

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**

2003.8

日本語訳
道路雪氷広場 勉強会参加有志
2011.4 初版
2012.8 追加補訂版

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。彼の研究は日本でも高く評価され、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。

タブラー氏から原著を見せられた時に、自分自身もそれから学んだように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い快諾を得ていた。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によって世界的に知られるようになった。タブラー氏は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。また北海道の吹雪対策への提言を含めて土木試験所報告81号にまとめた。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2010年3月に病で没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

（本文は、初版発刊時点で書かれたものをそのまま掲載しています）

目次

翻訳にあたって

第1章	はじめに	1
1.1	読者対象	1
1.2	目的	2
1.3	内容と構成	2
1.4	参考文献	3
第2章	効果的な防雪対策	4
2.1	要約	4
2.2	防雪対策の重要性	4
2.3	吹雪対策が見過ごされてきた背景	6
2.3.1	防雪柵利用の歴史	6
2.3.2	吹きだまり制御対策が下火になった理由	7
2.4	ワイオミングの事例	8
2.5	雪氷上での防雪柵の効果	14
2.6	異なる事例	15
2.7	防雪柵の費用対効果	17
2.8	道路設計の効果	19
2.9	結論	19
2.10	参考文献（第一著者名のみ翻訳）	20
第3章	雪の移動と吹きだまりの形成	21
3.1	概要（範囲）	21
3.2	要点（ハイライト）	21
3.3	雪粒子の特徴	22
3.4	吹雪量	23
3.4.1	定義	23
3.4.2	雪の輸送の形態	23
3.4.3	風速の高度分布	27
3.4.4	吹雪量率と垂直分布	28
3.4.5	吹雪時の視程について	30
3.4.6	吹雪の昇華（訳者注：主に昇華蒸発）について	32
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	35

3.4.8 雪面の形状	37
3.5 雪の浸食と堆積の過程	38
3.5.1 浸食	38
3.5.2 堆積	39
3.5.3 粒子間の結合	39
3.5.4 雪の圧密	40
3.6 植生による雪の堆積と保持	41
3.7 道路切土と窪地の堆雪	42
3.7.1 堆雪の進行課程	42
3.7.2 平衡斜面	43
3.7.3 捕捉率	45
3.8 防雪柵での堆雪	45
3.8.1 防雪柵の高さ、間隔、下部間隙の定義	45
3.8.2 風と吹雪粒子について空隙のある防雪柵の効果	46
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	48
3.8.4 空隙の無い防雪柵での吹きだまり雪丘の成長	51
3.8.5 平衡雪丘	52
3.8.6 空隙のある防雪柵の捕捉率	72
3.9 参考文献	77
 第4章 吹雪に関する課題の定量化	 82
4.1 範囲	82
4.2 ハイライト	82
4.3 課題の特定	83
4.4 問題点の分析	84
4.4.1 問題の構成	84
4.4.2 問題点と影響の把握	85
4.4.3 吹雪の発生源	85
4.4.4 これらの問題を引き起こす原因	86
4.5 候補となる吹雪対策	88
4.6 データと情報の収集	89
4.6.1 冬期野外観測	89
4.6.2 航空写真の撮影	92
4.6.3 気象データの収集	93
4.6.4 地理的情報	97
4.6.5 道路構造	98

4.6.6	その他の情報	98
4.7	年平均吹雪量の見積もり	99
4.7.1	手順の概要	99
4.7.2	吹きだまり発達期間の日数の決定	101
4.7.3	風速値からの潜在吹雪量の計算	106
4.7.4	降雪に基づく潜在的吹雪量の決定	110
4.7.5	無限の吹走距離下の潜在吹雪量の決定	112
4.7.6	年平均吹雪量の推定	113
4.8	設計吹雪量の決定	115
4.8.1	年吹雪量の分布確率	115
4.8.2	設計係数による除雪費用の変化の程度	117
4.8.3	設計常数のための費用対効果の評価基準	118
4.9	設計データ要約シート	122
4.10	参考文献	123
第5章	対策施設の概観	126
5.1	概要	126
5.2	ステップ1：現地調査の準備	126
5.3	ステップ2：現地調査	126
5.4	ステップ3：その他のデータ収集問題点の分析	127
5.5	ステップ4：問題箇所の風向を決定候補となる吹雪対策	127
5.6	ステップ5：	
	用地内における堆雪を最小にする対策検討データと情報の収集	127
5.7	ステップ6：用地外の風上からの吹雪の予測年平均吹雪量の見積もり	128
5.8	ステップ7：対策選択	129
5.8.1	横断面の改良	129
5.8.2	防雪柵	135
5.9	ステップ8：防雪柵の必要高の決定	135
5.10	ステップ9：防雪柵配置の決定参考文献	136
5.11	ステップ10：セットバック量の決定	136
5.11.1	二重柵の柵間距離	138
5.12	ステップ11：地形図上における防雪柵の試験的なレイアウト	138
5.12.1	防雪柵端部配置の決定	138
5.12.2	柵開口部の設計	140
5.13	ステップ12：防雪柵設置位置の決定	140
5.14	ステップ13：柵の素材の選択	142

5.14.1	防雪柵	142
5.14.2	防雪林	144
5.14.3	仮設柵	148
5.15	防雪柵設計のためのミネソタウェブサイト	149
5.16	参考文献	149
第6章	防雪柵（構造物）の設計と配置について	150
6.1	目的	150
6.2	要約	150
6.3	"吹送距離の長い"吹雪を対象とした吹きだめ柵の設計	153
6.3.1	防雪容量	153
6.3.2	柵高の詳細	154
6.3.3	列数の計算	156
6.3.4	空隙率の選択	157
6.3.5	防雪柵の下部間隙	159
6.3.6	定置式の地上防雪柵	159
6.3.7	支柱式防雪柵の素材	173
6.3.8	支柱型柵の補強	188
6.3.9	仮設柵	190
6.3.10	防雪柵型式の特徴	198
6.3.11	防雪柵の風荷重	199
6.4	吹き払い型防雪柵	205
6.4.1	ジェットルーフおよび吹き払い柵	205
6.4.2	風を通さない構造物による吹雪対策	208
6.4.3	側方防雪施設	208
6.5	柵の配置	210
6.5.1	柵の設置方向	210
6.5.2	道路からのセットバック	212
6.5.3	2列の防雪柵の柵間について	218
6.5.4	柵の延長と端部処理の基準	219
6.5.5	デジタル地形図を利用した防雪柵の配置計画	224
6.5.6	コンピュータを利用した防雪柵設計（SNOWMAN）	227
6.5.7	防雪柵設計のためのミネソタ・ウェブサイト	228
6.6	参考文献	229

第7章 防雪植栽	233
7.1 目的	233
7.2 要約	233
7.3 防雪柵ガイドラインとの比較	235
7.4 基本的な方法	235
7.5 樹種	236
7.6 効果	238
7.6.1 必要条件	238
7.6.2 防雪植栽の効果に影響を及ぼす要因	238
7.6.3 コンピュータシミュレーション	239
7.6.4 シミュレーションからの結論	241
7.6.5 開口部	242
7.7 防雪植栽の必要高	243
7.8 防雪植栽のセットバック	244
7.8.1 風下側の吹きだまり長のシミュレーション	245
7.8.2 セットバックに関する指標	246
7.9 防雪林の植栽パターン	248
7.9.1 落葉樹	249
7.9.2 防雪林	251
7.9.3 立体交差を保護する方法	251
7.9.4 防雪植栽	252
7.10 苗畑	255
7.11 敷地造成および植栽	256
7.11.1 実生（みしょう）の苗木	256
7.11.2 大規模移植	257
7.12 植樹後の管理	258
7.13 剪定	258
7.14 費用	259
7.15 防雪植栽の長所と短所	260
7.16 立ったままの（刈り取られていない）トウモロコシ	260
7.17 参考文献	262

訳者について

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 年以來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://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

第 2 章「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。

第 3 章「雪の移動と吹きだまりの形成過程について」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。

第 4 章「吹雪の定量化」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、第 2, 3, 4 章の理解が必要である。

第 5 章「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、第 6～8 章に 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。

第6章「防雪柵の構造と設置方法」、第7章「防雪林」、第8章「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)。

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 2.1 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。



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（Tabler1986）。

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）。

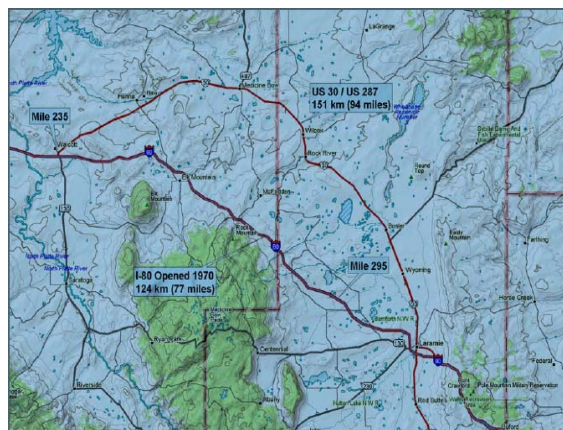


図 2.5. 1900 年に建設された高さ 4 m の、Alaska, Skagway の北およそ 25km に位置する、White pass と Yukon 鉄道の防雪柵。

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

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)。

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であろう (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。

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 2.10~13)。

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った (図 2.14)。

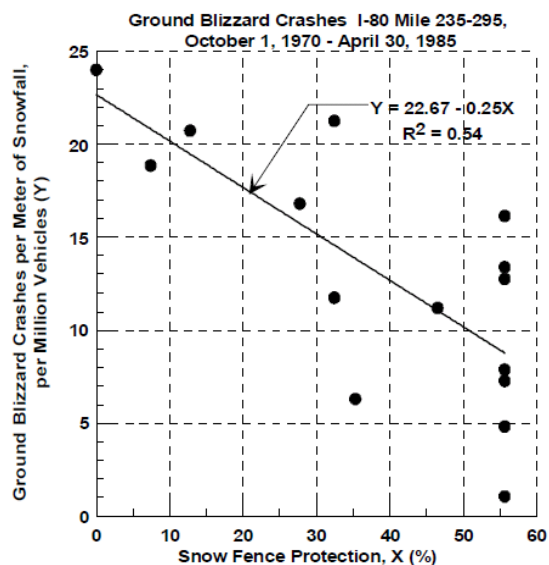


図 2.14 ワイオミング I-80、235～295 マイル区間における防雪柵延長に対する吹雪時の事故率年ごとの降雪深変化を考慮し、10月1日から4月30日の間の降雪深 1m、交通量百万台あたりの事故率を示す (Tabler and Furnish 1982 で更新した)。

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 節では、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。



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。

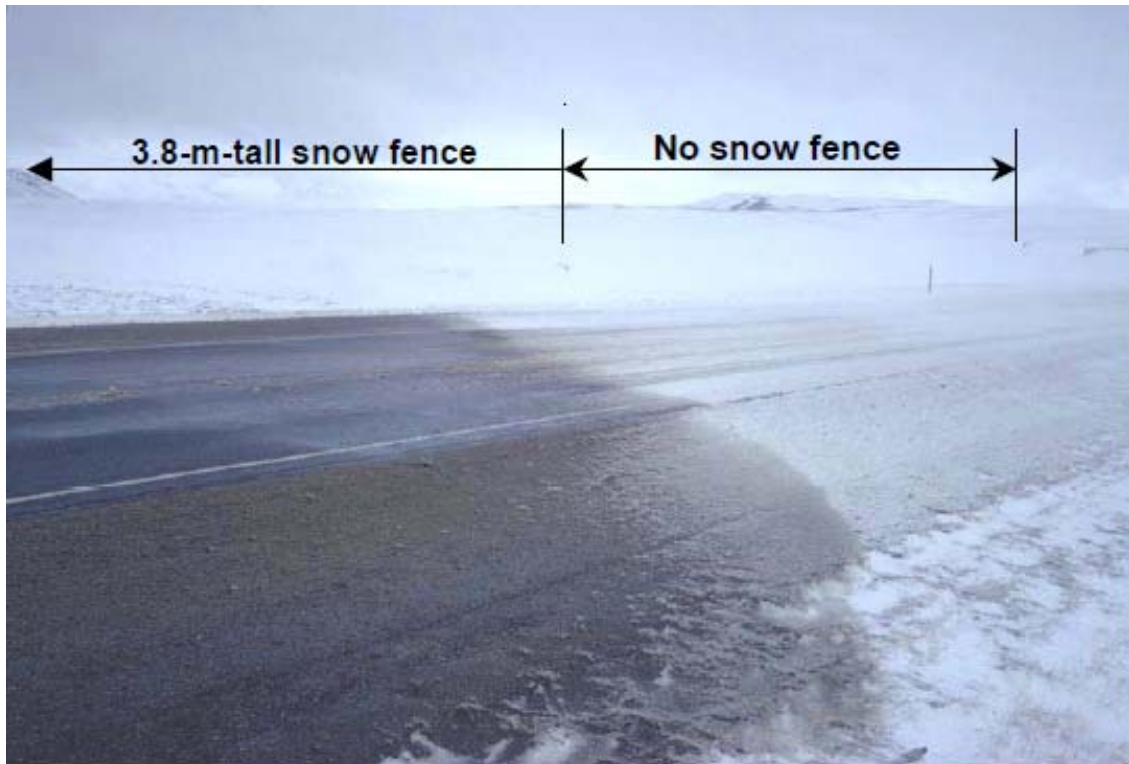


図 2.11 この、濡れ雪が凍結した路面から濡れ雪路面への移行点は、道路の約 150m 風上にある防雪柵の無い領域と、高さ 3.8m の防雪柵で守られている領域に対応している。写真左側へ伸びている部分は吹きだまりに隠れているが、防雪柵の上端は写真中央部に見える。写真の右側が防雪柵の無い領域である（Tabler と Furnish 1982 から引用）。



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)。

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）を減少させる。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る。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°C 違うことも一般的である。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る。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。

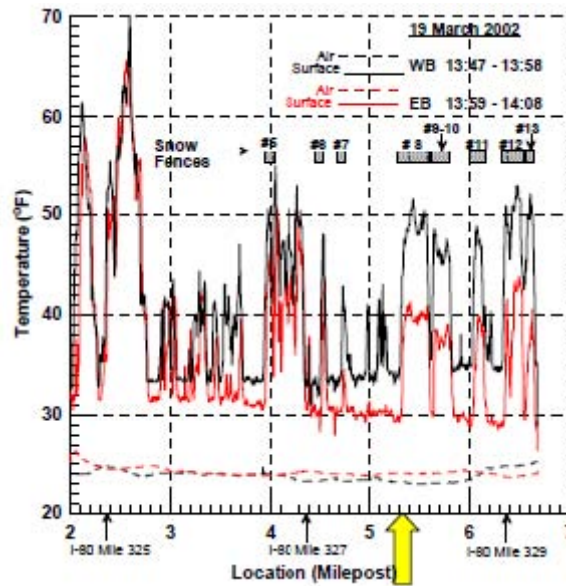


図 2.15 ワイオミング州 I-80 道路における舗装温度
防雪柵の効果を示している。黄色矢印の位置は図 2.16 の場所を示す。網掛の防雪柵の位置
は計測中の風向に依る。



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ある。）



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そ 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。

第 4 章に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ます。

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 の道路通行止め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。

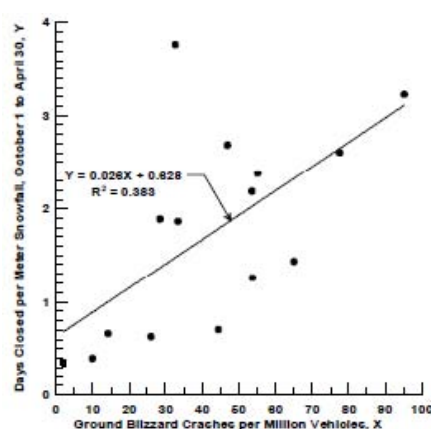


図 2.19 ワイオミング州 I-80 道路 Walcott Junction-Laramie 間における吹雪事故と通行止め時間（1970-1985）との関係

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 m²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。

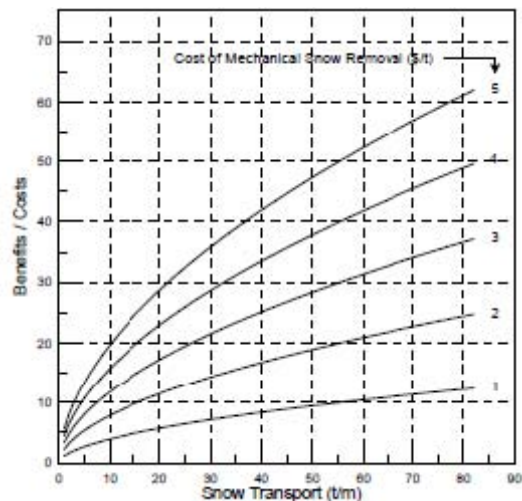


図 2.20 永久柵の B/C は季節的な雪輸送や機械除雪費用に関係する。

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 1980）。

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な要素である。

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（第一著者名のみ翻訳）

- Bli ncoe,L. J（2002年）：2000年自動車事故の経済影響、アメリカ運輸省、全米高速道路交通安全委員会、報告 No.DOT HS 809 446.
- BrownR.H（1983年）：防雪柵の今昔、地理文化学ジャーナル 4、87-98
- Burton, V.R（1925年）：ハイウェイにおける吹きだまりの防止と抑制、土木ニュース記録 95（19）752-754
 Burton, V.R(1928年):防雪柵利用の経済問題の二、三、土木ニュース記録 100,100-120
- Crofutt ,G. A（1880年）：Crofutt の新陸路の観光客と太平洋海岸ガイド、(株)オーヴァーランド出版、オマハ州
- Dodge,G.M(1910年)：ユニオンパシフィック鉄道の建設について、第 61 回議会、2 回目のセッション、議会文書 447。政府印刷局、ワシントン、DC。
- Dunn, S. O（1909年）：雪抑制（対策）、鉄道時代新聞 46(12)、623
- Ehrenberger,J. L(1973年)：シャーマンヒル、E&G出版物、キャラウェイ、ネブラスカ州。
- Farmwld,J A（1986年）：Shishmaref（アラスカ州）の水システムの開発、第 4 回寒地土木国際大会（Feb.24-26,アンカレッジ、アラスカ州）報告書、PP. 597-608。
- Fin ner, E. A（1934年）：ハイウェイの雪対策、ミシガン工学試験場、ミシガン州大学、会報 57。
 Fin ner, E.A（1939年）：ハイウェイ設計による吹きだまり防止、ミシガン工学試験場、ミシガン州大学、会報 86。
- Hbrsher,Lola M（1965年）：1880へのオールバニー郡（ワイオミング）の歴史。
- Johnson,G. D.B(1852年）：（ノルウェー語で翻訳できず）
- Komaov,A.A（1954年）：西シベリアにおける雪の移動と堆積の規則、および雪対策への応用、Trudy 交通工業大学 Tom PP.89-97ロシア語、カナダ国家研究会議技術翻訳 1094（1963）、オタワ、オンタリオ州、カナダ。

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

- 吹雪粒子は、直径 $100\mu\text{m}$ – $200\mu\text{m}$ 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 10cm (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、 5m (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 100km/h (62miles/h) の場合、吹雪粒子の50%が高さ 1m (3.28ft) までに集中し、30%は 2m (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 5m (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 10m (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。 3km (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、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*¹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 cm（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、碎かれ蒸発されて、次第に小さく丸くなる。

セクション 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。

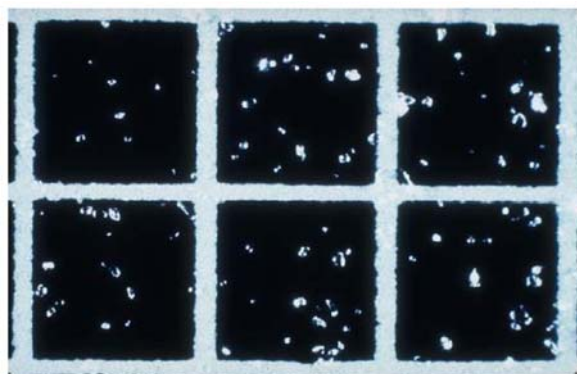


図 3.1 雪表面から 1m (3.3ft) のところに分布する吹雪粒子。

(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

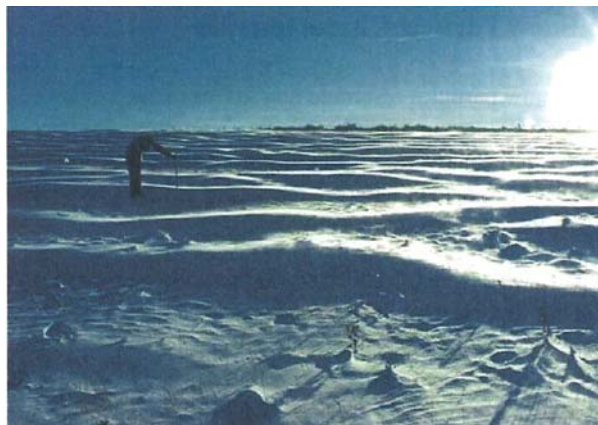
吹雪量とは、雪の塊が、風向に直角な単位幅を単位時間に通過する吹雪の質量を指します。吹雪粒子が、雪面から何千メートルも上部で検知されることもありますが、雪面から高さ 5m (16フィート) かそれ以上の雪の濃度については、防雪対策という観点からは無視できるほど小さいので、本報告書では特に別の記述がなければ、吹雪量は風に直交する単位幅あたりの雪面からの高さ 5m(16フィート) までの合計を指すこととします。

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 15.3m/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

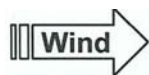
れます。(Table r1986)

図 3.2 風速 11.1m/s において、
0.001m/s の速さで移動しながら
形成される雪の波。写真は向い
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 1cm (0.5 インチ)、幅 25cm (10 インチ) です。大抵の跳躍粒子は、地面から 5cm (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



4.6m/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)

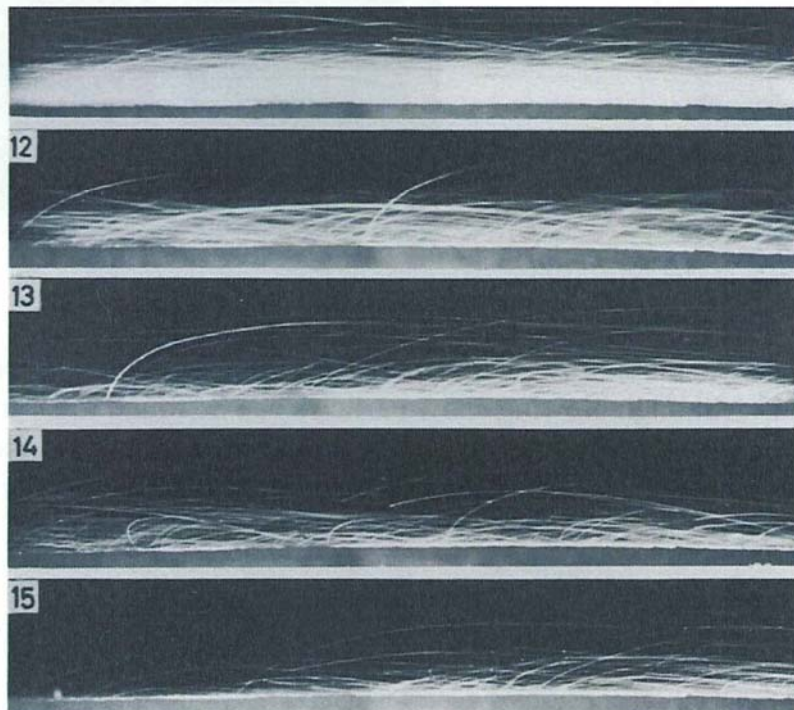


図 3.3 降雪がない状態の跳躍粒子。図の長さは 25 cm (10 インチ) で、風速は 1m (3.3 フィート) 高での値を示す。写真撮影：小林大二博士 (1972)

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、雪の移動の局所的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「スノウシャドウ」が示唆しています。

乱流拡散は、跳躍の特徴である周期的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ら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。

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 (Poneroy 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。

図 3.8 雪粒子の乱流拡散
(右側からの風)
(Tabler1994)



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 30cm (12 インチ) くらいに変わります (1966Budd、Dingle、Radok、1971Liljequist、1980bTabler)。

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せんが、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、Tabler 1981、Pomeroy、Santana 1990)

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 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 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(1991b Tabler)

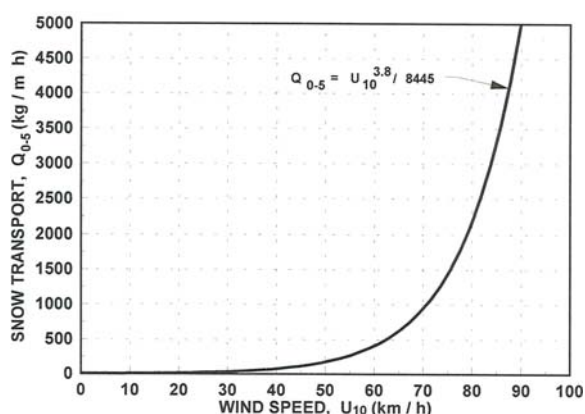


図3.10 地吹雪垂直分布が風速 U によっていかに変化するかを見る実験。この風速計は30cm(12インチ)毎に配列されており、ウッドポストの平原1.2m(4フィート)に設置されています。(Tabler 1991b)

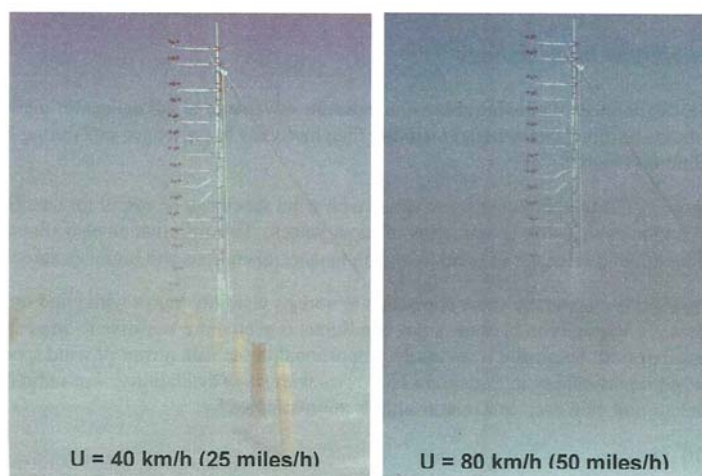


表 3.1 風速の機能としての吹雪量の垂直分布。値は、 Q_{0-z}/Q_{0-50} 。地面から 5m (16 フィート) の範囲での吹雪量 (単位 $g/m \cdot s$) はカッコ内に表示 (Tabler 1991 b)

Height Z (m)	Wind speed (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)

1.0 m/s = 0.447 miles/h

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; Ponteroy 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°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 ($+22^{\circ}\text{F}$)
(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。

$$MM_0 = e^{-2(F/T)} \approx 0.14^{(F/T)} \quad (3.6)$$

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)

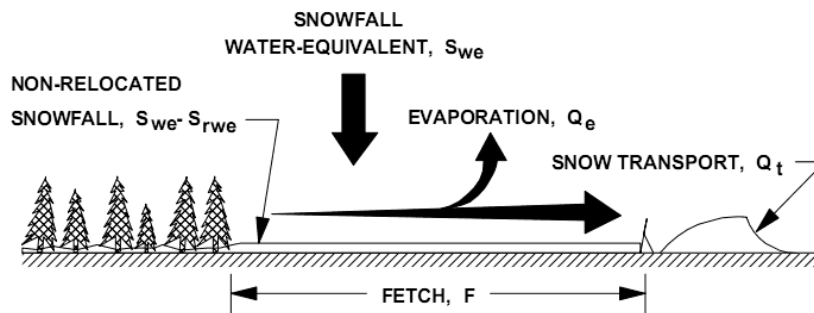


図 3.13 風により運ばれた雪の量から昇華蒸発損失を見積もるための、吹送距離の概念図 (Tabler 1975a)

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_{evap} = 昇華蒸発損失 (kg/m 風に対する幅)

S_{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_{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(θ)は、風により飛ばされた冬期降雪の積雪水量(S_{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、 θ 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 θ 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 (kg/m)が計算されます。また、吹送距離の間で雪の保存が一様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 は Q_{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)

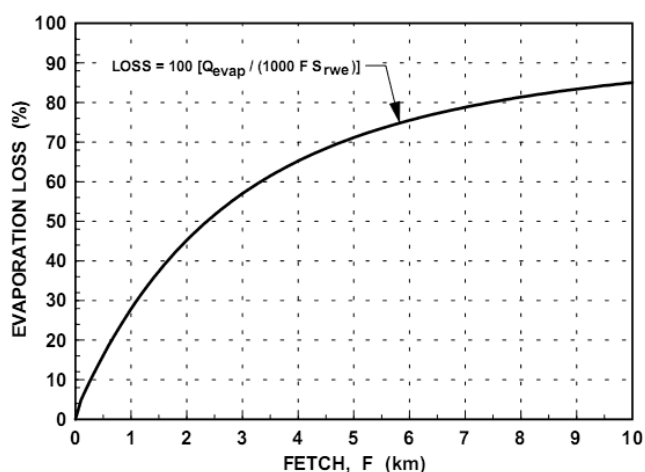
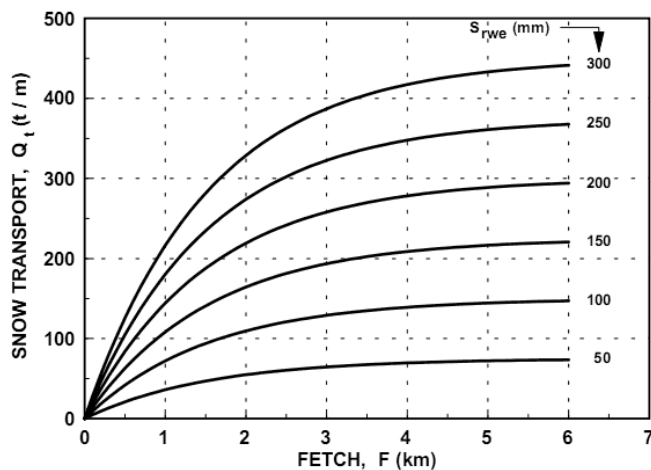


図 3.16 吹送距離と飛ばされた雪の積雪水量から計算された吹雪量

式 (3.9) において $T=3000m$ (10,000ft)を用いた場合の計算値 (Tabler 1994)



式(3.9)に $T=3000\text{m}(10,000\text{ ft})$ 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 $T = 3000\text{ m} (10,000\text{ ft})$ を用いています。

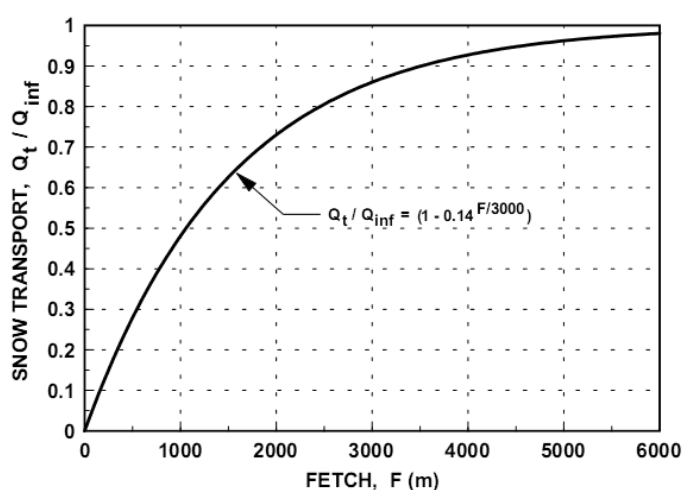
再配置された雪の積雪水量が既知である場合、

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

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 $T=3000\text{m}$
(10,000ft)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いた長さ数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 *sast rug*、ロシア語の *zast rug* 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(τ_0)が作用している。吹雪に関する乱流状態において、

$$\tau_0 = \rho_a \left| \frac{du}{dz} \right|^2 \lambda^2 \quad (3.12)$$

ここで、 ρ_a = 空気の密度, du/dz = 風速の垂直勾配, そして λ = 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）。吹雪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。

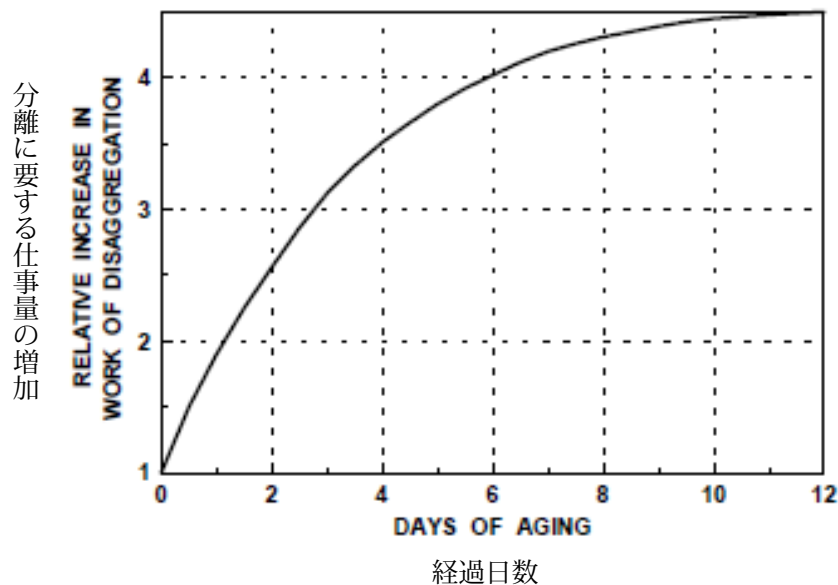


図 3.21 分離に要する仕事を指標とした時間経過に伴う堆積した雪粒子間の結合の強さの変化(Jellinek 1957 より).

3.5.4 雪の圧密

新雪の密度は、平均約 100 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 kg/m^3 程度と低く、降雪の無い中では 300 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(ρ_s , 単位 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 kg/m^3 の漸近線は、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 kg/m^3 (Benson 1962)、これは圧密度が急に減少する臨界密度に相当する。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、盛ん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 kg/m^3 である (Tabler 1985)。

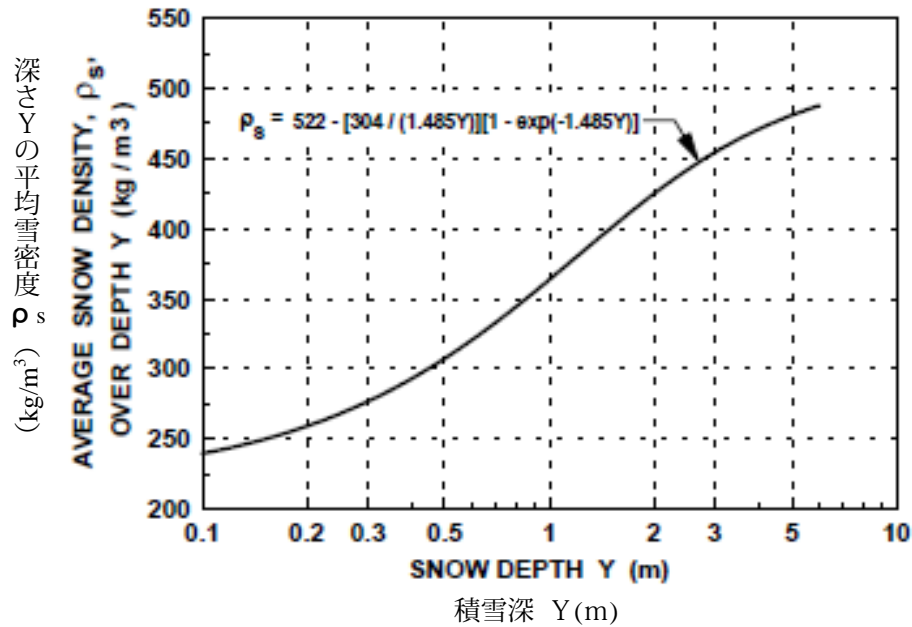


図3.22 融解前における積雪深と風で堆積した雪密度との関係 (Tabler 1985)

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、丈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、植生の繁茂状況のデータは、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、刈っていないトウモロコシの草並や切り株によって、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、表面の剪断応力に変化をもたらす。図 3.24 にみられるとおり、曲線部の表面の通過する風は、逆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。曲率の変化が十分に大きい場合、気流は表面で「剥離」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

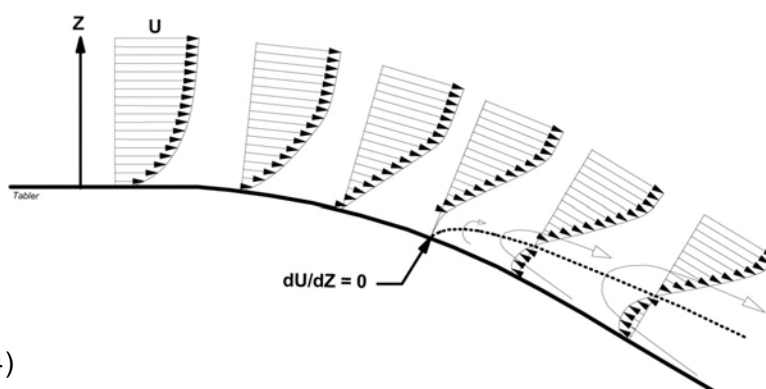
は、航空機の翼が失速角に達する時に起こり、大幅に空気抵抗が増加し、渦の風上の箇所での堆雪を起し循環部分の拡大に寄与する。このようにして、曲率変化が比較的小さい表面の近くで、吹きだまりが大きい。

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肩の近くの窪地に優先的に堆雪するためである。雪面の剪断応力が、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ぺんの特徴であり、砂丘の風下の斜面が安息角の時、積もった砂がすべる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 雪面が曲線となった箇所で、渦の形成の原因により風が剥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)と呼ばれる。吹きだまりの成長がいわ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、雪でいっぱ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。地形の積雪貯留量が多いほど、見かけと真の平衡断面の間の潜在的な格差が大きい。工学的には両者の違いは問題が無いと考えて良い。

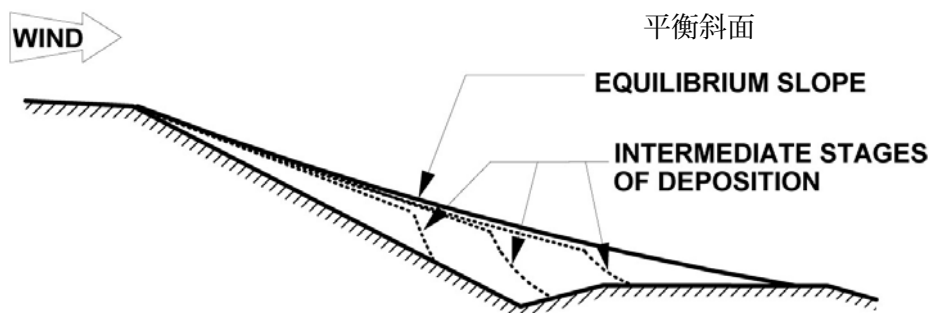


図 3.25 窪地箇所での吹きだまりの進行状況の図解 (Tabler 1975b)

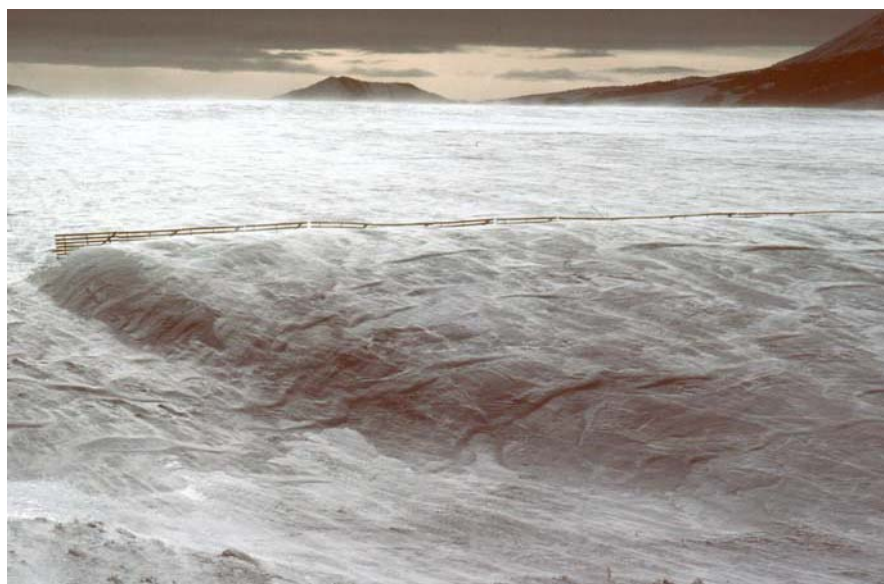


図 3.26 雪の波模様が 3.8m (12ft) 防雪柵の風下側の吹きだまりの平衡面を動いている (Tabler 1994)

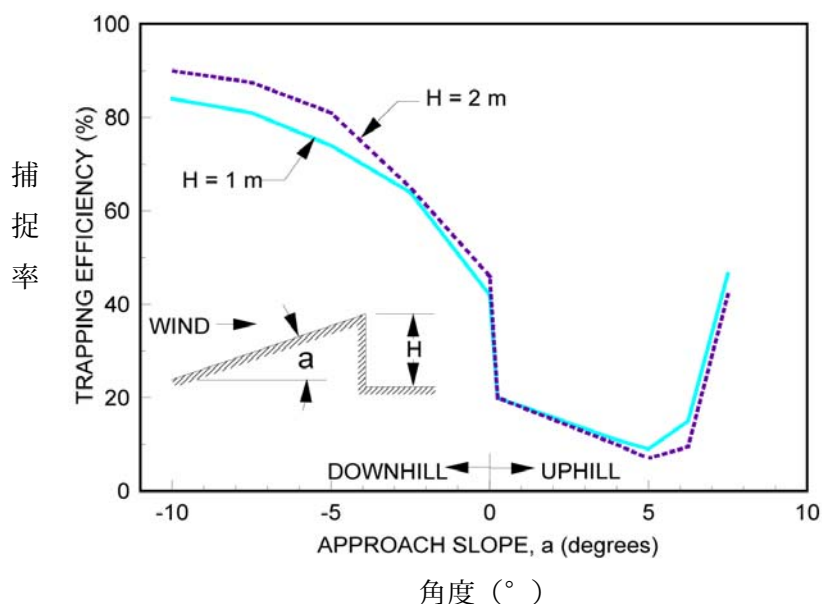
風速の変動があるので雪が堆雪している期間と雪が浸食されている期間がある。定量的相関がある訳ではないが、平衡斜面は風により幾分か大きくなる。すなわち、強い風では勾配が急になる。しかしながら風が吹く様な状況では、新しい粒子と既に積もっている雪の粒子が結合し、安定度が助長される。平衡斜面の角度は、気流の剥離に必要な角度（すなわち、雪面に接する所で渦を形成するような角度）よりも小さい。背後の乱流が大きい切り立った山岳地帯では、平衡斜面かも知れないが臨界角は 10°

～12° 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° 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「 P 」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。

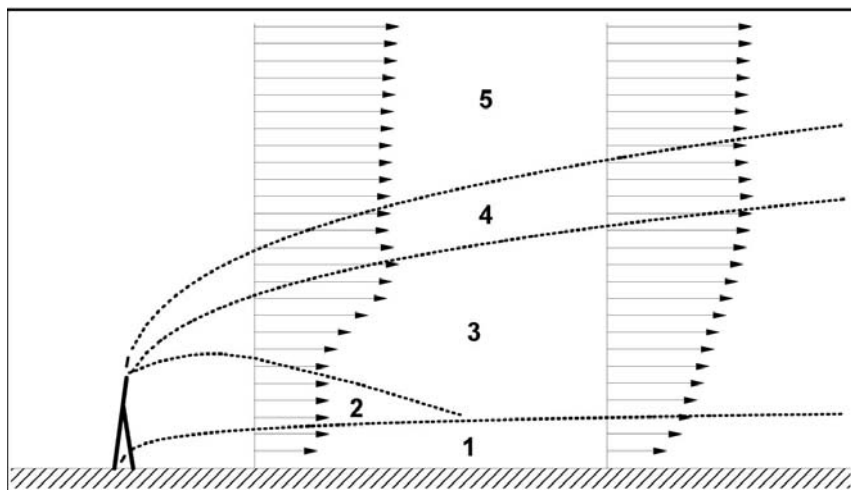


図 3.28 乱流図。Tabler と Schmidt (1986) によって区分した境界を表す。

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。

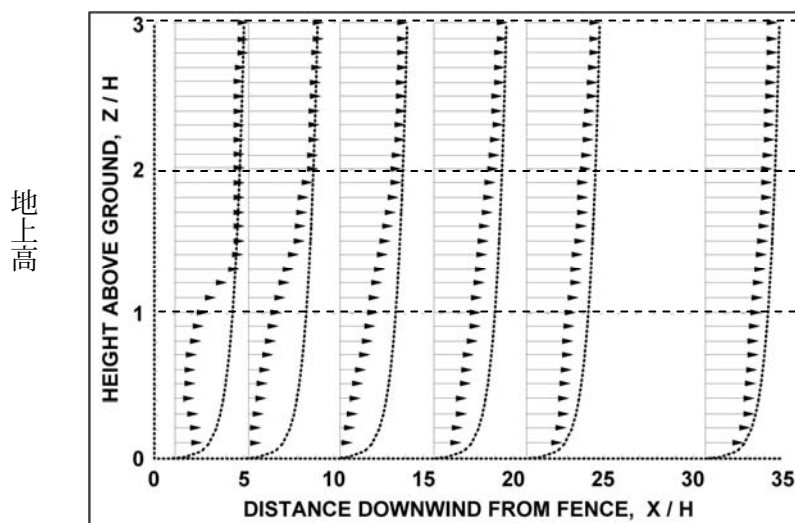
2の領域は、防雪柵のすぐ裏の風速が低下させられた領域で、ほぼ均一な風速の領域。

3の領域は、防雪柵のすぐ裏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ざっている領域である。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）、表面の剪断応力が小さくなってゆき、転動跳躍粒子が徐々にゆっくりとした動きになってゆき、やがて静止する。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

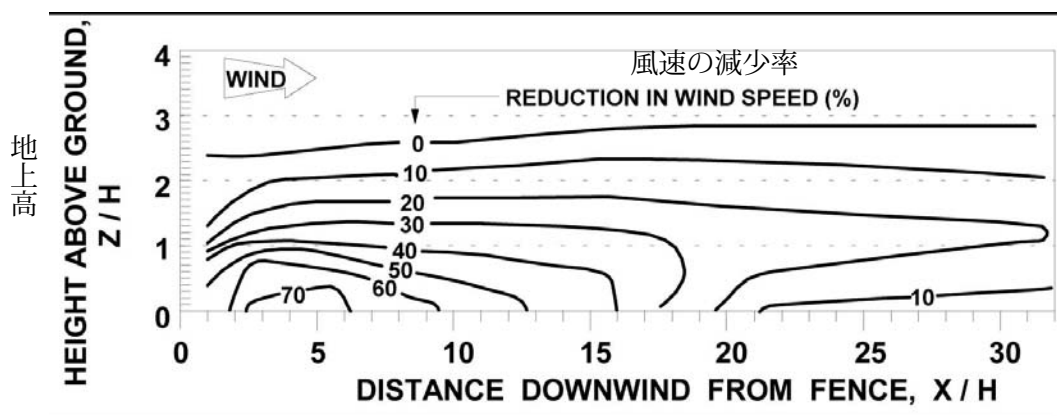
は、捕捉される領域を超えて地面に積もらないで運ばれてゆく。



防雪柵から風下の距離

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)

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 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、積み重ねて中央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、気流がその曲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、気流は表面から剥離する。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)。

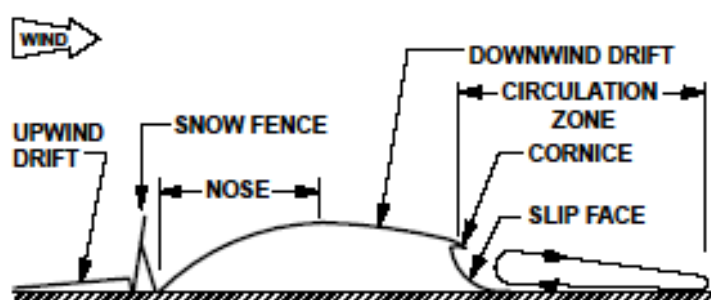


図 3.32 3.8m高さの防雪柵の後方にあるスリップ・フェースと雪庇(Tabler1994)。雪丘の深さは雪庇位置で約 3.7m。



この第 2 段階の間、吹きだまり後部の剥離気流は、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もある。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、雪粒子の荷電は粒子を表面に付着させ、スリップ・フェースの上端で雪底形成を引き起こす。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。

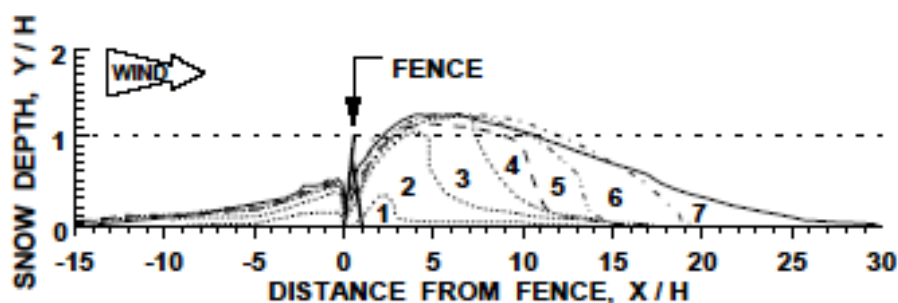


図 3.33 3.8m 高さの水平防雪板型防雪柵（50%空隙率）により形成された吹きだまり雪丘の 7 回の観測結果(Tabler1986)。

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に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・フェースの痕跡だけが残る。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、その後の成長は鈍化する。

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、風食又は堆積が発生することもあり得る。平衡状態の後、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、吹きだめ柵は翼

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。

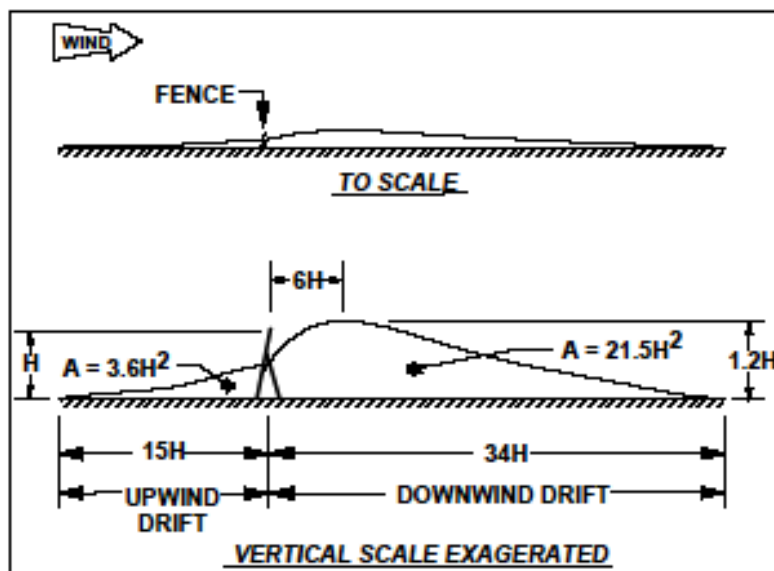


図 3.34 50%空隙率防雪柵により形成された平衡雪丘の寸法(Tabler1989)。

図 3.35 と 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_e：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_{max})は、下式のように変化する。

$$Y_{\max}/H = 6.3 (A/A_e) - 133 (A/A_e)^2 + 12.1 (A/A_e)^3 - 3.9 (A/A_e)^4 \quad (3.15)$$

第 5 章と第 6 章でも使用するが、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 空隙率 50%の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)。

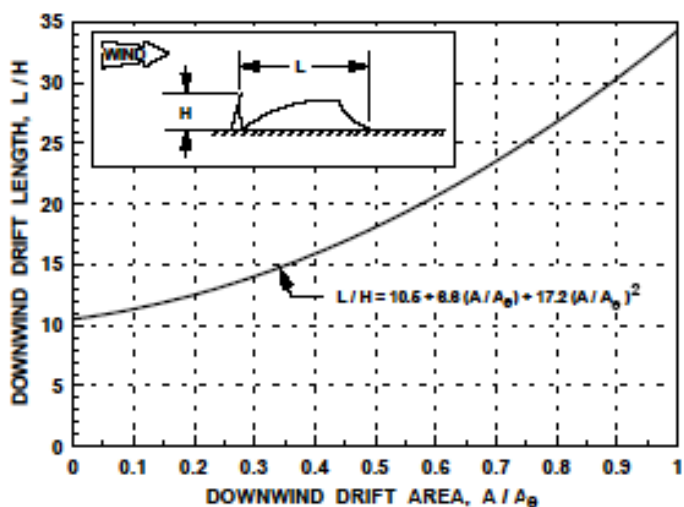
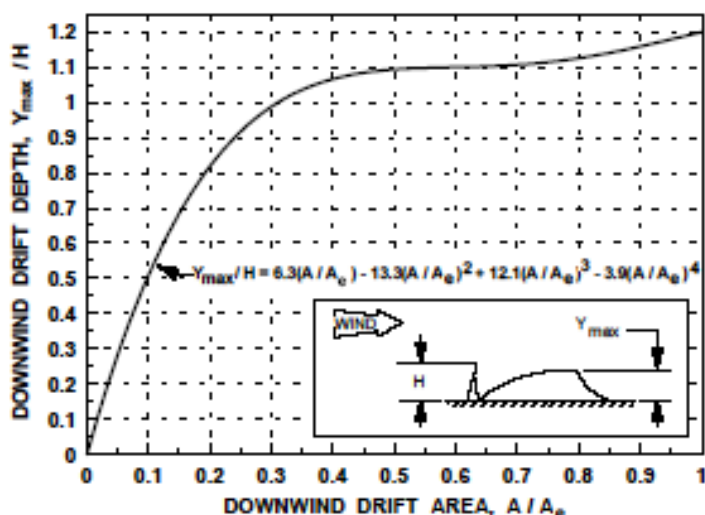


図 3.36 空隙率 50%の防雪柵における雪の堆積による風下側吹きだまり雪丘の最大積雪深の変化 (Tabler 1980a)。



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、主として循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。

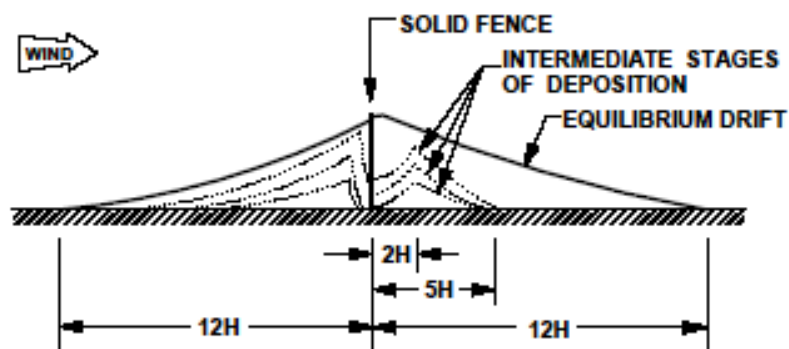


図 3.37 空隙の無い防雪柵における吹きだまり雪丘の成長過程(Tabler1994)

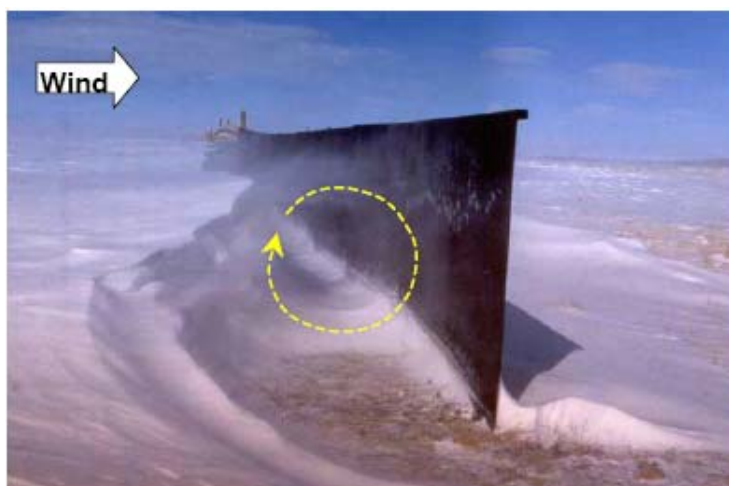


図 3.38 積雪深が約 $0.6H$ に達するまで、この空隙の無い防雪柵の風上側渦は風上の柵直前の堆雪を防げる(Tabler1994)。

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(方程式 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。

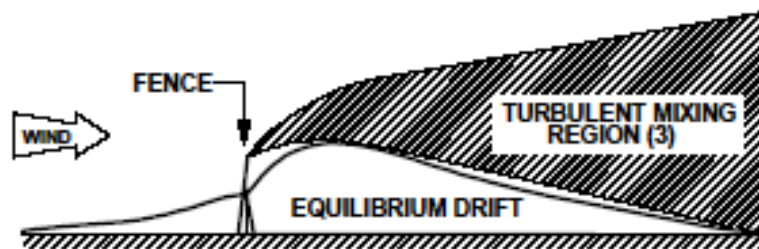


図 3.39 平衡雪丘の表面は、空隙の無い防雪柵後方の主要混合領域(領域 3、図 3.28)の下側境界に沿う(Tabler1994)。

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「ウェーク法則 (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属性、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幾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 Jaeger 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幾何学的相似関係は、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。

