大いに参考になると思われる。

## 1.3 内容と構成

2「効果的な防雪対策」では防雪対策の重要性と効果、過去の失敗例、費用便益に関して説明する。

3「雪の移動と吹きだまりの形成」では、吹雪と吹きだまりの特性について、吹雪対策が成功した例から検証し、ガイドラインの基礎や技術革新のためのヒントを提供する。

4「吹雪に関する課題の定量化」では、防雪対策のためのデータ収集、分析の手順、雪の輸送量と方向分布を見積もるための計算方法を説明する。また、本章を読み解くためには、2, 3, 4 の理解が必要である。

5「防雪対策の概観」では、防雪施設の簡単な設計方法を示す。防雪対策を本章以降、6～8に13のステップで詳細に記述しているが、それらの概要を示す。

6「防雪柵の構造と設置方法」、7「防雪林」、8「吹きだまりのない道路設計」、それぞれの章でそれぞれの章題に対応する詳細なガイドラインを記述する。

章の始めに〈要約〉で章の概要、ポイントを記す。参考文献は章の終わりにそれぞれ記載されている。あまりなじみがない専門用語は最初に表れたところに斜体で表現され、本論文の末尾の用語集で解説している。

本論文は道路や高速道路の吹雪対策について書かれているが、鉄道、空港、宅地造成、および産業設備の防雪対策にも同じく有効である。

## 1.4 参考文献

Kaminski, D. F. and S. Mohan. 1991. PASCON: An expert system for passive snow control on highways. *Transportation Research Record* 1304: 193-201.

Tabler, R.D. 1991. *Snow fence guide*. Strategic Highway Research Program, National Research Council, Report No. SHRP-H-320. Washington, D.C.

—. *Design guidelines for the control of blowing and drifting snow*. Strategic Highway Research Program, Report SHRP-H-381.

—. 2002. *Safety Improvement Study: Interstate-80 Mile 325-335*. Final Report, Agreement No. 54839, prepared for the Transportation Commission of Wyoming.



## 2 効果的な防雪対策

本章では吹雪による被害を見定め、それらに対する防雪対策の効果を費用便益から説明する。

### 2.1 要約

- ・ 道路に吹きだまる雪の量は、路上に直接降る降水量より何百倍も大きい場合がある。これは除雪費と安全上の問題に大きな影響を与える。
- ・ 吹きだまりは、運転を困難にし、カーブや交差点での見通し距離を低下させ、視線誘導施設の効果を減少させ、道路の有効幅員を減少させる等、深刻な安全上の問題を発生させる。
- ・ 吹雪は視程を減少させ、雪泥を形成する。
- ・ 吹きだまりは、舗装路盤への浸透水の供給源になり、舗装の損傷の原因になる。
- ・ 除雪車の改良により機械的な除雪が冬期道路管理の主流となっているため、防雪対策は見落とされてきた。そのため、防雪対策のための有効なガイドラインも 1970 年前には存在しなかったため、防雪対策の有効性を評価することが出来なかった。
- ・ 防雪柵は吹きだまりの排除、視程の改善、氷の形成を劇的に抑えること等が出来る。さらに、太陽放射熱を舗装と路盤に蓄積することで雪を融解し、雪の量を減少させる。
- ・ Interstate Highway 80 in Wyoming に関する 15 年に渡る研究では、防雪柵が除雪費用を 1/2～1/3 に減少させたことを示した。さらに、防雪柵は吹雪による交通事故を 60%以上減少させている。年間の物損、負傷、渋滞による損出は、フェンスの原価とほぼ同額である。これらの利益だけでも、3 倍以上の費用対効果がある事を示している。
- ・ 恒久的な防雪柵の費用便益は、除雪費用だけを計算しても 50:1～100:1（吹きだまりの量に応じる）と一般的な除雪費用に比べて減少している。
- ・ 防雪柵は柵の風下に長い距離を取ることが出来ると、より大きな効果を得ることが出来る。

## 2.2 防雪対策の重要性

### 除雪

吹きさらしの風の強い場所では、吹雪によって除雪費用が非常に増大する。費用は様々であるが除雪費用は1 tonにつき、およそ3 \$ 程度である。比較のために、高さが1.2mの防雪柵は、長さ1mにつき12.5 tonを保持することができる。

### 安全性

吹きだまりは、運転を困難にし、カーブや交差点の見通し距離を低下させ(図 2.1)、標識を見にくくし、氷を生じさせ、道路の有効幅員を減少させ、視線誘導施設の効果を無効にする。吹きさらしの道路における路面凍結の主因は、舗装と路盤に蓄えられた昼間の太陽の放射熱が吹雪いた雪を融解する事により生じる。地吹雪による吹きだまりの量は降雪量の何百倍も大きい場合がある。Interstate Highway 80 in Wyomingの10年にわたる吹雪による交通事故調査結果では、吹雪時の交通事故の内、防雪柵を設置していない箇所では25%にまで達しているが、防雪柵を設置した箇所では11%であった事を報告している (Tabler 2002)。



図 2.1 この致命的な事故は、カーブの吹きだまりによる見通し距離の低下が原因である可能性がある。

### 舗装寿命に対する影響

吹きだまりは、排水溝、排水管、カルバートを塞ぎ、舗装路盤への浸透水の供給源になり、舗装の損傷の原因になる(図 2.2)。また、除雪車が路面に損害を与え場合もある。



図 2.2 吹きだまりは排水を詰まらせ、舗装の下に水を浸透させることにより、道路を破壊する(左の写真は Tabler 1994 提供)

## 2.3 吹雪対策が見過ごされてきた背景

### 2.3.1 防雪柵利用の歴史

防雪柵の最も古い文献は 1852 年に、ノールウェイ人の G.D.B. Johnson により書かれた。吹きだまりを迂回できない線路に輸送手段が制約されるので、広範囲な防雪柵の使用は鉄道で始まった。米国最初と言える防雪柵の大部分は、1868-69(図 2.3)年にかけて、最初の大陸横断鉄道建設中に、切り土区間の風上側に置かれた天然石ブロックの列であった。1880 年までには、ワイオミングのユニオンパシフィック鉄道沿いの数え切れない木製防雪柵が、旅行案内書に書かれるようになった(Croft 1880)。初期のこれら木製防雪柵(図 2.4)は高さ 2m である。それらと同じ基本設計はユニオンパシフィック鉄道で使われ、ワイオミング交通省ではつい 1971 年まで使われ、それらの多くは今でも設置場所にある。



図 2.3 ワイオミング南東部で鉄道を守っている、多分 1868 年に設置された岩でできた防雪柵 (Tabler 1986)



図 2.4 Laramie の南東 25km でユニオン  
パシフィック鉄道を守っている防雪  
柵,(Tabler1986, 1901 年 J.E.Stimson 撮影,  
写真提供はワイオミング州立博物館の厚意  
による)

1900 年代前半以来,ワイヤにより結合された垂直な木製小割板で作られた,  
杭を使う防雪柵が使われ続けている。それより高い防雪柵は White Pass 及び  
Alaska,Skagway と Yukon Territory, Whitehorse 間の Yukon 鉄道に建設された(図  
2.5)。



図 2.5 1900 年に建設された高さ 4 m  
の,Alaska, Skagway の北およそ 25km に位置す  
る,White pass と Yukon 鉄道の防雪柵。

自動車が一般的に使われるようになると,防雪柵の建設が急速に広まっ  
た.1930 年の第 7 回ワイオミング道路委員会報告はワイオミングの道路沿いに  
101km の防雪柵が報告されている.更にその効果にも触れ,風の影響が大きな地  
域での防雪柵の理にかなった利用が,費用面でも他のあらゆる手段より,雪の影  
響を受けない道路維持を可能にするとしている.そのわずか 2 年後には,ワイオ  
ミングの防雪柵延長は 169km にまで伸びている(ワイオミング道路委員会  
1932)。

米国では防雪柵や吹きだまり制御の研究が 1930 年代に,ミシガン州立大学の  
Finney の風洞実験で始まった(Finney,1934).彼の二つの出版物はいくつかの,防  
雪柵の使い方や吹きだまりを防ぐ道路構造を提供した。

### 2.3.2 吹きだまり制御対策が下火になった理由

#### 力ずくの雪対策への流れ

1930年代には熱心に取り組まれた防雪柵の利用であったが、安い燃料費や人件費に加え、トラックや蒸気機関車、除雪プラウの改良などで、吹きだまり制御は、次の半世紀に渡り停滞し、力ずくの雪対策を選択した。担当者が変わっていく過程で、受動的な吹きだまり制御手段を改良する動機付けが乏しくなり、研究は停滞し、防雪柵に関する経験が失われていった。

#### 効果的な手引き書の欠如

過去には、手引き書が間違っていたり無かったりしたため、吹きだまり制御対策は時々、失望させる結果をもたらした。例えば、1908年の鉄道工学のテキストで推奨された防雪柵は、線路を埋める吹きだまりをもたらしたのである（Tratman 1908）。これは、空隙のある防雪柵では雪の大部分が風下に溜まるのに、雪は風上にだけ溜まると思いこんだ、明らかな誤解による。

過去の手引き書類の（実態との）不一致は、初期の雪対策技術者が防雪柵による吹きだまり形状や防雪柵の容量を予測できないことによる。結局、防雪柵は効果的であるために十分な容量を持たねばならないにもかかわらず、そうした手引き書は、1950年代にロシアの科学者により紹介されるまで存在しなかった。

#### 制度的な記憶喪失

吹雪関連の諸問題は、防雪柵の利用や道路横断構造の改良で消滅した後では、最初の段階でかつて課題が存在したという証拠は、わずかなものでしかないかもしれない。当初の課題や解決策を思い出す担当者が異動したり、退職したりすると、彼らの後継者は、現存する対策工法の効果を判定する基礎をしばしば持たないことがある。正しい認識へのこうした衰退が、追加的な吹きだまり制御事業への支援を弱め、現存する防雪柵の維持も停滞させる。もし、経験に基づく学習が新しい世代に受け継がれなければ、制度的な記憶衰退は避けられない。

## 2.4 ワイオミングの事例

現在の吹きだまり制御技術は、そもそも1960年代から1970年代にかけての米国林野庁の研究に基礎がある（Martinelli, Schmidt, and Tabler 1982）。その研究成果は、1970年に初めて供用開始となった、ワイオミングの州際道路80号（I-80）に新たに完成した区間の、厳しい吹きだまり問題を解決するために使われた。

I-80への適用例は唯一、雪制御対策の効果を立証した定量的評価を提供している。他の道路の雪制御計画を正当化できる事例としてI-80研究の背景と結果概要をここに示す。より詳細な情報はこの報告書末尾の文献を参照願いたい。



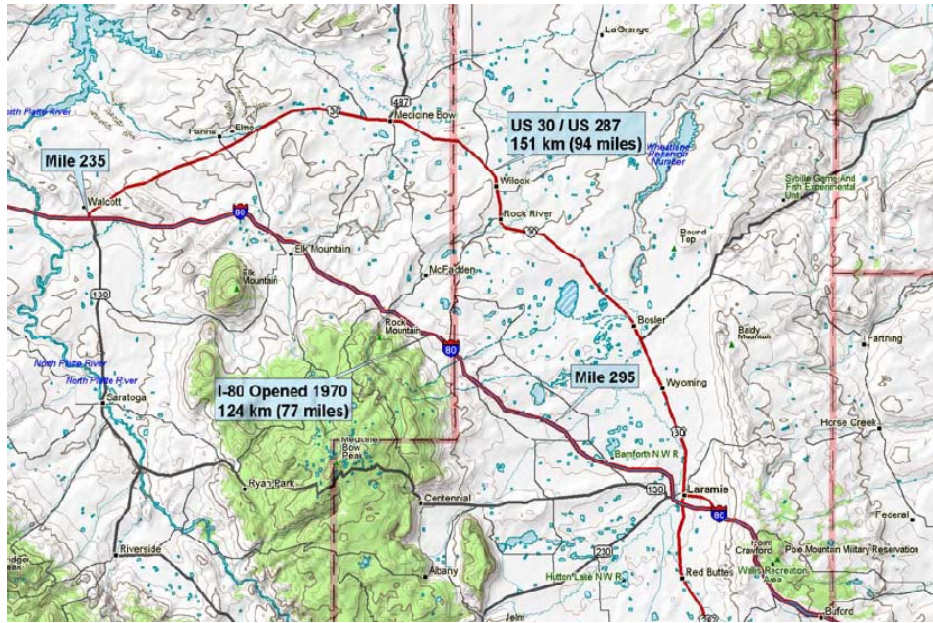


図 2.6 ワイオミング I-80 事例研究の場所 (Tabler 2002)

I-80 はワイオミング南部を横断する U.S.30 に近い経路を選択した。しかしながら、ララミーとウォルコット交差点間は、およそ 24km 短縮するために Medicine Bow Mountain 山麓に沿った新たな経路が選ばれた。

I-80 のこの新たな 124km 区間が、1970 年 10 月に最初に供用となった時には、防雪柵は全く無かった。3 か月後、深さ 5m に及ぶ吹きだまりが 27 カ所で道路走行車線に進入した。6 台のブルドーザーは、週 7 日 24 時間態勢で作業した。ある時には、風速が長時間時速 50km (14m/s) を超え、視程障害と事故のため、合計 10 日間道路が閉鎖されてしまった。この最初の冬の経験から、このレポートで提供されている手引き書の先駆者達の働きで、吹きだまりが道路に達している全ての箇所を守るため防雪柵が設計された。最初の契約は、高さ 1.8 から 3.8m で延長 18.3km が 48 万ドルで契約された。

1971 年から 72 年にかけての冬の、これら最初の防雪柵の注意深い観察は、吹きだまり防止効果を証明した。しかし、防雪柵で守られた区間の改善された視程と路面状況は、予期しない 2 次的効果であり、より印象的なものとさえなった(図 2.10～図 2.13)。

最初の画期的なこれら防雪柵の効果が、引き続く 18 年間にわたるより多くの防雪柵設置につながる。2001 年時点で、同様なシステムは I-80 の同じ区間で、約 64km の道路区間で 63.6km となった。総費用は 226 万ドルである。最初の防雪柵が設置されてから 10 年後、それらの効果を定量化するための研究が実施された (Tabler and Furnish 1982)。その最初の研究結果に新たな 5 年の追加資料を組み込んだ結果をここに報告する。

人員体制や機械,それに道路管理基準が解析期間中に変わり,冬期道路管理の経済的評価は複雑なものの,支出は少なくとも 1/3 から 1/2 に減った.もっと重要なことに,道路を守る防雪柵設置延長が長くなるのに伴い,衝突事故が減るという特徴が生じたことであつた(図 2.14).



図 2.7 防雪柵設置前のワイオミング I-80, 280.8 マイル地点の積雪状況(左)と,防雪柵設置後 31 年間の続いた積雪状況(右上).この地点の空中写真(Tabler 1973a)





図 2.8 ワイオミング I-80, 270.9 マイル地点の 1970 年の防雪柵設置前（上）と、設置後 31 年続いた典型的な積雪状況（右上）. 右下の写真はこの地点の高さ 3.8m 防雪柵でできた深さ 6m の吹きだまりで、防雪柵延長 1m 当たりで 80 トンに相当する (Tabler 1973a から引用).



図 2.9 ワイオミング I-80, 269.5 マイル地点の防雪柵設置前（左上）, 及び設置後 31 年続いた典型的な積雪状況との比較（右）. 下の写真は同じ日、別な場所での防雪柵にできた吹きだまり, (Tabler 1973a から引用).







図 2.10 ワイオミング I-80, 263 マイル地点で, ごくわずかな吹雪が 2 列になった 3.8m 防雪柵を回避しているのが見える (Tabler 1973a). この写真撮影時点で, 前にある防雪柵は満杯容量の 60%であった, 写真は, Robert L. Jairell.

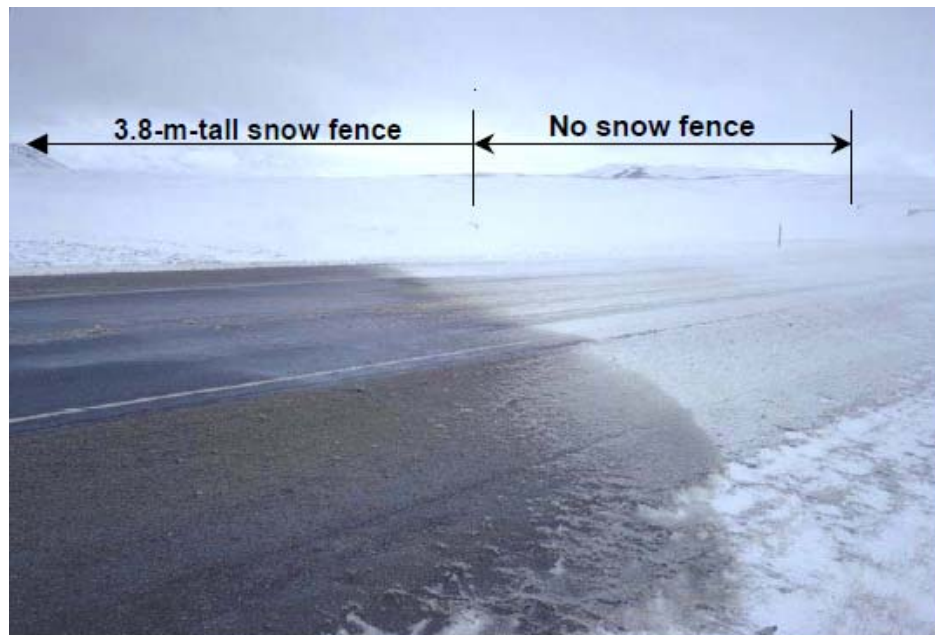


図 2.11 この, 濡れ雪が凍結した路面から濡れ雪路面への移行点は, 道路の約 150m 風上にある防雪柵の無い領域と, 高さ 3.8m の防雪柵で守られている領域に対応している. 写真左側へ伸びている部分は吹きだまりに隠れているが, 防雪柵の上端は写真中央部に見える. 写真の右側が防雪柵の無い領域である (Tabler と Furnish 1982 から引用)



図 2.12 穏やかな吹雪の間の, 3.8m 防雪柵風下で改善された視程距離. 写真右側は防雪柵で守られた領域から 60m 離れた所で撮影された. 右側の写真は, 数分後に防雪柵で守られている領域の境界点に立ち撮影された. 写真はワイオミング運輸局の Keith Rounds による (Tabler 1973a から引用).



図 2.13 防雪柵で守られている領域の中心から撮影したこの写真は, 視野の右外側に設置された高さ 3.8m 防雪柵風下で改善された視程距離を表している (矢印は風向である). 防雪柵の切れ目地点が, 道路標識を丁度超えた, 急激に道路状況が変わる地点と一致している (ワイオミング I-80, 254 マイル地点, Tabler 1986 から引用).

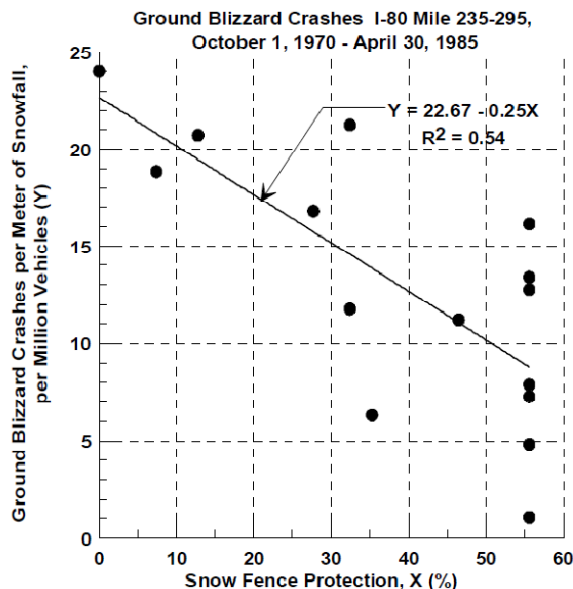


図 2.14 ワイオミング I-80, 235～295 マイル区間における防雪柵延長に対する吹雪時の事故率年ごとの降雪深変化を考慮し, 10 月 1 日から 4 月 30 日の間の降雪深 1m, 交通量百万台あたりの事故率を示す (Tabler and Furnish 1982 で更新した)

平均的降雪深と 1980 年交通量の条件で, 最初の研究は防雪柵設置箇所では 54 件の物損交通事故と 35 件の人身交通事故を防いだと結論づけた。5 年の追加資料を組み込み, 2001 年の交通量と最新事故率を適応させ, 平均的降雪量のもとで, ひと冬に 78 件の物損交通事故と 36 件の人身交通事故を防いでいると見積もった。2.7 では, 人身事故と物損事故だけで節約できる金額で, 防雪柵にかかる資本支出を 2 年以内に償却できる可能性のあることが示されるだろう。この防雪柵に道路閉鎖時間を減らしたり, 除雪費用を節約できることから増える追加利益を伴い, これらの防雪柵を更新する費用は 1 年以内に埋め合わせられることは明白である。

## 2.5 雪氷上での防雪柵の効果

図 2.11 で示したように, 防雪柵は劇的に吹きだまり (形成物) を減少させます。道路に達する飛雪流量を減少させることによって, 舗装上の堆雪を融雪する代わりに, 舗装 (表層や基層) に太陽熱が蓄積されます。防雪柵が設置された箇所と, その近くの防雪柵が無い吹雪の箇所の表面温度が,  $-8^{\circ}\text{C}$  違うことも一般的です。このことを図 2.15 に, トラックに搭載した赤外線センサーによる舗装温度の測定結果で示します。表面温度の急激な変化は, 防雪柵端部の風下で吹雪が発生している箇所, もしくは防雪柵パネルが壊れているところの風下の箇所と一致しています。図 2.16 の写真は, 温度測定時に写したもので, 雪氷路面から乾燥路面になった状況を示している。風上となる東向の路面ではより多くの吹きだまりが融けたため, 東側の路面温度は西向よりも低い。



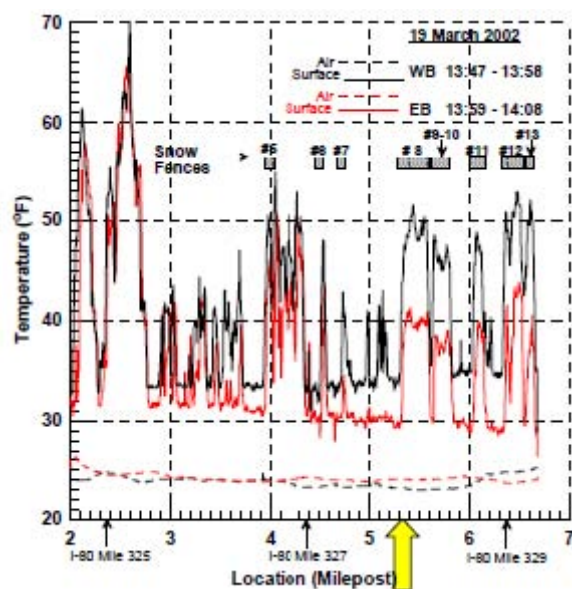


図 2.15 ワイオミング州 I-80 道路における舗装温度  
防雪柵の効果を示している。黄色矢印の位置は図 2.16 の場所を示す。網掛の防雪柵の位置は計測中の風  
向に依る。



図 2.16 図 2.15 が計測された際の露出路面状況  
雪氷路面（左）と乾燥路面（右）との間に図 2.14 の矢印で示した 7～8℃の温度変化がある。

## 2.6 異なる事例

数多くの成功事例は、設計された防雪柵が効果的であることを示している (Tabler,1992)。一つの例はアラスカ州 wainwright 村のもので、柵高 4.6m、延長 800m あり、以前は建物に被害を与え、道路を車両が快適に通行できなくしていた吹雪が除去されている (図 2.17)。



図 2.17 アラスカ州の北斜面にある wainwright 村  
 (上) 以前の状況 (撮影者 Robert L. Jairell, U.S. Forest Service Research)  
 (下) 柵高 4.6m の柵が 1982 年に設置された  
 (撮影者 Dr. Carl S. Benson, Geophysical Institute, University of Alaska - Fairbanks)

ここに示した事例は、防雪柵の効果がかなり長い距離の風下まで広がることを示すものである。これは、伴流（ウェーク）領域と外の層流との間の圧力勾配に起因すると考えられ、（この圧力勾配が）伴流領域への雪の流入を阻害している。

その結果、（雪の流入しない）保護されたエリアと保護されていないエリアの境界は風下の非常に長い区間で見られる。柵後方の吹きだまりは風を食い止める力を増加させ、結果的に柵後方の雪が除去される。この雪の衰退は柵後方の効果を広げている（図 2.18）。

（訳者注：この境界については、防雪柵の上部（=垂直的な境界）か、防雪柵の端部（=平面的な境界）かの議論がありましたが、よくわからない状況です。）



図 2.18 この順風方向からの空中斜め写真は柵の効果が非常に長い距離持続することを示す。前部にある 3.8m の柵は流入する雪の大部分を捕捉している。風を風速減衰効果の増加は風下の雪をおよ 1km に亘って除去する。雪のない区域に立つ短い柵はメインの柵の雪を捕捉率を計測するために設置された。  
(U.S. Forest Service Photo by A. Loren Ward.)

## 2.7 防雪柵の費用対効果

これまでに挙げた例は、防雪柵が地吹雪を防いだり、視程を改善したり、雪氷を軽減できることを示している。効果には除雪費用、交通事故、通行止め、路面維持コストの軽減が含まれる。

4 示した情報を使うと防雪柵事業の効果費用比 (B/C)が決定できる。

2.4 で述べたワイオミングの 60 マイルのケースでは、現在の交通量を基にすると、平均的な降雪を伴った 1 冬期間で 78 件の事故と 36 件の人身事故を防ぐと見積もられる。

The report Economic Impact of Motor Vehicle Crashes 2000 (Blincoe et al. 2002) によれば、物損のみの 1 単位価格は 2,532 ドル (236,000 円)、死亡事故を含めた 1 人身事故の平均価格は 46,422 ドル (4,327,000 円) であり、これから 1 年の平均は元々の投資額 1,910,000 ドル (178,500,000 円) に対して、1,778,000 ドル (165,700,000 円) の便益があります。仮に防雪柵を現在の価格に置き換え、交通量が現在の値でこれまで続いていたとすると、人身事故と物損単独事故の軽減による利益は B/C で 4.2 である。この計算は次の控えめな仮定に基づいている。

現在価格で柵の再設置費用：4,182,000 ドル (390,770,000 円)

金利： 7%

耐用年数 35 年

年維持費用初期資本投資の 5%(=19,500,000 円)

防雪柵のもう一つの重要な利益は、交通遅延を軽減することである。ワイオミングの法に基づいた道路閉鎖（いわゆる通行止め）が雪氷の堆積や厳しい気象環境で乱用される。なぜなら非常に多くの要因が道路閉鎖に影響を及ぼし、この中には通行止め基準の管理上の変化も含まれる。I-80 の道路通行止時間と防雪柵による防雪との関係は、限定された期間のデータでは、十分に有意なものとはなっていない。しかしながら防雪柵による通行止め回避効果は 1 年の通行止め時間と吹雪による事故の関係から十分に推断できる。図 2.19 からは、吹雪による事故が 61%減少すると、通行止め時間が 16.2 時間減少し、経済利益は 1 年あたり 168,000 ドル(15,620,000 円)になることを示している。

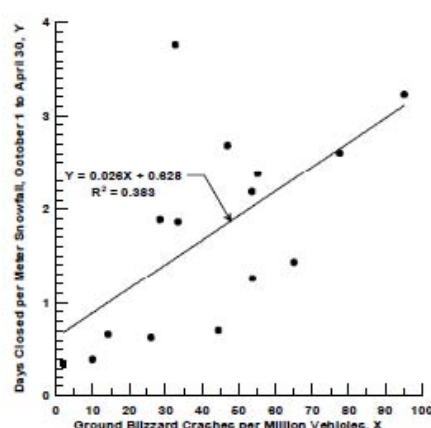


図 2.19 ワイオミング州 I-80 道路 Walcott Junction-Laramie 間における吹雪事故と通行止め時間 (1970-1985) との関係

冬期維持管理における経済利益には、残業時間、準備やサービスの短縮、ロータリーやローダーによる作業、雪氷（路面）管理のための凍結防止剤や防滑材の散布が含まれる。特定箇所の潜在的な削減可能量は、経年の決算書から決定できるに違いない。その大きさは除雪の省力は道路に到達する吹雪量の減少に比例すると考えることにより、例証できる。図 2.20 は、防雪柵の B/C は機械除雪費用と季節的な雪輸送—つまり風に直交する幅 1m の地上 5m 範囲の風による吹雪量—で変化する。次の仮定がこの分析に用いられている。

防雪柵の総費用は 1 m<sup>2</sup>あたり 15 ドル(1,390 円)

35 年の償還期間

7%の年利

1 年の柵維持コストは初期投資額の 5%

平均的な冬以上の吹雪量を設計容量とする

地役権や公道敷地取得額が変化するため、この分析には含んでいない。しかし、機械除雪の費用は非常に幅があり、1t あたり 3 ドル(278 円)から 5 ドル(463 円)が一般的で、その費用は地面掘削やゴミ処理費用に近い。

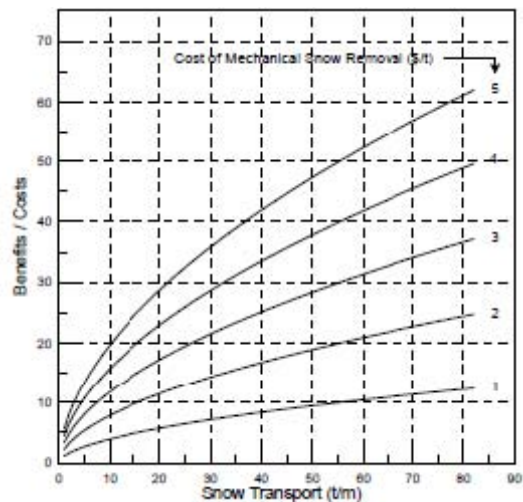


図 2.20 永久柵の B/C は季節的な雪輸送や機械除雪費用に関係する。

## 2.8 道路設計の効果

適切な道路設計（構造）は、吹きだまり防止に有効であると昔から認識されている(Finney 1939、Fowler 1930、Schultz 1930)。

広範囲における防雪柵設置による視認性改良や路面状況の改善は、合理的ではない。

道路は、吹きだまりのないように設計されるべきであるが防雪柵がいらないわけではない。防雪柵設置は、既存道路の横断面改良よりコストが安く効果的な吹きだまり対策の選択肢である。

## 2.9 結論

吹雪対策の中、吹きだまり防止、視認性改善、および雪氷路面の削減は主要要素である。

防雪柵の効果は明確であり、道路管理者は、この方法を用いて道路利用者の安全性や利便性の改善に努めることは責務である。このガイドには、防雪柵の応用に注意点などについてまとめている。

## 2.10 参考文献

Blincoe, L. J., A. Seay, E. Zaloshnja, T. Miller, E. Romano, S. Luchter, R. Spicer. 2002. *The Economic Impact of Motor Vehicle Crashes 2000*. U. S. Department of Transportation,



National Highway Traffic Safety Administration, Report No. DOT HS 809 446.

Brown, Robert Harold. 1983. Snow fences then and now. *Journal of Cultural Geography* 4(1):87-98.

Burton, V.R. 1925. Snow drift prevention and control on highways. *Engineering News Record* 95(19): 752-754.

———. 1928. Some economic considerations in using snow fences. *Engineering News Record* 100: 100-120.

Croft, George A. 1880. *Croft's New Overland Tourist and Pacific Coast Guide*. Overland Publishing Co., Omaha.

Dodge, Grenville M. 1910. *How we built the Union Pacific Railway*. 61st Congress, 2<sup>nd</sup> Session. Senate Document 447. Government Printing Office, Washington, DC.

Dunn, S.O. 1909. Snow control. *Railway Age Gazette* 46(12):623.

Ehrenberger, James L. and Francis G. Gschwind. 1973. *Sherman Hill*. E&G Publications, Callaway, Nebraska.

Farmwald, J.A. and J.A. Crum. 1986. Developing a community water system for Shishmaref, Alaska. In *Fourth International Conference on Cold Regions Engineering (Feb. 24-26, 1986; Anchorage, Alaska) Proceedings*, pp. 597-608.

Finney, E.A. 1934. *Snow control on the highways*. Michigan Engineering Experiment Station, Michigan State College, Bulletin 57.

———. 1939. *Snow drift control by highway design*. Michigan Engineering Experiment Station, Michigan State College, Bulletin 86.

Homsher, Lola M. 1965. *The history of Albany County, Wyoming, to 1880*. Lola M. Homsher, Lusk, Wyoming, 21

Johnson, G.D.B. 1852. *Nogle Ord om Snedeev, Snefog og Snefonner*. Universitetet i Trondheim - Norges tekniske høyskole. (in Norwegian).

Komarov, A.A. 1954. Nekotorye zakonomernosti perenosa i otlozheniya snega v raionakh zapadnoi Sibiri i ikh Ispol'zovanie v snegozadershanii i snegobor'be (Some rules on the migration and deposition of snow in western Siberia and their application to control measures). *Trudy Transportno-Energeticheskogo Instituta*, Tom 4, p. 89-97 (in Russian).

National Research Council of Canada Technical Translation 1094 (1963), Ottawa, Ontario, Canada.

Martinelli, M. Jr., R. A. Schmidt, and R. D. Tabler. 1982. Technology transfer in snow control engineering. *Journal of Technology Transfer* 6(2): 27-37.

Pugh, H.L.D. 1950. *Snow fences*. Great Britain Road Research Laboratory. Road Research Technical Paper No. 19.

Schneider, T.R. 1959. *Schneeverwehungen und Winterglatte*. Interner Bericht des Eidg.

Institutes fur Schnee- und Lawinenforschung, Nr. 302. English translation: Canadian National Research Council. Technical Translation 1038, 1962.

