

防風柵の防雪効果の検証と改善に関する研究

Verification and improvement of snow control
performance of windbreak fence

地方独立行政法人北海道立総合研究機構
建築研究本部

Building Research Department

Local Independent Administrative Agency Hokkaido Research Organization

概要 Abstract

防風柵の防雪効果の検証と改善に関する研究 Verification and improvement of snow control performance of windbreak fence

堤 拓哉¹⁾、南雲洋介²⁾
Takuya Tsutsumi¹⁾, Yosuke Nagumo²⁾

キーワード : 防風柵、防風性能、鉄道

Keywords : ***Windbreak fence, Snow control performance, Railway***

1. 研究概要

1) 研究の背景

新幹線などの高速鉄道は地域交通にとって基幹となる交通インフラであり、路線の自然災害対策は運行の安全を確保する上で極めて重要である。北日本地域では路線の強風対策に加え吹雪による吹きだまり対策が必要とされるが、現在、鉄道で用いられている防雪柵と防風柵は仕様が異なっており、強風対策と吹きだまり対策の双方が求められる路線での仕様選定が課題となっている。

2) 研究の目的

北日本地域における高速鉄道の安全性向上に資するため、防風性能と防雪性能を兼ね備える柵の仕様を明らかにする。

2. 研究内容

1) 既往研究、既存資料等の整理 (H29 年度)

- ・ねらい：既往研究、既存資料等を整理し防風性能および防雪性能に及ぼす要因や仕様を整理する。
- ・試験項目等：文献調査、仕様調査

2) 環境風洞装置および数値解析による防風性能の評価 (H29 年度)

- ・ねらい：柵の仕様と防風性能の関係を明らかにする。
- ・試験項目等：風洞実験・CFD

3) 粉体風洞装置を用いた防雪性能の評価 (H29 年度)

- ・ねらい：柵の仕様と防雪性能の関係を明らかにする。
- ・試験項目等：風洞実験

4) 防風性能と防雪性能を満たす仕様の検討 (H29 年度)

- ・ねらい：防風性能と防雪性能を両立する仕様を整理し、実際の設置環境を想定した性能を評価する。
- ・試験項目等：風洞実験

¹⁾ 地域研究部環境防災グループ主査 ²⁾ 東日本旅客鉄道株式会社

¹⁾ Chief for Urban Environment, Disaster Prevention and Environment Group, Regional Research Division.

²⁾ East Japan Railway Company.

3. 研究成果

- 1) 既往研究、既存資料等の整理：既往研究、既存資料等を整理し防風性能および防雪性能に及ぼす要因や仕様を整理した。鉄道用の防風柵に求められる防風性能を満たすには柵高 2m 以上かつ充実率 60% の有孔板で、防雪性能に関しては線路のある柵風下側の吹きだまりが小さい「吹き止め柵」に準じた仕様が有効であることから、新たに検討する柵では、柵上部は防風性能を担保する機能を持たせるため充実率 60% (空隙率 40%) とし、下部に無孔板 (充実率 100%) を取り付けの仕様が適していることが分かった。
- 2) 環境風洞装置および数値解析による防風性能の評価：柵の高さを増すほど柵風下側の減風される領域は広くなり、防風柵の下部に柵高さの 1/2 程度の無孔板を取り付けると防風性能が高くなることが明らかになった (図 1)。
- 3) 粉体風洞装置を用いた防風性能の評価：防風柵の高さを増すことにより柵風下側の吹きだまり量は軽減されるが (図 2)、線路がある柵風下側において吹きだまりが発生することが分かった。防風柵の下部に無孔板を付けると柵風下側の吹きだまり量は 1/2 程度まで減少することが明らかになった (図 3)。
- 4) 防風性能と防雪性能を満たす仕様の検討：防風性能と防雪性能を整理した結果、防風柵において下部無孔板の高さを柵の 1/2 程度とすることが総合的に最も性能が良いことが明らかとなった。実際の設置環境を想定した斜風の条件においても、下部無孔板により防雪性能が向上することが分かった。