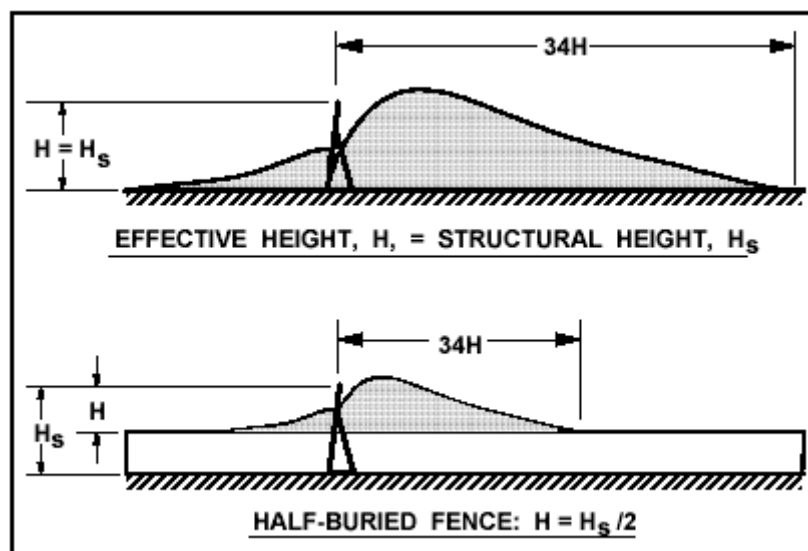


図 3.41 吹きだまりの大きさは柵高 H_s ではなく、それよりも小さい有効柵高 H による (Tabler 1994)

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

$B' \dots F'$ =実験による係数

$A' \dots F'$ 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則には 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 1.2 m 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 1.2 m 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 1.2 m での雪密度は 380 kg/m³ であるが、積雪深 3.7 m では 467 kg/m³ 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央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」と呼ばれ、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、ギャップや開口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)

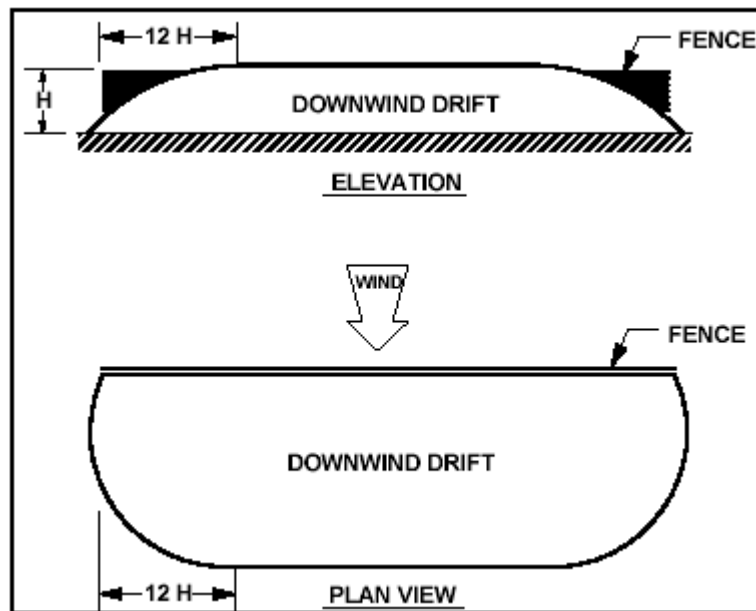


図 3.43 吹きだまり端部で端部効果が及ぶ三次元の円弧状の範囲(Tabler 1986)

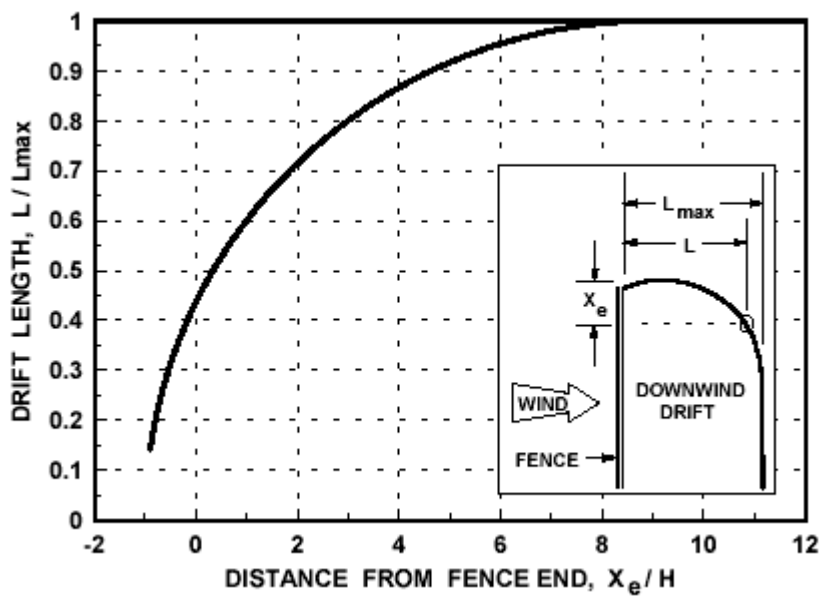


図 3.44 平坦地で、空隙率 50%の柵を用いた場合に、柵端部からの距離の関数として表される平衡状態の風下側吹きだまりの長さ(Tabler 1980a)

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。

$$A/A_{inf}=0.23+(X_e/H)/5.2-(X_e/H)^2/59.5+(X_e/H)^3/1961, X_e/H \leq 12 \quad (3.2.2)$$

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央部における防雪容量の約 84% である。

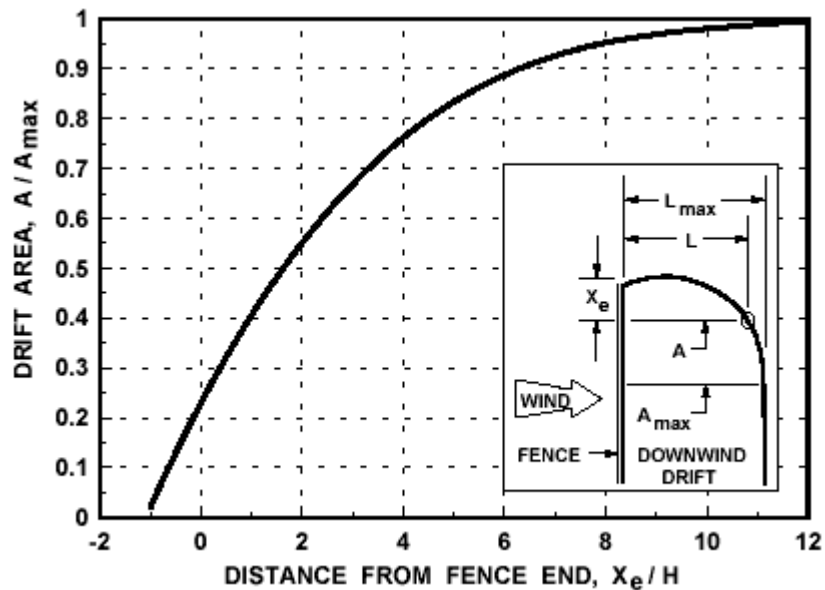


図 3.45 平坦地で、空隙率 50%の柵を用いた場合に、柵端部からの距離の関数として表される平衡状態の風下側吹きだまりの断面積 (Tabler 1980a)

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。

$$Q_c/Q_{c,inf}=0.288+0.039(L_f/H)-0.0009(L_f/H)^2+(L_f/H)^3/13333; 5 \leq L_f/H \leq 50 \quad (3.2.2)$$

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)。

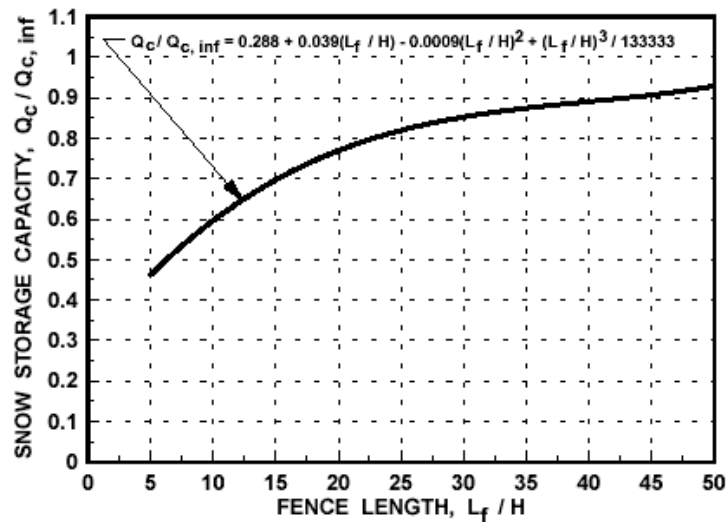


図 3.46 防雪柵延長の関数として表される総防雪容量(Tabler 1994)

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、しばしば積雪の沈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遠くまで伸び、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)小さ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)

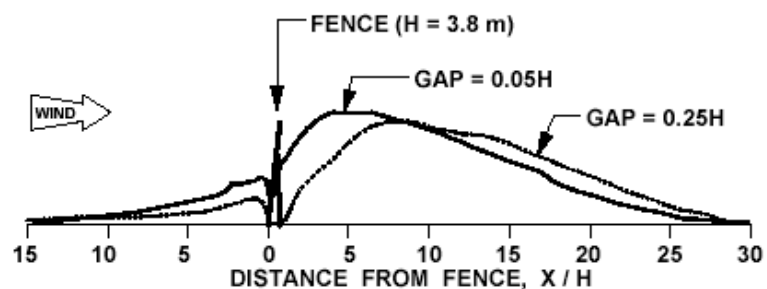
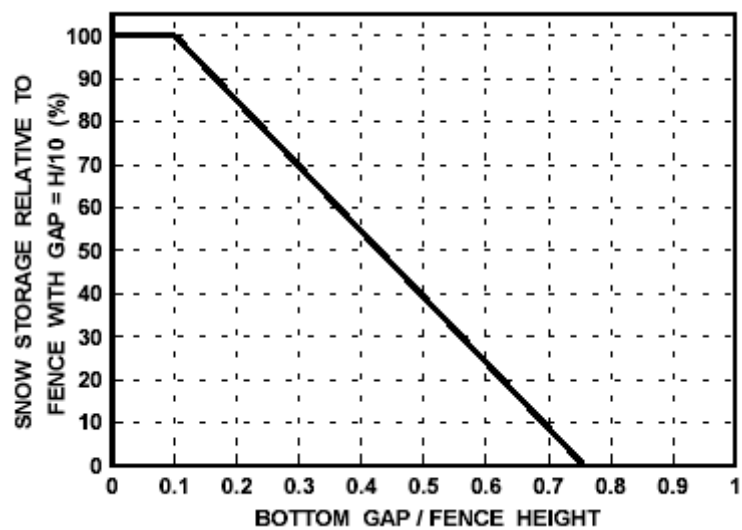


図 3.48 フィールド実験から導き出された堆雪量に対する下部間隙の効果 (Tabler 1994)



3.8.5.2.4 柵の空隙率

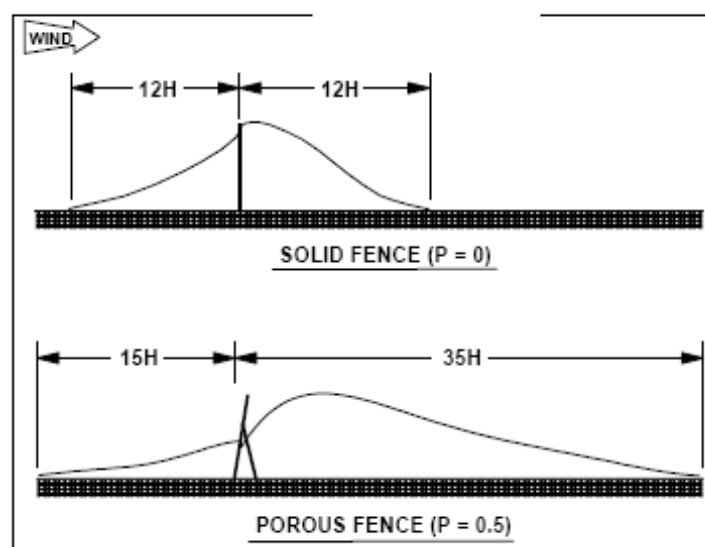
空隙率が 0.4-0.5 の柵は最も大きい吹きだまりを形成する。空隙率 0 の柵は風上側に大きい吹きだまりをつくるが、風下側の吹きだまりは小さい。空隙率 0 の柵の防雪容量は空隙率 50% の柵とくらべて非常に小さい (図 3.49)。図 3.50 と 3.51 で示すように、防雪容量と風下雪丘の長さは空隙率によってかわる。

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

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

平衡雪丘の形への空隙率の影響は 3.8.53 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)。



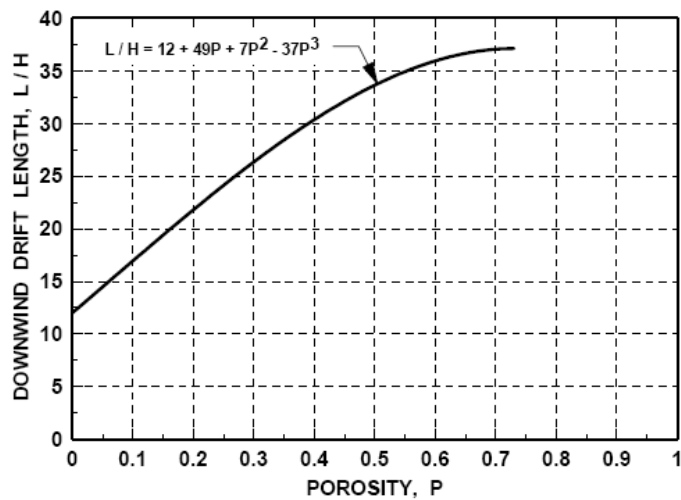


図 3.50 風下吹きだまり雪丘の長さは柵の空隙率の関数で表される (Tabler 1994)。

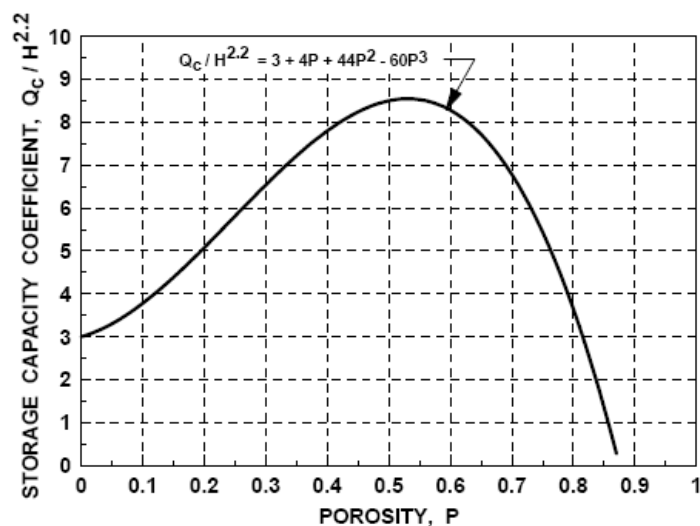


図 3.51 風下側防雪容量は柵の空隙率の関数で表される。

障害物の風への影響、即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(噴出)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。径 5 cm 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 の横張材を同じ 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、下部間隙を閉ざ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張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張材については不確かであるが、30cm幅の横張材は幅がその半分の横張材と比べて効果が小さいということの幾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° 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° の傾斜 (layback) は建設中の安定化と維持作業で人が柵に登るのを容易にしている。



参考図 傾斜角のメリット、建設中に脚立不要、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° は柵に直角な角度、0° は平行な角度である。どのように入射角が吹きだまりの幾何学的な形に影響するかは、部分的には柵の幾何構造による。ワイオミング柵のように斜めの筋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、筋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° と 45° 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 (α) の $\sin \alpha$ に比例して減少するであろうことを意味している。

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

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

ここで、添え字 90 は柵が風向に直交するときに形成される吹きだまりの大きさを示す。

バリエー（障害物）の列が主風向と少し斜めに交えば気流が側方に逸れる。このことがバリエーを通り過ぎる際に風が曲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、循環渦の一つの軸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。それは螺旋キリのような風

の働きで雪を風下に運ぶ。したがって、柵の末端の風下周辺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° 以上の入射角を持つ長い柵ではそれほど重要ではない。

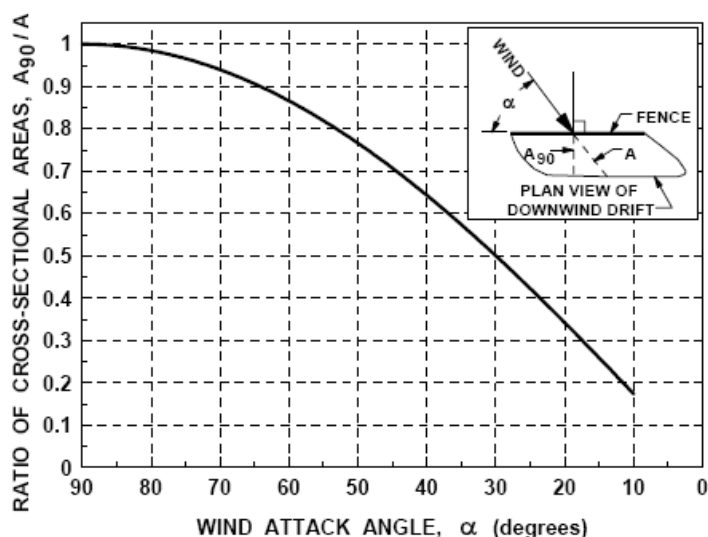


図 3.53 吹きだまり雪丘の断面と風の進入角との関係を表した図(Tabler 1986)

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、雪丘尻に雪を堆積させる、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噴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 5.56m/s で普通は 28m/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鈍感な理由の説明は節 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。

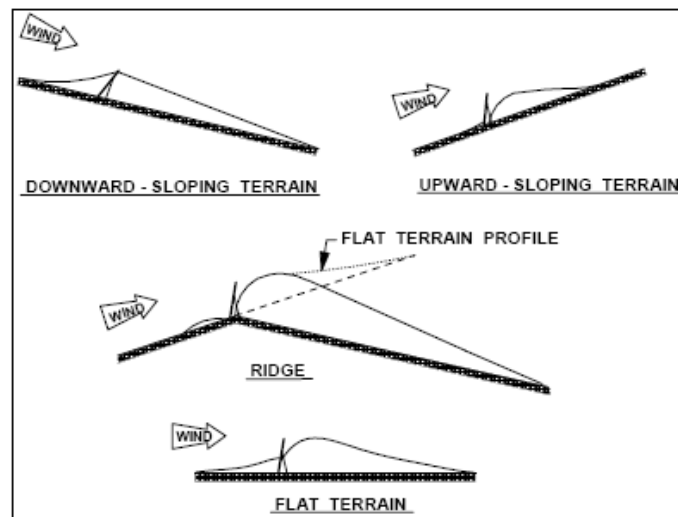
3.8.5.2.8 地形の影響

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、近傍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。

盛土や堤防のように、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浅くなる、存在すればの話であるが。

下り斜面：

約 15%以下の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：

丘の頂きや稜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、稜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。大ざっぱであるが、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：

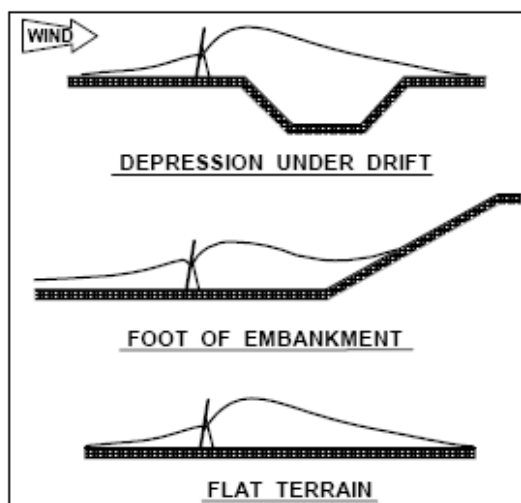
防雪容量は、風下吹きだまりが登り斜面と風下側の丘によって、切り詰められるので減少する。柵が斜面の裾に近ければ近いほど、風上側吹きだまりはますます深くなる。

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、土塁や丘は減少させる。

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苦労は、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			
柵タイプ										
	----Upwind drift----			---Downwind drift---			-----Total drift-----			
	Fence type	A/H ²	Q _c /H ^{2.2}	L/H	A/H ²	Q _c /H ^{2.2}	L/H	A/H ²	Q _c /H ^{2.2}	L/H
	Wyoming	3.6	1.0	16	21.5	7.5	34	25.1	8.5	50
	Slat-and-wire	5.1	1.5	18	18.3	6.2	34	23.4	7.7	52
垂直防雪版とワイヤ- 空隙なし	Solid	5.0	1.4	15	5.0	1.6	12	10.0	2.9	27
A = cross-sectional area (m ²), Q _c = snow storage capacity (t/m), L = drift length (m), H = effective fence height (m).										

A=断面積, Q_c=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ー ($H \geq 2\text{m}$):

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 $183H^2$ である。

総防雪容量は

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

H (m)、 Q_c (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樹脂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繁にもたらす。これは、柵直近での積雪深の急増をもたらし、最終的には柵を埋没させる。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、防雪容量は雪に埋没していない防雪柵より多いか又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。

$$Q_c = 8.5H^2 \quad (3.29)$$

H (m)、 Q_c (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。

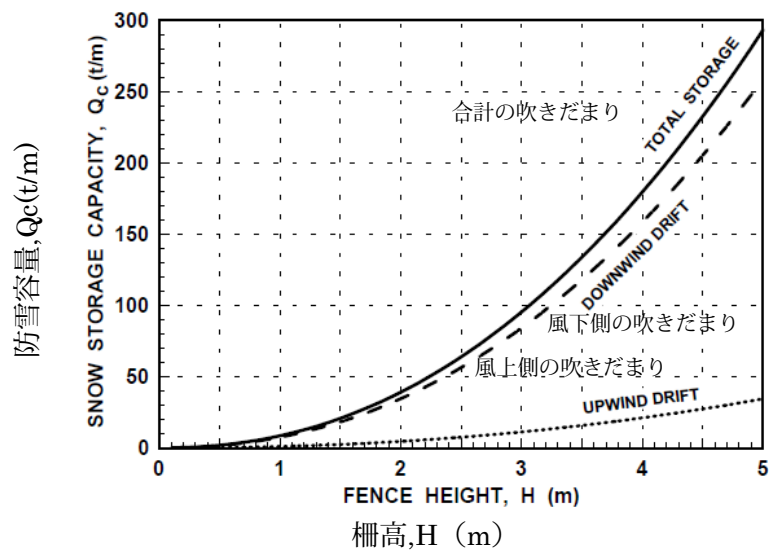


図 3.56 ワイオミング式防雪柵の柵高と風上と風下の吹きだまりの関係

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、既往の公表された値 (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。

空隙率 (%)	Porosity (%)	A'	B'	C'	D'	E'	F'	X/H Limit	X/H 上限
	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	

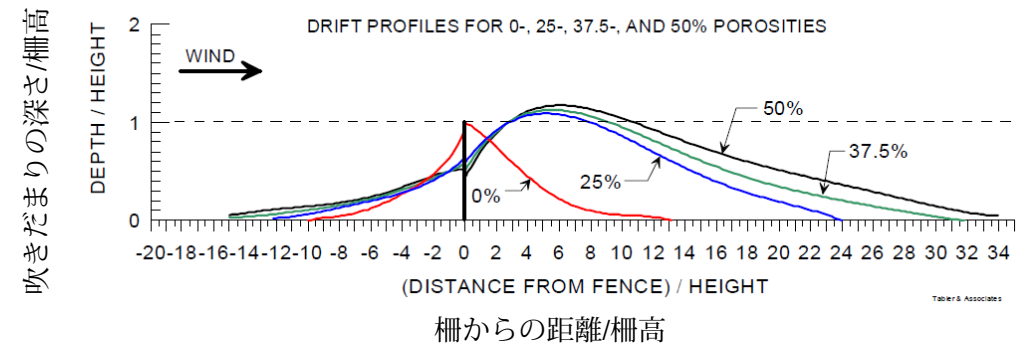


図 3.57 表 3.5 の係数及び式 3.17 によって得られた平地での吹きだまり形状への防雪柵の空隙率による影響

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、防雪柵の柵高又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遠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剪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 での関係では、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。

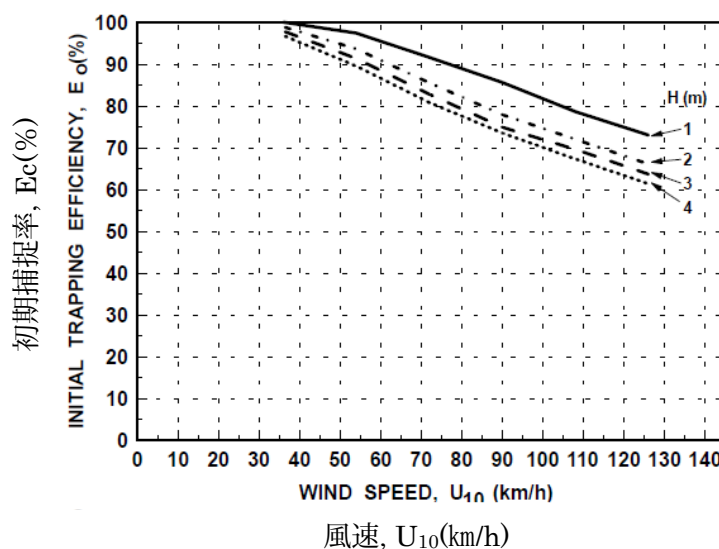


図 3.58 防雪柵の柵高と風速によってどのように初期捕捉率が変化するか
(Tabler & Jairell, 1993)

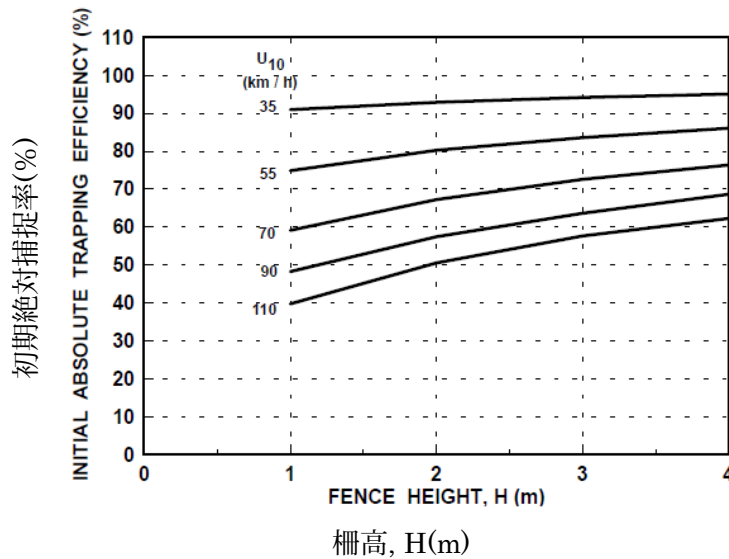


図 3.59 平地積雪面上の柵高によってどのように初期絶対捕捉率が変化するか (Tabler1994)

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履歴(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, 3. 48, 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。

しかし無孔の柵は例外である。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映している。(図 3.60)。

図3.60 高さ1.2mの空隙の無い柵の先端で噴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番目のステージの間、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番目のステージの間、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番目のステージの大部分を通して、進入角は平均約 3° 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

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

である。

E をある時点の捕捉率とすると、 E_0 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ぱいになっ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_0 の適切な値が0.95であることを示す。

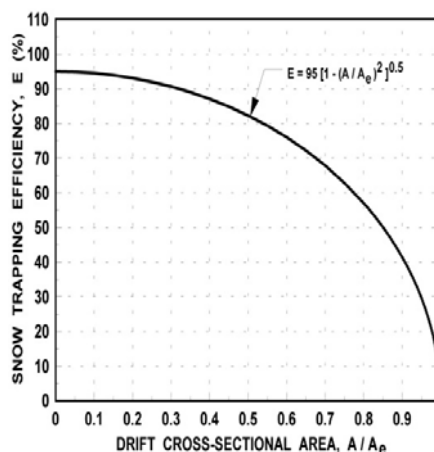
また、吹雪量が風速の3.8乗に比例しているという単純な見解を考えることも妥当に思える。

従って風速の50%の減少は吹雪量を93%減少させるだろう($0.5^3 = 0.07$)。

図3.61 空隙率50%の柵が雪で埋まる時の捕捉率の減少。

E_0 を 0.95と想定する。

(Tabler and Jairell, 1993)



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。

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

空隙率50%の防雪柵の捕捉率と平均捕捉率を表3.6.に示す。

表3.6 空隙率50%の防雪柵のある瞬間の捕捉率(E)と平均捕捉率(E_{ave})、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/A_e)。初期捕捉率 E_o は0.95である。

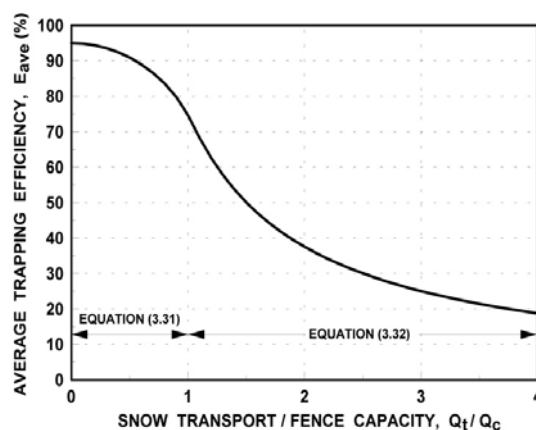
A/A_e	E	E_{ave}		A/A_e	E	E_{ave}
0.0	0.95	----		0.55	0.79	0.90
0.05	0.95	0.95		0.60	0.76	0.89
0.10	0.95	0.95		0.65	0.72	0.88
0.15	0.94	0.95		0.70	0.68	0.87
0.20	0.93	0.94		0.75	0.63	0.85
0.25	0.92	0.94		0.80	0.57	0.84
0.30	0.91	0.94		0.85	0.50	0.82
0.35	0.89	0.93		0.90	0.41	0.80
0.40	0.87	0.92		0.95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

吹雪量が柵をいっぱ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 E_o である。吹雪量が柵の防雪容量より大きい年は、

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

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
(Tabler and Jairell 1993).



3.9 参考文献

- Bagnold, R.A. 1941. *The physics of blown sand and desert dunes*. Methuen & Co. Ltd., London.
- Benson, C.S. 1962. *Stratigraphic studies in the snow and firn of the Greenland Ice Sheet*. U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory Research Report 70.
- Benson, C.S. 1982. *Reassessment of winter precipitation on Alaska's North Slope and measurements on the flux of wind-blown snow*. University of Alaska, Fairbanks, Geophysical Institute Report UAG R-288.
- Budd, W.R., R. Dingle, and U. Radok. 1966. The Byrd snowdrift project: Outline and basic results. In *Studies in Antarctic Meteorology, American Geophysical Union, Antarctic Research Series 9*: 71-134.
- Colbeck, S.C. (Ed.). 1980. *Dynamics of snow and ice masses*. Academic Press, New York.
- Coles, D. E. 1956. The law of the wake in the turbulent boundary layers. *Journal of Fluid Mechanics* 1: 191-126.
- Dyunin, A. K. 1954. Tverdyi rashkod snegovetrovogo potoka (Soild flux of snow-bearing airflow). *Trudy Transportno Energisheskogo Instituta*, vol 4, 1954: 71-88. National Research Council of Canada, Technical Translation 1102 (1963), Ottawa, Ontario, Canada.
- . 1959. Osnovy teorii metelei (Fundamentals of the theory of snowdrifting). *Izvest. Sibirsk. Otdel. Akad. Nauk SSSR* (12): 11-24, 1959. (In Russian). National Research Council of Canada Technical Translation 952 (1961), Ottawa, Ontario, Canada.
- Finney, E.A. 1934. *Snow control on the highways*. Michigan Engineering Experiment Station, Michigan State College, Bulletin 57.
- Gray, D.M. and D.H. Male (Ed.). 1981. *Handbook of snow*. Pergamon Press, Toronto, Ontario, Canada.
- Greeley, R. and J. D. Iversen. 1985. *Wind as a geological process on Earth, Mars, and Titan*. Cambridge University Press, England.
- Jellinek, H.H.G. 1957. *Compressive strength properties of snow*. U.S. Army Snow Ice and Permafrost Establishment, Research Report 34.
- Kind, R.J. 1981. Snow drifting. In *Handbook of snow*. D.M. Gray and D.H. Male, eds. Pergamon Press, Toronto, Ontario, Canada. pp. 338-359.

- Kobayashi, S. 1971. Development and movement of wavy features on the snow surface during snow drifting. *Contributions from the Institute of Low Temperature Science, Series A, Physical Sciences*, Number 29. pp. 81-92.
- Kobayashi, D. 1972. Studies of snow transport in low-level drifting snow. *Contributions from the Institute of Low Temperature Science, Series A, Physical Sciences*, Number 24. pp. 1-58.
- 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-Energicheskogo Instituta*, Tom 4, p. 89-97 (in Russian). National Research Council of Canada Technical Translation 1094 (1963), Ottawa, Ontario, Canada.
- Kuroiwa, D. 1962. *A study of ice sintering*. U. S. Army Corps of Engineers, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Report 86.
- Lee, L.W. 1975. *Sublimation of snow in turbulent atmosphere*. Ph.D. dissertation, University of Wyoming, Laramie.
- Liljequist, G.H. 1957. Energy exchange of an Antarctic snowfield. *Norwegian-British-Swedish Antarctic Expedition, 1949-52, Norsk Polarinstitutt, Oslo, Scientific Results*, Volume II, Part 1C. pp. 188-233.
- Male, D. 1980. The seasonal snow cover. In: *Dynamics of snow and ice masses*. S. Colbeck, ed. Academic Press, New York.
- Mellor, M. 1965. *Blowing snow*. CRREL monograph, Part III, Section A3c, U.S. Army Corps of Engineers, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, NH.
- Mellor, M. and G. Fellers. 1986. *Concentration and flux of wind-blown snow*. U.S. Army Corps of Engineers, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Special Report 86-11.
- Owen, P. R. 1964. Saltation of uniform grains in air. *Journal of Fluid Mechanics*, vol 20, Part 2: 225-242.
- Plate, E. J. 1971. The aerodynamics of shelterbelts. *Agricultural Meteorology* 8: 203-222.
- Pomeroy, J.W. 1988. *Wind transport of snow*. Ph.D. dissertation, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada.
- . 1989. A process-based model of snowdrifting. *Annals of Glaciology*, vol. 13. pp. 237-240.

- Pomeroy, J.W. and D.M. Gray. 1990. Saltation of snow. *Water Resources Research* 26(7):1583-1594.
- Radok, U. Snow drift. *Journal of Glaciology* 19 (81): 123-129.
- Schmidt, R.A. 1972. *Sublimation of wind-transported snow--a model*. U.S. Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, Research Paper RM-90.
- . 1981. Estimates of threshold windspeed from particle sizes in blowing snow. *Cold Regions Science and Engineering* 4: 187-193.
- . 1982a. Properties of blowing snow. *Reviews of Geophysics and Space Physics* 20: 39-44.
- . 1982b. Vertical profiles of wind speed, snow concentration, and humidity in blowing snow. *Boundary Layer Meteorology* 23: 223-246.
- . 1986. Transport rate of drifting snow and the mean wind speed profile. *Boundary Layer Meteorology* 34: 213-241.
- Schmidt, R.A. and K.L. Randolph. 1981. Predicting deposition of blowing snow in trenches from particle trajectories. In: *Western Snow Conference (St. George, UT; April 14- 16, 1981) Proceedings* 49: 34-42.
- Tabler, R. D. 1974. New engineering criteria for snow fence systems. *Transportation Research Record* 506: 65-78.
- . 1975a. Estimating the transport and evaporation of blowing snow. In: *Symposium on Snow Management on the Great Plains (Bismarck, ND; July 1975) Proceedings*, Great Plains Agricultural Council Publication 73: 85-104.
- . 1975b. Predicting profiles of snowdrifts in topographic catchments. In: *Western Snow Conference (Coronado, CA; April 23-25, 1975) Proceedings* 43: 87-97.
- . 1979. Visibility in blowing snow and applications in traffic operations. In: *Snow Removal and Ice Control Research, Transportation Research Board Special Report 185 (Proceedings, 2nd International Symposium, Hanover, NH; May 15-19, 1978)*. pp. 208-214.
- . 1980a. Geometry and density of drifts formed by snow fences. *Journal of Glaciology* 26(94): 405-419.
- . 1980b. Self-similarity of wind profiles in blowing snow allows outdoor modeling. *Journal of Glaciology* 26(94): 421-434.

- . 1984. Using visual range data for highway operations in blowing snow. *Optical Engineering* 23(1): 055-061.
- . 1985. Ablation rates of snow fence drifts at 2300-meters elevation in Wyoming. In: *Western Snow Conference (Boulder, CO; April 16-18, 1985) Proceedings* 53: 1-12.
- . 1986. *Snow fence handbook, Release 1.0*. Tabler & Associates, Laramie, WY.
- . 1989. Snow fence technology: State of the art. In: *First International Conference on Snow Engineering (Santa Barbara, California; July 10-15, 1988)*, U. S. Army Corps of Engineers, Cold Regions Research Laboratory, Special Report 89-6: 297-306.
- . 1991a. *Snow fence guide*. Strategic Highway Research Program, Report SHRP-H-320, National Research Council, Washington, D.C.
- . 1991b. 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, NH)*, pp. 729-738.
- . 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.
- Tabler, R. D. and R. L. Jairell. 1980. Studying snowdrifting problems with small-scale models outdoors. In: *Western Snow Conference (Laramie, Wyo.; April 15-17, 1980) Proceedings* 48: 1-13.
- . 1993. Trapping efficiency of snow fences and implications for system design. *Transportation Research Record No. 1387, Snow Removal and Ice Control Technology (Papers presented at a Symposium Sept. 14-18, 1992, Minneapolis, MN)*. Transportation Research Board, National Research Council, National Academy Press, Washington, DC, pp. 108-114.
- Tabler, R. D. and K. L. Johnson. 1971. Snow fences for watershed management. In: *Symposium on Snow and Ice in Relation to Wildlife and Recreation (Ames, IA; February 11-12, 1971) Proceedings*, 116-121.
- Tabler, R. D. and R. A. Schmidt, Jr. 1972. Weather conditions that determine snow transport distances at a site in Wyoming. *UNESCO / WMO Symposia on the Role of Snow and Ice in Hydrology (Banff, Alberta, Canada; September 6-13, 1972) Proceedings*, 118-127.

- . 1986. Snow erosion, transport, and deposition in relation to agriculture. Pages 11-58
In *Proceedings, Symposium on Snow in Agriculture Symposium (Swift Current, Saskatchewan, Canada; July 9-11, 1985)*, H. Steppuhn and W. Nicholaichuk, ed. Great Plains Agricultural Council Publication No. 120. pp. 11-58.
- 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. In: *Western Snow Conference (Sacramento, CA, 17- 19 April 1990) Proceedings* 58: 61-72.
- 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.
- Takeuchi, M. 1980. Vertical profile and horizontal increase of drift-snow transport. *Journal of Glaciology* 26(94): 481-492.
- Takeuchi, M. 1989. Snow collection mechanisms and the capacities of snow fences. *Annals of Glaciology* 13:248-251.

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薦し、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 要約

- ☐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為の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_{pot} 、風の記録に基づく。
 - ・潜在吹雪量、 Q_{sp} 、降雪と蒸発に基づく。
 - ・卓越風向
 - ・吹走距離(F)
 - ・現地での平年吹雪量、 Q_{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_{ds} 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

維持管理者と警察は彼らの管轄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。

維持責任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緩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。

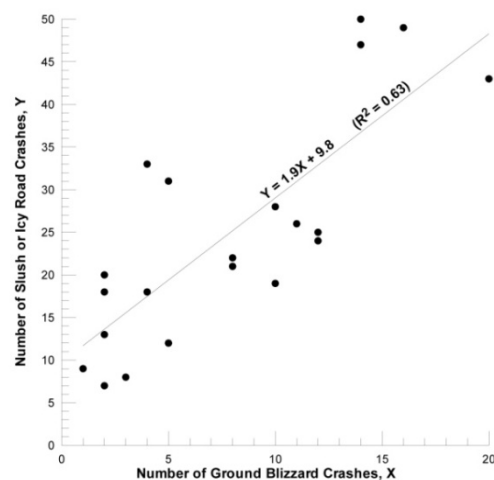
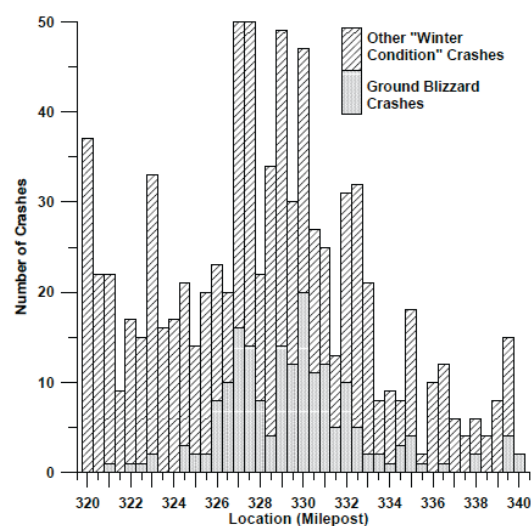


図 4.2 ワイオミング高速道路 I-80 における半マイルごとの事故分布（地吹雪条件下と、その他の冬期道路条件下）(Tabler 2002)



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訪れ、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眼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

吹雪災害には次の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、舗装修繕費）

3.吹雪の発生源（道路敷地内、開けた平坦地、凍結した湖）

4.吹雪災害を引き起こす箇所（横断構造、平面線形、縦断線形、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、もしくはその幾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、運転操作への障害）
- 3.その場所の事故の履歴は？
- 4.吹きだまりが路側の排水を妨げているか？もしくは路床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勤務体制、超過勤務に対して、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.この吹雪災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作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、警察官や地元住民、事故履歴である。

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、その卓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姿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“遠方”なのか、道路の“近傍”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。樹林の少ない高盛土がその実例である。

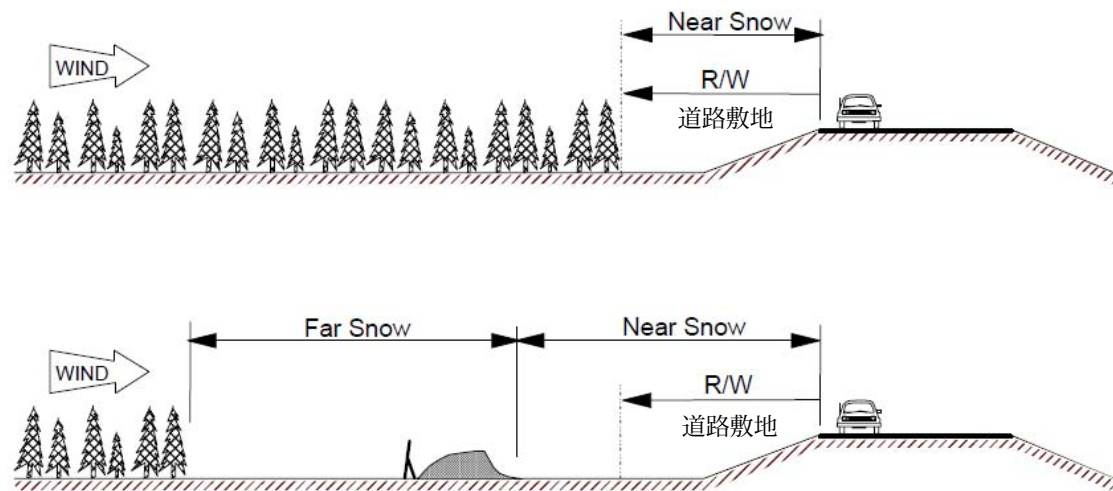


図4.3 道路から離れた“ 遠方 ”からの吹雪と道路の“ 近傍 ”からの吹雪の違い

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欠かすことができない。吹雪対策専門家が選択肢を見誤らないためには、最初から客観的な視点を持って検討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、雪面や除雪雪堤より路面を低くしてしまう。
 - ・急傾斜の高盛土は吹雪をより悪化させるし、防護施設は吹きだまりを引き起こす。
 - ・浅くて狭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、吸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堤を生じやすい。
- 道路付属物：路側のフェンス（図4.4）、広告板（図4.5）、建物、橋台、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：樹木、灌木など伐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壁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堤を高くしてしまうという課題を引き起こす。

- 除雪作業：雪堤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堤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。
- 視線誘導の不足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、積雪や雪堤より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“黒管理“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なる。すべての吹雪が解明されるとは限らないが、ある場所での吹雪災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
- ・注意喚起

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早い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陥

っ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章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な情報や、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雛形を付録に掲載した。

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任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釈するために、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項に記載されている。

便利なデジタル地形図として、DeLorme 社が販売している3D TopoQuadsと呼ばれるソフトウェアがある。同社は、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。このソフトウェアは第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項で説明する。

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、設計および吹雪緩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、効果的な吹雪緩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、他の場所での吹雪緩和対策を裏付けるのにもしばしば

貴重となる。加えて、将来的に吹雪緩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卓越風向に関して重要な情報源になってくれるが、卓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頭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歪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
- ・風衝樹形（枝が風下側にたなびいたり、偏った形態に生長した樹木）
- ・風雪ですり減った木の棒や柱の方向

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ヘルド・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

ハンドヘルド・コンパスは、灌木や樹木、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、芽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、晒さ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晒されていない状態にある成長点は、枯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、吹きさらしにある樹木や低木の樹形は、結果的に風下側だけになびいたり、成長が偏った様相を示す。風で浸食された植物、木の棒や柱の摩耗の模様から、例えば夏の期間であっても、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 木の棒の摩耗模様は、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項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、写真を縮尺1/12000までスケールアップすることで、孤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黒写真が望ましい（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) 写真は明るい晴れた日で、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、吹きだまりを覆い隠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、信頼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》海洋大気庁の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<http://lwf.ncdc.noaa.gov/oa/ncdc.html> で閲覧、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扱われている。
 - ・「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（雲量や視程など）・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枚のCDに全世界の10,000地点が含まれ、そのうちの4枚の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枚のCDに収められている。
- EarthInfo社のデジタルデータ(<http://www.earthinfo.com>)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枚の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枚の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枚の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.ncdc.noaa.gov/oa/climate/regionalclimatecenters.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ソスケールモデルは、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社(電話 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)の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遠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, Wilks 1993)。

4.6.3.4項で説明するように、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。最も信頼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草地である。冬季の最大積雪水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://www.wcc.nrcs.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ーは、ミネソタ州(<http://www.climate.umn.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(Tab 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。この表では風速階級毎に並べ、風向は10° 刻み（古いデータの場合は16方位）、風速階級は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桁まで扱うのが理想的であり、小数点以下1桁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(10)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項に記述された近傍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、大気中の気温の通減率を利用して計算することができる。

$$\text{気温の通減率} = 0.65^{\circ} \text{ C}/100 \text{ m} (3.5^{\circ} \text{ F}/1000 \text{ ft}) \quad (4.1)$$

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、近傍観測点の記録から月平均に換算した降水量を推定するべきである。

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。

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

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。

雨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。風が強い地点で雨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、風よけを装備した雨雪量計の50%と比較して、風よけのない雨雪量計は3分の1しか捕捉できないことが分かっている(Tabler 1997)。アメリカ気象局委託観測網のほとんどの雨雪量計は、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、観測所を訪れ、雨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、磁針との差を明らかにする

樹林と藪が示された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像(デジタル・ラスター・グラフィックス)は、USGS([http:// edc. usgs. gov/ products/ map. html](http://edc.usgs.gov/products/map.html))(電話303-236-7477)で注文することができる。

また、地形図はマイクロソフト社のインターネット・ウェブサイト *TerraServer-USA* <http://terra-server-usa.com>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分の緯度経度をカバーして

いる。

4.6.1.1項に記述したように、デジタルUSGS地図の別の情報源は「3D TopoQuads」である。DeLorme(www.delorme.com) (電話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、描画性能、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協会(www.nationalgeographic.com/topo)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
- ・道路縦断勾配

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、風下側へは路肩より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

吹走領域に貯まる雪の量は、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措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だろうし、耕作された農地では仮設柵が良いだろう。

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、土壌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：

- ・地質学的な土壌母材
- ・岩盤までの深さ
- ・組成（例：砂質粘性壤土）
- ・排水性（例：湿っている、良く排水される）
- ・もしあれば、塩分問題
- ・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章で述べたとおり、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、切土道路の雪の貯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、添え字が無限の吹走距離を表す Q_{inf} で表される。 Q_{pot} は通常の吹雪量の式（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

$$Q_t = 0.5 TS_{we} (1 - 0.1 4^{F/T}) \quad (4.3)$$

であり年平均吹雪量 Q_{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($S_{rwe}=S_{wd}$)結果の輸送なので、式(4.3)は次の形となる。

$$Q_t = 0.5 TS_{we} \quad (4.4)$$

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。

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

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_{ipot} と指定され、次のように計算される。

$$Q_{upot} = \sum q \quad (4.6)$$

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_{ipot} 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_{ipot} と同じと取る。もし Q_{spot} が Q_{ipot} より小さければ、降雪が吹雪量を支配し、 Q_{inf} は $0.5 TS_{we}$ (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} を補正することと計算できる。

$$Q_{t,ave} = Q_{inf} (1 - 0.1 4^{F/T}) \quad (4.7)$$

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。

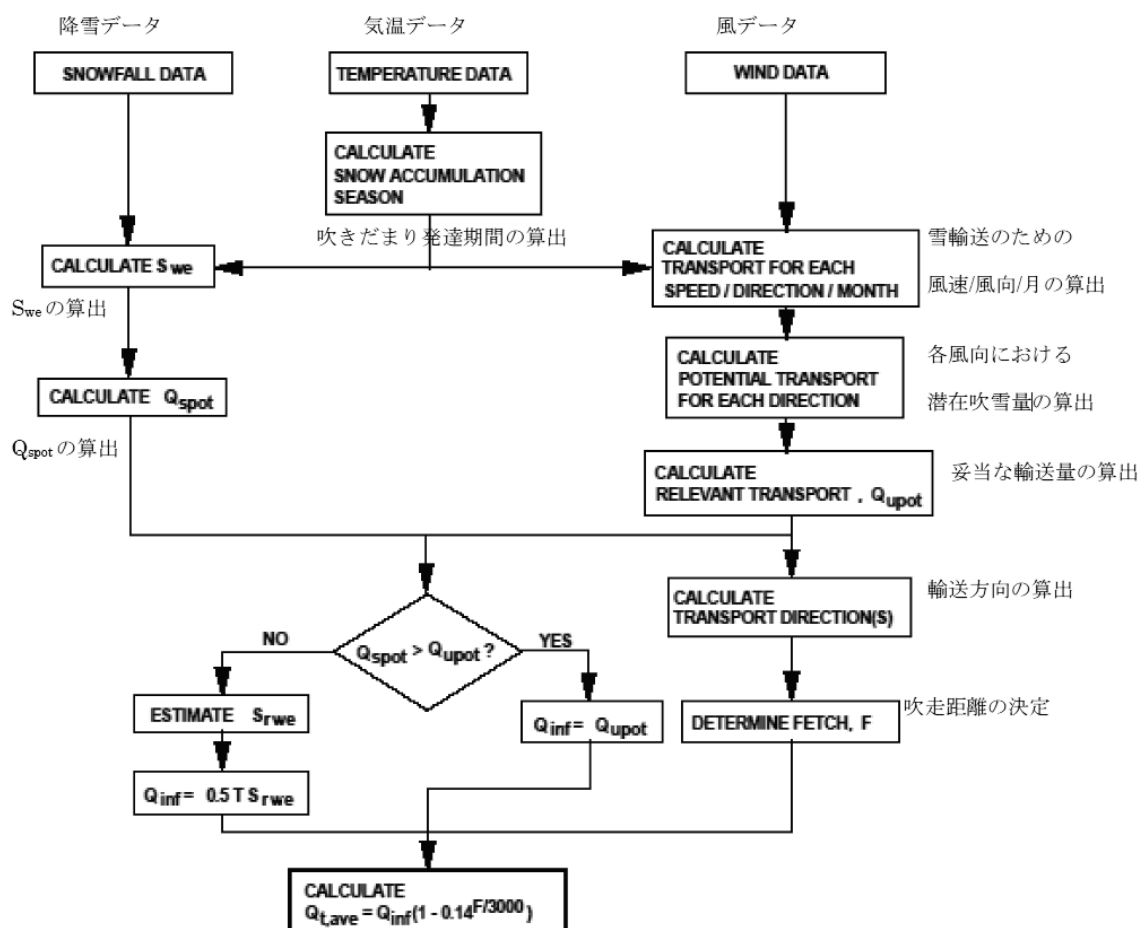


図4.9 年平均吹雪量 $Q_{t,ave}$ の推定手順のフローチャート (Tabler 1993)

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暦日は、吹雪量推定の最初の段階である。

4.6.3.1章に示した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、記録機器を設置した”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、秋のデータが見積もれず、春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挿される。この内挿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央から、0℃となった日までの日数である（ n は、秋の暖かい月の中日に加算、春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:	1 1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:	1 2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:	1 2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:	1 1月 12日- 3月 19日
ワイオミング州ララミー:	1 1月 11日- 3月 29日
ネブラスカ州リンカーン:	1 2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
ユタ州ソルトレイクシティ:	12月 10日- 2月 6日
プリンス・エドワード島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緯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。

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

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節と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、抽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 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。R²は重相関係数を示す (Tabler 1988より)。

State	Fall date					Spring date				
	A''	B''	C''	D''	R ²	A''	B''	C''	D''	R ²
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 ³ (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、経緯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、緯度1度ごとに5.5日、経度1度ごとに1日、秋には北から先に、東から先に、そして高いところから先にはじまる。春には反対向きに変化する(Tabler 1988)。

例題（ニューヨーク州バッファロー）：

与えられた条件：

表4.1

緯度 (Latitude) = $42^{\circ} 56' N$,

経度 (Longitude) = $78^{\circ} 44' W$,

標高 (Elevation) = 215 m (705 ft)

問い：New YorkのBuffaloにおける吹きだまり発達期間を算出せよ

解答：式(4.9)より

秋の日付: $519 - 0.0329(215) - 5.80(42.93) + 0.99(78.73) = 341 = 12月 7日$

春の日付: $-204 + 0.0329(215) + 7.00(42.93) - 0.41(78.73) = 71 = 3月12日$

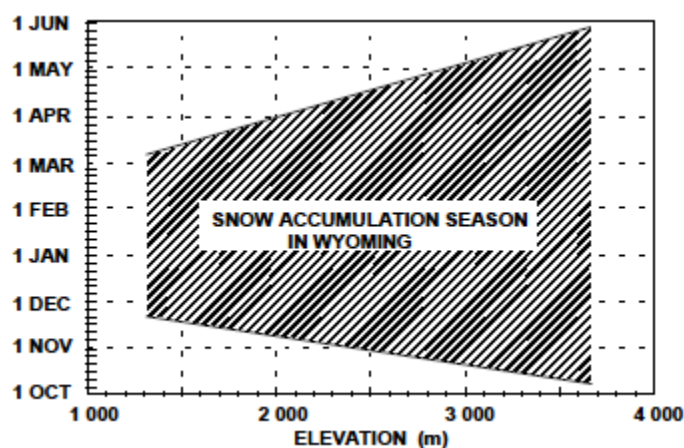


図 4.10 標高による吹きだまり発達期間の変化。表 4.1 よりワイオミング州中心の経緯度での値を例に示した。(Tabler1988)。

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節で述べた風向/風速の頻度について描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、3.3.3節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、

$$U_{10}/U_z = (10/Z)^{1/7} = C_u \quad \text{式} \quad (4.10)$$

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 に属する高さ5mまでの総吹雪量 q_{ij} は、次のように計算される。

$$q_{ij} = (f_{ij})(D)(86400[(C_u U_{ij})^{3.8}]/233847 \quad \text{式} \quad (4.11)$$

f_{ij} が、 i 要素の風速階級と j 要素の風向階級に属する、観測頻度である。

D は4.7.2節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で表した風速階級の中央値である。

各風向別の月間総吹雪量($Q_{\text{upot}})_j$ 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、ブルドベイ、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

$$q_{11-16,N} = (0.011)(24)(86400)[(1.073)(0.5145)(13.5)]^{3.8}/233847 = 201 \text{ kg/m (135 lbs/ft)}$$

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

$$= 903 + 497 = 1400 \text{ kg/m (941 lbs/ft)} \quad (\text{表 4.4})$$

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	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	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	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	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):

