

非平衡状態における防雪柵風下の吹き溜まりの比較実験

佐藤 威*・İbrahim Güler**・小杉健二*・佐藤篤司*

Comparative Experiments of Snowdrifts on the leeward of Snow Fences in a non-equilibrium State

Takeshi SATO *, İbrahim GÜLER **, Keiji KOSUGI *, and Atsushi SATO *

* *Snow and Ice Research Group,*

National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan

** *Civil Engineering Department, Faculty of Engineering and Architecture, Gazi University, Turkey*

Abstract

Drifting snow was simulated in a cold wind tunnel using actual snow particles. Snowdrifts on the leeward of snow fences were compared under the same drifting snow conditions. The scale models of nine differently structured snow fences were tested. The development of snowdrift, the catch efficiency of each snow fence and the snowdrift structures in a non-equilibrium state were investigated focusing on the relation to the fence structure.

The main results are as follows : (1) Although snowdrift development depends on the fence structure, generally, the starting point of a snowdrift moves toward the fence over time, the end point of a snowdrift does not move or moves away from the fence, and the peak of a snowdrift moves little. (2) The catch efficiency of a fence decreases with porosity except that the catch efficiency of a fence with a large surface gap is small even though its porosity is small. The maximum height of a snowdrift normalized with the fence height positively correlates with the catch efficiency. (3) Both the starting point and the peak of a snowdrift tend to locate away from the fence as the porosity increases. In the case of fences with small porosity and large surface gap, however, the starting point and the peak of the snowdrift are not close to the fence due to the strong wind coming through the surface gap. The end point tends to locate away from the fence as the porosity increases.

Key words : Snowdrift, Snow fence, Drifting snow, Wind tunnel

1. はじめに

吹雪によって発生する道路上の吹き溜まりや視程の悪化は、冬期間の道路交通の障害や交通事故の原因となり、また建物周辺の吹き溜まりの除雪は雪国の日常生活にとって大きな負担となることもある。このような吹雪による災害を防ぐために、防雪柵や防雪林を道路際に設置したり、道路構造を工夫するなどの対策がとられてきている。

防雪柵には、柵の下部に間隙がなく主として風上に雪

を溜める方式（吹き止め柵）、柵の下部に間隙を設け風上と風下に雪を溜める方式（吹き溜め柵）、張立材（防雪板とも言う）を風上に傾斜させ下部の間隙に風を集中させ、風下にある道路上の雪を吹き払う方式（吹き払い柵）の 3 種類がある。吹き止め柵は吹き溜まり防止のほかに視程障害の緩和効果があり、吹き溜め柵は吹き溜まり防止効果、吹き払い柵は視程障害緩和効果をねらったものである。

本報告では吹き溜め柵のみ扱うが、その防雪性能は柵

* 独立行政法人 防災科学技術研究所 雪氷防災研究部門

** ガジ大学工学部土木工学科

高、空隙率、下部間隙などの柵の構造に依存する。ここで、空隙率とは、下部間隙を除く柵の面積に対する張立材以外の面積の割合で、我が国では 20 ~ 25% が一般的である。また、下部間隙は、その下を風が通ることにより柵の近くに吹き溜まりができるのを防ぎ、防雪柵が雪に埋まって損傷しないようにすると同時に、柵の防雪機能を持続させる効果がある。吹き溜め柵には垂直に設置するものや風下に傾斜して設置するものがある。また、張立材は水平のものと垂直のものがあり、空隙率も千差万別である。我が国では垂直な支柱に金属製の張立材を水平に取り付けるのが一般的であるが、最近ではプラスチック製の張立材や、穴をあけた張立材も製品化されている。

道路などの吹き溜まりを防止するために防雪柵を設置するには、その場所の吹雪の条件だけでなく、土地の制約なども考慮し、適切な構造を選び適切に配置する必要がある。このため、これまでに防雪柵の周囲の吹き溜まり形状と柵の構造に関する研究が行われてきた。大別すると、実物の防雪柵を野外に設置して観測を行ったもの（例えば、秦野と今井，1969；Tabler，1980a；成瀬，1982；竹内ほか，1984；Takeuchi，1989；Brugnot，1989）と、防雪柵の縮小模型を風洞内や野外に設置して実験を行ったもの（例えば、Tabler，1980b；Iversen，1981；Iversen，1984；Anno，1984；Isyumov *et al.*，1989）がある。しかし、それぞれの観測や実験の条件が異なるため、結果を相互に比較することは困難である。

我が国では、防雪柵の設置の指針として「新編防雪工学ハンドブック」などが公表されている。これらは、従来の研究で明らかになった平衡状態（柵の周囲の吹き溜まりが最大となった状態で、こうなると防雪柵の機能は果たさなくなる）の吹き溜まりに関する知見に基づいている。しかし、現行の指針に基づいて設置されている防雪柵の周囲の吹き溜まりが、平衡状態に達することは少ないこともしばしば指摘されている。従来の研究では、平衡に達する以前の吹き溜まりについて詳しく扱ったものがあまりない。このため現行の指針は平衡状態の知見に基づき策定されたと推察されるが、より適切な防雪柵

の構造や配置を探るためには、非平衡状態の吹き溜まりについても研究を進める必要がある。これにより、現行の指針に従って柵構造を決定したとしても、より適切な配置が可能となるであろう。

本研究では構造の異なる 9 種類の吹き溜め柵の縮小模型を低温風洞内に設置し、吹雪状態を再現して、柵の周囲の吹き溜まりの発達過程を調べた。Gürer *et al.* (2002) の解析に引き続き、特に吹き溜まりが平衡状態に達する以前に注目して、吹雪の捕捉率ならびに吹き溜まりの構造などと柵構造との関係を調べ、さらに、吹き溜まりと模型柵風下の風の分布との関係を検討した。得られた知見は防雪柵の設計や配置に関して有用なものと考えられる。

2. 実験

2.1 防雪模型柵

使用した模型は 9 種類で、柵高、空隙率、下部間隙、柵の傾きなどを表 1 にまとめた。表中の略称は以下で使用するものである。いずれも文献や写真に載っているプロトタイプ（原型）の寸法から、なるべく相似になるように製作したが、部品の寸法が限定されるので、縮尺は柵によって異なり 1/15 ~ 1/23 である。また、完全に相似な構造となっていないものもある。JPN のみ金属製で他の模型柵はすべて木製である。USA と JPN を写真 1 と写真 2 に示す。

2.2 低温風洞

図 1 に示すように風洞は密閉型回流式で、測定部は長さ 14m、幅 1m、高さ 1m である。温度制御（- 30 ~ 25）された低温室内に風洞全体が設置されていて、風洞内の温度をさらに制御するための空調器も内蔵している。風洞内に吹雪が発生しやすいように、測定部の風上端（測定部中央にも移動可能）の底部に吹雪粒子供給装置が取り付けられている。

後述のレーザー距離計や風速計のセンサーなどをトラバース装置に取り付け、測定部内を 3 次元的に走査することができる。トラバース装置はマニュアル操作のほか、プログラムに従って自動的に移動可能となってい

表 1 防雪柵の模型の概要

Table 1 Summary of scale model of snow fence.

柵のタイプ	略称	高さ H [mm]	幅 W [mm]	空隙率 E [%]	下部間隙 G [mm]	傾き α [°]	縮尺
American	USA	158	762	32	15	75	1/20
Japanese	JPN	178	610	16	35	90	1/20
Norwegian	NOR	97	700	30	10	90	1/23
Turkish	TUR	67	750	25	12	90	1/19
Canadian	CAN	90	800	50	10	90	1/15
Swedish	SWE	80	800	40	10	60	1/20
French	FRE	100	805	44	20	90	1/20
Chinese	CHN	275	755	20	75	90	1/20
Russian	RUS	100	760	62	5	60	1/20

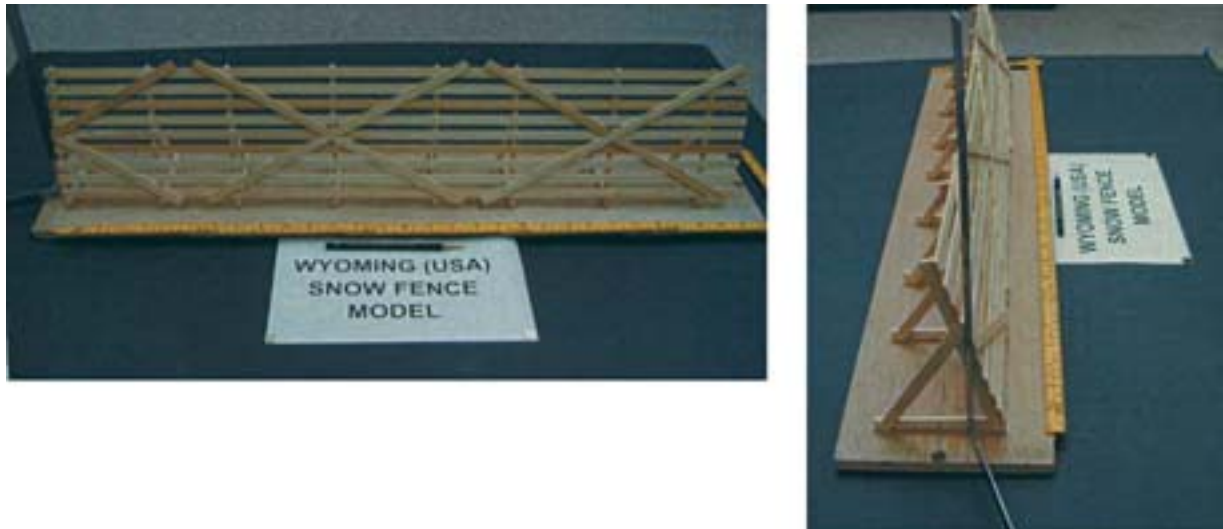


写真1 American タイプの柵 (左: 正面, 右: 側面)

Photo 1 American type snow fence (left : front view, right : side view).

