HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	防雪柵による吹きだまりと風速分布
Author(s)	成瀬, 廉二
Citation	低温科學. 物理篇, 41, 65-73
Issue Date	1983-03-22
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/18457
Type	bulletin (article)
File Information	41_p65-73.pdf

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

Renji NARUSE 1982 The Shape of Snow Drifts and Distribution of Wind Speed Around Snow Fences. *Low Temperature Science, Ser. A, 41.* (With English Summary p. 73)

防雪柵による吹きだまりと風速分布*

成瀬廉二
(低温科学研究所)

(昭和57年10月受理)

I. まえがき

防雪柵に関する調査研究は，国内外において古くから数多く行われてきた。塩谷[1]は1967年までに得られたいくつかの成果をまとめ，吹止柵では空隙率が増すと吹きだまり位置が風下側にのびること，効果的な吹きだまり形成に対して望ましい柵下部間隙の高さ，柵高と最大吹きだまり量との関係等について報告した。近年では，小林等[2]が北海道西部羽幌地域の現地調査結果にもとづき，冬季間を通じて柵のふぶき捕捉率を50～80%と推定した。福沢等[3]は同一地域内に多種類の実験柵を設置して性能比較試験を，Anno・Konishi[4]は模型雪と模型柵を用いた風洞実験を行った。

一方Tablerは，模型柵の屋外実験[5,6]や実物柵の吹きだまりの形態に関する詳細な調査をかさねつつ[7]，アメリカ・ワイオミング州の環境条件に適した防雪柵を設計し，実用的にも高い効果をあげている[8]。

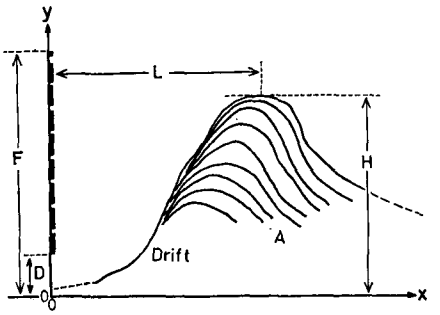
北海道の西岸，北岸のふぶき多発地域の道路沿いには，近年非常に多数の防雪柵が設置された。性能を支配する柵の構造，高さ，設置位置等に関しては，従来までの文献や独自の実験等をもとに経験的に決められているものと考えられるが，北海道において最も効果的な柵の基準が確立されているわけではない。種々の制約のもとで目的にかなう柵を開発するためには，改めて様々な視点から基本的な調査を積み重ねる必要がある。筆者は，防雪柵による吹きだまりの成長過程および柵の吹きだめ効果に関する知見を得る目的で，1980年から1982年の三冬期，北海道北西部，北部の国道沿いの柵の多点の調査を行った。吹きだまりの形態についてはTablerの結果[7](ワイオミング柵)と比較検討する。また，吹きだまり形成におよぼす風の構造の調査の一つとして，柵周辺の風速分布観測結果から風の流線分布を求めた。あわせて防風網の効果調査結果をも報告する。

II. 調査の概要と防雪柵の構造

調査は1980～1982年の2月および3月上旬に，北海道北西部・国道232号線(羽幌—天塩)，北部・40号線(音威子府—稚内)，238号線(稚内—枝幸)および石狩平野にて行った。調査の対象とした防雪柵は，横張り鋼板製の吹きだめ柵である。柵の風下吹きだまり(以下，雪丘とよぶ)の鉛直断面の一例を第1図に示す。本報告では，図に記号を示したように，地表面に x 軸

* 北海道大学低温科学研究所業績 第2483号

を柵から風下に，地表面から鉛直上方に y 軸をとり，柵の高さを F，下部間隙を D，雪丘頂部の高さを H，雪丘頂部の x 方向の距離を L，雪丘の鉛直断面積を A とおく。また，柵の空隙率 P は $(F-D)$ に対する板間の総間隔距離の割合 (%) で与える。



第1図 防雪柵と風下雪丘の鉛直断面の一例
内部の層構造については本文 (第 III 章) 参照

調査を行った防雪柵の構造に関する諸量を第1表にまとめて示す。次章以下で引用するワイオミング柵についても示した。ワイオミング柵が北海道の一般的な吹きだめ柵と大きく異なる点は，空隙率が大きいこと，柵が風下側へ傾斜していることである。第2表に防雪柵設置地域付近の地形的・気候的特性をまとめて示す。ワイオミング地域は北部北海道に比べて降雪量は多くないが，冬期間の総ふぶき量 (地ふぶき輸送量) は非常に多い[8]。