Tabler, R. D. 1973a. New snow fence design controls drifts, improves visibility, reduces road ice. In: *46th Annual Transportation Engineering Conference (University of Colorado; Denver; February 22-23, 1973) Proceedings*: 16-27.

———. 1973b. Snow fences improve highway safety. *Public Works* 104(8): 74-75.

———. 1974. New engineering criteria for snow fence systems. Transportation Research Board, *Transportation Research Record* 506: 65- 78.

———. 1986. *Snow fence handbook (Release 1.0)*. Tabler and Associates, Laramie, Wyoming.

———. 1989. Snow fence technology: State of the art. In *First International Conference on Snow Engineering (Santa Barbara, Calif., July 10-15, 1988)*. U.S. Army Corps of Engineers, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Special Report 89-6. pp. 297-306.

———. 1991. *Snow fence guide*. Strategic Highway Research Program, Report SHRP-H-320, National Research Council, Washington, D.C.

———. 1992. What's new in fencing for snow, wind and sand. In: *Proceedings of the 97<sup>th</sup> Annual Conference, American Railway Bridge and Building Association (September 21-23, 1992; Chicago, IL)* pp. 188-194.

———. 1994. *Design guidelines for the control of blowing and drifting snow*. Strategic Highway Research Program, Report SHRP-H-381.

———. 2002. *Safety Improvement Study: Interstate-80 Mile 325-335*. Final Report, Agreement No. 54839, prepared for the Transportation Commission of Wyoming.

### 3 雪の移動と吹きだまりの形成

#### 3.1 概要（範囲）

この章では、吹きだまりの特徴について述べる。これは本ガイドラインの基本でもある。

#### 3.2 要点(ハイライト)

- ・ 吹雪粒子は、直径  $100\mu\text{m}\sim 200\mu\text{m}$  である。
- ・ 雪は、転動、跳躍、および乱流拡散で移動する。転動する粒子が積雪表面に転がり、雪の丘や波を形成する。跳躍雪粒子は、積雪表面を飛び、その多くは表面から  $10\text{cm}$ （4 インチ）の間で発生する。乱流拡散は、さらに小さい雪粒子が乱流渦によって高いところに運ばれる過程を示す。
- ・ 雪は、風によってかなり高いところまで運ばれるが吹雪対策に関しては、 $5\text{m}$ (16 フィート)以上の区間を考慮しなくてもよい。
- ・ 雪粒子の濃度は、一定の高さにおいて風速に従って増加する。例えば、風速  $100\text{km/h}$ （62.1 miles/h）の場合、吹雪粒子の 50%が高さ  $1\text{m}$ （3.28ft）までに集中し、30%は  $2\text{m}$ （6.56ft）以上に集中する。垂直方向の吹雪粒子の分布は、防雪柵の最適な高さを決定するための重要な要素である。
- ・ 吹雪量は、高さ  $5\text{m}$ (16ft)の範囲において、風速の  $3.8$  乗( $V^{3.8}$ )に従って変化する。
- ・ 吹雪時の視認性は、高さ  $10\text{m}$ （33ft）の範囲において、風速の  $5$  乗( $v^5$ )に従って変化する。
- ・ 吹雪粒子は、相対湿度が 100%未満の場合は昇華・蒸発する。昇華・蒸発は、零下よりかなり低い温度でも発生する。
- ・ 吹雪粒子の昇華・蒸発は、雪の表面積と体積の比が大きい場合に著しく発生する。 $3\text{km}$ （1.9miles）の移動距離で半数以上の雪粒子が昇華・蒸発してしまう。吹雪の昇華・蒸発の定量化は、吹雪量（雪運搬量）の推測、加えて防雪柵の防雪容量（堆雪可能量）の計算の基本である。
- ・ 雪の堆積量から昇格・蒸発の損失を引いて、一冬の吹雪量（雪運搬量）の算出が可能である。

- 雪は、表面せん断応力が減少するところに堆積する。表面せん断応力は、風下側の距離が長くなるに従って減少する。雪の吹払いは、せん断応力が増大するところで発生する。
- 雪粒子は、堆積されるとともに凍結する。雪粒子間の付着強度は、時間とともに増加し 24 時間で倍増する。
- 堆積された雪の密度は、積雪深に従って増大する。
- 雪は、特徴のある地形において積もり吹払われる。この繰り返しによって堆積されていく。冬の終わりににおいて堆雪形状は、風速の低いところの地形と相似する。なぜならば、風速の強いところでは、雪粒子間の接着力が破壊され雪が吹払われてしまうからである。
- 防雪柵は、風速を減少させ風の分布状況を変える。これらの変化は、雪粒子の転動や跳躍を引き起こす。防雪柵背面の吹きだまりの増加に伴い堆雪の形状も変化する。
- 防雪柵の容量には限度がある。吹きだまりと風の状況が平衡状況になると、防雪柵はこれ以上の雪を止めることができなくなる。この時の<sup>※1</sup>吹きだまり体積は防雪柵の高さに比例し、横断面積はフェンス高さの 2 乗に比例する。(※1 実際の吹きだまり体積は防雪柵の高さの 3 乗に比例する:翻訳者)
- 積雪深と雪密度の関係によって、防雪柵の容量が防雪柵の高さの 2.2 乗に比例する。
- 防雪柵の容量は、防雪板の間隔によって変化する。防雪板の空隙率が 50%の場合、防雪柵の容量が最大になる。
- 防雪板の空隙率が 50%では、約 85%の雪が防雪柵の風下側に堆積される。平地に設置される場合、防雪柵の容量に達した時に、風下側の吹きだまりの長さは、防雪柵高さの 35 倍になる可能性がある。
- 密閉式の防雪柵（吹き止め柵）は、はじめに雪が風上側に堆積し、堆積量が防雪柵の高さを超えると風下側に堆積が始まる。密閉式防雪柵（吹きだめ柵）の容量は、防雪板の空隙率 50%の防雪柵（吹だめ柵）容量の 35%にしかない。
- 防雪柵周囲の地形は、吹きだまりの形状に最も大きく影響する。
- 防雪柵の捕捉率は、風上から飛んでくる雪が防雪柵によって止められる雪の量に比例する。初冬の防雪柵の捕捉率は 90～95%であり、雪の吹き込み(積り)によって減少し、防雪柵が半分埋まった状態では捕捉が 80%、防雪柵が 80%埋まった状態では 60%まで減少する。

### 3.3 雪粒子の特徴

吹雪粒子は小さい砂の粒子に類似して、サイズは微小（無限小）～0.5mm（0.02 インチ）までである(図 3.1)。雪粒子のサイズは地面からの高さに従い減少し、高さ 5 c m（2 インチ）のところで 0.2mm(0.008 インチ)、1m（3.3ft）のところで 0.1mmである。氷の中にほとんど気泡がないので、雪粒子の標準比重は 0.9 である。

新雪から飛ばされた雪の粒子は、留まった新雪と比べると小さい。

雪粒子が風に吹かれて飛び散り、砕かれ蒸発されて、次第に小さく丸くなる。

3.4.6 で説明されるように、風で飛び散る雪粒子の蒸発は、零下よりかなり低い温度においても発生している。

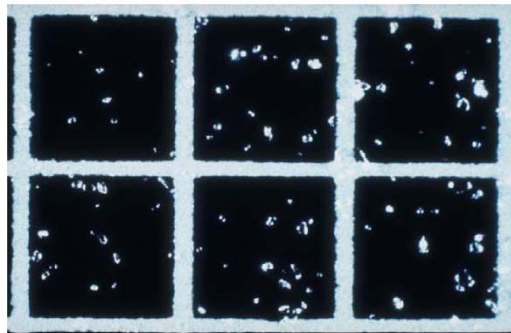


図 3.1 雪表面から 1m（3.3ft）のところに分布する吹雪粒子。  
(Tabler 1986) 格子のスケールは、2mm(0.08 インチ)、撮影者ドクター R, A Schmidt

### 3.4 吹雪量

#### 3.4.1 定義

吹雪量とは、雪の塊が、風向に直角な単位幅を単位時間に通過する吹雪の質量を指します。吹雪粒子が、雪面から何千メートルも上部で検知されることもあります。雪面から高さ 5m(16 フィート)かそれ以上の雪の濃度については、防雪対策という観点からは無視できるほど小さいので、本報告書では特に別の記述がなければ、吹雪量は風に直交する単位幅あたりの雪面からの高さ 5m(16 フィート)までの合計を指すこととします。

#### 3.4.2 雪の輸送の形態

雪の運動には、転動、跳躍、浮遊の 3 種類があります(Mellor 1965)。風が吹いたとき、粒が大きすぎて雪面から離れない粒子は、表面を転がるか或いはク

リープして風下に移動し、雪の波や砂丘状の雪を形成します(図 3.2)。雪の波は、平均風速が  $15.3\text{m/s}$  を超えると(Tabler1986)現れなくなります。クリープする粒子は、低風速時には吹雪量全体の  $1/4$  を占めますが、防雪柵や地形上の障害物によって簡単に捕捉されます。(Tabler1986)

図 3.2 風速  $11.1\text{m/s}$  において、 $0.001\text{m/s}$  の速さで移動しながら形成される雪の波。写真は向かい風での雪の波。(Tabler1986)



前述の粒子よりもっと軽いものは、跳躍すなわち地面を飛び跳ねるような動きをしますが、空中に浮遊し続けるには重すぎます。この跳躍粒子の軌跡は、粒子のサイズや風速、地面の状態によって変化しますが、典型的な「跳躍」は、放射状の軌跡は高さ  $1\text{cm}$ ( $0.5$  インチ)、幅  $25\text{cm}$  ( $10$  インチ) です。大抵の跳躍粒子は、地面から  $5\text{cm}$  ( $2$  インチ) 以内の範囲で動きます(図 3.3)。跳躍粒子は地表にある他の粒子、特に他の粒子と結合して繋がった粒子をはじき出します。(図 3.4)

## 風速

4.6 m/s (15.1 フィート/h)

5.0 m/s (16.4 フィート/h)

4.8 m/s (15.7 フィート/h)

3.9 m/s (12.8 フィート/h)

4.4 m/s (14.4 フィート/h)

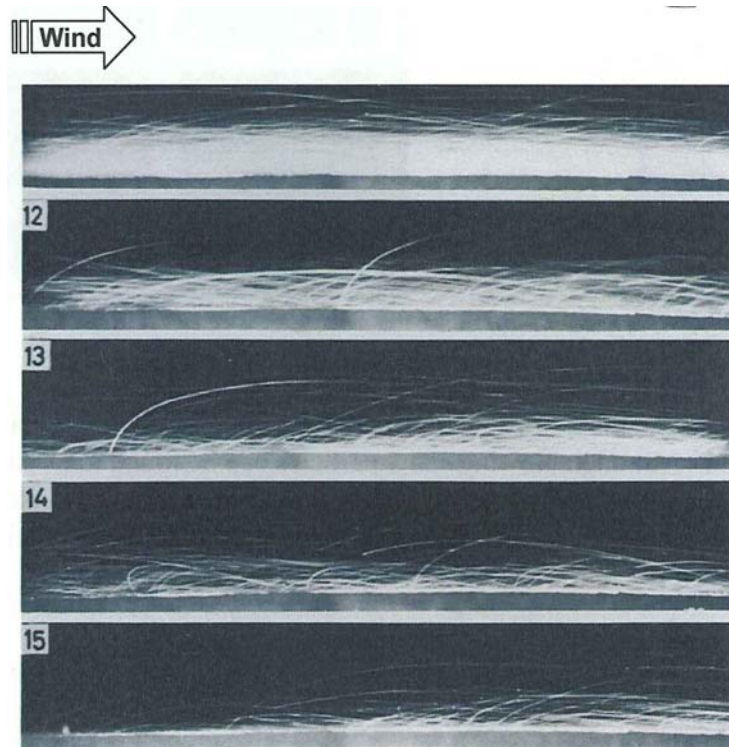


図 3.3 降雪がない状態の跳躍粒子。図の長さは 25 cm (10 インチ) で、風速は 1m (3.3 フィート) 高での値を示す。写真撮影：小林大二博士 (1972)

図 3.4 トラクターが雪面のクラストを壊したところの風下にある、跳躍粒子の連鎖反応。(矢印は風向を示しています)このような攪乱は風下の長距離に亘って続く地吹雪の源となります。(Tabler1986)



風が地面の大部分から雪を吹き飛ばした後の、残された雪は、風下に 7-8km に渡って続く跳躍粒子の流れの原因となります(図 3.5)。雪の流れは排水の流れと同一で(図 3.6)、それは雪が凸地よりも凹地に堆積しがちで、風も地形により流れるルートが決められます。



雪の流れとは反対に、雪の影は変形や堆積によって跳躍粒子の流れが止まったところから風下の領域です(図 3.7)。跳躍粒子は簡単に防雪柵で捕捉できます。跳躍粒子を気流から取り除けば、雪の表面が浸食するのを防ぐことができ、風下の雪を減らすことも出来ます。これは防雪柵が効果的である理由のひとつです。



図 3.5 吹雪のきっかけより風下の雪の流れ。この流れの限界は少なくとも 3km(1.9 マイル)形づくられます。(Tabler1986)

図 3.6 地形に沿った雪の流れ(向かい風で撮影) (Tabler1986)





図 3.7 直径 1.2m(4 フィート)、高さ 2.1m (7 フィート) の円柱状シェルターによって形成された雪の影 (タブラー1986)。この写真は、風下 150m (500 フィート) の地点直下から、U.S.フォレストサービスの Robert L.Jairell によって撮影された。



吹きだまり対策の立地条件や対策工の容量を計画する際には、雪の移動の局所の変動があることを考慮に入れなければいけないことを「雪の流れ」と「スノーシャドウ」が示唆しています。

乱流拡散は、跳躍の特徴である周期な地表に接触することなく、気流内部で浮遊するメカニズムに関連しています(図 3.8)。粒子に働く重力が上昇気流の影響で起こる平均揚力より弱い時に、雪の粒子が気流内部で浮遊します。乱流拡散は跳躍している粒子よりも小さな粒子でより活発になります。浮遊粒子が昇華蒸発によって小さくなるにつれて、地表からより高いところに運ばれます。このようにふるいわけされて雪面からの高さが増加するにつれ、粒子のサイズを小さくします。

図 3.8 雪粒子の乱流拡散 (右側からの風) (Tabler1994)



最近の研究では、大部分の高い地吹雪は乱流拡散状態で運ばれると考えられていますが、浮遊粒子量の大部分は、雪面から 1m (3.3 フィート) の範囲に含

まれます(Pomeroy 1988、1989)。防雪柵に捕捉された浮遊粒子は、後ろに移動するのを防ぐため、十分に保護された領域の表面に溜め置かねばなりません。

### 3.4.3 風速の高度分布

地表面の抵抗が減少するために、風速は高度と共に上昇します。この風速の鉛直分布は、防雪柵の風荷重を計算するのに必要になります。一般的に、雪面は空力学的には起伏があり(層流境界層はありませんが)、気流はあらゆる風速に於いて、地吹雪の境界の上では完全に乱流です。平らで遮るもののない地面という条件に於いて、風速の高度分布は次の式の通りに表わされます。

$$U=(2.5U^*)\ln(Z/Z_0) \quad (3.1)$$

ただし、

$U$  = 雪面上からの高さ  $Z$  での風速

$U^*$ =摩擦速度(空気密度で除した表面せん断応力の平方根という定義)

$Z_0$ =空気力学上の表面粗度 (すなわち風速ゼロ地点での高度)

$\ln$  =自然対数 (底 2.71828...)

雪に覆われた平坦な地形での吹雪状態に於いて、風速の範囲を通じて最も頻出する

$U^*$ は、通常 10m(33 フィート)風速の約 4%になります。 $Z_0$ の値は表面の状態に因り、氷の滑らかな表面の 0.001 cm (0.0004 インチ) から、森林植生の 30 cm (12 インチ) くらいに変わります(1966 Budd、Dingle、Radok、1957 Liljequist、1980b Tabler)。

$Z_0$ は、跳躍粒子の摩擦のため、風速に伴い上昇します(1964 Owen)。この関係は、表面の粗さによって変わっていきますが、次の近似式は工学的用途としては十分に使えます。

$$Z_0=U^{*2}/31250 \quad (3.2)$$

ただし速度が cm/秒で表わされるとき、高さは cm で表わされます(1986 Tabler と Schmidt)。ですから、地吹雪の存在が、風速鉛直分布に於いて重要な影響を及ぼすのです。

式 3.2 に示された風速鉛直分布は、防雪柵の風圧荷重を積算するのに使われます。保守的な見積りとしては、地吹雪がない状態で  $Z_0=0.02$  cm (0.008 インチ) の雪が覆われていると仮定し積算します。積雪状態が判らない状態で計測高以外の高さの風速を見積もるには、高さ  $Z$  での風速の次の数式で高さ 10m の風速に関連している、として求めるのが標準的です。

$$U_z/U_{10}=(Z/10)^{1/7} \quad (3.3)$$

この報告書全体に於いて、「風速」とは標準高 10m(33 フィート)を指しており、 $U_{10}$  という単位で表し、(3.3)式から見積って標準高での風速は高さ 1.8m (5.9 フィート) の風速の 28%増しです。

#### 3.4.4 吹雪量率と垂直分布

雪粒子が動き出す風速は、積雪状態と空気密度によって変化します。ふわふわしたやわらかい雪では、風速が 5.6m/s に達すると動き出しますが、一方、風と太陽によって固くなった雪面部は風速が 23.6m/s を超えるまで浸食に抵抗します。そして、風速がおよそ 6.7m/s 以下になると、通常は雪の動きが止まります。(Schmidt、Tabler1981、Pomeroy、Santana1990)

地吹雪粒子は雪面の数千メートル上を移動することもあります。大抵の雪の移動は雪面に近いところで起こります。吹きだまり制御を目的とするとき、5m(16 フィート)以上の移動は無視します。雪面上 5m までの吹雪量は、次の数式によって風速により変わってきます。

$$Q_{0.5} = U_{10}^{3.8} / 233847 \quad (3.4)$$

$Q_{0.5}$  は、風向に垂直な単位幅を通過する吹雪の質量 (kg/s) を示します。 $U_{10}$  は風速(m/s)です(1991b Tabler)。この関係は、雪面上の風速と高さに対する、回帰方程式によるものです(1986 Mellor と Feller)。それ故に飛雪流量の風速の影響を受けやすく、風速が 2 倍になると吹雪量は 14 倍に増加します(図 3.9)。このことは、何故防雪柵が効果的なのかを説明してくれます。風速を 50%減らすと吹雪輸送量が 94%減ります。しかし現実問題として、雪移動と堆積における防雪柵の空気力学上の効果は、もっと複雑なものになります。

とは言っても、雪輸送の大部分は雪面から 1m (3.3 フィート) 以内で起こり、最初の 5m(16 フィート)以内での地吹雪垂直分布は、地吹雪制御にとって重要な意味を持ちます。防雪柵を越える高さの吹雪の大部分は防雪柵には抑止されず、地吹雪垂直分布は防雪柵の高さを決めるのに重要な要素となります。図 3.10 と表 3.1 にグラフに示した通り、地吹雪垂直分布は風速が増加するにつれて均一になります。風速 9.7m/s では、わずか 10%以下の雪だけが 1.5m (5 フィート) より高いところを通過します。しかしながら、風速 30m/s では、約 38%の雪が高さ 1.5m 以上を通過します。他の条件が同じであるとすれば、防雪柵の効果は高さと共に増加します。

この本全般を通して、年間総吹雪量  $Q_t$  は  $Q_{0.5}$  と、つまり地面から 5m(16 フィート)の吹雪量と等しいとみなします。

図 3.9 図 3.9 地面から 5m(16 フィート)の範囲での雪の移動。風速 10m(16 フィート)高 (1991 b Tabler)

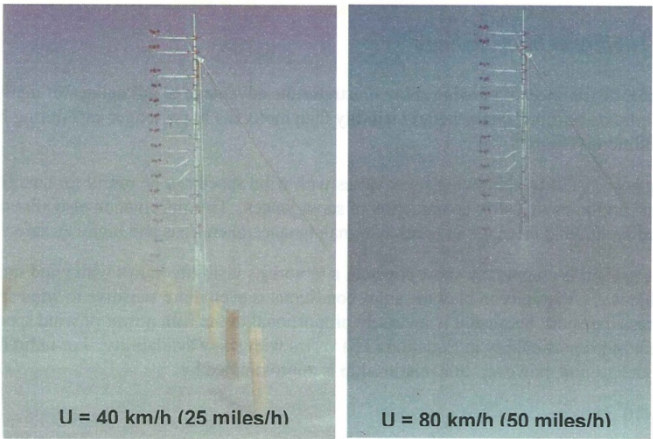
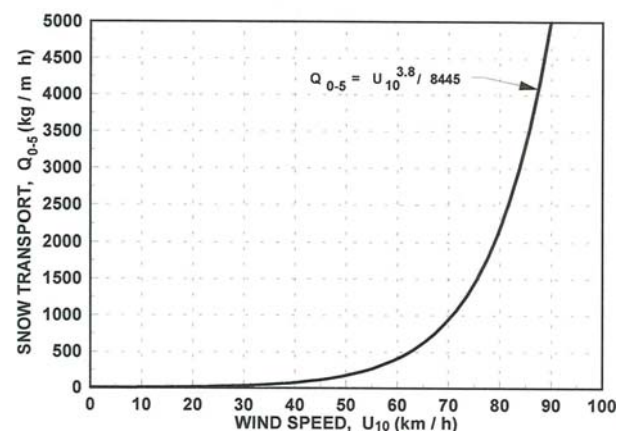


図 3.10 地吹雪垂直分布が風速  $U$  によっていかに変化するかを見る実験。この風速計は 30cm (12 インチ) 毎に配列されており、ウッドポストの平原 1.2m (4 フィート) に設置されています。(Tabler 1991b)

表 3.1 風速の機能としての吹雪量の垂直分布。値は、 $Q_{0-z}/Q_{0-5}$ 。地面から 5m (16 フィート) の範囲での吹雪量 (単位  $g/m \cdot s$ ) はカッコ内に表示 (Tabler 1991 b) 。

	風速 (m/s)				
	10	15	20	25	30
0. 1	0. 822	0. 487	0. 251	0. 126	0. 056
0. 2	0. 853	0. 579	0. 365	0. 239	0. 160
0. 3	0. 868	0. 628	0. 431	0. 312	0. 233
0. 4	0. 878	0. 661	0. 480	0. 366	0. 290
0. 5	0. 885	0. 687	0. 519	0. 411	0. 338
1. 0	0. 909	0. 768	0. 645	0. 563	0. 505
1. 5	0. 925	0. 818	0. 725	0. 662	0. 616
2. 0	0. 938	0. 857	0. 786	0. 737	0. 701
2. 5	0. 950	0. 888	0. 834	0. 797	0. 770
3. 0	0. 961	0. 915	0. 876	0. 849	0. 828
3. 5	0. 971	0. 940	0. 912	0. 893	0. 879

4.0	0.981	0.961	0.944	0.933	0.924
4.5	0.991	0.981	0.973	0.968	0.964
5.0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	(32.3)	(114.9)	(375.0)	(902.0)	(1711.8)

### 3.4.5 吹雪時の視程について

吹雪の垂直分布は、高さの高い視線誘導標の有効性を示す形状となっており、同時に吹雪時におけるトラックドライバーの視程が乗用車ドライバーのそれよりも何故良いかの理由を説明するものとなっています(図 3.11)。

吹雪時の視程が風速によりどのように変化するかを知ることは、ホワイトアウトの問題の定量化に有効であり、防雪柵の設置の妥当性を示すことでしょう。

この情報はまた、国道の維持管理における風の予測手法の精度向上に寄与することでしょう。

地面が完全に雪で覆われている場合、ドライバーの視程は風速により変化するものと予測されます。

吹雪時の視程は風速の5乗に反比例します。このため視程は、吹雪量よりも風速に対して、より敏感に変化します。

式(3.5)の比例係数は雪の有無により変化しますが、無限の雪面を仮定した場合、視程は以下の式により近似されます。

$$V = 1.1 \times 10^8 / U_{10}^5 \quad (3.5)$$

ここで、Vは視程(m)、風速はm/毎秒です(Tabler 1979, 1984)。

表 3.2 は、降雪が無い場合についての、風速毎の視程の値を示したものです。

視程は風速に対して極めて敏感であるため、風速変動が吹雪時の運転を危険なものとしています。

表 3.2 無限の雪面上で昇華蒸発が無く、突風率 40%の際の視程と 10 分風速 (Tabler 1994)

Wind speed (km/h)	Motorist visibility (meters)		
	Minimum	Maximum	Average
30	509	35 200	2 737
40	121	8 353	650
50	40	2 737	213
60	16	1 100	86
70	7	509	40
80	4	261	20
90	2	145	11
100	1	86	7
110	0.8	53	4
120	0.5	34	3
130	0.3	23	2
140	0.2	16	1
150	0.2	11	0.9
160	0.1	8	0.6
170	0.1	6	0.5
km = miles · 1.61; m = ft · 3.281			



図 3.11 平均風速 90km/h (訳者注 : 25m/s) の際の吹雪の垂直分布 (Tabler 1994)

10 分程度の間について見ると、風速は平均値に対し 30～50%変動しており、これにより視程が極端に変化します。

例えば風速が 40km/h (訳者注: 11m/s) で ±40% の変動を伴う場合、視程は 1100m (3609ft) から 16m (52ft) まで変化します。

### 3.4.6 吹雪の昇華 (訳者注 : 主に昇華蒸発) について

冷凍庫内の四角い氷が昇華蒸発するという一般的な経験や、吹雪時の雪の表面積と量の比が大きいことから、吹雪時には雪粒子の昇華蒸発が顕著に見られるであろうという直感につながります。

こうした考え方は最初に、Dyunin(1954、1956、1959)と Komarov(1954)によって提案されました。

風で運ばれた雪の昇華蒸発については、過程に基づくエネルギー収支モデル (Schmidt 1972; Lee 1975; Pomeroy 1988)や、吹雪時における大気条件の分析 (Schmidt 1982b)、水文学的な根拠 (Tabler and Johnson 1971)、物質収支の分析 (Benson 1982; Tabler 1975a)により具体化されています。

氷点下における昇華現象（訳者注：昇華蒸発、昇華凝結を含む）の写実的な証拠は、図 3.12 中の舞い上がった吹雪の上方における水蒸気の凝結により見られます。

Schmidt(1972)によると、昇華蒸発に影響を与える主要因は相対湿度です。例えば、気温 $-15^{\circ}\text{C}$ ( $+5^{\circ}\text{F}$ )、風速 88km/h(訳者注:24m/s)の条件下においては、相対湿度 40%の場合の昇華は、相対湿度 90%の 5 倍以上となります。従って、他の条件が等しい場合、湖のある地域のように湿度が比較的高い地域では、昇華蒸発が少ないため、吹雪量がより多くなります。

個々の粒子からの昇華蒸発に関係する他の重要な因子は、粒径と気圧、日射、気温です。気温が  $10^{\circ}\text{C}$  上がる毎に、昇華蒸発率は約 2 倍となります (Schmidt 1972)。



図 3.12 舞い上がった吹雪の上方における水蒸気の凝結  
当日の最高気温は $-5.6^{\circ}\text{C}$ ( $+22^{\circ}\text{F}$ ) (Tabler 1986)

昇華蒸発は空気を冷やし湿度を増加させますが、熱と水蒸気の浮遊が(訳者省略:自己抑制の働きを妨げ、)過程を進行させます。

風速とともに浮遊を増加させた場合、昇華蒸発率は風速とともに増加します。これらの数学的モデルは、冬期間の昇華蒸発の総量を見積もる簡易手法の開発に必要な洞察を提供します。

降水量から昇華蒸発の総量を差し引くことにより、雪対策施設の防雪容量の設計に必要な吹雪量の予測値が得られます。昇華蒸発を、雪粒子の典型的な大きさと、雪粒子が風によって運ばれる距離とで関係づける概念モデル(Tabler 1975a)では、吹送距離  $F$ , 残量比  $= M/M_0$  (初期量) から式 3.6 のように密接に近似されます。

$$M/M_0 = e^{-2(F/T)} \approx 0.14^{(F/T)} \quad (3.6)$$

ここで、 $T$  は最大吹送距離(平均的な寸法の粒子が完全に昇華してしまうまでに移動できる距離)で、 $F$  は吹雪を風下に運ぶ吹送距離です(図 3.13)

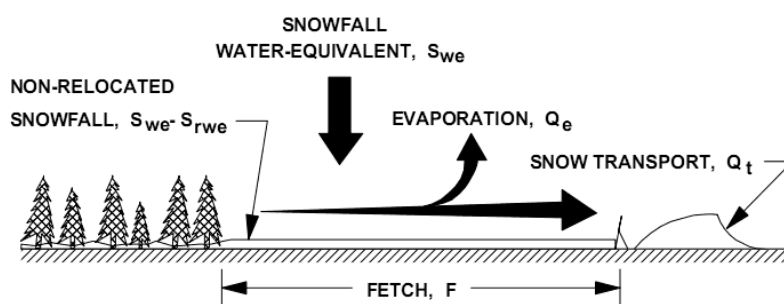


図 3.13 風により運ばれた雪の量から昇華蒸発損失を見積もるための、吹送距離の概念図 (Tabler 1975a)

式(3.6)を用いた微分方程式により、保存特性の異なる雪について、吹送距離の増分から昇華蒸発量の計算値が得られます。

一定の状態における吹送距離について

$$Q_{\text{evap}} = 1000 S_{\text{rwe}} F - 500 T S_{\text{rwe}} (1 - 0.14^{F/T}) \quad (3.7)$$

ここで、

$Q_{\text{evap}}$  = 昇華蒸発損失 (kg/m 風に対する幅)

$S_{\text{rwe}}$  = 飛ばされた雪の積雪水量(m)

$F$  = 吹送距離(m)

$T$  = 最大吹送距離(m)

飛ばされた雪の  $S_{\text{rwe}}$  は、風により運ばれた冬期の降雪の一部で、植物や地形により保有されたものや、その場で硬化したもの、融解したものを除いた値となります。

したがって、再配置係数( $\theta$ )は、風により飛ばされた冬期降雪の積雪水量( $S_{\text{we}}$ )の割合と定義されます:



$$\theta = S_{rwe} / S_{we} \quad (3.8)$$

シベリアとワイオミングにおける研究において、低く茂る植物のある平地では、 $\theta$  が冬期間に滅多に 0.7 を超えることはありませんでした。

また、アメリカ北東部では  $\theta$  は通常 0.2~0.3 となります。

吹送距離の風上側の端は、森林限界や深い小峡谷、流れのある水路、並木、凍結していない海岸線のように、そこを雪が横切らない境界となっています(図 3.14)。



図 3.14 この谷は上流側の境界の一例で、下流側の吹送距離を決めるもの(風は左から右へ) (tabler 1986)

最大吹送距離は、それぞれの吹雪に関しては、相対湿度や気温、風速により大きく変化しますが、季節全体の平均値は比較的安定しています。

ワイオミングにおける研究では、最大吹送距離は平均で約 3000m(1 万 ft)です。季節平均の値は地域により異なるものと予想されますが、他の補正要素により一般に 3000m となります。

例えば、相対湿度の低さが低気温を補う北極アラスカでも、同様の値があてはまります。吹雪ごとの昇華蒸発率は大きく異なりますが、冬期間を通じた純損失はそれほど変わりません。

式(3.7)においては、 $T=3000m$  が合理的な近似値となります。大陸性の気候に関しては、昇華蒸発損失は図 3.15 に示すように、吹送距離とともに増加し、吹送距離 3km(1.9 マイル)で約 57%が、10km(6.2 マイル)の場合は 85%が昇華蒸発します。

### 3.4.7 吹雪量と吹送距離及び飛ばされた雪の関係について

飛ばされた降水の総量から昇華蒸発損失を差し引いた結果から、吹雪量の総和  $Q_t(\text{kg/m})$  が計算されます。また、吹送距離の間で雪の保存が一樣であると仮定した場合、

$$Q_t = 500 T S_{rwe} (1 - 0.14^{F/T}) \quad (3.9)$$

ここで、 $S_{rwe}$  は水当量（メートル法）で、距離もメートルです。

$S_{rwe}$  として長期間の平均値を使用した場合には  $Q_t$  は  $Q_{t,ave}$  に置き換えられ、これは年間の吹雪量の平均を意味します。

図 3.16 は、この方程式が示す関係について表現したものです。

図 3.15 飛ばされた雪の昇華と吹送距離との関係(Tabler 1994)

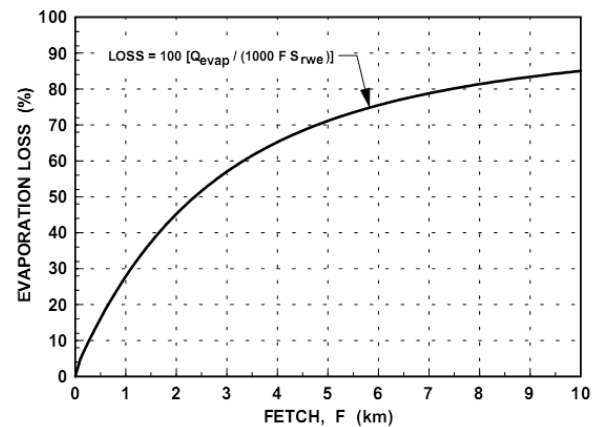
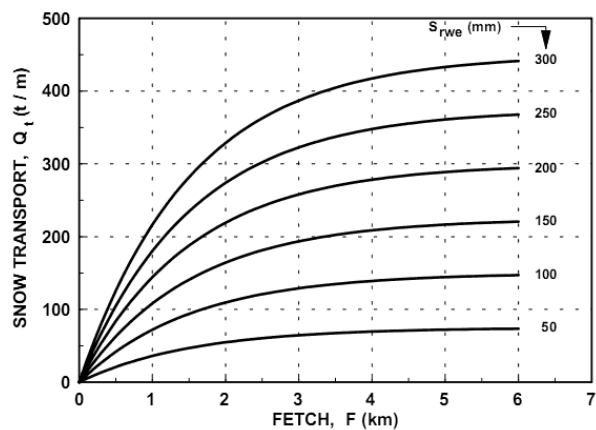