与えられた条件 : a) 表 4.4

b) 道路走向 北 / 南

問 :

a) 吹雪量の注目すべき方向

b) 注目すべき方向からの総吹雪量

c) 卓越吹雪方向

解答 :

a) 注目すべき方向は、SSWからWNW

b) 関係方向からの総吹雪量 =

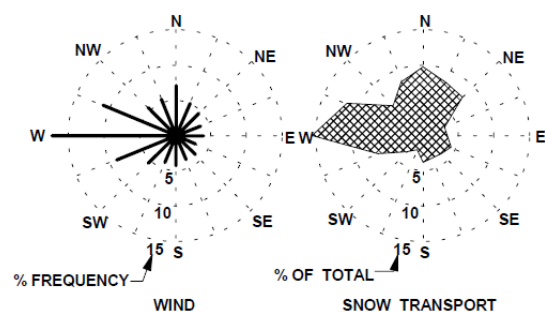
$$Q_{\text{upot}} = 5\,567 + 14\,287 + \dots + 2\,061 = 91\,983 \text{ kg/m (61,817 lb/ft)}$$

c) 卓越吹雪方向

$$[(202.5)(5567) + (225)(14287) + \dots + (292.5)(8083)] / 91983 = 253^\circ \text{ 方位}$$

表4.2と4.3を比較すると、吹雪量方向別分布が卓越風向としばしばかなり異なっていることがわかる。12月のバッファローにおける卓越風向は、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・エドワード島、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_{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、先に整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、「吹雪災害」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討しなければならない。表4.4によって示された分布は、フェンスがどれくらい遠く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_{upod})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否かを決定する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雨がある所では、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) 天気の詳細

月降雪量

	Dec	Jan	Feb	Mar
cm	58	63	45	29
in.	23	25	18	11

月降水量

	Dec	Jan	Feb	Mar
mm	86	76	61	74
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) 冬の間に降った雨; 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節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扱っている。

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許す。

例題(ニューヨーク州 バッファロー):

与えられた条件:

a) 降雪相当水量 (S_{we}) = 166 mm (6.5 in.)

b) 仮定 $T = 3\,000\text{ m}$ (10,000 ft)

問: 降雪データによる潜在的吹雪量(Q_{spot})

解答: 式 (4.4)

$$Q_{spot} = 0.5 T S_{we} = (0.5)(3000)(166) = 249\,000\text{ kg/m (167,340 lbs/ft)}$$

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

$$\text{If } Q_{spot} > Q_{upot}: \quad Q_{inf} = Q_{upot} \quad (4.12)$$

$Q_{spot} < Q_{upot}$ 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、

$$\text{If } Q_{spot} < Q_{upot}: \quad Q_{inf} = 0.5 T S_{rwe} \quad (4.13)$$

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250kg/m²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：

- a) Road oriented north/south (東方の南北を通る道路)
- b) $Q_{upot} = 91\,983\text{ kg/m}$ (妥当値) (4.7.3.2 節)
- c) $Q_{spot} = 249\,000\text{ kg/m}$ (4.7.4.2 節)
- d) 降雪の相当水量 (S_{we}) = 166mm = 16.6cm (4.7.4.1 節)
- e) 吹走距離上の植生の平均高さ = 30cm

問い：無限の吹走距離下の潜在吹雪量 (Q_{inf})

解答：式(4.12)より

$$Q_{spot} > Q_{upot}; \text{ 故に } Q_{inf} = Q_{upot} = 91\,983\text{ kg/m}$$

仮に Q_{spot} が Q_{upot} よりも大きくなければ

積雪密度を 250 kg/m^3 と仮定して

$$\text{吹き払われる雪の相当水量 } S_{rwe} = 166 - 0.25(300) = 91\text{ mm}$$

式 (4.13)から

$$Q_{inf} = (0.5)(3000)(91) = 136\,500\text{ kg/m}$$

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_{ave} は、式(4.7)を用いて推定される。

$$Q_{ave} = Q_{inf} (1 - 0.1F^{1/3})$$

ここで括弧内の吹走距離 F の真値は、 F が通常 3000m 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

懸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、懸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節で計算された吹雪の主風向は、4.6.1.3節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、衛星画像、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章で記述したように、境界線のいくつかは、林縁や小川等の経路や大きな吹きだまりを形成する樹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、膨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、衛星画像からも決定できる。吹走距離を定める地形や植生を決定するためにXMapや3-DeoQuadsを組み合わせ使用可能なDeLorme社のSAT衛星画像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（ニューヨーク州 バッファロー）：

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骨組みをなしている。

例えば、ニューヨーク州バッファローでは、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 Transport (t/m)	Description	
1	<10	Very light	極小
2	10 – 20	Light	小
3	20 – 40	Light-to-moderate	小・中
4	40 – 80	Moderate	中
5	80 – 160	Moderately severe	中・大
6	160 – 320	Severe	大
7	>320	Extreme	極大

4.8 設計吹雪量の決定

年平均吹雪量 Q_{ave} を推定する際、次なる疑問は“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？同様の疑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、設計係数と呼ばれ、 K と表現される。年平均吹雪量 Q_{ave} に設計係数を掛けることで、設計吹雪量 Q_{des} が求まる。

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

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)、ワイオミングの至る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。

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

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。この表の解釈を説明すると、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 s^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節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節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 $K \leq 2$ 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。

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

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。

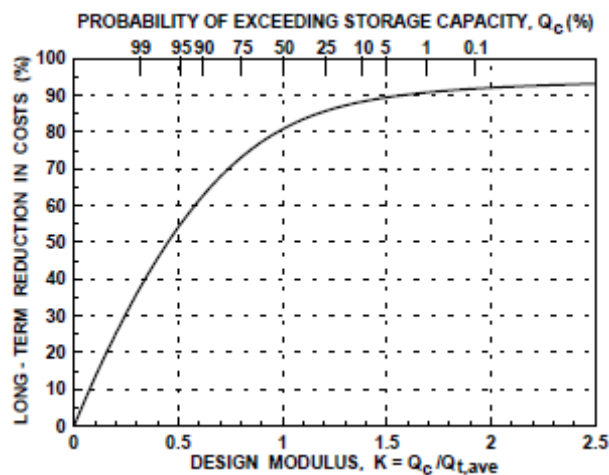


図4.12 設計年数の作用による吹雪量の長期間の縮減

例題（ニューヨーク州 バッファロー）：

与えられた条件：

- a) 吹走距離 $F = 500\text{m}$
- b) 年平均吹雪量 $Q_{t,ave} = 25\ 700\ \text{kg/m} = 25.7\ \text{t/m}$

問い：

- a) 平均年の設計吹雪量 Q_{des}
- b) 10年のうち1年を超える設計吹雪量 Q_{des}
- c) 除雪費用を90%に低減する設計吹雪量 Q_{des}

解答：式(4.14) $Q_{t,ave} = K Q_{t,des}$

- a) 平均年では、超過確率は0.5となる。表4.6から $K = 1.0$

故に、 $Q_{des} = (1.0) Q_{t,ave} = 25.7\ \text{t/m}$

- 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 $K = 1.40$

故に、 $Q_{des} = (1.40) Q_{t,ave} = (1.40) (25.7) = 36.0\ \text{t/m}$

- c) 除雪費用を90%に低減する場合は、図4.12から $K = 1.6$

故に、 $Q_{des} = (1.6) Q_{t,ave} = (1.6) (25.7) = 41.1\ \text{t/m}$

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、防雪柵により期待される年間の除雪便益 Bsr は次式により与えられる

$$Bsr = CsrCredKQ_{t,ave}/100 \quad (4.17)$$

ここで、 Csr は機械除雪費の原単位で、 $Cred$ 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、 $Cred$ 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 $H(\text{m})$ によって変化する。

$$Q_c = 8.5 H^2 \quad (4.18)$$

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關係する。

$$C_{sf} = O + ait I = O + ai t Pf H_{req} = O + ai t Pf (KQ_{t,ave}/8.5)^{1/2.2} \quad (4.19)$$

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 = 利息*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

Pf = 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1 m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、それぞれ利息と償却期間である(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かを示している。以下は代表的な条件である。

$i = 7\%$

$t = 25$ 年

$Pf = \$15$ (m²あたり)

$Q_c = Q_{t,ave}$

$O =$ 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)

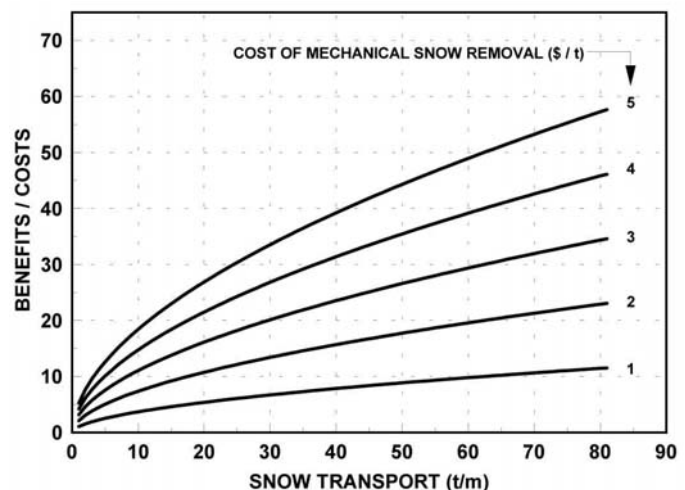


図 4.14.は設計常数 K に従い、どのように費用対効果が変化するか示している。条件は以下の通り。

$i = 7\%$

$t = 25$ 年

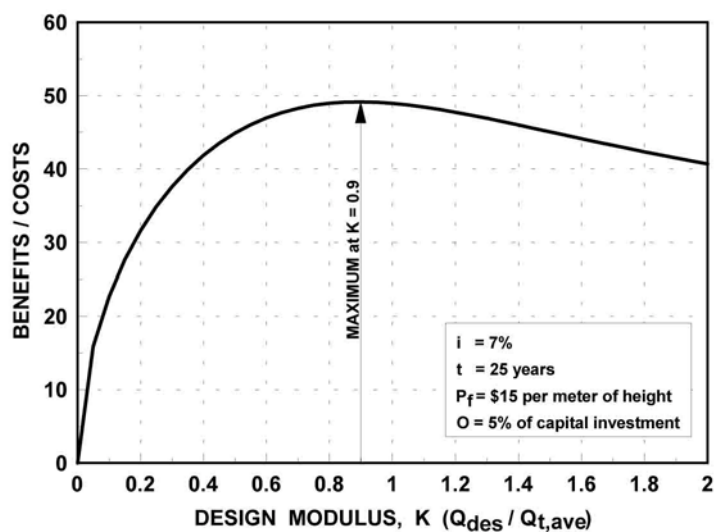
$P_f = \$15$ (高さmあたり)

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

$O =$ 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/ft²)
- g) 年間メンテナンス費用 $O = \text{投資の } 5\% = \$1.075/\text{m}^2$ (\$0.10/ft²)
- h) 耐用年数 $t = 25$ 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 (S_{we}): _____

季節降水量: _____

地吹雪率 (θ): _____

吹雪の水当量 (S_{rwe}): _____

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 対策設計の概観

5.1 概要

この章は、吹雪と吹きだまり対策について簡単なガイドラインを記述する。対策の詳細については、第6章-第8章にまとめる。この章は、対策の詳細を省略し、設計手順のチェックと概要を示すことにとどめて、以降の章のかわりではない。ここでは、前の各章の内容を把握して、吹雪問題に詳しくない技術者に、手順を示すものである。

5.2 ステップ1：現地調査の準備

冬期間における現場調査が重要である。調査の準備として、問題箇所の地形図と航空写真を入手しなければならない。インターネットサイトTerraServe <http://terraserver-usa.com> には、地形図と地理写真のデータがある。CD-ROMに収納されている地形図（(DeLorme3-D TopoQuads® software (www.DeLorme.com)) は、GPS受信機と一緒に使用できるので、優れたものである。DeLorme TopoQuad® mapsは、DeLorme XMap3.5® software上に使用することによって、防雪柵の配置が容易にできる。

5.3 ステップ2：現地調査

- ☐維持管理業者、または問題箇所に詳しい人に話を聞いて、以下の事項を決める。
 - ・マイルポストや土木ステーションによって問題箇所の位置を把握
 - ・問題の性質（吹きだまりの侵入、道路雪氷、視程障害）
 - ・問題箇所の気象条件
 - ・対策の重要度と優先度
 - ・提案と見解
- ☐吹きだまりの特徴、または侵入パターンについて、杭などを用いて方位測定
- ☐問題箇所の道路線形、その他の特徴（防護柵、橋台、樹林、植生）に注意
- ☐道路用地内に堆雪が制限されるか、または吹雪の発生源が風上から十分離れているかを検討。
- ☐土工改良や植栽を利用（現存の防雪柵を含む）して問題改善の可能性について事前検討。
- ☐隣接している土地の使用と所有権の情報を入手

5.4 ステップ3：その他のデータ収集

- ☐最大吹雪量の方向分布を決定するために過去の風データ収集
- ☐過去の降雪データ収集
- ☐過去の事故データ収集
- ☐再開発計画の収集

5.5 ステップ4：問題箇所の風向を決定

気象データと現地観測の分析に基づき、吹雪量の方向分布について、できるだけ正確に把握する。

5.6 ステップ5：用地内における堆雪を最小にする対策検討

あらゆる吹雪対策においては、道路用地内に発生する吹雪量を減少させる必要性を考慮しなければならない。用地が限られているため、典型的な選択肢は、木や低木の植え付け、または草刈りの方法である。

植生が吹雪を捕捉するので、できるだけ道路用地内に多くの植生を残したほうが良い。

一般的に、路側の草刈りは、舗装から6m（20ft）以内、または植生高さの20倍以内に留めるべきである（大きい方を基準に）。

道路法面における堆雪は、よく見られる問題の一つである。低木の植え付けは、最も良い選択肢である。低木の千鳥配置は以下の式に従う。

$$S = Hm/\tan\alpha \quad (5.1)$$

ここでは、Sは水平間隔（m）、Hmは生長時の樹高、 α は水平から計測した傾斜（勾配）である（図5.1）。低木の配置間隔は、生長時の枝張りと同じようにしなければならない。また、低木の代わりに、同じ間隔のフェンスを用いても雪を法面に留めることができる。

用地の平坦部において、間隔2～3m（6～10ft）の低木の群植は、雪を固定させることができるが、車道へ吹きだまりを引き起こす恐れがあるので、注意を要する。

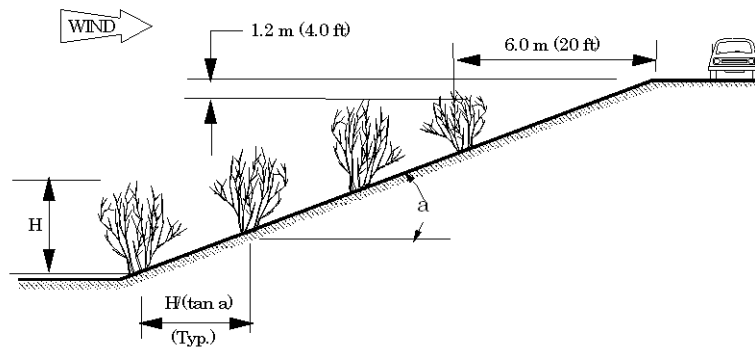


図 5.1 低木の植え付けは、盛土の吹雪を捕捉する最も良い方法

樹木と低木の植え付けは、盛土の吹きだまりを軽減することができる。風の向きと並行し、広い分離帯を有するハイウェイには、低木の植え付けが不向きであり、対策として、構造的フェンスの設置は、有効である。(図5.2)

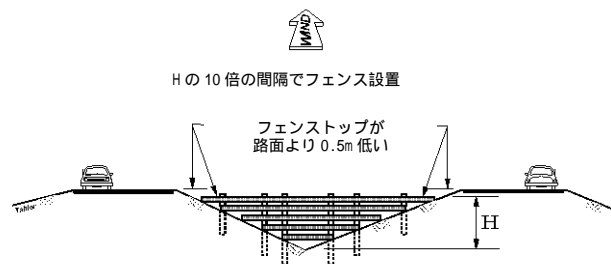


図 5.2 フェンスは、高さの10倍の間隔を空けて設置する。(Tabler 1994)

5.7 ステップ6：用地外の風上からの吹雪の予測

- ☐ 地形図、航空写真、または現地観測に基づき、吹雪最多方向の吹走距離を計測。
- ☐ 設計年を選択する。通常、平年を対象とする対策設計は、最大の費用対効果が得られる。
- ☐ 積雪シーズンの吹きだまりの成長期間を計算する。
- ☐ 積雪シーズンの雪の水当量を計算する。一般的に、雪の水当量は降雪量の10分の1 (降雪量/10) である。
- ☐ 地吹雪率 θ を決定する。 θ の値は、低い植物が生育する寒冷多風区域に0.75の最大値から、北東州の0.15くらいまでに変化する。未知の場合は、0.5を用いる。
- ☐ 下の式を用いて平年の吹雪量を推測する。

$$Q_{ave} = 150Sw(1 - 0.14^{F/300\theta}) \quad (5.2)$$

ここでは、 $Q_{t,ave}$ は、平年の吹雪量の合計（ t/m ）、 S_{we} は、積雪シーズンにおける雪の降水量の平均値、 F は吹走距離（ m ） 図5.3は、上の式の図解である。

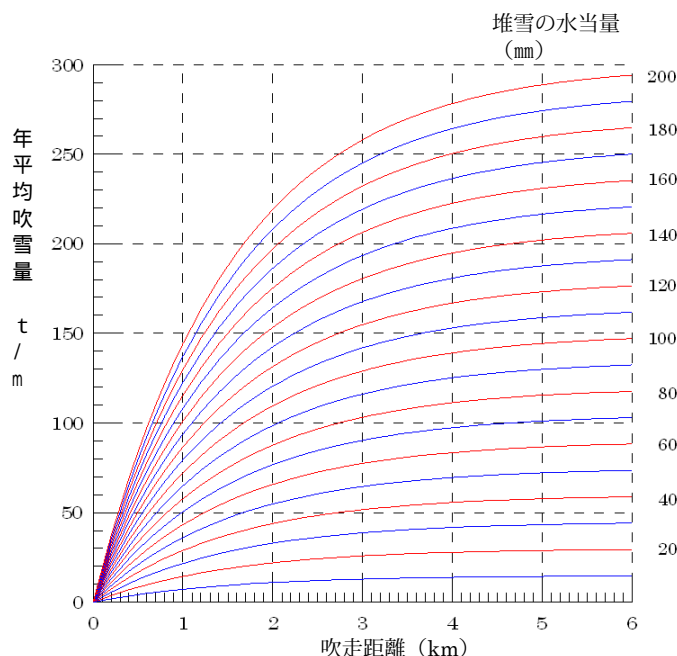


図 5.3 式 5.2 を用いた積雪シーズンにおける吹雪量と吹走距離、雪再配置の関係。マイル=0.6214km、インチ=mm/25.4 、トン/ft = 0.3357t/m。

式 5.3 に従い、設計年の吹雪量を計算する。

$$Q_{des} = K Q_{t,ave} \quad (5.3)$$

ここでは、 K は、表 4.6 から取る。平年の K 値は、1.0 である。

5.8 ステップ7：対策選択

特定の吹雪問題に対して、最も適切な対策を選択することは可能である。もし、道路用地外の風上からの雪が無視できるならば、植生管理と植樹に着目するとよい。これの詳細については、第 7 章に記述する。

5.8.1 横断面の改良

もし、雪問題がはるかに重要なら、横断面の改良は可能な選択肢である。重要な

は、断面改良、例えば、勾配を緩めることが、吹きだまり防止に有効な選択肢であるが、土工だけでは道路の雪氷問題や視程障害の解決にはならないと認識すること。切土断面改良に対する推薦策は、スノーフェンスと同じ目的を果たすように、できるだけ多くの雪を捕捉すること。しかし、切土の防雪容量は通常よりも少なく、特に切土から盛土へ変わる箇所で吹雪量が小さくなる。したがって、断面改良は、スノーフェンスの必要性を排除することにはならない。

5.8.1.1 切土区間

切土道路区間に関連した吹きだまりのタイプは図 5.4 に示される。吹きだまりが切土の風上側に形成される傾向は、しばしば見過ごされるが、断面改良を考える上で重要である。

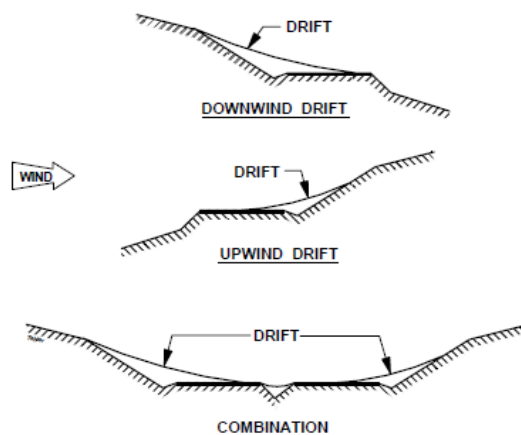


図 5.4 切土区間に形成される吹きだまりのタイプ (Tabler 1994)

切土改良の推奨される方策は、できるだけ多くの雪を切土斜面にためること、また、風上に地形や植生によって生じる平衡雪丘を作ることである(図 5.5)。これは、よく知られている経験則「1 : 6 まで斜面をねかせる」に置き換わる。ここでの推奨もまた、除雪の堆雪スペースを増加させる幅広の溝となる。数的ガイドラインを図 5.6 と図 5.7 に示す。事前の定義として、 α は風の進入角 (風向と道路直角方向がなす角) である。図 5.6 の切土地形における堆雪容量は図 5.8 に示される。断崖地形(図 5.9)における岩切りの推奨は除雪費用を低減させる。

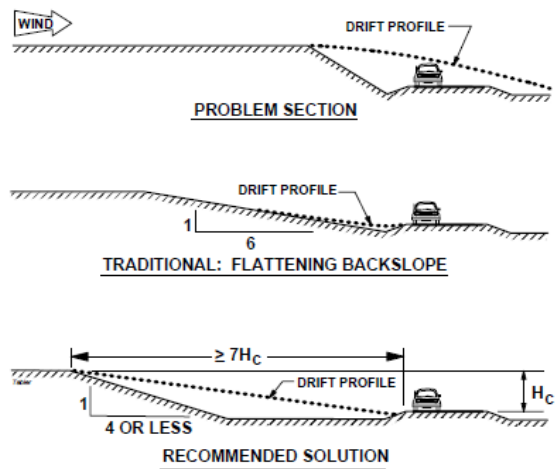


図 5.5 吹きだまりを防ぐための切土設計についての、従来と推奨策の比較 (Tabler 1994)

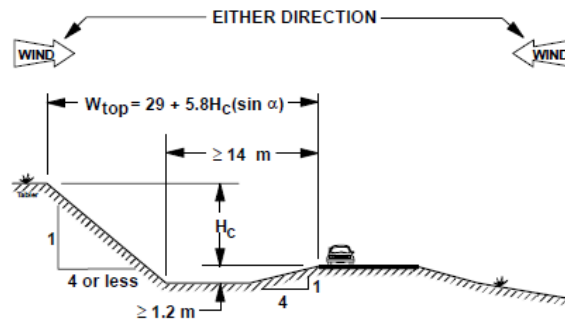


図 5.6 風上側の地形が平坦か道路に向かって下っている斜面での、吹きだまりを防ぐために提案される切土断面 (Tabler 1994 改) 単位はメートル

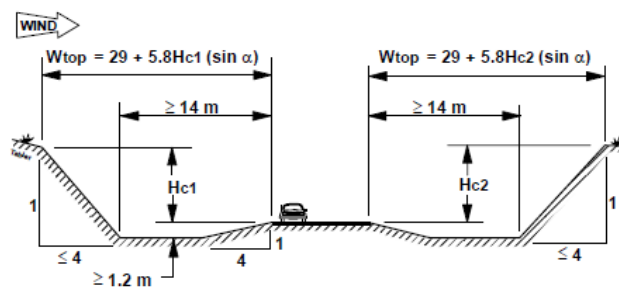


図 5.7 両端切土について提案されるガイドライン (Tabler 1994 改)

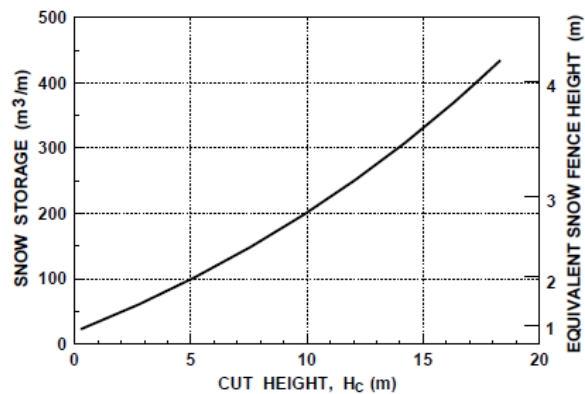


図 5.8 図 5.5 の断面における切土高さに対する堆雪容量 (Tabler 1994)

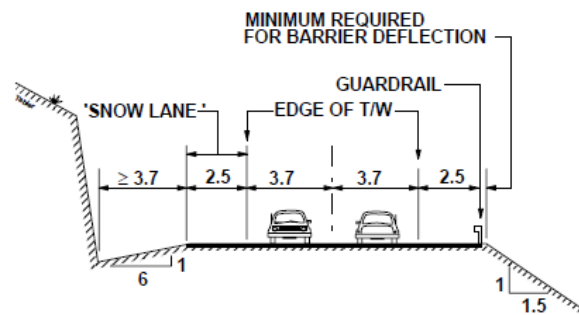


図 5.9 断崖地形における岩切りについてのガイドライン (Tabler and Cavagnaro 1993)

5.8.1.2 盛土区間

路側の雪堤は吹雪時に非常に危険な視程状況を起こし得る(図 5.10)。この問題を防ぐ方法は、図 5.11 のガイドラインにより、周囲の地盤面より上に道路を高くすることである。

高盛土について言えば、barn roof 区間は道路付近に形成される吹きだまりの深さを減少させる(図 5.12)。実行可能な場合は、断面は防護柵の必要を無くすよう設計されなければならない。

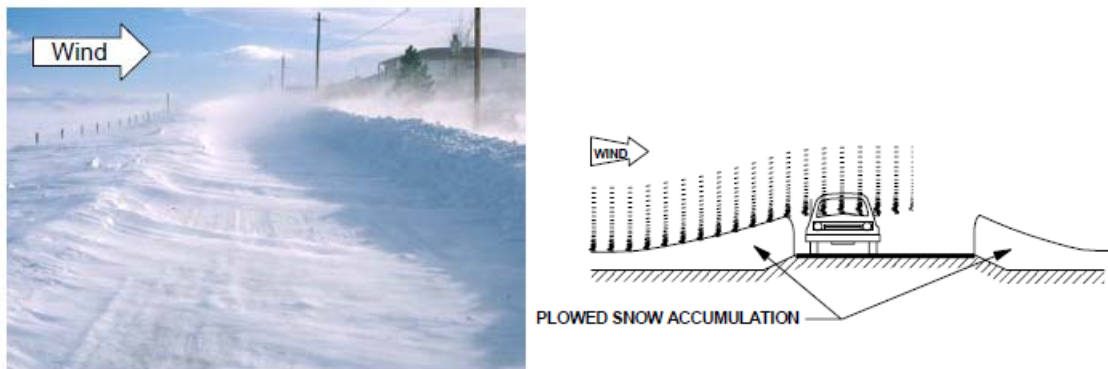


図 5.10 路側雪堤は著しい吹きだまりと視程障害の原因となる(右の図は Tabler 1994)。

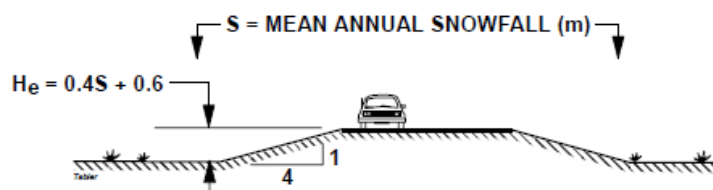


図 5.11 最小盛土高のガイドライン(Tabler 1994)。

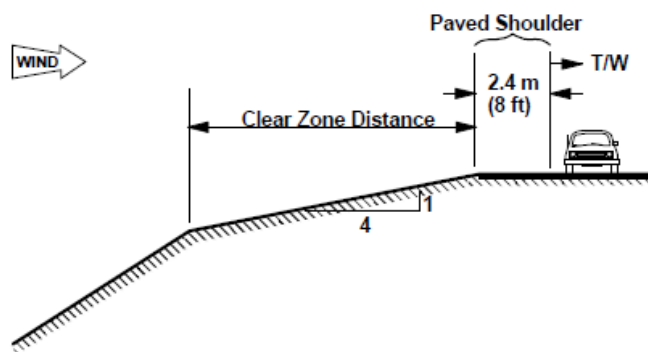


図 5.12 高盛土区間について提案される処置。

5.8.1.3 防護柵

防護柵は吹きだまりを形成させ(図 5.13)、視程障害の原因となり(図 5.14)、除雪車の通行を妨げ、そして路側雪堤の排除を妨げる(図 5.15)。吹雪の緩和のために、道路設計について唯一最重要なガイドラインは、衝突のない範囲の防護柵を最小限にすることである。box-beam またはガードケーブルの使用により吹きだまり問題の厳しさは減少するが(図 5.16)、なくなりはない。



図 5.13 防護柵が吹きだまりの原因となる。左の写真は W-beam レール、右の写真はコンクリート製中央分離柵 (Tabler 1994)。矢印は風向を示す。



図 5.14 防護柵は著しい視程問題を引き起こし得る。写真提供 Craig Shelton, Alaska Department of Transportation and Public Facilities.



図 5.15 防護柵が路側雪堤の排除を妨げる。



図 5.16 この 1/30 スケール屋外モデルは、box-beam ガードレール（手前側）による吹きだまりは W-beam レール（奥側）よりも少ないことを示している。（Tabler and Jairell 1980）。どちらのモデルも縁石を含む。

5.8.2 防雪柵

防雪柵が緩和計画の一部ならば、次の段階は、望まれる種類の柵についての設計要件を決定することである。柵のセットバックと設置のための要件の大部分は防雪植栽にも適用できる、また、違いについてはこの章の最後に述べる。与えられた柵高に対して最大の防雪容量をもたらすため、50%の空隙率が最も一般的に使われる。より空隙率の低い柵を使用する理由は、より短い吹きだまり雪丘長(図 5.17)により、用地制約により強制されうるセットバックを減少させられるからである。

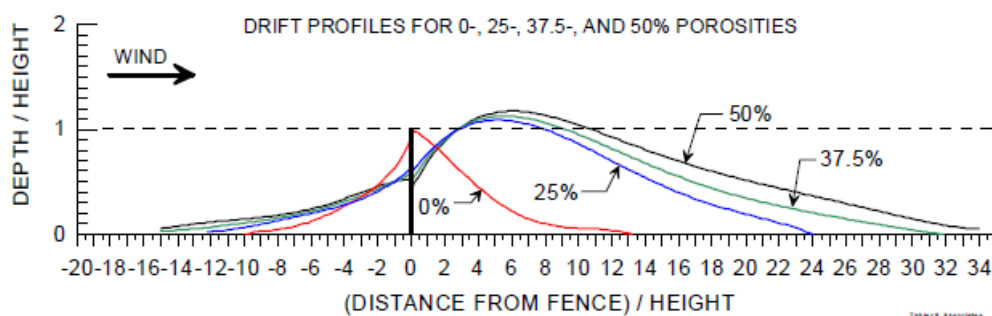


図 5.17 空隙率 0%、25%、37.5%、50%の柵により形成される吹きだまりの形状。

5.9 ステップ 8 : 防雪柵の必要高の決定

必要高 H_{req} (m) は次式で与えられる。

$$H_{req} = [Q_{des} / (3 + 4P + 44P^2 - 60P^3)]^{0.455} \quad (5.4)$$

ここで、 Q_{des} : t/m、 P : 空隙率。 通常のケース $P=0.5$ について、

$$H_{req} = (Q_{des}/8.5)^{0.455} \quad (5.5)$$

(5.5)式の図解は図 5.18 で与えられる。

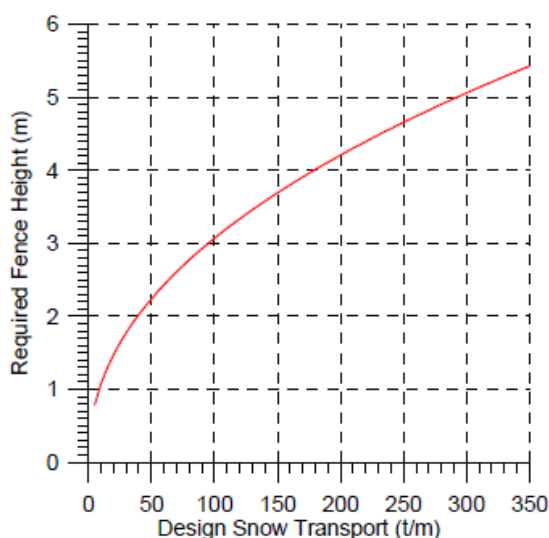


図 5.18 設計吹雪量に対する空隙率 50%防雪柵の必要高 (Tabler 1994)。

5.10 ステップ 9 : 防雪柵配置の決定

他の制約がなければ、吹雪の入射角が $55^\circ \sim 90^\circ$ 程度については、防雪柵は道路に平行に設置されることが好ましい。吹雪の入射角がもっと傾いているとき、柵は風の方向に直角に 10° 前後の傾きを保つべきである。これをオブリークフェンス (斜交柵) と呼ぶ。

5.11 ステップ 10 : セットバック量の決定

防雪柵のセットバックは、柵によって発生する吹き溜まりの終端になるべきであり、柵によって出来るいくつかの吹きだまりが、柵無しの場合に出来る吹きだまり深さより小さい時、妥当と考えられる。

道路上に吹きだまりを生じさせないためには、防雪柵のセットバックは防雪柵が防雪容量を満たした時、最大吹きだまりには、空隙率 50%の柵の場合には、平坦な地形に対して柵高さの 35 倍の距離が必要になる。この距離は、優先する風の方向 (主風向) に平行に計測され、図 5.19 に示すように、必ずしも道路に直角である必要はない。6.5.2.1 節に詳細に述べているが、防雪柵と道路肩との距離は、多分に地形に依存して

いる。

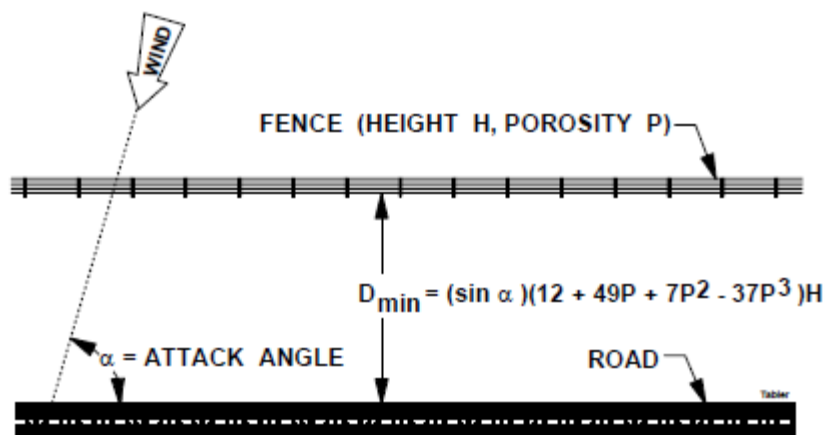


図 5.19. 平地に設置された防雪柵のセットバック (Tabler1994)

設計防雪容量が平均吹きだまり量の 2 倍あれば、図 5.20 に示すように、柵のセットバックは柵高さの 18 倍まで減少させることができる。これは、空隙率 50%の防雪柵の最小値である。防雪柵のセットバックは、図 5.21 に示すように、柵を壊し、柵の有効高さを減少させるような吹きだまりを発生させない場所であることが望ましい。

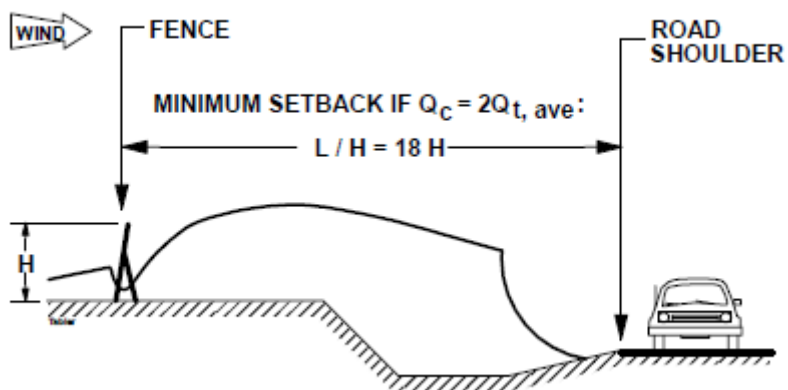


図 5.20. 防雪柵と道路肩との距離は設計吹き溜まり量より大きければ、縮小しても良い (Tabler1993)。

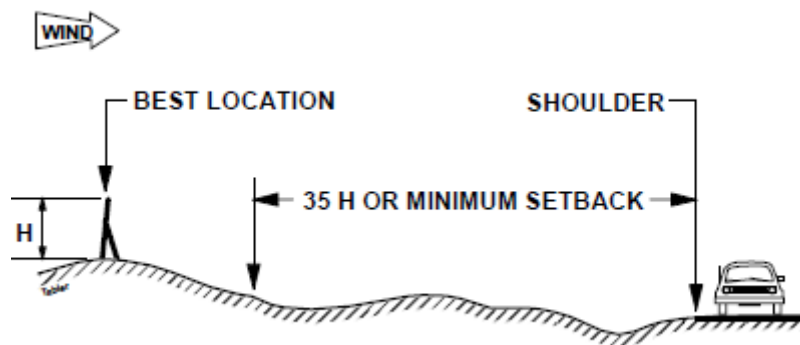


図 5.21. 防雪柵の設置位置としてベストな場所（計算で得られる最小セットバックより大きな位置に防雪柵を設置する）。

斜交柵の場合、柵と道路肩との最も小さい距離は、道路脇が摘要される。第 6 章に詳述するが、端部効果を考えると、セットバック距離は減少させることができる。

5.11.1 二重柵の柵間距離

一列の背の高い防雪柵は、低い高さの柵の列より多くの雪を捕捉し、コスト面でも効果的である。平地やなだらかな斜面地形で、より多くの列が必要とされている場所では、 $30H$ の列間を取るべきである。防雪柵の列間は風の吹き上がる所では列間を狭く、風が吹き下ろす所では離すべきである。

5.12 ステップ 11：地形図上における防雪柵の試験的なレイアウト

このステップは DeLorme 3-D TopoQuads® と DeLorme Xmap3.5®.を使うと容易である。

5.12.1 防雪柵端部配置の決定

防雪柵は図 5.22 に示すように、柵の端末では雪の捕捉率が減少することを考慮して、主風向に対して両側に 30 度以上延長しなければならない。同様な理由により、図 5.23 に示すように、斜交柵は重ね合わせ配列にしなければならない。地図上の防雪柵の配置は図 5.24 のように描かれる。

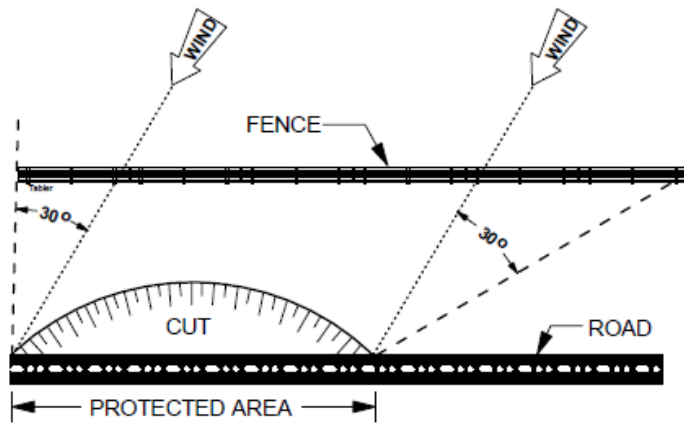


図 5.22. 道路を守るのに必要な前後 30 ° の防雪柵範囲 (Tabler1994) .

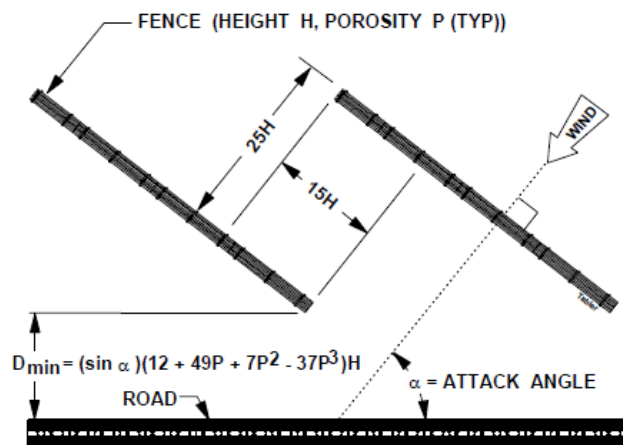


図 5.23. 道路を守るのに必要な斜交柵の設置基準 (Tabler1994) .

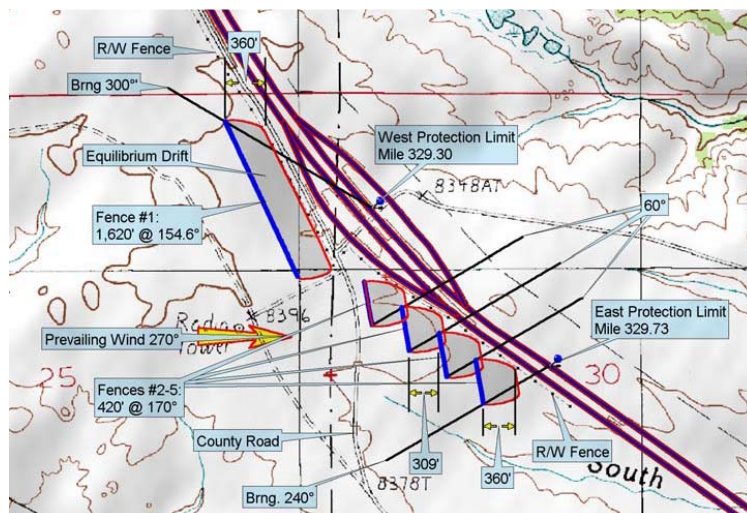


図5.24. DeLorme software. © 2002を使って作図した防雪柵配置の予備設計の例
DeLorme(www.delorme.com) XMap®3.5and 3-DTopoQuads®1.0. [m = 3.281*ft]

5.12.2 柵開口部の設計

柵端部効果は 3.8.5.2.2 節に詳述するが、防雪柵長は道路方向に少なくとも $30H$ はあるべきで、柵開口部は可能な限り避けた方がよい。小さな開口部でさえ、防雪容量と捕捉率が著しく減少する。開口部の設計方法を図 5.25 に示す。TypeC は想定する風向きが接続する道路に平行の場合である。

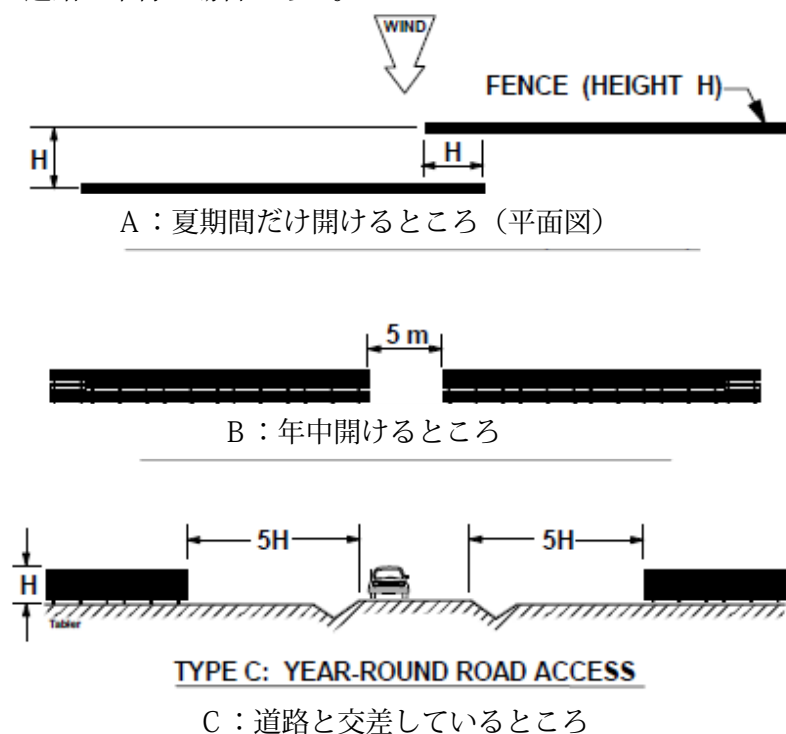


図 5.25. 防雪柵の開口部の設計方法 (Tabler1994)

5.13 ステップ 12 : 防雪柵設置位置の決定

予備設計による防雪柵配置が終了した後は、提案された防雪柵配置が現地に適合していることが証明されなければならない。一般的に、予備設計では地形図には示されない地形や物理的特徴により変更が余儀なくされる。現場における防雪柵の設置位置設計は、地図ソフト付きパソコンと連動する GPS 受信機の活用により容易になる。

最終的な野外検討設計では、防雪柵の縁端部が路面の明らかな急変や氷結状態を発生させないことを明らかにすべきである。第 2 章に示すように、防雪柵は明らかに視程を改善し、シャーベットや凍った路面の成立を減少させる劇的な効果がある。従って、防雪柵の設計者は、安全な場所から不安全な状態になってしまう重大な危険箇所を、結果として作ってしまうことがある。図 5.26 は防雪柵縁端部における急激な視程変化を表している。図 5.27 は違う日の同じ場所における、高さ 3.8m の防雪柵と中低木の間の隙間から流れ込む吹雪によって引き起こされる道路雪氷の変化を示している。

防雪柵縁端部における危険を避けるための緩和方法を次に示す。

※防雪柵を吹き込む雪の量を減らす高木や中低木などの自然物と結ぶ。

※防雪柵間の隙間を埋める。

※柵端部付近では、柵の高さを低くしたり、柵の空隙率を多くする。



図 5.26 この視程の急変は WyomingI-80 で、高さ 3.8m (12.4ft) の防雪柵の終端部で見られた。左側の写真は天候の急変時に、アンダーパスでもよく見られる現象である。右の写真は同時刻の反対側の方向で見られた、防雪柵に守られた範囲内の様子である (Tabler1994)。

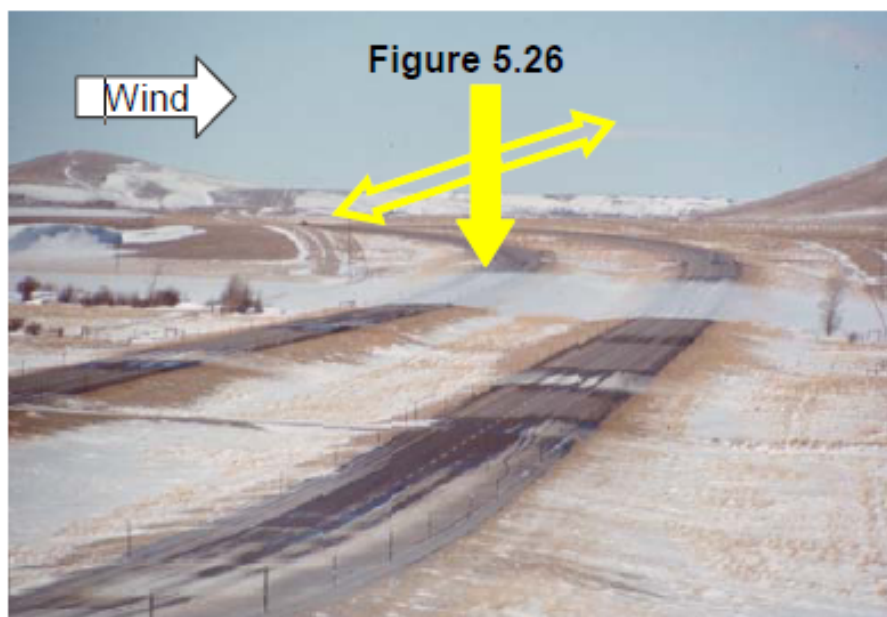


図 5.27 高さ 3.8m の防雪柵と中低木との隙間から流れ込む吹雪によって引き起こされる道路雪氷の変化。(Tabler1994)。

5.14 ステップ 13：柵の素材の選択

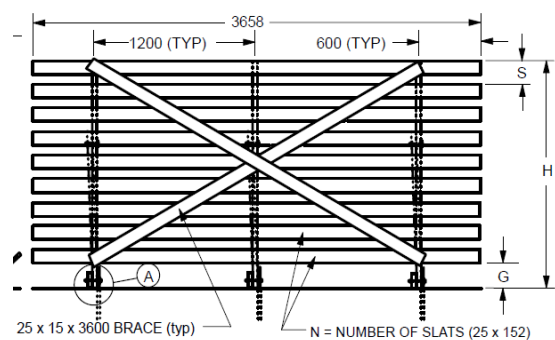
※防雪柵、防雪林、仮設柵の 3 つに分類してそれぞれの節で説明

5.14.1 防雪柵

多くの柵の素材については第 6 章に示した。背の高い柵に一般的に使用される素材は木と合成素材である。図 5.28 に示すワイオミングの防雪柵は、厚さ 2.5×幅 15cm (1×6 インチ) の板を木製のトラスフレームに固定してある。個々のパネル (右下参考図を参照) は幅 3.7m (12 フィート) で、片側を地中に埋め込んだ 1.5m (5 フィート) の補強杭でとめている。柵の高さは 1.8~4.3m (6~14 フィート) である。この柵の一般的な標準図を 6 章に示した。高さ 3.0~3.6m (10~12 フィート) の一般的な防雪柵の詳細な標準図は付録 B に示した。ワイオミングの防雪柵は最少のコストで構築できるが、25 年以上の耐用年数の間にはそれ相応の維持費が必要である。ワイオミングの防雪柵は強風や平坦地における雪の埋没には耐えられるが、傾斜地において埋没した場合には、雪のクリープやグライドの力によって損傷を受けることがある。



図 5.28. 3.0m のワイオミングの防雪柵



参考図 これが 1 パネル (図 6.8 より)

背の高い柵に最も広く使用されている合成素材は、撚ったケーブルの埋め込まれた合成高密度ポリエチレンのベルトであり、100m (360 フィート) のロール状になっている。ケンタウロス HTP ベルト (www.centaurhttp.com) は、図 5.29 に示すように 13cm (5 インチ) の幅に 3 つの撚ったワイヤーが埋め込まれている。より適用性のあるものとして、15cm (6 インチ) 幅に 7×7 の撚ったワイヤー 4 本を埋め込んだベルトが、パーマレイルインターナショナル (www.snowfence.com) から最近、紹介されており、取り付けや引っ張り作業 (図 5.30 参照) のための道具や支柱を含めたセット商品も提供している。

合成素材による柵の長所は、整然として景観を乱さない外観、耐久性、安価な維持費、そして雪のクリープやグライドによる損傷に対する耐久性である。道路敷地が十分にあるような場所では、合成素材は道路への立ち入り防止と防雪対策の 2 つの目的

で使用することができる。ワイオミングの防雪柵に比べて導入時のコストは大きくなるが、その差よりも多くの維持費を抑えることができる。



図 5.29. 柵の素材である合成ポリエチレンと金属製の燃ったケーブル（ケンタウルス HTP）



図 5.29. 柵の素材（パーマレイルインターナショナルの厚意により掲載

参考 15cm の新しいタイプのベルト
（図 6.36 より）



図 5.30. 巻き上げテンショナー（左）と
ベルト受け付きのアルミニウム製支柱
（写真はパーマレイルインターナショナル
の厚意により掲載）

5.14.2 防雪林

正しく設計された場合、防雪林は防雪柵と同様の効果的が得られる。この場合、防雪容量があることと隙間がないこと、そして、吹きだまり成長のどの過程においても、風下側の吹きだまりの道路への侵入を防ぐために十分な道路からの離れが求められる。植生の生長が促進されれば、植生によるフェンス（防雪林）は防雪柵よりもコストが安くなる。逆に好ましくない条件では、直接的な経費と間接的な経費の合計は防雪林と防雪柵で同様な額になる。

吹きだまりの制御に適している樹木は、比較的密集した枝葉が地表近くで広がっているものが良い。枝葉が枯れやすい樹種は避けるべきである。空気中や土壌の塩分への耐力もしばしば必要とされる。アメリカ中西部や南東部に適した多くの樹種は 1999 年にミネソタ運輸局が発行した「ミネソタの景観と沿道のための樹種」(Woody & Herbaceous Plants for Minnesota Landscapes & Roadsides) の CD-ROM で確認できる。

防雪柵への手引きは防雪林にも応用できるが、植生の生長に伴う高さや密度（葉面積）の変化の説明を取り込んで扱うことが必要である。風下側の吹きだまりの長さは時間とともに変化し、図 5.31 に示す冬期の吹雪量と関係する防雪容量によっても変化する。植生の密度が濃くなるほど風上側に堆雪し、風下側の雪丘の長さは短くなる。2 列以上の林を互い違いにした成木の針葉樹は空隙のない防雪柵と同様の効果がある。

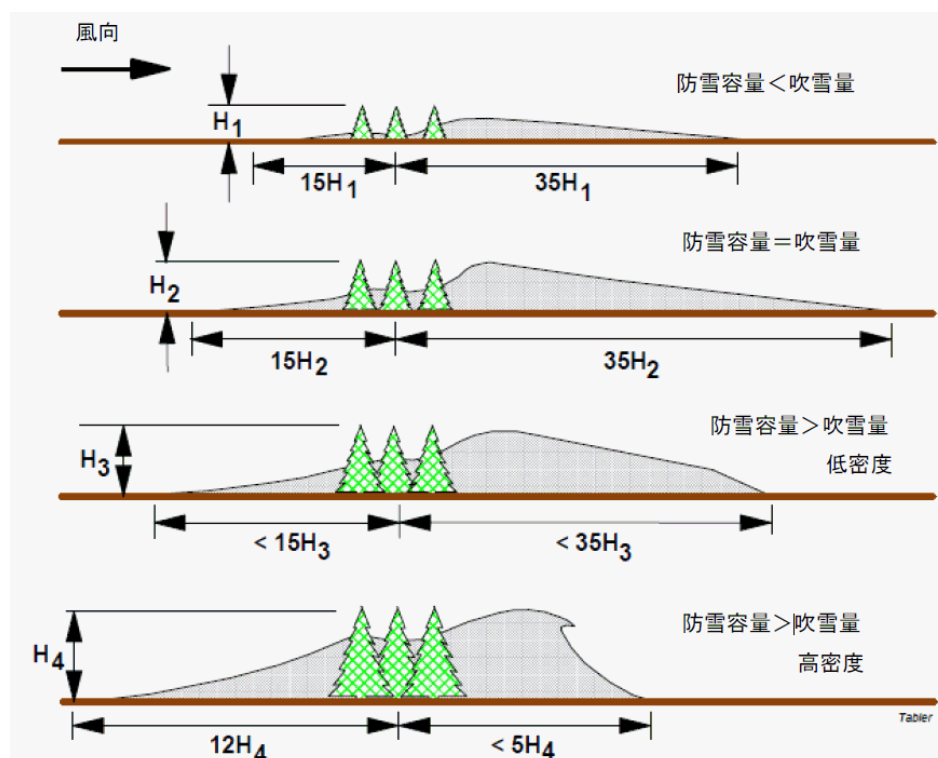


図 5.31. 防雪林の生長にともなう吹きだまり形状と防雪容量の変化

中程度以上の吹雪量の条件においては、 H_{req} をその場所において必要な柵の高さとして、必要な道路からの離れは $(\sin \alpha) (35 H_{req})$ となる。吹雪量がそれよりも多いところでは、防雪林の植生を歩道の端部から少なくとも 60m (200 フィート) は離すべきである。防雪林が十分な効果を示す高さに生長するまでの間 (※図 5.32 のように吹きだまりが風下側に長くなるので)、吹きだまりの侵入を防止するための仮設柵を併用することで、離れを短くすることができる。このような仮設柵は設計された吹雪量の全てを貯えるのに十分な容量を確保すべきであり、少なくとも防雪柵の高さの 20 倍以上の長さを、防雪林の風上側に離して設置すべきである。