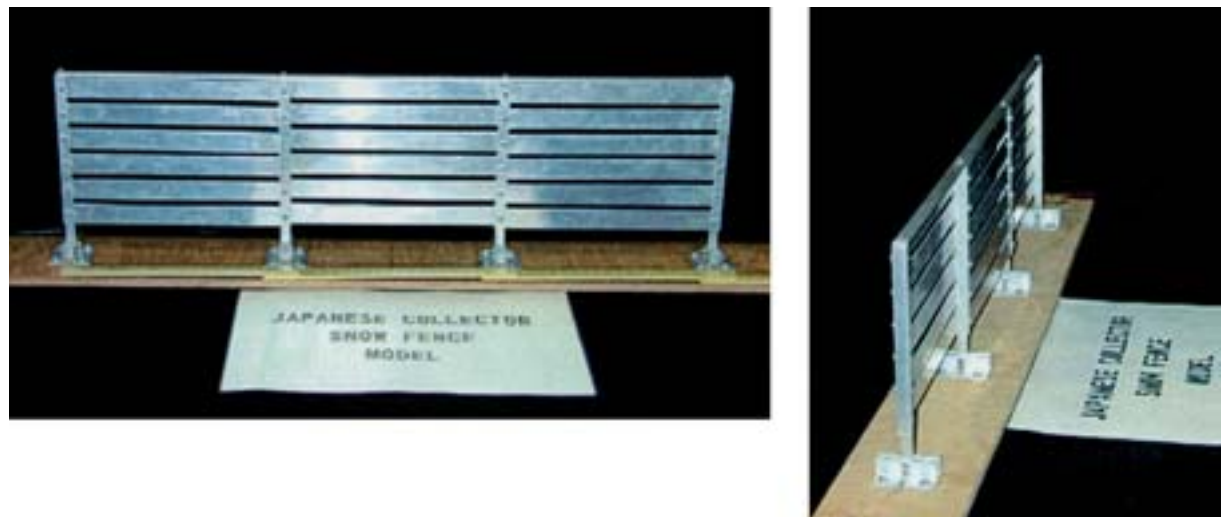


写真2 Japanese タイプの柵 (左: 正面, 右: 側面)

Photo 2 Japanese type snow fence (left : front view, right : side view).

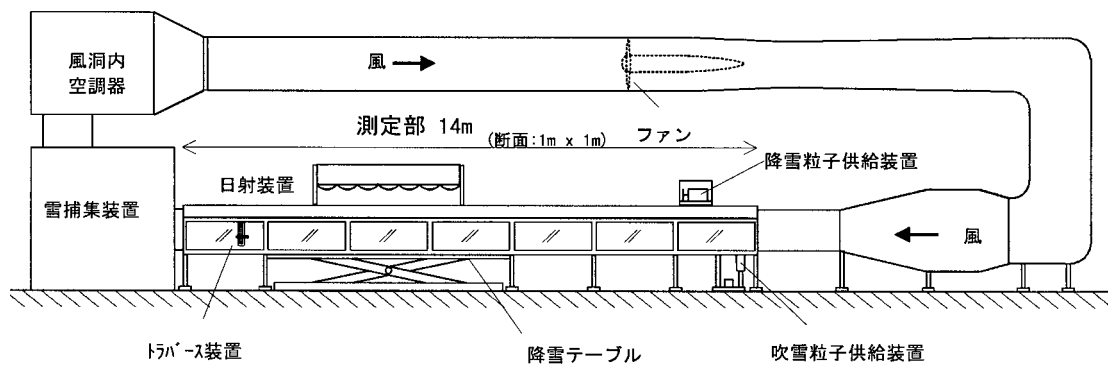


図1 低温風洞の模式図

Fig. 1 Schematic diagram of cold wind tunnel.

る。また、風や吹雪の流れ、ならびに個々の飛雪粒子の運動を可視化するため、レーザー光をシート状にして照射する可視化装置も使用可能である。

2.3 実験方法

模型柵を測定部風上端から 4.5m 下流に設置し、その風上側 1.4m までの範囲にステンレス板を置き、粗度を増すためその表面にガーゼを貼り付けた。さらにその風上には雪を敷き詰めたが、表面に霧を吹き、硬い雪面として実験を行った。また、模型柵の風下に置いたステンレス板にもガーゼを張り付けたが、その範囲は吹き溜まりの規模に応じて変えた。実験条件を表 2 にまとめた。柵の種類によらず風洞風速は 7m/s に、風洞温度は約 -15 とした。吹雪粒子供給装置には、保存しておいた雪(しまり雪)を一度砕いて粒子となったものを入れた。吹雪量をおよそ 0.13g/(cm・s) と一定にしたが、正確には供給した雪の密度に応じて吹雪量は多少異なっていた。測定時間は柵により異なるが最小 35 分、最大 210 分である。

吹き溜まりの例を写真 3 に示す。柵の風上側には吹き溜まりはあまり発達しなかった。最も発達した JPN の場合でもその量は風下の吹き溜まり量に比べ十分小さかったので、以下の解析では無視することにする。なお、風上側の吹き溜まりは雪質に大きく依存することが知られている(竹内ほか, 1984)。本実験は低温・乾燥条件で行ったため、雪粒子の付着力が小さくこのような結果になったものと考えられる。また、風洞風速が大きいため柵の風上側で吹雪が飽和に達することができなかった可能性もある。

吹き溜まりの発達速度に応じて適当な時間間隔で風を止め、レーザー距離計のセンサーを吹き溜まりの中心軸上(縦断面形状測定用)で風向に沿って、および吹き溜まりの適当な位置において吹き溜まりの中心軸と直角方向(横断面測定用)に移動させ、吹き溜まり形状の測定を行った(写真 4)。その際、あらかじめ吹き溜まりがない状態での測定値を差し引いて吹き溜まりの高さの分布の補正を行った。また、最後の吹き溜まり形状の測定が

表 2 実験条件

Table 2 Summary of experimental conditions.

柵のタイプ	測定時間 [min]	風速 [m/s]	気温 [°C]	供給雪の密度 [g/cm ³]	吹き溜まりの密度 [g/cm ³]
American	210	7 ¹⁾	-15	0.46	0.45
Japanese	55			0.45	0.39
Norwegian	35			0.44	0.42
Turkish	90			0.48	0.46
Canadian	150			0.47	0.49
Swedish	125			0.47	0.50
French	120			0.46	0.49
Chinese	125			0.45	0.47
Russian	125			0.46	0.46

1) 風洞中心における値



写真 3 吹き溜まりの例 (Turkish タイプ)
Photo 3 Example of snowdrift (Turkish type).



写真 4 トラバース装置に取り付けたレーザー距離計のセンサー
Photo 4 Sensor of laser distance meter attached to the traverse device.

終了した後、吹き溜まりの総重量と密度の測定を行うとともに、雪粒子の顕微鏡写真を撮り、粒径解析を行った。

模型柵の風下の風速測定は、吹き溜まりのない状態で超小型超音波風速計を使用して行った(写真5)。この風速センサーは、風速の直交3成分の測定が可能で、応答速度は20Hzまでである。構造上の制約から空間分解能は5cmであるため、5cm以下の空間スケールの風の場合は平均化されてしまう。また、風速センサーの中心は底面から5cm以下には設置できない。

3. 結果

3.1 吹き溜まりの発達過程

図2のように柵の風下に形成される吹き溜まりの構造を表すパラメータを定義する。 h_{\max} は吹き溜まりの最大高さ(雪丘の高さ)、 X_1 、 X_2 、 X_3 はそれぞれ吹き溜まりの始点の位置、雪丘頂の位置、終点の位置である。図3に単位幅あたりの吹き溜まり量 Q ならびに柵高 H で規格化した h_{\max} 、 X_1 、 X_2 、 X_3 の時間変化を示す。 Q は吹き溜まりの風洞中心軸上の縦断面積(柵の風下のみ)に吹き溜まりの雪の密度をかけて求めた。