図 3.16 吹送距離と飛ばされた雪の積雪水量から計算された吹雪量  
式(3.9)において  $T=3000\text{m}$  (10,000ft)を用いた場合の計算値(Tabler 1994)



式(3.9)に  $T=3000\text{m}$  (10,000 ft)を当てはめたものは、吹きだまり対策計画の多くの成功例に採用されており、一般工学用としては初の優れた近似値を提供しています。

しかし今後、新たな場所で吹雪量の予測値と実測値との間に違いを生じた場合には、式(3.9)の最大吹送距離  $T$  に異なる値を採用することで較正できることでしょう。式 (3.9)は以下のように表現することもできます。

$$Q_t = Q_{inf}(1 - 0.14^{F/T}) \quad (3.10)$$

ここで、 $Q_{inf}$ は吹送距離が十分にある場合の風下側の吹雪量、括弧内は吹送距離の修正項となります。

図 3.17 は、吹送距離と吹雪量との一般的な関係を示したもので、ここでは通常の想定  $T = 3000 \text{ m}$  (10,000 ft)を用いています。

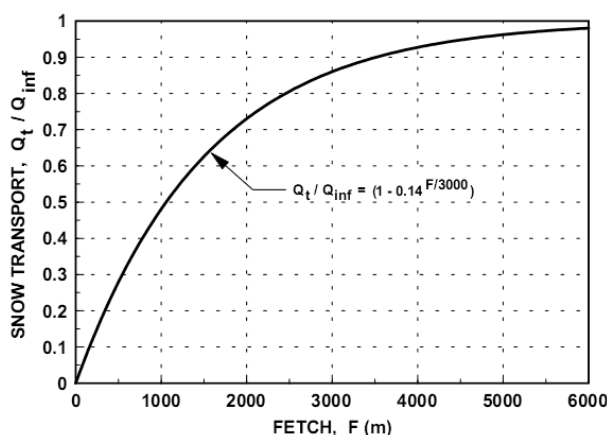
再配置された雪の積雪水量が既知である場合、

$$Q_{inf} = 500 T S_{rwe} \quad (3.11)$$

ここで、 $S_{rwe}$  はメートル。

しかし通常、風速の記録から式(3.4)により 4.7 章の記載のように  $Q_{inf}$ を予想することも可能です。

図 3.17 吹雪量が吹送距離とともにどのように増加するのか 式(3.10)において  $T=3000\text{m}(10,000\text{ft})$ とした場合(Tabler 1994)



### 3.4.8 雪面の形状

雪面の形状の大きさは、浸食と堆積に起因して、cm 単位の波や窪みから、m 規模の V 字形の雪丘の範囲にまで及ぶ。大きな方の特徴を良く知れば、空中写真での風向の判定に役立つ。また吹きだまり雪丘があることは、吹きだまりの表面がその時点の風と平衡状態にあることも示している。

雪丘は砂丘と類似している。最も一般的な類似点は、形が V 字形または三日月形であること、高さが 10~30cm あること、そして頂部が風上に向けた長さ数 m の角があることである(図 3.18)。波模様(丸みを帯びた水の波に似た丘)は、通常、高さが 20~40cm、長さが最大 10m かそれ以上に達する。そして風向に対し直交している(図 3.19)。雪丘も波模様も、雪面を転動する比較的大き

な雪粒子の存在下で、低風速時に、氷片の源となるような古い雪から、最も成長する。

図 3.18 三日月形の雪  
丘（風は左から）  
(Tabler 1986)



図 3.19 波模様（向かい  
風）防雪柵の高さ 3.8m  
(Tabler 1986)



雪丘と波模様は、風速に比例した速度で風下に運ばれる。図 3.2 で示したように、それらは平均 40km/h (11m/s) の風速下において約 5m/h (1.4 mm/s) で移動していた。式 3.4 より算出した波模様の吹雪量は、風の横断方向の m 幅当たりで 45kg/h、表面上 5m までの吹雪量の約 30%であった。波模様は、しばしば空中写真にはっきりと見られる。それらの形状は風と直交しているため、風向の判定に役立つ。

サスツルギ(単数形 *sastrug*、ロシア語の *zastrug* に由来)について、Mellor(1965)は、吹きさらしの雪原の表面に形成されるサスツルギは“一般に、

鋭く斜めに進んだ長い隆起であるとみなされる”と述べているが、サスツルギは数多くの異なる雪面の形状を言い表せる。硬い表面下にある柔らかい雪が、風で露出し浸食され、風上側に長さ 25～40cm の舌状の形が形成される(図 3.20)。サスツルギは空中写真ではなかなか見られないが、その方向は、現地観測時に風向の目安となる。

図 3.20 サスツルギとスケール比較のための 12×20cm の現場手帳(風は左から) (Tabler 1994)



## 3.5 雪の浸食と堆積の過程

### 3.5.1 浸食

雪粒子の浸食と輸送には、風によって雪面に生じるせん断応力( $\tau_0$ )が作用している。吹雪に関する乱流状態において、

$$\tau_0 = \rho_a |du/dz|^2 \lambda^2 \quad (3.12)$$

ここで、 $\rho_a$  = 空気の密度,  $du/dz$  = 風速の垂直勾配, そして  $\lambda$  = 混合距離

この関係式は、風の鉛直分布が雪の浸食、輸送、堆積の決定要素となることを示している。

吹雪は、表面のせん断応力が数粒の雪粒子をはじき出す程度の強さになると始まる。雪粒子が跳躍すると、それらは更に多くの雪粒子をはじき出す。この連鎖反応は、風の力がこの過程が持続しない程度に弱まるまで続く(図 3.5)。

距離 150～300m は、吹雪量が平衡状態に達するまでに必要な距離である。また、約 500m は、表面上 5m の間で、吹雪の断面が十分に発達するまでに必要な距離である(竹内 1980)。吹走が始まる境界となる、この風下側距離を超えると、防雪柵を含めて、雪面は浸食する傾向にある。

吹雪が平地上で高さ 5m 程まで十分に発達する時、吹雪量と浮遊層の中への輸送量が同じであるならば、表面の浸食量は昇華量と等しいはずである。吹雪量は変動し、浸食と堆積が一致するパターンで発達するが、一様に広い雪面では、積雪の平均的な減少量は、吹雪粒子及び雪面からの昇華量の合計値と釣り合っている。

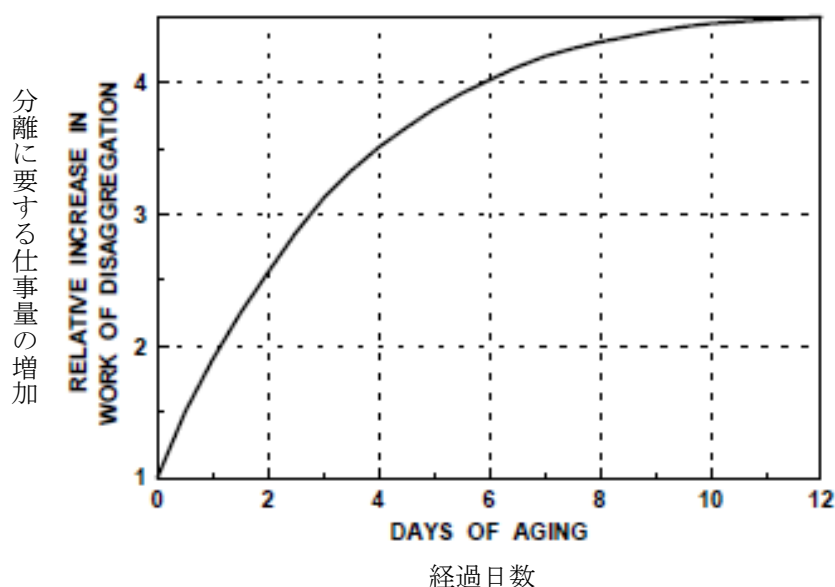
### 3.5.2 堆積

風速が低下すると、堆積が起こる。障害物や地形の変化により風速が低下すると、運ばれた雪はいくらか堆積する。風が加速する箇所では、浸食により多くの雪粒子が巻き上がる。これは、自然な乱流により風の力が常に変動することによる、動的な平衡状態である。時間の経過により平均化はするが、表面のせん断応力が低下する箇所では風下側に堆積が起こり、せん断応力が増加する箇所では浸食が起こる。

### 3.5.3 粒子間の結合

風で堆積した雪粒子は、互いに触れ合い、結合する。これらの結合は、焼結によって成長し強固になる。結合が強固になるにつれて、分離に要する仕事量は、1 日以内に 2 倍、3 日以内に 3 倍に増加する(図 3.21)。風で堆積した雪は、わずか数時間以内に、浸食に対し相当な抵抗力を持つようになるため、吹きだまりの形は、低風速時に到達できる最大の外形を示す傾向がある。

図 3.21 分離に要する仕事量を指標とした時間経過に伴う堆積した雪粒子間の結合の強さの変化(Jellinek 1957 より).





### 3.5.4 雪の圧密

新雪の密度は、平均約  $100 \text{ kg/m}^3$  である。積雪の密度は、上載積雪の荷重と積雪内の蒸気移動により変化し、時間と共に増加する。

吹きだまった雪粒子は、最初は小さく詰まっているため、通常は、乱されていない雪よりも密度が高い。新たに堆積した雪の密度は、気象状況により異なるが、降雪の有無が支配的な要素となる。新たに堆積した吹雪層の密度は、降雪の有る中では  $100 \text{ kg/m}^3$  程度と低く、降雪の無い中では  $300 \text{ kg/m}^3$  程度と高い。

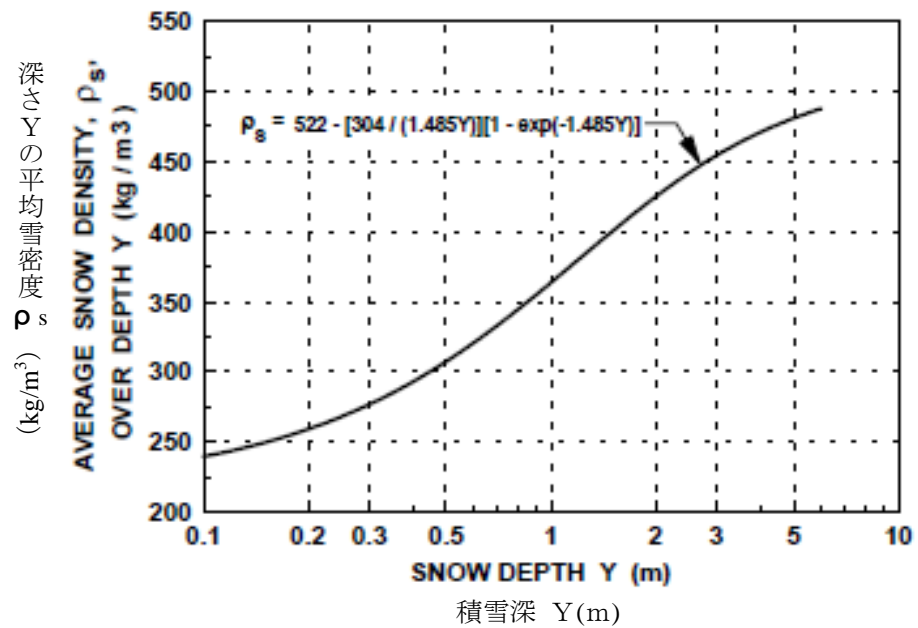
上載積雪の荷重によって、雪粒子は、塑性変形、粒子の破碎及び滑りを起こし、圧縮され再配置される。融け始める前の吹きだまりの雪密度( $\rho_s$ , 単位  $\text{kg/m}^3$ )は、次式で近似される。

$$\rho_s = 522 - (304/1.485Y)(1 - e^{-1.485Y}) \quad (3.13)$$

ここで、 $Y$  は積雪深(m)、 $e$  は自然対数の底 (2.71828...)(Tabler 1985)。式中において、最小二乗法により決定される  $522 \text{ kg/m}^3$  の 近線は、圧密の過程内での停滞状態を示している。例えば、一定の力で圧縮した時の最密状態のパッキンのように。実験的に単体で詰めた場合に到達する最大密度は約  $550 \text{ kg/m}^3$  (Benson 1962)、これは圧密量が急に減少する 界密度に相当する。式 (3.13) で与えられる関数の関係を、図 3.22 のグラフに示す。

吹きだまりの底にある氷層を例外として、完全に融けている吹きだまりの密度は、水はけの良い場所では、基本的に積雪深にはよらず、平均約  $600 \text{ kg/m}^3$  である(Tabler 1985)。

図 3.22 融解前  
における積雪  
深と風で堆積  
した雪密度と  
の関係  
(Tabler 1985)



### 3.6 植生による雪の堆積と保持

吹雪は表面の空気抵抗が減少させるように堆積する。表面の窪みは埋まり、突き出た物は流線形に流れ、例えば植生のように表面形状の粗い空間は埋まる(図 3.23)。雪面に突き出た植生によって表面のせん断応力は減少するため、の低い植生でも雪は保持される。

全ての降雪が飛ばされるほど十分な風の吹く場所では、吹雪量は、吹走距離よりも、植生の高さや密集度に反比例する関係にある。そのような場所では、植生の 茂状況のデータは、式(3.9), (3.10), (3.11)から吹雪量を推定する際に、必要に応じて、飛ばされた降雪量の推定に用いることができる。

実例として、 っていないトウモロコシの 並や切り によって、吹雪の障害が減少することもある。(Tabler 1991a)



図 3.23 直径 130mm、高さ 1.2m、間隔の異なる柱で保持された雪。表面の粗さの形状が雪の堆積をいかに制御するかを示している (Tabler 1994)



## 3.7 道路切土と窪地の堆雪

### 3.7.1 堆雪の進行課程

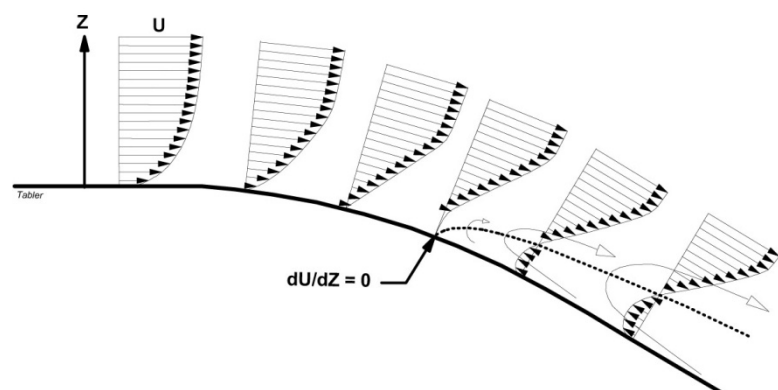
(3.12)式のとおり、速度勾配の変化は、表面の 断応力に変化をもたらす。図 3.24 にみられるとおり、 線部の表面の通過する風は、 圧力勾配により吹雪は減速され、吹雪が減速する領域で堆雪が進んでゆく。 率の変化が十分に大きい場合、気流は表面で「 離」して、表面近くで反対方向から吹いてくる風の渦を形成する。この状態は、航空機の が失速角に達する時に起こり、大幅に空気抵抗が増加し、渦の風上の箇所での堆雪を起こし 環部分の拡大に寄与する。このようにして、 率変化が比較的小さい表面の近くで、吹きだまりが大きい。

道路切土のような傾斜が急な窪地は、鉛直の速度勾配が大きく変化してゆき、窪地の堆雪の原因となる。それは、雪の大部分は表面近くで運ばれ、風速が最

初に変化する法 線の近くの窪地に優先的に堆雪するためである。雪面の 断応力が、直近の風上側と同じになる雪面の高さに達するまで堆積し続ける。吹きだまりは風上側から少しずつ積もってゆき、風下側へ堆雪が斜面状に伸びた状態になる。(図 3.25)(Tabler 1975b)。雪面が斜面上で急激に変化するのは、スリップ・フェースのてっ ぽんの特 徴であり、砂丘の風下の斜面が安 角の時、積もった砂がすべるのと同様である事から名付けられている。スリップ・フェースの上部は、一般的には 1:1 から 1.5:1 の範囲の勾配である。

風の流れは、スリップ・フェースの上部では、直近の風下側の渦と分かれた構成となる。渦の区間は、地表面からスリップ・フェースの上部までの高さの 6 ～ 7 倍の距離まで風下側へ続く。この領域に積もる多くの雪の粒子は風下に運ばれないように風から守られている。

図 3.24  
雪面が  
線となっ  
た箇所  
で、渦の  
形成の原  
因により  
風が 離  
されてい  
る箇所の  
空気流の  
断面図  
 $du/dz$  は  
鉛直の風  
速の速度  
勾配とな  
る。  
(Tabler  
1994)



### 3.7.2 平衡斜面

特定の風向風速において、特定の地形が、吹雪量にかかわらず最大雪捕捉容量を超えることがないと想定している事は道理に合っている。この最大積雪に対応する吹きだまりは、平衡斜面(図 3.25)と ばれる。吹きだまりの成長がい づゆる自然界の法 則ならば、成長の速度はこの段階までは、堆雪全体に反比例し、雪でいっ いになるに従い地形特徴での雪の捕捉率は減衰する。本来の平衡断面を限界として堆雪するが、雪の輸送量も限りがあるので、そこまで堆雪しないかもしれない。自然状態では、雪の輸送量に限りがあるので必ずしも平衡断面になるとは限らない。

しかしながら、表面の雪の波模様の移動は、実際の風速によって平衡断面となる事が推測されます(図 3.26)が、平衡断面でなかった場合は、雪の波は動かなくなる。地形の積雪 留量が大きいほど、見かけと真の平衡断面の間の潜在的格差が大きい。工学的には両者の違いは問題が無いと考えて良い。

図 3.25 窪地箇所での吹きだまりの進行状況の図解 (Tabler 1975b)

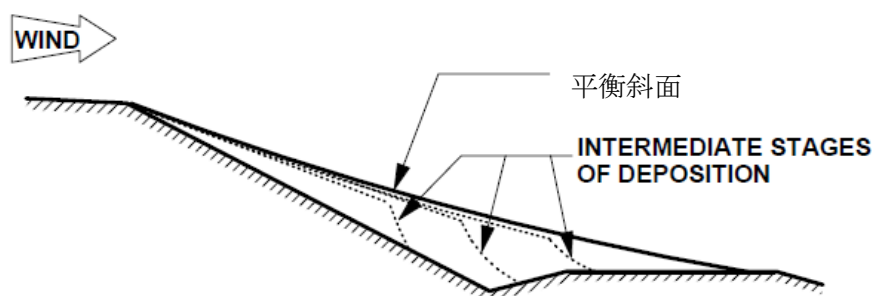
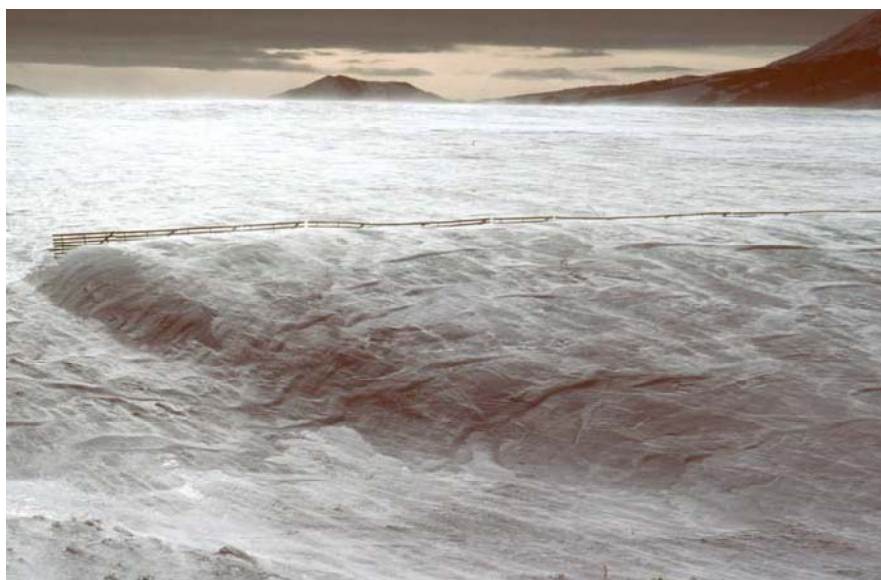


図 3.26 雪の波模様が 3.8m(12ft)防雪柵の風下側の吹きだまりの平衡面を動いている (Tabler 1994)



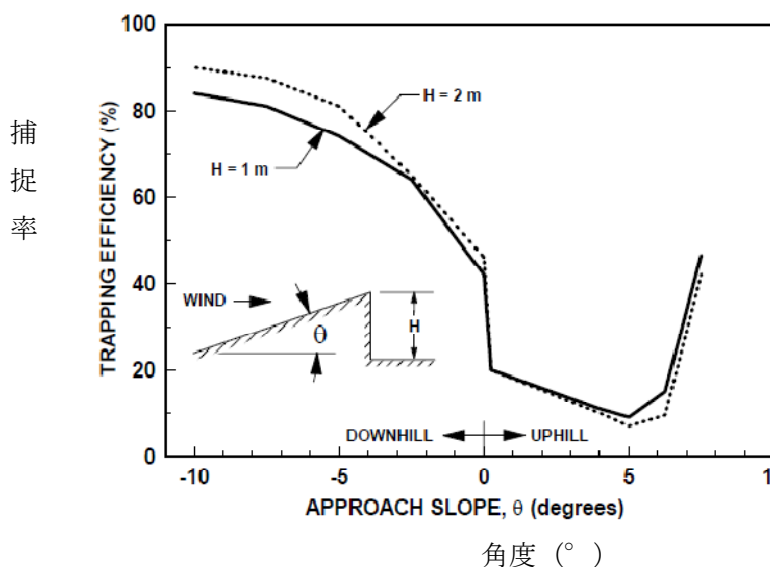
風速の変動があるので雪が堆雪している期間と雪が浸食されている期間がある。定量的相関がある訳ではないが、平衡斜面は風により 分が大きくなる。すなわち、強い風では勾配が急になる。しかしながら風が吹く様な状況では、新しい粒子と既に積もっている雪の粒子が結合し、安定度が 長される。平衡斜面の角度は、気流の 離に必要な角度(すなわち、雪面に接する所で渦を形成するような角度)よりも小さい。背後の乱流が大きい切り立った山 地帯では、平衡斜面かも知れないが 界角は  $10^{\circ} \sim 12^{\circ}$  の間で変化すると考えられる。

### 3.7.3 捕捉率

地形の捕捉率は、地面から 5m(16ft)の高さ以内の吹雪が地形によって永久に捕捉される割合である。捕捉率に影響を及ぼす大きな要因は、スリップ・フェースの風上の直近の表面の傾斜である。図 3.27 は、斜面の傾きと 2 つ段の高

さを設定した斜面に関してコンピュータシミュレーション(Schmidt、Randolph 1981)の解析による、雪の捕捉率の変化を表している。捕捉率は、斜面の傾きが急になってくると増大し、およそ  $10^\circ$  の角度になると最大になる。この角度は、平衡雪面と同じである。図 3.27 はまた、地面上のスリップ・フェースの高さが、捕捉率の結果に影響がないことを示す。

図 3.27 Schmidt と Randolph  
により解析された、風下方向  
への斜面の傾きと段の高さ  
の相関を表した初期の捕捉  
率 (1981)



## 3.8 防雪柵での堆雪

### 3.8.1 防雪柵の高さ、間隔、下部間隙の定義

防雪柵の高さ“ $H$ ”は、フェンスの上端から地面に向かって垂直である。防雪柵から距離と高さは、しばしば防雪柵の高さの倍数で表される。例えば、防雪柵の高さの 5 倍の距離を、 $5H$  と標記する。

下部間隙とは地面と防雪柵の下端の隙間の、防雪柵の雪の堆雪を減らすスペースで、その結果、高い捕捉率を維持する。

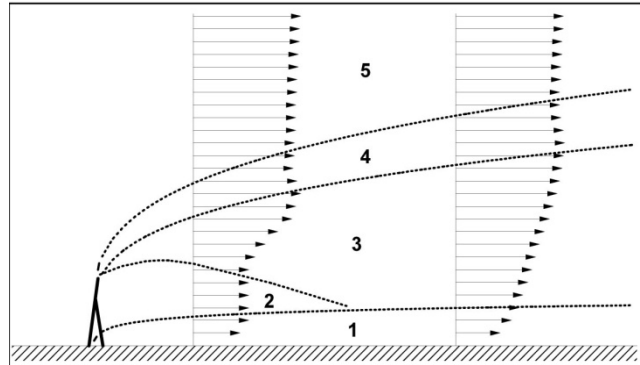
空隙率” ”は、防雪柵の正面で、下部間隙を除いた防雪柵の空いている部分の割合で “%” であらわす。40～50%の空隙のフェンスが、最も多くの雪が蓄えられる。



### 3.8.2 風と吹雪粒子について空隙のある防雪柵の効果

防雪柵は、風速を下げ、風速の高度分布を変える。典型的な防雪柵近くの風速高度分布は、図 3.28 (Tabler、Schmidt 1986) に以下に示される様な風の領域からなる。

図 3.28 乱流図。Tabler と Schmidt (1986) によって区分した境界を表す。



1 の領域は、3.1 式に与えられる速度分配に従って、表面の空気抵抗によって風速が低下した領域である。発達した層の境界の高さは、風下へ進むにつれて高くなってゆく。

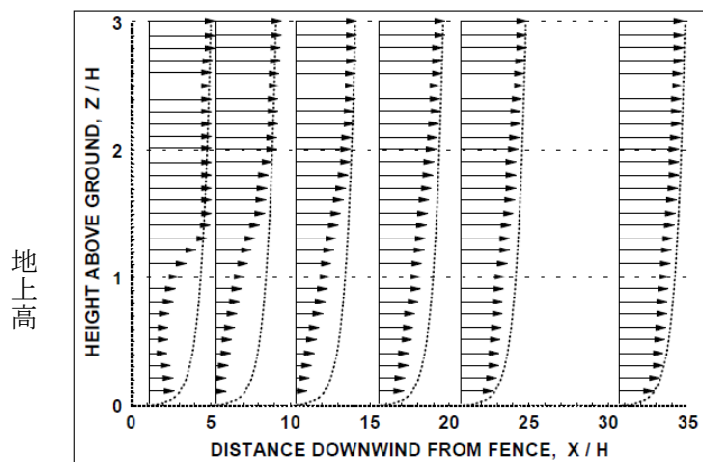
2 の領域は、防雪柵のすぐ 後の風速が低下させられた領域で、ほぼ均一な風速の領域。

3 の領域は、防雪柵のすぐ 後の風速が低下させられた吹雪と、防雪柵上を超える吹雪が混 在している領域である。この領域の上方の境界は、防雪柵上で加速された流れの中心と一致し、その高さは防雪柵からの距離の平方根の様に比例して増加する。風下に行くに従って領域が広くなり、この領域の下部は領域 2 と一致するところまで、一次的に広がっている。それから風下側へは一次的には広がらない。

4 の領域は、防雪柵上の吹雪の加速している領域と安定した吹雪（領域 5）の間の気流が乱れた領域である。この領域は、防雪柵の高さの 5 倍以内の距離では風速の高度分布をみると容易にわかるが、かなり離れたところでは、領域 3 と区別がつかなくなる。

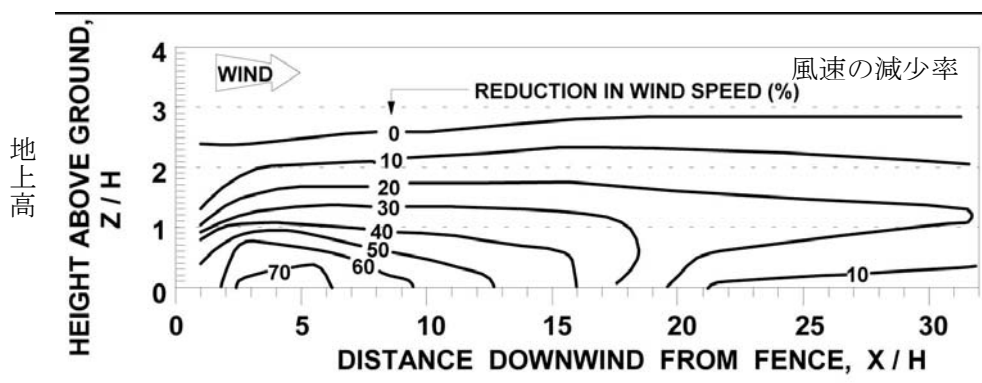
表面近くの風速は防雪柵から風下へ、防雪柵の高さのおよそ 7 倍の距離まで減速し(図 3.29)、表面の 断応力が小さくなってゆき、転動跳躍粒子が 々に ゆっくりとした動きになってゆき、やがて 止する。これらの雪粒子のいくらかは、風が減速する防雪柵の風上側の表面に到達し堆雪する。防雪柵を越えてゆくかなりの数の浮遊粒子は、捕捉される領域を超えて地面に積もらないで運ばれてゆく。

図 3.29 空隙率 50%の防雪柵の風下の距離 (X) の違いによる風速断面図、比較のため柵のはるか風上側の風速を破線で示す。Z は地上高で、H は防雪柵の高さを表す。(Tabler 1994)



防雪柵から風下の距離

図 3.30 は、風速の減少率は高いところではほとんどなくなり(Tabler and Jairell 1993)、高いところ(とその付近)の風速は論理的にほぼ等しいことを表わしている。雪が堆雪し始めるとき、防雪柵の空力的な効果により柵の背面に雪を堆雪する効果がある。しかしながら、吹きだまりが発達して、吹きだまりの形状が成長したり変化したことにより影響を与える。



防雪柵から風下の距離

図 3.30 高さ H における空隙率 50%の防雪柵での風速の減少率等値線図 (タブラー 1986)。等値線の値は同じの高さの周囲の風速からの減少率である。

### 3.8.3 空隙のある防雪柵での吹きだまり雪丘の成長過程

吹きだまり雪丘の成長過程は、Tabler(1986、1988a、1988b)によって説明済みである。吹きだまり雪丘成長の初期段階では、防雪柵を通り抜けた雪粒子は、風がかなり弱まって表面せん断応力の減少した領域に到達する。この領域は、風下側に 7H 程度の距離まで広がっている(図 3.29 と図 3.30)。この領域

内で地面に達して留まるほとんどの雪粒子は、積もり続けて中部の厚い凸レンズ型の吹きだまり雪丘を形成する。

この初期のレンズ型をした堆積は、気流がその線上を追従できなくなるまで、厚くなる。この段階では、図 3.24 に示されたように、気流は表面から離れる。結果として生じた渦領域は、有効防雪領域を風下側 12H から 15H の距離にまで広げる。柵高の約 75% の高さまでが雪で埋まり、ここが防雪容量の大部分を占める場所となる。スリップ・フェースと渦領域(図 3.31 と 3.32 参照)の形成は、雪丘成長の第 2 段階の特徴である。渦領域は、スリップ・フェースの高さの 6~7 倍の距離まで風下側に広がっている。スリップ・フェース上部の斜面傾斜は、通常、1:1 から 1.5:1 の範囲にある。

図 3.31 成長の中間段階における 50%空隙率防雪柵で形成されたスリップ・フェースと渦領域 (Tabler and Jairell 1993)。

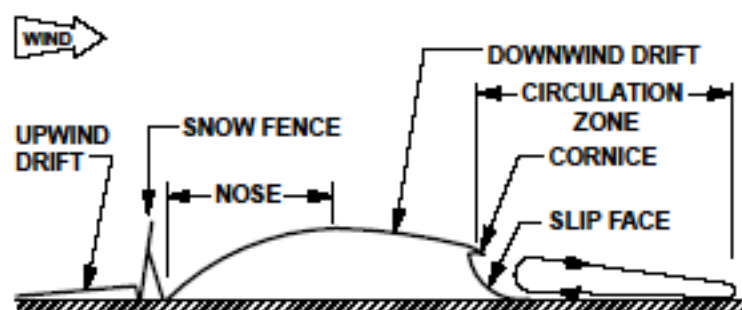


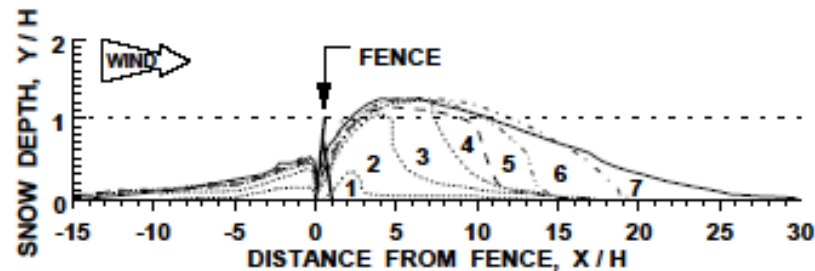
図 3.32 3.8m 高さの防雪柵の後方にあるスリップ・フェースと雪 (Tabler1994)。雪丘の深さは雪 位置で約 3.7m。



この第 2 段階の間、吹きだまり後部の離気流は、通過する風にかなりの抵抗を加える。これが、吹きだまり雪丘先端部の雪の堆積を促進し、渦領域内地上風を最小限にまで減少させる。その結果、弱風から中程度の風では、雪の捕捉率が堆雪開始時の初期捕捉率よりも大きくなることがある。しかしながら、強風は、地面に達する前に渦領域を超えて雪粒子を運ぶことがある。