雪丘の形態調査は，積雪深 1.8 m 以下の部分では測深棒により，それ以深の部分では表面の簡易水準測量によって行った。雪丘の断面形態の測定は9地点にて，雪丘の H と L のみの測定は36地点，雪丘断面の層位および密度分布等の測定は4地点，雪丘や柵周辺の風速多点分布観測は3地点にて行った。以上の内，石狩・新篠津に実験用に設置された防風網における調

第1表 調査を行った防雪柵の構造

	本調査の柵	ワイオミング柵[7]
水平板の縦幅	26 cm	15 cm
〃 の間隔	約 7 cm	15 cm
空隙率 P	約 20%	50%
柵高 F	2.8～5.1 m	2.44～3.78 m
下部間隙 D	(0.09 F～0.19 F) 平均 0.16 F	約 0.1 F
設置方式	鉛直	風下に 15 度傾斜

第2表 防雪柵設置地域の地形・気象特性

	北部北海道	ワイオミング[7]
標高	<100 m	2,190～2,400 m
Fetch (柵風上の平坦地の距離)	多くは 1 km 以下	2～6 km
柵周辺の地形	起伏あり	5% 以下の緩傾斜
冬期間の平均総降水量	<12, 1, 2 月の積算[9]> (羽幌) (稚内) (北見枝幸) 343 mm 292 mm 282 mm	<11 月初～3 月末> 約 250 mm
冬期間の平均風速	<12, 1, 2 月の平均[9]> (羽幌) (北見枝幸) 4.6 m/s 3.4 m/s	<地ふぶき発生期間の平均> 16 m/s

査を含む。防風網は，厚さ 3.7 mm，穴の平均直径 5 mm，空隙率 30% のプラスチックネット（ネトロンシート）で，高さは 3.3 m（下部間隙なし）である。

なお，調査を行った防雪柵は，柵周辺が比較的平坦で広い地点のもの，かつ調査時に比較的顕著に雪丘が形成されていたものを選んだ。したがって，得られたデータは数多くの柵から無作為にサンプリングされたものではない。

III. 柵による吹きだまりの形態

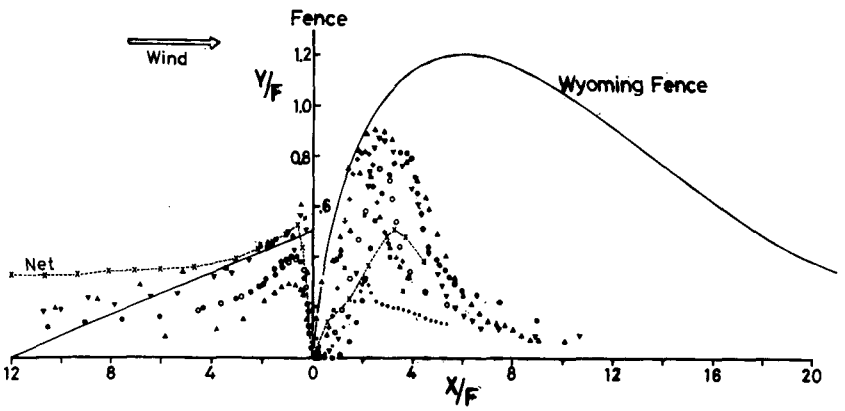
防雪柵に直角方向の吹きだまり（雪丘）表面の断面形（9 観測例）をまとめて第 2 図に示す。一般に，風下雪丘は風上雪丘より顕著に大きく，高さは 2 倍前後となっている。しかし×印で示した防風網では，風上雪丘も大きく，雪丘頂部の高さは風上，風下でほぼ等しい。図にワイオミング柵と記した曲線（風下側）と直線（風上側）は，Tabler[7] が 18 例の断面形態の観測をもとに 5 次の多項式および 1 次式に回帰させた吹きだまりの “平衡形” (“Equilibrium drift”: 雪丘の最大限界形態）である。筆者の調査による雪丘は，ワイオミング柵の平衡形に比べ，風上側はほぼ同規模だが風下側は著しく小さいことが明瞭である。