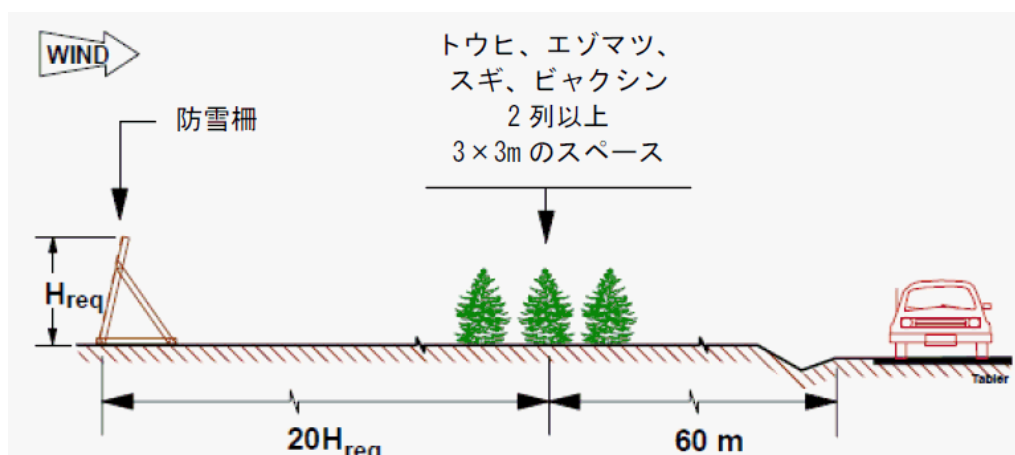


図 5.32. 吹雪量が中程度以上の場合の最小セットバックと必要に応じた臨時防雪柵の位置

防雪林と道路端からの離れが 90m (300 フィート) を超える場所では、図 5.33 のように、防雪林と保護すべき領域 (道路) の間に 2 列以上の低木を植えるべきである。

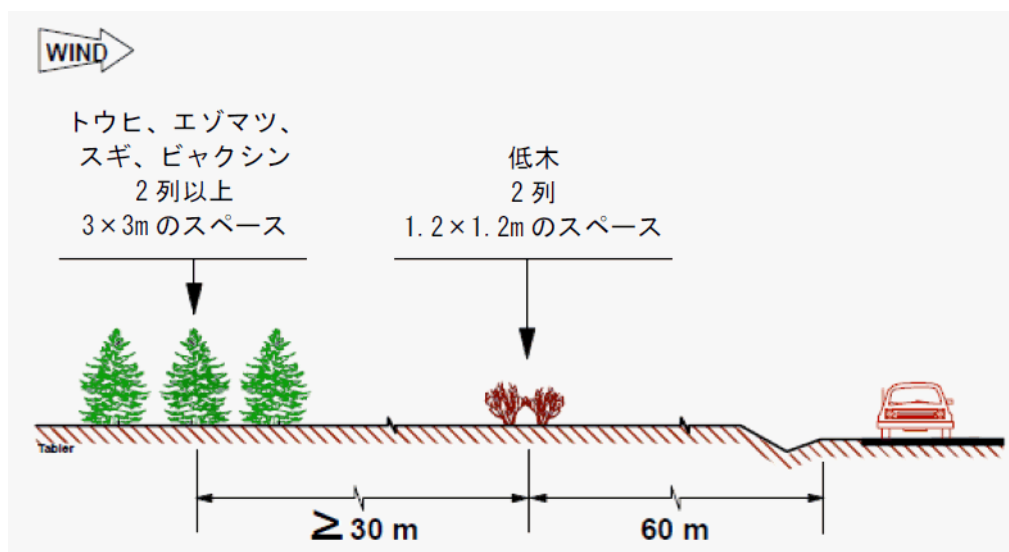


図 5.33. 防雪林と道路の離れが大きい場合には 2 列以上の低木を植えるべきである

防雪林の隙間は、図 5.34 のように風下側に深い吹きだまりを起こすので避けるべきである。多数の樹木が枯死してできた隙間は、代わりの植生が生長するまでの間、無孔板の防雪柵によって封鎖すべきである。

必要な柵の高さが 3m（10 フィート）未満の区間では、高木ではなく低木を用いることも検討すべきである。低木は生長が早く、枝葉が密になりやすいため、樹木に比べて導入コストが安いという長所がある。1.2m（4 フィート）の間隔と列間で千鳥に植えた 2 列の低木は効果的な防雪林となる。

防雪林の低い枝を刈り込むと風上側の吹きだまりが小さくなり、風下側の吹きだまりの長さが増大する。それゆえ、防雪林の裾枝打ちは推奨できないが、道路沿いの低い枝の裾枝打ちは図 5.35 のように吹きだまりを和らげることができる。図 5.36 のように、低木や針葉樹はその付近に吹雪を堆雪させるため、背の高い落葉樹の弱風域の風上側に植えるべきである。



図 5.34. 防雪林の隙間と不十分な離れは道路上に深い吹きだまりの原因となる



図 5.35. 道路沿いの低い枝の裾枝打ちは吹きだまりを和らげることができる



図 5.36. 低木や針葉樹はその付近に吹雪を堆雪させるため背の高い落葉樹の弱風域の風上側に植えるべきである

植樹することは傾斜地における吹きだまりを緩和する効果もある。図 5.37 に示す“ミネソタスノートラップ”は、風向が斜めの場合の効果的な植え方である。風が高架道路と平行に吹いている場合、高木と低木を合わせて植えることで図 5.38 のように局所的な吹きだまりから保護することができるが、より厳しい吹雪の場合には高木と低木は雪に埋没する。

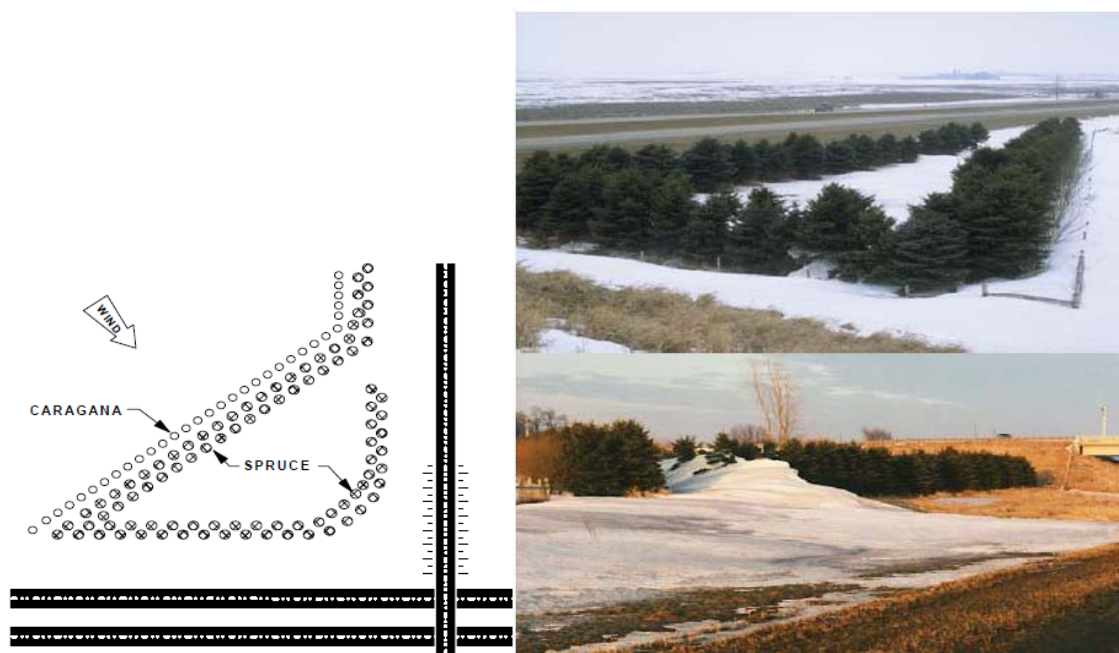


図 5.37. ミネソタスノートラップは傾斜地で斜めから吹雪が発生する場合に効果的な植栽方法である



図 5.38. この植栽は吹きだまりの削減に成功したと報告されている

5.14.3 仮設柵

最も一般的な仮設柵は鋼鉄製の T 字型支柱と 1.2m (4 フィート) 幅の細長い木製板やプラスチックのフェンス部分で構成されている。最も効果的で耐久性を持たせるためには、支柱は 2.4m (8 フィート) ごとに配置し、フェンスを直立した支柱にしっかりと、ピンと張る。多くの合成素材のフェンスの正しいテンションは、フェンスの弛みを抜いた後で 1% の引き伸ばしを与えることで達せられる。直立支柱への取り付けは、摩擦を防ぐためにフェンスが動かないように固定すべきである。ひとつの効果的な方法は、図 5.39 のように支柱に巻きつけたフォームパイプ (※緩衝材のようなもの) 隔離材と 50×50mm (2×2 インチ) のあて木で挟み込む方法である。地表からフェンスの下を 15cm (6 インチ) あけることによって、防雪容量が約 25% 増加し、フェンスが吹きだまりによって埋まる可能性を低くする。

図 5.40 に示した背の高い仮設柵の標準図を第 6 章に示す

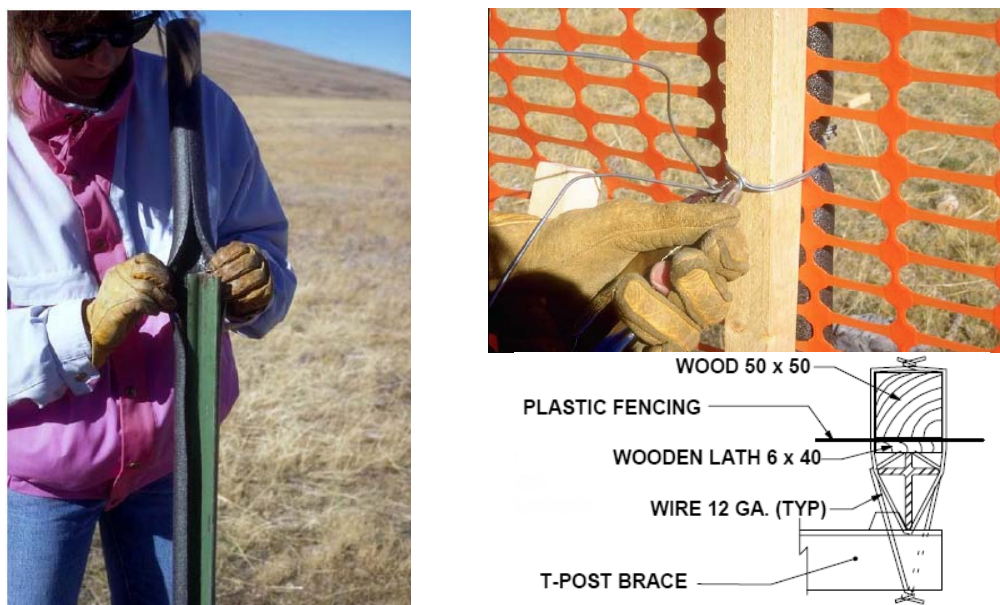


図 5.39. T ポストに巻きつけたフォームパイプは木の薄い板より良い制御力を与える (タブラー、1994 年) 右下は参考 (図 6.51 より)



図 5.40. 2.0m と 2.4m の仮設柵の設計 (タブラー、1994 年)

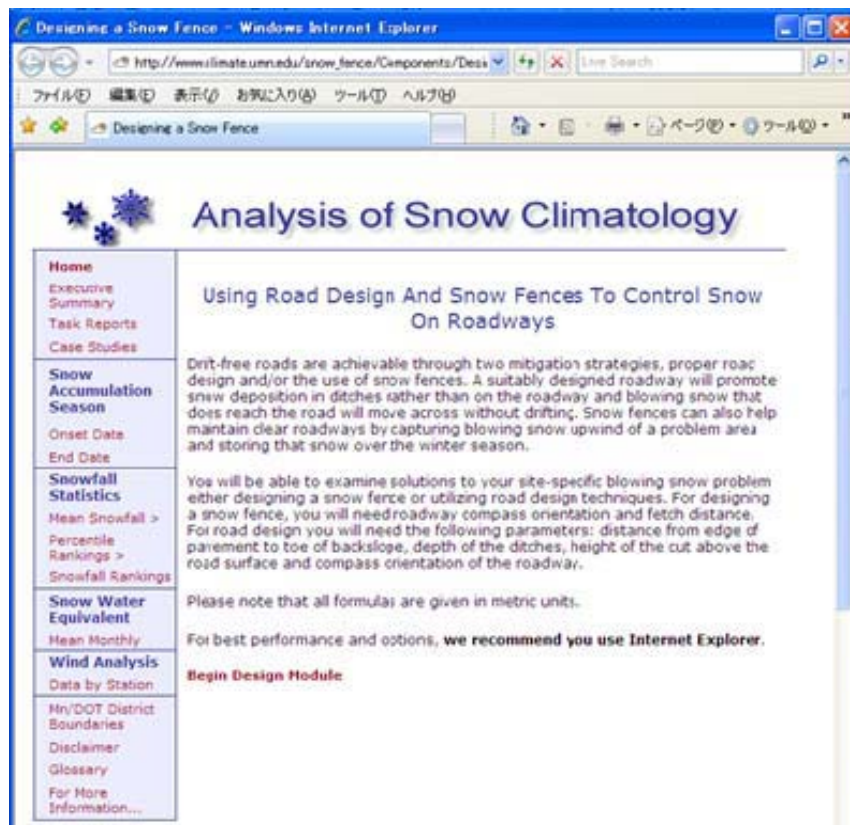
5.15 防雪柵設計のためのミネソタウェブサイト

ミネソタ州立大のインターネットサイトでは、ミネソタ州内における防雪柵の必要な高さ、道路からの離れ、2重柵の方法を利用者に示しているとともに、ミネソタ州外における防雪柵の設計においても降雪や雪に関係する係数を修正することで活用できる。このウェブサイトはこのレポートで示した指針に対する優れた教材となっている。

※アドレス) 掲載されているアドレスではつながらない!

×) http://climate.umn.edu/snow_fence/Components/Design/introduction.htm

○) http://www.climate.umn.edu/snow_fence/Components/Design/introduction.htm



参考 ミネソタウェブサイトのトップページ

5.16 参考文献

参考文献は 6～8 章の終わりに示す。

6 防雪柵（構造物）の設計と配置について

6.1 目的

本章では、第3章の吹雪量と堆雪量の特性に基づく、防雪柵の設計と配置のための明確な基準を示す。なお、本章は設計者が第3章の内容を熟知しており、4章の基礎的な計算を終えたものとして記載している。

防雪柵には、防雪対象地域の風上側に雪を捕捉する形式（吹きだめ式）と、防雪対象領域周辺の雪の流れを偏向する形式（吹き払い式）の2つの種類がある。吹き払い式防雪柵のいくつかの適用事例と設計基準については6.4項に述べることで、ここでは吹きだめ式防雪柵について詳述する。

6.2 要約

- 吹きだめ式防雪柵の防雪容量は、設計吹雪量（ Q_{des} ）と等しくなる。これは、防雪柵を成功させるための最も重要な条件となる。
- 防雪柵の捕捉率と、これによる有効性は柵高とともに増加する。
- 柵高の高い単列の柵は、同等の防雪容量を持つ柵高の低い複数列の柵と比べ、より経済的である。必要な柵高は、柵の空隙率と所要の防雪容量との関係から決まる。
- 空隙率50%の柵は、最も効率的で最も多くの雪を捕捉できるが、空隙率の小さい柵は必要なセットバックを減少させることができる。
- 無孔の防雪板では、柵前面の捕捉率は制限されるが、柵のセットバックを小さく抑えることが可能である。
- 柵高の1/10程度の下部間隙を設けることにより、捕捉率を改善し、堆雪の沈降による柵の破損を防ぐことが可能である。
- 柵には、ワイオミング防雪柵のような据え付け型のものと、支柱式のものとがある。表面取り付け式の柵は、建設費が通常最も安価になるが、支柱式の柵は斜面上における雪のクリープへの抵抗性に優れている。支柱式の柵は、専有面積が小さいことから、永久凍土上への設置に適している。
- ワイオミング防雪柵は、1パネルあたり3つの木製トラス部材と、これに25～30cm間隔で取り付けられた15cm幅の水平板により構成される。柵高の範囲は1.8～4.3mである。柵の上端は風下側に15°傾斜し、下部間隙は柵高の約1/8となる。個々のパネルは、幅3.66mで、補強棒とUクリップにより固定される。5種類の柵高の一般図を本章に、また柵高3.0m～3.6mの場合の詳細な標準図を付録Bに掲載してあ

る。

- U-クリップによる補強棒への確実な固定は必要不可欠である。柵のどのような動きも、固定の失敗につながる。
- ワイオミング防雪柵の耐用年数は、乾燥地では少なくとも 30 年であるが、総合的な維持費を最小にするためには、毎年の維持管理作業が必要である。
- 経験豊かな技術者の場合、約 1 人×1 時間で、高さ 3.6m のワイオミング防雪柵 1 パネルを完成できる。大規模プロジェクトの場合の総設置費用は、断面積 1 平方メートルあたり現在のところ約 14.20 ドルである。
- 大部分の合成素材は、適切な活用によって、防雪柵の経済性の向上に寄与する。プラスチック製の防雪板は摩擦や剪断に弱いため、適切に張力をかけた上で(伸張量は通常 1%)、垂直な支柱に固定しなければならない。カーボンブラック(訳者注:工業的に品質制御して製造される直径 3-500nm 程度の炭素の微粒子)は効果的な紫外線抑制材料であるため、黒色プラスチックは紫外線劣化に対する抵抗性が高い素材である。
- 120mm から 150mm 幅のポリオレフィン重合体(訳者注:オレフィン類やアルケンを単位分子として合成される高分子の総称。ポリエチレン、ポリプロピレン等)製の、3 本のワイヤーが埋め込まれた複合材料の可撓性のレールは、任意の高さと空隙率を有する防雪柵の建設に使用できる。重要な利点として、建設が容易であること、不規則な地形への適応性が良いこと、雪の沈降力による被害に対する抵抗性が高いこと、保守の必要が少ないことが挙げられる。材料、ブラケット、支柱はパーマレールインターナショナル(www.snowfence.com)から入手できる。
- 水平索と斜材は、雪の沈降圧とそれによる破壊的荷重を避ける必要があるため、防雪柵を支えるのに用いるべきではない。このため、縦方向に支索で支えられた端末支柱を除き、鉛直支柱は自立している必要がある。
- 防雪柵の風荷重は、柵の空隙率と周辺環境による簡易な補正を加えた上で、柵高と風速によって一覧表に表わされる。
- 2m 以上の高さの柵は、土地利用が夏期に限られる一時的な防雪柵として使用すべきだろう。特許工法の一つに、柵高 2.0 と 2.4m、パネル幅 2.4m の木製支柱により緊張されたプラスチック製の柵がある。個々のパネルは U-クリップと補強棒とにより固定される。なお、両柵高の柵の詳細な図面は、本報告に記載されている。
- ジェットルーフや Kolktafeln のようなデフレクタは、風を加速し、風に乱れを発生させることによって、切土斜面頂部に形成される雪庇を防止する際に用いられる。
- 日本では、雪の堆積を抑え視程の向上を図るために、吹き払い柵が用いられている。この柵は、風を下向きに偏向させる複数の防雪板により構成され、効果が風下

側の柵高の 1.5 倍の範囲に限られるため、路側に設置する必要がある。

- 風に向かって置かれたV字形の立体の柵のような横向きの吹き払い柵は、風下に長く狭い雪の無い領域と、両側面に沿った吹きだまりを形成する。横向きの吹き払い柵は、家畜の避難場所や孤立した構造物の保護には有効であるが、道路の吹きだまりの制御には殆ど適応できない。
- 一般に、卓越風向が道路軸直角方向から 35° 以内の場合には、柵は道路と平行に設置される（すなわち $\alpha > 55^{\circ}$ ）。より斜め方向からの風に対しては、柵を風向に直角に配置する。不整地を避ける必要がある場合や、有利な地形条件がある場合には、入射角 55° 未満でも許容できる。柵の方向は、柵の防雪対象領域の両側に正しく伸びていることと比べ、重要ではない。
- 柵は、風下側吹きだまりが道路上にかからないよう、道路から十分に離す必要がある。この距離は平地では、空隙率 0.5 の柵の場合は柵高の約 35 倍(35H)、空隙率 0.25 では 25H、空隙率 0 では 12H となる。
- 柵高を防雪容量から決まる値より高くすることによって、セットバックを小さくすることができる。一般に、防雪柵の防雪容量を吹雪量の平年値の 2 倍とした場合、セットバックは柵高の 18 倍(18H)となる。なお、本指針に従えば、百年に一度の吹雪でも、道路に吹きだまりが侵入することはない。
- 道路に対し角度をつけて並べられた柵では、端部の柵高を低くすることで、より道路に近づけて設置することができる。
- 防雪柵は、柵両端部において吹雪の卓越風向から 30° までの吹雪を捉えられるよう、防雪対象領域を超えて十分に長く設置する必要がある。
- 高盛土対策には、遠方で雪を捕捉するための盛土風上側端部の防雪柵や、雪を斜面上で止めるための灌木や密集した列の防雪柵がある。盛土上の防雪柵の列間距離は、斜面の水平からの傾斜角を α とした場合 $H/\tan \alpha$ となる。
- 防雪板のパネル間の隙間は、たとえ小さくても避けるべきである。ワイオミング防雪柵のパネル間のわずか 15cm の隙間が、顕著な吹雪の侵入と防雪容量の低下を引き起こす。
- 柵端部においては、防雪対象領域内外の境目で、危険な変化を生じないように注意が必要である。軽減対策は次のとおり。
 - 1) 木や灌木等、吹雪を弱める自然物による柵間の接続
 - 2) 柵間の隙間を埋めること
 - 3) 柵端部の柵高を下げることや、空隙率を上げることによる急激な変化の段階的
低 減
- デジタル地形図と地図作成ソフトウェアにより、防雪柵の配置が極めて容易にな

った。The 3-D TopoQuads® と Xmap®3.5 ソフトウェアは DeLorme (www.delorme.com) から入手でき、利用者は、正確な長さや方向の線をデジタル地形図に描いて、任意の倍率に拡大表示することができる。

- ニューヨーク州運輸局は、道路設計と防雪柵の両方を含む防雪対策について、本指針と本報告の式やアルゴリズムを用いて自動的に設計するコンピュータ・システムの開発を支援した。この、SNOWMAN と名付けられたシステムは、MicroStation® プラットフォームを利用して、デジタル地形モデルのファイルから、吹雪に平行な地形横断面図を作成する。また、吹きだまり分布の生成に際して、反復計算によって地形横断面図の修正や防雪柵配置の最適化を行なう。

6.3 “吹送距離の長い”吹雪を対象とした吹きだめ柵の設計

使用する防雪柵の形式は、所要の防雪容量、柵高と空隙率、耐久性、地形、支持地盤、風荷重、使用材料、工事費といった多くの要素により決まる。この項は、設計者が特定の用途に対して、最適な形式の柵を選定できるようにまとめたものである。

6.5 項に説明する設置条件は設計過程の一部と考えられるため、設計完了までに何回かの反復計算が必要となる場合がある。柵高と空隙率の両者により防雪容量と最小セットバックが決まることから、最適設計の決定に先立って異なる組み合わせとの比較が必要となる場合がある。

6.3.1 防雪容量

4 章に述べたように、防雪柵の防雪容量は、柵が設計上貯めることができる雪の量の最大値で、設計吹雪量 Q_{des} と等しくなる。排水施設の場合と同様に、十分な防雪容量の確保が防雪柵にとっての最重要の条件である。防雪柵の規模の決定は、排水溝や貯留池、雨水管に必要な容量を決定する場合と似ている。防雪柵設置予定地に、どれだけの吹雪が到達するかを予想した上で、所要の防雪容量に対する柵高や柵の列数を決めることができる。6.3.2 項に示すように、柵高の高い単列の柵は、同じ防雪容量を持つ柵高の低い複数列の柵と比べて経済的である。従って、単列の柵に必要な柵高を計算することが、通常行なわれる方法である。

6.3.2 柵高の詳細

6.3.2.1 必要とされる構造上の柵高, $H_{s,req}$ の計算

柵高と空隙率の両方が防雪容量に影響するため、もし配置制限により、要求される吹きだまりの平衡状態の距離（範囲）が明確であるならば、必要柵高の決定は 繰り返し作業となるかもしれない。しかしながら、通常の手順は、空隙率0.5の要求柵高を決めることから着手する。最大の効果を得るために、空隙率は0.45～0.5の範囲である必要がある。防雪容量は、式 (3.25)に示されるように柵高と空隙率 P により変化する。

$$Q_c = (3 + 4P + 44P^2 - 60P^3) H^{2.2} \quad (6.1)$$

ここで、 H はメートル（m）、 Q_c はメートル当たりのトン（t/m）である。 Q_{des} を Q_c の代わりに用いることで、必要とされる効果的な柵高 H_{req} を決定する。

$$H_{req} = [Q_{des} / (3 + 4P + 44P^2 - 60P^3)]^{0.455} \quad (6.2)$$

通常の場合、 $P = 0.5$ である。

$$H_{req} = (Q_{des}/8.5)^{0.455} \quad (6.3)$$

次式により与えられる必要な構造上の有効柵高 $H_{s,req}$ は、構造上の高さの効果的な高さの違いを示している。

$$H_{s,req} = H + \text{周囲の積雪深} \quad (6.4)$$

吹雪量による必要柵高を表 6.1 に示す。

表 6.1. 吹雪量の階級による
必要柵高

Class	Snow Transport (t/m)	Fence Height (m)
1	<10	1.1
2	10 – 20	1.5
3	20 – 40	2.0
4	40 – 80	2.8
5	80 – 160	3.8
6	160 – 320	5.2
7	>320	>5.2

例：

与えられた条件：設計吹雪量 $Q_{des} = 50 \text{ t/m}$

空隙率 $P = 0.5$

必要条件：設計吹雪量を蓄える必要柵高

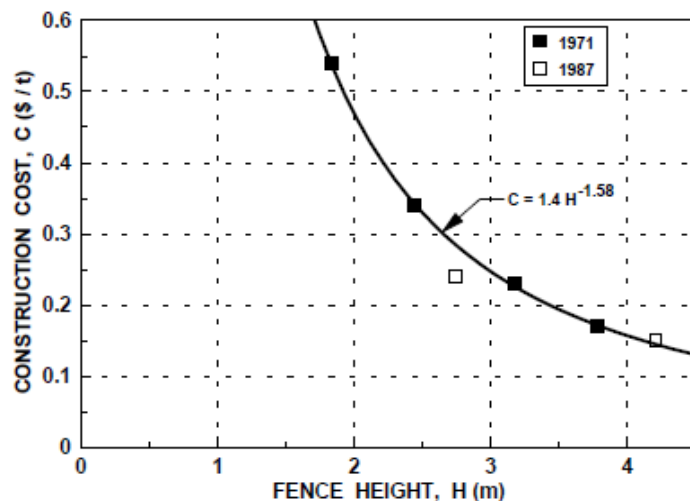
解答：式(6.2), (6.3): $H_{req} = [(50)/8.5]^{0.455} = 2.24 \text{ m}$

6.3.2.2 高い柵の優位性

防雪柵の効果は高さによって増大する。なぜならば、防雪容量が H^2 に比例するだけでなく、柵の頂部を越える雪の殆どが風下に逃げ、堆雪するからである。3章に示されているように、多くは1 m以上の高さでふぶき、風速24.4m/sに達すると、吹雪量の1/3以上はこの高さより上に存在する。それゆえ、柵によって遮断される総吹雪量の割合は柵高に伴い増加する。

一般的に総防雪容量が同じであれば、低い柵を複数列設置するよりも、高い柵を1列設置する方が経済的である。この場合一般的に使用される高さの範囲を越えるが、柵を建設するための費用は、おおよそ柵高に比例し、一方で防雪容量は、 H^2 に比例して増加する。先述したワイオミングにおける防雪柵プロジェクトがこれを一般化する後押しをしている。図6.1に示されるように、3.66mの柵の建設費用は1.8mの柵4列と1.2mの柵1列からなるほぼ同等のシステムの1/3以下である。

図 6.1 ワイオミングにおける2つの大規模プロジェクトのための、柵高に対する防雪単位当たりの柵の建設費用(Tabler 1989)。



土地の借地や購入のための費用は、土地の占有面積が少ないため、複数列の低い柵よりも1列の高い柵の方が通常少ない。例えば、1列の3.7mの柵は概して、路肩から約35H、または130mの用地が必要である。一方、柵の複数列の推奨される列間は30Hである（6.5.3節）。もし1.8mの柵4列が設置されたならば、最も遠い風上は、路肩から $(3 \times 1.8 \times 30) + (35 \times 1.8) = 225 \text{ m}$ の位置としなければならない。

その他に1列の高い柵を使用する優位性としては、（（表面積／量）の比率の違いによる）よりゆっくりとした雪解けがあげられる。さらに、少ない柵列と道路から遠い配置により、景観への影響を軽減させる。

農地における吹きだまりは春の種まきを遅らせる。融雪に要する時間は積雪深、例えば柵高に比例する。吹きだまりが完全に融ける日は関係する気候データから推定できる(Tabler 1985)。

$$\text{吹きだまりの消える割合} : \text{深さ } 1 \text{ cm} / ^\circ\text{C} \cdot \text{日} \quad (6.5)$$

6.3.3 列数の計算

1列の高い柵ではなく、複数列の低い柵を使用しなくてはならない場合、必要防雪容量を確保するための柵の列数 R は次式で計算される。

$$R = (H_{req} / H)^{2.2} \quad (6.6)$$

ここで、 H_{req} は式（6.2）で与えられる柵1列の場合の要求高さ、 H は使用される柵高である。

例：

与えられた条件：設計吹雪量 $Q_{des} = 50 \text{ t/m}$

$$H_{req} = 2.24 \text{ m}$$

使用される柵高 = 1.37 m

必要条件：設計吹雪量を補足するために必要な1.37mの柵の列数

解答：式（6.6）： $R = (2.24/1.37)^{2.2} = 2.9$ u 必要列数3列

6.3.4 空隙率の選択

雪の補足容量はおおよそ空隙率0.5の柵が最も大きいが、セットバックの制限により異なる空隙率の方が好ましい場合がある。図6.2は吹きだまり長さと総防雪量に対する柵の空隙率の効果を示す。

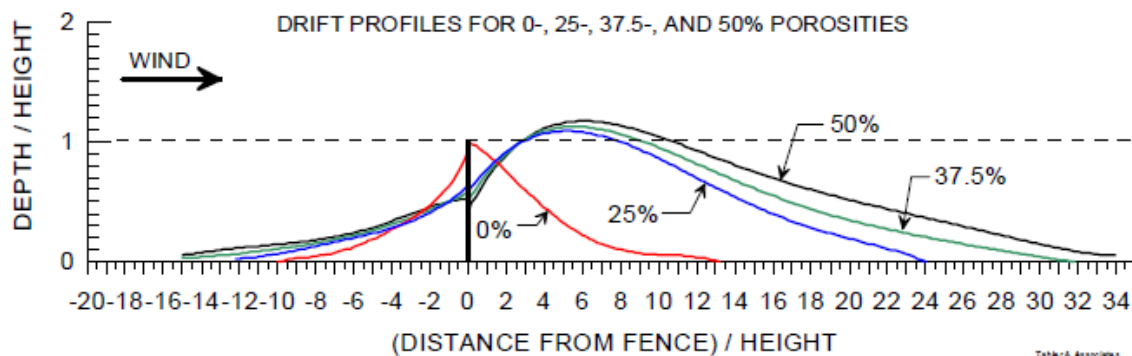


図 6.2 柵の空隙率を選択するための吹きだまり平衡状態の断面図

セットバックの制限によって、短い吹きだまりの平衡状態を必要とする箇所では、必要な空隙率を計算するのに式3.24が用いられる。必要柵高もまた空隙率により変化することを心にとどめておきたい（式6.2）。

$$L/H \approx 12 + 49P + 7P^2 - 37P^3 \quad (6.7)$$

下部間隙は空隙率の計算から除外すべきである。

6.3.4.1 空隙の無い柵 ($P = 0$)

空隙の無い柵の防雪容量は、空隙率50%の同じ高さの柵の1/3にしか過ぎない。しかしながら、空隙のない柵は二つの優位性を有する。

- 1) 雪は初めのうちは風上側に溜まる（風上の吹きだまりが平衡状態に近づくまで）。
- 2) 空隙のない柵の頂部を越えた多くの吹雪が乱気流や風下への高速な気流の中へ吹き込まれ、拡散する（図3.60）。

それゆえ、吹き上げ防止柵が、空隙のある柵では比較的能率の悪い急な盛り土の吹

雪の問題を解消するために使用される。図6.3と図6.4に示すように、吹き上げ防止柵が、日本の札幌の南西に位置する中山峠近傍の国道230号を保護している。吹雪の多くは、柵の下に斜面に溜まる。そして、残った微粒子が柵の頂部を越えて乱気流により垂直に拡散される。構造物は除雪機械を支えるのに十分な強度がある。このような吹き上げ防止柵は斜面に対し、垂直に設置すべきであるが、設計者である北海道開発局の打矢徹也氏は「中山峠の柵は景観保護のために傾斜させた」と述べている。



図 6.3 日本の北海道の中山峠近傍の吹き上げ防止柵、道路の下に斜面に雪を溜め、雪を垂直に拡散させ、道路上への堆雪を遅らせる(Tabler 1994)。右の写真は北海道開発局の打矢徹也氏の提供。

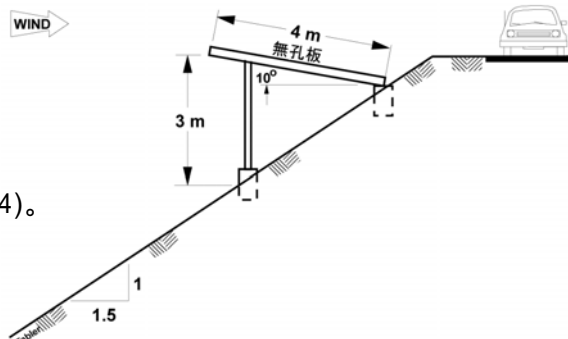
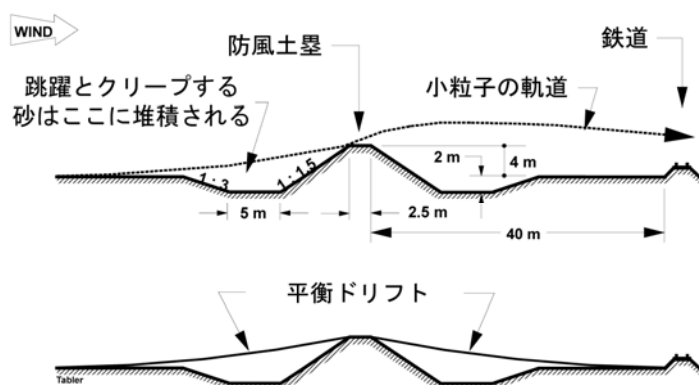


図 6.4. 中山峠に設置されている吹き上げ防止柵（図 6.3 参照）の設計図(Tabler 1994)。

盛り土は、雪をコントロールするための無孔防壁のもう一つの種類である。コロラド州の東平野の風塵から鉄道を守る典型的な防風土塁が図 6.5 に示されている。このような構造物が飛ぶ雪に対する防壁の役割も果たすが、盛り土の工事費が防雪柵の工事費を大きく超えている。図 6.5 に示されている構造物が溜める雪の量は、空隙率 0.5 の防雪柵と同量である。

北極地域で集落や施設を吹雪から守るため、雪で作られた防壁が設置されることがある。北西カナダに位置するベーカー湖はその顕著な例になっている。一時的な柵なら、必要な防雪容量を持つための十分な高さの雪防壁の頂部にさらに高さ 1.2m の柵を設置することが効果的な方法である。

図 6.5. 東コロラド州の鉄道を
守る防風土塁は、跳躍する粒子
を風上に堆積させ、小さい粒子
を頂点の上の高速気流に乗せ
る (Tabler 1994)。



密生した樹林も防雪壁の役割を果たすことを下記の章 8 に示す。

6.3.5 防雪柵の下部間隙

防雪柵と地面の間に間隙を空ける第一目的は、柵の近傍に雪の堆積を減らすことである。その結果、最大有効高さが保持され、堆積された雪の沈降圧またはクリープによる柵の被害も防ぐ。

地面と防雪柵の間隙は、どんな地形や植生があっても、基本的には $H_s/10$ 以上でなければならない。植生の上端よりさらにおよそ $H_s/10$ の間隙を空けると、最適な大きさになる。風の流れに沿った下向き斜面や、その他の、雪が溜まりやすい場所には、もっと大きな間隙も認められる。

6.3.6 定置式の地上防雪柵

6.3.6.1 ワイオミング防雪柵

水平板式の防雪柵であるワイオミング防雪柵は、ワイオミング運輸省 (WYDOT) によって 1971 年から使用されている。最初の報告から (Tabler 1974)、効果を最大化、そして工事費と維持費を最小化するための努力が続き、その設計は数々に改正された。現状のワイオミング防雪柵は、木材トラス枠に 280mm の支柱を固定し、それに 25x150mm の横材が付いた長さ 3.66m のパネルから組み立てられている (図 6.6)。各パネルは、土台の両端に土に埋め込んだ長さ 1.5m 直径 19mm の強化鉄筋で固定されている。現在、高さ 3.0m と 3.7m という二つの基準値だけ WYDOT に利用されている。しかし、防雪柵の下部間隙が高さの 12% の場合も含めた 1.8m から 4.3m までの範囲の値が過去に利用されていた。工事中の安定のため、柵の上端が風下に 15° 傾いている。

作業者にとってはより便利な踏み台にもなり、修理が促進される。15° 傾いた柵の防雪容量が大きくなることについて文献に述べられているが、著者の研究によると、その増量が 10%に過ぎない。

1971 年以来、ワイオミングにおいて数 100 キロメートルの防雪柵が高速道路に沿って設置された。加えて、モンタナ、アリゾナ、とアラスカにもかなりの長さの防雪柵が設置済みである。

この柵は、金属製のものも存在する。アリゾナ州運輸省は、風景への影響を減らすために、夏季中に倒すことを可能とするアルミニウム製の柵を設計した（図 6.7）。その後の使用経験では、柵が一年中に設置したままの状態も一般に受容されていることが示された。



図 6.6. ワイオミング防雪柵（右下は Tabler, 1994 による撮影）

図 6.7. アリゾナ州運輸省によって設計されたアルミニウム製のワイオミング式の柵。

写真提供：アリゾナ州運輸省。



図 6.8 に示されている構造部材のサイズは、高さ 5 種類の柵に対して、表 6.2 に載っている。柵高 3.0 と 3.6m の詳細標準設計図（イギリス法とメートル法）は付録 B に記載されている。この設計図は、規定サイズの粗引き木材を前提とする。新精度カンナの利用を反映するため、1988 年に製材等級の規定が変わった。その新規定は、粗引き木材の最小サイズが、仕上げ木材のサイズの標準値より 3.175mm 大きいおよび厚いことを示している（Western Wood Products Association 1988）。しかし、それ以降の設計変化により、このサイズ変化が補足された。

15°

①

③

④

⑤

②

45°(TYP)

1200 (TYP)

3658

600 (TYP)

S

H

G

A

25 x 15 x 3600 ブレース

N = 板の枚数 (25 x 152)

#6 鉄筋 x 1525

B (TYP)

U-CLIP

詳細図 ①

d1 d2 d3

a1 a2

③

d1 d2 d3

D (TYP)

①

15°

d1 d2 d3

②

d1 d2 d3

a1 a2

⑤

d1 d2 d3

a1 a2

④

161

表 6.2. 図 6.8 に示されているワイオミング防雪柵の部材のサイズ一覧 (mm 単位)。サイズの S 値と G 値は垂直のフロントトラスに並行して測られる。全てのトラス用の木材のサイズは 50x150mm である。ただし、高さ 4.3m の柵の長いトラス (3 番) には、50x200mm の木材が利用される。

部材 ID	説明	サイズ ID	柵の高さ(m)毎のサイズ：				
			1.8	2.4	3.0	3.6	4.3
一般	高さ	H	1766	2355	2944	3535	4122
	薄板の間隔	S	280	280	280	280	280
	薄板の枚数	N	6	8	10	12	14
	下部間隔	G	279	330	380	430	483
	穴の直径	D	16	16	16	18	18
	ボルト直径	B	14	14	14	16	16
1	正面	長さ	1829	2438	3050	3660	4267
		d1	610	819	820	795	1089
		d2	NA	NA	NA	1525	1832
		d3	76	95	95	95	95
2	土台	長さ	1372	1524	2130	2440	2438
		d1	152	152	150	180	152
		d2	NA	NA	NA	865	933
		d3	102	127	130	125	102
3	長い控材	長さ	1676	2007	2740	3350	3658
		d1	152	140	140	140	133
		d2	NA	NA	NA	1220	1162
		d3	152	165	170	190	241
		a1	32°	32°	32°	28°	25°
		a2	43°	43°	43°	47°	50°
4	短い控材	長さ	NR	NR	NR	1830	1829
		d1	NA	NA	NA	150	152
		d2	NA	NA	NA	320	203
		d3	NA	NA	NA	125	152
		a1	NA	NA	NA	38°	38°
		a2	NA	NA	NA	38°	38°
5	方杖	長さ	NR	NR	NR	1370	1372
		d1	NA	NA	NR	150	152
		d2	NA	NA	NR	265	152
		a1	NA	NA	NR	30°	32°
		a2	NA	NA	NR	32°	32°

アンカー取り付けのボルトの長さ = 150 mm; その他のボルトの長さ = 125 mm.

NR = 不要、NA = 不適用

ここで述べた設計は、44.4m/s (160km/h)以上の突風、完全に雪に埋もれた時の雪圧、そして家畜による被害に対して耐えられる。柵がほぼ雪に埋もれてしまったある年（図 6.9）、沈降圧による被害で、高さ 3.0m 以上の柵にとっては方杖の重要性が高いことが明らかになった。さらに、方杖は、家畜が長い控材に擦り寄せることも防ぐ。

図 6.9. 雪圧による被害を受けた従来設計である高さ 3.6m の柵。被害を防ぐためには、方杖が重要であることを示している。



事前に加工された（カット、穴開き、防腐処理）木材を買うことができる。高さ 1.8m と 2.4m 柵の正面パネルは工場組立でも良いが、経験によると、それより高い柵のパネルが積み降ろしの時に被害を受けやすいので、現場で組み立てられるべきである（図 6.10）。手慣れた作業者であれば、高さ 3.6m 柵のパネルを、1 人 1 時間당に約一枚のペースで組み立てることができる。ワイオミング州においての大きなプロジェクトの総費用は、正面の 1 平方メートル当たり凡そ\$14.20 である。

6.3.6.1.2 低価格防雪柵

地面に置かれる土台（部材 2 番）は、垂直方向の傾斜を固定し、枠の曲げ剛性を高める。土台の全長は地面に接する必要があるため、通常、各土台の下の地面を平らにしなければならない。岩地や低木地帯の場合、設置作業は時間と手間がかかることが多く、工事費が大きく増える。柵の高さが凡そ 2.4m 以下の場合、土台を設置しなくても、強度がほぼ低下しない。また、枠の板の下端にアングルカットする必要もない。この修正のおかげで、工事費が低下され、柵の傾斜そして高さをより自由に設定できるようになる。しかし、正しい傾斜で設置されるように指導されなかった場合、この利点が弱点に変わることもある。

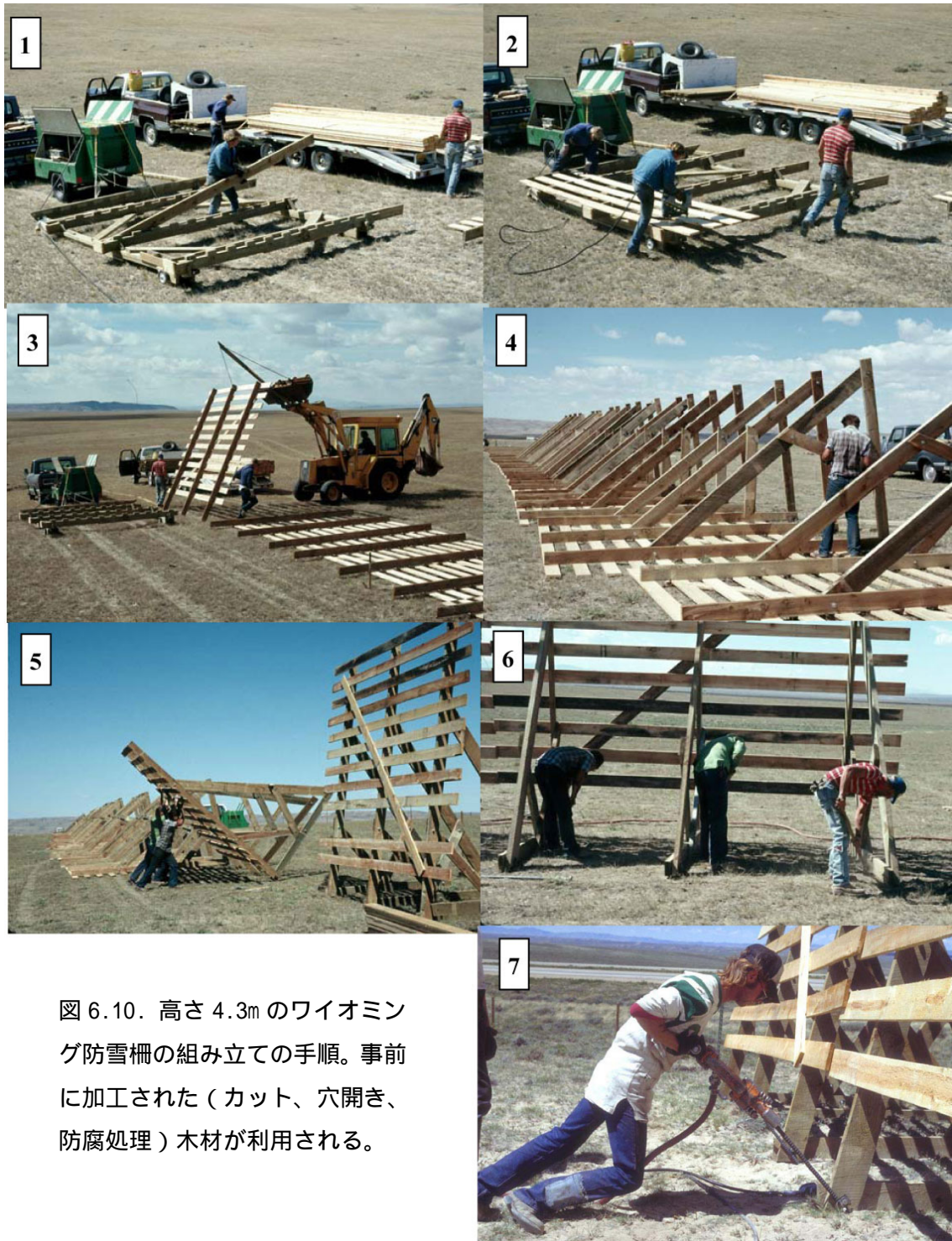


図 6.10. 高さ 4.3m のワイオミング防雪柵の組み立ての手順。事前に加工された（カット、穴開き、防腐処理）木材が利用される。

6.3.6.1.3 Anchors 固定アンカー

鉄筋は、ほとんどの土壌に対応する優れた引抜き抵抗のある安価なアンカーである。
 $\phi 19\text{mm}$ 鉄筋は、適切な引抜き抵抗を持ち、打ち込みに対して十分な剛性を有する。
 また、鉄筋の湾曲性によって岩盤に対して十分な柔軟性を持っている。U字型クリップを使用して、フェンスパネルを土台両端のアンカー（図6.11）に取り付ける。これらのU字型クリップは効果的で安価なものである。著者が知っている唯一の販売元は、バッドファロー、ワイオミング州のバッキンガム木材会社（電話307-684-2231）である。

アンカーの滑りを防ぐために、U字型クリップをボルトでしっかりと締付なければならない。図6.12は、緩んだ取付け状況を示している。U字型クリップと16mmボルトで締めつけたアンカーはリブが削られ、ほぼ平らになっている。

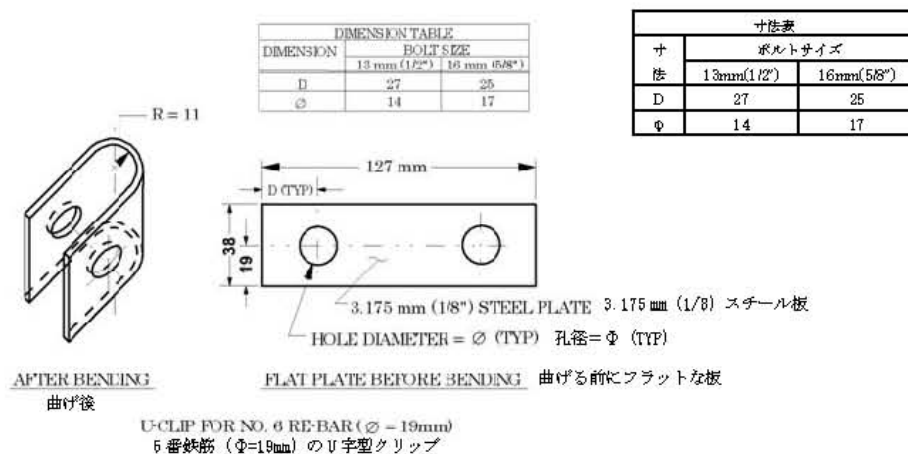


図 6.11. U-クリップでワイオミングフェンスをアンカー（寸法単位ミリメートル）に取り付ける（タブラー1994）。



図 6.12. 滑りを防止するためU字-クリップをしっかりと締めなければならない。
 右の図は、ボルトとU-字クリップで締めたアンカーであり、アンカーが擦れて金具が擦り減った状況を示している。

乾燥鉾質土壌においては、高さ2.4mのフェンスを取り付けるために鉄筋の根入れ深さが75 cm、高さ4.2mのフェンスには、120 cmの根入れ深さで十分である。湿地や沼地土壌には、もっと長いアンカー、あるいは違うタイプのアンカーを使用しなければならない。適切な引抜き抵抗力を持たせるために、アンカーの打ち込み角度は、垂直方向に $45^{\circ} \pm 5^{\circ}$ （図6.8）にしなければならない。

三角金具がアンカーの取り付け材として利用できる。ただし、木材の乾燥や収縮によって取付けの緩みを防ぐために、アンカーと金具は溶接で固定しなければならない。溶接は、振動に対して十分な強度を持たせなければならない。（図6.13）。打ち込みアンカーの破断の多くは、鉄筋と土台の取り付け方が不適切なことによるものである。アンカーを交差させ、針金で固定する方法は用いてはいけない（図6.14）。



図 6.13. 三角金具は、アンカーの取り付け材として使用できるがアンカーと溶接して固定させなければならない。溶接しない場合は、木材の乾燥と収縮によって取り付けに緩みが生じてしまう。右の写真は、振動によって仮付け溶接が破断した例を示している。左の写真は、タブラー（1994）からである。



図 6.14. アンカーを交差させ、針金でとめる方法は、ワイオミングフェンスの取り付けに使用してはならない（タブラー1994）。

図6.15に示す地盤アンカーは、支持力の低い土壌に地面据付式フェンスの取り付けに使える。支持力の低い土壌とは、沼地エリアや低湿地などである。アンカーを予定の深さまで打ち込んだ後、ケーブルを引っ張り、アンカーを直角方向に回転させる。油圧アンカーロック装置のゲージは、負荷をかけることによって、アンカーに必要な引抜き抵抗力を

持たせる。フォーサイト®製品LLC業者が（電話1-800-325-5360）、様々なサイズと形状のアンカーを製造している。これらの製品は、下記のインターネットのWebサイトで見る事ができる。<http://www.eartanchor.com>。一部のモデル（製品）は、ケーブルの代わりにネジ付きのロットを使い、取り付けの簡易化を図っている。

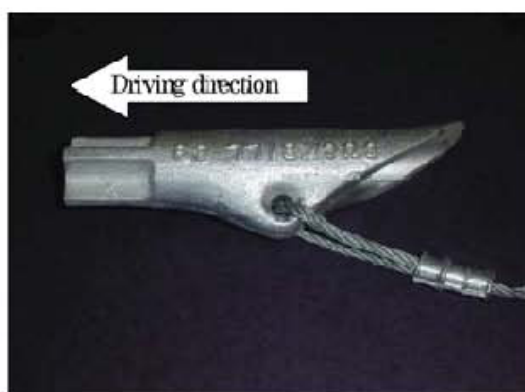


図 6.15 低支持力土壌用の地盤アンカー

永久凍土層の土壌では、凍結と融解の繰り返しで滑動層が地中のアンカーを年に100～200mm押し出し、（その結果、）フェンスが持ちあげられている（図6.16）。試験観測によると、アンカーの打ち込み角度は、垂直方向に55°以上になると、凍結融解による持ち上がりを減少させることができる。図6.17に示す取り付けアンカーは（単独な）移動可能となっており、数年に一度（再）打ち込みが必要である。



図 6.16.凍結融解の繰り返しによって、4.3m高のフェンスのアンカーが、土壌から押し出されている。（アラスカ ノーム付近）

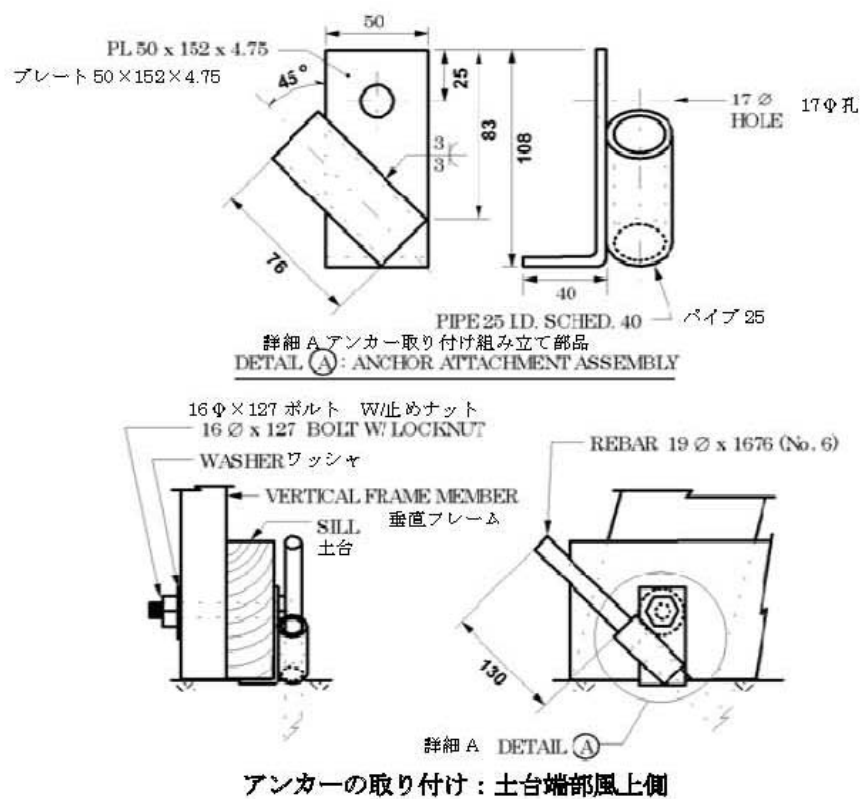


図 6.17. 滑動層の凍結と融解の対策として、永久凍土のアンカーの取り付けは、フェンスが垂直方向の移動を可能にしている。寸法はミリメートルである。

6.3.6.1.4 仕様

ワイオミング型防雪柵の材料と建設のためのここで扱う仕様は、経験上重要であることが証明したいくつかの基準を示している。承認機関の基準と一致させるためには、修正が必要になるかもしれない。

6.3.6.1.4.1 木材の等級と仕様

木材としては、lodgepole 松、ponderosa 松、Engelmann トウヒ、Douglas モミ、ツガ、西部カラマツ、あるいは他の事前に承認された樹種となる。全ての木材はおおよそ規格寸法の 3.175mm 以内で製材される。25mm 板材は WWPA (Western wood Product Association: 西部木材生産協会) 規格 3 番またはそれ以上の規格とする。全ての 50mm 寸法の木材は WWPA 規格 2 番またはそれ以上の規格とする。50mm 木材は全ての用途で防腐処理されるものとする。乾燥気候であることによる指定がある場合を除いては、25mm (1 インチ) 板材もまた防腐処理されるものとする。木材の切断や穴あけは加圧処理前に終えねばならない。防腐処理後に木材の切断や穴あけが許され施工されたら、切断や穴あけ箇所は汚れを取り、当初使われた保存塗料をスプレーやブラシで二度塗りしなければならない。防腐処理は米国木材防腐協会 (AWPA) 規格 C1 と C14 の要請と一致する。規制が許されれば、クロム銅ヒ素系木材保存剤が推奨される。扱いや管理は米国木材保存協会 (AWPA) 規格 M4 に一致するものとする。

6.3.6.1.4.2 金物類

別途定める場合を除いて、釘は ASTM (米国材料試験協会) A615 規格に従ってメッキまたは塗装されるものとする。ボルト、ナット、ワッシャーはそれぞれ、ASTM A307、A563、そして F436 の要求を満たすものとする。全てのボルトにはナイロン挿入締め付けナットが使われる。U クリップは別に定める場合を除いては、メッキや塗装をする必要はない。U クリップの穴は、規格化されたボルト直径より 1mm 大きい穴をあける。全ての U クリップについての大きさは 6.11 図で規格化された寸法の 3mm (1/8 インチ) 以内とする。リング又はスクリュー付きの足場固定釘が抵抗を大きくするために使われる。