積雪が新雪を含んでいるか、または風が吹いている間に雪が降っていたなら、雪粒子の荷重は粒子を表面に付着させ、スリップ・フェースの上端で雪の形成を引き起こす。これにより、雪の捕捉率がさらに上昇する。成長の第2段階は、わずかな延伸を伴った雪丘深さの増加が特徴であり、それは図 3.33 における 1～3 の観測結果に表されている。

図 3.33 3.8m 高さの水平防雪板型防雪柵 (50%空隙率) により形成された吹きだまり雪丘の 7 回の観測結果 (Tabler1986)。



風下吹きだまり雪丘の深さがその最大深さ(50%空隙率防雪柵高さの 1.0～1.2 倍)に近づくのに従って、成長の第3段階は始まる。この段階の特徴は、風下吹きだまり雪丘長が伸びるとともに渦領域が雪で埋まっていくことであり、それは、図 3.33 の観測結果 4～6 に表されている。しかしながら、スリップ・フェースが存在している限りは、雪の捕捉率は比較的高いまま維持される。

成長の第4段階は、雪丘表面がスリップ・フェースも渦領域もなく滑らかな形状となったときに始まる。ここでは、図 3.33 の観測結果 6 で示されるように、吹きだまり雪丘長は約 20H となり、スリップ・フェースの跡だけが残る。この段階で捕捉率は急速に低下し、転動粒子及び跳躍粒子だけが堆積する。このため、図 3.33 の観測結果 7 で表されるように、吹きだまり雪丘長は、その最終的長さとなる 30H から 35H にとどまったまま、その後の成長は停滞化する。

吹雪の継続的な流入にもかかわらず吹きだまり雪丘がその成長をやめるとき、成長の第4段階は終わる。この段階の吹きだまりは現在風況に対して平衡状態にあるが、風速や風向の変化により、風食は堆積が発生することもあり得る。平衡状態の後には、雪の捕捉率はゼロとなる。

平衡雪丘は気流の抵抗を低下させるように常に流線型をしており、吹きだめ柵は U 型の吹きだまりを形成する。セクション 3.8.5.2.1 で説明することとなるが、図 3.34 の 50%空隙率防雪柵の例にあるように、平衡雪丘の寸法は、柵高でその大きさが決まる。

図 3.34 50%空隙率防雪柵により形成された平衡雪丘の寸法  
(Tabler1989)。

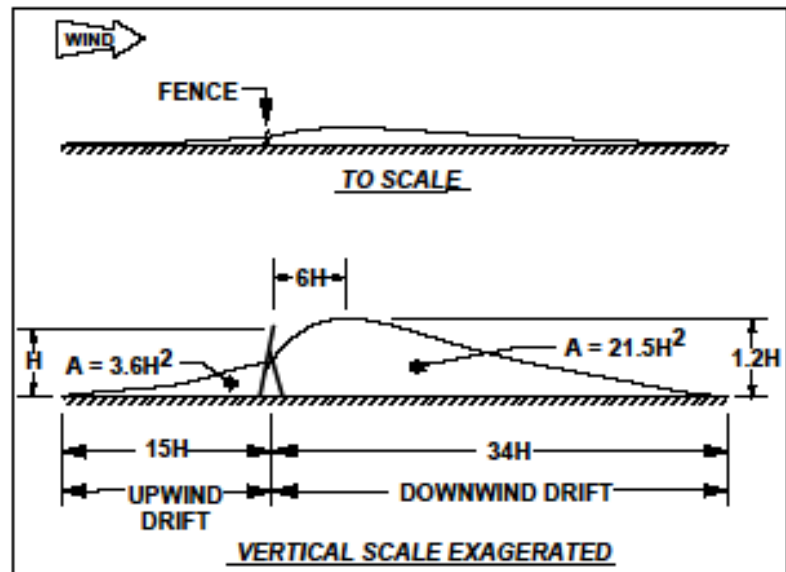


図 3.35 と図 3.36 は、50%空隙率防雪柵において、雪丘の長さ及び深さが雪によりどのように変化するかを示している。積雪による風下側吹きだまり長さは、下式のように変化する。

$$L/H = 10.5 + 6.6(A/A_e) + 17.2(A/A_e)^2 \quad (3.14)$$

ここで L:風下側吹きだまり雪丘長  
H:柵高  
A:風下側吹きだまり雪丘の断面積  
A<sub>e</sub>:平衡雪丘の断面積

また、風下側吹きだまり雪丘の最大積雪深(Y<sub>max</sub>)は、下式のように変化する。

$$Y_{\max}/H = 6.3(A/A_e) - 13.3(A/A_e)^2 + 12.1(A/A_e)^3 - 3.9(A/A_e)^4 \quad (3.15)$$

5 と 6 でも使用するが、平衡前の雪丘寸法におけるこれら概算は、雪丘の横断観測なしに防雪柵の防雪容量を見積もるのに役立つ。

図 3.35 50%空隙率防雪柵における  
雪の堆積による風下側吹きだまり  
雪丘長の変化(Tabler 1980a)

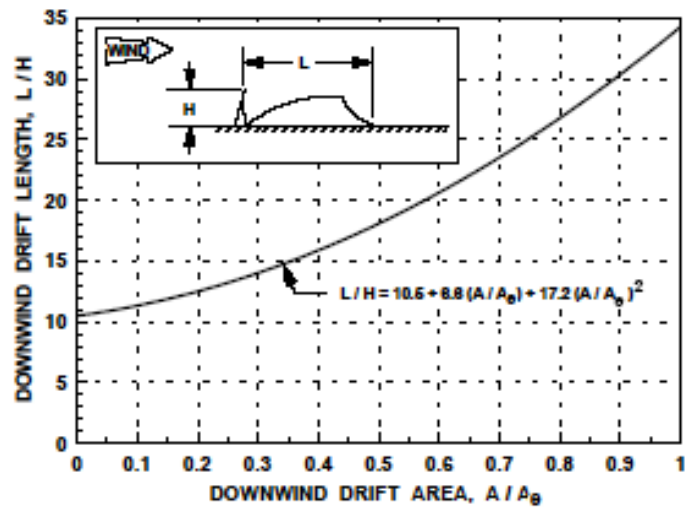
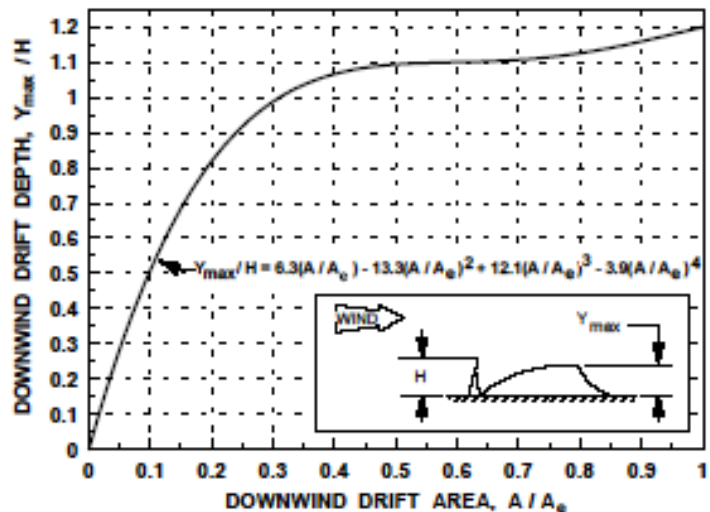


図 3.36 50%空隙率防雪柵における  
雪の堆積による風下側吹きだまり  
雪丘の最大積雪深の変化(Tabler  
1980a)。



### 3.8.4 空隙の無い防雪柵での吹きだまり雪丘の成長

空隙の無い防雪柵の場合、風上側吹きだまり雪丘高さが柵の上端に達するまでは、雪の大部分が風上側に堆積する(図 3.37)(Tabler、1986)。成長の第1段階は、防雪柵近くの堆雪を妨害する渦によって発生した、防雪柵風上と吹きだまりとの間にある空洞によって代表される(図 3.38)。この渦のすぐ風上側で雪面がよどみ点の高さ(約  $0.6H$ )より高い位置に達すると、第2段階が始まる。渦は弱まり、雪が空洞を埋めるようになる。これら最初の2段階の間、風下側吹きだまり雪丘は、主として環気流によって防雪柵側に吹き飛ばされる飛雪により形成される。風上側吹きだまり雪丘の高さが防雪柵上端に達すると、防雪柵の後方は渦領域で満たされ、風上側吹きだまり雪丘の成長が止まるとともに風下側吹きだまり雪丘が急成長する。図 3.37 に示したように、防雪柵両側の平衡雪丘は中くぼみ型で、どちらの側も  $10\sim 12H$  の長さに広がっていく。



図 3.37 空隙の  
無い防雪柵に  
おける吹きだ  
まり雪丘の成  
長過程  
(Tabler1994)。

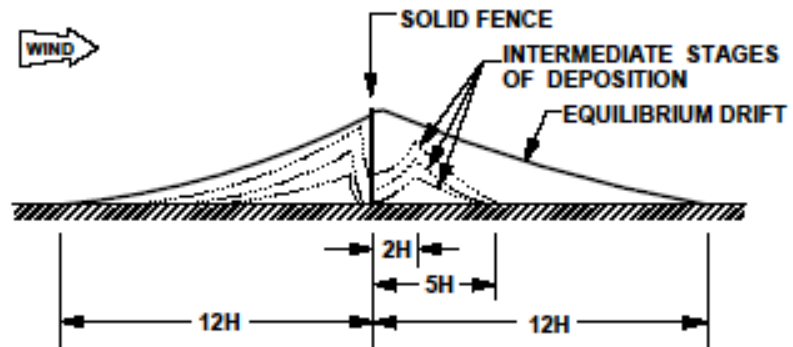
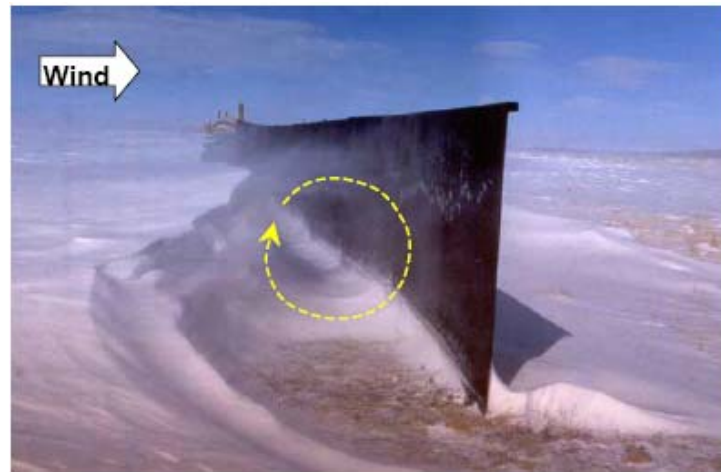


図 3.38 積雪深が約  $0.6H$  に達する  
まで、この空隙の無い防雪柵の風上  
側渦は風上の柵直前の堆雪を防げ  
る (Tabler1994)。



### 3.8.5 平衡雪丘

#### 3.8.5.1 重要性

平衡雪丘の形状は、防雪柵システムのためのガイドラインの多くがこれらの特性に基づいているため、重要である。例えば、風下側吹きだまり雪丘長は必要な離れを決定し、全体形状は柵の防雪容量を決定する。

#### 3.8.5.2 平衡雪丘の形に影響する要因

平衡状態では、防雪柵と吹きだまり雪丘とを合わせた風抵抗は最小であり、吹きだまり雪丘は表面せん断応力が風の経路に沿って一定となるように、形成されている。この一定性を促すメカニズムは、異なった速度の気流領域間の位置で起こる乱流混合である。吹きだまりの形は、主要混合領域(領域 3、図 3.28)の風下側における拡大の程度によって決まり、それは次に、柵後方と柵上方の気流の初期速度の違いへとつながる。その結果、平衡雪丘の表面が混合領域(図 3.39)の下側境界に沿うこととなり、吹きだまり雪丘はそれを形成した風の鉛直分布に応じて形成される。吹きだまり雪丘前側の形状は境界層の発達に関する

対数分布(式 3.1)に類似し、吹きだまり雪丘後側は混合層の風の鉛直分布を近似するように形成される。そして、2つの気流分布は雪丘頂上で合流する。

図 3.39 平衡雪丘の表面は、空隙の無い防雪柵後方の主要混合領域(領域 3、図 3.28)の下側境界に沿う (Tabler1994)



その結果、風下側吹きだまりの全体形状は、風の鉛直分布における「ウェーク法 (law of the wake) 」(Coles1956)の類似方程式により、合理的によく表される:

$$Y/H = B \ln(X/X_0) \{1 - \sin^2(0.5 \pi X/L)\} \quad (3.16)$$

ここで

$Y$ =積雪深

$X$ =防雪柵からの距離

$X_0$ =防雪柵から風上側雪丘の突端までの距離

$L$ =風下側吹きだまり雪丘長

$B$ =比例係数

$B=0.29$ 、 $X_0=0.1H$ 、および  $L=34H$  を用いることにより、50%空隙率防雪柵によって形成される風下側平衡雪丘においては、公式(3.16)は、よい近似となる。

したがって、平衡状態の吹きだまり形状は、柵長、空隙性、下部間隙などの防雪柵後方の乱流混合率に影響する防雪柵の性能、及び柵高とに依存する。さらには、周囲の地形が、より影響的であることもある。

また、どんな防雪柵においても、平衡雪丘の形状は風速、風向、及び積雪状態により異なってくる。それゆえ、ある特定の防雪柵によって形成される平衡雪丘の形状は、年ごとに異なる。

これら要因の複雑な相互作用のため、理論計算で雪丘形状を決定するのは難しく、雪丘の現場観測は形状決定の主要情報源となる。

### 3.8.5.2.1 柵高

その他の因子が同じであれば、平衡状態の吹きだまりの大きさは柵高にほぼ比例する(Tabler 1980a)。これは、たとえば、柵高 2m の柵の後方の吹きだまりが、柵高 1m に比べほぼ 2 倍の長さおよび深さとなることを意味している。

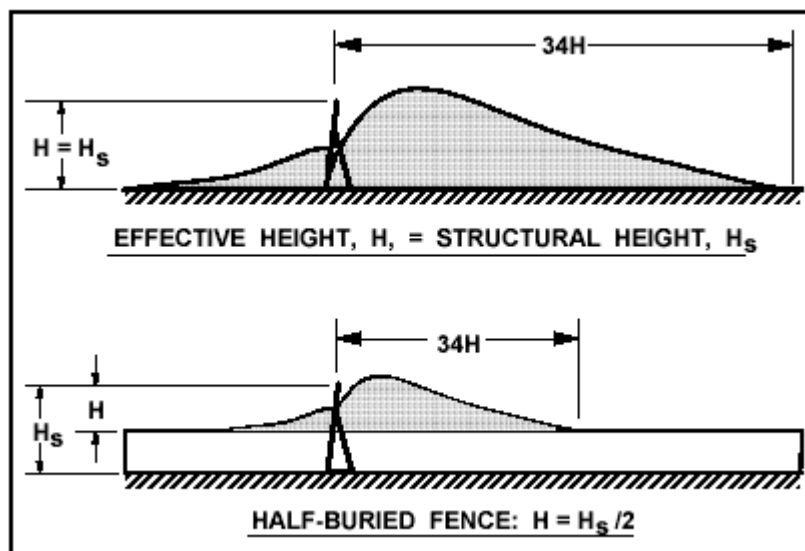
後述するようにいくつかの例外はあるものの、この近似はほとんどの工学的応用において適用でき、防雪柵設計のためのガイドラインを大いに簡素化している。図 3.40 は、柵高 6cm の柵によって形成された吹きだまりが、柵高 3.8m の柵の後方に形成されたものと 何学的に相似していることを示している。この相似性によって、縮小模型を利用した野外での吹きだまり実験が可能となる (Tabler 1980b; Tabler and Jairell 1980)。



図 3.40 柵高 1.8-m の防雪柵の縮小モデル(柵高 6cm) (写真左)によって形成された平衡状態の吹きだまりは、柵高 3.8m の柵によって形成されたものに比例している (Tabler 1986)

平衡状態の吹きだまりの 何学的相似関係は、それらの大きさを無次元項で表現することを可能にする。吹きだまりの長さ(積雪深)は、柵高  $H$  の倍数としてを表すことができる。しかしながら、ここで  $H_s$  として示される柵の構造的な高さ、 $H$  として示される有効柵高(周囲の積雪より上にある柵の高さ)を区別することが重要である。図 3.41 に示されているように、有効高が下がるのに応じ吹きだまり形状と堆雪量は大きく変化する。

図 3.41 吹きだまりの大きさは柵高  $H_s$  ではなく、それよりも小さい有効柵高  $H$  による (Tabler 1994)



吹きだまり形状は 5 次多項式形で近似することができる。

$$Y/H = A' + B'(X/H) + C'(X/H)^2 + D'(X/H)^3 + E'(X/H)^4 + F'(X/H)^5 \quad (3.17)$$

ここで、

Y=積雪深

X=柵からの距離

H=有効柵高

A'=実験による定数

B'...F'=実験による係数

A'...F'の値は柵の種類によって異なり、吹きだまり断面形状の回帰分析結果から実験的に決定される。

防雪柵による吹きだまりに関する相似 には 1 つの重要な例外がある。

柵高約 1.5m 未満の防雪柵で形成される吹きだまりの最大深度は、柵高とほぼ等しいということである。

この違いは、低い柵高では高い柵に比べ、気流が同じようには上方に吹き抜けないことを示唆しているが、低い柵は通常平衡状態になるまでに部分的に埋雪してしまうため柵の有効高が減少することに留意すべきである。実際には、低い防雪柵におけるこのような異常な挙動はほとんど無視してもよい。

平衡状態の吹きだまりの長さは柵高に比例する(Tabler 1980a):

$$L \propto H \quad (3.18)$$

柵が半分埋雪された場合、全体が露出している場合よりも吹きだまりの長さは短くなることがある(図 3.41)。ただし、部分的に埋雪した柵の後方にできる吹きだまりの長さは、堆雪の仕方によって異なる。柵が埋雪され始める前に平衡状態となった場合には、吹きだまりは柵高の約 50 倍の長さまで達しうる。これは、埋雪前の平衡状態の吹きだまりが形成する下向き斜面と、部分的に埋雪した柵後方の気流が相互に作用するからである。

吹きだまりの深さと長さは有効柵高に比例すること、また平衡状態の吹きだまりの基本的な形状は直角三角形に近似できることから、平衡状態の吹きだまりの断面積は有効高の 2 乗にほぼ比例しているといえる。

$$A_e \propto H^2 \quad (3.19)$$

ここで、 $A_e$  は平衡状態の吹きだまりの断面積 (Tabler 1980a)。

これは、柵高 2.4 m の柵が、柵高 1.2m の柵の 4 倍の量の雪を捕捉することを意味している。しかしながら後述するように、堆雪深が大きくなると雪が圧

密されるため(節 3.4.1.4 参照)、高い方の柵が実際に捕捉する堆雪量は、柵高 1.2m の場合に比べ、重量換算比では 4.6 倍になる。たとえば、式 3.13 または 図 3.22 に示すように、積雪深 1.2m での雪密度は 380 kg/m<sup>3</sup> であるが、積雪深 3.7m では 467kg/m<sup>3</sup> となる。したがって、方程式(3.13)と(3.15)から、柵の防雪容量は有効柵高 H に関連することを示すことができる (Tabler 1980a)。

$$Q_e \propto H^{2.2} \quad (3.20)$$

### 3.8.5.2.2 柵の延長と端部効果

前項で説明された吹きだまりの大きさは、延長が長い柵、つまり延長が 25H かそれ以上の柵の中 部だけに適用される。これらより延長が短い柵の場合、形成される吹きだまりは、柵の端部から 12H 付近まで円弧状に堆雪域が減少する(図 3.42・図 3.43)(Tabler 1980a)。

吹きだまりのこの特性は「端部効果」と ばれ、防雪対象に対してどこまで柵を延長するかを決定づける。さらに、道路に対して斜めに柵を設置する場合に、柵端部で吹きだまりが短くなるということが、最短距離での設置位置を特定する上での判断材料となる。したがって、端部効果は防雪柵システム設計において重要な意味を持つ。防雪柵はできる限り長くし、ギャップや開 部は避けるべきである。

図 3.44 に示すように、風下側吹きだまりの長さは柵端部からの距離  $X_e$  に応じて変化し、次式による。

$$L/L_{\max} = \{1 - 0.01[(X_e/H) - 9]^2\}^{0.5}, -1 \leq X_e/H \leq 9 \quad (3.21)$$

図 3.42 吹きだまり  
端部では円弧状に堆雪するため、この柵高 3.8m のワイオミングタイプの柵が示すように、防雪容量と捕捉率が減少する (Tabler 1986)



図 3.43 吹きだまり端部で端部効果が及ぶ三次元の円弧状の範囲 (Tabler 1986)

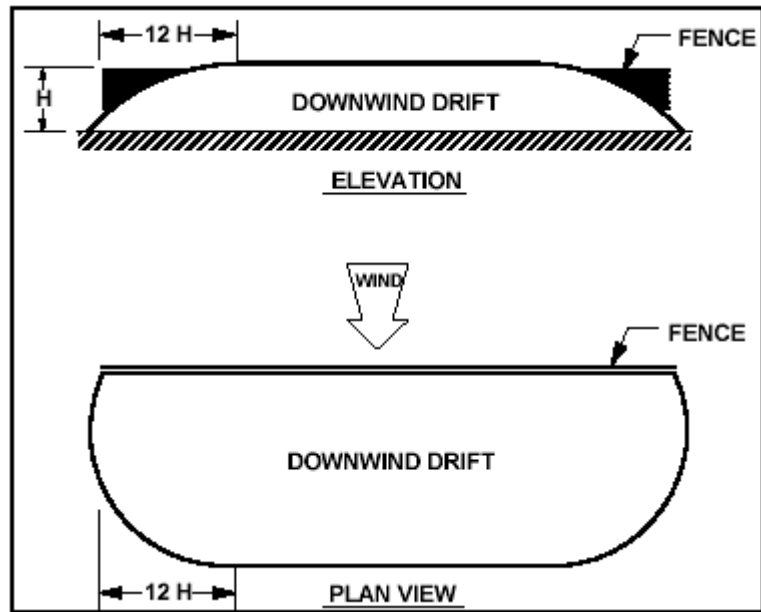
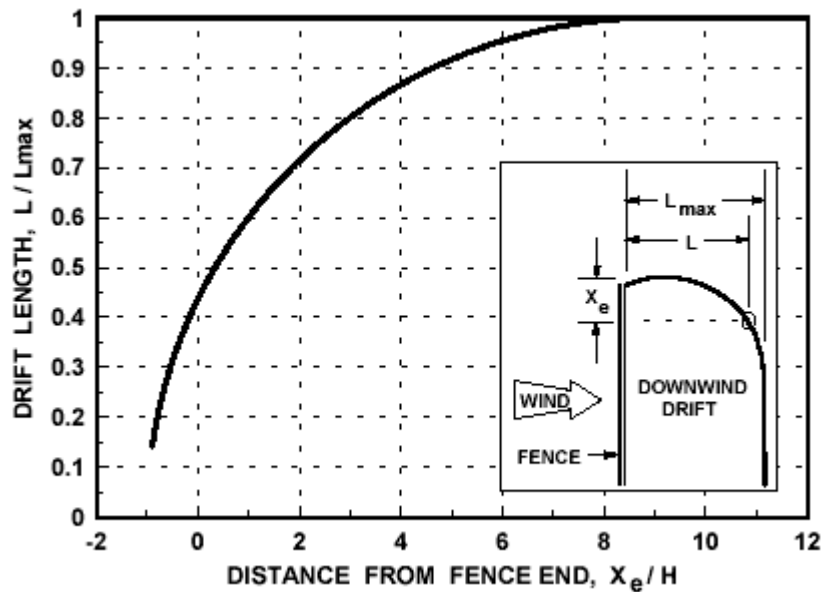


図 3.44 平坦地で、空隙率 50%の柵を用いた場合に、柵端部からの距離の関数として表される平衡状態の風下側吹きだまりの長さ (Tabler 1980a)



また端部効果は、吹きだまりの影響を受ける部分の防雪容量と捕捉率を減少させる。

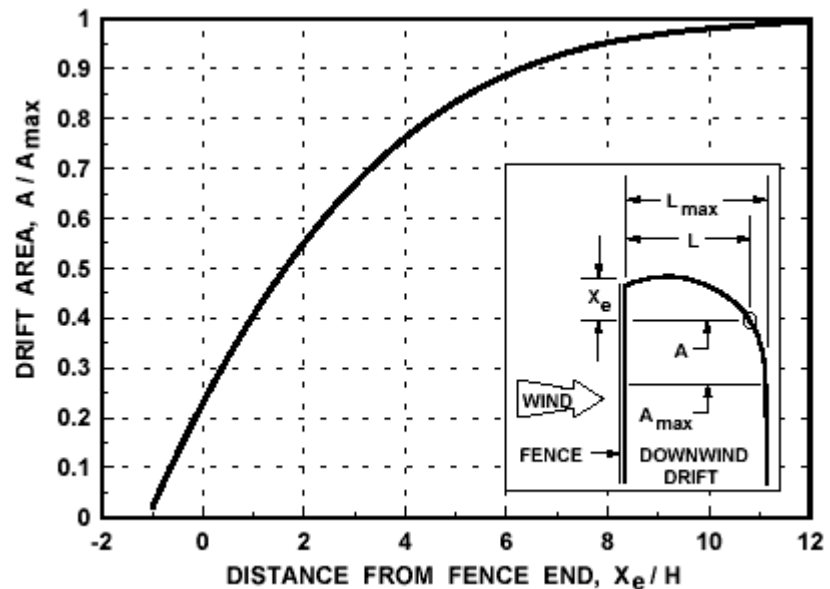
図 3.45 に示すように、吹きだまりの断面積  $A$  は、柵端部からの距離によって変化し、次式による。

$$A/A_{inf} = 0.23 + (X_e/H)/5.2 - (X_e/H)^2/59.5 + (X_e/H)^3/1961, X_e/H \leq 12 \quad (3.22)$$



ここで、 $A_{inf}$  は端部効果の影響を受けない場所での吹きだまりの断面積 (Tabler 1980a)。たとえば、柵端部から  $5H$  における容量は、非常に長い防雪柵中 部における防雪容量の約 84% である。

図 3.45 平坦地で、空隙率 50% の柵を用いた場合に、柵端部からの距離の関数として表される平衡状態の風下側吹きだまりの断面積 (Tabler 1980a)

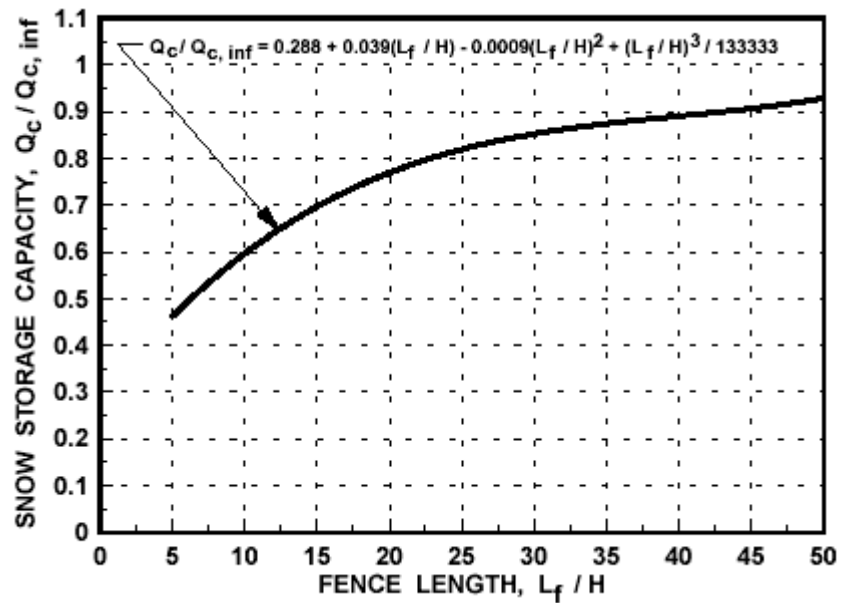


防雪柵延長が  $20H \sim 25H$  よりも短い場合、両端の端部効果の影響は重なり、吹きだまりの大きさと防雪容量をさらに減少させる。総防雪容量と柵延長の関係(図 3.46)は次式によって近似される。

$$Q_c/Q_{c,inf} = 0.288 + 0.039(L_f/H) - 0.0009(L_f/H)^2 + (L_f/H)^3/133333; 5 \leq L_f/H < 50 \quad (3.23)$$

ここで、 $Q_{c,inf}$  は無限長の防雪柵の防雪容量、 $L_f$  は防雪柵延長 (Tabler and Schmidt 1986)。

図 3.46 防雪柵延長の関数として表される総防雪容量 (Tabler 1994)



### 3.8.5.2.3 下部間隙

地面と柵下部の間の空間は柵近くの堆雪を最小限に抑え、また跳躍粒子がより捕捉されやすいように地面近くにとどめておく。部分的または完全に埋雪された防雪柵は吹雪に対して有効性を失うだけではなく、しばしば積雪の降による破損を受け、異常な規模の吹きだまりを発達させる可能性がある。最適な下部間隙は柵高の 10-15% に等しい。下部間隙がこの限界をよりも広がると、風下側吹きだまりの雪丘長はよりくまで伸び、吹きだまりの深さが減少して、吹きだまりの長さが変わらなくても防雪容量は減少する (図 3.47・図 3.48)。風上側吹きだまりの深さも、下部間隙が増加するにつれて減少する。

下部間隙の効果は風速によって変化する。強風下の事例では、柵高の約 25% に相当する下部間隙をもつ柵による雪の捕捉量は、下部間隙が柵高の 10% の場合に比べて 30% 程度少なかった。平均風速がそれよりも 2.2m/s(8km/h)～4.4m/s(16km/h) 小くなると、雪の捕捉量の差は 10% 程度にすぎなかった。

図 3.47 柵高 3.8m のワイオミングタイプの防雪柵における下部間隙 0.3m と 0.9m の場合のそれぞれの吹きだまり形状比較 (Tabler 1986)

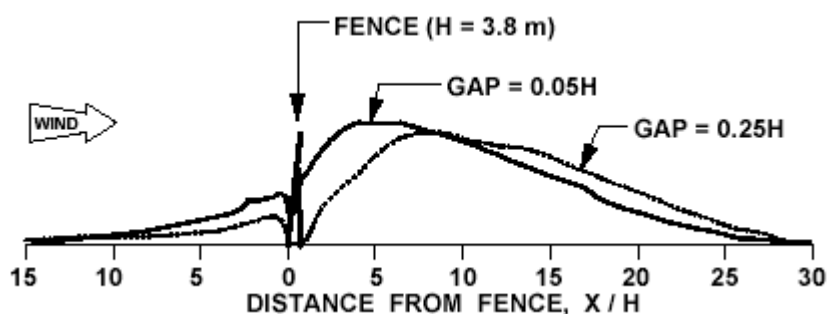
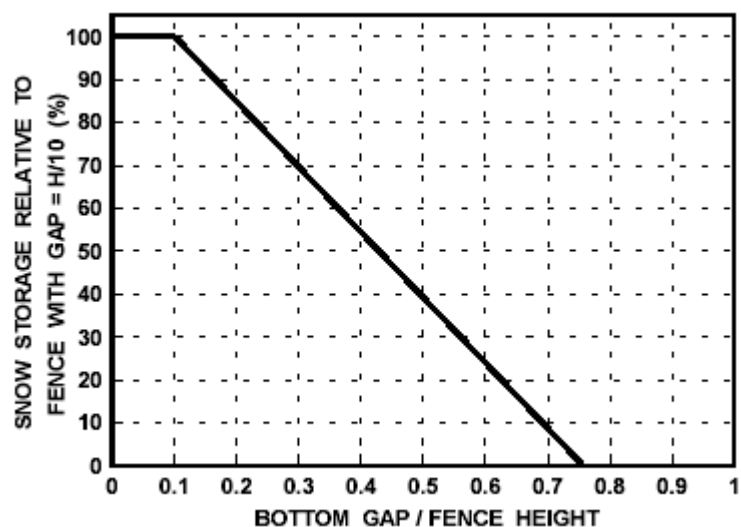


図 3.48 フィールド実験から導き出された堆雪量に対する下部間隙の効果 (Tabler 1994)



#### 3.8.5.2.4 柵の空隙率

空隙率が 0.4-0.5 の柵は最も大きい吹きだまりを形成する。空隙率 0 の柵は風上側に大きい吹きだまりをつくるが、風下側の吹きだまりは小さい。空隙率 0 の柵の防雪容量は空隙率 50% の柵とくらべて非常に小さい(図 3.49)。図 3.50 と 3.51 で示すように、防雪容量と風下雪丘の長さは空隙率によってかわる。

$$L/H = 12 + 49P + 7P^2 - 37P^3 \quad (3.24)$$

$$Q_c = (3 + 4P + 44P^2 - 66P^3)H^{2.2} \quad (3.25)$$

平衡雪丘の形への空隙率の影響は 3.8.5.3 で述べられる。

図 3.49 空隙率 50%と空隙率 0 の柵によって形成された吹きだまりの形の比較 (Tabler 1994)

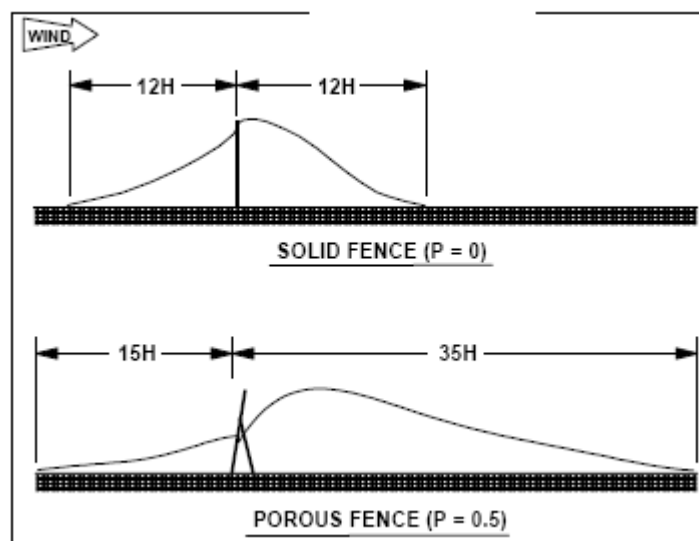


図 3.50 風下吹きだまり  
雪丘の長さは柵の空隙率  
の関数で表される (Tabler  
1994)

