

風洞シミュレーション実験による防雪柵の性能評価

Estimation of Snow-Fence Performance by Wind Tunnel Simulation Test

北見工業大学機械システム工学科

坂本 弘志

Mechanical Engineering, Kitami

Institute of Technology

Hiroshi SAKAMOTO

Abstract

In winter, the main cause of traffic difficulties on roadways is blowing snow. In particular, visibility blockage by blowing snow has caused traffic accidents that involve a considerable number of automobiles. To prevent blowing-snow disasters, snow fences are used very often. The estimation of performance of snow fence is often done by wind tunnel simulation test. However, the similarity law between the model and the prototype is not completely established on the present state. This report is described on wind tunnel simulation test to estimate performance of snow fence. In addition, new type snow fence developed in Kitami Institute of Technology is introduced.

キーワード：吹雪障害、風洞シミュレーション実験、相似則、新型防雪柵

1. はじめに

北海道・東北並びに北陸の日本国土の約半分は、1年の約3分の1、山岳部では実に1年のほぼ半分もの期間が雪に覆われ、冬の道路交通網の確保は、そこに住む人々の生命線を確保することと同じ意味を持つ。近年高速道路の整備や、郡部での高規格道路の着工に伴い、雪道での車両が高速走行する機会が増加するにしたがって、吹雪による交通障害、及び交通事故が、自然災害として大きくクローズアップされてきている。平成4年、冬の北海道道央自動車道の

自然災害として大きくクローズアップされてきている。平成4年、冬の北海道道央自動車道の千歳付近で起きた、125台の車両を巻き込んだ死亡追突事故は、吹雪の視程障害による悲惨な事故として記憶に新しい。特に事故が札幌と千歳空港の間で起きたことは、北海道民に限らず、所用や観光で北海道を訪れた人達にも降り掛かりうる災害であり、全国的な問題として認識されるべきものである。冬期間の道路交通における各種障害の大部分は、吹雪による吹き溜まり、並びに視程の悪化によって誘発されている。これらの防止策としては、現在のところ防雪柵の設置が基本となっているが、その形状は旧態依然のものが採用されているために、機能は十分なものとはなっていない。そのために高性能の新しい形の防雪柵の開発が、道路維持管理者、並びに利用者から強く望まれている。現在各種防雪施設の性能評価は、風洞モデル実験、数値シミュレーション解析、並びに野外観測実験によって行われている。数値シミュレーションによる評価は、近年その解析手法が確立されつつあるが、自然界での吹雪は乱流混相流で、かつ非定常性が極めて強いために、解析結果と実験結果との適合性は不十分であり、実用化に至っていない。また、野外観測実験は最も有効な方法であるが、実験費用が膨大となるためにほとんどが行われていない。したがって、現在のところ風洞モデル実験が、防雪施設の性能を評価する上で、最も有力な手法となっている。しかし、風洞モデル実験によって、防雪施設の性能を評価する場合、吹雪は固気二相流であることから、相似則に対する見解が不十分で、結果に対する信頼性を十分に得るに至っていない。本報告は、雪粒子モデルとして自然雪を用いた、風洞モデル実験による防雪柵の性能評価について述べたものである。あわせて、北見工業大学で開発された新しいタイプの防雪柵の紹介を行ったものである。

2. 吹雪モデル実験風洞施設の紹介

防雪施設の設計とその適正な配置、さらには性能を事前に推定するために、風洞による模型実験は有力な調査方法となる。風洞モデル実験で最も問題となるのは、模型雪である。現在のところ模型雪としては、表1に示すものが採用されている。この中で、活性白土は含水率によって粘着性を変えることから、比較的自然雪に近いものとすることができます、模型雪として

模型雪	
風洞実験	ノコクズ・雲母粉末
	木ウ砂
	シリカ砂
	ガラスピーブ
	炭酸マグネシウム
	活性白土
自然雪	
水路実験	砂
	シリカ砂

表1 風洞実験で使用される模型雪

採用されることが多い。ただ、粒子径が小さいことから ($d=1\sim40\mu\text{m}$)、使用中に風洞外へ拡散するために、それを防ぐ上で、かなり気密性の高い風洞が必要とすることと、その回収を含めた取り扱いが難点となっている。また最近は模型と実物の相似則をより高めるために、自然雪を使用する試みが行われているが、試験期間が冬期に限定されるという問題をかかえている。次に表2に、吹雪に関する模型実験を行うことができる国内の風洞装置を示してある。