アンカーとして使われる補強鉄筋は、ASTM A615 の必要条件と一致する Metric No. 19 (直径 3/4 インチ) Grade 60 とする。

全ての材料を受け入れる根拠は、適切な仕様の必要条件を満たす製造保証とする。

6.3.6.1.4.3 建設

切断や穴の場所は示された寸法の 6mm (1/4 インチ) 以内とする。ボルトを通す穴はボルトの大きさ規格より 1mm 大きくする。割れや壊れなど、欠陥がある全ての木材は、組み立てた後でも交換されるべきである。

パネルは設置目標とする防雪柵設置線上の 25mm (1 インチ) 以内とする。

各パネルの重さが等しく垂直方向に分散され、全ての土台部分の長さの 90%以上が地面に接するように設置されるものとする。これは建設の前に設置箇所の整地や、各土台部分の下をシャベルで均すことを要求するであろう。工事契約者は防雪柵設置線上から 3 m (10ft) 以内で配置したり要求される品質で防雪柵を建設するために必要なら、そのような整地や穴掘りを行なうものとする。もし許されるなら、整地は見栄えを良くし仕様上必要な防雪柵下部間隙を確保する場合にも行われる。

パネルは最も広い場所でもパネル相互の間隔が 25mm (1 インチ) を越えないように設置される。地形に凹凸がある領域では防雪柵パネルを重ねる必要が出てくる可能性があるかもしれない (図 6.18)。重なるパネルは、調べられた防雪柵線上から、最大でも 50mm (2 インチ) の横方向の場所ずれで設置されるものとする。

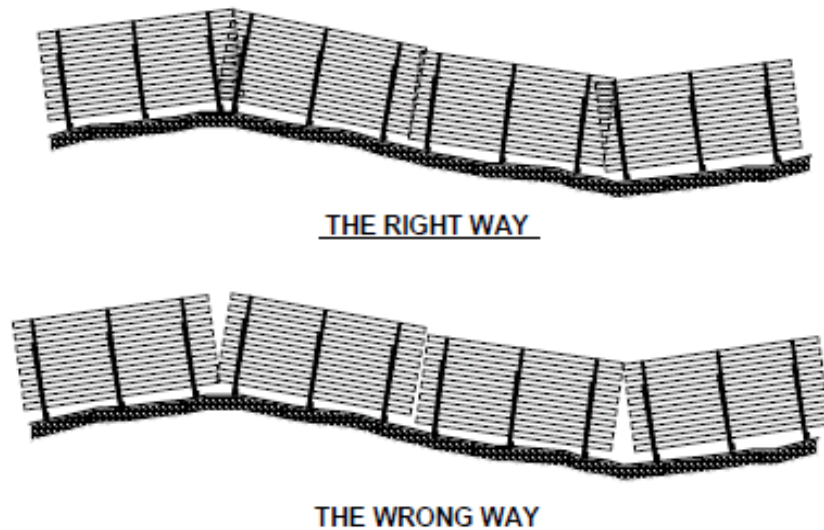


図 6.18 防雪柵の捕捉率や防雪容量を低下させるパネル間の隙間を無くするように、パネルが重なるようにしなければならない。

打ち込まれた鉄筋アンカーは計画通り、45 度の角度で十分深く防雪柵に直角な方向から 5 度以内で設置されるものとする。岩があってアンカーが打ち込めないときは、要求に適う岩の中に少なくとも 15cm 深さ、直径 22mm (7/8 インチ) の穴をあけ鉄筋は接

着樹脂で固定されるものとする。土台末端のボルトは締め付けられ、U クリップが鉄筋をしっかりと掴み、その結果アンカーが防雪柵を固定する。

6.3.6.1.5 供用年数

適切に設置されたワイオミング防雪柵は 44.4m/s の風速や防雪柵が完全に埋まる場合の積雪沈降圧、それに家畜による力にも耐えられる。仕様に沿って建設され、適切に維持されれば、乾燥気候のもとでワイオミング防雪柵は最低 30 年の耐久力がある。防雪柵に寿命がある間総維持費を最小にするため、毎年の予防的維持作業が重要である。材木の初期乾燥がボルト結合を緩くするような時には、根気強い維持が建設後 2 年間は特に重要である。

6.3.6.2 Buck-and-Pole 防雪柵

この防雪柵は、しばしば製材工場で廃棄される丸太の厚板を垂直方向の小割板として取り付けられた丸太の骨組みで作られる。種々な高さや空隙率が使われている。厚板は防雪柵の風上側でのみ求められている。

図 6.19 丸太防雪柵に取り付けられた垂直小割板



6.3.6.3 スウェーデン（あるいはノールウェー）型防雪柵

スウェーデンあるいはノールウェー型とも呼ばれる防雪柵は、高さ 2 m (6.5ft) で 15cm(6-in)幅、6.4cm 間隔で水平に設置された 9 枚の板で作られている。水平板は三角構造で固定され、防雪柵の上側 1/3 は風上に傾斜している（図 6.20）。上 1/3 が逆向きに傾いている理由は分らない。このタイプの防雪柵は設計上大きな変更無しに少なくとも 1885 年以来、米国で使われており、1971 年までワイオミング交通省の標準防

雪柵として使われていた。長距離にわたるこの防雪柵の利用は、特に米国西部を通る鉄道沿いで今も続いている。

空隙率は 35%なので、この防雪柵の防雪容量は同じ高さのワイオミング型防雪柵の約 70%、風下の吹きだまり長さは 24H（ワイオミング柵は 34H）で、柵上部が風上に傾いている根拠は不明。

図 6.20 スウェーデン（あるいはノールウェー）型防雪柵。この高さ 2 m の防雪柵は写真撮影時設置から 45 年経っていた (Tabler1986b)。



6.3.6.4 棒積み防雪柵

棒積み防雪柵は、丸棒や垣根を作るために積み上げられた木の棒で作られる。図 6.21 に示すジグザグ形状は、道路や鉄道を建設する間に伐採される木を使え、自立型防雪柵を建設するのに都合がよい。1920 年代 30 年代にまでさかのぼる多くのこのタイプの防雪柵はまだ健在である。

このタイプの防雪柵は田園風景が望まれる地域では有用かもしれないが、雪の捕捉率の点では効率が良くない。風上の V 字地点で風が向きを変えられ風が加速されることもあり、ジグザグ形状設計は雪の捕捉率を減らす。近代版では最も広い許容角度を目指すべきである。

図 6.21 コロラド州，La Veta Pass 近くの棒積み防雪柵 (Tabler 1986b)





図 6.22 標準的なワイオミング型防雪柵よりもジグザグ形状防雪柵がより少ない防雪容量であることを示す空中写真．これらの柵は比較のため設置された（Tabler 1986b）．柵高は 3.8m(12.5ft)．写真は Robert L.Jairell の厚意による（Tabler 1994）．

6.3.7 支柱式防雪柵の素材

支柱間に張り渡された横木は、防雪柵を雪で埋まりにくくするための大きな効果が期待できる。もし、防雪柵下部間隙が埋まったとしても、横木間に空間が確保されていれば防雪柵は埋まりにくくなる（図 3.52）。防雪柵として目の細かいプラスチック製の網を使用すると、防雪柵が雪で埋まりやすくなる（図 6.23）。しかし、防雪柵下部間隙が確保されている場合で、40 から 55%の空隙率のフェンスであれば、材料による防雪容量の差は少ない。

防雪柵の素材として木材、金属、プラスチック、布が使用できる。適切に設置し維持されると、これらのすべての材料が経済的な耐用年数となる。



図 6.23 網の空隙率と防雪能力

網の目が細かいと防雪柵の直近は雪で埋まりやすくなる。オレンジと青、それぞれの網の空隙率はほぼ同じであるが、青い網の防雪柵が先に埋まっている。

6.3.7.1 木製のスラットとレール

支柱式防雪柵はフェンスとなる板を垂直方向（スラット）、または、水平方向（レール）に設置することが出来る。レールを使用する場合、風、沈降圧、家畜の接触等を考慮しなければならない。水平の板の長さは、厚さ 25mm×幅50mm の板の場合2.4m まで、厚さ 50mm×幅50mm の板の場合3.7m まで、厚さ 50mm×幅100mm の板の場合 4.3m まで。板の間のスペースが必要な空隙率を決定する。レールの幅が 25cm 以上になると、大きな渦が発生し、それが雪粒子をその場に堆積させる代わりに飛散させてしまうので、防雪柵の効果が低減する。

図-6.24 高さ3.3m の支柱で支持されたレール（Tabler.1994）。



防雪柵が風の方向の変化により繰り返し交互にたわむこと、また、木の含水率の変化によることにより釘が緩む。従って、リングシャンク釘やネジのように抜けづらい金具を用いるか、また、ボルトか鋼鉄製の留め金により固定される 50×100mm の当て木によって、レールを支える。スラットは、支柱（図 6.25）間に張り渡された水平方向の桁により、垂直に配置することができる。この方法は支柱間を広く取ることが出来るため、コストを低く押さえることができる。

図-6.25 支柱間の水平方向の桁で支持されている垂直スラット4.6m の高さの防雪柵。場所はWainwright, Alaska (Tabler.1994)。写真は George Clagett, U.S. Soil Conservation Service.



6.3.7.2 ラス防雪柵

クリッピングやピケ柵と呼ばれている一般的なラス防雪柵は、スラットである幅40mm厚さ13mmの薄板をツイストワイヤーで固定したものである。最も一般的な高さは1.2mであるが、過去に1.8mの製品が製造されたこともあった。この防雪柵で支柱間が7.5m～15mの場合、スラット間隔が最適値より広すぎる場合が多く見受けられるので、その場合、同じ高さのレール式の防雪柵より雪の貯蔵能力が10%低下する。ロール（製品の取り扱いの単位）や様々な外力でスラットの間隔が多少伸びたとしても、その典型的な空隙率は0.6程度である。

下部間隙を恒久的に持たせるためのスラット上端部を50×100mmの水平材で固定する。その場合でも、スラットは自重でワイヤーロープを徐々にすべり落ちる。同じ理由で、スラットが2段3段になる背の高い防雪柵（図-6.26）は推奨できない。防雪柵を高くしたい場合、水平材でかさ上げができる（図-6.27）。

下部空間のない仮設の木製防雪柵の場合、支柱の支持力が小さくなるため、簡単に設置することが出来る。ただし、材料が多くなり重量も増すので、輸送、運搬、保存に欠点が生じる。

図-6.26 不適当な背の高い恒久的な木製フェンススラットは数年使い続けると抜け落ちる場合がある（Tabler, 1994）

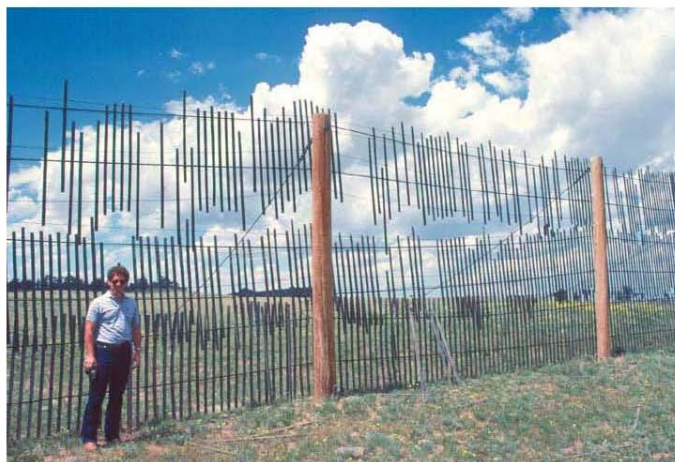


図-6.27 木製フェンスと水平材の組み合わせ



6.3.7.3 合成繊維によるフェンス

フェンスには押し出しプラスチック繊維によるネット、パンチシートで作成されたグリッド、ポリマーレール等、多くのタイプの合成繊維によるフェンスが利用可能である。合成繊維による利点は：

- ☐ 水平方向のサポートがいらない。
- ☐ 落下するスラットが無い。
- ☐ コンパクトなので容易に保管、運搬ができる。
- ☐ 木材より軽量なため、扱いや設置が簡単。
- ☐ 耐腐食性
- ☐ 一般的に木材より単位面積当たりの単価が低い。

網状のプラスチック製のフェンスは、支柱にしっかり固定しないと、雪に埋まった部分が強く下に引っ張られることで損傷を受けやすく、さらに、雪の沈降によっても損傷を受ける。これらの欠点により、プラスチック製のフェンスは仮設でのみ使用を勧める。

6.3.7.3.1 特性および仕様

プラスチック製のフェンスは、押し出し成形されたタイプ（図-6.28）と、パンチで穴を開け、最終形状に引き伸ばし成形したタイプ（図-6.29）の2つがある。この後者の過程は分子配向性が生じることにより、強い引張り強度が得られる（Wigley 1987）。ほとんどのプラスチック製フェンスは一般的に入手可能なポリエチレンやポリマー重合体から作られている。

図 6.28 押し出し成形された高密度ポリエチレンによる防雪柵DuPont® Vexar®（現在の製品番号 L77）（Tabler, 1994）。





図 6.29 穴あけ成形した高密度ポリエチレンによるConwed Plastics 社製「万能フェンス」
(Tabler, 1994)

押し出し成形された防雪柵の製造会社は DuPont® (www.dupont.com) と Tenax® (www.tenaxus.com)。穴あけ成型したシートフェンスの製品は ADPI Enterprises、Conwed Plastics (www.conwedplastics.com)、Tenax®, and The Tensar Corporation (<http://www.tensarcorp.com>)。

太陽からの紫外線は、プラスチックの急激な悪化を引き起こすが、製品化されたフェンスは適切に添加された化学物質の層が紫外線劣化に抵抗する。カーボンブラックは紫外線防止のための効果的な添加物である、そして、この黒いフェンスは最も大きな UV 抵抗がある。室内実験では 10～15 年を上回る寿命を示している。プレミアム材料で高度 2400 m で 8 年間暴露した実験では劣化は見られなかった。

コーカー (1986)によると、ほとんどのプラスチックフェンスは、 $-50 \sim +95^{\circ}\text{C}$ の温度に影響を受けない。Prudhoe Bay, Alaska に設置された高さ 4～5m のプラスチックフェンスは、 -40°C の低い温度でも大きな変状は見られなかった (図-6.30)。

図 6.30 Prudhoe Bay ,
Alaska に設置された高さ
4.6m (15 ft) の防雪柵
Tensar Corporation 社製
の UX3100 の高密度ポリエ
チレンを使用した防雪柵
(Tabler, 1994)



防雪柵に適したフェンスの仕様

- 材料が紫外線に対し安定させるため、2%のカーボンブラックを適切に混入する。
- 縦方向と横方向の高い引張強度（縦方向の強度は、雪の沈降力が引き起こす損傷を防ぐために重要である。）
- フェンスの空隙は、どの方向にも 25mm 以上とする（フェンスの雪による目詰まりを防止し、防雪柵への雪の堆積を減らすため）。
- 幅 1.2m の材料に 2.2kN の張力を加えたとき、200mm 以下の伸び。

高価な材料は 2m 以上の柵でのみ使用されるべきである。

6.3.7.3.2 設計条件

柵で用いられる多くの合成部材は高い引張強度を有しているが、そのほとんどは切れやすく、かつ摩耗しやすい。そのため、すべての部材が支柱に固定されていなければならない。背の高い恒久的な防雪柵では、弾性のある細長いシートを、支柱と柵の部材との間、および柵の部材と当て木の間に挟んでおくべきである（図 6.31）。当て木は、ボルトかスチールバンドを使って、しっかりときつく支柱に固定されなければならない。 端の支柱は、張力に対して十分張り綱で補強するか、又は筋交いをつけておかなければならない（図 6.32）。

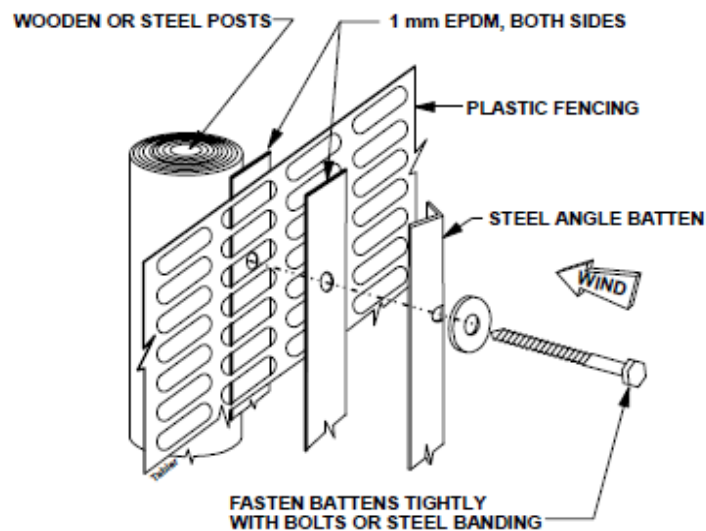


図 6.31. 2つの細長いシート（EPDM）を使って柵部材を挟み込むことで、プラスチックをしっかりと挟むことができる他、当て木の膨張・収縮を吸収できる。



図 6.32. 端の支柱は、合成部材の引っ張りに対し、長手方向に筋交いで補強しなければならない。Tensar UX3100 が、コロラド州サミットヴィルにおいて、高さ 5m の防雪柵に用いられた。

プラスチック製のネットのみが防雪柵の合成素材として用いられた際に、以前のガイドラインが策定された。今は、6.3.7.3.4 や 6.3.7.3.5 に記載した複合材料が使われるので、プラスチックのネットが高さ約 1.8m 以上の恒久的な防雪柵の柵部材として推奨されることはない。

1.2m 幅のプラスチック製防雪柵が規定の力で引き延ばされる際、柵の幅の方向の張力分布を変えないまま、地形の不規則さに合わせることはできない。この場合、結局、皺になってしまったり、湾曲した方にたるんでしまったりする。結果として、図 6.33 のイラストに示したように、支柱を使って傾斜の変化を吸収するようにしなければならない。

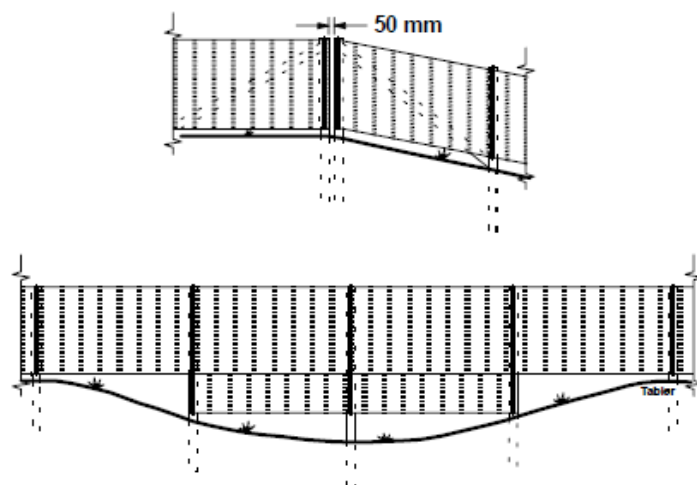


図 6.33. 合成素材の柵部材を使用する際、傾斜の変化に適合させて柵を設置する方法。

6.3.7.3.3 設置条件

雪の沈降による極端なたわみ（図 6.34）や、取り付け部分の破損につながる過剰な振動を避けるため、支柱に締め付ける前に、全ての柵部材はメーカーの仕様書のとおりピンと張られていなければならない。適切な張力は伸びを測定することで決定することができる。穴空きの柵部材に対する適切な張力は、大体 4.4kN である。柵部材は適切な力で張ることにより、1%ほど伸びる。柵の部材を張るおおよその手順として、まず、たるみの端の隙間に直径 25mm のパイプを通し、パイプの両端にチェーンを付ける。次に、トラックに取り付けられたハンドウインチを使い、チェーンの中心に張力を加える（図 6.35）。

図 6.34 雪の沈降による損傷やたるみをできるだけ少なくするために、合成素材の柵部材は十分に張られていなければならない。

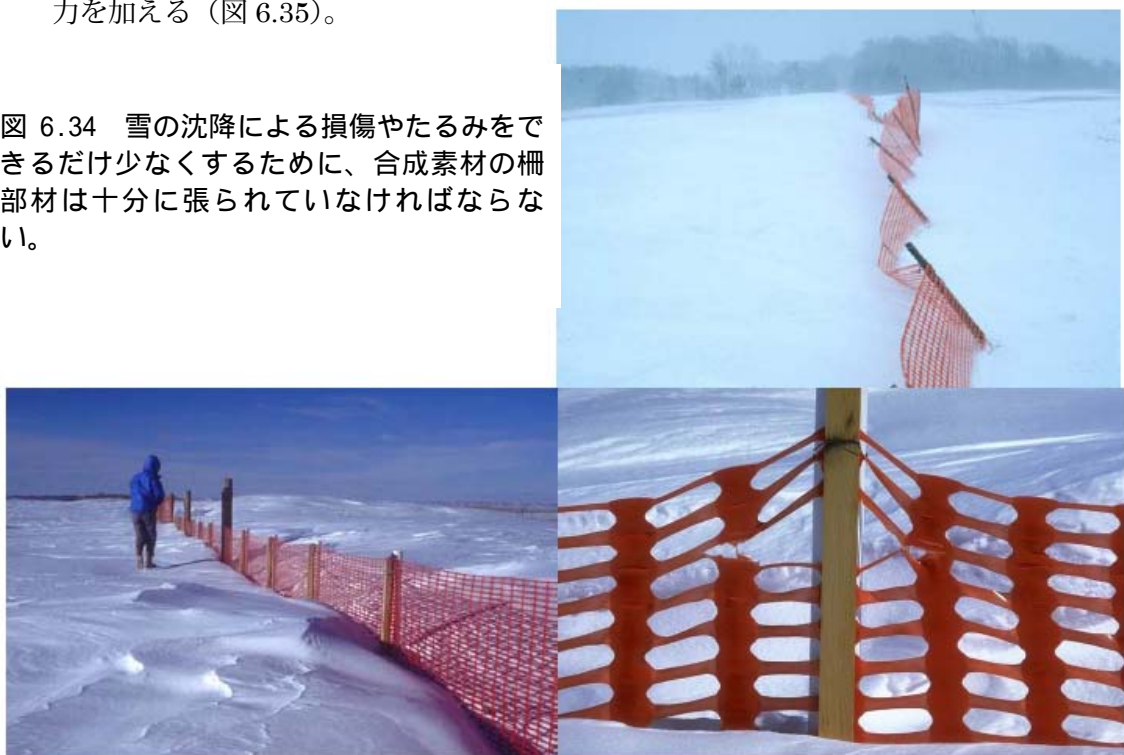


図 6.35. 重なったプラスチックの柵部材をピンと張る方法 .



6.3.7.3.4 複合ポリマーワイヤーレール

しなやかなポリマーワイヤーレールは元々、馬場の柵として開発されたものであるが、防雪柵としても理想的な素材である。材質は頑丈で、耐久性があり、必要とするどんな柵高や空隙率の柵にでも対応できる。部材は、3本の12.5ゲージのより線が組み込まれた大きな引張強度を持つポリマーから成る。Centaur HTP Fencing Systems社の製品は、幅120mm、長さ約200mのストラップから成り、20kNを超える破壊強度を有している。ワイオミング州や北極圏での試験によると、この材質は低温での使用にも適しており、低温により脆弱性が増して防雪柵としての使用に問題となることはないことがわかった。

Perma-Rail International社が製造したより頑丈でフレキシブルなPerma-Railは、127mmと150mmの2つの幅が製品化されている。150mm幅の製品にはケーブルが4本使用されている。Perma-Railの優れた柔軟性は、Centaur HTP製のワイヤーレールに比べ、7本のより線を使っているのに対し、7×7のより線を用いていることによるものである。



図 6.36. Centaur HTP ポリマーワイヤーレールの複合素材(上左側)を使って設置中の高さ4mの防雪柵(上右側). 下右側は、新しい15cm幅の Perma-Rail のストラップ.



柵の空隙率を変えることができるということは、風による鉄道車両の脱線を防ぐのに効果的である（図 6.37）。柵の空隙率は中央付近が 0.37 で、末端では 0.74 と大きくなっており、中間付近は 0.65 である（Tabler and Day 1992）。段階的に減風度合いを減らすことにより、列車が防風域を通り過ぎた所での脱線を引き起こす風速の急変を避けることができる。防雪柵での同様な活用として、6.5.4.4 で述べるように、吹雪に対する防雪効果を段階的に減らすことで、視程の急変を軽減させることが挙げられる。



図 6.37 柵の最後の 90m 区間において、減風度合いを段階的に減らすことで、柵の防風域末端での風速の急変を防ぐために、複合ポリマーワイヤーレールが使われた。

柵の部材が過剰にあちこち動くと、取り付け金具を貫通する器具が摩耗する。これを防ぐため、柵のたるみを取り除くように柵をピンと張る必要がある。最近まで、端の支柱に取り付けるために、唯一の市販されている器具はラチェット・ストラップ・ウインチであった（図 6.38）。比較的均一な地形においては、柵の片方の端だけに取り付けたウインチで、300mもしくはそれ以上の長さの柵を張ることができるが、より長い距離や起伏のある地形では、両端にウインチが必要となる。急な地形では、図 6.39 に示すように、ワイヤーレールが巻き取り装置に垂直になるように、末端を端の支柱に取り付けなければならない。Perma-Rail International 社は、現在、インラインウインチテンショナーを提供しているが、このウインチは必要であれば柵のどの場所にも取り付け可能である。これにより、支柱にウインチを取り付ける必要がなくなるので、柵の設置が非常に簡単になる。



図 6.38 左：柵の設置と維持のために、柵の端に恒久的に取り付けられたラチェット・ストラップ・ウィンチ。右：支柱の末端処理の方法

図 6.39 急勾配の箇所に建つ支柱にインライン・ウインチ・テンショナーやワイヤーレールの終端を垂直に取付る方法(Tabler 1994)

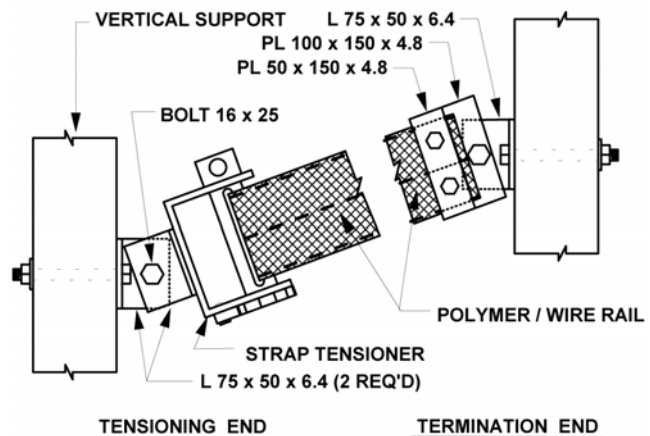


図 6.40 Perma-Rail のインライン・ウインチ・テンショナーは、どんな場所でも垂直で適切に取付でき、柵の建設コストを抑えることができる利点がある。写真は、Perma-Rail International 社の提供。

Perma-Rail International 社は、ワイヤーレールを支柱に取り付ける支持金物で、支持するところが自由に動くものを数種類製造している（図 6.41 及び 6.42）。ワイヤ

ーレールが損傷して張り直す場合、支持金具の付け直しが無く、維持が容易である。支持金具に加えて、Perma-Rail 社はまた、支柱と支柱の差し込みパイプのセット（図 6.43）と、ワイヤーレールの空隙率が 35%になるアルミニウム製の溝穴のついた支柱を製造している（図 6.44）。



図 6.41. 調整可能な取付金物を取付けた C 型支柱

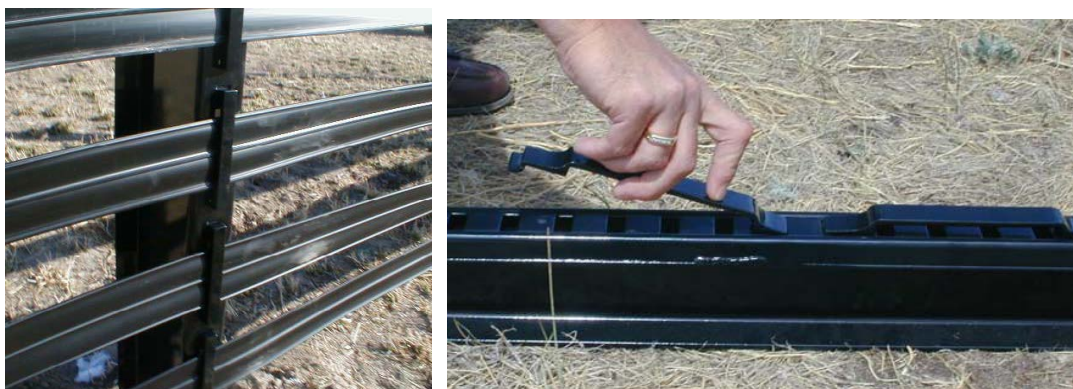


図 6.42. Perma-Rail 社の頑丈な支柱と取付金物が高い柵の建設を容易にさせる



図 6.43 Perma-Rail の調整用ウインチ（写真左）と、支柱の差し込みパイプ（写真右）は、不陸箇所の下部間隙を調整する。写真左は、Perma-Rail International 社の提供。



図 6.44. Perma-Rail のスリット穴付きアルミニウム製支柱と取付金物のセット
注意 金具は決められた箇所に使用する事。
写真は、Perma-Rail International 社の提供。

ワイヤーレールセットは、起伏のある場所でも適用できる（図 6.45）が、低い場所の支柱は、ワイヤーの張力で生じる上向きの力で地中から抜けないように、適切なコンクリートのアンカーで防がなければならない。これらの場所でコンクリートを少なくさせるには、「（地中アンカーを入れるための）ボーリングの穴にコンクリートを流す前に“鉤形”地中アンカー（図 6.15.）を入れる。

図 6.45.
ワイヤーレールセットは、起伏のある場所でも適用できるが、低い箇所にある支柱は、ワイヤーレールによって発生する上向きの力を適切なアンカーで抑えなければならない。



渦の流れは、吊られている柔軟なワイヤーレールを振動させ、地面から 1.5m の高さ以内で垂直方向の風速の速度勾配のため最大の振動が生じる(図 6.46)。この振動により、取付金具の部分でワイヤーレールの摩耗を生じさせ、曲げの繰り返しではめ込まれているワイヤーの破断を招く。そのため、支柱の間に最大で 1.5m の間隔を超えないように安定させるための補助の柱を入れる事が不可欠である(図 6.47.)。張力を大きくすると振動数が増大するので、支柱間のワイヤーをたるませない為に、ワイヤーレールを必要以上にきつく張るのは推奨しない。

図 6.46. 垂直の振動が、ワイヤーレールセットを脱落させる。

ワイヤーレールは地面から 1.5m までの高さが一番破損しやすい。



図 6.47. 強風の地域では、振れ留めは 1.5m 間隔を以内として用いるべきである。

レールセットの利点は：

- ☐ 風速が 19.4m/s 以上の箇所でも、あらゆる風向でも設置できる；
- ☐ Perma-Rail 社製の豊富な種類の支持金物により支柱に簡単に取付できる；
- ☐ レールにワイヤーを入れると、耐久性と耐破壊性を持たせる；
- ☐ 起伏のある地域では、湾曲に沿って支柱を設置する事ができる；
- ☐ 分割したワイヤーレールは、ラチェット・ストラップ・ウインチで張ったり補修するのが容易である；
- ☐ 多目的の柵として、立ち入り規制と防雪の両方に使用ができる；
- ☐ 任意の間隙や高さなどの柵の建設ができる；
- ☐ 雪の沈降圧やクリープによる損傷に耐えうる；
- ☐ 見た目が目立たなくて整然としている；

6.3.7.3.5 複合ポリマー繊維の柵

イギリスにある Liner Composites 社(www.linearcomposites.com)製の PARAWEB 柵は、50 mm幅の PARAWEB の帯で造られており、垂直方向に 50 mm間隔で、帯の中心同士の間隔は規格では 500 mmまたは 1m である。PARAWEB は、耐久力の高いポリエステル繊維の束をポリマー繊維の被覆が包んだものである(図 6.48)。PARAWEB 柵は 30m 巻きで、1.0、1.5 や 2.0m の幅のものが入手可能である。強度の高いタイプも使用できるが、標準タイプでも規定破断荷重が 1.62kN なので、防雪柵用として対応できる。この材質は、張力が規定破断の（柵高 1m 当たり 1.62～2.4kN）10～15%の張力で 1%の相当の伸びになる。メーカーから出ている柵の取付金物のセットも入手できるが、不可欠なもので無い(図 6.49.)。

PARAWEB は普通のプラスチックより重く、0.5 kg/m²有り、支柱間が長い箇所では、長手方向のケーブルのたるみを防ぐような水平の支持が必要となる（図 6.50.）。その資材は支柱に簡単に吊る事ができる。

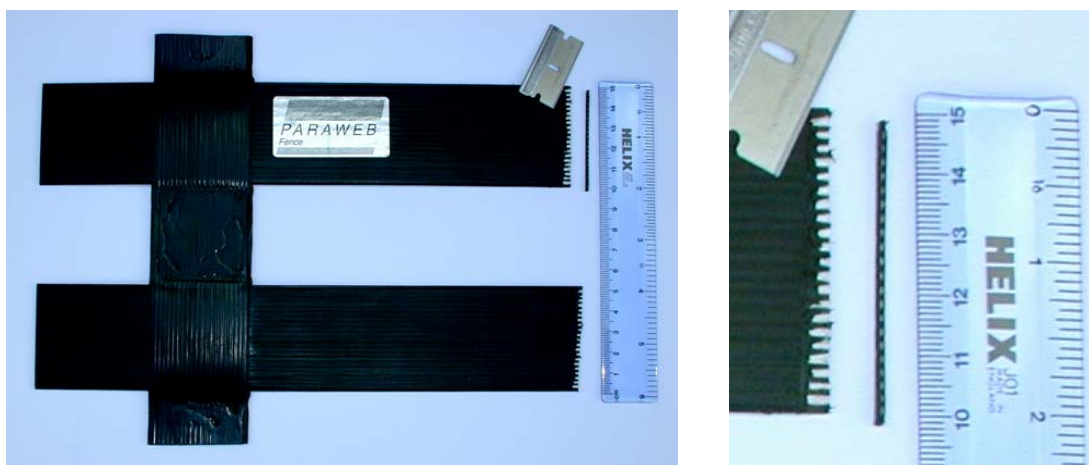


図 6.48. PARAWEB の柵は、ポリマー繊維の被覆で覆われている。断面は上の PARAWEB の右側の端と物差しの間に示している。PARAWEB の右端は白い繊維の先端を見られる様に削っている。

図 6.49. 支持金物付き PARAWEB 柵
写真は Liner Composites 社の提供。





図 6.50.
支柱間のワイヤーで支えら
れた PARAWEB 柵
Liner Composites 社の提供。

6.3.8 支柱型柵の補強

支柱は、風荷重に耐え、柵の材料に適切な張力がかかるように設計しなければならない。プラスチックの柵材料は高さ 1mあたり 2.5kN 程度の張力を必要とするので、端部分と曲線部分の支柱は、長さ方向に固定されなければならない、柵のラインを水平方向に曲げることは、特別な埋め込みの事前対策がなければ、避けるべきである。

6.3.11 の項で説明されるように、風が柵に加える力は、風速、空気の密度、風上側の地形、地表面状況、柵の空隙率及び高さ、によって変わる。構造設計に適用される風速は、地理的位置、適用可能な設置基準、所有者により設定された規格、により異なってくるが、通常、防雪柵は 160km/h (44.4m/s) の風速条件で設計されている。

1.2m高さの柵を支える鉄製の T 型支柱は、強風で曲がるのを防ぐために 2.4m間隔で設置する必要がある。高さ 1.8mの柵では、風による曲げモーメントは高さ 1.2mの柵に比べて 65%程度増加しているため、新たな斜材や支線の必要性を避けるためには、約 1.4mごとに鉄製支柱を配置しなければならない。それゆえ、1.8mより高い仮設柵に、鉄製 T 型支柱を使用するのは実用的ではない。

横方向の斜材と支線は、支柱型柵においては避けるべきである。これらの支えが吹きだまりに埋まったとき、これらは柵を破損してしまうほどの大きな荷重を支えることになるからである。このことは、クリープが起こる傾斜地で、特に当てはまる。垂直な支柱は、風荷重設計の下では曲がりまたは破壊に抵抗できるくらい強くなければならず、埋め込みは、構造物がひっくり返るのを防ぐのに十分な程度でなければならない。垂直方向の支持材料の選択は、主として、コストと有用性による。例えば、アラスカのプルドー湾では鉄製の井戸ケーシングが材料として使用されており、また、いくつかの鉄道用防雪柵では、廃レールが利用されている。支柱間の最適な間隔は、通常、総コストを最小にするものであり、材料コストと掘削・埋戻しコストの balan

スがとれているものである。

支柱型柵設計の手法は、支柱間隔において、それが必要とする妥当な支柱サイズと埋め込み深さを反復計算で決定することである。支柱の設計に関する標準的な基準としては、アメリカ木造建築学会(1994)によって発行された、木造建築マニュアルがある。また、建築技術者ハンドブック(Gaylord and Gaylord 1979)も、支柱設計の手順を示している。

表 6.3 は、160km/h(44.4m/s)の風速における、様々な高さ及び支柱間距離の防雪柵を支えるのに必要な、木柱の埋め込み深さを示している。

埋め込み深さは、土壌条件、特に岩盤深さによってしばしば制限される。コンクリートに支柱をはめ込むと必要な埋め込み深さはかなり抑えられるが、この場合、工事費用がひどく高くなることもしばしばである。側面抵抗を増加させるためのそれほど高価でない方法は、締め固め材料で穴の途中から上端まで埋戻すことであり、支柱の周りに厚さ 20cm のコンクリートを環状に注いだあと、締め固め材料で埋戻しを完成させる。支柱をコンクリートに据えつけるため、ラグボルトをコンクリートの輪の中心にある柱の中に取り付ける。

支柱は、全ての方向において 13m 以内の傾きで垂直に立つように設置されるべきであり、全ての支柱の風上面位置は予定された柵設置位置に比べ 25m 以内の誤差に収めるべきである。30cm 程度ごと、小分けして突き固めながら埋め戻しをするよう、注意を払うべきである。

永久凍土層での設置では、凍結による柵の上昇を防ぐため、鉛直支持は活動層の下 6 m の深さにまで拡げるべきである。

表 6.3. 160km/h(44.4m/s)の風速における、支柱間隔 (Sp) 別高さ別の 50%空隙率防雪柵を支持するのに必要な支柱の根元の円周(Circum.)と埋め込み深さ(Embed.)。ペイマツ (アメリカトガサワラ) の支柱の値。(平均的なせん断強度(120kPa)の土、締め固め材料での埋戻し、気温 20℃、平均海面高さ、の条件) (Tabler 1986b)

単位: cm

柵高 (m)	支柱間距離 = 2.5 m		支柱間距離 = 3.0 m		支柱間距離 = 3.5 m		支柱間距離 = 4.0 m	
	Circum.	Embed.	Circum.	Embed.	Circum.	Embed.	Circum.	Embed.
1.0	27	76	31	88	35	101	39	113
1.5	37	101	41	113	46	131	51	146
2.0	45	122	51	137	57	159	63	177
2.5	53	140	59	162	67	183	74	207
3.0	60	159	68	180	76	207	84	232
3.5	67	177	76	201	85	229	94	259
4.0	74	192	83	219	93	250	103	280

6.3.9 仮設柵

仮設柵は、耕作地などの、防雪柵が夏の土地利用に適合しない場所で必要となる。過去の慣例として、主として高さ 1.2m の鉄製支柱柵を使用してきたが、現在では、より高い柵の方がより効果的であることは明白となっている。

6.3.9.1 従来の T 型支柱柵

表 6.4 に示した指針値は、T 型支柱柵に使用されるべきものである。

表 6.4. T 型支柱柵の指針値

項目	柵高 (m)	
	1.2	1.8
支柱長さ (m)	2.0	2.6
支柱間距離 (m)	2.4	1.4
下部間隙 (cm)	15	18

各端部の支柱は、斜めに地面に差し込むような形で支柱の上端部近くから近接支柱の地面位置まで渡す形の、適所で針金で補強された鉄製の柱により、強化されるべきである。(図 6.51)

もし、柵材料としてピケが使用されているなら、(少なくとも 1.2m 幅に対し 1.1kN の力で) ピンと張られているべきである。また、合成柵材料においても、メーカーにより指定された張力で引っ張られているべきである。

プラスチックの柵材料を、支柱の反対側で、木製のラス（木摺）と、端から 15cm 及び中央で鉄製支柱にしっかり針金補強した外側の当て木（50mm 角）との間にはさむ(図 6.51、詳細 B)。より良い方法は、ラス（木摺）を、支柱の周りにはめるための 25mm パイプ用発泡断熱材に取り替えることである(図 6.52)。

図 6.51。鉄製 T 型支柱を用いる、合成柵材料でできた 1.2m 高さの柵を支えるための指針 (Tabler1994)。開口部を縫うようにつけた木製のラス（木摺）は、柵材料の両端に対して安全確保のための部品となる。

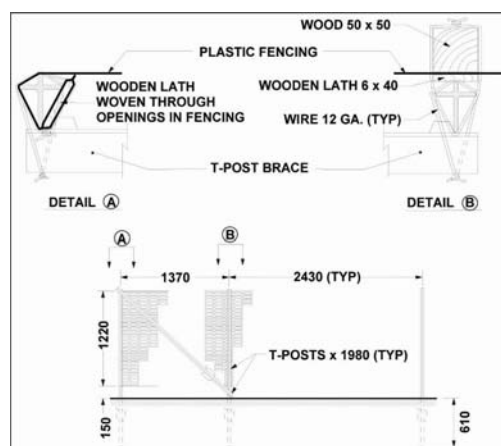




図6.52 鉄製T型支柱にかぶせられた発泡断熱パイプは、ラス（木摺）よりも良く柵を固定する (Tabler1994)。

6.3.9.2 Tensar® 可動式防雪柵

Tensar 社は高さ 2.0mと 2.4mの可動式防雪柵におけるデザイン特許(米国特許番号 5,184,800)を持っている。有効柵高が 2mの防雪柵は、柵高 1.2mの防雪柵の 3 倍の雪をためこむ。また、有効柵高 2.4mの防雪柵は、柵高 1.2mの防雪柵の 4.6 倍の雪をためこむ。

防雪柵は、各 2.4m長のパネルが 50x150mmの角材で出来た木枠で組み合わせられ、角をボルトで締められ、中央部分もピンと伸びた 1.2m幅のプラスチック製メッシュを取り付けたものとなっている(図 6.53 及び 6.54)。UX310型のプロトタイプは、その優れた強さと耐久性により、超高密度ポリエチレンの材料が使われていた。その後、その製品はより軽い UX420型に入れ替わったが、材料の違いがどの程度設計的に対応しているのかは、わかっていない。張力は、プラスチックに通したパイプに接続された棒を取り付けることにより、調整される。パネルは、ワイオミング防雪柵を据えつけるのに使われるのと同じ U-クリップに通した補強棒によって、相互に接続される(図 6.11)。また、U-クリップは、防雪柵と地面に埋め込まれた補強アンカーとをつなげている。ほとんどの土のための適切なアンカー埋設深は 50cmである。U-クリップと棒での接続(図 6.54)は、迅速な組み立てと分解を可能にする。パネル間の隙間をなくすため、必要に応じて先端か下部のどちらかでパネルを重ね合わせるようにする。U-クリ

ップは、不整地での設置に適応するために必要に応じて回転させられ、各接続のときに棒が振動で外れるのを防ぐために U-クリップだけを締める必要がある。3mm鋼板又は超高分子量ポリエチレンのどちらかで、U-クリップを作ることができる。

隣接したパネルは一本の 50×150mm 斜材と 1 個の風上側アンカーを共有しており、その結果、材料と設置のコストを最小にする。柵のどちらの側面にも、斜材を設置できる。

防雪柵は、どんな角度でも自在に傾けることができる。これは、堆雪パターンをコントロールするために役立ち、そして、防雪柵の有効柵高を利用可能なスペースに合うように変えることを可能にする。例えば、45° で高さ 2m の防雪柵を傾けると、高さ 1.4m の防雪柵となり、風下側吹きだまりの最大長は 70m から 49m までに変化する。

プレハブパネルの屋外設置には、長さ 30m あたり、約 3 (人・時間) の作業量が必要となり、それは、従来の 1.2m ラス防雪柵又はプラスチック製防雪柵を設置するのに必要な時間よりは少ない。高さ 2.4m の防雪柵の屋外設置に必要な時間は、同等な防雪容量をもつ一連の従来型 1.2m 防雪柵を設置するのに必要な時間の、たった 10% である。その材料及び製作コストは、恒久防雪柵のコストと同程度である。いずれの高さの防雪柵においても、1 パネルあたりの製作必要時間は、およそ 3/4 (人・時間) である。

発明者は、木枠が純合成材料のプレハブパネルに取って替わられることを意図したが、その計画は、無期限に柵上げされた様である。ニューヨーク州運輸省は、図 6.55 から図 6.58 に示す、複写許可の必要な、独自の木枠に関する標準図を作成した。



図 6.53. 高さ 2.0m 及び 2.4m の特許可動式防雪柵の設計には、Tensar® 社製柵材料を支持するための木製枠組を使用する (左、Tabler1994 より)。ここには高さ 2.4m タイプの例が示されている。

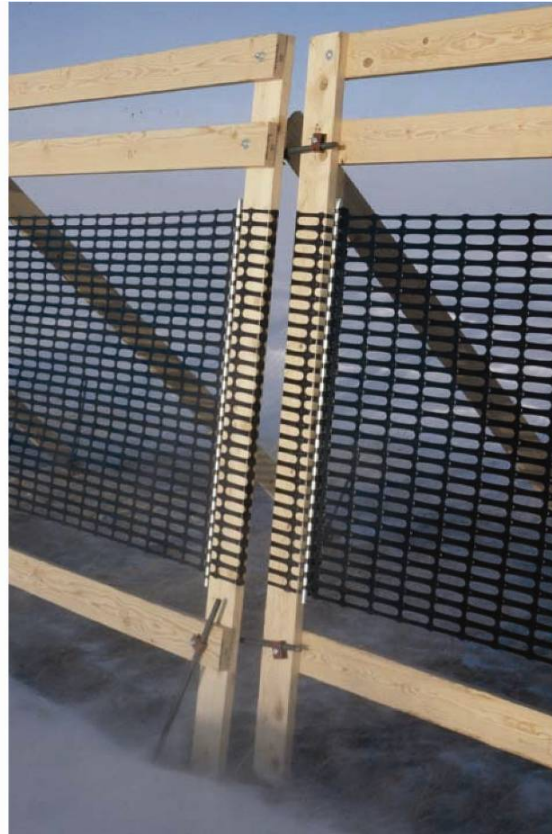


図 6.54. パネルは、図 6.11 に示された U-クリップを補強棒とともに使用することで接続される。左は、高さ 2.0m タイプの例 (Tabler1994)。

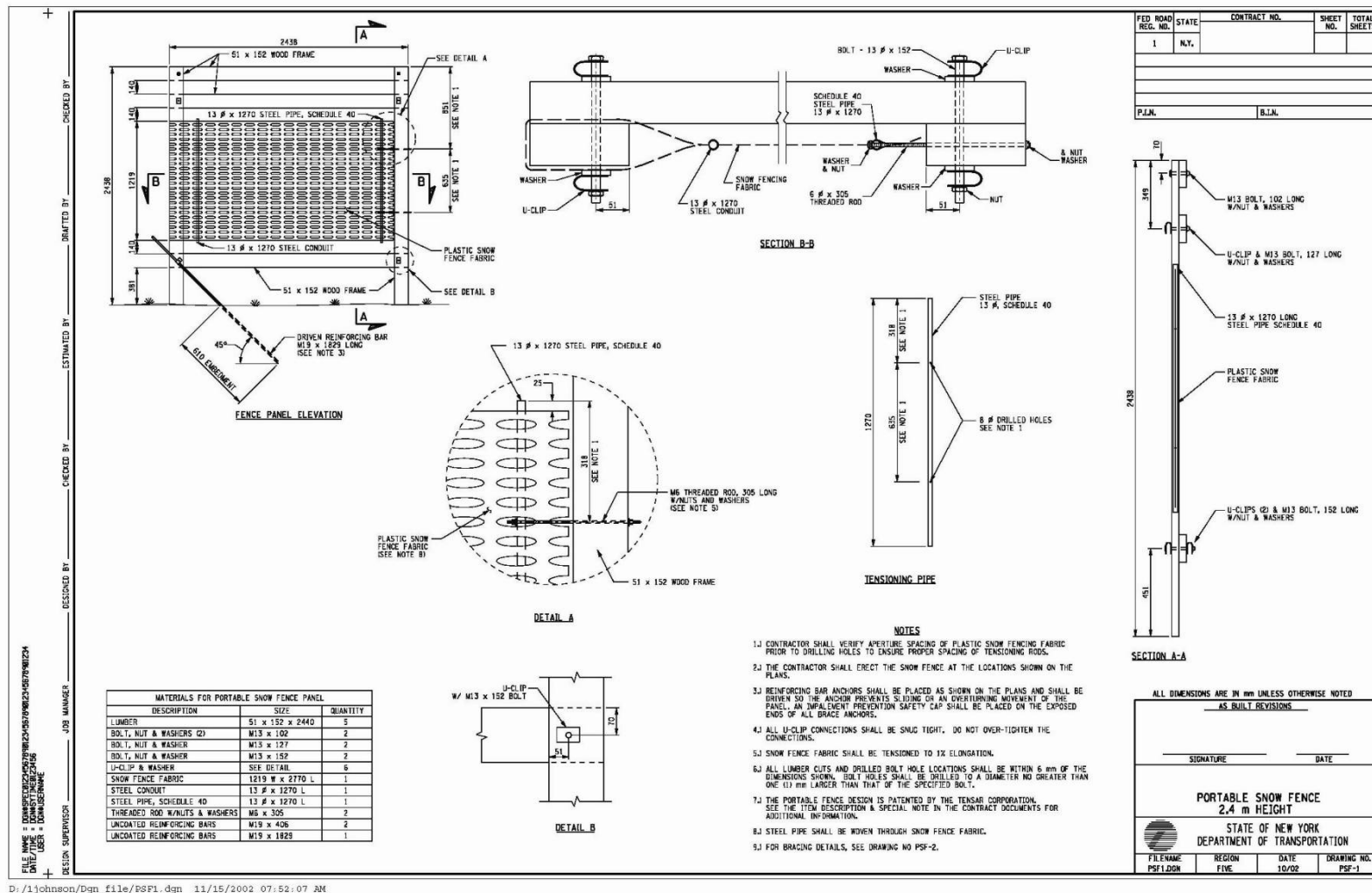


図 6.55. 2.4m高さの可動式防雪柵用標準図 (1/2)。図はニューヨーク州運輸省提供。

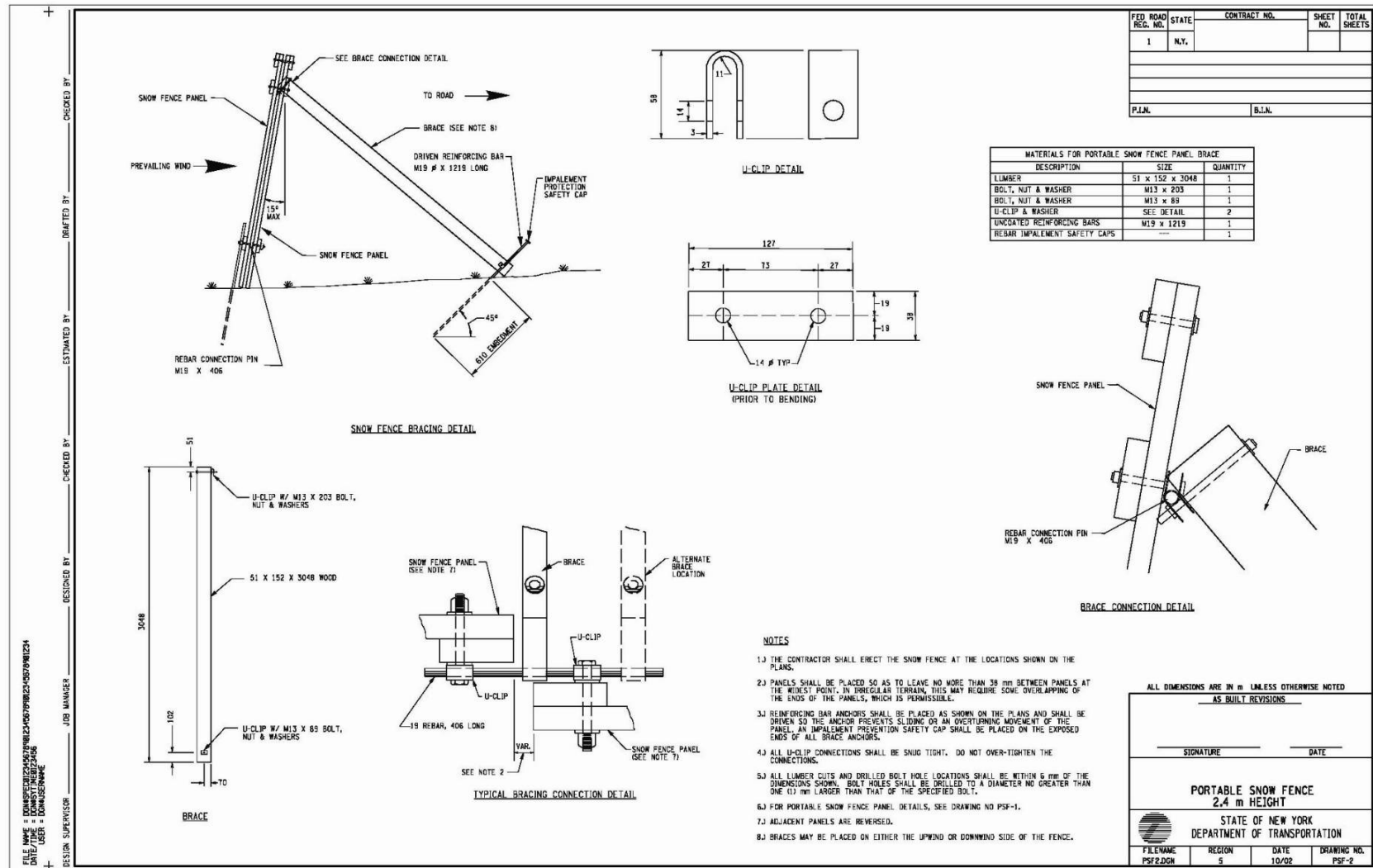


図 6.56. 2.4m高さの可動式防雪柵用標準図 (2/2)。図はニューヨーク州運輸省提供。

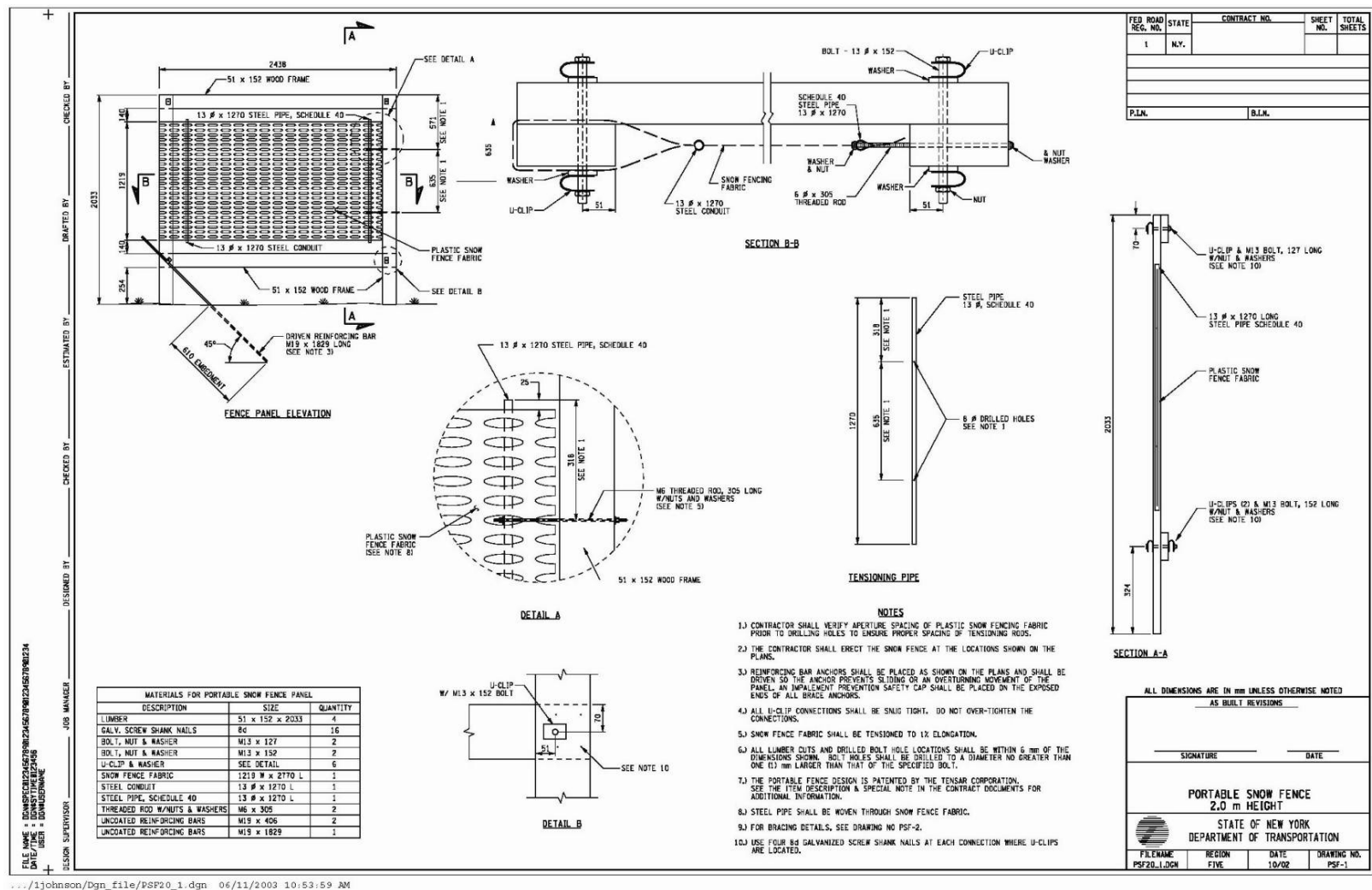


図 6.57. 2.0m高さの可動式防雪柵用標準図 (1/2)。図はニューヨーク州運輸省提供。

6.3.10 防雪柵型式の特徴

立地条件に見合った防雪柵の型式は、相対的成本、所要の高さ、空隙率、防雪板の材料、材料入手の難易度、および地形、土壌条件と設置される場所の土地利用によって決定される。ワイオミングフェンスと支柱型防雪柵の長所と短所を以下にまとめる。