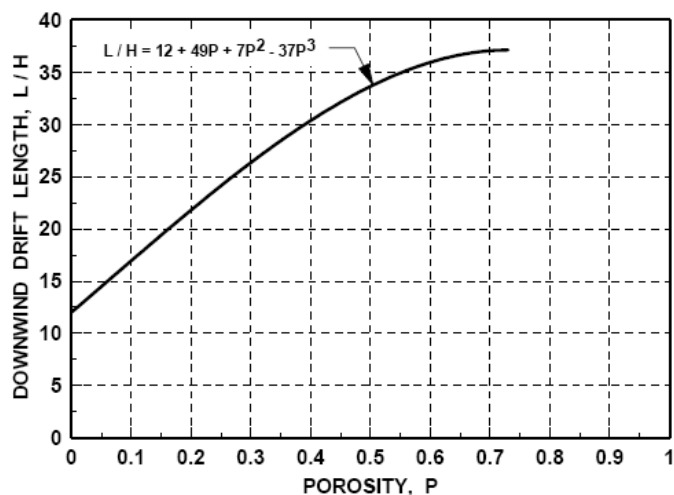
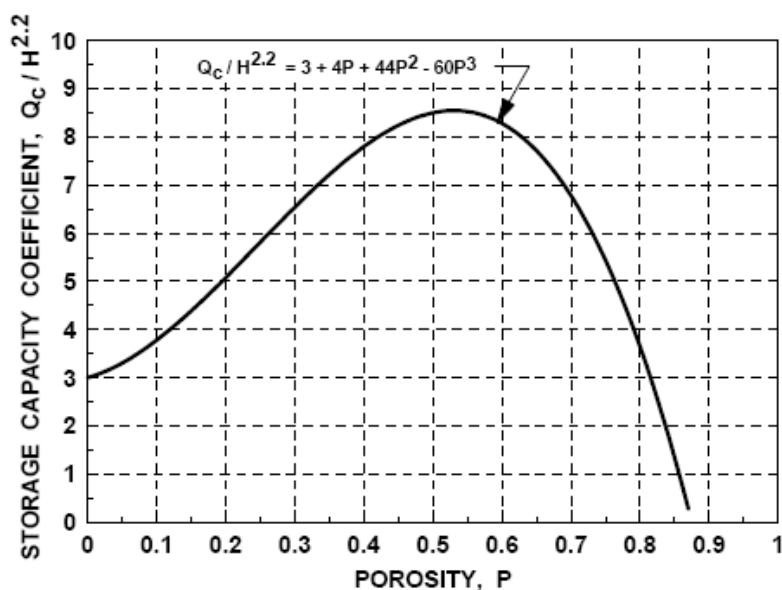


図 3.51 風下側防雪容量は  
柵の空隙率の関数で表さ  
れる



障害物の風への影響、ち吹きだまりに対する影響、は障害物の空気流に対する抵抗によって決められる。空隙率は空気流に対する抵抗を決めるため重要である。小さい開口断面を抜ける空気の流れはジェット(出)流になる。その結果、同じ空隙率であっても開口部のサイズが小さくなるに従って風の抵抗が増加する。5cmの円形開口部をもつ空隙率50%のプラスチック製フェンスの抵抗は、例えば同じ空隙率の幅15cmの横材を同じ15cm離れた木製スレート柵より大きい。

典型的な防雪柵の材料では開口部サイズの範囲以上で下部間隙が雪で埋まっていない状態では、空隙率が同じであれば開口部の形とサイズが異なる柵でできる平衡雪丘での違いが小さい(Tabler 1986,1988)。雪が柵の近くに堆積し下部間隙を閉塞するかは、開口部のサイズ、形と向きによって影響される。大半のプラスチックの柵材料に典型的な小さい開口部は、柵近くに雪が堆積しやすく、下部間隙を閉鎖し柵を埋めてしまいやすい。水平柵(図 3.52)はこの傾向が非常に小さく、下部間隙が埋まった場合も横材間の空間が下部間隙として働き柵の埋没を遅らせる。

図 3.52 水平なスレートは雪が柵近くに堆積するのを遅らせる(Tabler 1986)



最適な垂直柵のスレートや水平柵の横材については不確かであるが、30cm 幅の横材は幅がその半分の横材と比べて効果が小さいということのつかの事例が知られている。これはスレートの幅と発生する乱流のスケールとの関係によると思われる。乱流渦は空隙の無い部材の風下側にできる、そしてこれらの渦は周期的に生じて下流に運ばれる。これらの乱流渦のサイズは部材の幅に比例するために、広い板材は雪粒子の浮遊を促進し障害物の風下の表面せん断応力を増加させる。

#### 3.8.5.2.5 傾斜角

柵の頂部を風上側に傾けると、下部間隙を通過する風が増加し、風下吹きだまりの先端部(ノーズ)を風下に移動させ、吹きだまり雪丘の深さと防雪容量を減少させる。その反対に、頂部を風下側に傾けると柵下の流れを減少させる。その結果、傾斜柵の垂直高さの減少は大きな吹きだまりができることによって相殺される。空隙率 50%の柵を風下に  $15^{\circ}$  傾けると捕捉率や防雪容量の正味の増減効果は小さい。ワイオミングの標準柵に使われている  $15^{\circ}$  の傾斜(layback)は建設中の安定化と維持作業で人が柵を埋めるのを容易にしている。

参考図 傾斜角のメリット、建設中に 立不要、維持作業容易



### 3.8.5.2.6 風向

風の入射角は柵の列方向に対する相対的な風向である。 $90^\circ$  は柵に直角な角度、 $0^\circ$  は平行な角度である。どのように入射角が吹きだまりの 何学的な形に影響するかは、部分的には柵の 何構造による。ワイオミング柵のように斜めの 交い部材を持つ構造に対しては、風の抵抗は入射角の減少に従って増加する。なぜなら、 交いの大きな面積が風にあたるからである。同じように、垂直柵の空隙率は風がより傾いて吹くに従って減少する。しかしながら、経験的な研究によれば、入射角が  $90^\circ$  と  $45^\circ$  の間では風に平行に測定した吹きだまりの形状は入射角によらないことを示している(図 3.53(Tabler 1980a)。このことは、柵に直角に測定した風下吹きだまり雪丘の長さや断面積は、入射角 ( ) の  $\sin$  に比例して減少するであろうことを意味している。

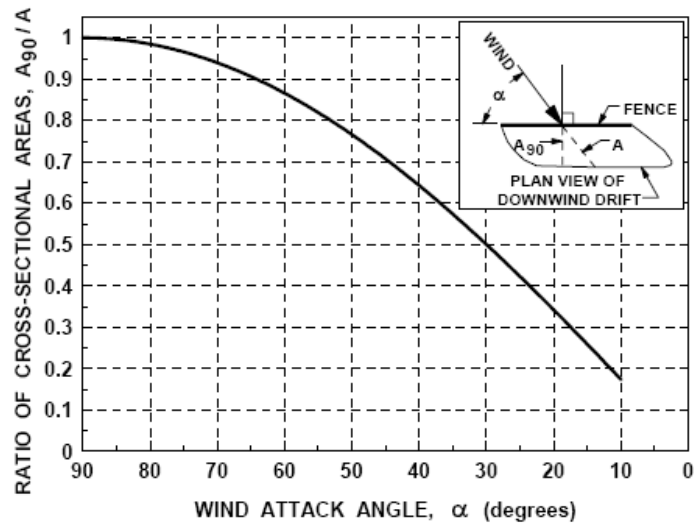
$$L=L_{90}(\sin \theta) \quad (3.26)$$

$$A=A_{90}(\sin \theta) \quad (3.27)$$

ここで、 $\theta$  は柵が風向に直交するとき形成される吹きだまりの大きさを示す。

バリアー（障害物）の列が主風向と少し斜めに交えば気流が側方に れる。このことがバリアーを通り過ぎる際に風が がりくねる原因になる。その結果、クロスした風速成分において起こり、 環渦の一つの 成分として吹きだまり雪丘の第 2、第 3 成長段階 (図 3.33) を通じて存在することは明らかである。それは キリのような風の働きで雪を風下に運ぶ。したがって、柵の末端の風下周 のスリップ・フェースの流れの中へ入る渦中の雪は空になっていて、捕捉率を減少させる。この効果(影響)は測定されてはいないが、おそらく  $45^\circ$  以上の入射角を持つ長い柵ではそれほど重要ではない。

図 3.53 吹きだまり雪丘の断面と風の進入角との関係を表した図 (Tabler 1986)



柵に直角に測定した吹きだまりの平衡雪丘は風向によって変化し、どの風向変化も吹きだまり雪丘の形を変える(傾向にある)。入射角の増加は、例えば、柵の端末部の風下吹きだまり雪丘を風食し、雪丘に雪を堆積させる、そして風下側の最大吹きだまり深さを移動させる。風食された雪の全ては堆積しないから、風向変化は捕捉率を減少させ雪が柵を超えてき出ることができることの原因となり得る。

#### 3.8.5.2.7 風速

平衡吹きだまり雪丘の形は風速によって変化するだろうと考えるのは当然と思うが、平衡雪丘が毎年近似していることや場所が違っていても似ていることからその違いは微細であるに違いない。その理由の一つは自然風の風速はそれほど大きくないためである。吹雪の発生限界風速は約  $5.56\text{m/s}$  で 通は  $28\text{m/s}$  を連続して吹くことはない。もう一つの、吹きだまり雪丘の形が明らかに風速に感な理由の説明は 3.5.3 で述べた雪粒子の結合である。平衡雪丘は一冬を通してできるので、最大の達成しやすい形になりやすい。

定量的なデータは少ないが、平衡雪丘は強風時に形成され弱風時に出来る吹きだまりと同じ深さではないだろう。風速の増加が前に堆積した吹きだまりを風食するので、もし雪粒子が結合する時間が無ければ十分に強くならない。

#### 3.8.5.2.8 地形の影響

柵を取り巻く地形は上で述べたどの要素よりも大きな影響を及ぼす。3次元の問題であるが、議論を簡単にするためにここでは風上側と風下側に限定した、したがって風を横切る方向には一様とした。



地形は、柵の風上側も風下側にも吹きだまり雪丘の形に影響を及ぼす。はるか風上側の地形が柵設置地点の吹雪量に影響し得るが、近所の地形状況は柵地点の気流に影響することで平衡雪丘の形に影響する。

一般的に言えば、地形状態による影響は、柵との距離、相対的なスケールと柵の高さによって多様である。その組み合わせの可能性は本質的には無限にあるので、ここで議論を実用的な適用を簡単に説明することができるように一般化するには限界がある。不規則な地形における吹きだまり雪丘の形を推定する方法は6章に述べるコンピュータ化した防雪柵設計プログラムのために開発された、しかしここに含めるには複雑すぎる。次の概要は図 3.54 と図 3.55 の関係で表される。斜面の向きは風向との関係で与えられる;上方向斜面は風が斜面を吹き上げていることを意味する。

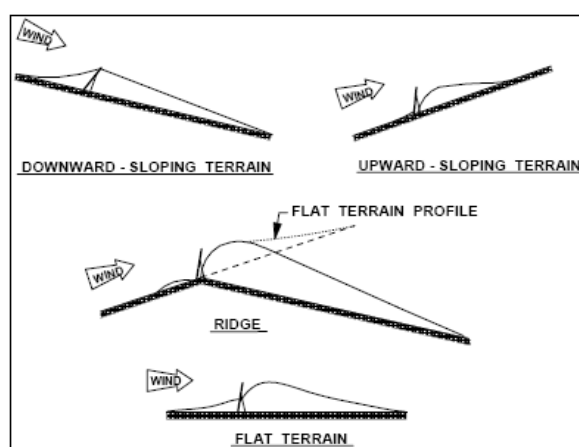


図 3.54 地表面勾配の平衡雪丘に及ぼす影響 (Tabler, 1986)

#### 上り(上向)斜面:

約 15%以下の一様な斜面の吹きだまりは、平坦な地面にできる吹きだまりと同じ形である。

土や 防のように、より急で短い斜面上では、吹きだまりは風が斜面に平行に吹くというよりむしろ水平に吹いたような形になる。吹きだまりは平地と比べて短く低い。さらに、柵の風上側の吹きだまりは非常に短く くなる、存在すればの であるが。

#### 下り斜面:

約 15%以下の一様な斜面の吹きだまりは、平坦な地面にできる吹きだまりと同じ形である。

雪が自然に積もるようなところに柵があれば埋まってしまうであろう。

長く 18%以上の勾配の一様な斜面では柵の風上側に雪がつきやすく柵を埋める。柵の風下側雪丘もまた大きい。

丘の頂:丘の頂きや 線上の柵の風上側の雪丘は発達せず存在しないこともあるが、風下側の吹きだまりは平地と比べてより深く長い。吹きだまり平衡雪丘の表面は風が地形の変化に合わせられることのできる最大の量を表している。その結果、 線上の柵の風下には平地上の同じ高さの柵と比べてずっと大きな吹きだまりができる。大 っ であるが、斜面角度一度につき約 0.15m 柵高が増加したのに相当する効果がある。

#### 柵風下側の登り(上向)斜面:

防雪容量は、風下吹きだまりが り斜面と風下側の丘によって、切り詰められるので減少する。柵が斜面の に近ければ近いほど、風上側吹きだまりはますます深くなる。

#### 吹きだまりの下の不規則さ:

吹きだまり面は吹きだまりの下の地形的不規則さには影響されない。

水路のようなくぼ地は大きく防雪容量を増加させるが、土 や丘は減少させる。

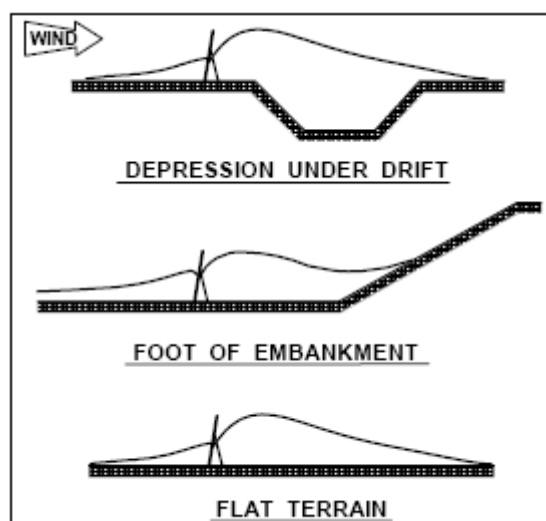


図 3.55 地形の不規則さの平衡雪丘に及ぼす影響 (Tabler , 1986)

### 3.8.5.3 防雪柵のタイプ別での平衡吹きだまり雪丘

#### 3.8.5.3.1 最も一般的な防雪柵の概略特性

吹きだまりの成長過程についての説明で述べたように、流線型の吹きだまりがすべて平衡状態にあるというわけではない。したがって、繰り返し計測し吹きだまりの成長が停止したことを検証することなく平衡吹きだまり雪丘を特定することは難しい。吹きだまりの平衡状態を正確に特定するためのこのような は、文献での吹きだまりの寸法に関する評価を間違いなくばらつかせる要因であった。

これよりここで説明する特性は、高さ 0.6～4.9m(2～16 フィート)の防雪柵の 30 年間以上に渡る多種多様な現地観測(Tabler 1980a,1986,1989)に基づく最良で有効な評価である。

選出した各タイプの防雪柵の平衡状態における吹きだまりの寸法とその断面積及び防雪容量は表 3.3 に示した通りである。ここで示した吹きだまり寸法と形は、典型的な平地において、防雪柵の端部から 12H またはそれ以上柵の内側に位置するエンドエフェクト（端部効果）の影響が無い断面で得られた結果である。

表 3.3 様々なタイプの柵によって形成された平衡吹きだまり雪丘の寸法 (Tabler 1986)

		風上の吹きだまり			風下の吹きだまり			総吹きだまり量		
		-----Upwind drift-----			----Downwind drift----			-----Total drift-----		
柵タイプ	Fence type	A/H <sup>2</sup>	Q <sub>c</sub> /H <sup>2.2</sup>	L/H	A/H <sup>2</sup>	Q <sub>c</sub> /H <sup>2.2</sup>	L/H	A/H <sup>2</sup>	Q <sub>c</sub> /H <sup>2.2</sup>	L/H
ワイオミング式	Wyoming	3.6	1.0	16	21.5	7.5	34	25.1	8.5	50
垂直防雪板とワイヤ	Slat-and-wire	5.1	1.5	18	18.3	6.2	34	23.4	7.7	52
空隙無し	Solid	5.0	1.4	15	5.0	1.6	12	10.0	2.9	27
A = cross-sectional area (m <sup>2</sup> ), Q <sub>c</sub> = snow storage capacity (t/m), L = drift length (m), H = effective fence height (m).										

A=断面積, Q<sub>c</sub>=防雪容量, L=吹きだまりの長さ(m), H=有効柵高

柵のタイプ別での吹きだまり形状は、以下の通りまとめことができる。

#### 空隙の無い防雪柵:

風上と風下の吹きだまり寸法は類似している。両側の吹きだまりの長さは有効柵高  $H$  の 12-15 倍で、最大の深さは有効柵高  $H$  と一致する。総防雪容量は空隙率 55% のワイオミング式防雪柵の 35% である(図 3.49)。

#### 垂直防雪板とワイヤ( $H = 2\text{m}$ ):

風上の吹きだまりは長さが約  $18H$ 、柵の位置で最大深さが  $0.6H$  の三角形の断面で、断面積が約  $5.1H^2$  である。

風下の吹きだまりは長さが約  $34H$ 、柵から  $4.6H$  離れた位置で最大深さが  $1.03H$ 、断面積が  $18.3H^2$  である。

総防雪容量は

$$Q_c = 7.9H^{2.2}, H = 2\text{ m (3.28)}$$

$H(\text{m}), Q_c(\text{t/m})$

#### 合成樹脂を用いた防雪柵:

柵の下部間隙が確保されている状態では、柵高や空隙率が同じであれば防雪容量や吹きだまりの長さの違いがわずかであることを様々な防雪柵部材の能力に関する実験は示している。しかしながら、防雪柵に用いられているほとんどの合成部材の標準的な小さな空隙は、初冬期に下部間隙の閉塞と堆雪を頻にもたらし、これは、柵直近での積雪深の急増をもたらし、最終的には柵を埋めさせる。この場合では平衡吹きだまり雪丘の形状を予測することはほとんどできず、防雪容量は雪に埋めしていない防雪柵より多いかは少ないかもしれない。

工学的視点では、防雪容量と吹きだまりの長さは柵高と空隙率が同一の全ての柵で一致すると仮定することが適当である。

#### ワイオミング式防雪柵:

風上の吹きだまりは、長さが約  $16H$ 、最大積雪深が柵直近で約  $0.5H$ 、断面積が  $3.6H^2$  の概ね三角形の断面である(図 3.33)。

風下の吹きだまりは、長さが約  $34H$ 、最大積雪深が柵から  $6.1H$  離れた位置で約  $1.2H$  で断面積が  $21.5H^2$  である。

防雪容量  $Q_c$  は以下の式により求まる。

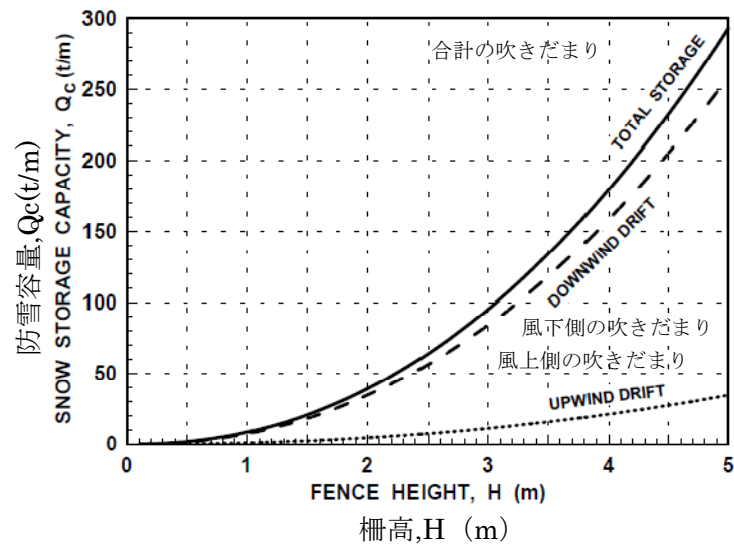
$$Q_c = 8.5H^{2.2} \quad (3.29)$$

$H(\text{m}), Q_c(\text{t/m})$

工学的視点では、ワイオミング式防雪柵の吹きだまり特性は、空隙率 0.50、柵高 1.8m の平地に設置された全ての防雪柵に適用できると考えられる。

図 3.56 は、防雪容量を柵高の関数として示したものである。

図 3.56 ワイオミング式防雪柵の柵高と風上と風下の吹きだまりの関係



### 3.8.5.3.2 空隙率に応じた平衡吹きだまり雪丘の断面形状

防雪柵の風上・風下の両側の平衡吹きだまり雪丘の断面形状は多項式 (3.17(p54)) で近似できる。

$$Y/H = A' + B'(X/H) + C'(X/H)^2 + D'(X/H)^3 + E'(X/H)^4 + F'(X/H)^5 \quad (3.30)$$

空隙率 0、25、37.5 と 50% の防雪柵の各係数を表 3.4 に示し、図 3.57 では多項式から得られた空隙率別の吹きだまりの横断形状を比較した。空隙率 50% の防雪柵の吹きだまり端部の雪丘深さが 0 となる表 3.4 で「 $X/H$  の上限」とした値は、既 の公表された値 (Tabler 1994 年他) からわずかに変化が見られた。

空隙率 50% の防雪柵からの距離に応じた吹きだまりの深さは表 3.5 に示す通りである。

表 3.4 柵高 1.8m (6 フィート) 以上の防雪柵によって形成された平衡吹きだまり雪丘について説明する多項式のための係数。表の項目名は式 (3.17) の記号に一致する。

Porosity (%)	A'	B'	C'	D'	E'	F'	X/H Limit
Upwind Drift 風上側吹きだまり							
0	9.13E-01	-3.610E-01	1.0050E-01	-1.8790E-02	1.7830E-03	-6.4000E-05	<10
25	6.30E-01	-1.450E-01	1.9240E-02	-1.2975E-03	7.5800E-06	1.8028E-06	<12
37.5	5.75E-01	-7.600E-02	4.4025E-04	6.8276E-04	-5.9656E-05	1.5934E-06	<15
50	5.20E-01	-5.540E-03	-2.1701E-02	3.5524E-03	-2.2153E-04	4.8560E-06	<16
Downwind Drift 風下側吹きだまり							
0	1.00E+00	-8.100E-02	-3.2520E-02	5.8280E-03	-3.2840E-04	5.7400E-06	<13.2
25	5.80E-01	2.218E-01	-2.9048E-02	1.0150E-03	-1.4489E-06	-3.4199E-07	<24
37.5	5.02E-01	2.689E-01	-3.7588E-02	1.9275E-03	-4.4983E-05	3.9880E-07	<31.6
50	4.30E-01	3.016E-01	-4.1203E-02	2.1930E-03	-5.4209E-05	5.1050E-07	<34

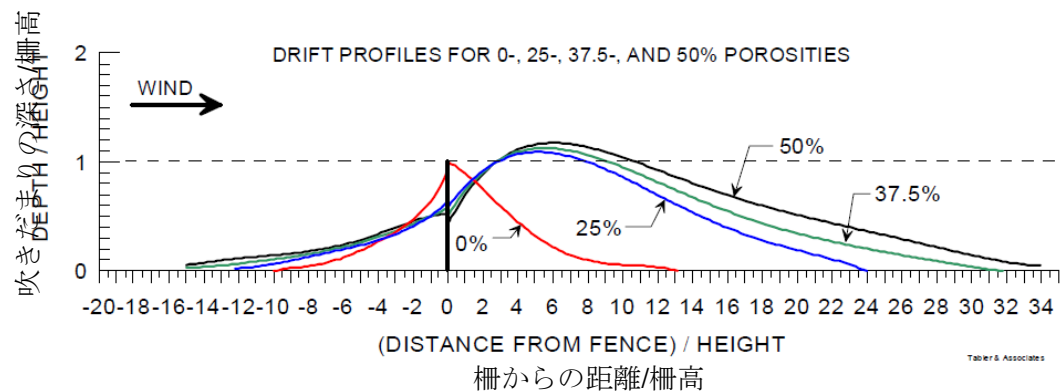


図 3.57 表 3.5 の係数及び式 3.17 によって得られた平地での吹きだまり形状への防雪柵の空隙率による影響

表 3.5 表 3.4 の係数と式 (3.17) で与えられるように、平地で柵高 1.8m (6 フィート) 以上の空隙率 50% の防雪柵によって形成された平衡吹きだまり雪丘の防雪柵からの距離に伴う吹きだまりの深さ。すべての評価は有効柵高  $H$  の倍数である

風上側吹きだまり		風下側吹きだまり			
距離	深さ	距離	深さ	距離	深さ
-----Upwind drift-----		-----Downwind drift-----			
Distance	Depth	Distance	Depth	Distance	Depth
0	0.52	0	0.43	18	0.60
1	0.50	1	0.69	19	0.55
2	0.45	2	0.89	20	0.51
3	0.39	3	1.02	21	0.47
4	0.34	4	1.11	22	0.44
5	0.28	5	1.16	23	0.40
6	0.24	6	1.17	24	0.37
7	0.20	7	1.16	25	0.33
8	0.18	8	1.13	26	0.29
9	0.16	9	1.09	27	0.26
10	0.14	10	1.04	28	0.22
11	0.13	11	0.99	29	0.18
12	0.11	12	0.93	30	0.14
13	0.09	13	0.87	31	0.11
14	0.07	14	0.81	32	0.08
15	0.05	15	0.75	33	0.06
		16	0.70	34	0.05
		17	0.65		
*Example for a fence 2 m (6.6 ft) tall: At a distance of $7H$ (14 m, or 46 ft) downwind of the fence, the drift depth would be $1.16H$ (2.32 m, or 7.6 ft).					



### 3.8.6 空隙のある防雪柵の捕捉率

雪の捕捉率に関する以下の論説は、Tabler(1974,1986)、Tabler 及び Jairell(1993)による参考文献を基にしている。

#### 3.8.6.1 定義

防雪柵の捕捉率  $E$  は、防雪柵の柵高  $h$  はそれより低い範囲を流れている全吹雪輸送量と防雪柵によって捕捉される吹雪輸送量の割合である。絶対捕捉率は、高さ 5m(16 フィート)以下の全吹雪輸送量と防雪柵等の障害物で捕捉される吹雪輸送量の割合である。初期捕捉率  $E_0$  は、防雪柵に全く雪が溜まっていない状態における最初の吹雪イベントでの捕捉率である。

#### 3.8.6.2 防雪柵の柵高と風速の関係による捕捉率

雪粒子の落下速度と垂直成分の分布、防雪柵の背面での気流の一般的特徴を用いることによって、雪粒子が地面に達する前にどれくらいくまで浮遊するかを見極めるため雪粒子の軌跡をたどることが可能である。もし、この距離が防雪柵の背面で減少している表面 断応力の領域を超えているなら、雪粒子は捕捉されない。

発達している吹きだまり背面の気流領域での定量的データは不足しているが、図 3.29 に示されている防雪柵風下（背面）の風速分布は風速と防雪柵の柵高に従って初期捕捉率がどう異なるかを評価する基礎を提供している。シミュレーションモデルより得られた図 3.58 の関係では、防雪柵の柵高が高いほど、初期捕捉率が多少減少することを示している。これは柵高が大きくなるに従って雪粒子の粒径(それにしたがって落下速度)が小さくなることに起因している。ただし、風速は捕捉率へ柵高の違いより顕著な影響を多く与えている。例えば 柵高 2m の防雪柵では、 $E_0$  は  $U_{10}=9.72\text{m/s}$  (35km/h(22 マイル/h))での 99%から  $U_{10}=30.00\text{m/s}$ (108km/h(67 マイル/h))の 68%に変化する。

絶対捕捉率は図 3.59 に示されているように防雪柵の柵高に従って増加しており、高い防雪柵の優位性を示している。

図 3.58 防雪柵の柵高と風速によってどのように初期捕捉率が変化するか (Tabler & Jairell 1993)

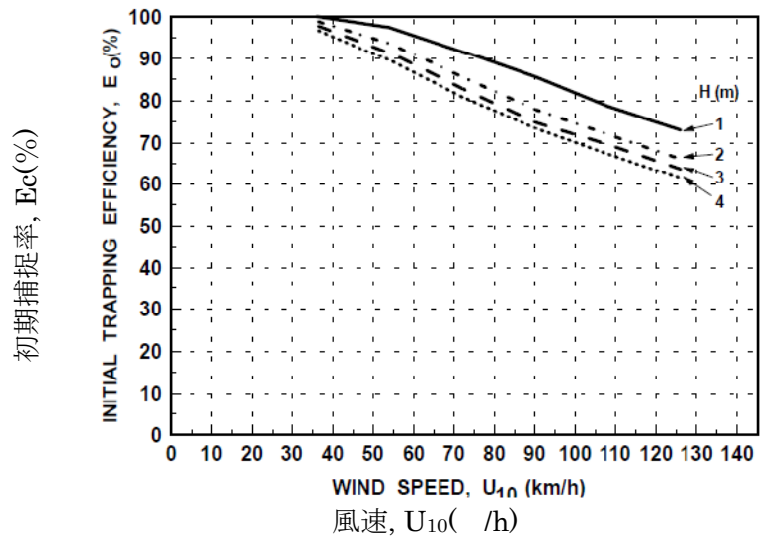
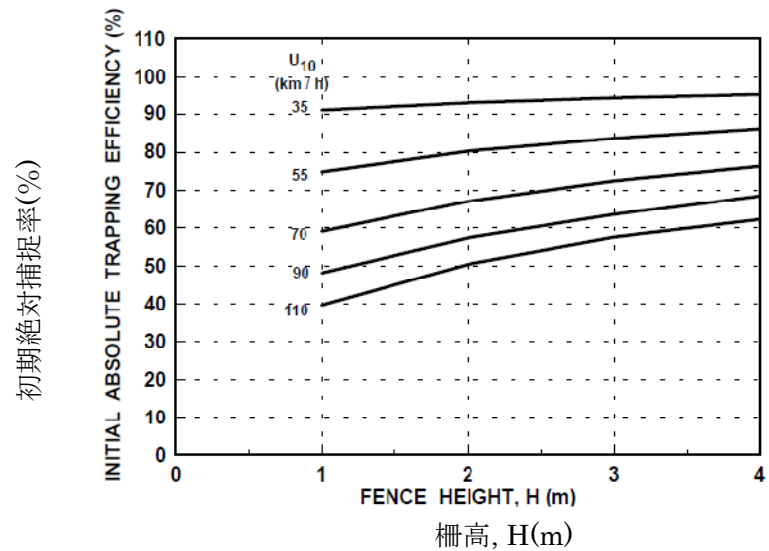


図 3.59 平地積雪面上の柵高によってどのように初期絶対捕捉率が変化するか (Tabler 1994)



### 3.8.6.3 捕捉率に影響を与える他の要素

以前に説明された風速の効果に加えて、捕捉率は柵の向きに対する相対的な風向や、吹きだまりの成長段階、そして風速や風向の変化の（これは堆雪した雪の風食のされやすさに影響を与える）によっても変わる。

一次近似として捕捉率は防雪容量に比例していると想定できる;すなわち、図 3.46 図 3.48 図 3.51 で示されているように捕捉率は柵の長さ、下部間隙、そして空隙率によって異なる。

しかし無の柵は例外である。なぜなら、柵の風上が平衡状態になるまでの初期段階中においても風上が平衡状態に達した後は急激に捕捉率は低下する。これは、柵上端の加速した流れの中の雪粒子の輸送を反している。(図 3.60)。

図 3.60 高さ 1.2m の空隙の無い柵の先端で射される雪粒子は風上の吹きだまりが空隙の無い柵先端に達した後なぜ捕捉率が低下する理由を示している。(Tabler 1994)



#### 3.8.6.4 捕捉率は時間によりどのように変化するか。

捕捉率に対する吹きだまりの影響はくぼんだ地形内の堆雪についての議論(3.7.3)より推測することができる。

雪が柵の後ろにどう堆積するかに関する記述から、吹きだまりが成長するのに従い、スリップ・フェースの頂上への進入角が変化するのとは明らかである。つまり2目のステージの間、吹きだまりが深くなるのに従い、上り斜面が成長する。そして3目のステージの間、吹きだまりが長くなるのに従い、下り斜面が成長する。(図 3.33)

3目のステージの大部分を通して、進入角は平均約 $3^{\circ}$ と比較的一定数にとどまっており、捕捉率が約70%の場合と一致している(図 3.27)。

吹きだまりが成長するのに従って、捕捉率は複雑に変化する。特にステージ2の間、捕捉率が時間と共に増加する時に隔たりがあるかもしれない。

捕捉率がどう時間変化するかの工学近似は、現場観測に基づくと

$$E = E_0[1 - (A/A_e)2]^{0.5} \quad (3.30)$$

である。

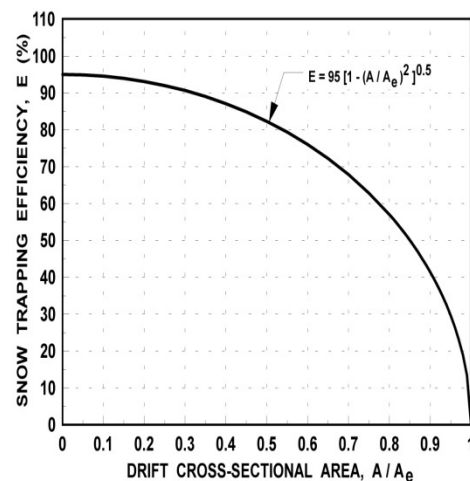
E をある時点の捕捉率とすると、 $E_o$  は柵が空である時の初期捕捉率であり、 $A$  は吹きだまりの断面積、そして  $A_e$  は柵が防雪容量までいっ いにされた平衡状態の時の吹きだまりの断面積である(図 3.61)。

現場観測、および図 3.58 に示されたコンピュータベースのモデルからの結果は、 $E_o$  の適切な値が 0.95 であることを示す。

また、吹雪量が風速の 3.8 乗に比例しているという単純な見解を考えることも妥当に思える。

従って風速の 50%の減少は吹雪量を 93%減少させるだろう( $0.5^{3.8} = 0.07$ )。

図 3.61 空隙率 50%の柵が雪で埋まる時の捕捉率の減少。 $E_o$  を 0.95 と想定する。(Tabler and Jairell1993)



吹雪量  $Q_t$  が防雪柵の防雪容量と等しいか、より少ないと、一冬を通しての平均の捕捉率  $E_{ave}$  は、3.30 式を  $A=0$  から冬の終わりの値  $A_f$  まで積分することによって推定できる。

$$E_{ave} = [1/(A_f/A_e)](E_o)\{0.5(A_f/A_e)[1-(A_f/A_e)^2]^{0.5} + 0.5\sin^{-1}(A_f/A_e)\}, Q_t \leq Q_c \quad (3.31)$$

空隙率 50%防雪柵の捕捉率と平均捕捉率を表 3.6.に示す。

表 3.6 間隙率 50%の防雪柵のある 間の捕捉率(E)と平均捕捉率(Eave)、方程式(3.30)と(3.31)によって与えられる吹きだまりの相対的な断面積(A/Ae)。初期捕捉率 Eo は 0.95 である。

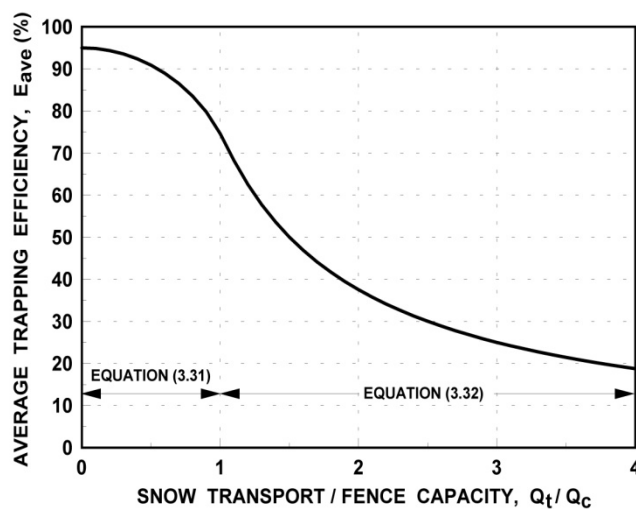
A/A <sub>e</sub>	E	E <sub>ave</sub>		A/A <sub>e</sub>	E	E <sub>ave</sub>
0.0	0.95	----		0.55	0.79	0.90
0.05	0.95	0.95		0.60	0.76	0.89
0.10	0.95	0.95		0.65	0.72	0.88
0.15	0.94	0.95		0.70	0.68	0.87
0.20	0.93	0.94		0.75	0.63	0.85
0.25	0.92	0.94		0.80	0.57	0.84
0.30	0.91	0.94		0.85	0.50	0.82
0.35	0.89	0.93		0.90	0.41	0.80
0.40	0.87	0.92		0.95	0.30	0.77
0.45	0.85	0.92		1.00	0.00	0.75
0.50	0.82	0.91				

吹雪量が柵をいっ いにするために吹雪輸送量が十分であったケースには、方程式 3.30 で与えられる平均捕捉率は 0.79 Eo である。吹雪量が柵の防雪容量より大きい年は、

$$E_{ave} = E_o(0.79)(Q_c/Q_t), Q_t > Q_c \quad (3.32)$$

方程式(3.31)と(3.32)、図 3.62 により与えられる、平均捕捉率は吹雪量が柵の設計防雪容量を越える時でも、柵がかなりの効果を持っていることを示す。

図 3.62 容量に比例した吹雪量の関数としての平均捕捉率 (Table and Jairell 1993).