また、図1には模型雪として活性白土を用いて、高速道路のインターチェンジ付近の吹き溜まりの観測を行った結果を示してある。(北海道開発局建設機械工作所の風洞実験による実験)。さらに図2には模型雪として自然雪を用いて、高速道路の切盛堀部に設けられた防雪柵周辺の吹き溜まりの観測を行った結果を示してある。(北見工業大学の風洞による実験)。両者とも吹き溜まりの位置と形状は、かなり実物に近いものを再現しているが、活性白土の場合、その起伏が平坦となることが難点となる。

機 開	風洞の型式	測定部の大きさ (縦×横×長さ: cm)	主な実験対象
北海道工業大学建築工学科	回流型	80×100×300	建物屋上の積雪形状 建物周辺の吹きだまり
北海道開発局建設機械工作所	吹出型	80×80×600	防雪柵、防雪林等の道路の防雪対策
日本大学理工学部	吹出型	30×30×120	建物周辺の吹きだまり
北見工業大学機械システム工学科	吹出型	130×130×1000	防雪柵による吹雪対策
北海道大学低温科学研究所	回流型	50×50×900	雪粒子の運動

表2 吹雪に関する国内の模型実験風洞装置



図1 活性白土模型雪による高速道路インターチェンジ付近の吹き溜りの観測
(北海道開発局建設機械工作所風洞)

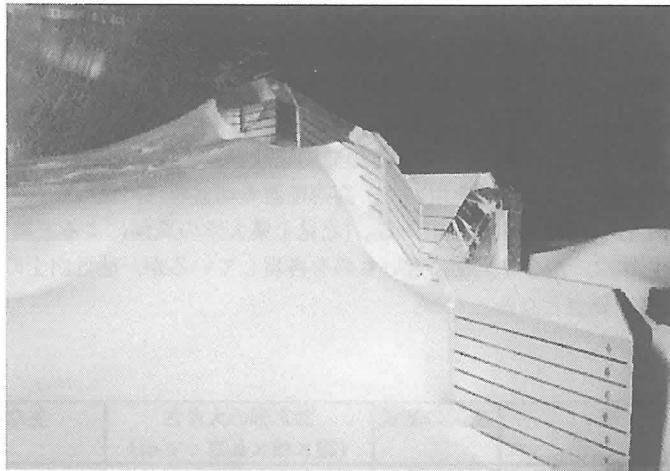


図2 自然雪による高速道路切盛境部の防雪柵周辺の吹き溜りの観測
(北見工業大学風洞)

3. 雪粒子を用いた場合の風洞モデル実験の相似性

模型雪として自然の雪粒子を用いた風洞モデル実験手法が北見工業大学で開発され、利用されている。自然雪を採用した場合、吹雪は実際のものに最も近いものとなるために、得られた結果の信頼性が高いことは言及するまでもない。本節では、雪粒子を用いた場合の風洞モデル実験の相似性について述べるものとする。

吹雪時の防雪柵周辺の流れを規定するパラメータとして、風速 U 、柵高 H 、雪粒子の径 d 、重力加速度 g 、および空気の動粘度 ν が考えられる。したがって、これらから導かれる無次元パラメータとして、以下のものが考えられる。

- (1) 柵高 H に基づくレイノルズ数 $R_H (=HU/\nu)$
- (2) 雪粒子の径 d に基づくレイノルズ数 $R_d (=dH/\nu)$
- (3) 雪粒子の径 d に基づくフルード数 $F_r (=U/\sqrt{gd})$
- (4) 雪粒子の径 d と柵高 H との比 d/H

模型雪として実際の雪粒子を用いている場合には、 R_d は実物とモデルとにおいて同一となり、考慮する必要がなくなる。また流体力学的には、レイノルズ数が 10^4 を越えると、流れはそれに無関係となる。柵モデルと実物柵のレイノルズ数 R_H は、 $(1.87 \sim 2.65) \times 10^5$ 、および 1.58×10^6 であり、いずれも 10^4 を越えた値となるために、パラメータ R_H は、同じく考慮する必要がなくなる。一方、雪粒子モデル d と柵高 H との無次元パラメータ d/H は、柵の寸法を $1/n$ スケールとした場合には、雪粒子の大きさも $1/n$ としなければならない。その結果、雪粒子の