第 2 図の結果をもとに，それぞれの風下雪丘の鉛直断面積 A を求める。ここでは，$x=0$ から雪面がほぼ平坦となる $x=30$ m までの区間の面積を A とする。$x=20$ m 付近で道路または除排雪による堆積物に達することも多いが，この場合は表面形を 30 m まで外そうして求めた。雪丘高 H (m) と断面積 A (m^2) との関係を第 3 図に示す。ただし，防風網の結果を除く。H と A とには良い正の相関関係（相関係数：0.90）が認められる。両者を原点を通る直線で近似させると，

$$A = 12.5\,H, \qquad (1)$$

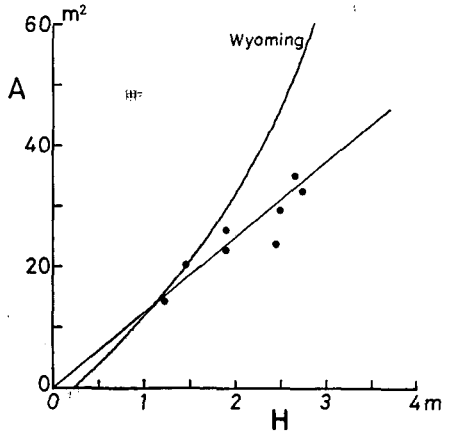
を得る。

Tabler は発達過程の風下雪丘について，H/F を S（A と平衡形の断面積との比：$A/(19F^2)$）の 4 次の多項式で表したが，この関係に $F=3.3$ m としたときの H と A との関係を示す曲線を

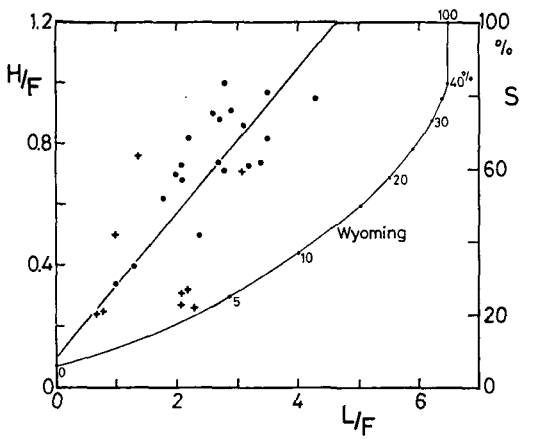


第 2 図　防雪柵前後の雪丘の断面形

X および Y は，雪丘表面各点の，柵からの水平距離および地表面からの高さ。F は柵の高さ



第3図 柵の風下雪丘頂部の高さ H と鉛直断面積 A との関係



第4図 風下雪丘頂部の相対位置 L/F と相対高さ H/F の関係
S は $100\,A/A_{max}$

あわせて図示した。ワイオミング柵では，H が大きくなると A が急速に増加するが，これは雪丘の成長とともに雪丘の総長が大きく伸びることを反映している。次に吹きだまり成長にともなう雪丘頂部の位置の変化を調べる。L と H を測定した柵の内，下部間隙 D が雪で埋設していない 29 例について L/F と H/F との関係を第 4 図に示した。＋印は柵高 F が 4.6～5.2 m の高い柵，●印は F が 2.6～3.4 m の一般柵である。L/F と H/F との相関係数は 0.70，母相関係数の 95% の信頼限界は (0.45, 0.84) となり，両者間に有意な相関関係があると言える。この関係を直線で近似させると，

$$H = 0.24\,L + 0.1\,F, \tag{2}$$

を得る（ただし，(1) 式では測定値が少なく，(2) 式では値のちらばりがやや不均一なため，両式とも最小自乗法を用いず目視により決定した)。多数の異なる柵の測定から得られた (2) 式の関係は，雪丘の成長 (H の増加) につれて雪丘頂部の位置が風下側へ移動することを示唆する。第 1 図の雪丘断面図に，内部に顕著に認められた層構造を示した (1981 年 3 月 3 日，サラキトマナイ，F=3.2 m, H=2.62 m, L=7.0 m)。各層位の高さは，堆積後の積雪の圧密のために，かつての表面の位置より低下しているが，層位の頂部位置が雪丘成長とともに風下へ変位していることが明らかである。この観測結果は第 4 図の傾向と一致する。