## 4 吹雪に関する課題の定量化

### 4.1 範囲

本章は地吹雪に関する課題を分析するための手順を推し、吹雪量を定量化するのに必要である、現場での情報、データ、および分析について説明する。

特定の防雪施設を設計する前に、必要であるステップは、

- 1.課題の特定
- 2.課題の分析
- 3.可能な解決策の特定
- 4.データの整理
- 5.平年吹雪量と風向の推定
- 6.対策施設が受け持つべき防雪容量の決定

### 4.2 ハイライト

課題を特定する:道路への吹きだまりは?ドライバーの視界不良は?雪氷の形成は?

課題の原因を特定する。断面形状、平面図、安全施設、道路構造と植物、路側の雪の堆積などの要素を評価する。

必要なデータ、情報そして分析を決定する 可能な解決策を特定する。

収集すべきデータと情報は以下の通り:

- 課題となる範囲の場所
- 風向きと積雪量の冬期の現場計測値
- 大きいプロジェクトのための冬期航空写真
- 天候のデータ(降雪、温度、風速、および方向)
- 地形図と正射写真区画
- 道路形状を示している平面図。

現地での吹雪に関する課題の定量化には一連の推定計算を必要とする。

- 季節の積雪量
- 潜在吹雪量、 $Q_{upot}$ 、風の記録に基づく。
- 潜在吹雪量、 $Q_{spot}$ 、降雪と蒸発に基づく。
- 越風向
- 吹走距離(F)
- 現地での平年吹雪量、 $Q_{t,ave}$

- 吹雪対策施設での設計吹雪量、 $Q_{des}$

防雪対策施設を設計する際の防雪容量  $Q_{des}$  は要望される超過確率か費用対効果で、決定する。

便益が除雪費の減少と等しいとすると、平年吹雪量で防雪柵と他の防雪対策施設の容量を設計することで、最大の便益が得られる。

### 4.3 課題の特定

維持管理者と 察は彼らの管 の中で吹雪に関する課題に最も詳しいが、通常、彼らは問題を解決する可能性に気づかない。

維持責 がある管理者と技術者は、吹雪に関する課題の特定優先付けに関してリードしなければならない。

維持管理者との議論で吹雪に関する課題を特定できるのが最も良いが、過去の事故データ、特に事故時の道路と天気の状態の情報を含むレポートであった時も証拠を提供できる。

通行障害や事故発生時の気象状況に関する「吹雪」か「地吹雪」のカテゴリは特定の場所の吹雪 和対策の必要性に関して明白な証拠を提供する。ワイオミング州の高速道路 I-80 の 20 マイルの区間における事故の分析(図 4.1 と 4.2)では凍結路面と地吹雪による事故との相関関係を例証され、そして、吹雪対策が必要な箇所が示された。

図 4.1 高速道路 I-80 の 10 マイルの区間における凍結事故と地吹雪事故の相関関係は、吹雪が凍結路面の根本原因であると示唆する。

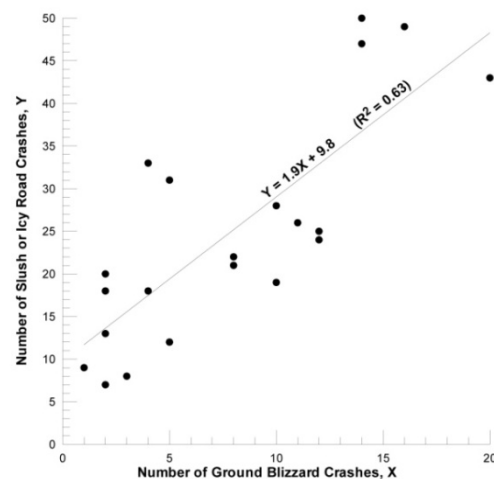
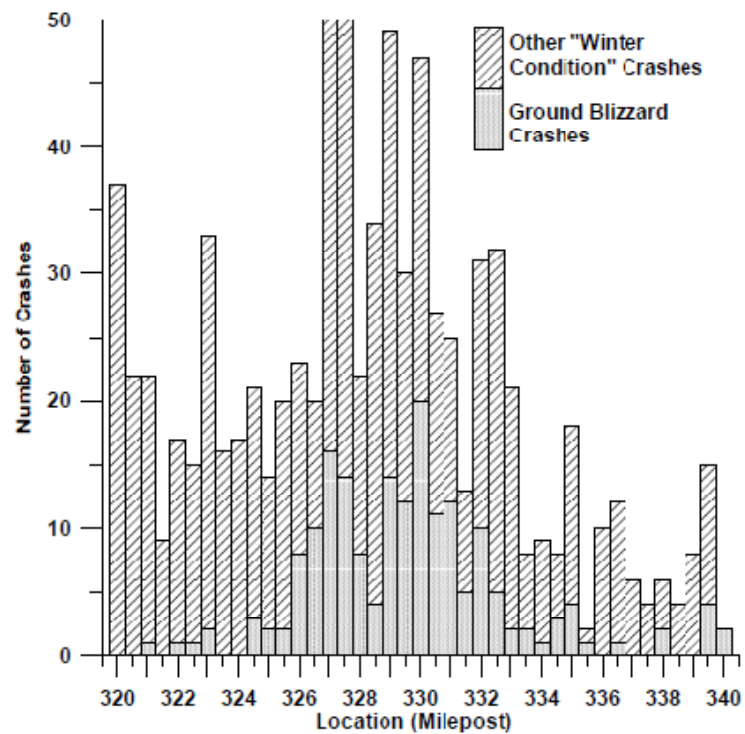




図 4.2 Distribution of crashes associated with winter condition crashes and ground blizzard conditions on Wyoming I-80, by halfmile locations (Tabler 2002).



## 4.4 問題点の分析

このようにして課題を明らかにしたのちに、吹雪対策技術者は実際に現地を、状況をよく知る維持管理者から情報を得る必要がある。本節では、その原因や問題点の重要性に対して正確な理解を促すための着点や知識について述べる。吹雪対策を安易に決定しないためには、調査の開始時点から、実際の道路用地に限らず資料収集や解析を行う必要がある。

### 4.4.1 問題の構成

吹雪 害には次の 4 つの側面がある。

1. 現象の種類(吹きだまり、視程障害、シャーベットや路面凍結)
2. 吹雪による障害 (事故、除雪作業費の増大、舗装修 費)
3. 吹雪の発生源 (道路敷地内、開けた平坦地、凍結した湖)
4. 吹雪 害を引き起こす箇所(横断構造、平面線形、 断線形、視線誘導、防護施設、沿道の植生や構造物、除雪作業、交通)

### 4.4.2 問題点と影響の把握

吹雪による問題点の分析に際しては、以下を明らかにする必要がある。

1. 問題となっている吹雪は、道路外からの吹きだまりなのか、視程障害なのか、

路面凍結なのか、もしくはその二つかが複合しているのか?

2. その問題が雪の堆雪状況と関係しているのなら、安全上の課題は何か?(その区間、ドライバーの目線高さを超えた高さの視程障害、運転 作への障害)
3. その場所の事故の 原因は?
4. 吹きだまりが路側の排水を妨げているか?もしくは路 肩への浸透を及ぼしているか?それによって、舗装への損傷が生じているのか?
5. 維持作業者に求められるスキルや 業務体制、超過 業務に対して、その吹雪がどのような影響を及ぼしているのか?
6. 毎年の発生頻度とその程度は?
7. この吹雪 害を解決した場合の大きなメリットは?道路交通や維持管理作業の安全性が確保できるのか?維持管理作業の 労力軽減になるのか?他の道路で応用できる知見が得られるのか?

上記の設問は、課題の正当性や重要性を明確にし、適切な対策方法を導くことができる。また、これらの設問に対する回答は、現地状況に詳しい維持管理業者との現地立会や吹雪対策専門家による冬期の現地調査から得られる。この他に参考になる情報源は、 警察 署や地元 自治体、事故 現場 である。

#### 4.4.3 吹雪の発生源

最初に分析すべき課題は、吹雪の発生源を明らかにし、その 越風向を特定することである。地吹雪の発生初期における吹雪の相対的な 強さを明らかにする必要がある。たとえば地吹雪が運ばれる高さ(高、中、低)である。特に、図 4.3 に概念的に示すように、地吹雪をもたらす飛雪の発生源が道路から離れた “ 方 ” なのか、道路の “ 近 ” なのかの判断は、特に重要な点である。吹走距離が道路用地内だけであったり、風上側の距離が短かったりする場所では、輸送量そのものが小さいにもかかわらず、吹雪量が路面凍結や高い事故率の要因となっている場合もある。 林の少ない高 土がその実例である。

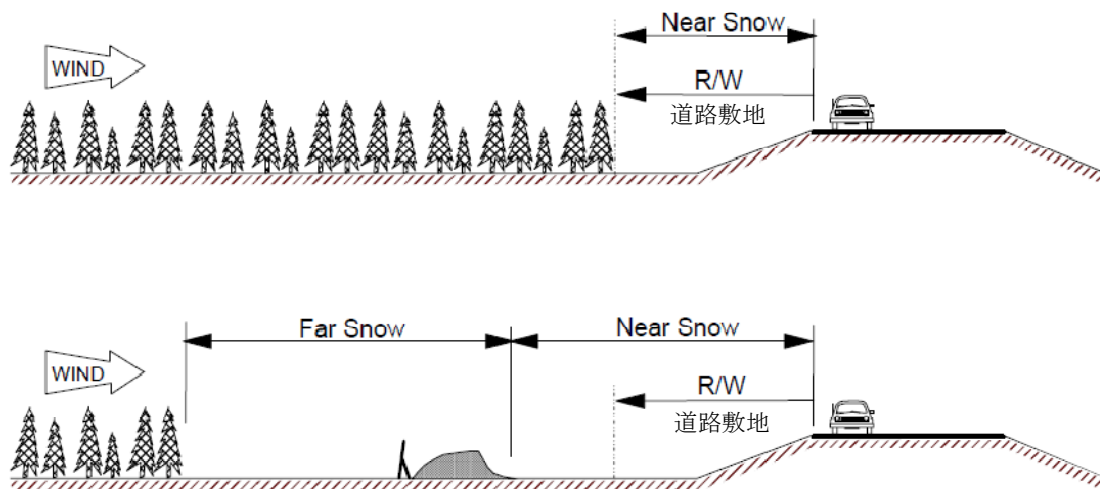


図 4.3 道路から離れた“遠方”からの吹雪と道路の“近傍”からの吹雪の違い

#### 4.4.4 これらの問題を引き起こす原因

これらの問題を引き起こす原因を決定することに困難を伴うことがあるが、吹雪対策を講じる上では原因の特定は 行うことができない。吹雪対策専門家が選択肢を見誤らないためには、最初から 観的な視点を持って検 査することが重要である。例えば、吹きだまりを生じにくい道路構造とすることで、防雪柵を用いることなく視程障害の 緩和や路面凍結防止を実現することもできる。

以下の要因は、吹雪や地吹雪による問題点に寄与している可能性がある。

##### 横断構造:

切土では道路上に吹きだまりが生じやすい。以下はその例である。

- ・ 周囲より中途半端な高さの道路では、雪面や除雪機 より路面を低くしてしまう。
- ・ 急傾斜の高 土は吹雪をより 化させるし、防護施設は吹きだまりを引き起こす。
- ・ くて い溝状の横断構造の道路では、路側に堆雪をもたらす可能性がある。

##### 平面線形:

- ・ 切土に平行な風は吹きだまりを生じにくい代わりに、 走距離が長く吹雪量が増加するために視程障害や路面凍結を招くことがある。

##### 縦断線形:

- ・ 除雪車の速度によって投雪距離が異なるので、除雪車の速度が遅くなる上りこう配では道路近くに高い雪 を生じやすい。

**道路付属物：**

- ・ 路側のフェンス(図 4.4)、広告板(図 4.5)、建物、 台、それに不適切な防雪柵は、道路上にむしろ吹きだまりを及ぼす場合がある。

**沿道の植生：**

- ・ 木、 木など 採されていない植生は吹きだまりを引き起こす場合がある。

**防護施設：**

- ・ 通常のガードレール、コンクリートの防護 は、吹きだまりを引き起こす。同じく重要な点として、これらは投雪距離を妨げることで雪 を高くしてしまうという課題を引き起こす。

**除雪作業：**

- ・ 雪 の成長を促すような除雪方法は、風に向かって雪を投じるとともに、非常にゆっくりとした運転につながる。ロータリー除雪は雪 の構造を小さくするなど、いくつかの作業性の面でプラウによる除雪より望ましい。
- ・ 視線誘導の不 は吹雪の中での事故の原因となる。視線誘導標の間隔は 60m (200 フィート) 以下にすべきであり、積雪や雪 より 1.5m の高さまで設けるべきである。
- ・ 交通量が増えるとともに、同じ視程でも安全走行に対しての危険性は増加する。
- ・ 吹雪による問題の有無は維持管理水準によっても異なる。小規模な吹雪条件であれば“ 管理 “のエリアでの維持管理上の問題となるが、管理水準が高くなければ特段の維持管理を必要とはしなくなる場合もある。



図 4.4 2.4m(8 フィート)の高い板塀が道路上に吹きだまりを生じている。主風向は写真の左側で、道路風下側の構造物や植生は非積雪期の現地踏査では見落とされやすい。



図 4.5 路側より 30m 離れたところにある広告板が吹きだまりを生じている (Tabler 1994)。なお、除雪作業者はこの原因には気づいてはいなかった。

## 4.5 候補となる吹雪対策

吹雪の課題を解析するために収集した情報によって、吹雪対策技術者が対策方法を特定しやすくするだけでなく、さらに必要となるデータや分析事項を明らかにする。すべての吹雪が解明されるとは限らないが、ある場所での吹雪害が緩和されることによって、これまで吹雪対策がうまくいかなかった他の場所に、その技術が応用できるという利点も生じる。すなわち、特定の路線での吹雪対策に限らず、地域や州全体への間接的な効果をもたらすことになる。

吹雪対策として、以下に示すような解決策すべてが初期時点では候補となる。

- ・ 防雪柵
- ・ 防雪“林”
- ・ 横断構造の改良
- ・ 除雪方法の変更
- ・ 防護施設の変更
- ・ 沿道の植生管理
- ・ 視線誘導
- ・ 注意 起

明らかに不適當であったり、当てはまらなかったりする解決策はいく段階で候補から外すべきであるが、道路用地や費用の点から“最も良い”とする解決策に安易に就いてしまうような先入観は避けなくてはならない。また、4.7で説明するようにデータ分析が進むまで、具体的な対策方法は提示すべきではない。

## 4.6 データと情報の収集

本節では、吹雪緩和対策の設計に必要となる情報や、データ入手手段について述べる。

### 4.6.1 冬期野外観測

本項では、特定の問題に対して現地調査で収集するもっとも重要な情報について述べる。なお、吹雪の評価チェックリストに関する形式を付録に載した。

#### 4.6.1.1 場所の決定

吹雪が問題となる区間の始点と終点を示すマイル標またはステーションは、冬の野外観測で決めるべきである。これらの野外観測は、道路維持作業の現場主や管理者の情報を参考にして実施されるべきだが、防雪の専門家は道路維

持の情報を解 するために、本書に書かれていることに基づいて独自の評価を下すべきである。

調査場所は、5m 位の幅で特定して、観測する際には地形図やプランニング・シートに記入すべきである。大規模な調査プロジェクトでは、冬期の航空写真が吹雪の問題箇所の境界を説明するのに役に立つ他、風向に関する情報も提供してくれる。航空写真撮影のガイドラインは、4.6.2 に記載されている。

便利なデジタル地形図として、DeLorme が している 3-D TopoQuads と ばれる フトウェアがある。同 は、米国地質調査所 (USGS) による完全な途切れのない地形データを CD-ROM または DVD で提供している。GPS レシーバーがあると、位置を特定でき地図上に記すことができる。これにより、野外調査において距離を計測しなくても済む。この フトウェアは第 6 章に記載したとおり、防雪柵を適切に配置させるのにも非常に便利である。地図に関する他の情報は 4.6.4 で説明する。

#### 4.6.1.2 吹雪の問題の定量化と記録

吹雪状況の記録は、優先順位付け、設計および吹雪 和対策の評価において有益である。積雪状態や視程の状況を示す写真やビデオの記録に加えて、道路の雪氷状況、車道端や切土での積雪深の測定は、効果的な吹雪 和対策を明確にするための根拠を提供してくれる。この情報は、他の場所での吹雪 和対策を 付けるのにもしばしば貴重となる。加えて、 来的に吹雪 和対策を維持することの重要性について、その証拠を提供してくれる。

#### 4.6.1.3 吹雪の卓越風向の測定

除雪車の運転手は、吹雪時の一般的な風向、特に問題となるような吹雪の越風向に関して重要な情報源になってくれるが、越風向のより厳密な決定が吹雪制御の計画に要求される。維持業者による感覚的な風向と実際の風向とは、かなり異なる可能性のあることを に入れておくことが重要である。なぜなら、1) 切土内の風向と風上側の風向とは著しく異なることがあるし、2) 風向に対する運転手の感覚は、除雪車の相対的な動きや道路走向の変化により められるからである。

風向は野外において、コンパスを用いて以下を測定することで決定できる。

- 道路に向かってくるその時々風向
- 吹きだまりの長さ方向の走向
- 風衝 形( が風下側にたなびいたり、 った形態に生長した 木)
- 風雪ですり減った木の や柱の方向



#### 4.6.1.3.1 野外での風の測定

風向は、風に向かいながらハンド・ルド・コンパスを使うことで測定できる。しかし、道路自身によって風向が影響を受けない場所を選ぶことが重要である。例えば、切土内の風向は、切土の影響を受けない風向から 45 度かそれ以上異なることもありうる。風の測定に意味を持たせるのならば、測定は典型的な強風の条件下で行い、冬期間に数回繰り返さなければいけない。

#### 4.6.1.3.2 野外での吹きだまりの測定

ハンド・ルド・コンパスは、木や木、または何らかの地物の後ろに形成される吹きだまりの成長方向の測定にも使うことができる。流線型をした吹きだまり形状（図 4.6）は容易に風向を識別できるインジケータとなる。冬の終わりに測定された大きな吹きだまりの走向は、吹雪時の平均的な風向を示す。もし、小さな吹きだまりしか利用できない場合は、意味のある平均的な吹雪時の風向を知るために、冬期間、数回測定を繰り返さなければならない。道路形状は風に影響を与えるため、防雪柵が設置されている所の風向を代表していない切土などの箇所に形成された吹きだまりは、測定対象にしないことが重要である。



図 4.6 灌木により形成された流線型の吹きだまりの走向は、吹雪が輸送される卓越風向の決定に使うことができる (Tabler 1994)。

#### 4.6.1.3.3 吹雪輸送方向に関する他のインジケーター

吹雪は、植物の形状に影響を与えることがある。吹雪が植物の成長を阻害する第一のメカニズムは、雪を覆っているワックスの保護層を吹雪が摩滅させてしまうことにある。この結果、剥かれた植物の細胞組織は乾燥してしまうことになる。風下に面しているか、または何らかの原因で直接吹雪にさらされていない状態にある成長点は、死することはないので成長していく。風下側だけ成長するので、吹きさらしにある木や低木の形は、結果的に風下側だけになびいたり、成長が止まった様相を示す。風で浸食された植物、木の幹や柱の摩滅の様相から、例えばの期間であっても、吹雪時の卓越風向を合理的に推定することができる(図 4.7)。



図 4.7 木の棒の摩滅模様は、吹雪時の卓越風向を示している (Tabler 1986)。

#### 4.6.1.4 吹雪吹走域での積雪深の測定

可能であれば、冬の後半に、吹雪が吹走する場所に残っている雪の深さを測定しておくべきである。この測定に最適な日は、4.7.2 で述べてあるように、吹きだまりが最大となる 1 週間位前である。

#### 4.6.2 航空写真の撮影

大規模な調査プロジェクトにおいて、冬期間の航空写真は吹雪が問題となる場所や吹雪時の卓越風向の測定に役立つ。図 4.8 に示されているように、写真

を縮 1/12000 までスケールアップすることで、立した地物によって形成された吹きだまりは容易に識別できる。ただし、これには次の条件が必要である。

1. カラー写真よりも白写真が望ましい(カラー写真ではしばしば十分なコントラストが得られない)。
2. 写真は明るい日で、太陽高度が低い時に撮影する必要がある。
3. フライトは、吹雪時の代表的な風を伴った規模の大きな吹雪の後に予定されるべきである。ただ、吹きだまりを覆いすような降雪後にフライトを予定してはいけない。
4. 写真は融雪が始まる前に撮影されなければいけない。できれば、積雪深がピークになる近くが望ましい。
5. 吹きだまりを形成させる雪面から突き出た地物が存在している必要がある。

航空写真は、吹雪で問題となる箇所を特定し、図におとしたり、吹走距離を決めるのにも利用できる。また、より詳細で新しい有用な情報が地形図上で得られることから、防雪柵の配置を事前に検討するのにも役立つ。航空写真撮影にかかるコストは、野外観測や設計、また位置を記した地図の準備に要する時間を省けることで容易に回収できる。重要な調査プロジェクトでは、できる判断を下すために、冬期間、2回、もっと言えば3回の航空写真撮影が妥当である。



図 4.8 縮尺 1/12000 の航空写真から、大きな灌木や地形の背後に形成された吹きだまりの形成状況がわかる。



### 4.6.3 気象データの収集

本項では、データの情報源と確定すべき要因について記述する。

#### 4.6.3.1 気象データの情報源

気象データの主な情報源は、National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) 米 海 大気庁の National Climatic Data Center (NCDC) 米 国立気候データ・センターである。最新のデータは <https://climate.data.noaa.gov/> で 、取得することができる。情報は日々更新されているが、次の CD が利用できる。

##### 「Climatology of the United States No. 81.」 (NCDC)

7937 地点の観測所の 1971 年～2000 年の月毎の平均気温・降水量および各月の最高気温・最低気温のデータが収められている。これには降雪深のデータは含まれないが、降水量に換算された降雪量が 示されている。

##### 「Integrated Surface Hourly Observations 1995-1999」 (NCDC)

1995 年～1999 年の毎時の風向・風速のデータに加えて、気温・空の状態（量や視程など）・降水量・吹雪に関するデータなどの多くの情報が提供されている。12 の CD に全世界の 10,000 地点が含まれ、そのうちの 4 の CD には USA のデータが収められている。

##### 「United States Snow Climatology, Version 1.0, October 1998」 (NCDC)

1961 年～1990 年の日毎、月毎・季節毎の降雪量および積雪深に加えて、その出現頻度、再現期間、極値などの多数の 統計値のデータが収められている。

##### 「Solar and Meteorological Surface Observation Network 1961-1990」 (NCDC)

前述の「Integrated Surface Hourly Observations」の観測データと同じように、237 地点の米国気象局の観測所の毎時のデータが 3 の CD に収められている。

EarthInfo のデジタルデータ(<https://climate.data.noaa.gov/>)は、観測開始からの記録データがすべて含まれ、ソフトウェアは、指定した条件でデータ検索、仕分けすることができるため特に有用である。このデータで、吹雪評価に役立つ収集データは次のとおりである。

#### 「EarthInfo, Inc., NCDC Summary of the Day (TD-3200), 1867 – 2001」 (NCDC)

USA の 19,355 地点の観測所のデータが、地域毎に 4 の CD に収められている。収録データは、日毎の最高、最低気温、降水量、降雪量および蒸発量である。

#### 「EarthInfo, Inc., NCDC First Order Summary of the Day (TD-3210), 1881-2001」 (NCDC)

12 の CD に 1881 年～2001 年の USA の 1,240 地点の観測所データが地域ごとに収められている。収録データは日毎の最高・最低・平均気温、平均露点温度、最大・最小の相対湿度、降水量、降雪量、積雪深および風向風速である。

#### 「EarthInfo, Inc., NCDC Surface Airways (TD-3280), 1948-2001」 (NCDC)

12 の CD に 1948 年～2001 年の USA の 529 地点の観測所データが地域毎に収められている。収録データは風向風速、気温、露点温度、相対湿度および天気（降水形態や吹雪の形態などを含む）である。また降雪、吹雪、気温などの気象条件を指定して風速頻度分布を作成することができる。

アメリカ気象プログラムの一部として設立された 6 つの地方気象センターでは、上記のデータに含まれない観測所の風向風速のデータを取得することができる。<http://www.noaa.gov/oa/1mae/reoal1mae/ers.html>

道路気象情報システム(RWIS)の観測所には、降雪量はないが風向風速と気温のデータが記録されている。

地理的および気候のデータを組み合わせた風のメスケールモデルは、1km メッシュ毎の平均風速・風向分布として開発されてきた。ニューヨーク州に関するこのデータは、「TrueWind Solutions (518-437-8650)」によって収録されており、インターネット・ウェブサイト(<http://www.truewind.com>)でアクセスすることができる。このデータの精度は確認されていないが、予備的に行ったワイオミング州での評価結果では、有効と考えられる。16 方位(N・NNE・NE・ENE など)で風向しか利用できないが、過去の資料を備えた観測所からい位置でも推測することができる価値に比べると、この限界は重要ではない。

北東アメリカおよび南東カナダの確率降雪深・確率積雪深は、Cember と Wilks(1993)によって分布図が作成されている。これは、デジタルデータとしても利用することができる(Cember, Eggleston, Wilks1993)。

4.6.3.4 で説明するように、降雪および降水データは、風の影響によって過小評価されることが多い。最もできる降雪データは、水資源予報のための天然資源保存サービス(NRCS)による測定データである。これらのデータは、ア

ラスカ、アリゾナ、カリフォルニア、コロラド、アイダホ、モンタナ、ネバダ、ニューメキシコ、オレゴン、サウスダコタ、ユタおよびワシントン州のものが利用できる。測定場所は、風の影響を受けない山中の小さな地である。冬季の最大積雪量は積雪期の降雪の相当降水量に近似している。過去の観測記録は <http://climate.r.s.usda.gov> で取得することができる。

吹雪量を算定するために必要な気象パラメータは、ミネソタ州 (<http://climate.mnstate.edu/>) およびワイオミング州については、すでに取りまとめられている (Tabler 1997)。ニューヨーク州については、雪対策の設計を支援するための SNOWMAN プログラムの一部から利用することができる (Tabler 2000)。

#### 4.6.3.2 風の過去の記録

風の過去の記録は、吹雪量を評価し、吹雪量の風向別分布を決定するために利用することができる。この解析では、表 4.2 に示すような、各月毎の風向風速出現頻度表を作成する必要がある。この表では風速階 毎に並べ、風向は 10° 刻み(古いデータの場合は 16 方位)、風速階 は 1.5m/s (3-knot) 毎が最適である (0-1.5m/s、2.0-3.0m/s、3.5-5.0m/s、5.5-8.0m/s、8.5-10.5m/s、>20.0m/s)。観測出現頻度は小数点以下 2 まで ののが理想的であり、小数点以下 1 では吹雪量を正確に評価できないと考えられる。

風速計は、最終的に高さ 10m(U<sub>10</sub>)に換算する必要がある。この情報は、Changery(1978)による編集に加えて、前述のインターネット・ウェブサイトでの NCDC からの Local Climatological Data (地域気象データ) で利用することができる。

#### 4.6.3.3 月平均気温

月平均気温は、4.6.3.1 項に記述された近所の観測所のデータを用いることができる。観測所の標高が問題のある地点と大きく異なる場合、大気中の気温の減率を利用して計算することができる。

$$\text{気温の減率} = 0.65^{\circ} / 100 \text{ m} \quad (3.5^{\circ} / 1000 \text{ m}) \quad (4.1)$$

#### 4.6.3.4 降雪および冬の降水量

冬季の降水量に換算した降雪量(Swe)は、吹雪量の推定に用いられる。問題となっている地点のために、近所観測点の記録から月平均に換算した降水量を推定すべきである。

月平均相当降水量を合理的に求めるには、以下の式がある。

$$e = (\text{降雪の深さ}) \times 0.1 \quad (4.2)$$

基本的に、冬季の降水量がすべて雪の場合、降水量も積雪期の降雪量と等しいと仮定することができる。

雪量計や吹きさらしの積雪深計(積雪の表面を計測する積雪深計)は、風が強いときに捕捉した降水量を過小評価する。風が強い地点で 雪量計が風よけを装備していない場合、真値は観測値の 2 倍程度である(Tabler ら 1990)。ワイオミングの州全体の研究で、風よけを装備した 雪量計の 50%と比較して、風よけのない 雪量計は 3 分の 1 しか捕捉できないことが分かっている (Tabler 1997)。アメリカ気象局委 観測 のほとんどの 雪量計は、空港のように吹きさらしの場所にある。また、すべて風よけを装備しているとは限らないため、降水量データを使用する際には、観測所を 選り、 雪量計の捕捉性が十分かどうかの確認をすることが望ましい。

冬季の降水量の評価には、U.S. Natural Resources Conservation Service (アメリカ天然資源保存サービス) のスノー・コース上で測定される最大積雪相当水量のデータの利用が最良の方法である。これらのスノー・コースは森林内の空き地にあるため、観測条件に優れている。NCDC の降雪量データや降水量を用いる代わりに、スノー・コース・データを用いて、標高の低い場所の降水量から降雪量と高さの関係によって推定する方法がある。

問題となっている箇所で使用できるデータがない場合、他の地点の降水量からの推定や、コンタの技術を用いることができる。例えば、標高に応じて降雪量が増加する地点では、標高と降水量の関係から求めることができる。