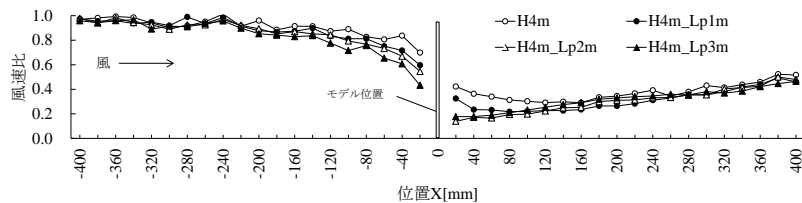


図 1 下部無孔板の高さと風速分布との関係

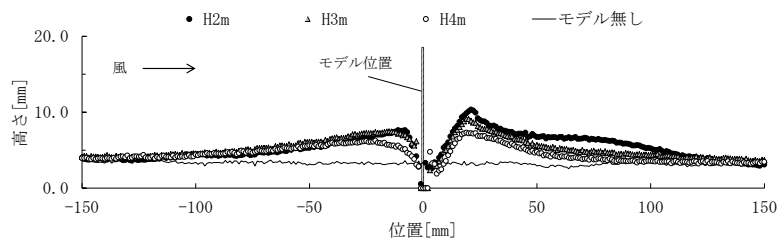


図 2 柵高さと堆積状況との関係

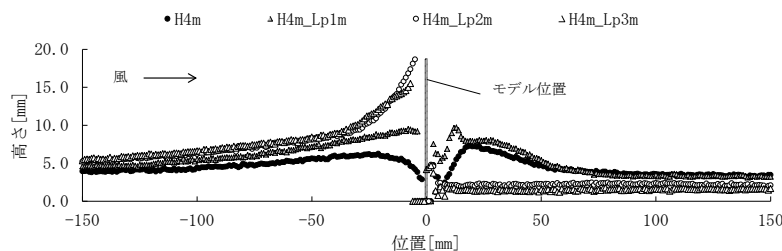


図 3 下部無孔板の高さと堆積状況との関係

4. 今後の見通し

- ・研究成果は、共同研究機関における鉄道安全対策の基礎資料として活用する。
- ・本研究で明らかにした仕様に基づき、共同研究機関が実物大のモデルによる検証実験を秋田県にて実施中である。

目 次

1. はじめに	1
(1) 研究の背景	1
(2) 研究の目的	1
(3) 研究内容	1
2. 既往研究、既存資料等の整理	2
(1) 防風柵に関する既往研究	2
(2) 防雪柵に関する既往研究	2
(3) 2章のまとめ	3
3. 環境風洞装置を用および数値解析による防風性能の評価	3
(1) 検討概要	3
(2) 環境風洞装置による防風性能の評価	3
(3) CFD による防風性能の評価	7
(4) 3章のまとめ	7
4. 粉体風洞装置を用いた防雪性能の評価	11
(1) 検討概要	11
(2) 粉体風洞装置による防風性能の評価	11
(3) 4章のまとめ	18
5. 防風性能と防雪性能を満たす仕様の検討	19
(1) 防風性能と防雪性能を満たす仕様の整理	19
(2) 実際の設置環境を想定した検討	19
(4) 5章のまとめ	21
6. まとめ	22
参考文献	23

1. はじめに

(1) 研究の背景

新幹線など高速鉄道は地域交通にとって基幹となる交通インフラであり、路線の自然災害対策は運行の安全を確保する上で極めて重要である。平成 25 年 3 月、秋田県大仙市の奥羽線（神宮寺駅～刈和野駅間）において秋田新幹線が吹きだまりにより脱線する事故が起きるなど¹⁾、北日本地域では路線の強風対策に加え吹雪による吹きだまり対策が重要である。普段、雪の少ない地域の路線では、防雪林や防雪柵が整備されていないため、防風柵が稀に発生する大雪に対し路線の吹きだまり対策を担うことになるが、防風柵の防雪性能は不明であり、防風と防雪を両立する仕様は明らかになっていない。



写真 1-1 秋田新幹線

(2) 研究の目的

北日本地域における高速鉄道の安全性向上に資するため、防風柵の防雪性能を明らかにすると共に、防風柵の防雪性能を改善する仕様を明らかにする。

(3) 研究内容

本研究における実施内容を表 1-1 に示す。研究項目 1 では、防風柵および防雪柵に関する既往研究を整理する。研究項目 2 および研究項目 3 では、柵の仕様と防風および防雪性能の関係について風洞実験と数値解析により検討を行う。研究項目 4 では、実際の設置環境を想定した検討を行う。

表 1-1 本研究の実施内容

研究項目	実施内容	章
1. 既往研究、既存資料等の整理	既往研究、既存資料等を整理し防風性能および防雪性能に及ぼす要因や仕様を整理する。	2
2. 環境風洞装置を用および数値解析による防風性能の評価	風洞実験および数値解析により防風柵の防風性能を評価すると共に仕様変更と防風性能の関係を明らかにする。	3
3. 粉体風洞装置を用いた防雪性能の評価	粉体を用いた風洞実験により防風柵の防雪性能を評価すると共に仕様変更と防雪性能の関係を明らかにする。	4
4. 防風性能と防雪性能を満たす仕様の検討	1～3 の検討を踏まえ、防風性能と防雪性能を両立する仕様を整理し、実際の設置環境を想定した性能を評価する。	5

2. 既往研究、既存資料等の整理

(1) 防風柵に関する既往研究

防風柵における既往研究をみると、建築分野では主にビル風の軽減を目的として防風柵が設置されており、充実率（閉塞率）が大きくなるほど柵の直背後の風速を低減する効果が高いことから、柵の充実率を60%以上とするケースが多い²⁾⁻⁴⁾。道路分野では道路あるいは橋梁を通行する車両を強風から守る目的で防風柵が設置され⁵⁾、橋梁部に柵を設置する場合、主桁の風荷重を増加させ、橋の耐風性能を悪化させる可能性があるため、充実率として60±20%程度を目安としている⁶⁾。沿岸部の漁港等では、船舶の防風および風波の制御のために防風柵が設置され、充実率50%の柵が風波に対する制御効果が高いとされている⁷⁾。鉄道分野では、1986年に起きた山陰本線での強風による脱線事故以降、風速による運転規制の規定が改正され、強風箇所における防風柵の設置が進められた⁸⁾。鉄道関連の防風柵の設置事例を表2-1に示す⁹⁾。鉄道分野においては、設置される防風柵の仕様は柵高2m、充実率60%の仕様が多い。これらの防風柵の防風性能は柵風下側における風速の低減効果により評価されている。