レイノルズ数 R_d は、実際のその $R_d = 50 \sim 100$ ($d = 0.1 \sim 0.2\text{mm}$) の $1/n$ となる。しかし、雪粒子の運動は低レイノルズ数では、 R_d に強く依存するために、雪粒子の大きさを柵のモデル寸法に合わせて小さくすると、実物とモデル実験とにおける雪粒子の運動は、かなり異なつたものとなる。したがって、実験では、相似則を規定する上で、相反するものとなる二つの無次元パラメータ R_d と d/H のうち、 R_d を一致させる手法を採用することが妥当と考えられる。以上のことから、実際の雪粒子を用いた風洞モデル実験結果は、柵高に基づくモデルのレイノルズ数を、 10^4 より大きくした場合には、実物のそれと同一となるものと考えてよいこととなる。したがって、相似則を規定するのはフルード数 F のみとなる。結果的に実物とモデル実験とにおけるフルード数は同一となるために、モデル実験で行っている風速は、同程度の風速における実際の結果を再現しているものと考えてよい。図3には、防雪柵（吹き払い柵）周辺の吹き溜まり形状に関して、風洞モデル実験と実物の野外観測実験とを比較した結果を示してある。両者は極めて類似していることから、雪粒子を用いた風洞モデル実験は、実物をかなりの精度をもって再現しているものと考えてよい。また、風洞モデル実験における風速は $6 \sim 8\text{ m/s}$ としており、野外観測における風速もまた平均的には 10 m/s 以下であることから、風洞モデル実験の風速は、実物の風速にほぼ対応しているものと判断できる。