#### 4.6.4 地理的情報

地形図からは次の点を読み取ることができる。

- a) 吹走域の決定
- b) 防雪柵配置に影響する地形構造の特徴を識別
- c) 真北を決定し、 針との差を明らかにする

林と が示された 1:24,000 の最新の地形図を使用すべきである。

印刷された地図およびデジタル画 (デジタル・ラスター・グラフィックス) は、USGS(<http://ed.us.s.o/rodu.s/ma.h.ml>)( 303-236-7477)で注文することができる。

また、地形図はマイクロ フト のインターネット・ウェブサイト *TerraServer-USA* (<http://erraser.er.usa.om>)でも入手できる(世界の正確な測定を可能にする地図で、“orthoquads”は誰でも自由にアクセスできる、世界最大のオンライン・データベースのうちの 1 つである)。この地図は 1m の格子で、3.75 分の 1 度経度をカバーしている。



4.6.6.1 に記述したように、デジタル USGS 地図の別の情報源は「3D TopoQuads」である。DeLorme([www.delorme.com](http://www.delorme.com))(207-846-7000)から利用可能なソフトウェアで、表示に境目がなく、緯度と経度を選択したズーム機能、3D 表示、画面性能、正確な GPS 位置を有している。また、境目のない地形図の関連ソフトウェアもアメリカ地図学会([www.national Geographic.com/geo](http://www.national Geographic.com/geo))から利用できる。

## 4.6.5 道路構造

### 4.6.5.1 計画と分析

必要なら、現地調査や計画分析シートから、計画と分析に必要な次の情報を得ることができる。

- ・ 問題発生区間の範囲
- ・ 標高
- ・ 正確な道路の方位
- ・ 道路用地幅
- ・ 沿道の土地所有者
- ・ 道路 断勾配

### 4.6.5.2 標準的な道路横断構造

現地の標準的な道路横断構造は、吹雪の原因の特定、防雪容量の評価、吹きだまりの被害を最小限にするための断面構造の決定に用いられる。また、道路横断構造は柵の配置の決定にも使用される(6 章)。

道路の風上、風下の地形は道路上の平衡的な積雪分布に影響をおよぼす。そのため、道路横断の地形データは、少なくとも道路の風上側へは道路用地より 60m、風下側へは路 60m の範囲が必要である。

標高と距離は、少なくとも 0.1m 単位での測定が必要である。横断に沿って、標高は斜面の変化点では中間点も加え、3m 間隔での計測が必要である。

## 4.6.6 その他の情報

### 4.6.6.1 吹走領域上の植生

吹走領域に 積る雪の量は、植生により変化する。総降雪量が吹雪量の限界を決める(つまり風によって周期的に雪が吹き払われる)場所で、植物の平均高から雪の保持力の基準を見積もることができる。

#### 4.6.6.2 土地利用

土地利用も、その場所に応じた規制 置を決める根拠となり得る。景観が大切な地域では防雪柵の代わりに木を植えた方が良いでしょうし、 作された 地では仮設柵が良いでしょう。

#### 4.6.6.3 土壌

防雪柵の土台を具体化したり、防雪林の可能性やその種類を決めるには、土の情報が必要である。そのために含むべき項目を次に示す：

- ・ 地質学的な土 材
- ・ 盤までの深さ
- ・ 組成（例：砂質 性 土）
- ・ 排水性（例：湿っている、良く排水される）
- ・ もしあれば、 分問題
- ・ 定性的な支持力（弱い、平均的、強い）

### 4.7 年平均吹雪量の見積もり

#### 4.7.1 手順の概要

3 で述べたとおり、吹雪量とは風に直交する単位幅の上を単位時間に通過した地表から高さ 5m までの雪の質量である。この吹雪量は、防雪柵や植生、切土道路の雪の 留能力を決定する際に必要な情報である。この節では、気候データから年平均吹雪量を推定する手順を記述する。

潜在吹雪量は、吹走距離を無視した場合に見積もられる最大の吹雪量で、え字が無限の吹走距離を表す  $Q_{inf}$  で表される。 $Q_{spot}$  は通常 of 吹雪量の式(3.9) から推定される潜在吹雪量である。積雪水量  $S_{we}$  が mm 単位、 $F$  と  $T$  は m として

$$=0.5T \cdot r_o(1 \cdot 0.14^{-T}) \quad (4.3)$$

であり年平均吹雪量  $Q_{t,ave}$  は kg/m となる。

$Q_{spot}$  は、冬期の総降雪量が、すべて無限の吹走距離上で吹き飛ばされた ( $S_{rwe}=S_{we}$ ) 結果の輸送なので、式(4.3)は次の形となる。

$$=0.5T \cdot r_o \quad (4.4)$$

風が吹雪量を支配する要因である、つまり浸食される雪が冬の間ずっと残っているような場合とすれば、風によって吹雪量が決まり、潜在吹雪量は式(3.3)を用いて風速の記録から計算できるだろう。

$$Q_{0.5} = 10^{3.8/233847} \quad (4.5)$$

ここで、 $Q_{0.5}$ は風向に直交した 1m の幅における kg/s、 $U_{10}$ は m/s である。この方法により計算された潜在吹雪量は、 $Q_{upot}$ と指定され、次のように計算される。

$$Q_{inf} = \quad (4.6)$$

ここで、 $q$ は、頻度分布表による、ある地域における雪の管理手法に関わる風向と、風速が寄与するものである。

もし  $Q_{upot}$ が  $Q_{spot}$ より小さければ、風が輸送を制限しており、 $Q_{inf}$ が  $Q_{upot}$ と同じと取る。もし  $Q_{spot}$ が  $Q_{upot}$ より小さければ、降雪が吹雪量を支配し、 $Q_{inf}$ は  $0.5TS_{we}$  (式(4.4)) として計算される。

最後に、年平均吹雪量は式(3.10)を用いて、実際の吹走距離により  $Q_{inf}$ を補正することで計算できる。

$$Q_{a,e} = (1 - 0.14)^n \quad (4.7)$$

しかしながら、吹雪量の推定には図 4.9 に示した段階的な手順が求められる。4.7 章の残りは、この手順の詳細を示す。

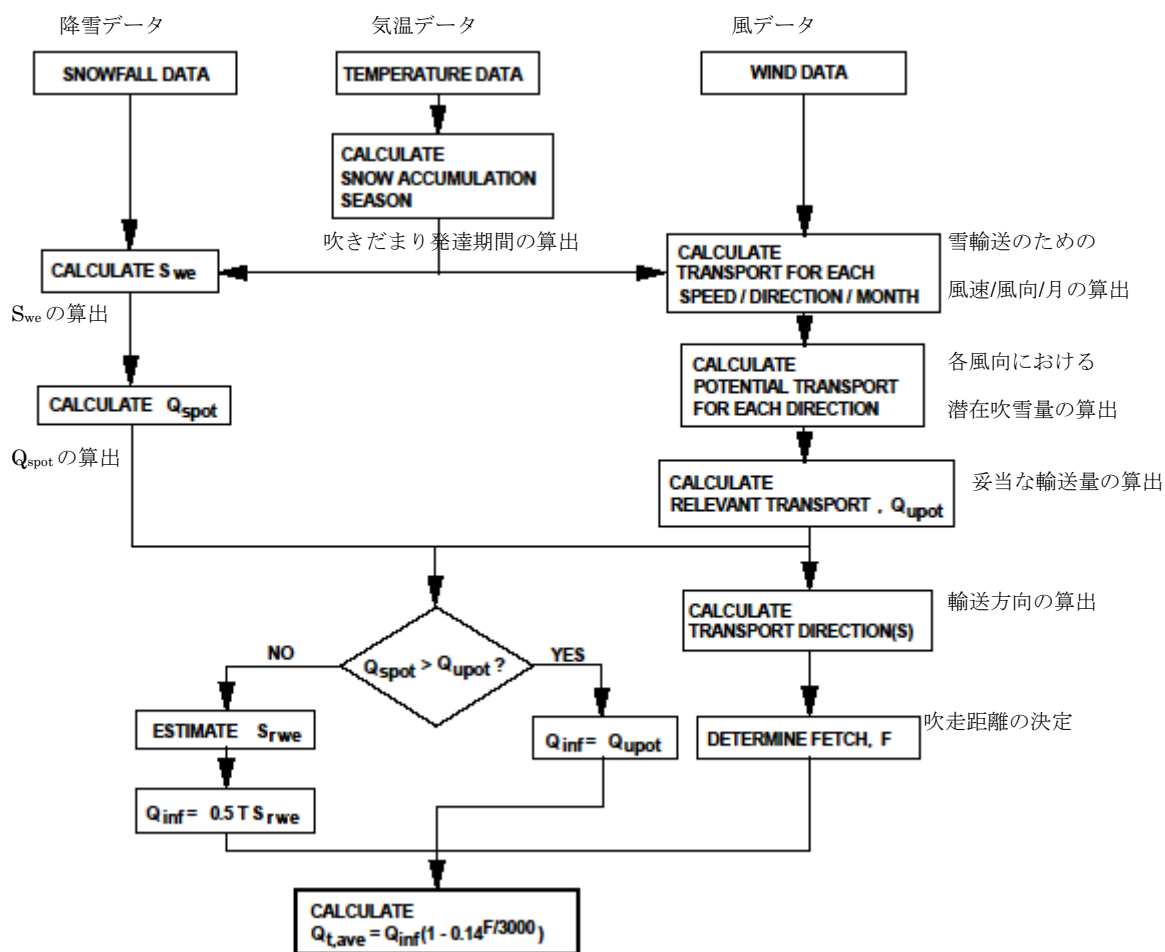


図 4.9 年平均吹雪量  $Q_{t,ave}$  の推定手順のフローチャート (Tabler 1993)

#### 4.7.2 吹きだまり発達期間の日数の決定

吹きだまり発達期間は、冬の間続く吹雪の始まりから、吹きだまりが成長しきるまでの期間である (Tabler 1988)。平均的な吹きだまり発達期間の日は、吹雪量推定の最初の段階である。

4.6.3.1 に示した NCDC データセットはいくつかの地点における“地表の雪”を報告しているが、通常この情報は吹きだまり発達期間の決定に使えない。“地表の雪”は、典型的には風に吹きさらされる場所で測定される。風が遮られる場所では、圧密によって積雪深が減少する一方で、水量は増えるため、積雪深から最大水量となる日付を決めるのが難しいかもしれない。

“NRCS”で報告されたような雪の調査情報は、記録機を設置した“SNOTEL”の場所での吹きだまり発達期間の推定に使うことが出来る。古いデータのほと

んどは、冬の中盤に開始され、月毎や隔週間隔の手動計測である。その結果は、  
のデータが見積もれず、 のデータの分解能が乏しい。

吹きだまり発達期間は、月平均気温から算出された平均気温が 0℃に達した  
時より始まる。月平均気温とした理由は、月平均値が容易かつ便利に使うこと  
ができ、月の中ごろの値に相当するので妥当だと考えられる。したがって、0℃  
となる時は、平均気温がそれぞれ 0℃以上・未満となった連続した月から内  
される。この内 の手順は次の式で示される。

$$n = 30(T_+)/(T_+ - T_-) \quad (4.8)$$

ここで、 $n$ は気温が高い方の月の中 から、0℃となった日までの日数であ  
る( $n$ は、 の暖かい月の中日に加算、 の温かい月の中日から減算するもので  
ある)。  $T_+$ と  $T_-$ は、それぞれ暖かい月と寒い月の平均気温である。

それぞれの気候データが利用できる場所では、0℃となる日付は式(4.8)から、  
次の例のように算出できる。

例題（ニューヨーク州バッファロー）：						
与えられた条件:						
	月平均気温					
	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr
°F	40.0	29.6	24.7	24.6	32.5	43.6
°C	4.4	-1.3	-4.1	-4.1	0.3	6.4
問い:吹きだまり発達期間を算出せよ						
解答:式(4.8)より						
秋の日付: $n = 30(4.4)/(4.4 + 1.3) = 23$ ;      11月15日 + 23日      = 12月8日 春の日付: $n = 30(0.3)/(0.3 + 4.1) = 2$ ;      3月15.5日 - 2日 = 3月14日						

10～30年の平均気温より算出された 0℃期間の例は次のとおりである。

アイオワ州エームズ	11月27日	3月10日
アラスカ州バロー	9月8日	6月13日
アイダホ州ボイシ	12月16日	1月29日
ニューヨーク州バッファロー	12月8日	3月14日
コロラド州デンバー	12月22日	2月6日
アリゾナ州フラッグスタッフ	12月5日	2月26日
モンタナ州カリスペル	11月12日	3月19日
ワイオミング州ララミー	11月11日	3月29日
ネブラスカ州リンカーン	12月3日	2月28日

ウィスコンシン州マディソン	11月 21日	3月 19日
オハイオ州マンスフィールド	12月 12日	2月 22日
ユタ州　　ルトレイクシティー	12月 10日	2月 6日
プリンス・エドワード　シャーロットタウン	11月 28日	4月 2日

気温のデータが利用できない場所での 0℃日の推定は、気温の地理的な多様性が標高や経度でよく説明できるので、異なる他の地点の 0℃日から次の回帰式によって求めることができる。

$$Date = A'' + B''(Latitude) + C''(Longitude) + D'' \quad (4.9)$$

ここで、*Date* は年における日数、標高 (elevation) は m、緯度 (Latitude) ・経度 (Longitude) は度で表す。*A''*、*B''*、*C''* そして *D''* の値は、周囲の地点のデータを用いた統計的な回帰分析から求めることができる。式(4.9)の係数が一旦決まってしまうと、データが欠落している地点の日数を求めることができる。数地点の気候と相対的な地域は、地域的な、もしくは州のデータの利用が望まれる。表 4.1 に、4.6.3.1 と Wernstedt(1972)に記載された 10～30 年の月平均気温から回帰分析によって求められた、提出されたいくつかの州の *A''*、*B''*、*C''* そして *D''* の値を示す。

表 4.1 0°Cの日付の式  $\text{Date} = A'' + B'' (\text{Elev}) + C'' (\text{Lat}) + D'' (\text{Long})$  に関する係数。ここで、標高(elevation)はm、緯度(Latitude)・経度(Longitude)は度である。分析に用いた地点数は、地点名の後に括弧書きで示した。R<sup>2</sup>は重相関係数を示す(Tabler 1988 より)。

State	Fall date					Spring date				
	A''	B''	C''	D''	R <sup>2</sup>	A''	B''	C''	D''	R <sup>2</sup>
Alaska (64)	+784	-0.0419	-5.35	-1.02	0.90	-391	+0.0189	+4.63	+1.38	0.91
Arizona (19)	+255	-0.0339	-4.74	+3.01	0.40	-46	+0.0505	+3.86	-1.41	0.65
California (13)	+652	-0.0308	-6.36	+0.00	0.37	-2	+0.0484	-0.57	0.00	0.85
Colorado (80)	+713	-0.0236	-5.05	-1.32	0.70	-270	+0.0389	+7.54	-0.34	0.85
Idaho (85)	+521	-0.0333	-3.37	0.00	0.82	-217	+0.0487	+4.95	0.00	0.88
Illinois (51)	+661	-0.0536	-7.50	0.00	0.81	-341	+0.0604	+9.39	0.00	0.85
Indiana (49)	+738	-0.0607	-9.29	0.00	0.77	-440	+0.0736	+11.68	0.00	0.84
Iowa (86)	+600	-0.0144	-6.25	0.00	0.94	-242	+0.0119	+7.28	0.00	0.94
Kansas (54)	+895	-0.0138	-13.64	0.00	0.83	-466	+0.0042	+12.81	0.00	0.79
Maine (20)	+508	-0.0345	-3.93	0.00	0.86	-114	+0.0331	+4.31	0.00	0.92
Maryland (5)	+589	-0.0541	-10.05	+2.42	0.80	-383	+0.0579	+14.67	-2.31	0.70
Michigan (72)	+494	-0.0469	-4.04	+0.33	0.92	-104	+0.0214	+6.55	-1.31	0.94
Minnesota (80)	+452	-0.0166	-2.86	0.00	0.90	-78	+0.0148	+3.44	0.00	0.93
Missouri (38)	+881	-0.0012	-13.36	0.00	0.80	-501	+0.0015	+13.79	0.00	0.73
Montana (106)	+431	-0.0200	-5.26	+1.45	0.40	+2	+0.0318	+7.14	-2.68	0.75
Nebraska (53)	+552	+0.0004	-5.21	0.00	0.77	-290	-0.0036	+8.56	0.00	0.80
Nevada (34)	+222	-0.0057	-6.65	+3.41	0.59	-4	+0.0360	+8.24	-2.91	0.82
New England* (67)	+690	-0.0292	-8.07	0.00	0.76	-285	+0.0313	+8.15	0.00	0.86
New Jersey (20)	Same as Pennsylvania					Same as Pennsylvania				
New Mexico (33)	+1073	-0.0413	-7.43	-3.55	0.59	-615	+0.0606	+9.60	+1.77	0.78
New York (61)	+519	-0.0329	-5.80	+0.99	0.89	-204	+0.0329	+7.00	-0.41	0.88
North Dakota (71)	+373	-0.0115	-3.35	+1.03	0.86	+36	+0.0171	+3.81	-1.37	0.88
Ohio (52)	+952	-0.0572	-9.65	-2.36	0.75	-693	+0.0511	+13.45	+2.22	0.83
Oregon (52)	+235	-0.0400	-3.62	+2.61	0.63	-158	+0.0563	+7.67	-1.63	0.75
Pennsylvania (60)	+631	-0.0449	-7.87	+0.65	0.71	-249	+0.0454	+9.93	-1.45	0.83
South Dakota (84)	+367	-0.0131	-5.65	+2.15	0.75	+10	+0.0153	+5.42	-1.83	0.76
Utah (72)	+361	-0.0252	-4.03	+1.57	0.56	-141	+0.0436	+7.38	-1.53	0.75
Virginia (2)	Same as Maryland					Same as Maryland				
Washington (57)	+1021	-0.0252	-11.73	-0.94	0.80	-772	+0.0408	+10.77	+2.41	0.89
West Virginia <sup>3</sup> (13)	Same as Maryland					Same as Maryland				
Wisconsin (88)	+571	-0.0289	-3.04	-1.16	0.90	-112	+0.0177	+4.52	-0.15	0.91
Wyoming (76)	+667	-0.0185	-3.47	-1.55	0.64	-216	+0.0341	+5.70	-0.06	0.76

\* New England states: Vermont, New Hampshire, Massachusetts, Rhode Island, and Connecticut.



特定の地域における、吹きだまり発達期間に関する州規模の近似式ながら、表 4.1 は日数が標高、経 度によって変化することを例示している。一例として、標高の係数 B が大きくなれば、吹きだまり発達期間が増加する傾向がある (図 4.7)。

アメリカ合衆国の平均的な吹きだまり発達期間は、標高 100m ごとに 2.5 日、度 1 度ごとに 5.5 日、経度 1 度ごとに 1 日、 には北から先に、東から先に、そして高いところから先にはじまる。 には反対向きに変化する (Tabler 1988)。

<p>例題 (ニューヨーク州バッファロー) :</p> <p>与えられた条件:</p> <p>表 4.1</p> <p>緯度(Latitude) = 42° 56' N,</p> <p>経度(Longitude) = 78° 44' W,</p> <p>標高 (Elevation) = 215 m (705 ft)</p>
<p>問い: New York の Buffalo における吹きだまり発達期間を算出せよ</p>
<p>解答: 式(4.9)より</p> <p>秋の日付: <math>519 - 0.0329(215) - 5.80(42.93) + 0.99(78.73) = 341 = 12月 7日</math></p> <p>春の日付: <math>-204 + 0.0329(215) + 7.00(42.93) - 0.41(78.73) = 71 = 3月12日</math></p>

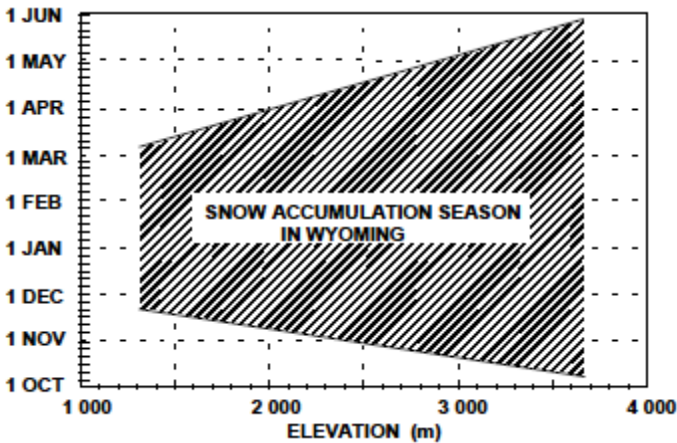


図 4.10 標高による吹きだまり発達期間の変化。表 4.1 よりワイオミング州中心の経緯度での値を例に示した。(Tabler1988)。

### 4.7.3 風速値からの潜在吹雪量の計算

#### 4.7.3.1 風向による $Q_{upot}$ (潜在吹雪量) の計算

4.6.3.2 で述べた風向/風速の頻度について かれた図表を使用して、次の手順は、吹きだまり発達期間内の各月における、潜在吹雪量の計算に用いられる。

風向風速計は、しばしば標準の 10m(33 フィート)以外の何らかの高さに設置されることがある。そのため、まず始めに、3.3 で述べられた風の鉛直分布を使用して 10m の高さにおける風速に換算した補正値を計算する。

式(3.3)より、 $U_{10}$  と  $U_z$  の比(高さ  $Z$  における風速)は、

$$U_{10}/U_z = (10/z)^{1/7} = U_{10}/U_z \quad (4.10)$$

$C_u$  は、風向風速計の高さ  $Z$  で観測した風速を、10m(33ft)の高さに修正するのに使用される定数である。

雪質、標高、および温度によって、吹雪発生限界風速は異なる。

しかしながら、潜在的吹雪量を算出するために、最も低い限界風速は 20km/h(12miles/h、5.6m/s)程度で使用されるべきである。

この値以上の風速について、風向  $j$  に する高さ 5m までの総吹雪量  $q_{i,j}$  は、次のように計算される。

$$q_{i,j} = (U_{i,j} - U_{lim})^3 (86400) / 233847 \quad (4.11)$$

$f_{i,j}$  が、 $i$  要素の風速階 と  $j$  要素の風向階 に する、観測頻度である。

$D$  は 4.7.2 で計算されたように、吹きだまり発達期間内の月降雪日数であり、 $U_{i,j}$  は m/s で表した風速階 の中 値である。

各風向別の月間総吹雪量( $Q_{upot}$ ) $_j$  は、各方向の  $q_i$  の合計として計算することができる。

この様に算出された吹雪量は、プルドーベイ、アラスカ州(Tabler et al. 1990)の高い防雪柵の風下で測定された雪の吹きだまりによく近似することができる。

例題(ニューヨーク州 バッファロー)：
与えられた条件：
a) 吹きだまり発達期間 = 12月8日～3月13日 b) 表4. 2に示されている12月の風のデータ c) 風向風速計の高さ = 6. 1m(20ft)
問：吹きだまり発達期間における、12月の北、11-16ノット(5. 7～8. 2m/s)の風速階級から、潜在的吹雪量について計算しなさい、また、総潜在的吹雪量について計算しなさい。
解答： a) この階級の平均風速 = $0.5(10.5 + 16.5) = 13.5$ knots b) $C_u = (10/6.1)^{1/7} = 1.073$ c) knots から m/s への換算 = 0.5145 d) $D = 24$ (12月の潜在的吹雪量) e) したがって、式(4. 11)から $q_{11-16,N} = (0.011)(24)(86400)[(1.073)(0.5145)(13.5)]^{3.8}/233847 = 201$ kg/m (135 lbs/ft) 北からの潜在的吹雪量 = すべての風速階級で、全月数における合計値 = $903 + 497 = 1400$ kg/m (941 lbs/ft) (表 4. 4)

表 4.2 6.1m(20ft)の風速と風向 ニューヨーク州 バッファロー 1965年～74年の12月

Wind azimuth	Direction	-----Wind speed class-----									
		0-3	4-6	7-10	11-16	17-21	22-27	28-33	34-40	>40	Total
(Degrees, true north)		-----Frequency of observations (%)-----									
348.75 - 011.25	N	0.4	1.3	1.9	1.1	0.2	0	0	0	0	4.9
011.25 - 033.75	NNE	0.1	0.5	0.8	0.6	0	0	0	0	0	2
033.75 - 056.25	NE	0.2	1.5	1.1	0.6	0.2	0	0	0	0	3.6
056.25 - 078.75	ENE	0.3	1.3	1.5	1.1	0.3	0.1	0	0	0	4.6
078.75 - 101.25	E	0.4	1.9	2.9	3.3	0.2	0.05	0	0	0	8.75
101.25 - 123.75	ESE	0.1	1.2	1.6	0.2	0	0	0	0	0	3.1
123.75 - 146.25	SE	0.4	0.8	1.5	0.2	0	0	0	0	0	2.9
146.25 - 168.75	SSE	0.4	1.0	2.1	0.5	0.05	0	0	0	0	4.05
168.75 - 191.25	S	0.4	2.6	2.7	2.0	0.4	0	0.05	0	0	8.15
191.25 - 213.75	SSW	0.3	1.3	1.8	2.8	1.0	0.2	0	0	0	7.4
213.75 - 236.25	SW	0.1	1.1	1.4	2.5	1.0	0.4	0.1	0.05	0	6.65
236.25 - 258.75	WSW	0.1	0.8	2.3	2.7	1.7	1.2	0.3	0.05	0	9.15
258.75 - 281.25	W	0.1	1.5	4.4	7.1	3.2	0.9	0	0	0	17.2
281.25 - 303.75	WNW	0.2	1.0	2.5	2.7	0.8	0.2	0	0	0	7.4
303.75 - 326.25	NW	0	0.6	1.5	1.2	0.3	0	0	0	0	3.6
326.25 - 348.75	NNW	0.1	0.8	1.4	1.6	0.6	0.05	0	0	0	4.55
000.00 - 360.00		3.60	19.20	31.40	30.20	9.95	3.10	0.45	0.10	0.00	98.00

表 4.3 潜在的吹雪量と風向 ニューヨーク州 バッファロー 12月8日～31日

Wind azimuth (Degrees, true north)	Direction	Wind speed class									Total
		0-3	4-6	7-10	11-16	17-21	22-27	28-33	34-40	>40	
348.75 - 011.25	N	0	0	0	201	134	0	0	0	0	336
011.25 - 033.75	NNE	0	0	0	110	0	0	0	0	0	110
033.75 - 056.25	NE	0	0	0	110	134	0	0	0	0	244
056.25 - 078.75	ENE	0	0	0	201	201	176	0	0	0	579
078.75 - 101.25	E	0	0	0	604	134	88	0	0	0	827
101.25 - 123.75	ESE	0	0	0	37	0	0	0	0	0	37
123.75 - 146.25	SE	0	0	0	37	0	0	0	0	0	37
146.25 - 168.75	SSE	0	0	0	92	34	0	0	0	0	125
168.75 - 191.25	S	0	0	0	366	268	0	203	0	0	838
191.25 - 213.75	SSW	0	0	0	513	671	353	0	0	0	1537
213.75 - 236.25	SW	0	0	0	458	671	705	405	422	0	2662
236.25 - 258.75	WSW	0	0	0	495	1141	2116	1216	422	0	5391
258.75 - 281.25	W	0	0	0	1300	2148	1587	0	0	0	5036
281.25 - 303.75	WNW	0	0	0	495	537	353	0	0	0	1384
303.75 - 326.25	NW	0	0	0	220	201	0	0	0	0	421
326.25 - 348.75	NNW	0	0	0	293	403	88	0	0	0	764
000.00 - 360.00		0	0	0	5532	6678	5467	1824	845	0	20347

表 4.4 潜在的吹雪量と風向 ニューヨーク州 バッファロー 12月8日～3月14日

Wind azimuth (Degrees, true north)	Direction	Wind speed class									Total
		0-3	4-6	7-10	11-16	17-21	22-27	28-33	34-40	>40	
348.75 - 011.25	N	0	0	0	903	497	0	0	0	0	1400
011.25 - 033.75	NNE	0	0	0	616	39	0	0	0	0	635
033.75 - 056.25	NE	0	0	0	499	339	0	0	0	0	838
056.25 - 078.75	ENE	0	0	0	1027	571	496	0	0	0	2094
078.75 - 101.25	E	0	0	0	1626	913	316	0	0	0	2855
101.25 - 123.75	ESE	0	0	0	236	126	0	118	0	0	481
123.75 - 146.25	SE	0	0	0	170	20	0	0	0	0	189
146.25 - 168.75	SSE	0	0	0	382	93	0	0	0	0	474
168.75 - 191.25	S	0	0	0	990	1112	662	465	0	0	3229
191.25 - 213.75	SSW	0	0	0	1784	2106	1677	0	0	0	5567
213.75 - 236.25	SW	0	0	0	1996	4524	3768	1525	1514	960	14287
236.25 - 258.75	WSW	0	0	0	3344	8911	12287	6453	2011	1054	34061
258.75 - 281.25	W	0	0	0	5587	9944	10600	2762	1091	0	29985
281.25 - 303.75	WNW	0	0	0	2099	3508	1740	737	0	0	8083
303.75 - 326.25	NW	0	0	0	939	759	259	0	0	0	1957
326.25 - 348.75	NNW	0	0	0	768	864	410	0	0	0	2061
000.00 - 360.00		0	0	0	22965	34347	32215	12060	4616	2014	108217

#### 4.7.3.2 吹雪量と卓越風向の関係を定める

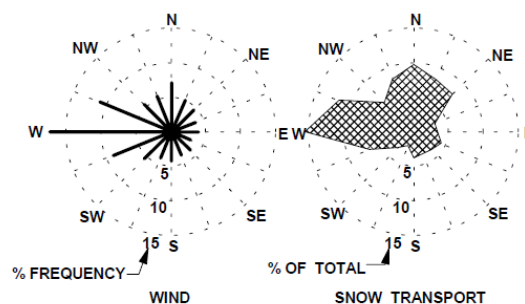
障害箇所における道路走向は知られているので、表 4.4 のように、重要な吹雪に寄与する風向は、風向による吹雪の図表から容易にわかる。

次に、吹雪は風向の関係からまとめられる。そして、平均的な吹きだまり方向が計算される。これは以下の例で示される。

例題(ニューヨーク州 バッファロー)：
<p>与えられた条件：</p> <p>a) 表 4.4</p> <p>b) 道路走向 北/南</p>
<p>問：</p> <p>a) 吹雪量の注目すべき方向</p> <p>b) 注目すべき方向からの総吹雪量</p> <p>c) 卓越吹雪方向</p>
<p>解答：</p> <p>a) 注目すべき方向は、SSWからWNW</p> <p>b) 関係方向からの総吹雪量 =</p> $Q_{\text{upot}} = 5\,567 + 14\,287 + \dots + 2\,061 = 91\,983 \text{ kg/m (61,817 lb/ft)}$ <p>c) 卓越吹雪方向</p> $[(202.5)(5567) + (225)(14287) + \dots + (292.5)(8083)] / 91983 =$ <p>253° 方位</p>

表 4.2 と表 4.3 を比較すると、吹雪量方向別分布が 越風向としばしばかなり異なっていることがわかる。12 月のバッフ ローにおける 越風向は、おおよそ真西であることが見られるが、吹雪の方向は約 253° である。別の事例はプリンス・エドワード 、シャーロットタウンの風の記録によって示される。そこで、 $Q_{\text{upot}}$  の分析は、総吹雪量の約半分が北風と、残り半分が西風と関連していることを示している。このほぼ等しい二つの方向の吹雪量は、先に 理した風配図からは読み取ることができない。この例は、風配図をそのまま使うよりも、潜在的吹雪量に基づく風のデータを分析する重要性を強調している。また、「吹雪 害」にいつも降雪が関与している場合には、吹雪の方向が潜在的吹雪分析によって明白ではないかもしれない、ということを認めなければならない。ここで示した定量分析による結果は、維持管理員の報告書と一致しているか必ず照査すべきである。

図 4.11 プリンス・エドワード島、シャーロットタウン (Tabler1994)における風配図と潜在的吹雪量( $Q_{upot}$ )。



最大限の効率を得るため、防雪柵などによる吹きだまり対策は、風向変動の幅を考慮してその防御対象を検 しなければならぬ。表 4.4 によって示された分布は、フェンスがどれくらい まで防御を必要とするかを特定するのに、必要な量的な情報を提供する。

#### 4.7.4 降雪に基づく潜在的吹雪量の決定

モンタナとワイオミングに起こるような特に風の強い領域では、冬期において、雪がないのに強風がよく起こる期間があるので、風の記録から計算された潜在的吹雪量( $Q_{upot}$ )は、実際の吹雪量よりはるかに大きい。

降雪が風よりも特定要因であるか かを決定する 1 つの方法は、吹雪量について計算するのに式(4.4)を使用することである。このとき、すべての降雪は風によって無限に長い吹走距離を移動させられると仮定する。

##### 4.7.4.1 平均した降雪の相当水量の評価

降雪を相当水量として算出する方法( $S_{we}$ )は、吹きだまり発達期間において得られた合計降雪量を計算して、相当水量を得るためにこの値を 10 で割ることである。(式(4.2))。

最初と最後の月の降雪日数が、降雪期間では比例していると仮定することによって、降雪量は算出されている。

また、冬の降水量のすべてが雪となっている場所では、降水量データから降雪相当水量を算出することもできる。

しかしながら、以下の例は、吹きだまり発達期間に降 がある所では、降水量データは  $S_{we}$  を算出するのに使用されるべきでないことを示す。

例題(ニューヨーク州 バッファロー)：

与えられた条件：

- a) 吹きだまり発達期間 = 12月8日～3月14日 (4.7.2節)
- b) 天気のデータ

月降雪量					月降水量				
	Dec	Jan	Feb	Mar		Dec	Jan	Feb	Mar
cm	58	63	45	29	mm	86	76	61	74
in.	23	25	18	11	in.	3.4	3.0	2.4	2.9