Q の時間変化を見ると、CANでは120分を過ぎてからは変化がなく、吹き溜まりが平衡状態に達していると判断される。TUR、SWE、FRE、RUSも増加傾向が時間とともに小さくなり、平衡状態に近づきつつあると考えられる。一方、USA、JPN、NOR、CHNは Q が増加し続けていて平衡状態には至っていない。

h_{\max}/H は時間とともに単調増加し、USAとCANは一定値に達している。 X_1/H は時間とともに単調減少する(すなわち吹き溜まりの始点の位置が柵に近づく)ものや時間的に変動するものがある。変動の大きなRUSを除くすべての柵で X_2/H は吹き溜まりの形成初期からあまり変わらない。すなわち、雪丘頂の位置はあまり時間的に変化しないことがわかる。RUSの吹き溜まりの表面

はなめらかでなく波状のパターン(リップル)が発達していた。しかも、そのパターンは時間とともに移動していた。リップルを平滑化したときの吹き溜まり形状はなだらかであるため、最も高いリップルの位置で定義した X_2 は時間的に大きく変動したものと考えられる。 X_3/H は一定もしくは時間的に単調増加する(すなわち、吹き溜まりの終点の位置が柵から遠ざかる)傾向がある。

すでに平衡状態に達したCANでは、吹き溜まりの形状を表すパラメータである h_{\max}/H 、 X_1/H 、 X_2/H 、 X_3/H もほぼ一定値に達しているが、平衡状態に近いTUR、SWE、FRE、RUSでは、 h_{\max}/H 、 X_1/H 、 X_3/H のいずれかが一定値に達していない。すなわち、TURでは X_3/H が、SWEでは X_1/H が、FREとRUSでは X_1/H 、 X_3/H が時間的に変化している。このことは、柵の構造によって吹き溜まりの発達過程が異なることを意味する。

実際の吹き溜まりの発達過程の典型例を図4に示す。図4aはCANで h_{\max} と X_1 が早い段階で一定値となった後も吹き溜まりの尾部が発達するパターン(A)である。図4bはSWEで、吹き溜まりは風上、風下方向ともに伸び、かつ雪丘頂も高くなるパターン(B)である。他の柵の測定結果より、TUR、USAはパターンAで、FRE、JPN、NOR、CHNはパターンBであることがわかった。しかし、吹き溜まりの発達パターンと防雪柵の構造(柵高、空隙率、下部間隙)との関係ははっきりしなかった。

3.2 防雪柵の風下の風速分布

模型柵の風下において、柵からの距離を変えながら測定した水平風速の鉛直分布の例を図5a(JPN)と図5b(FRE)に示す。Uは風速の柵に直交する水平成分で、10秒平均値である。使用した風速センサーの大きさの制約から、柵高の小さなFREでは、柵高の大きなJPNに比べて下部の測定値はない。JPNでは、柵の近く(X/H の小



写真5 トラバース装置に取り付けた超音波風速計のセンサー

Photo 5 Sensor of ultrasonic anemometer attached to the traverse device.

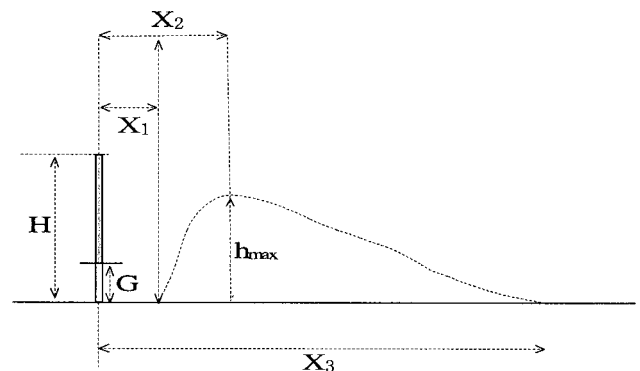


図2 防雪柵と吹き溜まりの構造のパラメータ(H : 柵高, G : 下部間隙, X_1 : 始点の位置, X_2 : 雪丘頂の位置, X_3 : 終点の位置, h_{\max} : 雪丘の高さ)

Fig. 2 Parameters of snow fence and snowdrift structure (H : fence height, G : surface gap, X_1 : starting point, X_2 : peak, X_3 : end point, h_{\max} : maximum height).

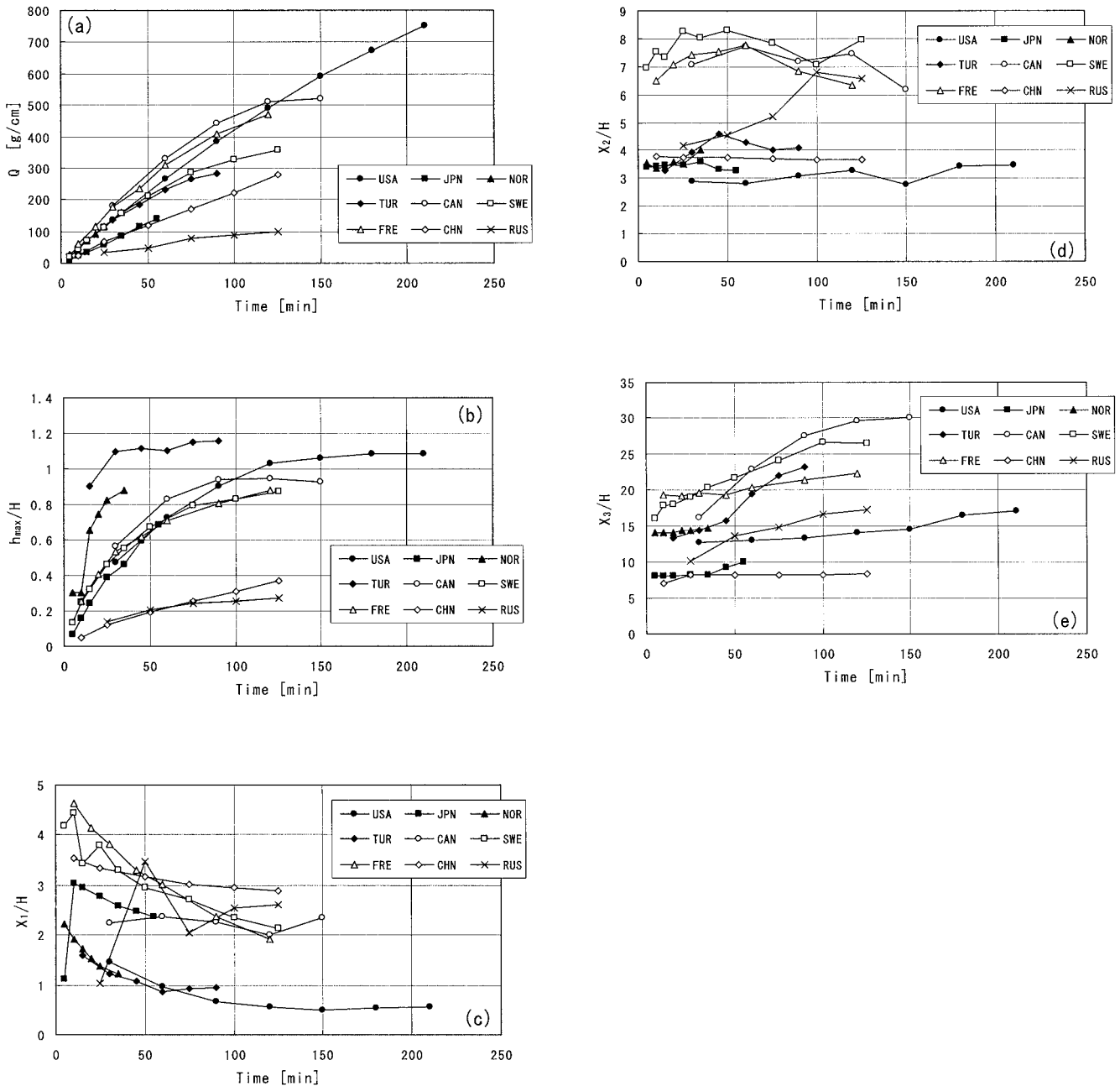


図 3 単位幅当たりの吹き溜まり量と柵高で規格化した吹き溜まり構造のパラメータの時間変化 (a) Q , (b) h_{max}/H , (c) X_1/H , (d) X_2/H , (e) X_3/H .

Fig. 3 Temporal changes of the snowdrift volume per unit width, Q , and structure parameters of the snowdrift normalized with the fence height. (a) Q , (b) h_{max}/H , (c) X_1/H , (d) X_2/H , (e) X_3/H .