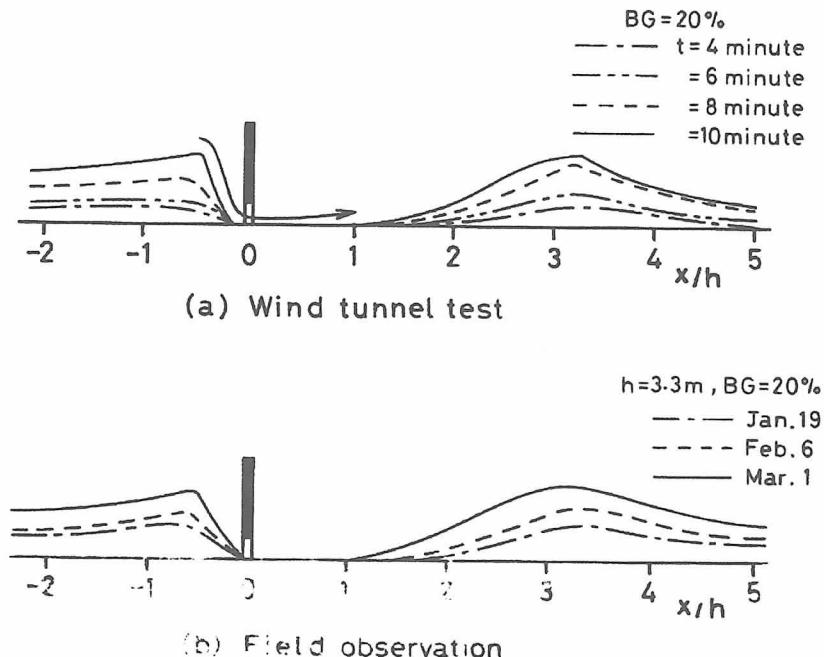


図3 防雪柵周辺の吹き溜まり形状に関しての風洞モデル実験と
実物の野外観測実験との比較

4. 北見工業大学で開発された新型防雪柵の紹介

4.1 吹雪発生用風洞装置について

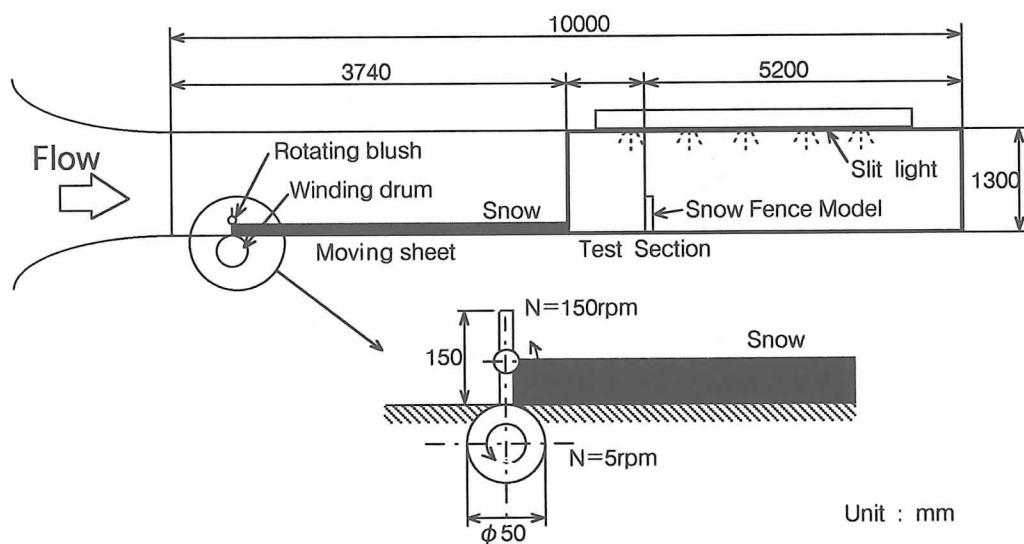
北見工業大学機械システム工学科に設置されている、模型雪として自然雪を用いる風洞装置を図4に示してある。本装置の測定部は、図4(a)に示すように断面1.3m×1.3m、長さ10mの大きさを有する。吹雪は、次のような方法で発生させる。まず、図4(a)に示すように測定部入口から約3.7mの範囲で、その床面上の可動シート上に自然雪を一様に散布する。次に可動シートを上流方向に移動させ、測定部入り口に取り付けた回転ブラシによって雪を巻き上げ、風速によって飛翔させて吹雪を発生させる。吹雪は常に風洞入口付近から発生、ブラシの回転数に基づいて巻き上がり、発生することから、間欠性を有する非定常性の強いところから、自然で発生する吹雪に、かなり近いものとなる。実験に当たっては、風速を6~8m/sとして吹雪を発生させる。防雪柵モデルの評価は、吹雪の濃度分布、風速分布並びに吹き溜まりの位置と形状を観測することによって行う。防雪柵モデル周辺の吹雪の濃度は、測定部の天井壁に設けたスリット光源によって照射し、ビデオカメラで連続観測し、コンピュータで画像処理を施して、等濃度線図として求めている。

4.2 開発された新型防雪柵について

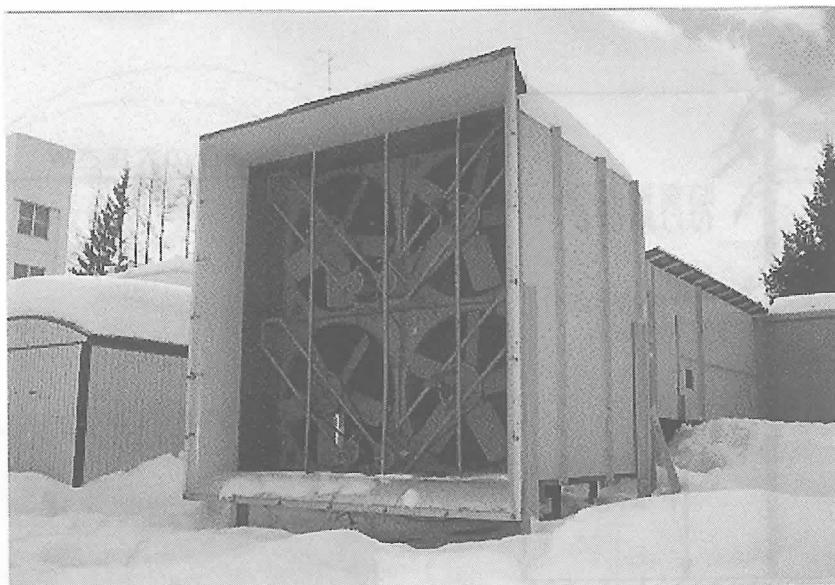
北見工業大学で開発された、新型防雪柵を図5に示してある。開発された防雪柵は、従来柵の防雪板(板型形状)の形状とは全く異なる翼型防雪板を有するものである。翼型防雪板として、図5に示すように円弧翼型防雪板と、ジェーコフスキーワーク型防雪板の2種類のものが開発された。円弧翼型防雪板は、防雪板前縁部が円弧型を有するもので、これによって防雪板間の流れの偏向をスムーズ化して、吹き払い性能の向上を図っているものである。また、ジェーコフスキーワーク型防雪板は、飛行機等に用いられている翼と類似した形状を有するもので、防雪板間の流れの偏向をスムーズにして、同じく吹き払い性能の向上を図っているものである。開発に当たっては、風洞モデル実験を遂行し、防雪板の大きさ、取付け角度、取付け枚数、下部間隙、防雪柵の高さの最適値を求めた。また、防雪柵製作設計する上で不可欠となる、空力特性値の検討もあわせて行っている。