今回調査を行った限り (45 例) においては，H/F の最大値は 1.0 であった。一方，竹内等[10]の模型実験では 1.1，Tabler は 1.2 を得ている（第 2 図参照)。したがって，ここでは風下雪丘の限界の高さ H_{max} を，

$$H_{max} = 1.2\,F, \tag{3}$$

と仮定する。(1), (3) 式より，雪丘の最大断面積 A_{max} は，

$$A_{max} = 15\,F, \tag{4}$$

となる。ただし，A_{max} は (m^2), H_{max}, F は (m) の単位。

ある一つの防雪柵が堆積させ得る最大雪丘（平衡形）の断面積に対する，成長過程の雪丘断面積の割合 S(%) を $100\,A/A_{max}$ で与え，第4図の縦軸右側に，H/F に対応する S の値を示した。北海道の柵では，S が大きいもので80% 程度に達している。高い柵では1～2の例外を除いて S 値が小さい。II 章で述べたように，比較的顕著に雪丘が発達した柵を測定しているので，全体の柵の平均では S 値は非常に小さいと推定される。ただし，S 値が大きくなる以前に，下部間隙および柵の下方部分が雪に埋設し，防雪柵としての機能をほぼ失ったと考えられる柵も多く見られた。

Tabler が示した H/F 対 S, L/F 対 S の二つの図を合成して L/F 対 H/F の関係を求め，第4図にあわせて示した。曲線に付した数字はワイオミング柵の S(%) である。ワイオミング柵では，S が小さい内は (0～30%) 雪丘成長にともない頂部の位置が速やかに風下方向へ移動し，$L=6.5\,F$ に達して（このとき $S=40$%）後は，L は変化せず H のみ増加する。

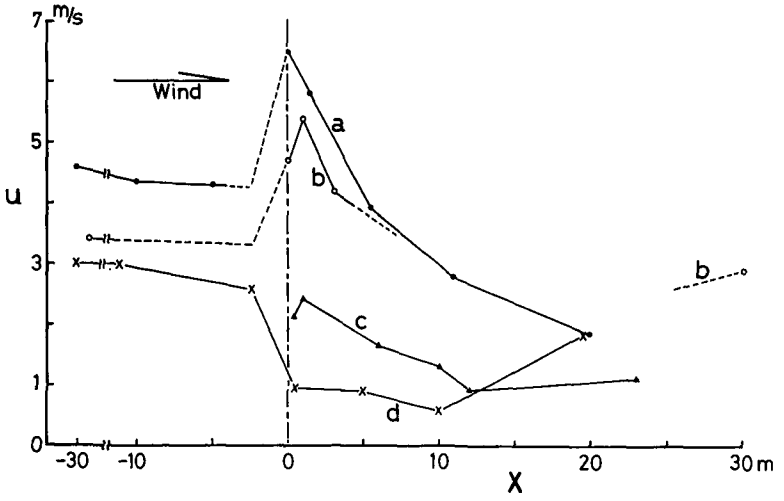
以上では雪丘の形態のみに関して述べてきたが，吹きだまりの積雪密度は，一般に自然積雪の密度より大きい。例えば，自然積雪（積雪深 0.28 m）の全層平均密度が 300 kg/m^3 のとき柵風下雪丘頂部付近（積雪深 2.2 m）のそれは 370 kg/m^3（猿払，1981年2月1日），自然積雪 (0.5 m 深) の全層密度が 250 kg/m^3 のとき雪丘頂部付近 (0.9 m 深) のそれは 320 kg/m^3（別海，1980年2月17日）であった。この差は，雪丘の積雪深が大きいことによる積雪の圧密の効果が最も大きいと考える。

IV. 柵および網前後の風速分布

防雪柵・網に直角な鉛直二次元面内で風速の多点分布観測を行った。5個の小型三杯風速計の内，1個を定点におき，他を順次移動させて観測し，定点の風速を基準風速とし各点の測定が同時観測に相当するよう補正した。