さな所)で風速の低下の大きな範囲 (Z/H が 0.4 ~ 1) とさらに下層に風速が強い部分が存在するのが特徴的である。特に $X/H = 2$ では風速が負になり逆向きの流れとなっている。FRE では、柵の近くで風速が弱められている傾向は見られるが、逆向きの流れは存在せず、また、下層の強風も顕著ではない。

風洞の中心軸を含む縦断面内の風ベクトルの分布を図 6a (JPN) と図 6b (FRE) に示す。JPN の場合は柵の風下に 3 つの渦が存在するが、FRE の場合には存在していない。また、JPN では柵の下部間隙から吹き込む強い風

(以下、ジェットという)も認められる。

図 5 と図 6 はいずれも平均状態を表すものであるが、図 7a (JPN) と図 7b (FRE) に平均風速とともにバーで σ (柵に直交する風速水平成分の変動の標準偏差) を示した。これらの図より、柵の近くにおける風速変動は JPN のほうがかなり大きいことがわかる。しかも、風速の変動範囲は 3σ であるので、JPN の平均風速が負の部分でも瞬間的には風速は正となることもある。すなわち、図 6a で示した渦はあくまでも平均的に存在するものであり、瞬間的には風がかなり乱れた状態であること

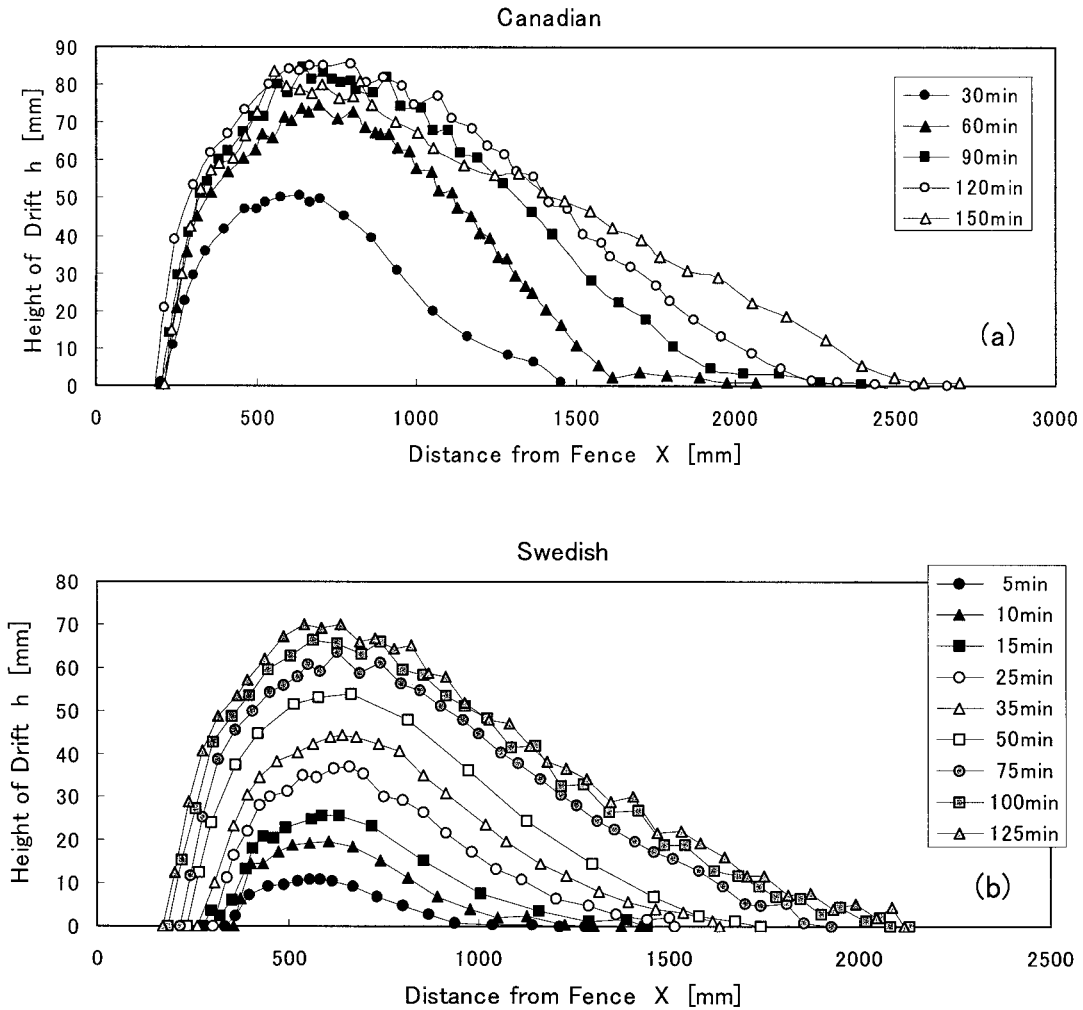


図4 吹き溜まりの時間変化 (a) Canadian タイプ, (b) Swedish タイプ

Fig. 4 Temporal changes of the snowdrift in cross-section. (a) Canadian type, (b) Swedish type.

がわかる。

図8は、柵高より少し下 ($Z = 0.8H$) における水平風速と柵からの距離との関係である。風上における同一高度の風速はおよそ 6m/s である。柵の下部間隙に風が集中して吹き出すジェットが強い JPN, CHN では、風速は柵近傍で負（すなわち逆風向）となった後に、再び距離とともに正に回復しているが、回復は USA, NOR, TUR より早いのが注目される。また、空隙率の比較的大きな CAN, SWE, FRE は、柵のすぐ風下での風速低下が小さく、ゆっくりと風速が回復している。空隙率の最も大きな RUS は、柵の風下で風速はほとんど変化していない。

3.3 防雪柵の捕捉率と雪丘の高さ

防雪柵による吹雪の捕捉率が大きければ柵周囲の吹き溜まり量は多くなる。竹内ほか (1984) によれば、非平衡状態における捕捉率は柵高によってあまり変わらないことが報告されている。

本研究では、測定開始から 30 分後 (JPN, NOR, SWE は 35 分後, CHN, RUS は 25 分後) までの間について、前述の単位幅あたりの吹き溜まり量 Q を、供給した雪粒

子量から求まる吹雪量で割って捕捉率を定義した。得られた捕捉率と柵高の関係は大きくばらついていて (図は省略), 柵の構造によって捕捉率が大きく異なることを示している。そこで、捕捉率と空隙率の関係を図9に示す。煙をトレーサーとして柵の風下の流れをレーザー光スクリーンで可視化して観察した結果と 3.2 で述べた風速分布より、ジェットの強いもの (JPN, CHN), ジェットがないもの (NOR, CAN, SWE, FRE, RUS), ジェットがあっても弱いもの (USA, TUR) に分類してみると、後二者は空隙率とともに捕捉率は低下するが、前者はその傾向とは異なり空隙率が小さいにもかかわらず捕捉率は小さいことがわかる。これは、ジェットとともに柵の下部間隙を通った飛雪粒子の一部が、吹き溜まらず、さらに風下に移動するためと考えられる。

測定開始から 30 分後 (JPN, NOR, SWE は 35 分後, CHN, RUS は 25 分後) の雪丘の高さを柵高で規格化した h_{\max}/H と捕捉率の関係には正の相関がある (図10)。ばらつきの原因として、吹き溜まりの形状がすべての柵について相似ではないため、 h_{\max}/H と吹き溜まり量が厳密には一対一に対応しないことが考えられる。 h_{\max}/H と

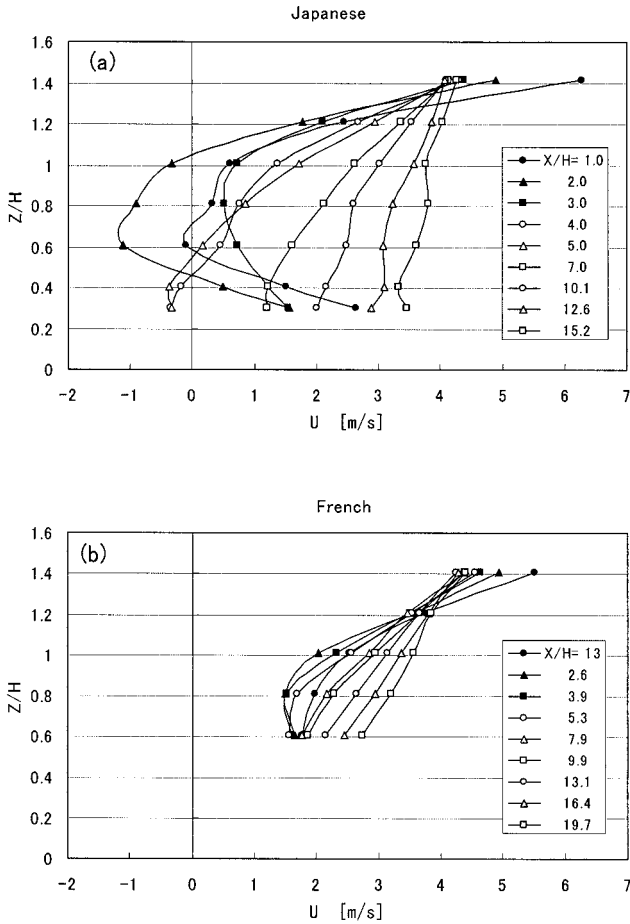


図 5 防雪柵風下における水平風速の鉛直分布 (a) Japanese タイプ, (b) French タイプ

Fig. 5 Vertical profiles of the horizontal wind speed on the leeward of the snow fence. (a) Japanese type, (b) French type.

空隙率の関係 (図 11) についても, 捕捉率と空隙率の関係と同様の傾向が見られる.