4.3 吹雪発生用風洞モデル実験による性能試験について

図6および7は開発された円弧翼型防雪板を有する、防雪柵周辺の吹雪の濃度分布の観測結果の一例を示したものである。吹雪の濃度分布は、色の濃淡による6段階に分けて表示され、具体的には4.1節で述べたように、発生した吹雪をビデオカメラで撮影し、そのビデオ画像をコンピュータによる画像処理を行うことによって求めてある。これらの結果から、つぎに示すように防雪柵の性能が評価できる。まず、図6に示すように、従来柵での吹雪は、柵後方の $x/H=1.5 \sim 2.0$ 付近から巻き上がるため、高濃度の吹雪はドライバーの視程高さ1.35m(点線)を越え、視程は悪化していることがわかる。しかし、開発された柵では、防雪板の大きさが950mmと620mmのいずれも、吹雪はドライバーの視程高さ以下を通過し、視程は十分に確保されていることがわかる。また、図7は、除雪等で下部間隙が閉塞された場合の吹き払い性能を同じく、吹雪濃度分布の測定に基づいて調べたものである。開発された柵では、下部間隙が

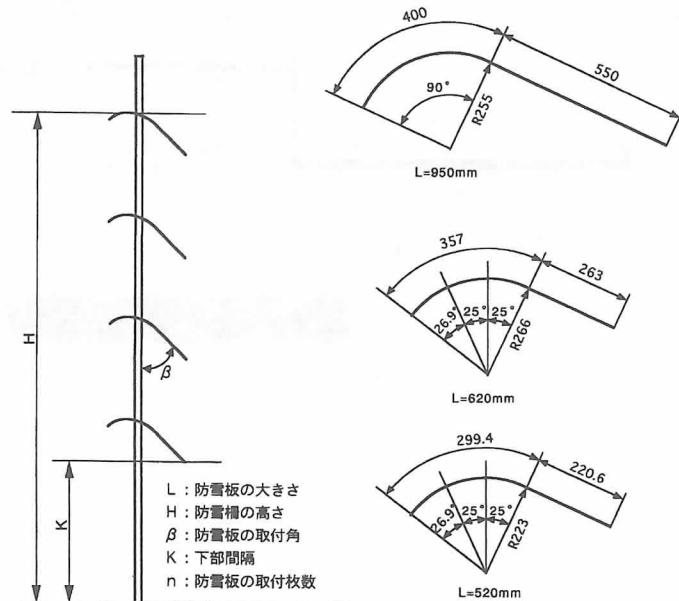


(a) 風洞測定部概略図

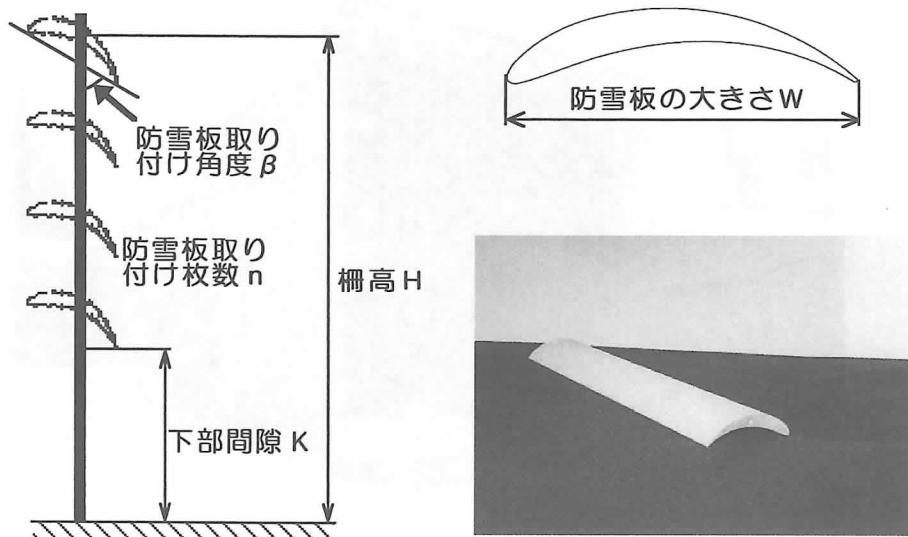


(b) 風洞全体図

図4 北見工業大学の吹雪発生用風洞装置



(a) 円弧翼型防雪板



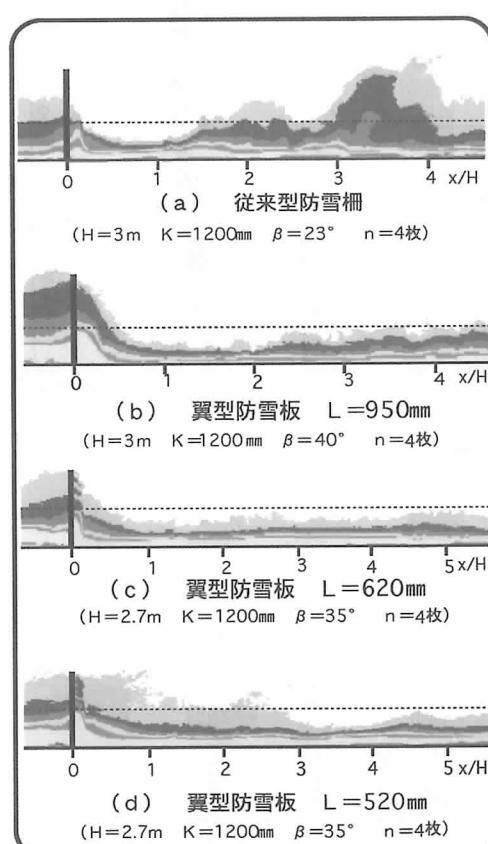
(b) ジューコフスキ翼型防雪板

図5 北見工業大学で開発された防雪柵