問：

吹きだまり発達期間における降雪相当水量 ( $S_{we}$ )

- a) 降雪データ
- b) 降水量データ
- c) 対策工を設計するための  $S_{we}$  の最適な算出

解答：

- a) 降雪データと式(4.2)より：

$$\text{期間中の降雪量} = (24/31)(58) + 63 + 45 + (14/31)(29) = 166 \text{ cm} = (65 \text{ in.})$$

$$S_{we} = 166/10 = 16.6 \text{ cm} = 166 \text{ mm} (6.5 \text{ in.})$$

- b) 降水量のデータより：

$$S_{we} = (24/31)(86) + 76 + 61 + (14/31)(74) = 237 \text{ mm} (9.3 \text{ in.})$$

- c) 冬の間に降った ；したがって、最適な算出値  $S_{we} = 166 \text{ mm} (6.5 \text{ in.})$

#### 4.7.4.2 降雪に基づく潜在的吹雪量の算出

降雪データに基づく潜在的吹雪量( $Q_{spot}$ )は、式(4.4)から計算されます。 $S_{we}$ の単位が mm、T の単位が m、 $Q_{spot}$  が kg/m である。

$$Q_{spot} = 0.5 T S_{we}$$

標準的事例では、最大の吹走距離(T)が 3000m(3.4.6)と等しいと仮定する。それは、この報告書を通して、明確な一変数として っている。しかしながら、もし、今後の研究で示されるなら、他の値が使用されることを す。



例題(ニューヨーク州 バッファロー):
<p>与えられた条件:</p> <p>a) 降雪相当水量 (<math>S_{we}</math>) = 166 mm (6.5 in.)</p> <p>b) 仮定 <math>T = 3\,000\text{ m}</math> (10,000 ft)</p>
問: 降雪データによる潜在的吹雪量 ( $Q_{spot}$ )
<p>解答: 式 (4.4)</p> $Q_{spot} = 0.5 T S_{we} = (0.5) (3000) (166) = 249\,000\text{ kg/m} \text{ (167,340 lbs/ft)}$

#### 4.7.5 無限の吹走距離下の潜在吹雪量の決定

降雪量のデータから計算された潜在吹雪量( $Q_{spot}$ )が、風のデータより計算された潜在吹雪量( $Q_{upot}$ )よりも大きければ、風が吹雪量を支配する主要因となり

$$Q_{spot} > Q_{upot} \quad (4.12)$$

$Q_{spot} < Q_{upot}$  であれば、潜在吹雪量は(3.11)式で与えられる。 $Q_{inf}$  は kg/m、 $S_{rwe}$  は mm、 $T$  は m として、

$$Q_{inf} = 0.5 T S_{rwe} \quad (4.13)$$

この計算は、吹き払われる雪の相当水量  $S_{rwe}$  の推定が必要とされる。風の強い地方であっても、多くても冬期降雪の 70% が風によって再輸送される。この値は、安全側の設計が望まれ、または適用されるのであれば妥当である。第 2 の方法は、吹きだまり成長終期の積雪水量の推定は、吹走距離上の実際の積雪測定か、吹走距離での植生と同等の高さの積雪深と想定するかによって設定することである。おおよそ、融雪前の積雪密度は、平均  $250\text{kg/m}^3$  と仮定される。

例題（ニューヨーク州 バッファロー）：
与えられた条件： <ul style="list-style-type: none"> <li>a) Road oriented north/south（東方の南北を通る道路）</li> <li>b) <math>Q_{upot} = 91\,983\text{ kg/m}</math>（妥当値）（4.7.3.2 節）</li> <li>c) <math>Q_{spot} = 249\,000\text{ kg/m}</math>（4.7.4.2 節）</li> <li>d) 降雪の相当水量（<math>S_{we}</math>）= 166mm = 16.6cm（4.7.4.1 節）</li> <li>e) 吹走距離上の植生の平均高さ = 30cm</li> </ul>
問い：無限の吹走距離下の潜在吹雪量（ $Q_{inf}$ ）
<p>解答：式(4.12)より</p> $Q_{spot} \geq Q_{upot} \quad \text{故に} \quad Q_{upot} = 91\,983\text{ kg/m}$ <p>仮に <math>Q_{spot}</math> が <math>Q_{upot}</math> よりも大きくなければ  積雪密度を <math>250\text{kg/m}^3</math> と仮定して  吹き払われる雪の相当水量 <math>S_{rve} = 166 - 0.25(300) = 91\text{ mm}</math>  式(4.13)から  <math>Q_{inf} = (0.5)(3000)(91) = 136\,500\text{ kg/m}</math></p>

## 4.7.6 年平均吹雪量の推定

### 4.7.6.1 輸送式

年平均吹雪量  $Q_{t,ave}$  は、式(4.7)を用いて推定される。

$$Q_{t,ave} = Q_{inf}(1 - 0.14^{F/T})$$

ここで括弧内の吹走距離  $F$  の真値は、 $T$  が通常 3000 m と設定するため、次節の記述により決定される。

### 4.7.6.2 吹走距離の決定

念される地域に近接する気象観測所や、風向を把握しうるローカルな地形の影響により、吹雪の主方向は、念される状況で表現されるのではなく、潜在吹雪量の解析により決定される。4.7.3.2 で計算された吹雪の主風向は、4.6.1.34 で記述されている現地観測によって確認されるべきであろう。

吹雪の主方向が確認された後に、吹走距離は航空写真、画、地形図、または現場により計測される。吹走距離は、防護領域から吹雪量の限界点と定義された風上側の境界線までとする。

3で記述したように、境界線のいくつかは、林や小等の経路や大きな吹きだまりを形成する。高が高いブッシュまたは海岸線や湖岸線などの窪地を含む。吹走距離は、大で明確な境界線がないと、 $F$ は無限で  $0.14^{F/3000}$  がゼロとなる。

吹走距離を決定するために最大限役に立つ手段は、4.6.4節で示した Terra-USA インターネット・ウェブサイト上で利用できるデジタル正射区画写真である(<http://terraser-ver-usa.com>)。吹走距離は、画からも決定できる。吹走距離を定める地形や植生を決定するために XMap や 3-DTopoQuads を組み合わせて使用可能な DeLorme の SAT10 画ソフトウェアが利用できる。一例を 6.5.5 節の図 6.91 に示す。

例題 (ニューーク州 バッフ ロー) :
与えられた条件 : a) $Q_{inf} = 91\,983 \text{ kg/m}$ (4.7.5 節) b) $T = 3000\text{m}$ (一般的な想定値)
問い : 年平均吹雪量 $Q_{t,ave}$ を計算せよ a) 吹走距離が 500m の場合 b) 吹走距離が無限の場合
解答 : 式(4.7) $Q_{t,ave} = Q_{inf}(1-0.14^{F/T})$ より a) $F=500\text{m}$ , $Q_{t,ave} = 91\,983 (1-0.14^{500/3000}) = 91\,983 (1-0.14^{0.1667})$ $= 91\,983 (1-0.7206) = 25\,700 \text{ kg/m}$ b) $F=\text{無限}$ , $Q_{t,ave} = 91\,983 (1-0) = 91\,983 \text{ kg/m}$

#### 4.7.6.3 吹雪量の分類

表 4.5 は、吹雪量の対数スケールに基づいた、吹雪の厳しさの分類を示している。この分類は、大局的に吹雪障害を定義し、次章における一般的な制御方法のガイドラインの組みをなしている。

例えば、ニューーク州バッフ ローでは、500m の吹走距離は「クラス 3 小一中」に位置づけられている。そこでは、無限の吹走距離は「クラス 5 中一大」に位置づけられる。

表 4.5 年平均吹雪量の厳しさの分類

クラス	吹雪量 (t/m)	種類
Class	Snow Transort (t/m)	Description
1	<10	Very light
2	10 – 20	Light
3	20 – 40	Light-to-moderate
4	40 – 80	Moderate
5	80 – 160	Moderately severe
6	160 – 320	Severe
7	>320	Extreme

## 4.8 設計吹雪量の決定

年平均吹雪量  $Q_{t,ave}$  を推定する際、次なる 問は“最適な設計年数は何?”となる。平均以上の冬期間の吹雪量が、完全に制御しうる防雪容量となるのではないか。そうだとしたら、最適な設計年数は 10 年のうち 2 年、それとも 1 年? 同様の 問がカルバートの寸法や他の水理構造物で言われている。しかしながら、吹きだまりの制御方法の場合は、たとえ吹雪量が何年かのうちに設計容量を超えるにしても、それまでに生じた便益が存在するという事実により問題を難しくしている。加えて、設計年数の超過が、壊滅的な結果を生み出さない。それは単に制御方法による便益が生じないという意味をなす。

設計年数の吹雪量と年平均吹雪量との比は、設計係数と ばれ、 $K$ と表現される。年平均吹雪量  $Q_{t,ave}$  に設計係数を けることで、設計吹雪量  $Q_{des}$  が求まる。

$$Q_{des} = K \cdot Q_{t,ave} \quad (4.14)$$

例えば、 $K=1$  であれば、防雪柵の防雪容量は年平均吹雪量と同様となる。 $K=0.5$  であれば、防雪容量は年平均吹雪量の半分となる。ここでの議論は、吹きだまり制御のための適切な設計係数を選定する設計者を支援することにある。

### 4.8.1 年吹雪量の分布確率

よりよい情報が利用できるようになるまで、以下の仮説が提案されている (Tabler 1997; Tabler 1982)。

年吹雪量を調節する係数は、通常平均 1.0 と変数 0.0964 で分布する。

この分布は、年間流量 (Markovic 1965)、ワイオミングの ー 所での年最大吹きだまり量 (Tabler 1982)、アラスカ州プルドーベイにおける東よりの風での吹雪量 (Tabler, Benson et al. 1990) を含む、水文学的変数の種類に適用することを示している。したがって、年吹雪量の分布確率は、以下のように与えられる。

$$F(K) = \int_{-\infty}^K s(2s)^{0.5-1} \exp\{-(K-1)2/2s^2\} ds \quad (4.15)$$

ここで、 $K$  は設計係数 ( $Q_{des} / Q_{t,ave}$ )、 $F(K)$  は頻度 ( $F$  は吹走距離)、 $s^2$  は変数

式 4.15 から求められる超過確率は、表 4.6 のように示される。この表の解を説明すると、長期間の平均値 ( $K=1.50$ ) よりも大きい吹雪量 50% は、100 年のうち 5 年発生することが予見される。設計係数  $K$  は、いかなる再現期間でも、この表から直接取得できる。次節では、設計係数が費用対効果の割合と関係づけられている。

表 4.6 設計係数  $K$  を表現した際の年吹雪量の超過確率。評価は  $1-F(K)$  であり、 $F(K)$  は  $\sigma^2$  が 0.0964 として式 4.15 で与えられる (Tabler 1982 を修正)。

K	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.0	0.9994	0.9993	0.9992	0.9991	0.9990	0.9989	0.9988	0.9986	0.9985	0.9983
0.1	0.9981	0.9979	0.9977	0.9975	0.9972	0.9969	0.9966	0.9962	0.9959	0.9955
0.2	0.9950	0.9945	0.9940	0.9934	0.9928	0.9921	0.9914	0.9906	0.9898	0.9889
0.3	0.9879	0.9869	0.9857	0.9845	0.9832	0.9818	0.9804	0.9788	0.9771	0.9753
0.4	0.9733	0.9713	0.9691	0.9668	0.9644	0.9618	0.9590	0.9561	0.9530	0.9498
0.5	0.9463	0.9427	0.9389	0.9350	0.9308	0.9264	0.9218	0.9170	0.9119	0.9067
0.6	0.9012	0.8955	0.8895	0.8833	0.8769	0.8702	0.8633	0.8561	0.8486	0.8410
0.7	0.8330	0.8249	0.8164	0.8077	0.7988	0.7896	0.7802	0.7706	0.7607	0.7506
0.8	0.7403	0.7297	0.7190	0.7080	0.6968	0.6855	0.6740	0.6623	0.6504	0.6384
0.9	0.6263	0.6140	0.6017	0.5892	0.5766	0.5640	0.5513	0.5385	0.5257	0.5128
1.0	0.5000	0.4872	0.4743	0.4615	0.4487	0.4360	0.4234	0.4108	0.3983	0.3860
1.1	0.3737	0.3616	0.3496	0.3377	0.3260	0.3145	0.3032	0.2920	0.2810	0.2703
1.2	0.2597	0.2494	0.2393	0.2294	0.2198	0.2104	0.2012	0.1923	0.1836	0.1751
1.3	0.1670	0.1590	0.1514	0.1439	0.1367	0.1298	0.1231	0.1167	0.1105	0.1045
1.4	0.0988	0.0933	0.0881	0.0830	0.0782	0.0736	0.0692	0.0650	0.0611	0.0573
1.5	0.0537	0.0502	0.0470	0.0439	0.0410	0.0382	0.0356	0.0332	0.0309	0.0287
1.6	0.0267	0.0247	0.0229	0.0212	0.0196	0.0182	0.0168	0.0155	0.0143	0.0131
1.7	0.0121	0.0111	0.0102	0.0094	0.0086	0.0079	0.0072	0.0066	0.0060	0.0055
1.8	0.0050	0.0045	0.0041	0.0038	0.0034	0.0031	0.0028	0.0025	0.0023	0.0021
1.9	0.0019	0.0017	0.0015	0.0014	0.0012	0.0011	0.0010	0.0009	0.0008	0.0007
2.0	0.0006	0.0006	0.0005	0.0005	0.0004	0.0004	0.0003	0.0003	0.0003	0.0002

#### 4.8.2 設計係数による除雪費用の変化の程度

4.8.1 で示した分布確率は、設計年数の費用対効果の変化率の程度で定める経済分析に寄与している。もし便益が除雪機械の経費削減のみを得るとしたら、便益は効果的な制御方法による吹雪捕捉に比例するであろう。

図 4.12 は、4.8.1 での頻度分布を用いた発生確率による、可能な限りの吹雪量を平均的に捕捉する計算により得られた、設計係数と超過確率との関係による除雪費用の長期間の縮減を示している。 $K > 2$  では超過確率が非常に小さくなるため、実用的な関心は  $K = 2$  の範囲に限定される。この範囲の間で、除雪費用の長期間の縮減  $C_{red}$  は、式 4.16 により近似される。

$$C_{red} = 142.9 - 76.28 K^2 + 13.91 K^3 \quad (4.16)$$

平均的な冬期での設計年数（100 年のうち 50 年を超える防雪容量）を使用  
 した場合は、除雪金額が 80%に低減される。2 倍の防雪容量の場合は、金額は  
 たった 11%に低減される。

図 4.12 は、除雪コストを確実に縮減するための設計係数を選定するのに用  
 いられている。

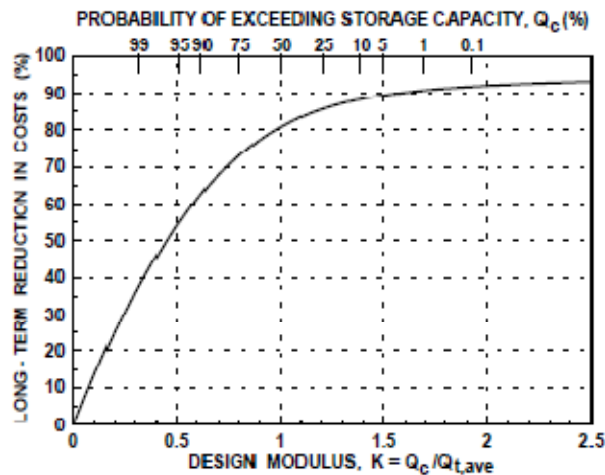


図 4.12 設計年数の作用による吹雪量の長期間の縮減

<p>例題(ニューヨーク州 バッファロー)：</p>
<p>与えられた条件：</p> <p>a) 吹走距離 <math>F = 500\text{m}</math></p> <p>b) 年平均吹雪量 <math>Q_{t,ave} = 25\,700\text{ kg/m} = 25.7\text{ t/m}</math></p>
<p>問い：</p> <p>a) 平均年の設計吹雪量 <math>Q_{des}</math></p> <p>b) 10 年のうち 1 年を超える設計吹雪量 <math>Q_{des}</math></p> <p>c) 除雪費用を 90%に低減する設計吹雪量 <math>Q_{des}</math></p>
<p>解答：式 (4. 14) <math>Q_{t,ave} = K Q_{t,des}</math></p> <p>a) 平均年では、超過確率は 0.5 となる。表 4.6 から <math>K = 1.0</math></p> <p>故に、<math>Q_{des} = (1.0) Q_{t,ave} = 25.7\text{ t/m}</math></p> <p>b) 10 年のうち 1 年を超える場合は、超過確率は 0.1 となる。表 4.6 から <math>K = 1.40</math></p> <p>故に、<math>Q_{des} = (1.40) Q_{t,ave} = (1.40) (25.7) = 36.0\text{ t/m}</math></p> <p>c) 除雪費用を 90%に低減する場合は、図 4.12 から <math>K = 1.6</math></p> <p>故に、<math>Q_{des} = (1.6) Q_{t,ave} = (1.6) (25.7) = 41.1\text{ t/m}</math></p>



#### 4.8.3 設計常数のための費用対効果の評価基準

削減された除雪費用のみを単純に便益と考えると、防雪柵により期 される  
年間の除雪便益  $B_{sr}$  は次式により与えられる

$$sr = sr_{red} \cdot a_e/100 \quad (4.17)$$

ここで、 $C_{sr}$  は機械除雪費の原単位で、 $C_{red}$  は道路上の堆雪の減少割合 (%)  
である。仮に防雪柵がなく、全ての吹雪が路上に堆雪すると考えると、 $C_{red}$  は  
柵の長期の捕捉率に等しい。全く現実的ではないが、この単純な仮定が最適な  
設計常数を決定するうえでの有効な礎となる。

3 章で説明されているように、空隙率 50%の防雪柵の防雪容量は、次式のよ  
うに有効柵高  $H(m)$ によって変化する。

$$= 8.5^{2.2} \quad (4.18)$$

$Q_c$  は、柵の長さ(m)当たりの質量 (t) である。6.3.2.1 節で述べるように、  
設計吹雪量は防雪柵に必要とされる防雪容量である。それゆえ、

$$Q_c = Q_{des} = KQ_{t,ave}$$

防雪柵の建設費用は(適当な近似値として)高さと共に直線的に増加するので、  
防雪柵の年平均コストは次式のように、設計常数と年平均吹雪量に関係する。

$$s = a = a_{re} = a \cdot (a_e/8.5)^{1/2.2} \quad (4.19)$$

ここで、

$C_{sf}$ = 防雪柵の年平均コスト

$O$ = 年間メンテナンス費用

$ait$ = 利  $i$  と償却期間  $t$  における固定投資 1 ドル当たりの年間資本負担

$I$ = 防雪柵に対する固定資本投資

$H_{req}$ = 設計吹雪量を溜めるために必要とされる柵の高さ

$P_f$ = 柵の正面領域の平方メートル当たりの資本投資費用(柵の長さ 1m 当たり  
のコストを高さで割った値)

固定投資 1 ドル当たりの年間資本負担、 $ait$  は次式で与えられる。

$$ait = i/[1 - (1 + i)^{-t}] \quad (4.20)$$

ここで、 $i$  と  $t$  は、それぞれ利 と償却期間である(Burington 1948)。

図 4.13 は、年平均吹雪量  $Q_{t,ave}$  と機械除雪の費用と共に費用対効果がどの  
ように変化するのか示している。以下は代表的な条件である。

$i = 7\%$

$t = 25$  年

$P_f = \$15(\text{m}^2 \text{あたり})$

$Q_c = Q_{t,ave}$

$O = \text{初期資本投資の 5\%}$

図 4.13 年平均吹雪量  $Q_{t,ave}$  の変動  
と機械除雪費用による防雪柵の費用  
対効果 (Tabler (1994) を修正)

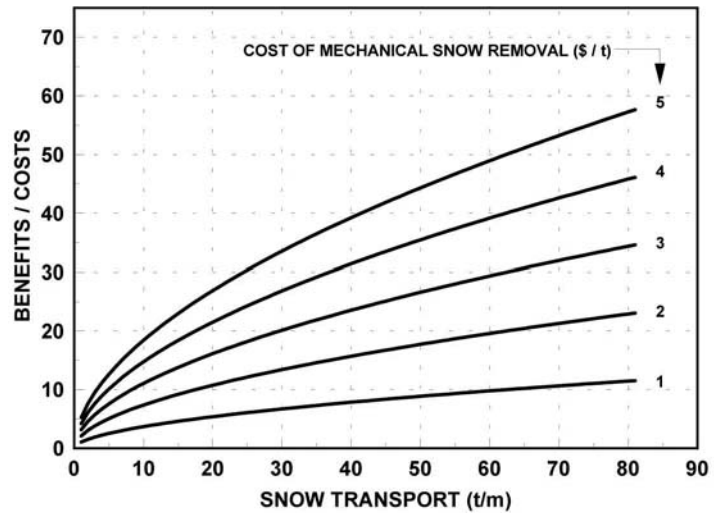


図 4.14 は設計常数  $K$  に従い、どのように費用対効果が変化するか示している。条件は以下の通り。

$i = 7\%$

$t = 25 \text{ 年}$

$P_f = \$15(\text{高さ } m \text{ あたり})$

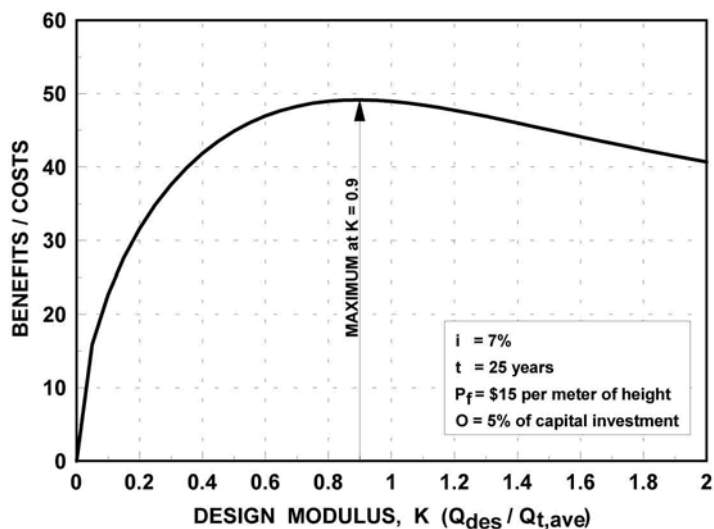
$Q_{t,ave} = 60 \text{ t/m}$

$O = \text{初期資本投資の 5\%}$

$C_{sr} = \$5 / t$

図 4.14 設計常数  $K$  の変化による防  
雪柵の費用対効果、機械除雪費の原  
単位を 5 ドル/t、年平均吹雪量を  
60t/m と仮定 (Tabler 1994)

$Q_{t,ave}$ ,  $O$ ,  $P_f$ ,  $i$ , および  $t$  の全  
ての値に対して、費用対効果はおお  
よそ  $K = 0.90$  で最大に達する。すな  
わちその時、防雪容量は年平均吹雪  
量の 90% に等しい。



もし雪対策の目的が単に機械除雪の経費節減であるならば、防雪柵の防雪容量を年平均吹雪量 ( $K=1$ ) と等しいとして設計することは、経済的に理にかなっており、他の評価基準が無い場合は 1.0 の値を使用すべきである。しかしながら、安全性向上を目的とした計画においては、より厳しい評価基準を導入したほうが良いだろう。

例：バッファロー ニューヨーク

既知の条件:

- a) 吹走距離  $F = 500 \text{ m}$  (1640 ft)
- b) 年平均吹雪量  $Q_{t,ave} = 25\,700 \text{ kg/m} = 25.7 \text{ t/m}$  (8.6 tons/ft)
- c) 設計常数  $K = 1.0$ ;  $Q_{des} = 25.7 \text{ t/m}$  (8.6 t/ft)
- d) 必要柵高 ( $H_{req}$ ): 1.65 m (5.4 ft)
- e) 機械除雪費  $C_{sr} = \$2.50/\text{t}$  (\$2.75/ton)
- f) 防雪柵等の対策費用  $P_f = \$21.50/\text{m}^2$  (\$2.00/ft<sup>2</sup>)
- g) 年間メンテナンス費用  $O = \text{投資の } 5\% = \$1.075/\text{m}^2$  (\$0.10/ft<sup>2</sup>)
- h) 耐用年数  $t = 25 \text{ 年}$
- i) 利息  $i = 6\%$

問:

- a) すべての吹雪が道路上に堆積すると仮定した場合の防雪柵費用に対する除雪便益の割合

解答:

- a) 式 (4. 20) から:  $a_{it} = 0.07823$
- b) 除雪費用の削減  $= C_{red} = 81\%$  (図 4. 9から)
- c) 式 (4. 17) から除雪便益  $B_{sr}$ :  

$$B_{sr} = C_{sr} C_{red} Q_{des} / 100 = (2.50)(81)(25.8) / 100 = \$52.24/\text{m}$$
- d) 式 (4. 19) から防雪柵費用  $C_{sf}$ :  

$$C_{sf} = O + a_{it} P_f H_{req}$$

$$= (1.075)(1.65) + (0.07823)(21.50)(1.65) = 4.55 \text{ \$/m}$$
- e) 除雪便益 / 防雪柵費用  $= \$52.24 / 4.55 = 11.5 : 1$

## 4.9 設計データ要約シート

以下は、この章で計算された設計パラメータをまとめるための便利な様式である。

### 吹きだまり対策設計データ

箇所名 / 位置: \_\_\_\_\_

箇所 I.D.: \_\_\_\_\_

吹きだまり成長期間: \_\_\_\_\_

降雪 ( $S$ ): \_\_\_\_\_

降雪水当量 ( $Swe$ ): \_\_\_\_\_

季節降水量: \_\_\_\_\_

地吹雪率 ( $\theta$ ): \_\_\_\_\_

吹雪の水当量 ( $Srwe$ ): \_\_\_\_\_

風の履歴による可能最大吹雪量 ( $Q_{upot}$ ): \_\_\_\_\_

蒸発散式による可能最大吹雪量: ( $Q_{spot}$ ): \_\_\_\_\_

関連する潜在的な吹雪量 ( $Q_{inf}$ ): \_\_\_\_\_

吹走距離( $F$ ): \_\_\_\_\_

年平均吹雪量 ( $Q_{t,ave}$ ): \_\_\_\_\_

設計常数 ( $K$ ): \_\_\_\_\_

設計吹雪量: \_\_\_\_\_

超過確率: \_\_\_\_\_

重要な輸送方向: \_\_\_\_\_

平均堆雪方向(s): \_\_\_\_\_

問題を引き起こす他の風向: \_\_\_\_\_

構造設計に用いる風速: \_\_\_\_\_

## 4.10 参考文献

- Burington, R. S. 1948. *Handbook of mathematical tables and formulas*. Handbook Publishers, Inc., Sandusky, OH.
- Cember, R.P and D.S. Wilks. 1993. *Climatological atlas of snowfall and snow depth for the northeastern United States and southeastern Canada*. Northeast Regional Climate Center, Research Publication RR93-1 (Cornell University, Ithaca, NY).
- Cember, R.P K.L. Eggleston, and D.S. Wilks. 1993. *Digital snowfall and snow depth probabilities for the northeastern United States and southeastern Canada*. Northeast Regional Climate Center, Digital Data Set Series, Data Set No. DS93-1 (Cornell University, Ithaca, NY).
- Changery, Michael J. 1978. *National Wind Data Index Final Report (Number HCO/T1041, UC-60)*, prepared for the U.S. Department of Energy, Division of Solar Technology.
- Kaminski, D. F. and S. Mohan 1991. PASCON: An expert system for passive snow control on highways. *Transportation Research Record* 1304: 193-201.
- Markovic, Radmilo D. 1965. *Probability functions of best fit to distributions of annual precipitation and runoff*. Colorado State University, Hydrology Paper No. 8.
- Tabler, R. D. 1968. Physical and economic design criteria for induced snow accumulation projects. *Water Resources Research* 4(3): 513-519.
- . New engineering criteria for snow fence systems. *Transportation Research Record* 506: 65-78.
- . 1975. Estimating the transport and evaporation of blowing snow. In: *Symposium on Snow Management on the Great Plains (Bismarck, N. Dak.; July 1975) Proceedings*, Great Plains Agricultural Council Publication 73: 85-104.
- . 1982. Frequency distribution of annual peak water-equivalent on Wyoming snow courses. In: *Western Snow Conference (Reno, Nev.; April 20- 23, 1982) Proceedings* 50:139-148. Also *Eastern Snow Conference Proceedings* 50: 139-148.
- . 1986. *Snow fence handbook (Release 1.0)*. Tabler and Associates, Laramie, Wyoming.
- . 1987. Slide rule for snow fence design. In: *Western Snow Conference (Vancouver, B.C.; April 14-16, 1987) Proceedings* 55:162-165.

———. 1988. Estimating dates of the snow accumulation season. In: *Western Snow Conference (Kalispell, Montana; April 19-21, 1988) Proceedings* 56:35-42.

———. 1991a. Snow transport as a function of wind speed and height. In: *Cold Regions Engineering. Proceedings, Cold Regions Sixth International Specialty Conference TCCP/ASCE* (Feb. 26-28, 1991; West Lebanon, New Hampshire): pp. 729-738.

———. 1991b. *Snow fence guide*. Strategic Highway Research Program, Report SHRP-H-320, National Research Council, Washington, D.C.

———. 1993. New guidelines for blowing snow control. In: *Proceedings of International Workshop on Winter Road Management (IWWRM)* (January 26- 29, 1993; Sapporo, Japan). pp. 69-81.

———. 1994. *Design guidelines for the control of blowing and drifting snow*. Strategic Highway Research Program, Report SHRP-H-381.

———. 1997. *Computer-aided design of drift control measures*. Final Report: Research Agreement # 47608, Research Project # FHWA-WY-97/02, prepared for the Wyoming Department of Transportation.

———. 2000. Climatologic Analysis for Snow Mitigation in New York State. Final Report Prepared for Brookhaven National Laboratory Associated Universities Inc., Upton, NY.

Tabler, R. D., C. S. Benson, B. W. Santana, and P. Ganguly. 1990. Estimating snow transport from wind speed records: Estimates versus measurements at Prudhoe Bay, Alaska. *Western Snow Conference Proceedings* 58: 61-72.

Tabler, R. D., N. H. Berg, D. Trabant, H. Santeford, and P. A. Rechard. 1990. Measurement and evaluation of winter precipitation. *Cold Regions Hydrology and Hydraulics, ASCE Technical Council on Cold Regions Engineering Monograph*. pp. 9-38.

Tabler, R. D. and R. L. Jairell. 1971. *A recording gage for blowing snow*. USDA Forest Service Research Note RM-193.

———. 1993. Trapping efficiency of snow fences and implications for system design. *Transportation Research Record* 1387: 108-114.

Tabler, R. D., J. W. Pomeroy, and B. W. Santana. 1990. Drifting snow. In: *Cold Regions Hydrology and Hydraulics, ASCE Technical Council on Cold Regions Engineering Monograph*. pp. 95-145

Tabler, R. D. and R. A. Schmidt, Jr. 1972. Weather conditions that determine snow transport distances at a site in Wyoming. In: *UNESCO / WMO Symposia on the Role of Snow and Ice in Hydrology (Banff, Alberta; September 6- 13, 1972) Proceedings*: 118-127.

———. 1986. Snow erosion, transport, and deposition in relation to agriculture. In: *Proceedings, Symposium on Snow in Agriculture Symposium (Swift Current, Sask.; July 9-11, 1985)*, H. Steppuhn and W. Nicholaichuk, ed. Great Plains Agricultural Council Publication No. 120. pp. 11-58.

Wernstedt, F.L. 1972. *World climatic data*. Climatic Data Press.

Yevjevich, Vujica. 1972. *Probability and statistics in hydrology*. Water Resources Publications, Fort Collins, CO.



## 5 訳者

本書は「道路雪氷広場」(主 査:独)土木研究所寒地土木研究所/(特非)雪氷ネットワーク)の勉強会を契機として、雪氷関係技術者等の自主的な勉強会によって翻訳されたものである。

翻訳者

所属	氏名
(独)土木研究所 寒地土木研究所 (雪氷チーム)	松澤 勝
	中村 浩
	伊東 靖彦
	川中 敏朗
	金子 学
	上田 真代
	渡邊 崇史
	武知 洋太
(独)土木研究所 寒地土木研究所 (道央支所)	横山 博之
	吾田 洋一
(独)土木研究所 寒地土木研究所 (寒地機械技術チーム)	山崎 貴志
(有)アークス	孫田 敏
(一財)日本気象協会北海道支社	永田 泰浩
	丹治 和博
	田中 裕樹
	二階堂 ひさえ
	石本 敬志
(株)アルゴス 北海道支店	原田 裕介
(株)シー・イー・サービス	井上昌幸
	村上学
(社)北海道開発技術センター	金田 安弘
(特非)雪氷ネットワーク	竹内 政夫
(株)雪研スノーイーターズ	西田 浩平
(株)ノースプラン	飯田 隆元
HRS(株)	鈴木 清史

Controlling Blowing and Drifting Snow with Snow Fences and Road Design ( )		
2011 年 2 月 録翻訳版発		
発行者 (独)土木研究所寒地土木研究所・(特非) 雪氷ネットワーク		
原著者 Ronald D. Tabler, Tabler and Associates Niwot, Colorado		
翻訳者 道路雪氷広場 勉強会参加有志		
連 先		
062-8602	平区平岸 1 条 3 丁目 寒地土木研究所 雪氷チーム	TEL 011-841-1746
064-0804	中 区南 4 条西 6 丁目 11-2 全日ビル 5F 雪氷ネットワーク	TEL 011-272-3540