3.4 吹き溜まりの形成位置

防雪柵の風下において吹き溜まりがどこにできるかは, 防雪対象である道路などと防雪柵の間隔を決定したり, 柵自体が雪に埋まる可能性の検討などに必要な情報である. そこで測定開始から 30 分後 (JPN, NOR, SWE は 35 分後, CHN, RUS は 25 分後) における吹き溜まりの始点の位置 X_1 , 雪丘頂の位置 X_2 , 終点の位置 X_3 について, 柵の構造との関係を調べた.

図 12a は X_2/H と柵高 H の関係である. H が 150mm をこえるものは H によらず X_2/H がほぼ一定の値になっている. また, H が 100mm 前後の柵の X_2/H はかなりばらついている. このことは, X_2/H は柵の構造 (空隙率や下部間隙) に依存することを示唆している. 図 12b は X_2/H と空隙率の関係である. ジェットの強い JPN と CHN を除くと, X_2/H は空隙率とともに増大する傾向にある. なお, ここで RUS の X_2/H には前述の理由から曖昧さがあるので考察から除外した. 空隙率が小さい JPN

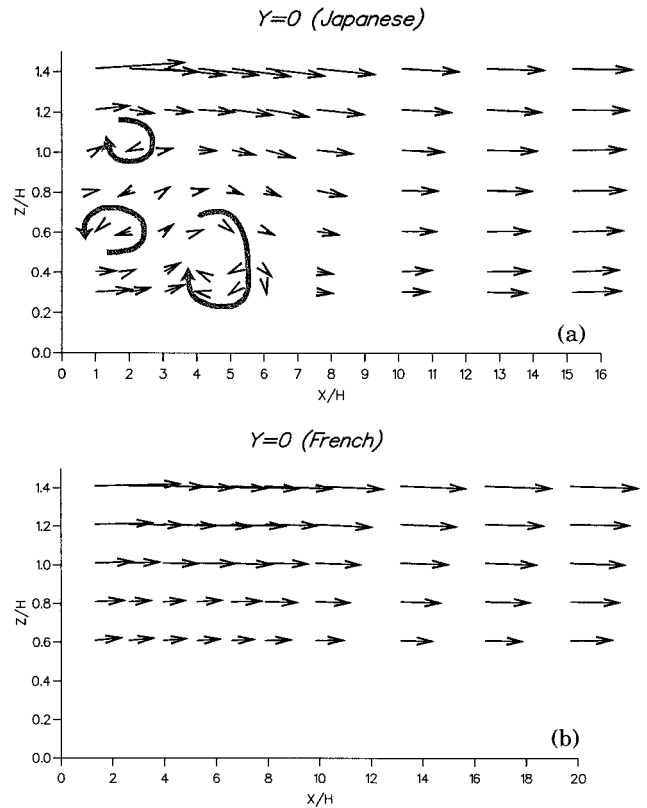


図 6 防雪柵風下における縦断面内の風ベクトルの分布 (a) Japanese タイプ, (b) French タイプ

Fig. 6 Wind vectors in longitudinal section on the leeward of the snow fence. (a) Japanese type, (b) French type.

と CHN では, この傾向からやはらずれて大きめの X_2/H となっているが, 強いジェットによって雪丘頂が風下にならずれたと考えられる.

図 13 は X_1/H と空隙率の関係である. これは X_2/H と空隙率の関係と同様の関係であるが, ばらつきはこちらのほうが大きい. また, X_2/H の場合 (図 12b) に比べ, ジェットの強い柵の X_1/H が, ジェットのない柵およびあっても弱い柵の傾向からより離れているのは, 吹き溜まりの頂部の位置よりも開始位置のほうがジェットの影響を受けやすいことを示している.

上記の X_2/H および X_1/H と空隙率の関係から, 吹き溜まりの風上側の立ち上がり勾配に相当する $(X_2-X_1)/H$ を求め図 14 に示した. この図では, 空隙率とともに $(X_2-X_1)/H$ が大きくなり立ち上がり勾配が緩くなる傾向に見えるが, 実際は, ジェットの強い柵は勾配が小さく, また, ジェットがない柵およびあっても弱い柵は空隙率とともに勾配が緩くなる傾向になっていることに注意する必要がある.

次に, 吹き溜まりの尾部の長さに対応する $(X_3-X_2)/H$ と空隙率の関係を図 15 に示す. ジェットの強い柵の吹き溜まりの尾部は短く, ない柵およびあっても弱い柵の尾部は長い傾向がある. 後者については, 空隙率が 25

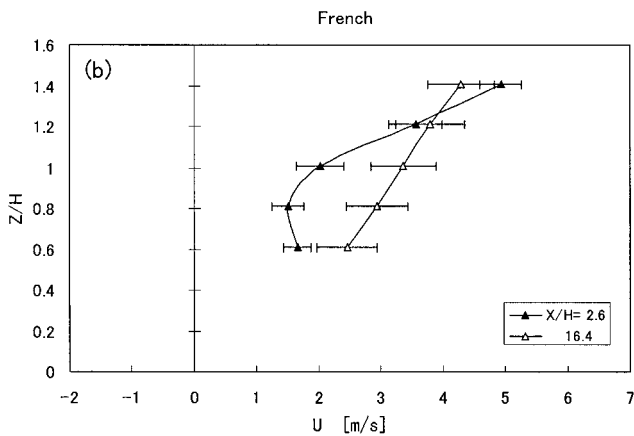
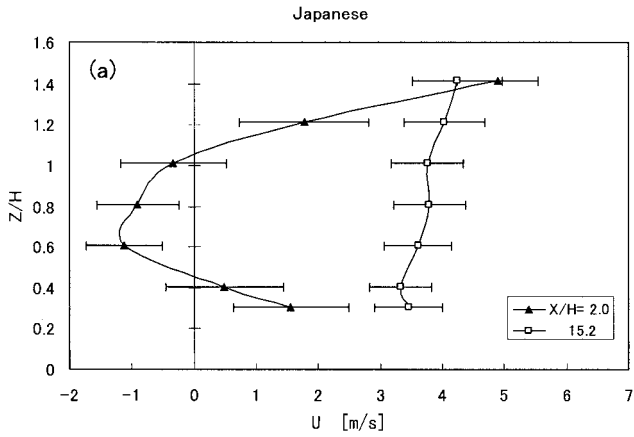


図7 防雪柵風下における水平風速の平均と変動の標準偏差(バーで示した)の鉛直分布 (a) Japanese タイプ, (b) French タイプ

Fig. 7 Vertical profiles of the mean horizontal wind speed together with its fluctuation (standard deviation), denoted by the bar, on the leeward of the snow fence. (a) Japanese type, (b) French type.

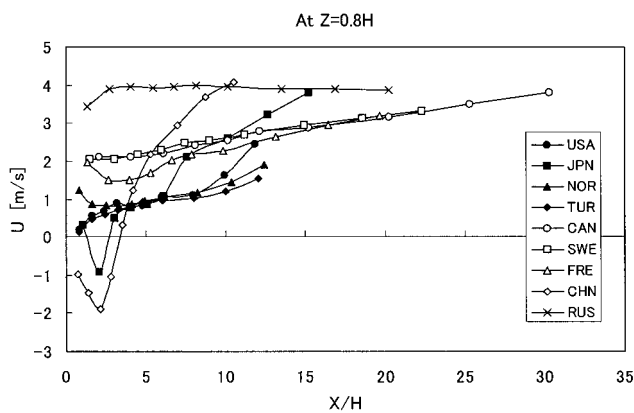


図8 $Z = 0.8H$ における水平風速と柵からの距離との関係

Fig. 8 Relation between the horizontal wind speed at $Z = 0.8H$ and the distance from the fence.

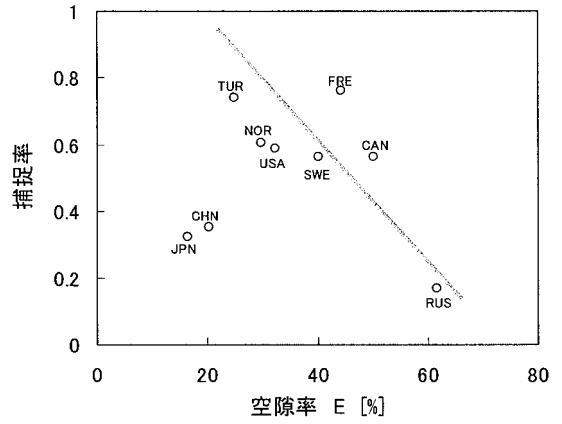


図9 捕捉率と空隙率の関係. 実線は, ジェットのない柵およびあっても弱い柵の傾向を示す.

Fig. 9 Relation between catch efficiency and porosity. Solid line shows the tendency of the fences without jet and those with weak jet.

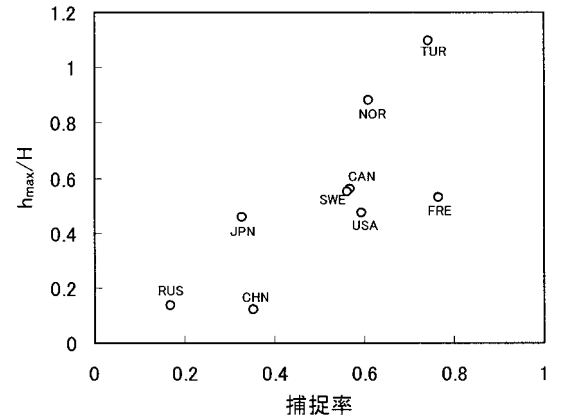


図10 h_{max}/H と捕捉率の関係

Fig. 10 Relation between h_{max}/H and catch efficiency.