3/4程度まで閉塞されても吹雪はドライバーの視程高さ以下を通過し、十分に視程は確保されている。また下部間隙が全閉された場合では、低濃度の吹雪がドライバーの視程高さを若干越えるが、大部分の吹雪は視程高さ以下を通過し、視程はかなり確保されている。しかし、従来柵では全閉されると、道路全体が吹雪に覆われ、視程はほとんど確保されないことがわかる。以上述べたように、開発柵は、従来柵に比べて、かなり高性能を有していることが風洞モデル実験から評価できる。

4.4 野外観測実験による開発柵の性能評価について

試作した実物モデル柵は、石狩町と厚田村の境界付近の国道231号（通称石狩国道）に設置した。実物モデル柵は、図8に示すように、1スパンが3040mmで、10スパンの全長30.4mである。設置位置は、従来柵との比較検討を行うために、図9に示すようにそれに隣接する形と



濃 ■■■ 淡

図6 防雪板の大きさの相違による吹雪濃度分布

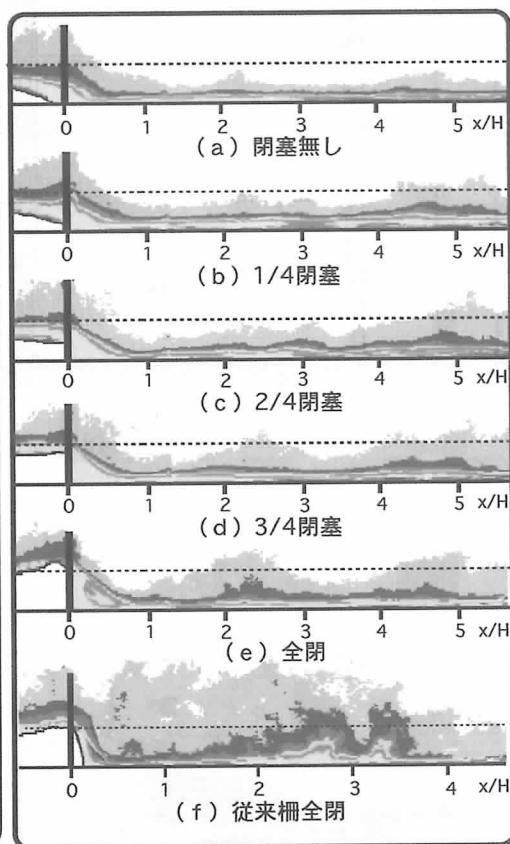


図7 下部間隙閉塞の相違による吹雪濃度分布

した。性能評価試験に当たっては、柵風上側に3本、道路風下側に10本の堆雪高測定用ポールを設置し、柵風上側並びに道路風下側の堆雪高の評価と、カメラ撮影による吹雪発生時の道路の視程の評価を行った。また合わせて、発煙筒による下部間隙流の観測を行った。図10(a)および(b)は、発煙筒による下部間隙流の観測結果を示したものである。従来柵における下部間隙流は、道路幅6m付近から急激に巻上がるが、開発柵のそれは道路上で巻き上がる