柵前後の吹きだまり形成に大きく影響をおよぼすのは，地ふぶき密度の高い雪面近傍の風の構造である。そこで，雪面高 0.3～0.5 m の風速の水平分布の観測結果を第5図に示す。図中の **a**～**d** に対応する柵の構造，雪丘規模等に関する諸要素を第3表にまとめて示した。**a**～**c** はいずれも横張り柵，**d** はプラスチックネット，**b** は無積雪期の観測である。風速測定値を単に直線で結んだものを実線，風速が単調減小から増加（あるいはその逆）に変化すると推定した部分は破線にて示してある。柵では，柵に近づくにつれ緩やかに減小した風速が柵直前から急激に増加し，柵直下または直後で最大となった後，再び徐々に減小し，風下数 m 付近の地点で風上の基準風速以下となる。一方，下部間隙のない網の場合は，網直前から風速は急降下し，網の風下 10 m 付近（雪丘頂部付近）で最小値を示している。網の風上雪丘が比較的大きいこと（第2図参照）は，網直前の雪面風速の減小の影響と考えられる。無雪期 **b** の風速分布は，雪丘が大きい **a** および小さい **c** と同じような傾向を示している。無雪期における地面高 1 m の風速は柵の風下 10 m 地点付近にて極小値を示したが，地面近傍の風速は測定密度が小さいため詳しい構造は不明である。しかし，第一次近似的には，柵風下の雪面付近の風速が風上基準風速以下になる地点の後方に吹きだまりが形成される，と言えるであろう。

柵周辺の平均的な風の特性を表す場合，等風速線図を示すことも一つの方法[11]であるが，



第5図 柵前後の雪面高 0.3～0.5 m の風速 u の水平分布
柵の位置は $x=0$

第3表 (第5図) a～d の柵および雪丘の諸要素

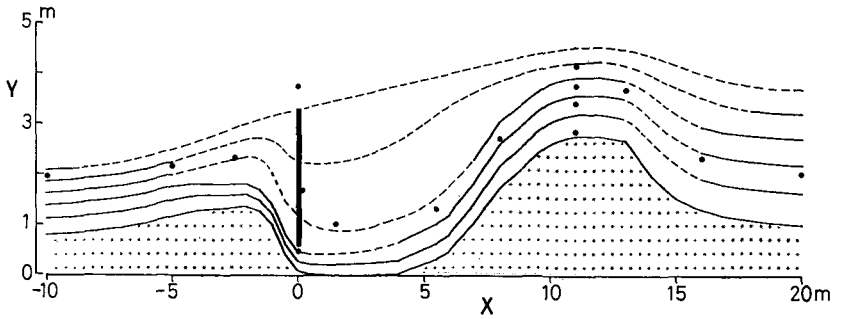
	場所	年月日	F (m)	D (m)	P (%)	H (m)	L (m)	S (%)	風速計の雪面高 (m)
a	羽幌	1980. 2. 27	3.33	0.57	20	2.74	11.7	69	0.30
b	猿払	1980. 12. 3	2.9	0.50	20	0	—	0	0.38
c	樽川	1982. 2. 22	4.6	0.43	20	1.45	10.0	26	0.50
d	新篠津	1980. 2. 16	3.3	0	30	1.66	11.0	42	0.50

隙間のある柵で，かつ前後に雪丘が形成されていると，等風速線は局部的にこみ合い，描きにくい。そこで，風速値をもとに平均的な流線分布図を求める。

水平に x 軸，鉛直に y 軸，$x-y$ 軸に直角に z 軸をとったとき，x 方向の風速を u (m/s) とおき，z 方向の風速を 0 と仮定する。また，充分長い時間内の平均的状態においては風の流れは定常であるとみなし，かつ次式を満たすように z 方向の単位幅の空気の流量は保存されると仮定する。すなわち，

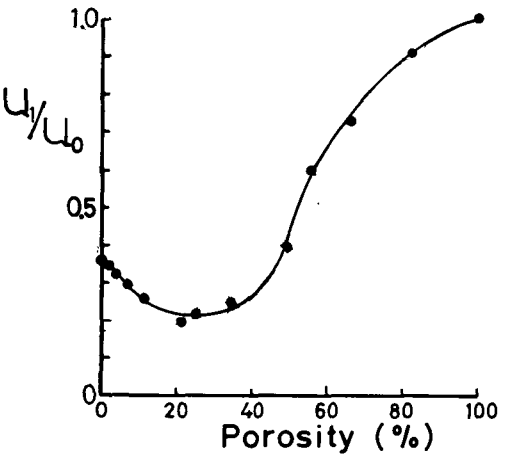
$$\frac{\partial}{\partial x}(uh)=0\,, \qquad (5)$$