ワイオミングフェンス

長所

- ☐ 大半の場所で設置可能なために、もっとも経済的である
- ☐ 撤去および移動が比較的容易である。
- ☐ フィールドでの工事期間を短縮するためにあらかじめ組み立てておくことが可能である。
- ☐ 標準仕様はほとんどの場合に適用可能である。

短所

- ☐ 急斜面では積雪のクリープやグライドの影響を受けやすい。
- ☐ かなりの占有面積を要する。
- ☐ きめ細かな維持管理を必要とする。
- ☐ 実用上の最大柵高は約 4.3m(14フィート)に制限される。

支柱型防雪柵

長所

- ☐ 用地が少なくても設置可能である。
- ☐ どの高さの防雪柵にも適している。
- ☐ 急斜面での積雪のクリープに対して影響がより少ない。
- ☐ プラスチック製など、全ての防雪板の材料に対して利用可能である。
- ☐ 永久凍土に適している。
- ☐ 防雪板の材料によるが、かなり維持管理費を少なくすることができる可能性がある。

短所

- ☐ 通常、ワイオミングフェンスより高価である。
- ☐ 1.8m(6フィート)より高い防雪柵では、移動は容易ではない。
- ☐ (ワイオミングフェンスに比べて) 工事に時間を要する。
- ☐ 設置箇所によって、(柵の支持構造は) 特注となる。

6.3.11 防雪柵の風荷重

6.3.11.1 基本方程式

構造物への風の力は次の式によって与えられる。

$$F_w = 0.5 \rho_a C_d H_s S_p U^2 \quad (6.8)$$

ここで F_w = 風の力 (N),
 ρ_a = 空気密度 (kg/m^3),
 C_d = 抗力係数
 H_s = 柵高 (m),
 S_p = 長さまたはスパン (m),
 U = 風速 (m/s)

方程式(6.8)から概括的にいえることは、風の力は風速の二乗、防雪柵の面積（柵高×延長）、空気密度に正比例して増加することである。

6.3.11.2 空気密度

空気密度は温度と気圧で変化するため、風荷重を計算する上で、この変化を計上することが重要である。標高と温度の関数としての空気密度を表す以下の式は、List(1968)によって示された関係式より得られた。

$$\rho_a = \{353(1 - 0.000022569E)^{5.255}\} / (t_a + 273) \quad (6.9)$$

ここで ρ_a = 空気密度 (kg/m^3),
 E = 標高 (m),
 t_a = 気温 ($^{\circ}\text{C}$)

6.3.11.3 抗力係数

抗力係数(C_d)は、物体に加えられた力と、風の動圧($0.5 \rho_a U^2$ と定義される)との間の比例係数である。ここに記述された構造設計のためには、抗力係数は風速約 11m/s 以上の場合は依存しない。この風速は、通常十分に乱流となる速度である。抗力係数は、風洞実験や現地試験での計測から実験的に決定される。文献としての一次資料として Hoerner (1965)と Guyot(1978)があり、抗力係数が載っている。

抗力係数は、様々な場所での風速を物体に加わる力と関連づける計算ができるために、方程式(6.8)で使用されている風速に適した抗力係数を使用することが必要である。たとえば、高さ 1m(3.3フィート)の柵に係る抗力と地上高 10m(33フィート)の風速を関連づける係数を特定することが可能である。ここで使用されるように、抗力係数は物体の投影面積に対して風速の二乗平均に一致する。これは、地面に取り付けられた物体の風荷重を計算するための特に重要な特徴である。

地上の高いところに吊された、長くて、空隙のない防雪板は 1.98 の抗力係数を持っている。この同じ防雪板が地面に接触しているなら、おそらく渦の発達の影響で、抗力係数は約 1.25 まで減少する。三次元の物体は自由流と、地面付近の空気の抗力係数の間にそのような大きな違いを示さないし、そして有孔板に関しても同じことが言える。

有孔板の投影面積は形状によって定義され、したがって空隙も含んでいる。抗力係数は明らかに不透過領域の割合に関連するが、気流の断面を見ると開口部の面積よりも小さいので、一般に、この比例関係は非線形である。その結果、有孔板の空力的にみた空隙率は、物理的な空隙率よりも小さいかもしれない。より小さい空隙は、大きな空隙に比べより低い空気力学的空隙率（したがって、より大きい抗力係数）をもたらす。

様々な防雪柵への抗力係数を表 6.5 に記載した。

表 6.5 防雪柵での抗力係数

Fence	Porosity, P	Source	C_d
Solid Fence	0	Hoerner (1965)	1.25
Solid fence	0	Tabler (1978)	1.22 ± 0.03
Wyoming snow fence	0.5	Tabler (1978)	1.05 ± 0.01

±値は 95%信頼限界を示す

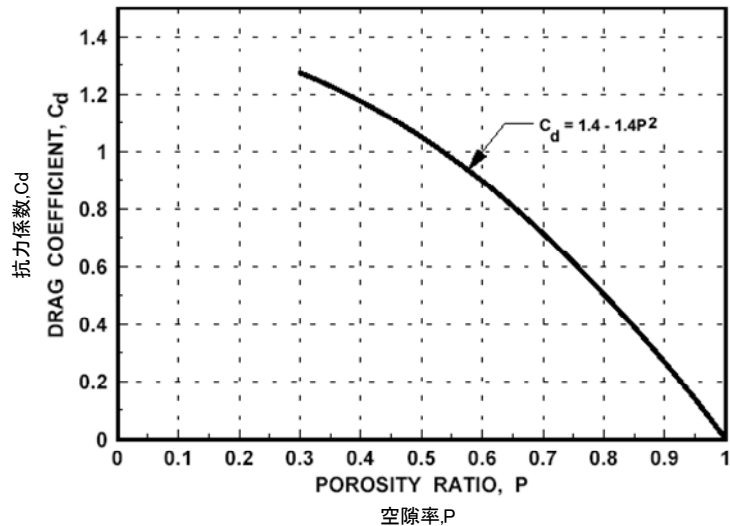
有孔板の抗力係数を実験的に決定できない場合、Guyot (1978)によって記述されたように、経験則的な関係から抗力係数を推測することも可能である。比較的空隙率が高い有孔板に対し、実用的に適用可能な式として、筆者は図 6.59(Tabler 1986b)に示すような空隙率 P と抗力係数の近似的な関係を単純な二次方程式として提示している。

$$C_d = 1.4 - 1.4P^2; P > 0.3 \quad (6.10)$$

この方程式は、工学的目的で利用する場合に、十分に安全側に立ったデータの範囲を提供している。多くの防雪柵で無理なくほとんど近似していて、実測から得られた「P = 0.5 では $C_d = 1.05$ 」となることにもかなっている。方程式(6.10)は $P < 0.3$ の防雪柵に対しては抗力係数を過大評価しているように見える。

以上述べてきた内容は、非常に長い防雪柵に適用される。三次元の物体では抗力係数はより少ないが、防雪柵に適用する場合、通常は修正しなくてもよい。

図 6.59 防雪板の空隙率と抗力係数



6.3.11.4 風速

風速鉛直分布は 3.4.3 節(3.1)式で表されるとすると、柵高 H の上の風速の二乗平均の第一近似は(6.11)で表される。

$$U_m^2 = 6.25 U_*^2 \{ [\ln(H/Z_0)]^2 - 2 \ln(H/Z_0) + 2 \} \quad (6.11)$$

ここで他の用語は 3.4.3 で定義した通りである。抗力の合力が働く地表からの高さ、 Z_f 、は(6.12)式で与えられる。

$$Z_f = 0.5H \{ [\ln(H/Z_0)]^2 - \ln(H/Z_0) + 0.5 \} / \{ [\ln(H/Z_0)]^2 - 2 \ln(H/Z_0) + 2 \} \quad (6.12)$$

粗度 $Z_0 = 0.02$ の雪面において、(6.12)式は次の近似式(6.13)で表される。

$$Z_f = 0.56H \quad (6.13)$$

空隙率 50%柵にかかる風圧を柵高と風速で表 6.6 に示した。表では標高 0m、粗度 $Z_0 = 0.02$ および気温を 20°C と仮定した。

6.3.11.5 設計風速の選定

設計風速（風荷重）は地方の建築基準で与えられていることが多い。西アメリカ建築基準（ICBC1982）、や合衆国の基準（UBC）では：

“設計風圧を決めるための基本となる最小基本風速は No.4 の図[合衆国地図に示し

た 50 年再現値]から得られるであろう。そこでは、地形と地方の記録が、標準高さでの 50 年再現値は No.4 図に示されているものより高いことを表している。これらより高い値は最小基本風速である。”

これら基本風速は“最速マイル”のことで、距離 1 マイルを風が通過した最短時間から計算される。最速マイルデータを記録した風速計は使われなくなっており、この尺度は 50 年再現値に基づいたガスト（突風）データと置き換わっている。図 6.60 に示された風速図は新しい標準風荷重の基礎となるもの(Peterka and shahid 1998) として提供されたものである。50 年ピークガストは“特殊風地帯”としてマークされた地域では適用されない。

表 6.6 . 空隙率 50% ($C_d = 1.05$) の防雪柵に、標高 0m、20 の条件で、働く風圧 $P_{w,0}$ を、柵高 H 、(粗度 $Z_0 = 0.02\text{cm}$ として)での風速自乗平均を決めるために数値積算した。表の Z_f は合力、またはモーメント・アーム (moment arm) (Tabler 1986a) である。

H (m)	Z _f (m)	Wind speed at 10m (km/h)-----										
		100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
		Wind pressure, P _{w,0} (Pa)										
1.0	0.56	240	290	345	405	470	539	614	693	776	865	959
1.2	0.67	251	304	362	425	492	565	643	726	814	907	1005
1.4	0.79	261	316	376	441	512	588	669	755	846	943	1045
1.6	0.90	270	327	389	456	529	607	691	780	875	975	1080
1.8	1.01	278	336	400	470	545	625	711	803	900	1003	1111
2.0	1.12	285	345	410	482	559	641	730	824	923	1029	1140
2.2	1.23	292	353	420	493	571	656	746	843	945	1053	1166
2.4	1.34	298	360	429	503	583	670	762	860	964	1074	1190
2.6	1.45	303	367	437	512	594	682	776	876	982	1095	1213
2.8	1.56	308	373	444	521	605	694	790	891	999	1114	1234
3.0	1.67	313	379	451	530	614	705	802	906	1015	1131	1254
3.2	1.76	318	385	458	537	623	716	814	919	1030	1148	1272
3.4	1.87	322	390	464	545	632	725	825	932	1045	1164	1290
3.6	1.98	327	395	470	552	640	735	836	944	1058	1179	1306
3.8	2.09	331	400	476	559	648	744	846	955	1071	1193	1322
4.0	2.20	334	405	481	565	655	752	856	966	1083	1207	1337
4.2	2.31	338	409	487	571	662	760	865	977	1095	1220	1352
4.4	2.41	341	413	492	577	669	768	874	987	1106	1233	1366
4.6	2.52	345	417	496	583	676	776	883	996	1117	1245	1379
4.8	2.63	348	421	501	588	682	783	891	1006	1127	1256	1392
5.0	2.74	351	425	506	593	688	790	899	1015	1138	1267	1404

km/h = 1.606 • miles/h

m = 0.305 • ft

Pa = 47.85(lb/ft²)

表 6.7. 表 6.6 の標高と温度の違いを、(6.14)式で補正するための係数($C_{E,T}$)。

例、標高 2200m、気温 - 10 の風荷重は表 6.6 の 0.85 を掛けて求める (Tabler 1986a)。

Elevation (m)	-----Air temperature (°C)-----						
	-40	-30	-20	-10	0	+10	+20
	Correction factor, $C_{E,T}$						
0	1.26	1.21	1.16	1.11	1.07	1.04	1.00
200	1.23	1.18	1.13	1.09	1.05	1.01	0.98
400	1.20	1.15	1.10	1.06	1.02	0.99	0.95
600	1.17	1.12	1.08	1.04	1.00	0.96	0.93
800	1.14	1.10	1.05	1.01	0.98	0.94	0.91
1000	1.12	1.07	1.03	0.99	0.95	0.92	0.89
1200	1.09	1.04	1.00	0.96	0.93	0.90	0.87
1400	1.06	1.02	0.98	0.94	0.91	0.87	0.84
1600	1.04	0.99	0.95	0.92	0.88	0.85	0.82
1800	1.01	0.97	0.93	0.90	0.86	0.83	0.80
2000	0.99	0.95	0.91	0.87	0.84	0.81	0.78
2200	0.96	0.92	0.89	0.85	0.82	0.79	0.77
2400	0.94	0.90	0.86	0.83	0.80	0.77	0.75
2600	0.92	0.88	0.84	0.81	0.78	0.75	0.73
2800	0.89	0.86	0.82	0.79	0.76	0.73	0.71
3000	0.87	0.83	0.80	0.77	0.74	0.72	0.69

$^{\circ}\text{C} = 0.556(^{\circ}\text{F} - 32)$

$\text{m} = 0.305 \cdot \text{ft}$

表 6.8. 式(6.10)によって、表 6.6 の風荷重を空隙率の異なる柵に適用し、抗力係数 C_d を求めるための補正係数 C_p : (Tabler 1986a)。

Porosity ratio, P	C_d	Correction factor, C_p	Porosity ratio, P	C_d	Correction factor, C_p
0.00	1.40	1.33	0.55	0.98	0.93
0.05	1.40	1.33	0.60	0.90	0.85
0.10	1.39	1.32	0.65	0.81	0.77
0.15	1.37	1.30	0.70	0.71	0.68
0.20	1.34	1.28	0.75	0.61	0.58
0.25	1.31	1.25	0.80	0.50	0.48
0.30	1.27	1.21	0.85	0.39	0.37
0.35	1.23	1.17	0.90	0.27	0.25
0.40	1.18	1.12	0.95	0.14	0.13
0.45	1.12	1.06	1.00	0.00	0.00
0.50	1.05	1.00			

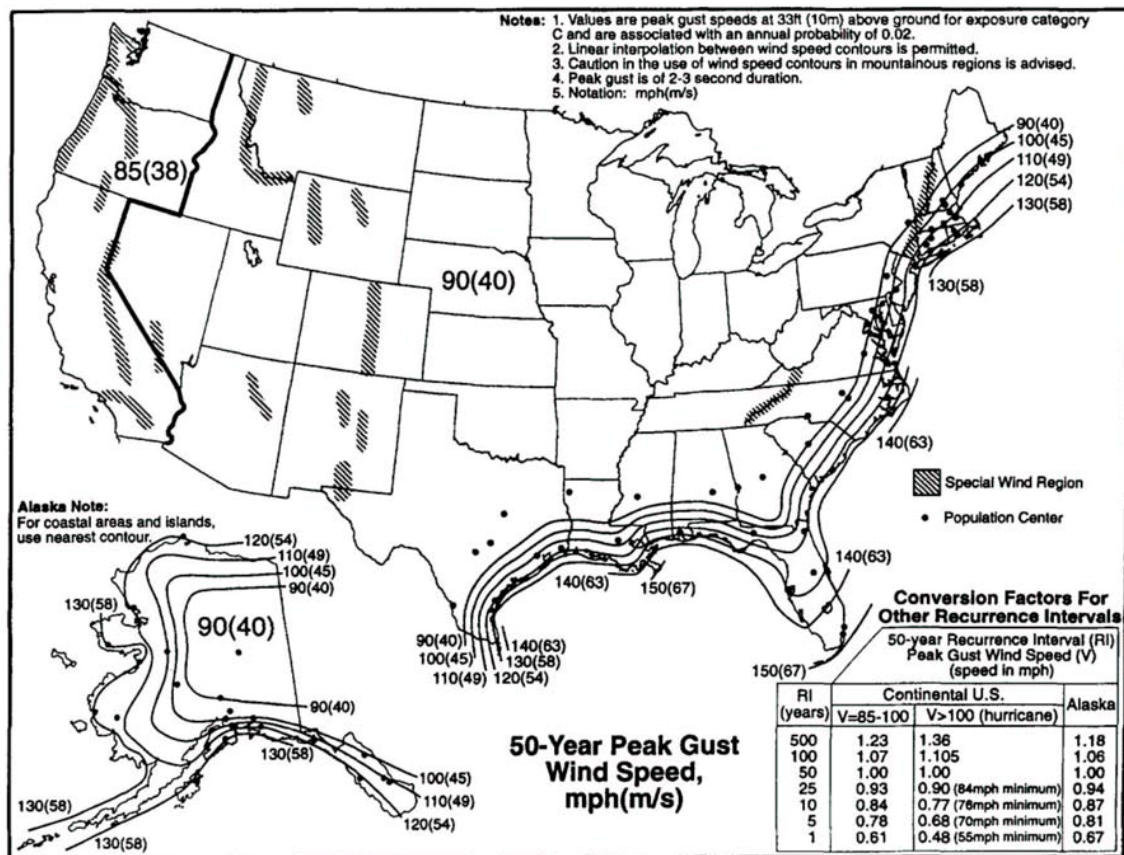


図 6.60 ガスト風速 50 年再現期待値図 (Peterka, J.A. and S. Shahid 1998).
合衆国の設計ガスト風速。Journal of structural Engineering 124(2):207-214).
c . 著作権 1998ASCE(WWW.Pubs.asce.org) . 発行者の許可を得て掲載。

6.3.11.6 風荷重計算法 (手順)

表 6.6 から 6.8 までは使った風荷重計算手順。

1. 求めようとする防雪柵の柵高 (H_s) と空隙率(P) を決める。
2. 表 6.6 や必要に応じてより大きな値で設計風速を決める。
3. 設置箇所の標高と起こりうる最低気温と設計風速を決める。
4. 表 6.6 から柵の空隙率 50%、標高 0m での気温 20℃の風圧 $P_{w,0}$ を読む。
5. 表 6.7 から設置地点の標高と設計温度に合った補正係数($C_{E,T}$)を決める。
6. 表 6.8 から柵空隙率に対する補正係数 (C_p) を決める。
7. ステップ 4 で得られた値とステップ 5 と 6 で得られた係数を掛けると、式 (6.14) で与えられるように、設計風圧 P_w が求められる。

$$P_w = (C_{E,T}) (C_p) (P_{w,0}) \quad (6.14)$$

S_p 離れた支持部材に働く風力 F_w は設計風速 (P_w) に支持部材 ($H_s \cdot S_p$) との間の柵面積を掛けて得られる。地表面に関して適用される曲げモーメントは F_w と表 6.6 で与えられる Z_f の積で求められる。

例：ニューヨーク州バッファロー

与えられた条件：柵高：2.4m(7.9ft)

空隙比：0.4

設計風速：140km/h(87miles/h)

標高：215m(705ft)

設計風速で予想される最低気温： -10°C (14°F)

必要事項：設計風圧と間隔 3.0m の鉛直支柱に働く曲げモーメント合力を計算すること。尚、固定点は地表とする。

解：表 6.6 から、 $P_{w,o}=583\text{Pa}$; $Z_f=1.34\text{m}$

表 6.7 から、 $C_{E,T}=1.09-(15/200)(0.03)\div 1.09$

表 6.8 から、 $C_p=1.12$

$P_w=(583)(1.09)(1.12)=711.7\text{Pa}(14.87\text{lb}/\text{ft}^2)$

$F_w=(711.7)(2.4)(3.0)=5124\text{N}(1152\text{lb})$

曲げモーメント $= (5124)(1.34)=6866\text{N} \cdot \text{m}(5061\text{ft} \cdot \text{lb})$

6.4 吹き払い型防雪柵

吹き払い型防雪柵は米国で使われることは少ないが、日本では主要な吹雪対策として設置され、インド、中国などの米国以外の他国でも用いられている。このほか、ヨーロッパでは、雪崩発生区での雪庇防止柵として、この吹き払い型防雪柵が用いられることがある。吹き払い型防雪柵の一般的な形式は、吹き払い柵、風を通さない構造物による対策（鉛直に無孔板を建て込んだ防雪柵など）、3 次元的構造をもつ側方防雪施設の 3 つである。

6.4.1 ジェットルーフおよび吹き払い柵

ジェットルーフは、水平方向から傾けた単一の屋根のような偏向板からなり、風上端に比べて風下端では地面に近くなるように傾けられている（図 6.61、図 6.62）。この柵の構造から、下向きの風の流れを強めることで吹雪粒子を吹き抜けさせ、吹きだまりを形成することなく風下遠くに飛ばすことができる。こうした効果は、切土上部や

山地の尾根風下側の雪崩発生区での雪庇対策に应用される。

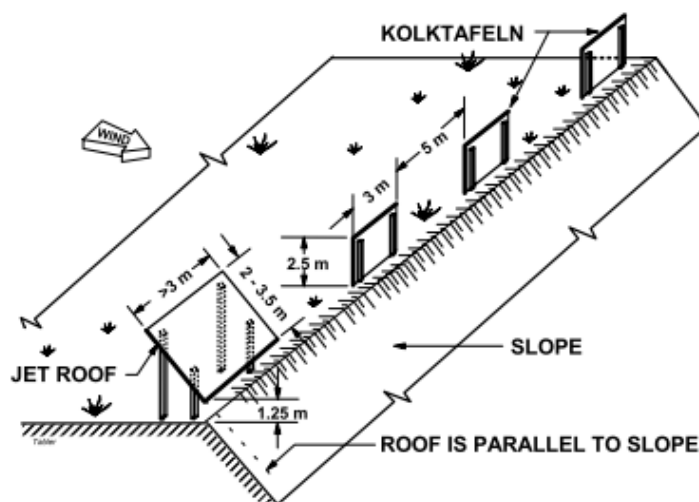


図 6.61. ジェットルーフと Kolktafeln（乱流発生板）は雪崩発生区での雪庇を防止する。

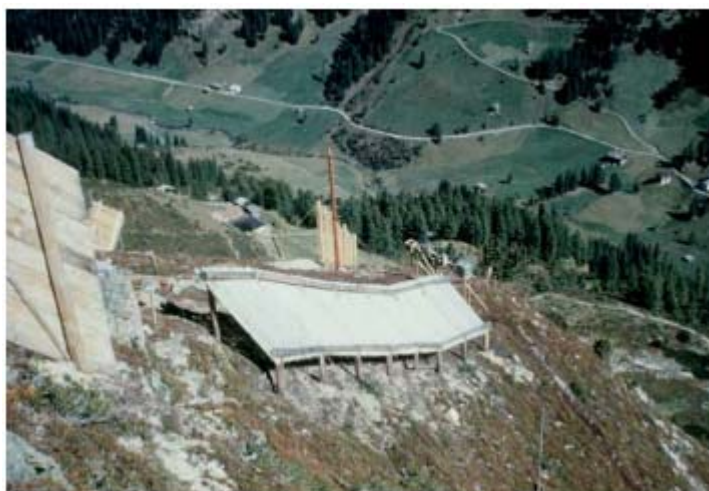


図 6.62. スイスでのジェットルーフ設置例（Dr. M. “Pete” Martinelli 撮影）

ジェットルーフはどんな長さでも構わないが、その幅は通常 1.5～4m である。また、最も効果を発揮するためには板と斜面の傾斜を同じとし、低い方の柵の端部（風下側）では、地面との間隙を 1～1.5m にするのが良い。

日本では、吹き払い柵の一例あるいは“誘導柵”として、道路切土での吹きだまりを緩和するためにとりわけ大きなジェットルーフが用いられている。道路の切土での積雪を少なくするために設計された吹き払い柵は、吹きだまりを緩和する効果もある。吹きだめ柵の方が防雪機能としては効果的だが、日本特有の農用地など土地利用事情から、道路近くでの吹き払い柵の設置が優先的に進められている。

一般的に吹き払い柵は、フロントガラス高さでの道路雪堤からの飛雪量を少なくすることで、視程障害を緩和させることを目的に用いられる。この目的に使われる柵には数多くの種類があるが、風の流れを下向きにする複数の防雪板を持つ点が共通して

いる。図 6.65 は、発炎筒によって吹き払い柵の風下側の風の流れを可視化したものである。また、柵から強く吹き出す風の流れは柵高の 1～1.5 倍の範囲で柵風下側の吹きだまりを防ぐ。そのため、吹き払い柵は道路端に設置する必要がある、幅の狭い道路に限定される。米国の道路での適用は制限されるが、私道では許容範囲内かもしれない。



図 6.63. 吹き払い柵による切土の積雪減少効果（北海道開発局、打矢徹也氏 撮影）

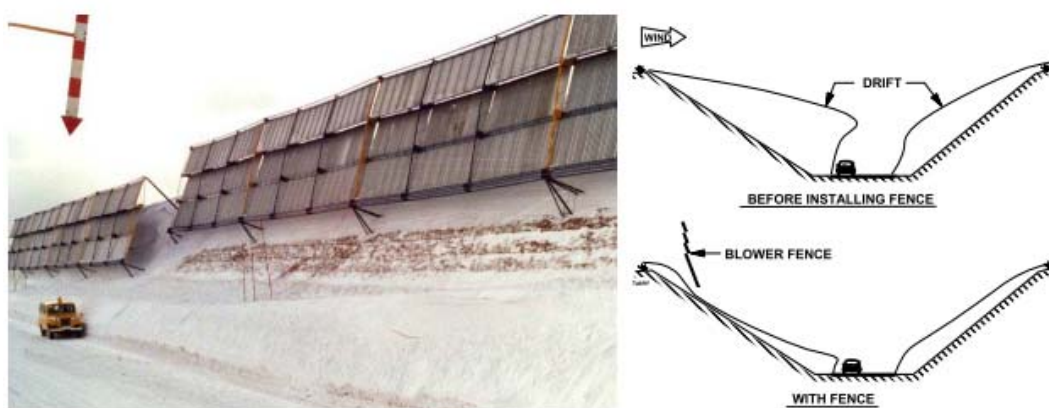


図 6.64. 大きな吹き払い型防雪柵の吹きだまり防止効果は、1974 年に北海道開発局によって図化されている（P19、Tabler1994）。なお、写真は北海道開発局の打矢徹也氏撮影。

図 6.65. フロントガラスの高さで道路端（左）からの吹き込む飛雪を防ぐために、日本で用いられている吹き払い柵の風の流れを発炎筒の煙で示している。写真は北海道開発局の打矢徹也氏撮影。



6.4.2 風を通さない構造物による吹雪対策

このような吹雪対策は、雪や盛土による堤体、または吹き止め柵を示す。風を通さない構造物による防雪対策では、雪面に到達する前に、吹雪粒子が乱流に取り込まれ防雪対象エリアの向こう側に運ばれるよう、防雪柵の上を越えて加速する風の流れに吹雪粒子を流し込む（図 3.58）。また、乱流拡散は吹雪粒子が濃縮されることも防ぐ。こうした吹雪対策は有孔板を用いた吹きだめ柵には劣るが、ある程度の防雪容量を見込むことはできる。

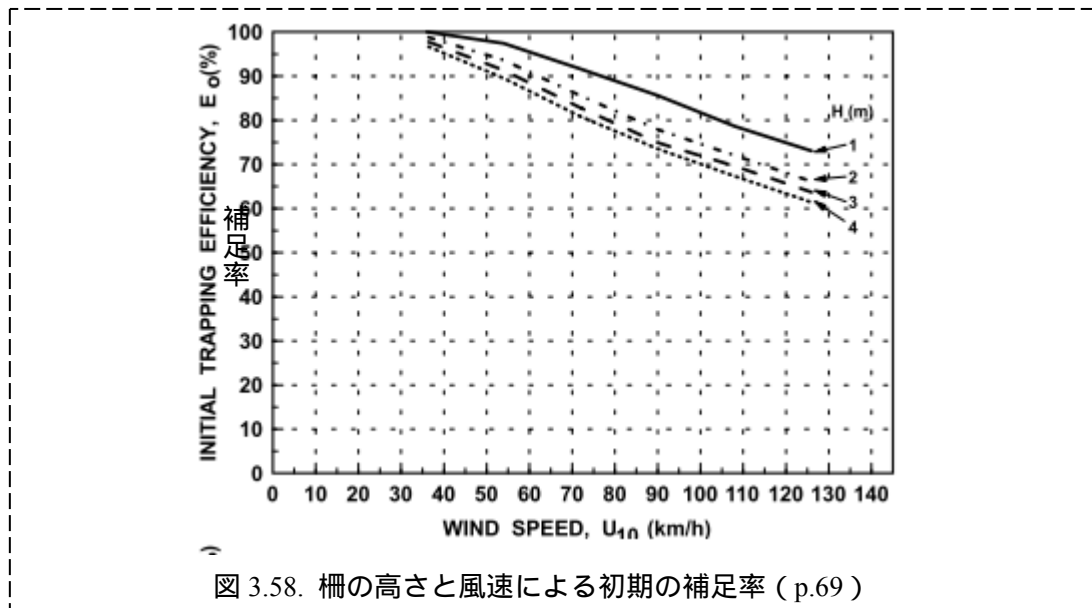


図 3.58. 柵の高さと風速による初期の補足率 (p.69)

6.4.3 側方防雪施設

側方防雪施設によって防雪対象エリアから吹雪粒子を迂回させることができる。図 6.66 に示すように、降雪さえ伴わなければ、構造物の風下側の物陰では吹きだまりが生じにくくなる。施設の物陰への吹雪粒子の侵入を妨げることに加え、外の風の流れとの圧力勾配と側方の渦流の回転によって、吹きだまりの生じない範囲を長くすることができる。家畜避難施設はその好例である（図 6.67）。ただし、道路施設としては、外の風の流れと施設の裏側に形成される吹きだまりの存在が側方防雪施設のやっかいな点である。

図 6.66. 構造物の後方では飛雪がなく、そこを吹雪が避ける様子 (Tabler, 1984) (高さ 2.4m、幅 2.2m、長さ 5m のトレイラーを風下側から撮影)。





図 6.67. 家畜避難施設の周りの吹きだまりの鳥瞰図（左、R. L. Jairell 氏撮影）。この家畜避難施設の 1/30 模型では、風下側の積雪状態、側方防雪施設の有効性や翼状に広がる吹きだまりを示している。

側方防雪施設の形状は、流線型のものよりあまり鋭角に尖っていない形の方が多少効果的である。また、家畜避難施設の模型実験では、半円形とするよりは V 型にした方がわずかに背後の積雪は少なかった。施設の端部間での風に対する幅/高さの比は、その性能に最も影響を及ぼす。風上側の吹きだまりが平衡状態となった後に風下側で堆雪することから、幅の広い家畜避難施設は吹き止め柵のように機能するといえる。そのため、風下側での堆雪を最少とするためには、主風向に対する施設の幅（または直径）は柵高の 15 倍以上としない方が良い。

Kolktafeln は、通常は 3m 四方の大きさの正方形の無孔板で、雪庇ができるのを防ぐために使われる（図 6.61）。このパネルによって生じる乱流が、雪庇が形成されるような箇所での堆雪することを防ぐ。このような考え方は、ビル周辺での吹きだまりの形状を変化させることにも応用できる。

【輪読会での注釈】

- ※ 図 6.63、図 6.64 にある吹き払い型防雪柵は、現在の日本で設置されている例はない。当時は、ある程度の効果が見込まれると考えられていたが、実際に効果はあまりなかったものと考えられる。また、シベリア鉄道でもこれに似た吹雪対策が行われていた。
- ※ 図 6.65 の吹き払い柵は、当時「多板式吹き払い柵」と呼ばれていた。現在の吹き払い柵に比較して、防雪板はかなりの角度で下向きに取り付けられ、柵全体が直立し、下部間隙が小さいのが特徴である。
- ※ 家畜避難施設は、放牧している家畜に冬期の安全な場所を確保するために考案されたものであり、本著では道路防雪としてではなく、家畜に対する防雪施設として扱われている。
- ※ Kolktafeln はドイツでの防雪技術（雪崩対策技術）のひとつの名称である。
<http://de.wikipedia.org/wiki/Lawinenverbauung> ドイツ語
- ※ 本文では解説されていないが、Kolktafeln は単一で機能するのではなく、3m 間隔で設置することで、その間を吹き抜ける風を利用して雪庇を防ぐ目的がある。

6.5 柵の配置

最適な防雪柵の配置は、地形、土地利用と所有者、植生、土質、建物やその他の構造物周辺の自然と場所、景観への配慮、特定の位置と同様に重要なその他の多くのより細かい要素に依存する。現地調査は、必要不可欠である。なぜなら、地図と計画から柵の性能及び妥当性に影響する全ての特性を把握することはできない。この節で提案した基準は、柵設置を決定するための基本的な点について定める。

6.5.1 柵の設置方向

柵の設置方向は、吹雪の主方向に注意しそれらの設置ラインに適用される。吹雪の方向と防雪柵の設置ラインとの角度は、吹雪の入射角 α として定める（図6.68）。

6.5.1.1 柵の設置方向の重要性

風が柵に対しより傾斜するに従って、柵の長さ1スパン(最小長さ)毎の防雪容量は減少するが、少なくとも 45° 又は3.8.5.2.6節以上に大きい吹雪の入射角でない場合には、風に直角な柵1スパンの幅毎の防雪容量は評価できる程大きな影響を柵の方向によっては受けない。

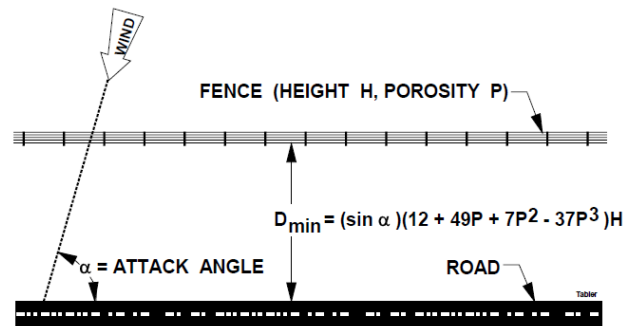
しかしながら、それ以上に風が柵に対して傾斜するに従って、おそらく捕捉率は減少する。もし柵が風に厳密に直角でない場合、柵に平行な風の成分は柵端部の伴流に雪粒子が押し流されるまで、吹きだまりの延長方向に沿ってそれらの粒子を輸送するらせん状の渦を発達させ、スリップ・フェースの後方に渦の循環を引き起こす。

柵が吹雪の主方向に垂直に置かれた場合で風向が道路に垂直でない場合、柵と道路の間の距離が増加するに従って、柵の効果は減少する

6.5.1.2 標準規定

一般的に、もし主風向が道路に対して垂直から 35° 以内（すなわち、 $\alpha \geq 55^\circ$ ）の場合には、柵は道路に対して平行方向に設置されなければならない。より斜方向からの風では、柵は主風向に垂直に整列させるべきである。もし地形的問題の回避又は地形的利点の活用を必要とする場合、吹雪の進入角が 55° より小さい場合も許容できる。柵の設置方向は、防雪範囲の両側での柵の適切な延伸に比べ重要性は非常に低い。

図 6.68 吹雪の進入角が55°又はそれ以上の場合、柵は道路に対し平行に配置すべきである (Tabler1994)



6.5.1.3 平行柵と斜行柵の比較

道路に対し平行な柵は、「平行」(図6.68)が適用され、道路に対し角度を持って配置した柵は「斜行」(図6.69)が適用される。平行柵は柵の総延長がより短く、捕捉率を減じるように空隙率がより小さいため、柵と防雪範囲の間の距離を減らすのにより効果的である。

斜行柵を用いなければならない箇所では、斜行柵と道路の間に平行柵を加えることで、最も完璧な防雪対策となる。平行柵の防雪容量は、斜行柵と平行柵の間の最大距離を超えて移動した全ての雪を堆雪させるのに十分にすべきである。

平均風向が道路にほぼ平行な箇所では、ヘリンボン(杉綾)模様に道路の両側に柵を配置することによって、地吹雪の障害状況障害を改良することができる。柵は、風に垂直に配置するよりも、道路に近接する柵端部より外側の柵端部をより風下側に遠ざかる様に傾けて配置すべきである(図6.70)。この柵方向は道路から地吹雪をそらす助けとなる。

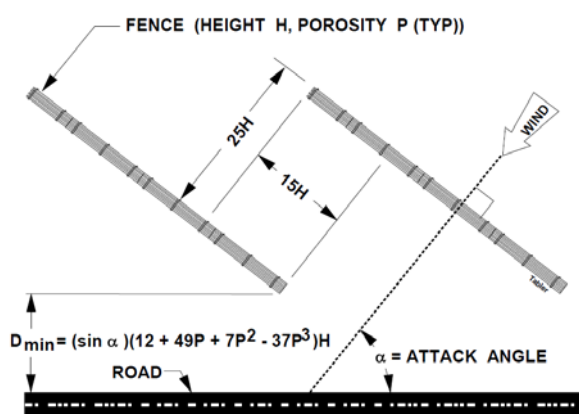


図 6.69 柵は、道路と風向との角度が55°以下の場合には、主風向に対し垂直に配置すべきである。

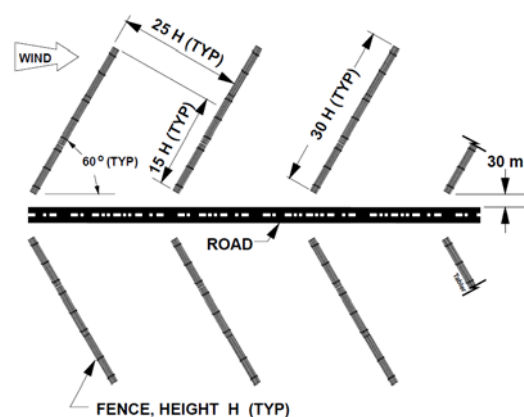


図 6.70 道路中心線に沿った風に使用されたヘリンボン柵のセットバック (Tabler 1994)

6.5.1.4 その他の留意点

おそらく耕地利用と一緒に両立させるためには、妥協案を検討することが望ましく必要かもしれない。例えば、耕作地では、買収すべき必要不可欠な道路用地の幅を減じるか、耕作事業により不都合になる可能性がある千鳥配置された一連の柵よりむしろ一枚の平行柵を用いることがより望ましいかもしれない。この考慮は、用地買収や地役権のため事業計画の立案協議の前に取り組まれるべきである。

6.5.2 道路からのセットバック

セットバックは、道路の路肩又は何かその他の基準箇所から設置した柵までの距離であり、道路対し垂直方向に計測される。必要となるセットバックは、柵の空隙率と吹雪量に対する防雪容量を基に約20～35Hとしているが、必要となる面積は既存の道路用地又は地役権においては確保できないかもしれない。セットバックの条件は、柵高による限定的な制限とすべきでない。現状入手可能な用地より多くの用地が必要な場合、適正な高さの柵利用を可能とするため、地役権や道路用地は取得されるべきである。道路用地の追加購入によるコストを抑える場合には、柵設置のための永続的な地役権を取得することがしばしば可能である。必要な場合には、事故履歴や適切に設計された防雪柵システムの十分な便益の記録によって用地取得の根拠付けが可能である（2章参照）。土地利用計画などが重なってしまい必要となる場合、6.3.9節で記載した仮設柵を秋に整備し、春に撤去することが可能である。

吹きだまり延長は柵高に比例するため、セットバックの基準は柵高の倍数によって与えられる。しかしながら、必要となるセットバックは、従来設計で要求される構造上の柵高 H_s の代わりに有効柵高 H が基にされる。これは、柵が（3.8.5.2.1節で記載されたように、部分的にも埋まっていない）完全に露出している冬期間でも、吹きだまりが道路上に侵入しないであろうことを保証する。

6.5.2.1 平行柵の最小セットバック

風下側吹きだまりが道路上の方へ拡大しないように、柵は道路から十分離すべきである。平地では、風下側吹きだまりの長さ（ L/H ）は柵の空隙率によって式（3.24）のように変化する。

$$L/H = 12 + 49P + 7P^2 - 37P^3 \quad (6.15)$$

P は柵の空隙率を示す。従って、平地における平行柵に必要なセットバックは次の通りである。

$$D = H(\sin \alpha)(12 + 49P + 7P^2 - 37P^3) \quad (6.16)$$

α は吹雪の主風向から決まる吹雪の進入角である。

空隙率0.5の柵は最大の防雪容量を持ち、従ってそれを許容できる距離が適用されるべきである。セットバックの距離が制限される箇所では、空隙率の少ない柵を用いることで、必要な距離を減らすことができる。

例：

設定条件： $H_{\text{req}}=2.4\text{m}(8\text{ft})$
 $\alpha=65^\circ$
 $P=0.5$

問： 最小セットバック, D

正 答： 式(6.16)：
 $D=2.4(0.91)[12+49(0.5)+7(0.5)^2-37(0.5)^3] = 73\text{m}$

セットバック距離の仕様においては、地形もまた考慮されなければならない。3章で記述したように、高い位置に設置した柵は風下側の平衡吹きだまり量は大きくなる。しかしながら、吹雪量を超えるこの地形による効果によって防雪容量がもし増加した場合、吹きだまりの平衡状態に達することがなく平地の場合より風下側雪丘は短いかもしれない。

また、風上側の窪地に柵が設置された箇所では、防雪容量が増加する状況も見られる。これらの両事例では、柵は（式6.16）で示されるより防雪範囲に近接して設置できる。防雪の専門家はこの報告書での知見を基に決断できるが、簡略化されたガイドラインはまだ開発されていない。

さらに、その他の地形による効果は、3.8.5.2.8節の定性的な記述から推察することができる。

6.5.2.2 道路に対して斜めに設置した防雪柵の最小セットバック

吹きだまりの長さは防雪柵の柵高に比例するので、道路に近い防雪柵の高さを段階的に低くすることで、道路に対して斜めに設置した防雪柵を道路の近くに設置できる（図 6.71）。柵高を段階的に低くした部分の防雪容量は、期間を通じた吹雪量を蓄えるには十分ではないかもしれないが、部分的な防雪機能であっても何もないよりは良い。柵高を段階的に低くしないより端部効果を減少させることができるので、柵高を段階的に低くした場合は、防雪柵の主要部分の捕捉率も改善できる。

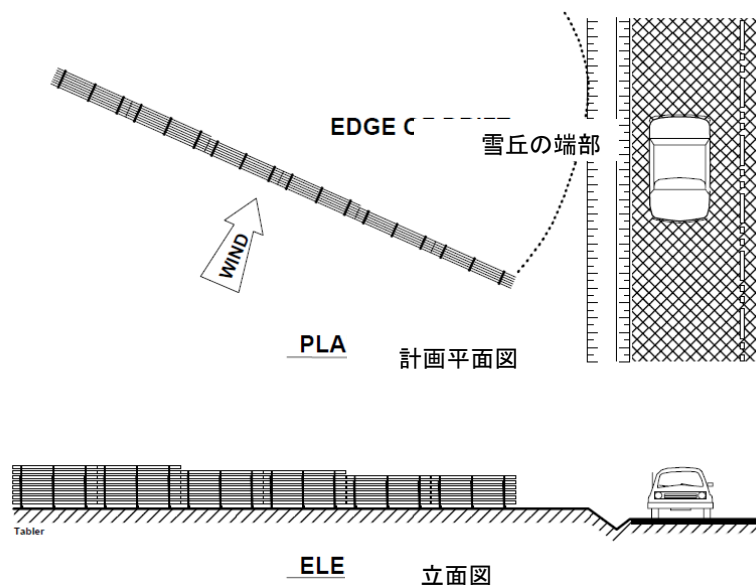
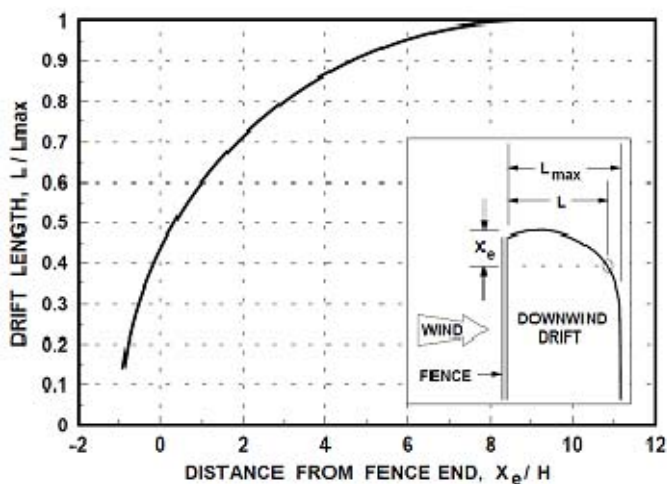


図 6.71 柵高を段階的に低くすることで道路に対して斜めに設置した防雪柵をより道路に近づけて設置できる

もし吹雪の主風向が既知であり、一貫してその風向から吹雪が発生する場合、端部効果（図 3.42、図 3.43、図 3.44）によって、斜めに設置した防雪柵は、式 6.16 によって求められた最小セットバックより道路の近くに設置することができる。配置については、テンプレートを使って、同じ縮尺の地図、写真、図面に吹きだまりの円弧を記入することで最も上手く決めることができる。防雪柵の端部は、吹きだまりの円弧が道路の路肩で接線となるように、計画した防雪柵に沿ってテンプレートを置くことで決めることができる。いくつかの許容誤差が示されているが、風向が変化したり、風向が想定した向きと異なる場合がある。そのため、防雪限界としては、道路の路肩より側溝の中心線が推奨される。端部効果のテンプレートとの調整については、図 3.44 か式 3.21 を参照できる。

【参考資料】 図 3.44



6.5.2.3 柵高を大きく設計した防雪柵によるセットバックの減少

どのように雪丘が成長するかを考慮すると、確率年の最大吹きだまり時のスリップ・フェースが、図 6.72 のように防雪エリアに到達するように設計することで、必要とされる防雪容量から得られる柵高よりも柵高の大きい防雪柵を用いることができる。3.8.3 で示したように、雪丘の長さは堆雪量とともに式 6.17 のように変化する。

$$L/H = 10.5 + 6.6 (A/A_e) + 17.2 (A/A_e)^2 \quad (6.17)$$

ここで A は冬期間のある時点の雪丘の断面積を、 A_e は防雪柵の平衡雪丘の断面積を示す。

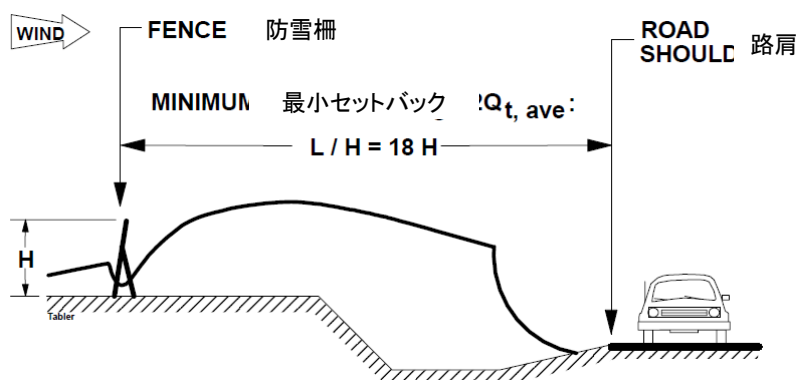


図 6.72 防雪容量から得られる柵高より柵高の大きい防雪柵を使用することでセットバック距離を減らすことができる

例として柵高 2.4m で空隙率 50%の防雪柵の防雪容量が必要となる場所を考える。水平な領域の場合、この防雪柵は少なくとも 84m ($10.5 + 6.6 + 17.2 = 34.4$ 、 $34.4H = 82.3$ m) 風上側に設置しなければならない。柵高 4.3m の防雪柵を代用した場合は最大容量の 30%に相当し、 A/A_e は 0.3 となる。式 6.17 より、雪丘の長さは $14H$ 、60m ($10.5 + 1.98 + 1.548 \div 14$ 、 $14H = 60.2$ m) となる。このように、もし、大きな吹きだまりが発生した場合に道路への侵入が起こるリスクを受け入れられるなら、背の高い防雪柵を 24m 道路に近づけて設置することが可能になる。この技術を用いるのなら、吹きだまり量の確率年 (4.8.1 参照) を大きくとることが賢明である。デフォルトのように、計画防雪容量を平均吹雪量の 2 倍とした場合、確率年の最大吹きだまり量を超過する確率は 1%以下となる。式 6.17 で A/A_e を 0.5 とすると、雪丘の長さは $18H$ となる。図 6.73 のように切土部によってすでに増加している防雪容量は、このような計算の中で考慮しなければならない。

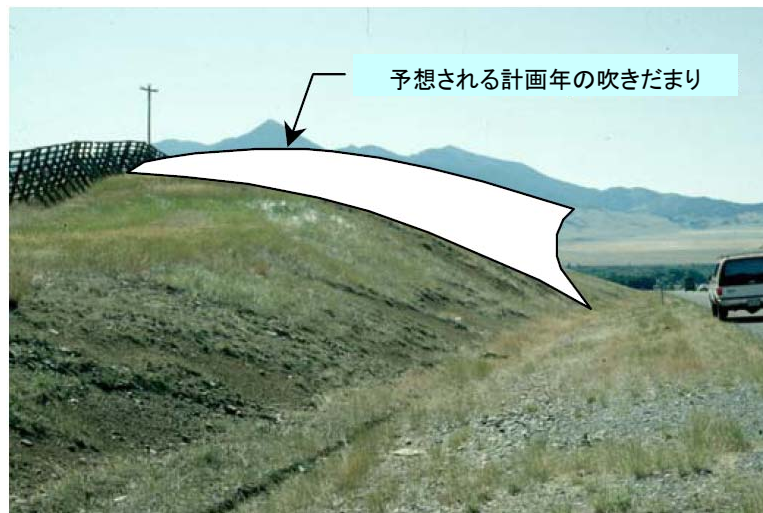


図 6.73 すでに増加した防雪容量として切土部を合計することで、必要なセットバックは 18H に減少する

6.5.2.4 地形上の考慮

道路までの最小距離の指針は、道路への雪丘の侵入を防ぐために重要であるが、防雪柵の位置を決める上で他にも同様に重要な考慮すべき点がある。時には、より好ましい場所を得たり、好ましくない場所を避けるために、防雪柵を道路までの最小距離より離して設置することが望ましい場合もある（図 6.74）。

防雪柵の埋没を防ぐため、自然に吹きだまりができるくぼ地や丘陵の風下側に防雪柵を設置すべきではない。風上側に面した険しい斜面も、捕捉率と防雪容量が減少することから避けるべきである。好ましい地形条件は、尾根や丘陵の頂上で、風上側の流れが一定方向で、他のくぼ地が防雪容量を増加させるような場所である。

法面の長い盛土区間の防雪対策では、遠方からの雪を集めるために法尻の風上側に防雪柵を整備すべきで、もし、すでに低木や狭い範囲の柵などがある場合は、法面上に雪を蓄えるためにそれらを活用すべきである（図 6.75）。防雪柵と法肩が近すぎる場合には、防雪柵が道路上に大きな吹きだまりを発生させる。防雪柵と法面の距離は、 $H/\tan a$ （ H ：柵高、 a ：水平面からの盛土の角度）とすべきである。

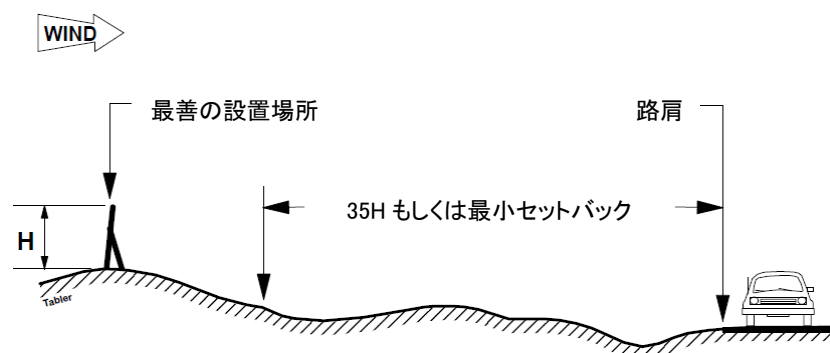


図 6.74 防雪柵にとって最善の場所は、最小のセットバック距離より、防雪エリアから離れている場所かもしれない。地形もセットバックを決める上で、考慮すべき点である。

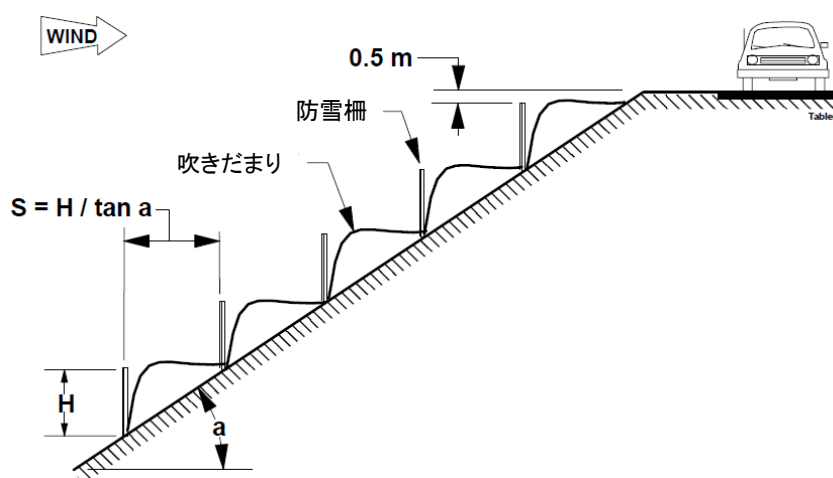


図 6.75 法面上の柵はこの図（タブラー、1994 年）のように設置すべきである

6.5.2.5 最大セットバック

道路から防雪領域までの距離（セットバック）の最大は、主に自然条件下で発生する吹きだまり障害によって決まる。浅い切土路面のような影響を受けやすい場所では、少量の吹雪によって道路上へ吹きだまりが発生するため、防雪柵を防雪機能が必要な領域に近づけて設置しなければならない。吹きだまりが道路上に侵入するまでに、多くの吹雪を蓄えられる深い切土のような場合には、柵を防雪領域から遠ざけることができる。防雪柵は守るべき領域からかなり離して設置することができる。実際の吹雪の減少は、セットバックと吹走距離によって決まる（図 6.76）。とても吹走距離が長い場合（6km 以上）に、道路から防雪柵のセットバックを 300m とすると、吹雪量の 82%が減少する。

最大の防雪効果をあげるには 2 列の防雪柵を用い、1 列目には設計吹雪量より大きい防雪容量を持たせ、2 列目を道路の路肩から 20H 離して整備する。設置場所の根本原理は、式 6.17 によって与えられる平衡雪丘直前の雪丘の長さである。当然、この設計を用いる際には、吹雪量を正確に評価しなければならない。

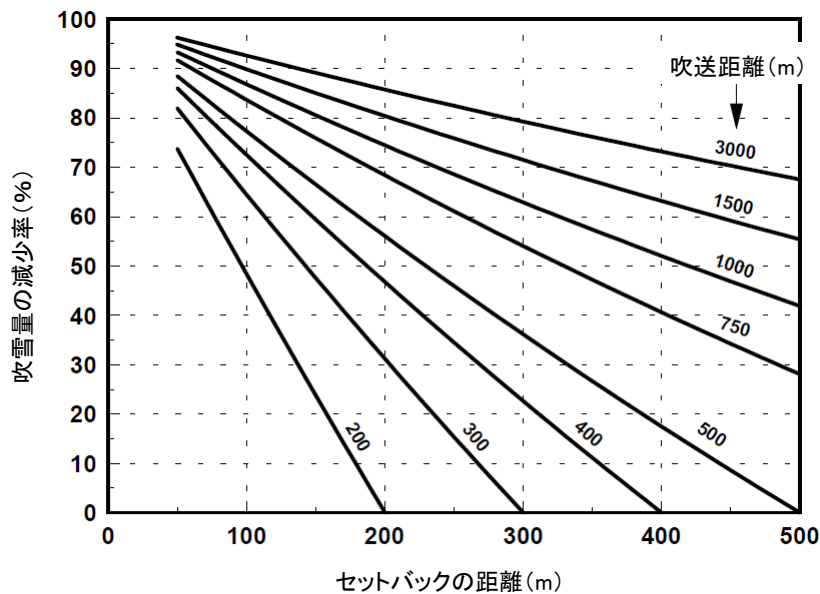


図 6.76 吹雪量の減少は防雪柵と道路の距離と吹送距離によって決められる。このモデルは防雪柵の捕捉率を 100%と仮定しているが、実際には防雪柵と道路の間の雪はさらに移動する（タブラー、1994 年）