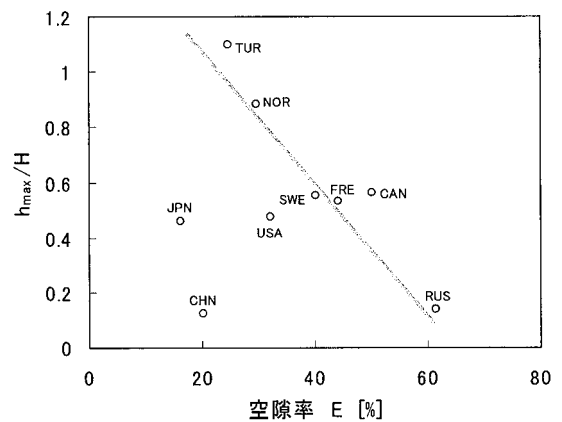


図11 h_{max}/H と空隙率の関係. 実線は, ジェットのない柵およびあっても弱い柵の傾向を示す.

Fig. 11 Relation between h_{max}/H and porosity. Solid line shows the tendency of the fences without jet and those with weak jet.

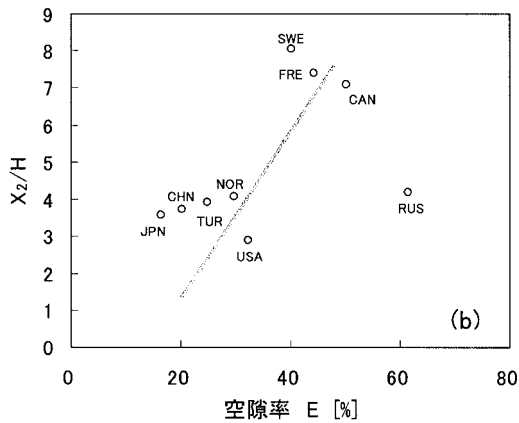
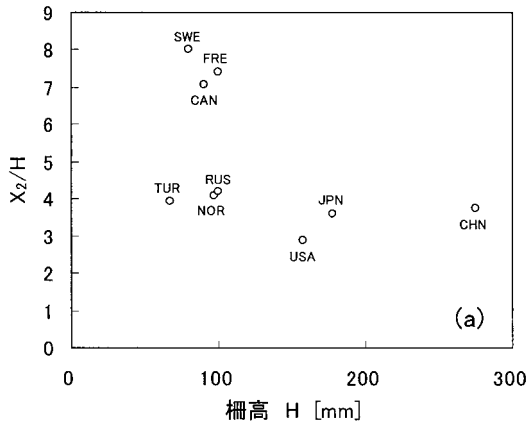


図 12 (a) X_2/H と柵高の関係, (b) X_2/H と空隙率の関係. 実線は, ジェットの無い柵およびあっても弱い柵の傾向を示す.

Fig. 12 (a) Relation between X_2/H and fence height, (b) Relation between X_2/H and porosity. Solid line shows the tendency of the fences without jet and those with weak jet.

~ 50% 程度の柵では空隙率に依存しないが, RUS まで含めてみると空隙率とともに吹き溜まりの尾部が短くなる傾向があるようにも見える. 吹き溜まりの尾部の発達には柵の風下の風の強弱に左右されると考えられる. すなわち, 風が強くと飛雪粒子が雪面に落下してもさらに風下に移動するため尾部は短く, 風が弱いとそこにとどまるため尾部が長くなるであろう. また, 柵の風下の風は, 柵による影響に加え雪丘そのものの影響を受けると考えられる. すなわち, 雪丘が高いと雪丘によってさらにその風下の風が弱められてしまう. そこで, $(X_3-X_2)/H$ と $X = 10H$, $Z = 0.8H$ における風速との関係 (図 16a), および h_{max}/H との関係 (図 16b) を調べた. 図 16a では, ジェットが強い柵 (JPN と CHN) と, ない柵およびあっても弱い柵 (RUS を除く) の 2 つのグループに分かれ, 吹き溜まりの尾部は前者のほうが短い. また前者および後者の風速依存性ははっきりしない. 図 16b の h_{max}/H 依存性については, ジェットの強い柵 (JPN と CHN) は h_{max}/H が小さく吹き溜まりの尾部は短い, ジェットの無い柵およびあっても弱い柵 (RUS を除く) は h_{max}/H が

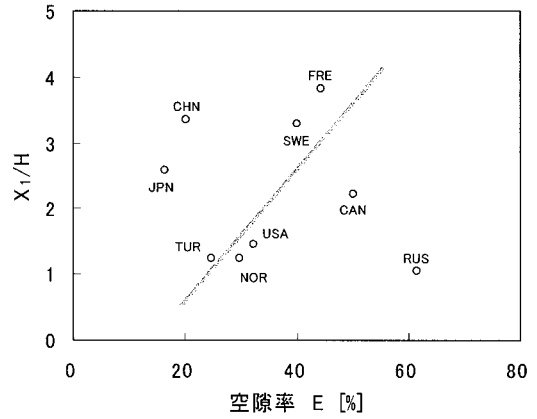


図 13 X_1/H と空隙率の関係. 実線は, ジェットの無い柵およびあっても弱い柵の傾向を示す.

Fig. 13 Relation between X_1/H and porosity. Solid line shows the tendency of the fences without jet and those with weak jet.

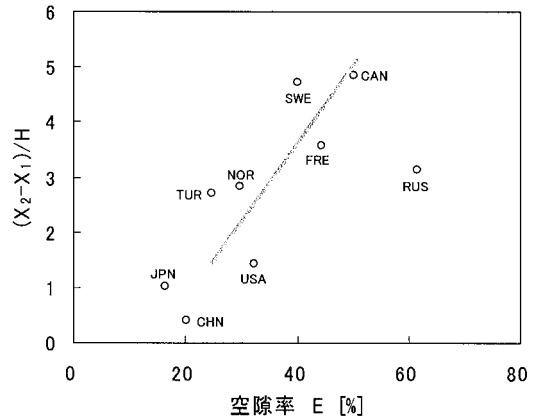


図 14 $(X_2-X_1)/H$ と空隙率の関係. 実線は, ジェットの無い柵およびあっても弱い柵の傾向を示す.

Fig. 14 Relation between $(X_2-X_1)/H$ and porosity. Solid line shows the tendency of the fences without jet and those with weak jet.

大きく吹き溜まりの尾部は長いものの, 両者とも吹き溜まりの尾部の長さの h_{max}/H 依存性ははっきりしない. しかし, 図 16 より, 少なくともジェットが強いものについては, 柵の風下の風速の回復が早いため, また, 雪丘の高さが低いためその風下の風もさほど弱められず, 吹き溜まりの尾部が短いと考えることができそうである.

柵の設置に際して重要となる柵から吹き溜まりの終点までの距離 X_3/H と空隙率の関係を図 17 に示した. X_3/H は $(X_3-X_2)/H$ と X_2/H の和であり, 雪丘が最大となる位置と尾部の長さに依存する. ジェットが強い柵では $X_3/H < 10$, ない柵およびあっても弱い柵 (RUS を除く) では空隙率とともに増大する傾向があり 20 程度まで達する.

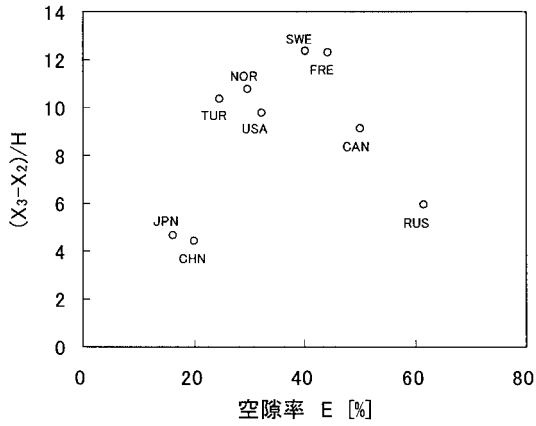


図 15 $(X_3 - X_2)/H$ と空隙率の関係

Fig. 15 Relation between $(X_3 - X_2)/H$ and porosity.