ただし，h(m) は $x-y$ 面内に任意に選んだ2本の流線の間隔 (y 方向) を表す。いま，$uh=1.2$ m^3/s とし，羽幌 (第3表 **a**) における得られた流線分布を第6図に示す。柵の直後では大小の渦が発生することが発煙筒を用いた目視観測でも認められる。したがって，破線で示した柵前後の流線は，ある時刻の粒子経路線とは一致しないことは言うまでもないが，5分間程度の平均的な風の流れと見なし得るであろう。吹きだまり形成に重要な影響を与える点は，雪面付近の下層の流線間隔変化 ($\partial h/\partial x$) の様子であると考えられる。最下層の気流は，柵直前で収束され，雪丘に達すると徐々に開き，頂部から後面にかけて大きく発散している。この観測例では，



第6図 柵周辺の風の流線分布 (1980年2月27日, 羽幌)

柵の風上 30 m 地点の雪面高 1.25 m 以上の空気は柵の上端を越え，雪面高 0.7 m 以下の空気は柵の下部間隙を通ることが第6図からわかる。また，柵の下部間隙を通過する空気の流量は 3.1 m^3/s, 柵の全隙間を通過する流量は同じく 3.1 m^3/s と見積もられる。竹内等[12]の観測によると，雪面から 0.3 m までのふぶき輸送量は，高さ 10 m までの全輸送量の 57%～96% を占めている。したがって，一般には飛雪粒子の大半は柵の下部間隙を通り抜ける。この飛雪が柵風下にてどのように堆積分布をするかは，下部間隙，空隙率，柵高の三要素に支配され，さらに雪丘形成後はその形態が影響をおよぼすであろうと考えられる。これらの詳しいしくみ，相互作用を明らかにすることは，今後の課題の一つである。



第7図 防風網の空隙率に対する風速減衰効果
u_0 は自然状態の風速，u_1 は網風下の平均風速

防風網の風速減衰効果を次に調べる。第5図 **d** では，網の直後からおよそ $4H$ (H は網高) までの区間で雪面付近の風速は風上基準風速の 20～30% の値を示した。風洞 (測定部の高さ 50 cm) において，様々な空隙率の網に対する風速分布を測定した。試験網の高さ h を 25 cm とし，網直後から $2h$ までの区間における高さ $h/2$ の風速の平均値 u_1 を求め，網のないときの風速 u_0 との比を第7図に示した。風速計は熱線風速計を用いたので，u_1 の測定値は，風速の水平成分ではなく鉛直面内の絶対値を表している。空隙率が0に近く小さい網では，網後部の逆流が大きく，u_1/u_0 は増す。最も風速減衰効果の大きい網は，空隙率 20～30% のものという結果が得られた。

V. あ と が き

1980～82年の冬期，北海道北西部および北部の国道沿いに設置されている防雪柵 (横張り吹きだめ柵) において，吹きだまりと気流に関する調査を行った。北海道の柵とワイオミング

の柵とでは，風下雪丘の形態に大きな相違が認められた。これらの特徴をまとめると，北海道の柵はワイオミングの柵に比べて，

1) 風下雪丘頂部の位置が，成長過程を通じて柵に近い。

2) 雪丘成長につれ雪丘の全長があまり長くならない。

3) 雪丘成長につれ雪丘頂部がすみやかに高くなり，限界高に早く達する。

4) したがって，吹きだめ可能容量（雪丘断面積で比較し得る）が少ない。

5) しかし三冬期の観測では，北海道では効果的に吹きだめ限界（平衡形）に達した柵はない。

以上の特性の差は，両地域の柵の構造（特に，空隙率，下部間隙，柵の傾き）および冬期間の気象条件（特に，総地ふぶき輸送量）の相違によるものと考えられる。気流の調査では，地ふぶき密度の高い雪面近傍最下層の風の，柵前後の発散，収束状況が，吹きだまり形成に重要な影響をおよぼしていることが改めて認識される。したがって，柵の下部間隙，空隙率，柵高のかね合いが，形成される雪丘の規模，形態に対して支配的であると予測されるが，今回調査を行った柵は，$P \simeq 20\%$，D/F がほぼ 0.1～0.2 の小さい範囲内にあるため，P や D の相違による H や L の変化に関する有意な傾向を認めるまでには致らなかった。風に対する障害物としての柵の種々の構造要素が，吹きだまり形成におよぼす機構の解明は，今後のさらに詳細な研究に残された課題である。