6.5.3 2 列の防雪柵の柵間について

1 列の背の高い防雪柵は、背の低い複数列の防雪柵より多くの飛雪を捕捉でき、費用対効果も優れる。しかしながら、防雪柵が季節的に整備されるような条件では、複数列の防雪柵が必要となる。複数列の防雪柵では、風下側の列の防雪柵が埋まらないように柵間をあけなければならない。これは、それぞれの防雪柵の防雪容量と捕捉率を最大にし、構造的な損害を防ぐために重要である。

柵間の指針は主風向に沿って計測された距離によって与えられる。地面が平らな場所では、30H が十分な柵間である。風下側に向かって地面が下がっているような場所では、防雪柵の風上側がほぼいっぱいになった場合を考慮して、より大きな柵間があることが望まれる。吹雪量が多く、防雪柵が尾根や丘の頂上にある場合、防雪柵は確実に長く、深い雪丘を形成し、風下側の柵を容易に破壊する。図 6.77 は、丘の上の 1.8m 防雪柵が、3.8.5.2.8 で述べた風上側の傾斜の影響によって、風下側に地形が平らだった場合に予想される雪丘の 2 倍の長さ（130m、70H）の雪丘を作ったことを示している。結果として、吹きだまりは風下側の高さ 3m の防雪柵を埋没させ、図 6.78 のような被害を発生させた。このような場合の望ましい設置場所は、非常に多くの条件によって左右されるため、単純な指針を作成することはできない。最善のアドバイスは、このような状況では 2 列以上の防雪柵を整備しないことである。

図 6.79 のような中央分離帯柵（道路に沿った吹雪を中央分離帯の凹地に溜める柵）の柵間は、最大の柵高（柵の最も低いところからの高さ）の 10 倍とすべきである。

図 6.77 丘の上から 1.8m の防雪柵へ向けた吹雪が、巨大な吹きだまりを発生させ、55m 風下側に位置する 2 番目の 3m 防雪柵を埋没させた。吹きだまりは平坦な場所にある 1.8m 防雪柵の 4 倍となった(タブラー、1986b)



図 6.78 図 6.77 で埋没した防雪柵の損傷(タブラー、1986b)

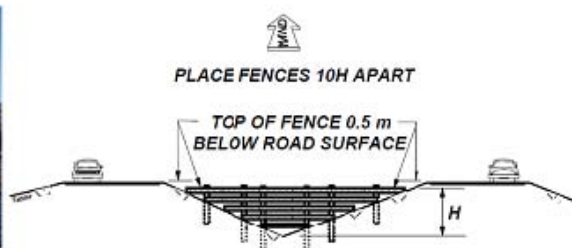


図 6.79 中間分離帯柵の柵間は最大柵高の 10 倍とすべきである(右：タブラー、1994)

6.5.4 柵の延長と端部処理の基準

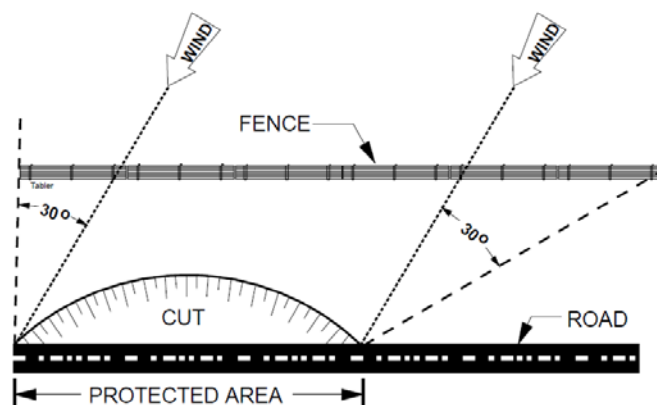
6.5.4.1 柵端部の余裕延長

柵の設置における最も一般的な誤りの一つは、防雪対象領域を超えて十分な長さまで柵を延ばさないことである。柵は、想定される風向範囲の吹雪量を捕捉できるほど十分に長く延ばさなければならない。柵端部に余裕延長を加えることは、端部効果の影響を補うために必要である。

安定した平均的な風向の吹雪イベントでさえ、風向は変動する。風速の変動と同じように、大気の流れが風向の変動を引き起こすからである。これらの変動がどの程度

大きいかは、気象条件や現地の地形にもよるが、特定のデータがない場合は、主風向の両側に25°の変動を考慮して柵を設計するとよい。柵は、風向の変動及び端部効果の影響を考慮して、主風向の両側30°からの風を捉えられるよう、防雪対象領域の両側に十分に延ばす必要がある（図 6.80）。従って、柵端部の余裕延長の最小値は、柵から路肩までの（風向方向の）距離の0.6倍に等しくなる。

図6.80. 平行柵の両端部は、主風向の両側30°からの風を捉えられるよう、防雪対象領域を超えて十分な余裕延長をとる必要がある(Tabler 1994)。



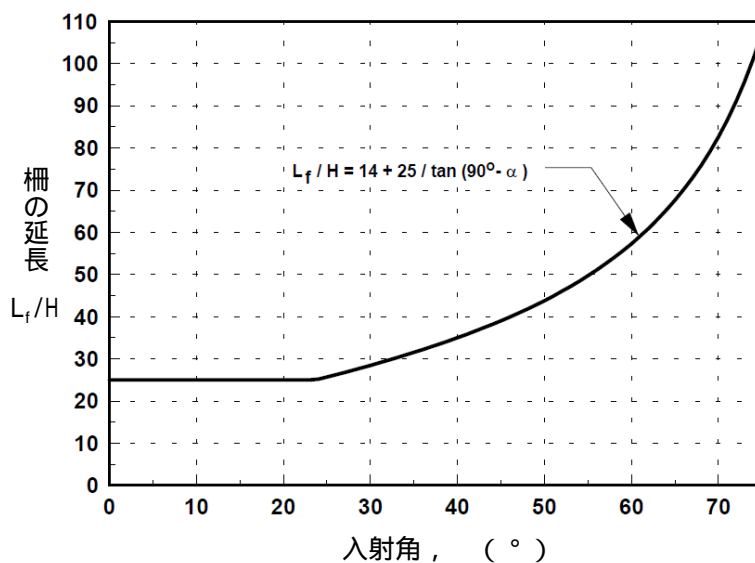
6.5.4.2 斜行柵の余裕延長と列間隔

風向によって、道路に対して斜めに柵を配置することが必要な場合、望ましい防雪効果を得るためには、斜行柵を防雪対象領域の十分近くに配列することがしばしば必要になる。これらの配列に必要な延長は、道路と柵との角度、列間隔、および端部効果と風向変動の影響を補うための柵端部の余裕延長によって決まる。後者の要件（斜行柵端部の余裕延長）は、単列柵の端部の余裕延長でも規定した30°の角度によって決まる。この余裕延長は、平衡状態に達した吹きだまりによって柵の風下側の一部がすぐに埋まったことから、十分に現実的なものと言える。斜行柵の列間隔は、平衡状態の吹きだまり雪丘の長さや深さを考慮し、最小で $25H_s$ とする必要がある。この列間隔のときに必要な柵端部の余裕延長は、 $25H (\tan 30^\circ) = 14H$ となる。道路の直線区間において必要となる斜行柵の最小延長 L_f は、図6.81.に示すように、次式から求められる（但し、 $L_f < 25H$ のときは $L_f = 25H$ とする）。

$$L_f = 14H + 25H/\tan(90^\circ - \alpha); \quad \text{if } L_f < 25H; \text{ set } L_f = 25H \quad (6.18)$$

この柵延長の下限值 $25H$ は、列間隔の基準とは関係ないが、その代わりに、短延長の柵における性能低下の影響を考慮して、柵の最小延長の設定のために独自に設けたガイドラインである（3.8.5.2.2参照）。

図6.81. 斜行柵の最小延長 (L_f)と吹雪の入射角()との関係(柵端部からの入射角が30°の場合)(Tabler 1994)。



6.5.4.3 柵の開口部

柵は、穴や開口部を無くし、できるだけ長くすべきである。

開口部を通して風が加速し、開口部そのものより遙かに広い範囲に雪が堆積するなどの悪影響がある。空隙のある柵は穴から構成されているので、多少の開口部を設けても大して違いは生じないだろうと推測する者は驚くかもしれない。ワイオミング柵のパネルの間隔を15cm開けるだけで、防雪容量は大きく失われ、吹きだまりの前端部はかなり侵食されて、ホタテの貝殻のように波打った状態になる(図6.82)。その結果として、パネルの間隔は2.5cm (1 in.) を超えて開けるべきではない。起伏のある場所に設置する場合に、この要件を満たすには、パネルを部分的に重ね合わせなければならない(図6.18)。

図6.82. ワイオミング柵の模型。柵高1.8m、パネルの間隔15cm、板の間隔(板の芯々間で)30cm(風上に向かって撮影)。パネルの間隔を15cm開けることで、柵の効果がいかに低減するかに注目。

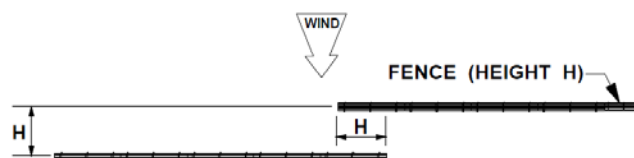


防雪柵の設計者は、開口部によって防雪効果が低下することを理解したうえで、家畜や野生動物のために開口部を設けて欲しいと要望する地権者や野生動物保護団体職員その他の者に屈することなく抵抗すべきである。動物達は、防雪柵よりも遙かに長い距離を歩き回ることができる。また、いずれにせよ他にさほどこすることもない。

取付道路との接続箇所において、夏期のみ開けておく開口部では、柵の配列をずら

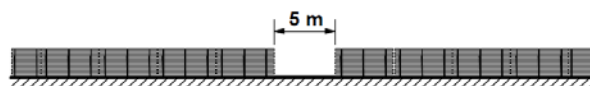
して余裕延長を設けること（図6.83のType A）が、推奨される方法である。図6.84に例示されるように、このタイプの開口部は端部効果の影響を最小限に抑えられる。冬期も使用するために、取付道路上に雪がたまらないようにしなければならない箇所では、最善の解決策は、道路の計画上許されるのであれば、風上側のより遠くに部分的な柵を設けて開口部を防護することである。もしそれができない場合、次善の策は、開口部の幅を最小にすることだが、そのためには、主風向に関する信頼性の高い情報が必要となる。他の道路との交差箇所において分断される柵の端部は、風向が一様な場所では、路肩から少なくとも $5H$ とる必要がある（図6.83, Type C）。この間隔は、道路の更なる拡幅の可能性があるかもしれないので、計画の第一歩と考えるべきである。

十分な接続のある箇所では、開口部の最小幅は5 m程度がよい。開口部を通して風が加速し、吹きだまりを吹き流すことによって、道路に雪がたまらなくなるからである（図6.83, Type B）。

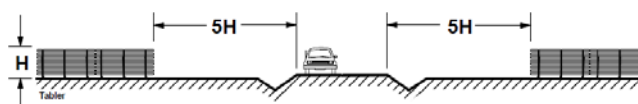


TYPE A : 夏期だけの接続箇所(平面図)

図 6.83. 道路との接続に応じた開口部の柵の配列



TYPE B : 通年での接続箇所



TYPE C : 通年での道路との交差箇所



図 6.84. 図6.83.のType Aのような開口部。柵高は3.8 m。

図 6.85. 通年での取付道路との接続に適した開口部(Type B, 図6.83)。柵高は4.3m。



6.5.4.4 危険な変化の防止

第2章で実例を示したように、柵は、視程の改善や雪氷路面の抑制に極めて効果的である（図2.11、2.12、2.16）。それ故に、防雪柵の設計者は、防雪区間内から区間外へのコンディションの急激な変化による重大な危険箇所をうっかりと作ってしまうことがある。このことは、防雪柵の端部における視程の変化に例示される（図6.86）。同じ箇所で別の日に撮影された図6.87は、道路の雪氷環境の変化を示している。この変化は、高さ3.8mの防雪柵と水路沿の中低木との隙間から流れ込む吹雪によって引き起こされた。そのような隙間を無くすために、柵を延ばしておくべきであった。この危険な変化は、ワイオミングI-80道路において、他のどの箇所よりも多くの冬期の事故を引き起こす要因となった（図6.88）。

以下に、柵の端部において、防雪区間内から区間外へのコンディションの危険な変化を避けるために採用可能な緩和策を示す。

- ☐ 柵と自然地物（例えば、高木や中低木などの吹雪を弱めるもの）との接続。
- ☐ 柵間の隙間を埋めること。
- ☐ 柵の端部付近における段階的な柵高の低下または空隙率の増加。



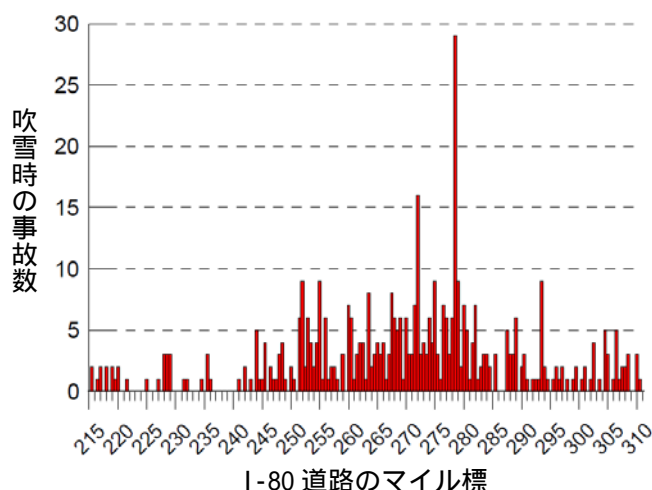
図6.86. 防雪柵の端部における視程の変化（柵高3.8m、ワイオミングI-80道路）。左の写真は、作業機械用アンダーパスの向こう側にある、柵の端部の急激な変化を示している。

かすかに見えるオレンジ色のライトは、作業中の事故を注意喚起するものである。右の写真は、逆方向の防雪領域内における状況を同時に示したものである。



図 6.87. 道路を横切る吹雪の帯（写真の中央すぐ上）。その後方にある防雪柵と、水路沿の中低木との間の、柵の無い所が走路となっている。図6.86と同じ箇所にて (Tabler 1994)。

図 6.88. ワイオミングI-80道路における吹雪時の事故数と発生箇所の関係（1991年1月1日～2001年12月31日）。図6.86と6.87の箇所で事故数が最大となっていることに注目。



6.5.5 デジタル地形図を利用した防雪柵の配置計画

デジタル地形図や地図ソフトウェアは、防雪柵設計の配置計画を大変容易にするものである。DeLorme（www.delorme.com）から入手できるソフトウェア「3-D TopoQuads®」と「XMap®」では、利用者がデジタル地形図上で正確な長さと方位の線を描くこと、希望の倍率にズームすることができる。ほぼ南北に延びる直線道路を仮定したときの作業手順は以下の通りである。

1. 地図上で防雪対象地域を指定する。
2. 指定地点から、主風向に余裕を持たせた角度を差し引きした線を引く。たとえば、主風向 270°に対しては、6.5.4.1 に示す 30°の余裕を持たせるとして、北側からは 300°、南側からは 240°の線を引く。これらの線で、防雪対象地域を指定できる。
3. 舗装端部から両方の指定した点において、主風向に沿った、予想した最大の吹きだまりの長さ（例：必要柵高×35）と等しい距離を計測する。この線の終わりで舗

装端部からの距離を決定する。また、この点の間に描かれた線は防雪柵の位置を示している。

4. 道路の特徴や制約の要因で、必要に応じて防雪柵の線を区切る。その時、できれば風上に追加防雪柵を設置し、開口部の保護を行う。

図 6.89 では、道路との角度を持った並列の防雪柵を例にとり、防雪柵設計準備のための地形図の有効性を検証する。また、地図ソフトウェア「Xmap®3.5」は、特定の座標を希望の座標系に決定することができる（図 6.90 参照）。

予備配置計画完了後の次のステップは、地図上だけではわからない理由で配置計画の調節を行う必要がある場合、設計した防雪柵の位置を実際に現地で見直すことである。DeLorme のソフトウェアを実行しているラップトップコンピュータに任意の GPS 受信機を接続することにより、設計している防雪柵の位置を現地で確認できる。

また、DeLorme にも「XMap®」と「3-D TopoQuads®」に関連して使用できる「*Sat 10 Satellite Imagery*」（衛星画像）というソフトウェアがある。このソフトウェアの分解能 10m の衛星画像は、以前の地形図上では表示しきれなかった特徴を随時更新して、吹走距離の決定を助け、植生や地形の特徴を視覚化するために役に立つものである。図 6.91 に、このアプリケーションでの図 6.89 の例と同じ位置の「XMap®3.5」の表示例を示す。また、この分割画面表示は、地図か衛星画像のどちらかをフルスクリーンに切り替えることもできる。

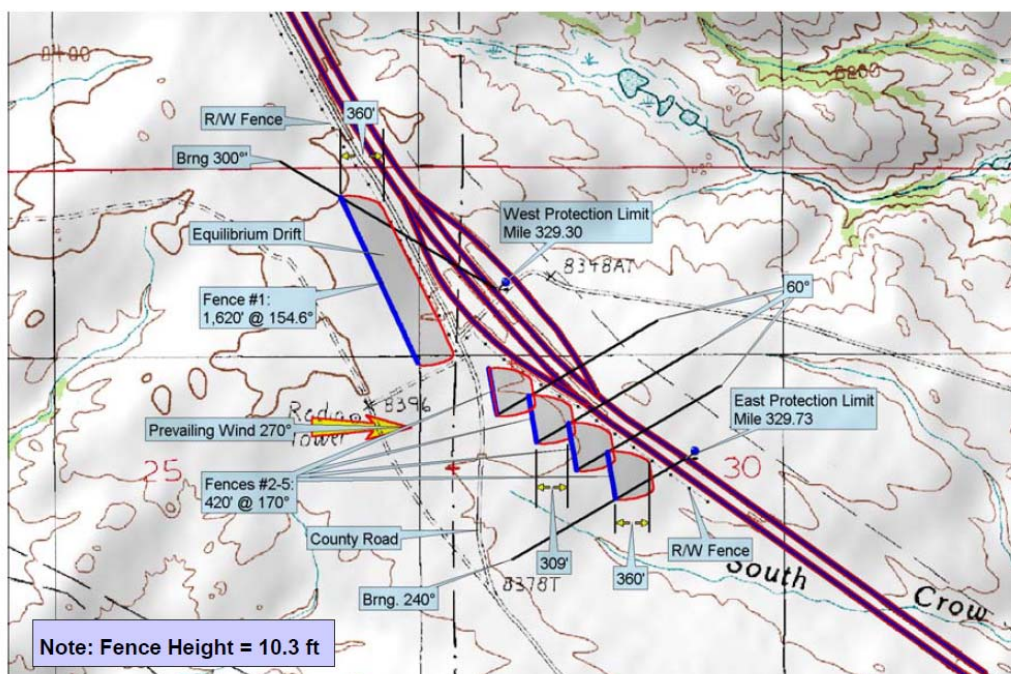


図 6.89. 予備配置計画の例：DeLorme のソフトウェアを使用している防雪柵システム
2002DeLorme(www.delorme.com) XMap®3.5 と 3D TopoQuads®1.0 (1m = 3.28ft)

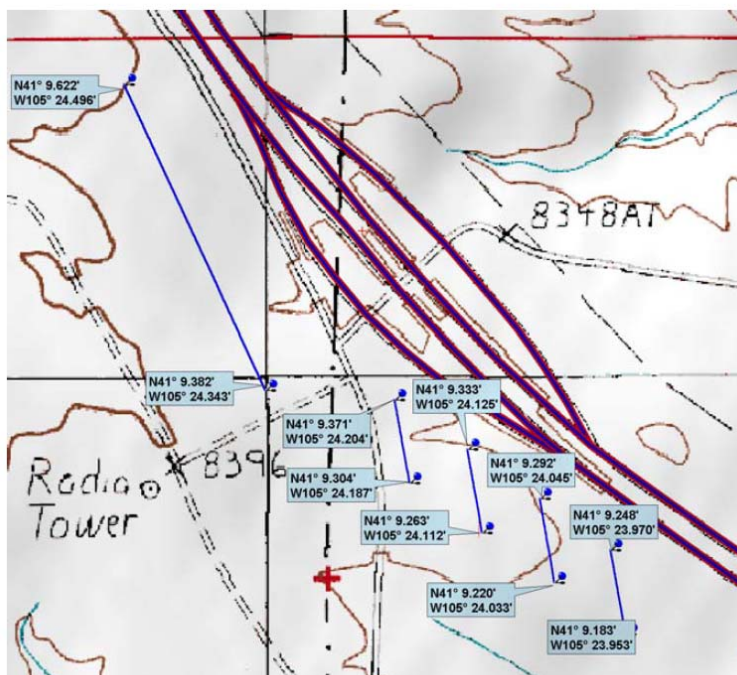


図 6.90. ポイントをクリックすることにより、防雪柵の座標を注釈として表示できる。
2002DeLorme(www.delorme.com) XMap®3.5 と 3D TopoQuads®1.0

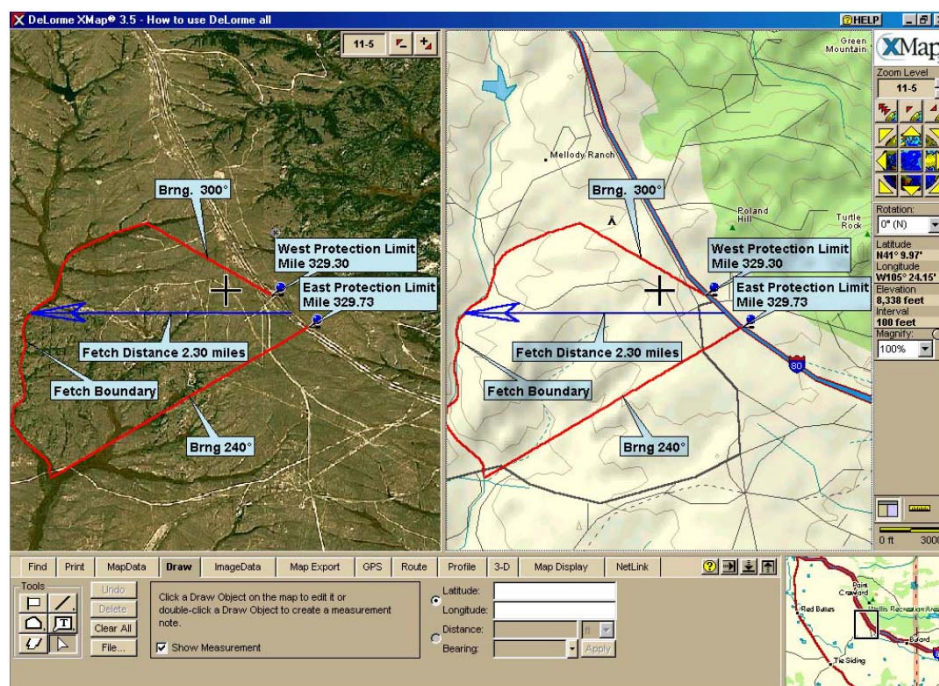


図 6.91. 図 6.89 の例で、吹走距離の測定のために分解能 10m の衛星画像がどのように XMap®とともに使われることができるかについて示している。

右：コンピュータ画面 「印刷スクリーン」イメージ 左：決定する 3-D TopoQuads®
2002DeLorme(www.delorme.com) XMap®3.5, 3D TopoQuads®1.0 と Sat 10 Satellite Imagery.

6.5.6 コンピュータを利用した防雪柵設計(SNOWMAN)

ニューヨーク州運輸省 (NYSDOT) は、このレポートに示される考え方や数式・手順に従って、道路設計と防雪柵設計の両方を含む防雪対策を自動的に設計するために、コンピュータシステムの開発をサポートしてきた。SNOW MANagement から SNOWMAN という名がつけられたこのシステムは、コーネル大学がプロジェクト管理を提供して、ブルックヘブン国立研究所とニューヨーク州立大学バッファロ校との共同で開発された。このスノーマンは 1997 年から開発に着手され、その一部がまもなく利用可能になると思われる。このシステムは、MicroStation®をデジタル地形モデル・ファイルから通常の吹雪量の卓越方向に平行な断面図を作成できる。利用者は希望の対策工(土木工事か防雪柵)に特定の制約を課すこともできる。さらに、このシステムには、第 4 章に記述したように、指定された位置の吹雪量を定量化するために、州全体の気候データベースも組み込まれている。

このシステムの特徴的な点は、繰り返しにより横断面修正または防雪柵の配置計画を可変して、吹きだまり断面形状を推定できることである。たとえば防雪柵の場合には、利用者が柵高や路肩までの距離を指定しなければ、吹きだまりが道路に影響を及ぼさないための柵高や、最も近接する箇所での距離を出力する。また、利用者が指定した柵の列数と柵高や、指定した制約条件で必要な柵の空隙率を出力することもできる。

図 6.92 のテストケースでは、不規則な地形での高さが違う 3 列の柵で推定・実測した吹きだまり断面の比較と、横断方向の吹きだまり断面を推定し、検討した例である。

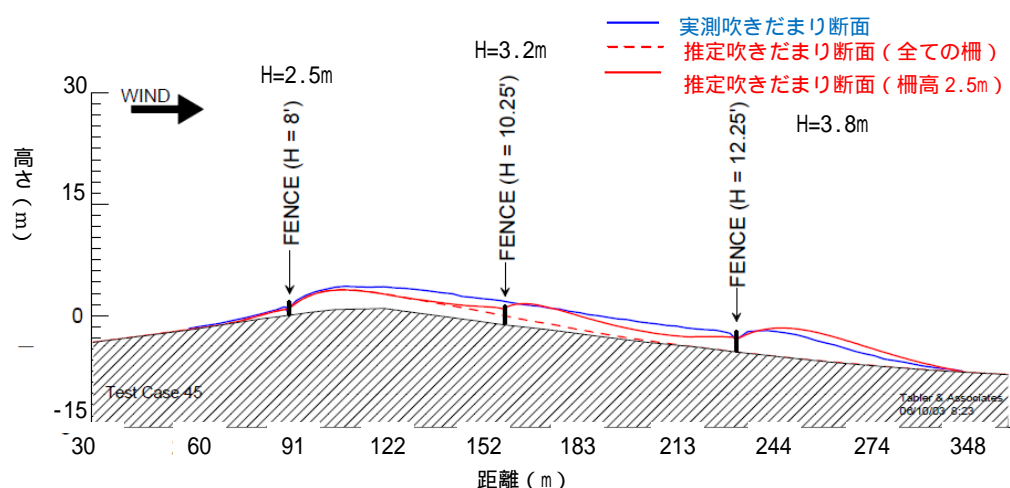


図 6.92. 「ワイオミング I-80」のサイト上で実測した吹きだまり断面と、SNOWMAN システムで推定した吹きだまり断面との比較。

防雪柵のない土地での吹きだまり形状の推定は、第 8 章に詳述している。防雪柵による吹きだまり形状を推定する方法は複雑すぎるので、ここでは記述しないが、必要

があれば著者から提供が可能である。なお、このプログラムの有効性は、NYSDOT ウェブサイト (www.dot.state.ny.us/) 上で発表される予定である。

6.5.7 防雪柵設計のためのミネソタ・ウェブサイト

第 5 章で詳細に記述したミネソタ大学インターネット・サイト (http://climate.umn.edu/snow_components/design/introduction.htm) では、利用者はミネソタ州の任意の場所の防雪柵設計において、高さ・道路からの距離・および防雪柵システムの重要度合いを決定できる。ミネソタ州内と同程度の降雪量や吹雪発生条件であれば、このウェブサイトを国内外の防雪柵の設計にも適用できる。いずれにしても、ミネソタ・ウェブサイトはこのレポートに示されるガイドラインのための、優れた教科書的作用を果たすものである。

6.6 参考文献

- American Institute of Timber Construction. 1974. Timber construction manual. John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Baker, H.A. and C.J. Williams. 1990. Guidelines for controlling snowdrifting on Canadian highways. Transportation Development Centre, Policy Coordination Group, Transport Canada Pub. No. TP 9937. Montreal, Quebec.
- 1990. Research study of highway snowdrifting. Transportation Development Centre, Policy Coordination Group, Transport Canada Publication No. TP 10129E. Montreal, Quebec.
- Coker, W. 1986. The growth of plastics in the fence industry. Fence Industry/Access Control, Vol. 29, No. 1: 14-20.
- Finney, E.A. 1934. Snow control on the highways. Michigan Engineering Experiment Station Bulletin 57.
- Gaylord, E.H. Jr. and C.N. Gaylord. 1979. Structural engineering handbook. McGraw-Hill Book Company, New York.
- Geisler, D.C. 1969. Comparative strengths of lodgepole pine and metal fence posts. M.S. thesis, Colorado State University, Fort Collins.
- Guyot, G. 1978. Determination des efforts exercés par le vent sur un brisevent. Boundary Layer Meteorology 15: 57-67 (in French, with English abstract) .
- Hagen, L.J. and E.L. Skidmore. 1971. Windbreak drag as influenced by porosity. Transactions ASAE 14: 464-465.
- Hoerner, S.F. 1965. Fluid dynamic drag. Hoerner Fluid Dynamics, Bricktown, N.J.
- Hokkaido Development Bureau. 1974. Snow disaster prevention techniques using snow fences. Part I. Snow fence research report No. 3, Hokkaido Development Bureau, Construction Machinery Plant, Engineering Development Section (Sapporo) . (In Japanese) .
- International Conference of Building Officials. 1982. Uniform Building Code. International Conference of Building Officials, 5360 South Workman Road, Whittier, Calif. 90601.
- Jairell, R. L. and R. D. Tabler. 1985. Model studies of snowdrifts formed by livestock shelters and pond embankments. In: Western Snow Conference (April 16-18, 1985; Boulder CO) Proceedings 53: 167-170.
- Japan Construction Machinery Society. 1988. New snow protection engineering handbook.

- Morikita Shuppan Co., Tokyo. (in Japanese)
- Kaminski, D.F. and S. Mohan. 1991. PASCON: An expert system for passive snow control on highways. *Transportation Research Record* 1304: 193-201.
- List, R.J. 1968. Smithsonian meteorological tables. Smithsonian Publication 4014, Rev. ed. 6 (4th repr.) . Washington, D.C.
- Martinelli, M. 1964. Influence of gap width below vertical-slat snow fence on size and location of lee drift. *Bulletin of the International Association of Scientific Hydrology, International Union of Geodesy and Geophysics, IX Anne'e, No. 4*: 48-57.
- Mellor, M. 1965. Blowing snow. CRREL monograph, Part III, Section A3c, U.S. Army Corps of Engineers, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, New Hampshire.
- Meroney, B. and R. Meroney. 1989. Snow control with vortex and blower fences. In: *Proceedings, 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*: 297-306.
- Minsk, L.D. 1975. Control of snow and ice on missile fields. U.S. Army Corps of Engineers, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Special Report SR 240.
- Norem, H. 1985. Design criteria and location of snow fences. *Annals of Glaciology* 6: 68-70.
- Peterka, J. A. and S. Shahid. 1998. Design gust wind speeds in the United States. *Journal of Structural Engineering* 124 (2) : 207-214.
- Pugh, H.L.D. 1950. Snow fences. Great Britain Road Research Laboratory. *Road Research Technical Paper No. 19*.
- Rowley, R.K. and G.H. Watson. 1973. Vertical and lateral pile load tests in permafrost. In: *North Amer. Contrib. Permafrost, 2nd Int. Conf. Proceedings (Yakutsk, USSR) : 712-721*.
- Schneider, T.R. 1959. Schneeverwehungen und Winterglatte. *Interner Bericht des Eidg. Institutes fur Schnee- und Lawinenforschung, Nr. 302*. English translation: *Technical Translation 1038, 1962, National Research Council of Canada, Ottawa, Ontario, Canada*.
- Sutton, O.G. 1953. *Micrometeorology*. McGraw-Hill Book Co., New York.
- Tabler, R. D. 1974. 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.

- 1978. Measured wind loads on 50% porous snow fences. Third U.S. National Conference on Wind Engineering Research (Feb. 26-March 1, 1978; Gainesville, FL) , Preprint Volume: III-27-1.
- 1983. Snow control research and engineering in Japan. Hokkaido Development Bureau, Civil Engineering Research Institute Report No. 81.
- 1984. Using visual range data for highway operations in blowing snow. Optical Engineering 23(1) : 055-061.
- 1985. Ablation rates of snow fence drifts at 2300-meters elevation in Wyoming. In: Western Snow Conference (Boulder, Colo.; April 16-18, 1985) Proceedings 53: 1-12.
- 1986a. Wind loads and fence design. Technical Report, Signode Corporation, Glenview, Illinois.
- 1986b. 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.
- 1989. Snow fence technology: State of the art. In: First International Conference on Snow Engineering (Santa Barbara, California; July 10-15, 1988) , U. S. Army Corps of Engineers, Cold Regions Research Laboratory, Special Report 89-6: 297-306.
- 1991. Snow fence guide. Strategic Highway Research Program, Report No. 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, Sapporo, Japan) . Road Division, Civil Engineering Research Institute, Hokkaido Development Bureau, Sapporo: 69-81
- 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.
- Tabler, R. D. and T. Day. 1992. Innovations in wind protection. Proceedings, Fifth Symposium of the International Organization for Transportation by Rope -- North American Continental Section (Steamboat Springs, Colorado; 30 August - 3 Sept. 1992) : 67-73.
- Tabler, R. D. and R. L. Jairell. 1980. Studying snowdrifting problems with small-scale models outdoors. In: Western Snow Conference (April 15-17, 1980; Laramie, WY) Proceedings

48: 1-13.

- 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: 95-145
- Tabler, R. D. and R. A. Schmidt. 1986. Snow erosion, transport, and deposition in relation to agriculture. In: Proceedings, Symposium on Snow in Agriculture (Swift Current, Sask.; July 9-11, 1985) , H. Steppuhn and W. Nicholaichuk, ed. Great Plains Agricultural Council Publication No. 120. pp. 11-58.
- Tabler, R. D. and D. L. Sturges. 1986. Watershed test of a snow fence to increase streamflow: preliminary results. In: American Water Resources Association, Cold Regions Hydrology Symposium (Fairbanks, Alaska; July 22-25, 1986) Proceedings: 53-61.
- Tani, N. 1958. On the windtunnel test of model shelter hedge. Bulletin of the National Institute of Agricultural Science, Tokyo, No. A6: 1-81.
- Thom, H.C.S. 1968. New distributions of extreme winds in the United States. Journal of the Structural Division, ASCE. V.94, ST7 (Paper No. 6038) : 1787-1801.
- Western Wood Products Association (WWPA) . 1988. Western Lumber Grading Rules 88. 522 S.W. 5th, Portland, OR.
- Wrigley, N. E. 1987. Durability and long-term performance of TensarR polymer grids for soil reinforcement. Materials Science and Technology v. 3: 161-170.

7 防雪植栽

7.1 目的 範囲

防雪植栽とは、吹雪をコントロールする植栽である。植物の素材としては、木、灌木、草や、冬期も生えたままにされたトウモロコシやヒマワリのような農作物などを含む。本章では、防雪柵に用いられる原則や定量的な関係に基づいた防雪植栽の技術的ガイドラインを提供する。本章は3、4、そして6章を熟知した読者を想定している。

7.2 要約

- 木や灌木の列は道路用地外に起因する飛雪を集めるための防雪柵の代わりとしてよく使うことができる。灌木の群植（雪を保持する植栽）は、道路用地内に雪を固定させる。
- 防雪柵と同じ原則や定量的な関係が、防雪植栽にも適用できる。同様に防雪柵のガイドラインも防雪植栽に適用できるが、植物の成長に伴う高さや空隙率の変化を考慮した調節が必要となる。
- 吹雪のコントロールに適した木や灌木は、地上まで枝葉が比較的密なものである。下枝が枯れ上がるような種は避けるべきである。空気中の塩の飛沫や、土壌の塩分への耐性が求められることもある。
- the Minnesota Department of Transportation(1999)が作成した CD-ROM“ミネソタの風景や道路脇における草木”という、米国中西部や米国北東部に適した植物についての資料がある。この情報はインターネットの www.plantselector.dot.state.mn でも利用できる。
- 適切に設計すれば、防雪植栽は防雪柵のように効果的である。重要な要件として、十分な防雪容量、隙間が無いこと、どの発達段階においても道路まで吹きだまりが達しないような十分なセットバックが含まれる。
- 植物の成長に伴う空隙率の変化や高さの変化によって、風下側の吹きだまりの長さが変わる。防雪植栽の空隙率が低下すれば、より多くの雪が風上側に吹きだめられ、風下側の吹きだまりが短くなる。2列かそれ以上の列の成熟した針葉樹は、無空隙の防雪施設として機能する。
- 防雪柵で得られた高さや空隙率と捕捉率や吹きだまりの長さの関係によって、特定の種や植物の配置に関するガイドラインに応用できる。本章のガイドラインのいくつかは、トウヒ属を用いた計算機シミュレーションで裏付けされている。
- 木は、平均的な雪の捕捉率（防雪柵で最初の吹雪から防雪容量が満たされるまでの平均的な捕捉率に相当）が75%に達した場合に効果が十分になると考えられている。

る。このような状態の木の高さを”防雪効果のある高さ”と言う。

- 防雪効果のある高さは吹雪量によって変化し、必要最低限の防雪植栽の高さとなる。トウヒ属を用いたシミュレーションで与える値の例では、とても少ない吹雪量 (<10t/m) なら 1.2m、並みの状態 (80t/m) なら 2.8m である。平均的な成長率では、植えてからそれぞれ 5、10 年でそれらの高さまで成長する。
- 必要なセットバックは、風の入射角と総吹雪量によって決まる。並み程度の吹雪量までのセットバック距離は、その場所で要求される柵高を H_{req} として、 $(\sin\alpha)$ ($35H_{req}$) となる。
- 吹雪量が並みより大きい場所の防雪植栽のセットバックは、舗装道の端から最低でも 60m 必要である。
- 防雪植栽の切れ目や隙間は、風下側に深い吹きだまりを生じさせるので、避けるべきである。木の大量枯死による隙間は、代わりの植物を設置するまで防雪柵で塞ぐべきである。
- 道路の南側に植えられた防雪植栽の最小セットバックは、冬至の日中でも路面に日が射すよう見込んでおくべきである。例えばメイン州において、太陽高度は最も小さい場所で 22° であり、セットバックは最低でも成熟した木の高さの 2.5 倍が必要である。
- 木の高さが防雪効果のある高さに達するまで、臨時的な防雪柵を設置してセットバックを短くできる。そのような防雪柵は、設計吹雪量を十分に捕えられる防雪容量であり、植栽から風上側に柵高の 20 倍以上離して設置すべきである。
- 木と道路の間に灌木を 2 列設置すれば、木が防雪効果のある高さに達するまで、臨時的に吹雪をコントロールできる。
- 幅が広く、木が密に植えられるものは、雪をすべて風上側に溜めるため”防雪林”と呼ばれ、必要なセットバックは 30m である。
- 針葉樹の列内の最適な間隔は約 3m で、列間は 3m 離す。樹木列は、木が枯れた場合に隙間ができる可能性を減じることが求められる。
- 灌木は成長が早く、枝分かれが多い習性があり、木より初期コストが低い点が利点である。列間、列内の樹木の間隔がともに 1.2m で、2 列の樹木列を千鳥状に配置すれば、効果的な防雪柵になる。
- 急傾斜の盛土斜面に雪をためるには、灌木を 1.2m の列間で千鳥状に配置すべきである。
- 大量に植える場合、灌木間の距離は灌木が成熟した時の大きさによるが、一般的には 2~3m である。
- 樹木の下枝を剪定すると、風上側の吹きだまりが小さくなり、風下側の吹きだまりが長くなる。従って枝打ちは必要ないが、道路脇の木の枝打ちで吹きだまりの問題が軽減する事もある。

- 生育環境が良好であれば、防雪植栽は防雪柵より低コストである。生育環境がそれほど良くない場所では、防雪植栽と防雪柵の直接経費と間接経費を合わせたものは、比較に値する。
- 農場に立ったままのトウモロコシの列は、効果的・経済的に吹雪をコントロールする。最良の方法は、それぞれ8列のトウモロコシからなる条を、50m 離して2条残しておくことである。道路に近い方の条は、路肩からのセットバックを65m とすべきである。

7.3 防雪柵ガイドラインとの比較

防雪柵に属する全ての原則が防雪植栽に応用できるが、防雪植栽のガイドラインでは高さや密度の多様性、不規則性や、それらの要因の時間変化について考慮しなければならない。加えて、生存や成長に影響する経済的な要因のように、防雪植栽の植え付け、維持管理には生物学的な要件も考慮しなければならない。このような理由で、防雪植栽の設計には、農学者、林務官、造園者そして技術者の知識が要求される。

過去の防雪植栽のガイドラインは、吹雪量や種類による雪の捕捉率、関係した物理過程に注目せずに発展した。この手落ちの結果、道路まで吹きだまりが達してしまい結局木を撤去しなければならなかったことが、しばしばあった。加えてそのガイドラインは、地域特異性の強い検証がなされたので、他の地域には上手く適用できなかった。現在では、本書の3、4章に概要を示したように、定量的な吹雪量や防雪柵の効果についての理解が進んだので、防雪植栽のガイドラインを発展できるようになった。本書の内容をたくさん組み込んだ防雪植栽に関する素晴らしいガイドラインが、“防雪植栽による雪の捕捉”として University of Minnesota Extension Service(1999)から発行されている。設計のガイドラインに加えて、その資料には、樹種の選定、植え付けの実践、病虫害の予防、除草剤の考慮について有用な情報が書かれている。その資料に記載された基本的な設計計算は、6章で紹介したウェブサイトに含まれている。

http://climate.umn.edu/snow_fence/Components/Design/introduction.htm

7.4 基本的な方法

植物を吹雪のコントロールに使うには、次の二つの手法がある。

雪の捕捉—木や灌木によって”遠くの”雪を捕える。

雪の保持—草や灌木、木によって雪を保持する。このようなコントロール手段は、*保持植物*と称されるだろう。

後者の方法は、雪の供給源が盛土斜面や中央分離帯、インターチェンジの分岐点内側の用地など道路のごく近接した限られた場所の場合に適用できる。

7.5 樹種

吹雪のコントロールに適した木や灌木は、地表まで比較的枝葉が密であるべきである。下枝が枯れ上がる種類は避けるべきである。樹種は、生長が早く、干ばつ・霜・病気に耐性があり、家畜や野生動物に食害されず、様々な土壌に適し、下枝が落ちることなく密生でき、長生きで、そして最も重要なこととして空気中の塩の飛沫に耐性があるものを用いるべきである。その次に考慮すべきこととして、観賞用としての価値や、野生動物の隠れ場所や餌のための価値がある。針葉樹は、年中葉が密であり、野生動物の食害に比較的あいきい点で利点があるが、落葉樹や灌木も枝が密であれば良く使われる。しかしながら、シカやその他のドライバーの危険を増長するような動物を引き寄せる樹種は、特に道路用地内では避けるべきである。

針葉樹の中でも、トウヒ、ヒマラヤスギ、ジャクシンはマツよりも葉が密で、密に植えても成長とともに下枝が失われないので好ましい樹種である。落葉樹のヤナギバグミ(*Elaeagnus angustifolia*)、アメリカンプラム(*Prunus americana*)もまた防雪植栽によく使われるが、望ましい密度とするためには列数を増やす必要がある。枝が密になる習性があり、密生や枝分けに耐える多くの灌木は、吹雪のコントロールにとって理想的である。

樹種は局所的な気候や土壌に適したものを選ぶべきである。州の延長事業は一般的な状態に関する情報を提供してくれるが、特定の地域の勧告のためには林務官や農学者の助言を探し出さなければならない。表 7.1 は、防雪植栽として一般的な樹種をまとめたものである。米国中西部や米国北東部で供される様々な樹種が載ったすばらしい資料が、the Minnesota Department of Transportation(1999)によって整備された CD-ROM”ミネソタの風景や道路脇における草木”である。その CD が提供する樹種の情報には、生育習慣、地域的な要件（塩の粒子や土壌塩分）、虫や病気、除草剤の影響、写真が含まれている。CD-ROM には、”防雪植栽による雪の捕捉”(University of Minnesota Extension Service 1999)が入っている。この情報も、www.plantselector.dot.state.mn で利用できる。

塩の飛沫や土壌塩分の関係がない場所ではあるが、ハナミズキ(*Cornus spp.*)は成長も早く、株立ちの特徴があるので、すぐれた防雪植栽となる。

表 7.1 防雪植栽によく使われる木や灌木. 成熟時の高さx幅 (*は、塩の飛沫およびまたは土壌塩分に影響されやすいことを示す).

木	高さ x 幅 (m)	高さ x 幅(ft)
<i>Abies concolor</i> (コロラドモミ)	(9-15) x (5-9)	(30-50) x (15-30)
<i>Elaeagnus angustifolia</i> (ヤナギバグミ) ¹	(6-8) x 6	(20-25) x 20
<i>Juniperus scopulorum</i> (コロラドビャクシン)*	(1.5-6) x (2-3)	(5-20) x (6-9)
<i>Juniperus virginiana</i> (エンピツビャクシン)	(12-15) x (2.5-6)	(40-50) x (8-20)
<i>Picea pungens</i> (コロラドトウヒ)	(20-30) x (6-11)	(70-100) x (20-35)
<i>Pinus edulis</i> (小型のマツ)	(9-15) x (6-8)	(30-50) x (20-25)
<i>Pinus nigra</i> (ヨーロッパクロマツ)	(15-18) x (6-12)	(50-60) x (20-40)
灌木		
<i>Caragana arborescens</i> (オオムレスズメ)	(3-4.5) x (2-3)	(10-15) x (6-10)
<i>Cornus racemosa</i> (ラセモサミズキ)*	(2-3.5) x (2-3.6)	(6-12) x (6-12)
<i>Cornus sericea</i> (ミズキ)*	(2-3.5) x (2-3.6)	(6-12) x (6-12)
<i>Cotoneaster acutifolia</i> (Cotoneaster)	(2-2.4) x (1.2-1.5)	(6-8) x (4-5)
<i>Juniperus chinensis</i> Maneyi (Maney juniper)	(1.2-1.5) x (1.5-2)	(4-5) x (5-6)
<i>Lonicera tartarica</i> (Zabelii) アカバナヒヨウタンボク	(3-4) x 3	(10 12) x 10
<i>Potentilla fruticosa</i> 'Jackmannii' (Jackmann potentilla)	(1-1.2) x (1-1.2)	(3-4) x (3-4)
<i>Prunus Americana</i> (アメリカンプラム)*	(3-9) x (2.5-7.5)	(10-30) x (8-25)
<i>Prunus virginiana</i> (バージニアザクラ)	(3-6) x (3-6)	(10-20) x (10-20)
<i>Rhus aromatica</i> (Fragrant sumac)	(1-2.4) x (2-3)	(3-8) x (6-10)
<i>Rhus glabra</i> (Smooth sumac)	(3-4.5) x (3-4.5)	(10-15) x (10-15)
<i>Rhus trilobata</i> (Skunkbush sumac)	(1-2) x (1.2-1.8)	(3-6) x (4-5)
<i>Rhus typhina</i> (Staghorn sumac)	(3.7-7.6) x (3.7-6)	(12-25) x (12-20)
<i>Ribes alpinum</i> (Alpine currant)	(1-1.8) x (2-3.7)	(3-5) x (6-12)
<i>Rosa rugosa</i> (ハマナス)	(1.2-2.4) x (1.2-2)	(4-8) x (4-6)
<i>Shepherdia argentea</i> (Silver buffaloberry)	(3.7-4.5) x (3.7-4.5)	(12-15) x (12-15)
<i>Symphoricarpos albus</i> (シラタマヒヨウタンボク)	(1-2) x (1-2)	(3-6) x (3-6)
<i>Syringa vulgaris</i> (ライラック)	(3-4.5) x (2-3.7)	(10-15) x (6-12)
<i>Tamarix ramosissima</i> (タマリクス・ラモシッシマ)	(3-7.6) x (2-4.5)	(10-25) x (6-15)

1 ヤナギバグミは、(訳注: 米国にとっての) 外来種だと考えている機関もある。

7.6 効果

適切に設計されるならば、高木と中低木の植栽は防雪柵と同じくらい効果的である。

7.6.1 必要条件

効果的な防雪植栽のための必要条件は、構造防雪柵に対するものと同様である：

- ・ 適切な堆雪容量
- ・ 開きや隙間が無いこと
- ・ 適切なセットバック

7.6.2 防雪植栽の効果に影響を及ぼす要因

防雪林と灌木には、防雪柵とは異なる捕捉特性がある。樹冠が閉じ、林冠がより密になるにつれ、より多くの雪が風上側に堆雪し、風下側の吹きだまりはより短くなる傾向がある（図 3.51）。

同時に、樹高の増大は、風下側のふきだまりをより長くする傾向がある。 お互いに相殺するこれら2つの変化の程度は、図 7.1 に図示されるように、そこでの吹雪量に依存する。

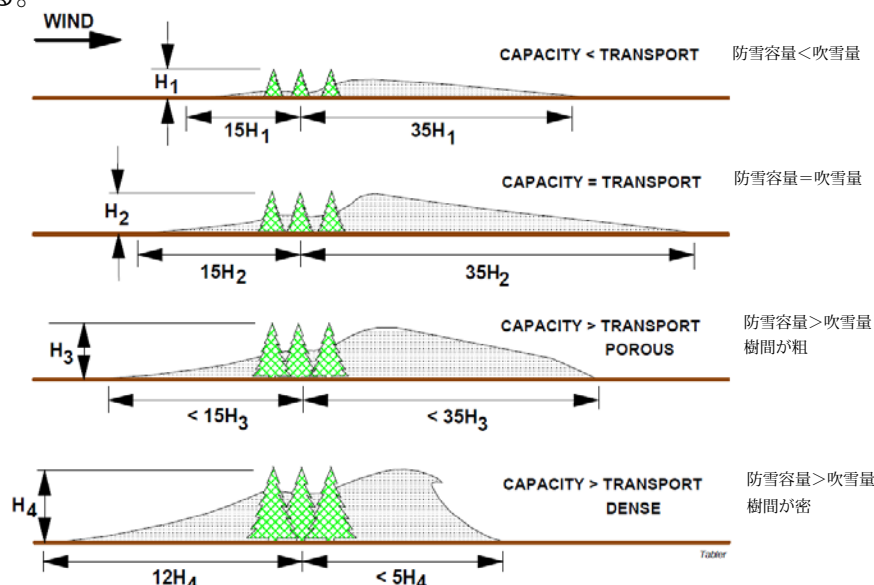
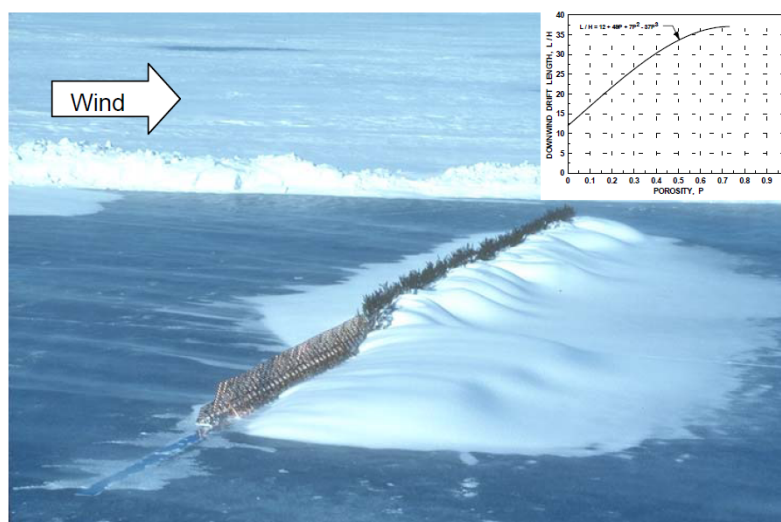


図 7.1 防雪植栽の生長による、吹きだまり形状と堆雪の変化

防雪植栽の物理的な形態において生じる動的な変化と、これらの変化を支配する場所依存要因のため、なぜ一部の防雪植栽が吹きだまり問題を改善するよりもむしろ悪化させるのかを理解できる

図 7.2 は、密な防雪植栽は、隙間のない（無孔の）柵のようにふるまう傾向を示す。より多くの雪が防雪林の風上側に堆雪し、風下側の吹きだまりは植栽に近い。風が平衡状態に達する前に吹き止むことは、図 7.1 に示される最終段階を表す。

図 7.2 3.8m 高の防雪柵と防雪植栽のスケールモデル(1:30)比較
挿入図は図 3.51



防雪植栽が完全な効果になるために要求される期間は、木々の生長速度・間隔・習性と吹雪量に依存する。生長条件が良好で、吹雪量が少ない($< 10\text{t/m}$) 場所では、木列は、苗が植えられてから 5 年後には完全な効果になりえる。他の極端な例では、吹雪量が 100t/m のオーダーであるワイオミングにおいて、植林されてから完全な効果となるまでに 20 年かかった (Powell et al.1992)。

防雪植栽が完全な効果を発揮するために必要な時間を決める関係は複雑である。しかし、第 3 章の防雪柵に示される関係を利用した、雪の捕捉率についてのコンピュータシミュレーションによって有用な予測をすることができる。

7.6.3 コンピュータシミュレーション

防雪柵が雪に埋まる際の捕捉率の変化が与えられ (3.8.3)、防雪容量に影響を及ぼす空隙率を考慮することで (3.8.5.2.4)、防雪植栽の生長により捕捉率がどのように変化するか予測することができる。例として、高さ H 、底面の直径 $0.7H$ の三角形の輪郭を持つ 2 列の密な樹木の典型的な例を考える。それらは間隔 S で千鳥状に植えられ、列間も同じ間隔である (図 7.3)。単純化のために、防雪林の空隙率が、地面と木々の頂点に囲まれた面積に対する個々の樹影間の空間の比率と等しく、樹冠の輪郭に囲まれている部分には空隙が無いと仮定する。さらなる単純化として、平均の空隙率を、最も高い空隙率となる面 (木列に対して垂直から 45°) と最も低い空隙率となる面 (木列に対して垂直) の平均として定義する。

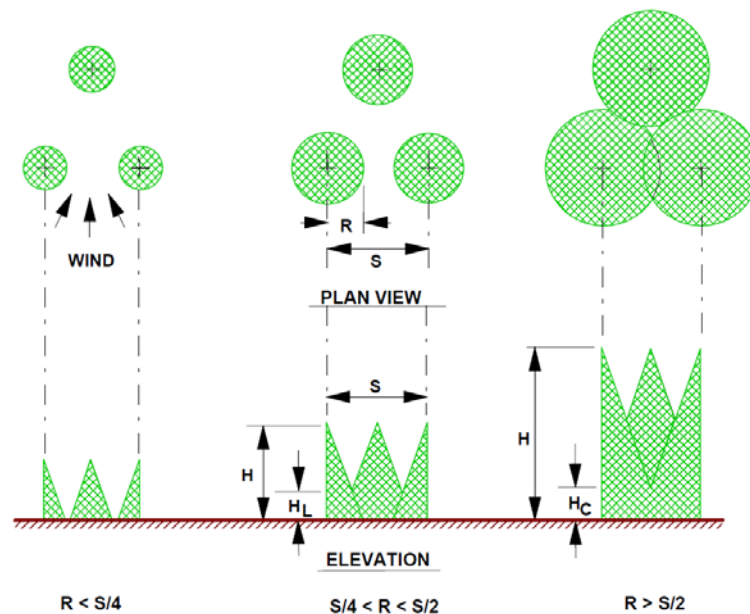
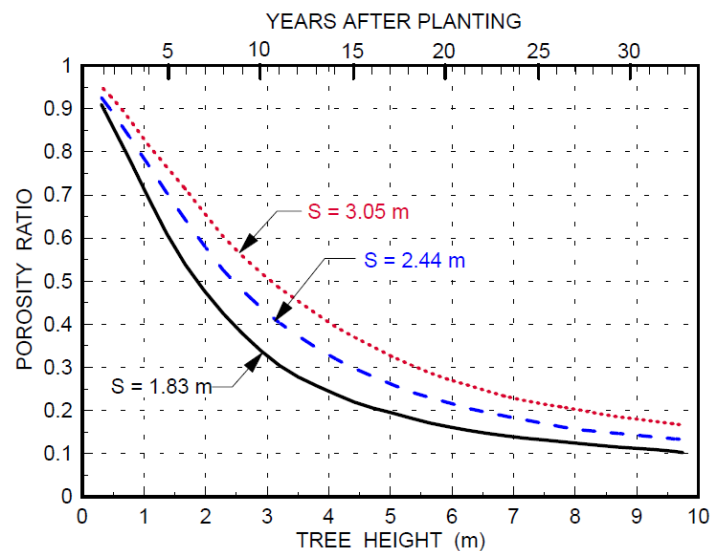