4. 議論

4.1 従来の結果との比較

ここでは、非平衡状態に注目した従来の研究結果と本研究の結果を比較する。Price (1961) は、同じ柵高で空隙率の異なる柵を用いた野外実験を行い、吹き溜まり構造の時間変化を報告している。柵の下部間隙については不明であるが、吹き溜まりが非平衡状態にあるときに、空隙率が大きくなると雪丘の高さは減少、吹き溜まりの始点、終点、および雪丘頂は柵より遠ざかる傾向を示した。これらは、本実験における下部間隙からのジェットのない柵、およびあっても弱い柵に対する傾向と一致する。

また、Tabler (1980b) は本研究で用いた American タイプの防雪柵を用いた野外観測を行うとともに、同じ構造で柵高が 3.8m の柵の 1/30 模型を凍った湖の氷の上に置き、それぞれ吹き溜まりの発達過程を調べた。いずれの場合も、吹き溜まりの発達中は、本研究で得た吹き溜まり形状に近い結果を得た。また、雪丘の高さ (h_{max}/H) が本研究で得た 30 分後の値である 0.5 となったときの吹き溜まりの終点の位置 (X_3/H) は 15 程度となり、本研究で得た 13 とほぼ一致する。

4.2 平衡状態に至るまでの時間と初期捕捉率の関係

防雪柵の風下に形成される吹き溜まりによっても、柵の風下の風の分布が変化し、防雪柵の捕捉率が変化すると考えられる。吹き溜まりが平衡状態になると、吹き溜まり量はそれ以上増えず柵の防雪機能はなくなる。このときの吹雪の捕捉率は 0 となるので、捕捉率は初期の値から徐々に低下していくであろう。ここでは、測定終了までの平均捕捉率と測定開始 30 分後 (JPN, NOR, SWE は 35 分後, CHN, RUS は 25 分後) までの平均捕捉率を比較するとともに、平衡状態に至るまでの時間との関係を検討する。

図 18 は測定終了まで (柵のタイプにより時間は異なる) の平均捕捉率と測定開始から 30 分後までの平均捕捉率 (以下、初期捕捉率という) の関係である。両者が一致しているのは測定時間が 35 分の NOR、ほぼ一致し

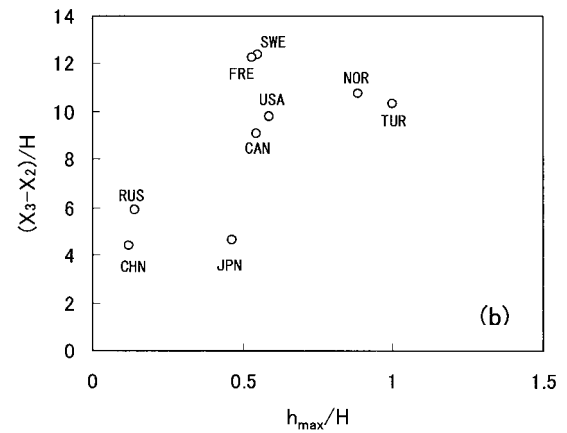
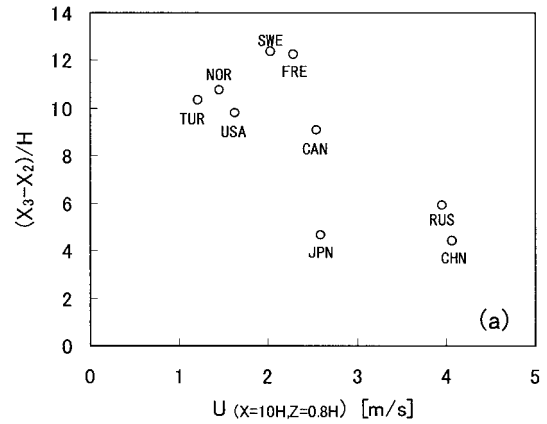


図 16 (a) $(X_3 - X_2)/H$ と防雪柵風下の風速との関係、(b) $(X_3 - X_2)/H$ と h_{max}/H の関係

Fig. 16 (a) Relation between $(X_3 - X_2)/H$ and the wind speed on the leeward of the snow fence, (b) Relation between $(X_3 - X_2)/H$ and h_{max}/H .

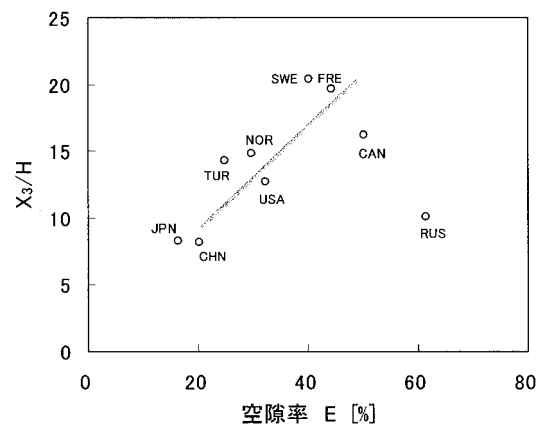


図 17 X_3/H と空隙率の関係。実線は、ジェットのない柵およびあっても弱い柵の傾向を示す。

Fig. 17 Relation between X_3/H and porosity. Solid line shows the tendency of the fences without jet and those with weak jet.

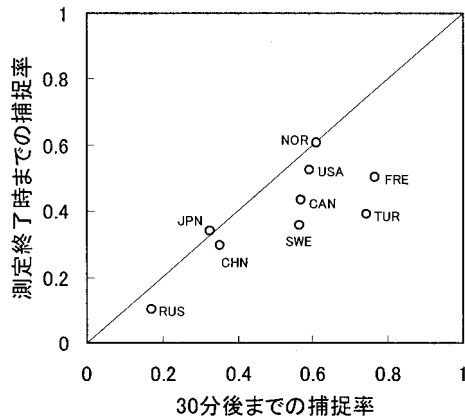


図 18 測定終了時までと 30 分後までの平均捕捉率の比較

Fig. 18 Comparison of the mean catch efficiency until the end of measurement with that in the first 30 minutes.

ているのは測定時間が 55 分の JPN である。これら以外は、いずれも初期捕捉率が大きく、捕捉率が時間とともに低下することを示している。125 分後には平衡状態に達しつつある RUS と、120 分後には同じく平衡状態に達しつつある FRE の初期捕捉率はそれぞれ 0.17 と 0.76 で、かなり異なっている。また、初期捕捉率が 0.59 の USA は 210 分後においてもまだ平衡状態に達していないのに対し、0.57 の CAN は 150 分後にはすでに平衡状態に達している。

このように、初期捕捉率と平衡状態に至るまでの時間の間には必ずしも一義的な関係はない。このことは、平衡状態における吹き溜まりの構造は、防雪柵と風下の吹き溜まりによって作られる柵風下の風の分布に対応するものであり、平衡状態が実現するのに要する時間も捕捉率の大小とは直接関係しないことを示唆している。

4.3 ジェットの形成と空隙率

本研究より、防雪柵の下部間隙から吹き込む強い風（ジェット）が防雪柵の捕捉率や、吹き溜まりの位置、雪丘の高さなどに影響を与えることが示された。ここでは強いジェットの発生する条件について検討する。

柵の空隙率が大きくなると下部間隙があってもそこに風が集中しなくなり、強いジェットはできないと考えられる。また、空隙率が同じで下部間隙が異なる場合には、下部間隙が小さいほど風の集中が強まるようにも思えるが、一方、地表面近くの弱い風のみ集中するのでジェットは弱くなるかもしれない。従って、ジェットが強いための条件としては、空隙率が小さく適度な下部間隙が必要と考えられる。

4.4 風洞実験結果の野外への適用

本研究では、風洞内に防雪柵の縮小模型を置き、風上より実際の雪粒子を使って吹雪を発生させたが、従来の風洞実験で雪粒子を使ったものはない（雪粒子を使った実験は Tabler (1980b) によるもののみであるが、これは

野外で行ったものである）。模型柵に対する飛雪粒子の大きさの比は野外の実物の柵の場合より遙かに大きい。また、風洞内では吹雪はほとんど跳躍運動をする飛雪粒子からなるが、模型柵の大きさ（高さ）に対する飛雪粒子の跳躍高さ（跳躍距離）の比は野外に比べ大きい。さらに野外では浮遊運動をする飛雪粒子も存在する。このような野外とは異なる条件下で得られた実験結果と、野外における実際の現象の対応を検討し、さらに実験時の風速や時間から実際の風速や時間を換算するには、相似則の議論が不可欠である。また、異なる模擬雪を使った実験結果同士を比較する場合も同様である。模型柵を用いた吹き溜まりの風洞実験に関する相似則については、これまでに Tabler (1980b), Anno (1984), Iversen (1984), Kind (1986), Isyumov *et al.* (1989) らによっても検討されているが、現段階では必ずしも一致した結論は得られていない。雪粒子を用いた相似則の詳細な議論は別の機会に譲り、本研究においては若干の考察をするにとどめる。

防雪柵の風下の吹き溜まりは、柵の空隙や下部間隙を通り抜けた跳躍粒子が柵の風下にできる渦の中で浮遊粒子に変わり、それが沈降して雪面上に堆積し形成されると言われている (Takeuchi, 1989)。実験では模型柵の上方を通過する跳躍粒子も見られたが、模型柵の周囲の飛雪粒子の運動を可視化して観察したところ、跳躍して模型柵の風下に入り込んだ飛雪粒子や、柵の空隙や下部間隙を通り抜けた飛雪粒子のなかには、移動速度が低下したり風上に向かうものもあり、それらは野外での現象に近いものと考えられる。