本研究の野外調査を行うにあたっては，以下に記す多くの方々のご協力をいただいた。北大低温科学研究所秋田谷英次氏，遠藤八十一氏，小林俊一氏，丹野皓三氏，佐藤利幸氏，同研究所大学院生本山秀明氏，金田安弘氏（現，気象協会），鴻野繁和氏（現，気象協会），堀内康光氏（現，北海道開発コンサルタント），菊地時夫氏（現，高知大学）。また，北海道開発局留萌開発建設部羽幌出張所および北大農学部天塩地方演習林の諸氏には現地調査に際し便宜をはかっていただき，大日本プラスチックス株式会社には同社が設置した試験防風網を調査させていただいた。本研究を通じて，北大低温科学研究所石田完教授ほか気象学部門の諸氏，同研究所小林大二助教授，北海道開発局土木試験所竹内政夫氏，石本敬志氏，および USA 林野局 Tabler 氏等から数々の助言を得た。以上の方々に感謝の意を表します。

なお，本研究に要した費用の一部は，文部省科学研究費（空気と雪粒子の相互作用の研究：代表者石田完教授）より支出された。

文　献

1) 塩谷正雄 1967 防雪柵. 雪氷, **29**, No. 4, 100-106.

2) 小林大二・油川英明・対馬勝年・木下誠一 1980 雪の堆積論 III, —横張り防雪柵の堆雪過程—. 低温科学, 物理篇, **39**, 91-100.

3) 福沢義文・竹内政夫・石本敬志・野原他喜男 1981 防雪柵の性能比較試験. 第 25 回 北海道開発局技術研究発表会論文集, 32-39.

4) Anno, Y. and Konishi, T. 1981 Modelling the effects of a snowdrift-preventing forest and a snow fence by means of activated clay particles. *Cold Regions Science and Technology*, **5**, 43-58.

5) Tabler, R. D. and Jairell, R. L. 1980 Studing snowdrifting problems with small-scale models outdoors. Preprint of Western Snow Conference, April 1980, Laramie, Wyoming.
6) Tabler, R. D. 1980 Self-similarity of wind profiles in blowing snow allows outdoor modeling. *J. of Glaciol.*, **26**, No. 94, 421–434.
7) Tabler, R. D. 1980 Geometry and density of drifts formed by snow fences. *J. of Glaciol.*, **26**, No. 94, 405–419.
8) Tabler, R. D. 1980 Snow fences on Wyoming's interstate highway-80. 昭和55年度日本雪氷学会秋季大会講演予稿集, 171–172.
9) 札幌管区気象台 1973 北海道の気候 (改訂版), p. 283.
10) 竹内政夫・野原他喜男・Tabler, R. D. 1981 防雪柵の野外模型実験. 昭和56年度日本雪氷学会秋季大会講演予稿集, p. 23.
11) Zhonglong, W. and Yuan, C. 1980 Research on prevention of snow-drifts by blower fences. *J. of Glaciol.*, **26**, No. 94, 435–445.
12) 竹内政夫・石本敬志・野原他喜男 1975 吹雪量と飛雪量垂直分布. 雪氷, **37**, No. 3, 114–121.

Summary

Measurements were made of surface shapes of snowdrifts formed around snow fences and distribution of wind speed over the fences and dirfts in winters of 1980–1982. The fences studied in the northern and the northwestern parts of Hokkaido are the horizontal-slat fences having heights F(m) from 2.8 to 5.1 m, porosities of about 20% and bottom gaps from 0.09 F to 0.19 F. The following linear relations were obtained empirically as to a drift behind a fence:

$$A = 12.5\,H,$$
$$H = 0.24\,L + 0.1\,F,$$

where H(m) is the height of the drift, L(m) the distance between the fence and the top of the drift and A(m²) the cross sectional area of the drift between the fence and a point of 30 m leewards from it. A maximum snow-retention capacity, i.e. the area of "equilibrium drift" A_{max}, was estimated here as $A_{max} = 15\,F$, which was much smaller than $A_{max} = 19.3\,F^2$ obtained by Tabler (1980) for Wyoming's horizontal-slat fences.

Distribution of flow-lines of air was deduced on the basis of measurements of wind speed over a fence, the up-wind drift and the lee-wind drift. The result suggests the importance of the effect of interaction between the height and porosity and bottom gap of the fence on the formation of effective drifts. It was also revealed from measurements in a wind tunnel that a net with a porosity of 20～30% reduced the lee-wind speed to 20～30% of natural speed.