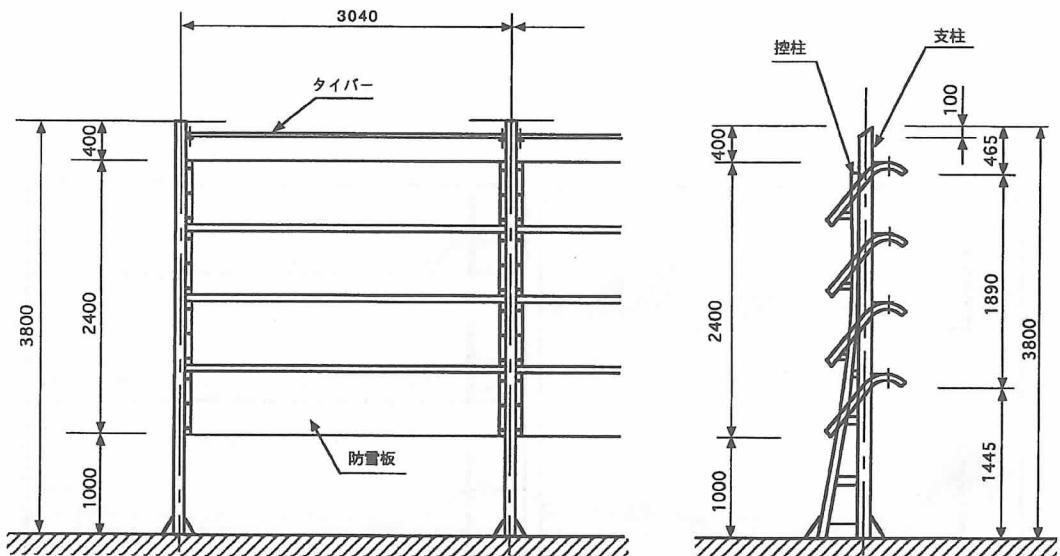


図8 野外観測用実物柵モデル

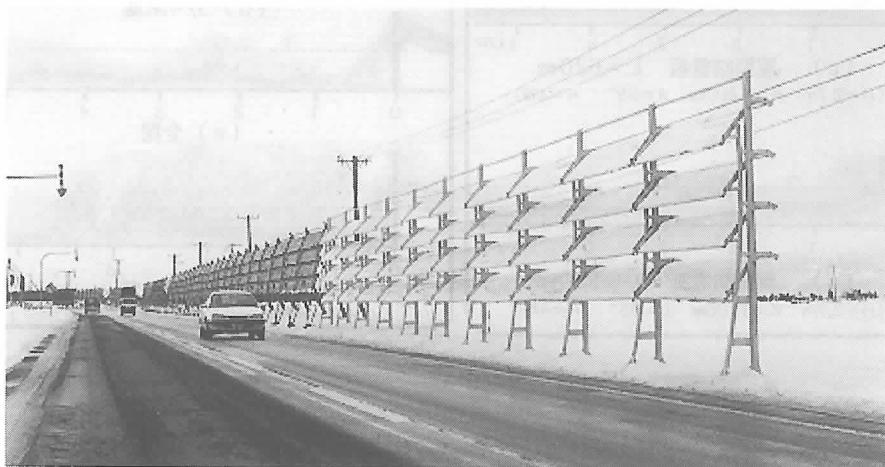


図9 実物柵モデル野外設置状態



(a) 従来柵



(b) 開発柵

図10 発煙筒による下部間隙流の可視化

ことなく、路面上に沿って移動していることがわかる。このことから、下部間隙流の巻き上がりによって生ずる吹雪の視程障害の緩和は、従来柵に比べて開発柵はかなり高いものと考えられる。図11 (a) は、地吹雪発生時における視程の観測結果を示したものである。従来柵では、吹雪が道路上で巻き上がるために、視程はかなり悪化しているが、開発柵では吹雪の巻き上がりもなく、視程はかなり良好であることがわかる。また図11 (b) は、大規模な吹雪發