上記のことは、模型柵の周囲の吹き溜まりの形状が周囲の風の分布に依存していることを示唆している。そこで、模型柵と実物の柵の周囲の流れの相似性について検討する。流れの相似性はレイノルズ数で規定され、小さな模型を使う場合には風速を実際より大きくしなければレイノルズ数は一致しない。しかし、自然風は乱流状態にあり、また模型柵は風洞内に形成されている乱流境界層内にあり、いずれもレイノルズ数は非常に大きな値になっている。このような場合は、流れの相似性はあまりレイノルズ数によらないといわれている。従って、本研究でも流れの相似性に関しては特に問題はなく、本研究手法は妥当であると考えられる。

最後に、時間の相似性について考える。たとえば、風洞実験で 30 分後の吹き溜まりの状況が野外では何時間後に相当するかという問題である。風洞実験で風上から供給する吹雪の強さと野外での吹雪の強さが同じ場合を考え、実物柵と模型柵の捕捉率は同程度と仮定できるなら、模型柵のほうが大きさが小さいぶん短い時間で吹き溜まりは平衡状態に達すると考えられる。しかし、Isyumov *et al.* (1989) が述べているように、模型実験で時間の相似性を実現するのは困難である。このことは、実験結果と野外での観測結果を比較する際にどのように時間を対応させるかという基準がないことを意味する。前述の通り、American タイプの柵については、模型柵を

用いた風洞実験の結果と実物の柵を用いた野外での観測結果は良く一致しているが、一方で、竹内ほか(1984)は、野外で柵の空隙率、下部間隙、構造が等しく高さの異なる吹き溜め柵の風下の吹き溜まり形状が、非平衡状態においては相似にならないことを指摘している。このような野外における観測結果と模型柵を用いた実験結果を対応させるための時間の基準を確立するためには、野外において吹雪条件と非平衡状態の吹き溜まり形状の変化の観測を積み重ねる必要がある。

4.5 防雪柵の最適構造と最適配置

吹き溜め柵に求められる条件として、吹雪の捕捉率を大きくする、沈降力で柵が損傷するのを防ぐとともに、柵の防雪機能を持続させるために、柵近傍に吹き溜まりができないようにする、吹き溜まりの範囲を狭くして柵と防雪対象である道路などとの間隔を狭くする、を考える。に対しては空隙率を小さくする必要があるが、下部間隙があると捕捉率が低下するのは避けられない。に対しては空隙率が小さく、かつ適度な下部間隙が必要となる。またに対しては、下部間隙から吹き込むジェットがないか、あるいはあっても弱い場合には空隙率が小さいほうが有利であり、またジェットが強い場合も有利である。従って～の条件を同時に満たすには空隙率が小さく、かつ適度な下部間隙を持つものが最適となろう。本研究で用いた柵の中ではJPNやCHNが捕捉率の点でやや劣るものの条件、に対しては有利な構造であるといえる。空隙率や下部間隙の具体的な数値を確定するには今後さらに検討が必要である。

5. まとめ

本研究では異なる構造を有する9種類の吹き溜め柵の縮小模型を用いて風洞実験を行い、主として柵の風下における吹き溜まりの発達過程や、非平衡状態における吹雪の捕捉率ならびに吹き溜まり構造と柵の構造との関係を調べた。また、柵風下の風の分布との関連も調べた。その結果、以下の結論を得た。

- i. 柵の構造によって吹き溜まりの発達過程は異なるが、その始点は時間とともに柵に近づき、終点は時間的に変わらないか、または柵から遠ざかる。また、雪丘頂の位置は時間的にあまり変わらない。
- ii. 空隙率が小さく、下部間隙の大きな柵の風下には乱れの大きな逆風域が存在し、また下部間隙から吹き出す強い風(ジェット)が存在する。空隙率が比較的大きな柵の風下では風速の低下が小さい。後者に比べ前者の場合には、柵から離れるにつれ風速が速やかに回復する。
- iii. 柵による吹雪の捕捉率は空隙率が大きくなると低下するが、ジェットのある柵では空隙率が小さいにもかかわらず捕捉率が小さい。
- iv. 柵高で規格化した雪丘の高さと吹雪の捕捉率の間には正の相関がある。
- v. 吹き溜まりの始点ならびに雪丘頂は空隙率とともに柵から離れる傾向にあるが、空隙率が小さくても

ジェットが強い柵では、ジェットによる影響で始点と雪丘頂は柵から離れる。一方、吹き溜まりの終点は空隙率が大きいと柵から離れるが、ジェットの強い柵では、柵の風下の風速の回復が早いこと、および雪丘の高さが低いため風の遮蔽効果が小さいことの二つの理由により、終点は柵からあまり離れない。

以上より、空隙率は小さく、かつ適度な下部間隙を有する構造の吹き溜め柵が、柵の維持管理上、ならびに設置スペースの観点から有効であることが明らかとなった。しかしながら、下部間隙が存在すると吹雪の捕捉率の低下を招くため、空隙率や下部間隙の最適値の決定にあたってはさらに実験を重ねる必要がある。また、本報告では取り上げなかった吹き払い柵の普及も進んでいるが、その構造と吹き払い効果の関係については、これまでにあまり系統的に研究されていない。こちらも今後の研究課題としたい。

謝辞

風洞の運転ならびに各種実験装置の準備と操作は長岡雪氷防災研究所新庄支所雪氷防災実験棟のオペレータである武田竹志氏によるものである。また、実験に際しては鎌田慈博士(当時、防災科学技術研究所特別研究員)に手伝っていただいた。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) Anno, Y. (1984): Requirements for modeling of a snowdrift. *Cold Regions Science and Technology*, **8**, 241-252.
- 2) Brugnot, G. (1989): Six years of snow-fence testing in France. *Annals of Glaciology*, **13**, 16-19.
- 3) Güterer, İ., Sato, T., Kosugi, K., Kamata, Y., and Sato, A. (2002): Comparison of the models of different types of snow fences in cold wind tunnel. *Proceedings of the XIth PIARC International Winter Road Congress 2002*.
- 4) 秦野武雄・今井篤雄(1969): 板柵の防雪機能について。雪氷, **31**, 74-80。
- 5) Isyumov, N., Mikitiuk, M., and Cookson, P. (1989): Wind tunnel modeling of snow drifting applications to snow fences. *CRREL Special Report*, **89-6**, 210-226.
- 6) Iversen, J. D. (1981): Comparison of wind-tunnel model and full-scale snow fence drifts. *J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **8**, 231-249.
- 7) Iversen, J. D. (1984): Comparison of snowdrift modeling criteria: Commentary on "Application of Anno's modeling conditions to outdoor modeling of snowdrifts". *Cold Regions Science and Technology*, **9**, 259-265.
- 8) Kind, R. J. (1986): Snowdrifting: A review of modeling methods. *Cold Regions Science and Technology*, **12**, 217-228.
- 9) 成瀬廉二(1982): 防雪柵による吹きだまりと風速

- 分布．低温科学，物理篇，**41**，65-73．
- 10) 日本建設機械化協会（編）（1977）：新編防雪工学ハンドブック．527 pp.，森北出版株式会社．
- 11) Price, W. I. J. (1961) : The effect of the characteristics of snow fences on the quantity and slope of the deposited snow. International Union Geodesy and Geophysics, Pub. No. 54
- 12) Tabler, R. D. (1980a) : Geometry and density of drifts formed by snow fences. J. of Glaciology, **26**, 405-419.
- 13) Tabler, R. D. (1980b) : Self-similarity of wind profiles in blowing snow allows outdoor modeling. J. of Glaciology, **26**, 421-434.
- 14) 竹内政夫・野原他喜男・石本敬志・福沢義文（1984）：防雪柵の研究 柵前後の吹溜り雪丘形状 ．雪と道路，**1**，96-100 ．
- 15) Takeuchi, M. (1989) : Snow-collection mechanisms and the capacities of snow fences. Annals of Glaciology, **13**, 248-251.
- （原稿受理：2002 年 10 月 25 日）

要 旨

雪粒子を用いて低温風洞内に吹雪状態を再現し，同一の吹雪条件のもとで吹き溜め柵の風下の吹き溜まりの比較実験を行った．使用した柵の縮小モデルは 9 種類で，それぞれ構造が異なっている．吹き溜まりの発達過程，ならびに非平衡状態における吹雪の捕捉率，吹き溜まりの構造などと柵構造との関係を調べた．

主な結果は以下の通りである．(1) 柵の構造によって吹き溜まりの発達過程は異なるが，その始点は時間とともに柵に近づき，終点は時間的に変わらないか，または柵から遠ざかる．また，雪丘頂の位置は時間的にあまり変わらない．(2) 柵による吹雪の捕捉率は空隙率が大きくなると低下するが，下部間隙の大きな柵では空隙率が小さいにもかかわらず捕捉率が小さい．また，柵高で規格化した雪丘の高さと吹雪の捕捉率の間には正の相関がある．(3) 吹き溜まりの始点ならびに雪丘頂の位置は空隙率が大きくなると柵から離れる傾向にあるが，空隙率が小さくても下部間隙の大きな柵では，そこを通る風による影響でそれらの位置は柵から離れる．一方，吹き溜まりの終点は空隙率が大きいほど柵から離れる．

キーワード：吹き溜まり，防雪柵，吹雪，風洞