図 7.3 樹高、樹間、吹雪量に関する空隙率、捕捉率、吹きだまり長についてのコンピュータシミュレーションに使用される防雪植栽（トウヒ）のモデル(Tabler 1994)

最後に、植樹後の年数と樹高の関係を説明するため、苗木の植樹時樹高 20cm、最初の 2 年間は年 15cm 生長、その後は年 30cm 生長すると仮定する。これらの仮定により、上記防雪林の平均空隙率は、図 7.4 で示されるように、樹高、樹齢、樹間とともに変化する。

図 7.4 樹間、樹高、樹齢の変化に関する、図 7.3 に示されるモデルの空隙率の変化(Tabler 1994)



樹高、樹間、吹雪量とともに捕捉率がどのように変化するかを決定するため、防雪柵についての以下の関係が防雪植栽にも適用されると仮定し、上記で決定した平均空隙率に置き換える。

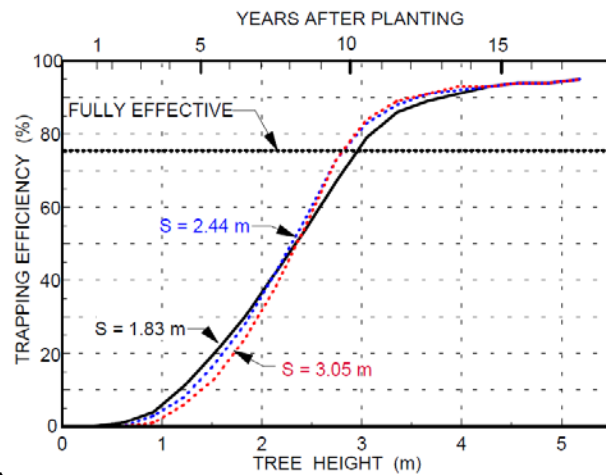
- 式 (3.25): $Q_c = (3 + 4P + 44P^2 - 60P^3)H^{2.2}$, $P < 0.88$ (6.1)

- 式 (3.31): $E_{ave} = [1/A_f/A_e] E_o \{0.5(A_f/A_e)[1 - (A_f/A_e)^2]^{0.5} + 0.5 \sin^{-1}(A_f/A_e)\}$, $Q_t \leq Q_c$ (6.2)

- 式 (3.32): $E_{ave} = E_o(0.79)(Q_c/Q_t)$, $Q_t > Q_c$ (6.3)

中程度の吹雪量(80t/m) では、図 7.5 で示されるように、捕捉率は、樹間、樹高、樹齢によって変化する。 捕捉率 75%に描かれる線は、防雪柵を埋めるための十分な吹雪量のある冬期間における防雪柵(P=0.5)の平均捕捉率に一致する(3.8.6.4)。この同基準を防雪林に適用し、捕捉率 75%を「完全な効果」となる樹高(樹齢)とする。

図 7.5 図 7.3 に示されるモデルにおける、樹間、樹高、樹齢にともなう捕捉率の変化(Tablre 1994)



7.6.4 シミュレーションからの結論

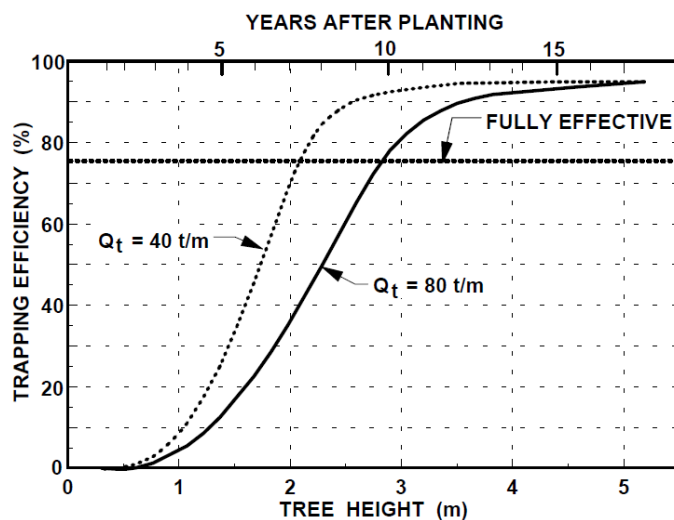
三角形の樹形と形状因子(直径=0.7H)に仮定したモデルについて：

- 捕捉率における樹間(1.83~3.05m)の影響は、樹間 1.83~3.05mの範囲を通して 10%未満である。
- より密な樹間は最初のうちは捕捉率を増加させるが、空隙率が 0.5 以下に落ちた後は捕捉率を減少させる。最も密な樹間(1.83m)は、十分な効果となるために要求される年数が、より広い樹間よりも長くなる。この結果は、樹間の減少が捕捉率を増加させるという知識に反する。より広い樹間は成長率を向上させるかもしれません。そしてそれは性能の違いを増す。
- 樹間 2.4mにおける、異なる 2 レベルの吹雪量についての捕捉率の比較に示されるように、捕捉率と完全な効果となる樹齢は吹雪量に強く依存する(図 7.5)。吹雪量 40t/mでは、防雪林は植樹後 7 年で完全な効果に達し、対して 80t/mでは 10 年必要とされる。
- ここでのシミュレーションにより、トウヒの植樹については樹間 2.4mが最適である。

これらの結論が厳密に適用されるのは本モデルで使用した樹木形状や配置についてのみである。しかしながら、基本的な原理は一般的に適用でき、他の形状の木々についての指針の作成に類似のシミュレーションが使用できる。

より空隙のある植栽、特に落葉樹や中低木については、樹間はいっそう重要である。

図 7.6 図 7.3 に示されるモデルにおける、樹間 2.44m での吹雪量、樹高、樹齢に関する捕捉率 (Tabler 1994)



7.6.5 開口部

防雪植栽は、樹木の枯死によって開きが発生し、効果が低減する。そして、その開口部の風下側に形成された吹きだまりは、しばしば道路上まで達する。その長さは防雪植栽の風下側の吹きだまりよりかなり長くなる。図 7.7 に示す密なトウヒ林（マツ科の常緑針葉樹）の開口部は、このことを物語っている。この対策として、3列以上の林帯とする、現地条件に合う植物を植える、枯死したところに再度植栽する、メンテナンスを強化するといった選択肢がある。



図 7.7 密なトウヒ林の開口部に発生する厳しい吹きだまり問題

7.7 防雪植栽の必要高

防雪植栽の必要高は、75%の雪を捕らえられる有効高である。樹高は、防雪柵の柵高の計算方法（6.3.2 節）と同じように算出できる。7.4.1 節で説明したシミュレーションによると、図 7.7 に示しているような吹雪量（少量～中程度）に対して、樹高は、防雪柵の柵高と同じでなければならない。吹雪量が 80 t /m (27tons/ft) 以上の場合は、樹高を多少高くしなければならない。表 7.2 は、吹雪量に対応する防雪植栽と防雪柵の有効高を示す。

図 7.8 吹雪量に対応した樹木、および防雪柵の必要高 (Tabler 1994)

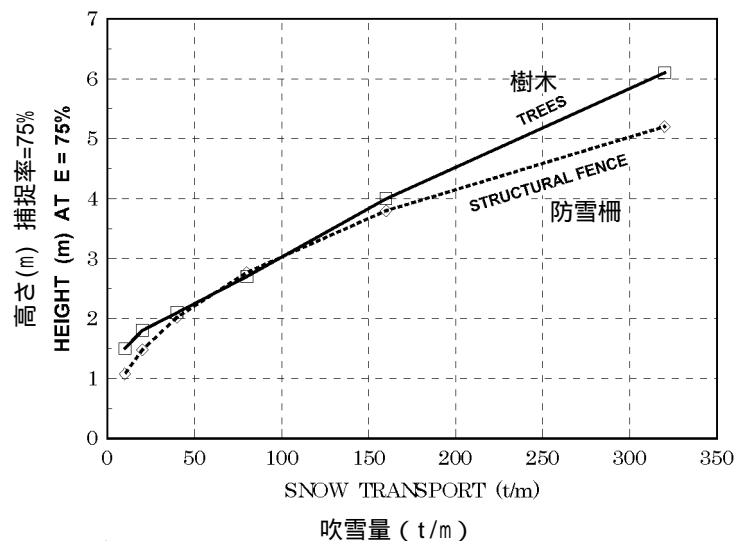


表 7.2 吹雪量に対応した樹高（有効高）と樹齢。(Tabler 1994). (図 6.1 に示したモデル。間隔 2.4m (8ft))

1シーズンの 吹雪量 (t/m)	吹雪の分類	有効高	
		樹高	樹齢
Seasonal Snow transport (t/m)	Blowing snow classification	Fully effective: Height (m)	Age (yr)
<10	Very light	1.2	5
20	Light 軽い	1.5	6
40	Light moderate	2.1	8
80	Moderate	2.7	10
160	Moderately severe	4.0	14
320	Severe 厳しい	6.1	21

1 metric ton = 2,205 lb
1 m = 3.281 ft

樹高を決めるときは、防雪柵と同じように地形を考慮する。例えば、切土法肩付近に植えられた中低木は、十分な防雪容量がある（図 7.9）。吹きだまりが道路に影響をおよぼさない場合を除いて、吹雪量を正確に決めなければならない。

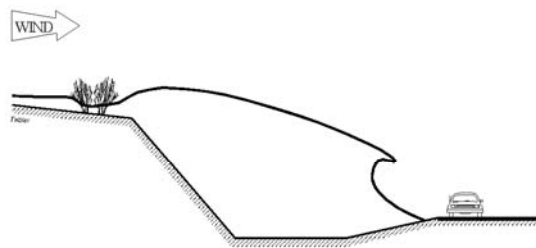


図 7.9 風上側の遠くに設置された高い防雪柵の代わりに、切土法肩に植えられた中低木を用いることができる。吹きだまりが道路に影響をおよぼさない場合を除いて、吹雪量を正確に決めなければならない。(スケッチは、Tabler より。 1994)

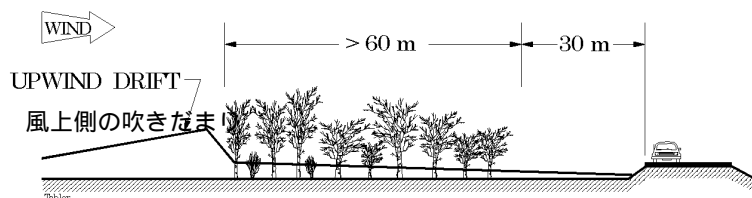
7.8 防雪植栽のセットバック

切土法肩に中低木の植栽として（図 7.9）、路肩から中低木までの防雪容量を設計吹雪量の 2 倍、路肩からのセットバックは、樹高の 18 倍にしなければならない。防雪柵を設置する場合も同じ考え方である。

路肩からのセットバックは、一般的に平衡状態の風下側の吹きだまりの長さによって決められる。ここで、防雪柵と防雪植栽の重要な違いは、高木や中低木を密に植栽することである。これによって、空隙のない防雪柵と同じ働きとなる。3.8.4 節に述べるように、風上側の吹きだまりが平衡状態になるまで、空隙のない防雪柵の風下側には雪がほとんど堆積しない。もし、風上側の防雪容量に、設計吹雪量を十分にためこむことが可能であれば、空隙のない防雪柵の風下側には吹きだまりがほとんど堆積しない。

日本では、この考え方をを用いて、鉄道やハイウェイに沿って広い林帯、“防雪林”を植えている（図 7.10）。同様に、このような防雪植栽が、道路のより近いところに設置することも可能である。ただし、樹林が一定の高さと密度に生長するまでには、道路上に吹きだまりが流れ込むことがある。

図 7.10 日本で植えられる防雪林は、（密な）樹林を空隙のない防雪柵とする原理を利用して、風上側に雪を堆積させている。



樹木のセットバックを決定するには、樹高、密度、および防雪容量が関係する。これらは植物の生長に伴って変化する。したがって、風下側の吹きだまりの長さが時とともに変化する。

モンタナ州の Laursen と Hunter (1986年) は、風上側の最前列が、路肩から最低 61m と推奨し、Shaw (1989年) は、吹雪量の多い草原において最小のセットバックを 91m と推薦している。

7.8.1 風下側の吹きだまり長のシミュレーション

樹木の雪収容能力と吹雪量の比較によるコンピュータシミュレーション (図 7.3 に示すモデルを対象) が、樹木の生長に伴う吹きだまり長の変化を示すことができる。このために、式 7.1 と式 7.3 の他に、仮に下の防雪柵の関係式も樹木モデルに当てはまることとする：

$$\text{式 (3.24): } L/H = 12 + 49P + 7P^2 - 37P^3 \quad (7.4)$$

$$\text{式 (3.14): } L/H = 10.5 + 6.6(A/A_e) + 17.2(A/A_e)^2 \quad (7.5)$$

これらの方程式をあわせると、風下側に平衡状態以前の吹きだまり長は、以下の式で表すことができる：

$$L/H = \{ [10.5 + 6.6(A/A_e) + 17.2(A/A_e)^2] / 343 \} (12 + 49P + 7P^2 - 37P^3) \quad (7.6)$$

仮に吹きだまりの横断面が直角三角形 (底辺 $12H$ 、最大深さ $Y_{\max} = (1-P)H$ であり、雪の平均密度は式 3.13 によって与えられることとすると、防雪植栽の風上側の防雪容量 $Q_{c,up}$ を推定することができる。

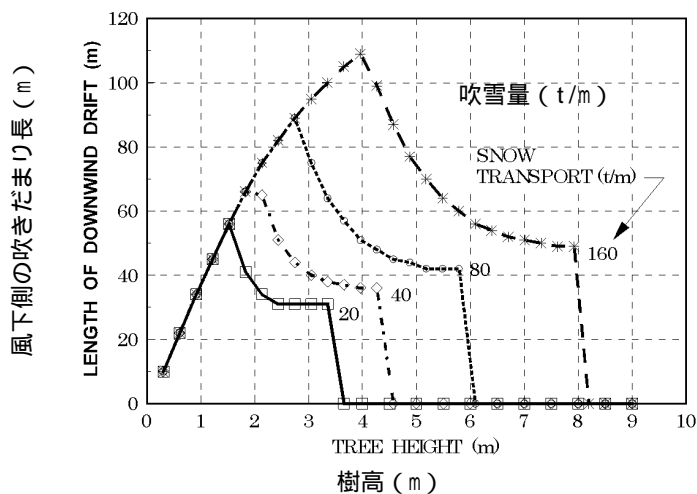
$$\rho_s = 522 - [304 / (1.485Y_{ave})] [1 - e^{-1.485Y_{ave}}] \quad (7.7)$$

ここでは、 $Y_{ave} = Y_{\max} / 2$

これらの仮定に基づいたシミュレーションモデルでは、風下側の吹きだまり長が、樹高と吹雪量によって変化することを示した。図 7.11 は、樹木の間隔が 2.4m のケースを示す。

式 7.1 に示したように、曲線の上向き部分は、風下側の吹きだまりが平衡状態になるまでの期間を表し、下降部分は、風上側に多くの雪が溜まり、風下側の吹きだまりが平衡状態に達することがなくなる期間を表している。この段階において、吹きだまり長は、式 7.6 によって与えられる。ゼロへの急落下は、すべての雪が樹木の風上側に溜まることを意味する。

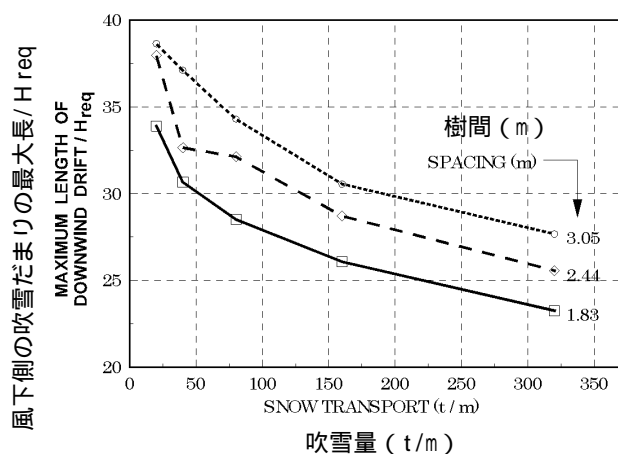
図 7.11 図 7.3 に示す樹木のモデルにおいて、風下側に形成される吹きだまりの長さは、樹高、樹齢、および吹雪量の関数である。樹間は、2.4m である。



風下側の吹きだまりの最大長を（図 7.11 の曲線の頂点）プロットすると、吹きだまり長が防雪柵の場合と基本的に同じであることを示す（図 7.12）。

防雪柵の必要高と吹雪量との関係は式 6.3 に示す。

図 7.12 図 7.3 に示す樹木モデルにおいて、風下側の吹きだまりの最大長が、吹雪量と樹間の関数である（Tabler 1994）。 H_{req} は、図示の吹雪量の防雪容量がある防雪柵の柵高である。



7.8.2 セットバックに関する指標

シミュレーションモデルでは、平地形の防雪林での吹きだまり条件（吹雪量 $Q < 80\text{t/m}$ ）において、セットバック D は高さ H_{req} 空隙率 50%の防雪柵と同等とすべきであることを示している。

$$D = 35(\sin\alpha) H_{req} \quad (7.8)$$

α は、風と対象物との交角である。しかしながら、吹雪量が大きくても、セットバックが短くなる場合がある。この指標の応用について、例により説明する。ある場所の設計吹雪量を、4.7 項で述べた手法を用いて計算するものとみなすことで、6.3.2.1 項から 80t/m では H_{req} が 2.8m となる。もし優先すべき吹雪量の方角が道路と垂直 ($\alpha = 90^\circ$)

であれば、(7.8)と同様 98m のセットバックとなる。この間隔では、風下の吹きだまりがいかなる成長段階でも道路上に到達しない。

吹きだまり長さや吹雪量（図 7.12）との関係は、適切なセットバック距離がメイン州では 30m かそれ以下から、北部の州の平野部の大部分では 90m までの範囲にできる理由を説明している。ここで学ぶべき最も重要な知見は、必要なセットバックが吹雪量に依存することと、指標がこれらの論拠をカスタマイズすべきであることである。

短いセットバックは、樹木が完全に効果が発揮できる高さになる前に吹きだまり距離が数年間で許容されるのであれば使用すべきである。代替えとして、仮設柵は樹木が幼齢期の際風上側に導入されてきた。その柵は、図 7.13 に示すように柵高の 20 倍かそれ以上の距離とし、風下側の吹きだまりが樹木の障害とならないよう、風上側へ十分遠くに設置されるべきである。この距離は、柵が樹木を守り、吹きだまりが樹木のダメージとならないような深さとなる。樹木から 60m のセットバックは、地盤上に枝を張った密に植えた樹木での最小値であり、吹雪柵の防雪容量が設計吹雪量と同様であることを示している。この指標では、経験により得られたものであるが、図 7.12 のシミュレーション結果によってもサポートしている。

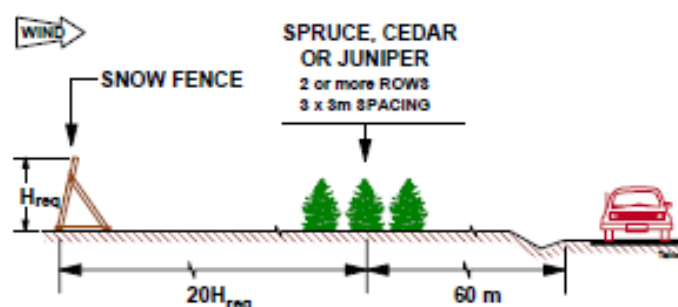


図 7.13 設計吹雪量と同様の防雪容量と防雪林の最小のセットバックの組み合わせによる推奨される仮設柵の配置

一般的に、60m 以下のセットバックは推奨されない。なぜなら、柵の端部や防雪林の開口部に形成された大きな吹きだまりが、道路本線上でも大きな吹きだまりとなるためである。図 7.7 の例では、路肩から約 30m 離れた道路用地に樹木が植えられている。

切土付近で囲うような植栽（図 7.14）とするのは芳しくない。切れている範囲の中間部は捕捉されるが、それ以上に植栽の端部に吹きだまりが形成される。

図 7.14 切土付近で囲うような植栽は、樹木の端部で道路上に大きな吹きだまりを形成させる。



昆虫、病気や干ばつは、下枝の枯れ上がりを引き起こし、風下側での吹きだまりの結果は、3.8.5.2.3 項で述べた風下での下部間隙の影響と同様となる。繁茂していない葉での結果は、図 7.15 のように吹きだまりが道路まで到達する。



図 7.15 道路端から 30m に植えられている発達したトウヒの枯れ上がり起因する道路への大きな吹きだまり

セットバックが 90m かそれ以上の時、樹木が成長する間早期に発現し、また木が成長した後で風下側の吹きだまりを減少するために、樹高 2.0-2.5m の低木列を道路から 60m 離れた位置に植栽すべきである（図 7.16）。

樹木に対する最小のセットバック距離においても、冬至の正午に道路表面へ太陽光を与えさせるべきである。例えば、メイン州では正午の太陽高度の最小値が 22° なので、南方側の道路の樹木は、路肩から成木高さの少なくとも 2.5 倍のセットバックが要求される。

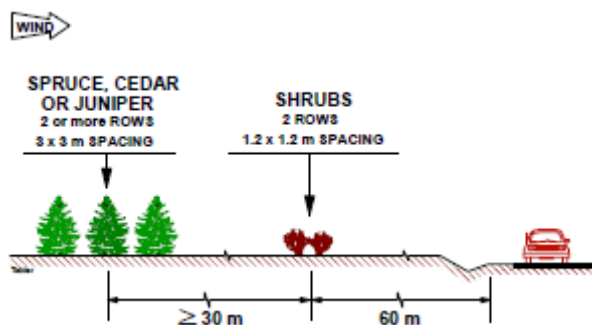


図 7.16 道路と高木列との間に植栽されている中低木列は、高木が十分に効果を発揮するまでの間防雪効果を改善させる。

7.9 防雪林の植栽パターン

樹木の数や要求される植樹範囲を最小限とするために、樹木は一般的に風向によらず道路と並行して植えられる。理想的には、列状の柵と風との交角は、 55° 以下にすべきではない。樹間は、十分な成長により樹冠の閉区間を確保すべきである。植栽の

欠損部や開口部は、柵構造での事例と同様の理由により避けられるべきである。樹木の割り付けは、風上側の列によって形成される大きな吹きだまりによって、高木や中低木が埋まるのを避けるように植栽されるべきである。

針葉樹の最小2列の配列は、3m 間隔とし、雪が通ることができる樹間を減らすよう千鳥配置に植栽されるべきである。針葉樹の3列の植栽は、より早く効果的となり、多分開口部は拡大しないであろう。列間隔は、使用される樹種に依存されるが、一般的に高木が3m、中低木が1.2m とする。中低木の配列もまた千鳥配置とし、盛土斜面の植生は7.17 図に示すようにすべきである。高盛土で落葉樹の幼樹の2列配置の場合は、斜面の頂点（法肩）に中低木を植栽することもある。

針葉樹の風上側での中低木の植栽列は、乾燥した風から防御し、また土壌水分の再供給を増やす積雪を増加させることにより、厳しい環境を改善し早期成長を促進する。

ミネソタ州の標準例では、0.9m の間隔となるよう、針葉樹の1.5m 風上側に caragawa（シベリア産の中低木）を1列植栽する。防雪柵では、新しく植栽した樹木を保護するために1.2m の離れ（間隔）が用いられているが、防雪柵の風下側に形成される大きな吹きだまりが風下側の樹木を傷めやすいため、低く成長する中低木の方が好ましい。

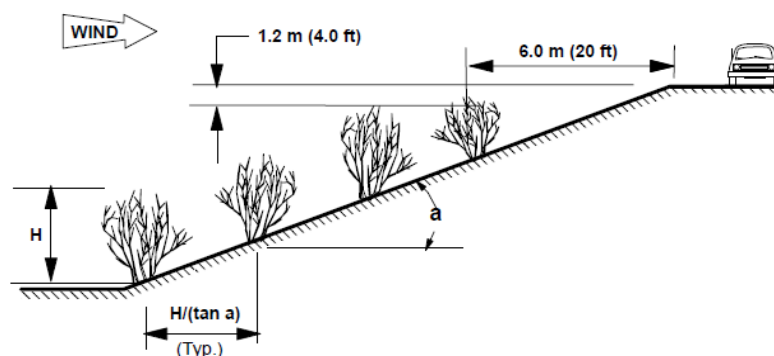


図 7.17 奨励される斜面での中低木の植栽パターン

7.9.1 落葉樹

落葉性の高木や中低木は、空隙率 60%以下となる十分な列数であれば、防雪フェンスとして効果的である。図 7.18 に示すような樹形での2列配置は、適切な空隙率を得ることができるが、3列配置のほうがより一般的である。見た目または物質的な空隙は、空気力学的なものより好ましい。なぜなら、気流の抵抗は、それ自身の枝や小枝の前面面積よりも受風面積の方がつり合うためである（Hoerner 1965）。

広葉樹の大部分は、地面付近が開けている傾向にあるので、樹冠より下部の吹雪を軽減するために風上側に2列の中低木や針葉樹を植える必要がある（図 7.19）。高い広葉樹の利点は、風下の長い距離を風から保護することである。



図 7.18 ロシアオリーブによく似た習性の枝張りである 2 列の広葉樹が、雪を捕捉するのに効果的な十分な空隙率となっていることを示している (Tabler1994)。



図 7.19 針葉樹の高木や中低木は、高い落葉樹の下に開けた範囲を閉塞することが要求される。

2つのアプローチが広葉樹の植栽を可能とする。自生している樹林範囲が不足している場合、最小で 3 列の高木か 2 列の中低木が樹冠の密度によって必要とされる。間隔の差異は、虫や病気などによる損失を軽減するために重要である。アメリカ北西部のような森林内で原生植物が占有している範囲では、自生する樹木や他の植物が植生を補足し、樹冠密度を大きくすることになるので少数の列植栽でよい。この場合では、植生は成林内での優先種に含めるべきである。

7.9.2 防雪林

図 7.10 に防雪林用に示した 60m の幅は、落葉樹向けである。 繁茂した葉を持つ針葉樹については、幅 30m が適切である。 30m のセットバックは、風上における防雪容量が設計吹き溜まり量と少なくとも同じくらい大きいことを必要とする。

7.9.3 立体交差を保護する方法

高木と中低木の列植は、立体交差(図 7.20)での吹き溜まり問題を著しく緩和することができる。 ミネソタでは「スノートラップ」と呼ばれるトウヒの三角形列植は、多くの場合極めて有効である(図 7.21)。スノートラップは野生生物の侵入を防ぐ効果の他に、従来の 2 つの平行列植より高い捕捉能力がある。

高架道路と平行な風向については、図 7.22 及び 7.23 に示されるように、高木と中低木の列植を使用すると良い。

図 7.20. 立体交差に起因する典型的な吹きだまり問題

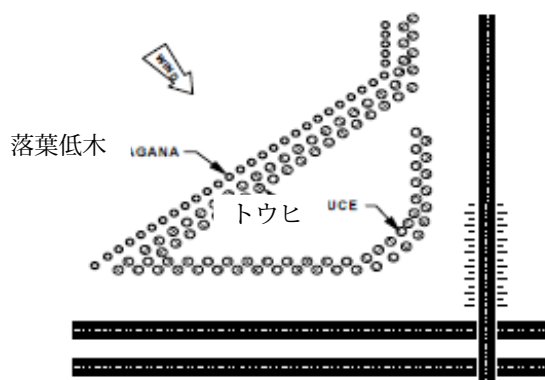


図 7.21. 立体交差で吹き溜まりを減少させるために使われた「ミネソタスノートラップ」(Tabler 1994 年より)



図 7.22.A
高木と中低木のコンビネーションは、立体交差における吹雪問題をほぼ解決することができる。

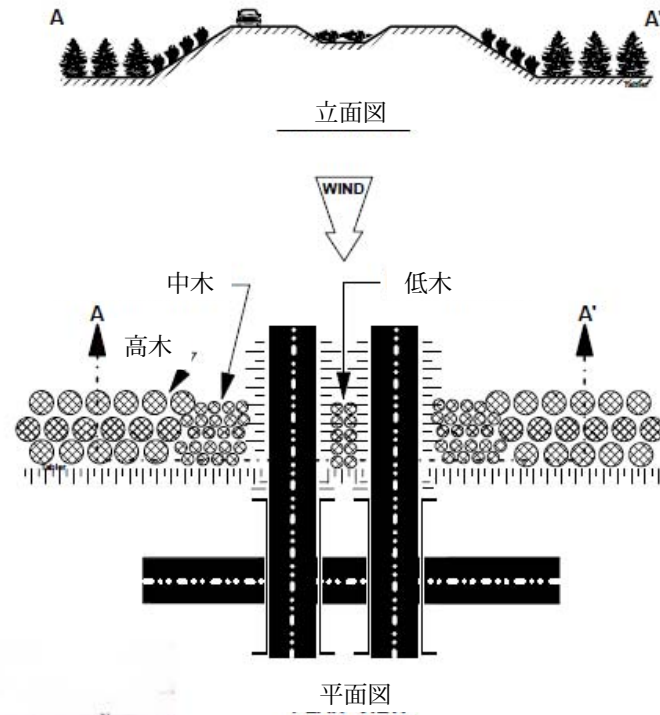


図 7.23
この立体交差で植栽が吹き溜まりを縮小することに成功することが報告された。

7.9.4 防雪植栽

中低木と高木の植栽は、中央分離帯やインターチェンジにおける三角形の場所のような道路用地内の空いた空間に置くことにより、吹雪を減少させる効果がある。しかしながら、もし不適當に設計されれば、そのような植え付けは地吹雪問題を悪化させる可能性がある。減光防止やカーブの視線誘導、アクセスコントロールや美化のための路傍植栽は、それらが引き起こした吹き溜まり問題により撤去されなければならない。イリノイ州における研究(イリノイ運輸省 1978)では、「計画的な利点を持って中低木植栽された場所は今、地吹雪問題について暗雲を投げかけている。それは厳しい場合に車道閉鎖を引き起こし、旅行者を危険にさらす場合がある。」と結論づけた。

防雪のための中低木植栽は吹き溜まり量がクラス 1(<10t/m)の雪にのみの使用に限定されるべきである。なぜなら中低木植栽は、風上からの雪ではなく、単に地面に

降る雪をとどめておくように計画されているからである。もし、吹雪の源が道路外からのものであれば、違う制御方法が要求される。

(セクション 3.6 で説明したように) 雪の効果的な捕捉には樹冠を密に重ねる必要はないので、中低木をまとめて植える時は離すことが出来、十分に成長した林冠の離れで、概ね 2-3m(図 7.24)程度の間隔である。ハナミズキのようなヒコバエの多い樹種では、より一層離れた間隔として良い。

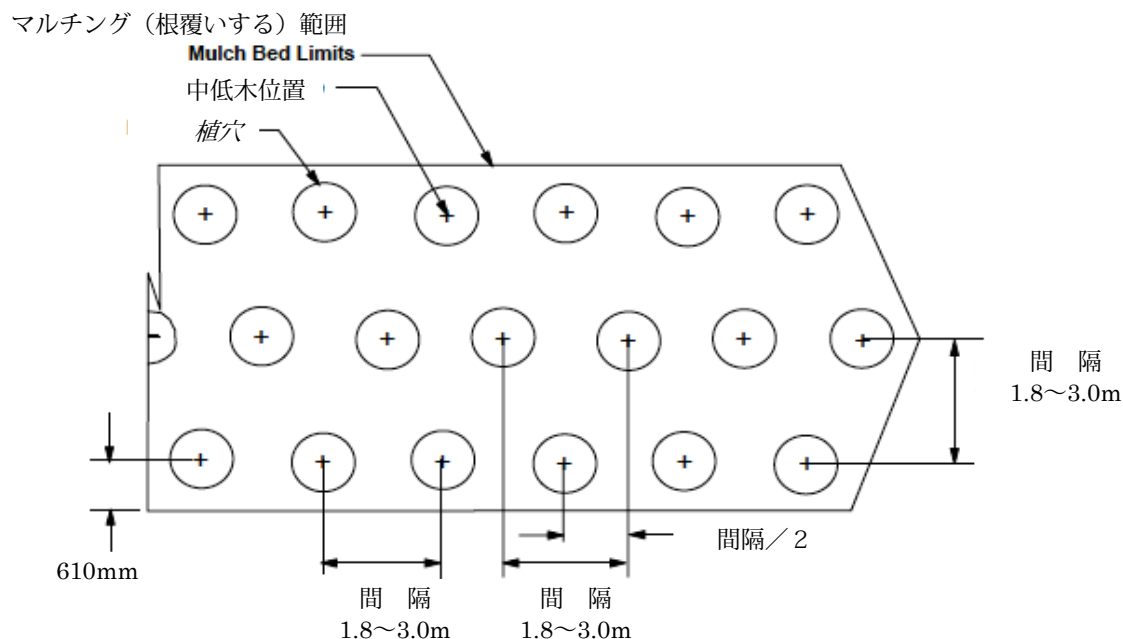


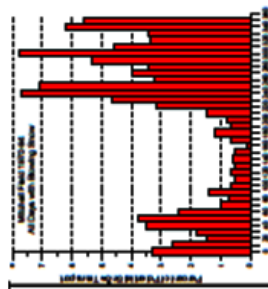
図 7.24 中低木植栽配置図

風が道路方向にほぼ平行な時、防雪に必要な中低木の数は、防雪柵の設計のために図 6.67 で示したように、ヘリンボン設計による中低木の千鳥配列により減らすことができ、それは、列方向が風を道路から遠ざけて導くようになっている。この千鳥配列ならびに様々なその他の植栽計画は図 7.25 に示され、その場所は、吹雪方向が定まらないような場所である。図 7.25 は、詳細植栽計画についての良い手法を示している。

道路敷地内が、あらゆる方向から来る吹雪に対して安定させられない場合、道路脇の中低木のトップが道路舗装面未満であるように、中低木は植栽されるべきである。中低木の丈は、最大積雪深と同等かそれ以上とすべきである。

中低木が望ましい高さより高くなる時、その樹冠は、路傍植生管理プログラムの一部として秋に剪定されることができる。公道用地内の特に雪折れしない種類の草本植生は、同様に滞雪に貢献する。したがって、路傍植栽の草刈りの舗装端からの距離は、草刈りされていない植物の高さの 12 倍か 6m の、どちらか大きい方にするべきである(図 7.26)。卓越風に垂直な草刈りされていない草の一片を残すことは、さらに雪の捕捉に貢献する場合がある(図 7.27)。

1970-1994の吹雪の
すべての日のデータ



方向 (方位角度)

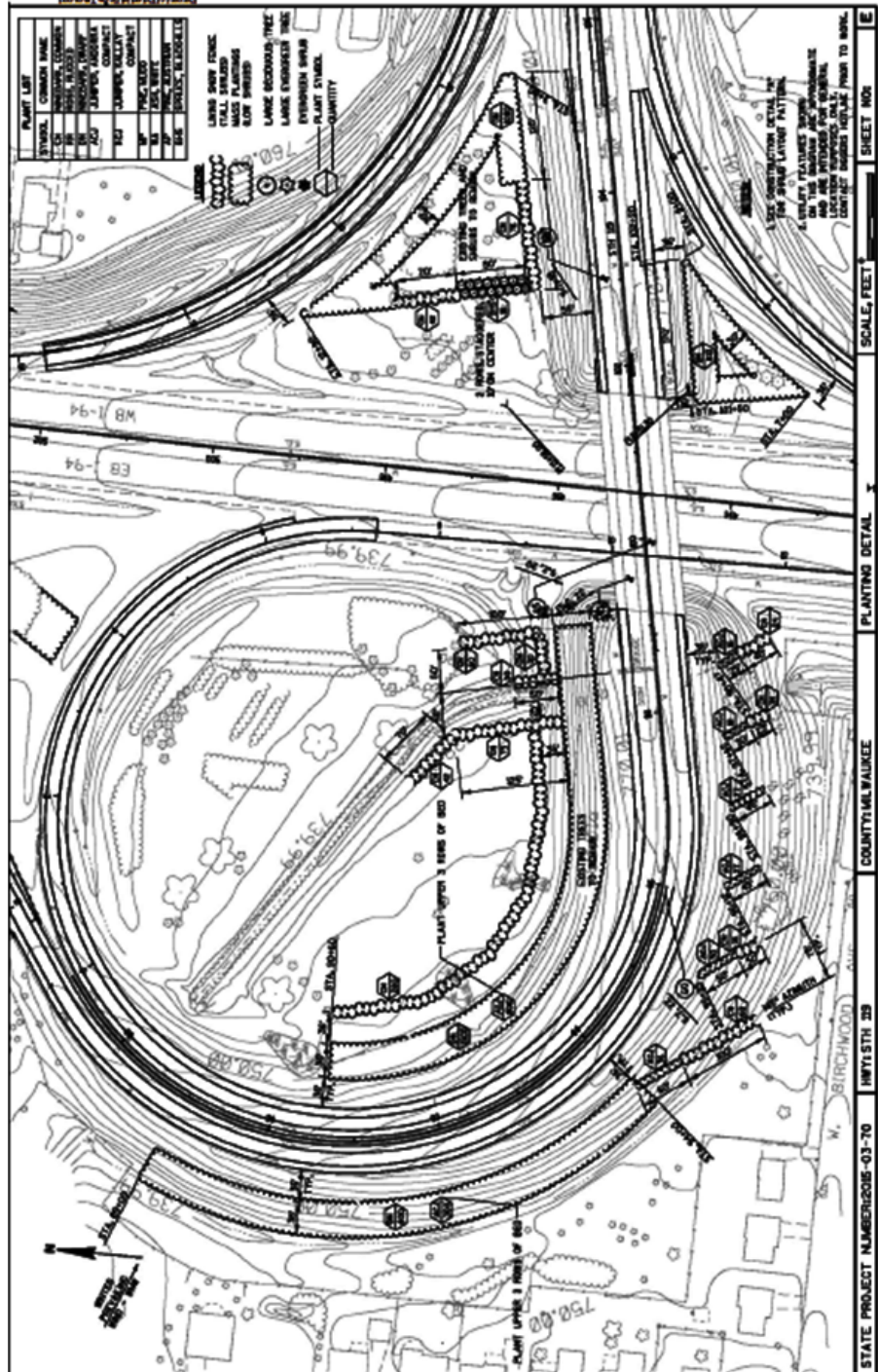


図 7-25 右上の図に示される方向から吹く吹雪に対する高木と中低木による植栽配置の例 (Martin B. Villaca の設計. ウィスコンシン運輸省提供。)

図 7.26
道路敷地内の草本植生は最大滞雪
のために管理されるべきである。



図 7.27
風に垂直な方向の草の列
を残すことは雪「の近く
で」滞雪させる有効な方法
かもしれない。
写真提供ミネソタ運輸省。

7.10 苗畑

針葉樹 より大きな木がより高価なので、高さ 20～30cm の苗木は、防雪林の植え付けに最も一般に使用される。しかしながら、高木を植えた時の活着および維持管理費用について比較すると、苗木植栽のコストは小さい。苗木の値段は生き残りと急成長については、2 次的なものに考えるべきである。一般に、針葉樹のポット苗は露出した根茎よりよく残存し成長する。

モンタナハイマツによる 2 年間の研究結果によると、コンテナ植栽は、露出した根の苗より 40～55% 大きく成長したことが示されている (Laursen and Hunter 1986)。育苗培土 (ポッティング・ミックス) は、水分と栄養素の蓄えを含んでおり、植え傷みを小さくし、運搬と植え付けの間、根の露出を保護する。コンテナ貯蔵タイプには、ペーパーポット苗、発泡スチロールの板により保護された苗とプラグ苗がある。

落葉樹 根切断された 2 年もののポット苗は、利用出来る種が限られる 1 年ものの苗より好まれる。ポプラ科(柳、ハコヤナギおよびポプラ)は、しばしば根を切断して植え

られる。また、これにより植物の調達と植林のコストを著しく下げることができる。

7.11 敷地造成および植栽

敷地造成用の有用な方法と植栽方法は、Laursen and Hunter(1986)、Shaw(1989) 及び the University of Minnesota Extension Service (1999) によって出版物で提供されている。より重要な状況のうちのいくつかは、次のセクションで手短かに述べられる。

7.11.1 実生（みしょう）の苗木

水、栄養及び日光が苗木の生死及び成長速度の決定的要因なので、注意深い敷地造成は不可欠である。苗木は、前年の晩夏に植え、雑草は除草剤でコントロールされるべきである。秋に植栽床は、草を掘り起こし耕されるべきである。実生（みしょう）の苗は翌春できるだけ早く植えられるべきである。コンテナ植栽の苗は、露出した根を持つ苗より遅く植えても良い。

適切な植栽手順の重要性が、Laursen and Hunter(1986)によって述べられた。

植林作業は、あたかも防風プロジェクトの成功がすべてそれに依存するかのよう
に注意深く実行することが必要である。苗品質および苗の生育力は、扱い、そ
して植える期間中に急速に悪化する。苗の放置、または不適當に植えられた苗は、
陸に上がった魚に良く似ている。その目的は悪化の割合を最小に抑えることであ
る。数秒の日光曝露は、常緑樹の根組織を殺し得る。

雑草の制御は植栽後の最初の 3〜5 年間は必要不可欠である。除草剤と草刈りの選択
には、雑草生長を防ぐ間、厚い木材チップマルチングの選択と、薄膜を通して水と空
気が通り抜けることを可能にする雑草よけの化学合成の布の使用を含んでいる（図
7.28）。その布の幅は 1.8〜2.4m が望ましい。その雑草除けの布が置かれる前後に苗木
植栽を行う。コロラドでは一般的に苗木植栽は、機械によって最初に行われる。雑草
除けの布を置く機械が列を下って移動するとともに、オペレーターは布に切れ目を入
れ、苗の芽吹きを引き出す。風による布のまくれ上がりを防ぐために、雑草除けの布
の端がしっかり地面についていることが必要である。その標準的方法は深い溝の中に
布の端を埋めることである。太陽光線に耐える材料が使用される場合、雑草除けの布
の残りの部分は露出し続けることができる。

乾燥した場所において、苗木が設置される時に土に置かれたポリアクリルアミドは、
植え付け時の散水量を減少させ、成長率を改善する。



図 7.28
木材チップマルチングの施工状況（左図）。

布製の雑草除け（マルチング）は経済的に雑草を予防し、水分を保持する方法である（右図、Tabler 1994）。

7.11.2 大規模移植

むき出しの根や根鉢（はだかの株）を用いる大規模移植でもまた生存と満足な成長を保証するために適切に植えられなければならない。土壌は植えられている樹種に適したローム質土でなければならない。通常、20-20-10肥料は 0.6kg/m^2 の割合で土壌に混ぜなければならないが、土質によってはこの割合を調節する必要があるかもしれない。

植え穴は根または根鉢の直径のより 60cm 幅広に、また、根鉢または根の下端より 15cm 深く掘らなければならない（図 7.29）。詰め土は埋め戻し材として使われなければならない。根鉢や根の下端は、木を設置する前の穴に敷かれた 15cm 厚の詰め土の上に載せなければならないが、突き固めは、土が落ち着くことにより根頭が斜面の下に沈下することを防ぐのに十分でなければならない。理想的には、排水を促進するため、根鉢の上部は埋戻しが落ち着いた後の斜面より 25~50mm に延長すべきである。木のまわりに置かれたマルチング層（厚さ 10~13cm）は、水分を保ち、雑草の繁殖を減らす。より厚いマルチング層は過度の断熱をもたらし、春における土壌温度の上昇を遅らせる。

樹径 5cm 以上のすべての木々は支持のために杭に縛られなければならない。好ましい方法は、根鉢の外側に円周方向に等間隔で垂直に打ち込まれた 3 本の 2.1m 鋼製 T 型支柱を使用することである。支柱からの支えワイヤーは木の幹に固定されたポリプロピレンまたはポリエチレンのバンドに接続される。ホースの断片をバンドの代わりに

使ってはいけない。

7.12 植樹後の管理

植樹は、最初の5年間か完全に定着して周囲の植生との競争が可能となるまで、水やりと、雑草との過度の競争からの保護をしなければならない。防草シートは、しっかりと地面に固定されたままであれば少なくとも5年間は雑草を抑制するだろう。シートが劣化する頃には、植樹された木は土壌を覆うのに十分大きくなり、草本の雑草種の成長は減少するだろう。

植栽の健康状態と、防草シート

の安定性の監視のための定期的な点検は重要なメンテナンス作業である。強風によりシートが持ち上げられ植栽に損傷を与えるため、シートの緩んだ部分は再固定しなければならない。高木と中低木は定期的に虫や病害の点検をすべきで、必要に応じて処置を行う。

高木と中低木は植樹後最初の3年間ほどは必要に応じて水やりをすべきである。乾燥地域では、点滴灌漑システムは散水車を使用することに経済的に代わりえる。

7.13 剪定

防雪植栽の中の堆雪は野生生物にとって好ましくないことから、林内の堆雪を減らす方法として剪定が推奨される。裾枝打ちは、防雪柵において下部間隙を広げることと同様の効果がある。剪定は風上側で堆雪を減らし、風下側の吹きだまりを長くし、吹きだまり抑制性能に悪影響を与えるかもしれない。剪定は樹冠の下の風速と吹雪量を増加させるため、これの実行は若干の野生生物種にとって有害となるかもしれない。林内の堆雪を減らすためのよりよい方法は、林風上側の堆雪を促進するために、必要に応じて中低木や防雪柵を用いて植栽の風上側端部の密度を高めることである。

剪定は、街路樹に起因する吹きだまりの軽減に用いることができる（図 7.30）。取り払われる大枝の地盤からの高さが高くなるほど、吹きだまりは風下側により遠くへ移動する。

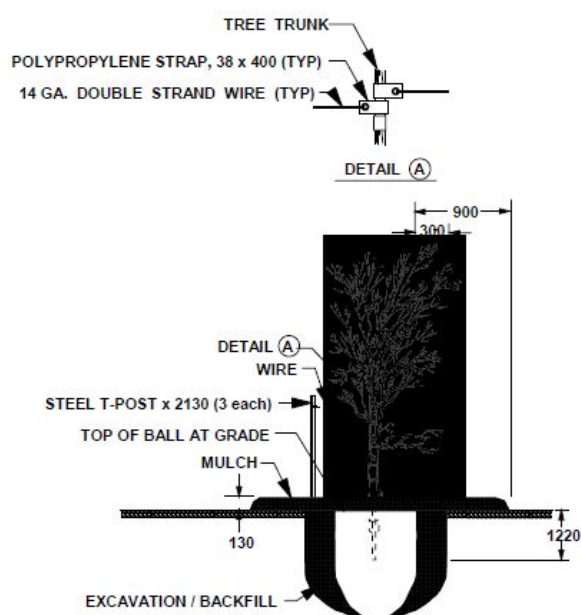


図 7.29 大規模移植のための植樹ガイドライン



図 7.30 街路樹の裾枝打ちは吹きだまりを軽減する。右上写真における剪定はこの場所における吹きだまりを防ぐだろう。矢印は風向を示す。

7.14 費用

防雪植栽の直接費用は、苗木、用地準備、植樹、肥料や他の土壌添加物、防草シート、マルチング、水やりを含む。柵は家畜や野生生物による損傷を防ぐことをしばしば要求される。Powell ら(1992)は、ワイオミングにおいての 4.3m 高の防雪植栽と防雪柵の設置費用を、林が完全な効果となるために要求される期間における、初期投資の逸失金利を考慮して比較した。彼らの分析(表 7.3)は、これら 2 種類の防雪柵の設置費用はそれぞれの耐用年数にわたっておおそ同じであることを示す。

ミネソタにおける防雪植栽の契約額は、落葉樹で\$31,075～\$52,830/km、常緑種と落葉種両方の植樹で\$77,690～\$124,300/kmの範囲と報告されている(Walvatne 1991)。南ミネソタのより吹きさらしの場所が必要とされる 3.6m 柵の費用は 1994 年の価格で\$49,100/kmと推定される。

アイオワにおいて、1989 年における防雪植栽の設置契約額は約\$13,050/kmとなると Shaw(1989)により報告されている。

除雪費と、防雪植栽が効果的となるために必要な 5～20 年間にわたる金利を考慮すると、防雪植栽の費用は防雪柵とほぼ同じであることがよくわかる。

表 7.3. 4.3m 高のワイオミング柵と防雪植栽の 1983 年における設置費用 (Powell
ら 1992)。「効果がある設置費用」は、防雪植栽が完全な効果となる間、年
5.25%の金利を複利計算された初期設置費用の値である。

Fence type	Installation cost (\$/km)	Effective Installation cost (\$/km)	Service life (years)	Unit cost (\$/km/yr)
Living snow fence	22,625	62,957	60	1049
Wyoming snow fence	36,096	36,096	35	1031

1km = 0.622 mile

7.15 防雪植栽の長所と短所

良好な状況下では防雪植栽は防雪柵より低コストで活着する。そのうえ、防雪植栽は景観的に好ましく、また、野生生物に生息地を提供する。これらの利点は下記の短所と比較検討されなければならない。

- ☐ いくつかの場所では、気候、土壌、生物条件が植栽の活着を難しくまたは不可能にする。
- ☐ 最適な成長条件と吹雪が少ない条件下であっても、十分に効果的となる高さになるまでに通常 6 年以上必要である (表 7.1、図 7.5)。ワイオミングにおいては、完全な効果となるまでに 20 年以上必要とされた。
- ☐ 防雪植栽の高さと空隙率、吹きだまり長と防雪容量は、時間とともに変化する。
- ☐ 成長形態や枝配置の不揃いは、防雪植栽の効果を減らす開口部や過剰な下部間隙を引き起こしえる。小さな開口部でさえ大きな問題を引き起こしえる。
- ☐ 植物の柵は虫、病害、火災、乾燥、冬枯れ、風、雪、凍雨、過剰な水、家畜や野生生物による食害、により損害を受けやすい。

7.16 立ったままの (刈り取られていない) トウモロコシ

少なくとも 2 つの州では、トウモロコシの列を高速道路の道路用地に隣接した場所に立ったままにしておく実験を行った。この方策が効果的で経済的であることは合意されている (図 6.18)。立ったままのトウモロコシの列数は収穫機械のサイズにより異なるが、効果的な吹きだまり抑制のための最低限は 6 ~ 8 列である。最も効果的な方策は、50~60m 幅のスペースにより分けられたトウモロコシの 2 つの帯を用いることである。実質的に、トウモロコシ列は空隙率 50% の防雪柵として機能する。立ったままの 2m 高さのトウモロコシの 2 つの帯は、2.7m 高防雪柵と同じ程度の、およそ 75t/m を貯められる。

ミネソタにおける過去の実績では、畑に立ったままにしておかれるトウモロコシに

対して、収穫時期における収穫物の市場価格に基づく代金が、春にトウモロコシを回収するオプション付きで農家に支払われた。1984年のミネソタの計画における費用は平均\$810/kmである。1985年に始まった6年の期間の間、ミネソタの1つの地区で\$480/kmの平均費用が報告された。— 通常の1.2m防雪柵の設置撤去費用より約95%少ない。

路肩からの最小セットバックは防雪柵と同様でなければならない（立ったままのトウモロコシの有効高さの35倍）（図7.32）。ミネソタにおける標準的な実績では、道路用地から46mの最小セットバックである。30mのセットバックでは近すぎるとわかった。



図 7.31 立ったままのトウモロコシが効果的で経済的な防雪柵となる (Tabler 1994)。

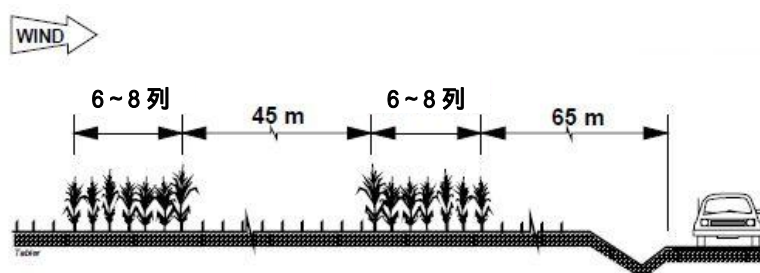


図 7.32 トウモロコシの有効高さを 1.8m と仮定した、立ったままのトウモロコシのためのガイドライン (Tabler 1994)。

7.17 参考文献

- Bates, C. and J. Stoeckler. 1941. Snowdrift control on highways by planting trees and shrubs. Lake States Forest Experiment Station, USDA forest Service, University Farm, St. Paul, Minn.
- Finney, E.A. 1934. Snow control on the highways. Michigan State College, Experiment Station Bulletin No. 57.
- 1937. Snow control by tree planting. Michigan State College, Experiment Station Bulletin No. 75.
- Hoerner, S. F. 1965. Fluid dynamic drag. Hoerner Fluid Dynamics, Bricktown, New Jersey.
- Hunter, W. G. 1959. Control of trees and shrubs for ease of highway maintenance. The Maine Trail, March, 1959: 6-10.
- Illinois Department of Transportation. 1978. Effects of roadside vegetation on drifting snow.
- Laursen, S. B. and H. E. Hunter. 1986. Windbreaks for Montana. Montana State University, Cooperative Extension Service, Bulletin 366.
- Minnesota Department of Transportation. 1999, Woody and herbaceous plants for Minnesota landscape & roadsides, version 2.0. CD-ROM.
- Olsen, H.E. 1963. Landscape planting for snowdrift control. Park Maintenance, Vol. 16, No. 3: 17-28.
- Peterson, T. and R.A. Schmidt. 1984. Outdoor scale modeling of shrub barriers in drifting snow. Agriculture and Forest Meteorology 31: 167- 181.
- Powell, K., C. Reed, L. Lanning, and D. Perko. 1992. The use of trees and shrubs for control of blowing snow in select locations along Wyoming highways. Final Report, Project No. HRP-1(18), Wyoming Department of Transportation. Federal Highway Administration Report No. FHWA-92-WY- 001. National Technical Information Service, 5285 Port Royal Road, Springfield, VI 22161.
- Scholten, H. 1988. Farmstead shelterbelts: Protection against wind and snow. University of Minnesota Extension Service Publication NR-BU-0468.
- Shaw, Dale L. 1989. Living snow fences: Protection that just keeps growing. Colorado Interagency Living Snow Fence Program, Colorado State University, Fort Collins.
- Stoeckler, J.H. 1962. Shelterbelt influence on Great Plains field environment and crops. USDA Production Research Report No. 62.

- Sturges, D. L. 1983. Shelterbelt establishment and growth at a windswept Wyoming rangeland site. USDA, Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station Research Paper RM-243. Fort Collins, CO.
- Sturges, D. L. and R. D. Tabler. 1981. Management of blowing snow on sagebrush rangelands. *Journal of Soil and Water Conservation* 36(5) : 287- 292.
- Tabler, R. D. 1975. Predicting profiles of snowdrifts in topographic catchments. In: *Western Snow Conference* (Coronado, Calif.; April 23-25, 1975) *Proceedings* 43: 87-97.
- 1983. Snow control research and engineering in Japan. Hokkaido Development Bureau, Civil Engineering Research Institute Report No. 81.
- 1991. Snow fence guide. Strategic Highway Research Program, Report SHRP-H-320, National Research Council, Washington, D.C.
- 1994. Design guidelines for the control of blowing and drifting snow. Strategic Highway Research Program, Report SHRP-H-381.
- Tabler, R. D. and R. L. Jairell. 1992. Trapping efficiency of snow fences and implications for system design. *Transportation Research Record* No. 1387: 108-114
- Tabler, R. D. and R. A. Schmidt. 1986. Snow erosion, transport, and deposition in relation to agriculture. In *Proceedings, Symposium on Snow in Agriculture* (Swift Current, Sask.; July 9-11, 1985) , H. Steppuhn and W. Nicholaichuk, ed. Great Plains Agricultural Council Publication No. 120: 11-58.
- University of Minnesota and Minnesota Department of Transportation. 1999. Catching the snow with living snow fences. University of Minnesota Extension Service Report MI-7311-S.
- Walter, J. 1984. Living snow fence: 60 years ago it was new. Wyoming Department of Transportation, Cheyenne. *The Highwayman*, Spring, 1984: 13.
- Walton, Clyde D. 1984. Functional wind control with plants. In *Proceedings, Northeastern States technology Exchange Meeting -- Roadside Management* (Nov. 16, 1984; Kittery, Maine) , Section 5, Maine Department of Transportation.
- 1985. Functional landscape design for Interstate highways. In *Proceedings, Northeastern States Technology Exchange -- Roadside Management* (Dec. 6, 1985) , Section 2, Maine Department of Transportation.
- Walvatne, P. G. A. 1991. A report on MN/DOT's living snow fence efforts. Unpublished report prepared for Minnesota Snow Control Workshop (February 6, 1991; Mankato, MN) . Minnesota Department of Transportation, Environmental Services Section, St. Paul.

訳者

本冊子は「道路雪氷広場」(主催:(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	イセノ・エフ・ゲニー
	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 (抄)

2011 年 4 月 初版発刊

2012 年 8 月 追加翻訳

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

【連絡先】

〒060-0042 札幌市中央区大通西 18 丁目北大通マンション 704 号 雪氷ネットワーク

TEL 080-5599-1174

〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 寒地土木研究所 雪氷チーム

TEL 011-841-1746