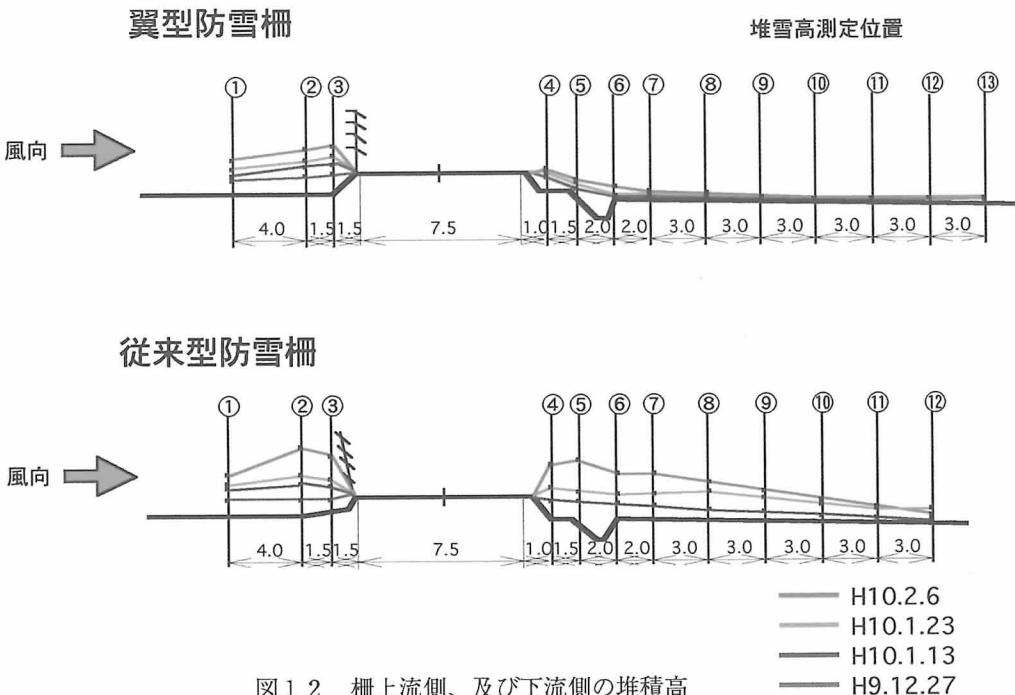
(a) 地吹雪時



(b) 大規模吹雪時

図11 吹雪時における視程の観測

生時の視程の観測結果を示したものである。図に示すように従来柵における道路上の視程は、ほとんど確保されておらず、悪化していることがわかる。しかし開発柵における視程は、かなり良好である。これらの結果から開発柵の視程障害緩和は、従来柵に比べて数段高いことがわかる。図12は、平成9年12月25日から平成10年2月6日までにおける、柵上流側と下流側における堆雪の観測結果を示したものである。柵上流側の堆雪高さは、開発柵の方が従来柵より



も若干大きくなるが、堆雪形状にあまり差異が認められない。しかし柵下流側の堆雪高さは、開発柵では最大で50cm程度であるが、従来柵のそれは200cmにも達している。また堆雪量も開発柵では少なく、柵風下側の30m付近では、ほとんど無い。したがって、柵の下部間隙流による吹き払い効果は、柵高の10倍下流（柵後方30m）においても持続しているものと考えられる。このことからも、開発柵の吹き払い性能は、従来柵のそれに比べて、かなり高いものと判断される。

5. むすび

本報告は、防雪施設の性能評価を行う風洞モデル実験について模型雪として、自然雪を用いた北見工業大学風洞装置を中心として解説したものである。あわせて、北見工業大学で開発された防雪柵について、自然雪を用いた風洞モデル実験、並びに野外実験の紹介を行い、開発された防雪柵は、従来柵に比べてかなりの高性能を有することを示したものである。

参考文献

- (1) 坂本他 2 名, 1998, 寒地環境工学合同シンポジウム論文集, 第11巻, 45.
 - (2) 坂本他 2 名, 1997, 同上, 第10巻, 157.
 - (3) 坂本他 3 名, 1996, 同上, 第9巻, 125.
 - (4) 坂本他 2 名, 1995, 同上, 第8巻, 71.