既往研究より防風柵による防風効果を整理すると、防風柵の充実率は60%前後が最も多い。防風柵の充実率と防風性能との関係を模式的に表すと図2-1のようになる。防風柵の充実率が大きくなると柵の直背後における風速低減率（基準風速からの低減率）は上昇するが、柵上端からの剥離流の巻き込みが強まって速度回復が促進され、柵風下側において減風される領域は狭くなる。逆に充実率を小さくすると柵の直背後の風速は上昇するが、減風される領域は広がる傾向がみられる¹⁰⁾。

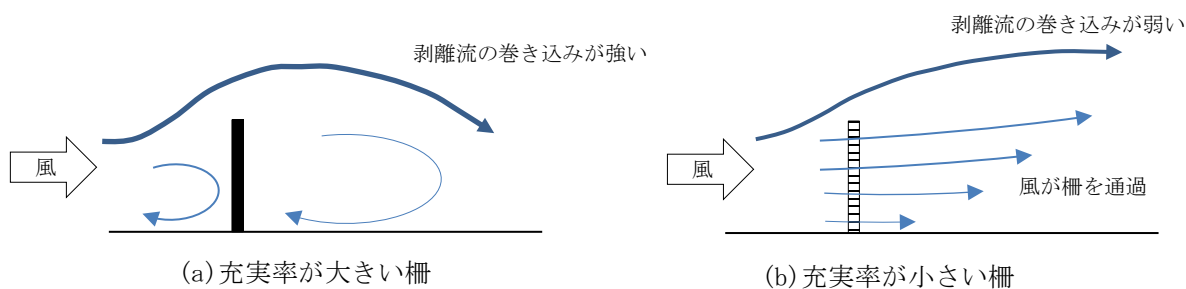


図 2-1 充実率の違いと防風柵周囲の風の流れとの関係

表 2-1 鉄道分野における防風柵の施工例⁹⁾

事業者名	線区名	区間	設置箇所	対策工の仕様 (高さ, 充実率)	設置時期
北海道旅客鉄道(株)	根室本線	西新得～広内駅	橋梁 盛土	3m, 80% 2m, 60%	2005. 9
東日本旅客鉄道(株)	東海道本線	根府川構内 (白糸川橋梁)	橋梁	3m, 60%	1991. 7
	常磐線	夜ノ森～大野間 (熊川橋梁)	橋梁 盛土	2m, 60% 3m, 60%	1996. 2
	川越線	指扇～南古谷間 (荒川橋梁)	橋梁	2m, 60%	1998. 4
	仙石線	野蒜～陸前小野間 (鳴瀬川橋梁)	橋梁	1. 8m, 100%	2000. 6
三陸鉄道(株)	南リアス線	小石浜～甫嶺間 (矢作川鉄橋)	橋梁	2m, 60%	1994. 12
関西国際空港(株)	関西空港線	りんくうタウン ～関西空港間	橋梁	2m, 60%	1997. 2

(2) 防雪柵に関する既往研究

防雪柵に関する既往研究をみると、道路分野において古くから体系的研究が行われ^{11), 12)}、その成果が、道路以外の分野で応用的に用いられている。鉄道分野では防雪林を中心とした雪対策が古くから

行われ¹³⁾、防雪柵の設置は、用地取得などの制約により仮設型が大部分を占めており（写真 2-1）¹⁴⁾、固定式の防雪柵が設置される事例は少ない（写真 2-2）。防雪柵は大きく分けて「吹きだめ柵」、「吹き止め柵」、「吹き払い柵」の3種類に区分される（図 2-2）¹²⁾。「吹きだめ柵」および「吹き払い柵」は柵の風下側に多くの雪を堆積させ、「吹き止め柵」は柵の風上側に雪を多く堆積させることが特徴である。鉄道の防雪柵としては、路線沿いにまとまった用地が確保できる場合は「吹きだめ柵」、用地が確保できない場合は「吹き止め柵」が選択される¹⁵⁾。道路等の防雪柵の充実率は70%程度であり、防風柵に比べて大きい傾向にある。

（3）2章のまとめ

本章では防風柵および防雪柵に関する既往研究および事例等を整理した。既往研究を参考にすると、防風柵の充実率は60%程度、防雪性能を持たせる仕様としては、用地取得の可否に左右されず、柵風下側の吹きだまりが小さい「吹き止め柵」に準じた仕様が適していると考えられる。



写真 2-1 仮設防雪柵¹⁴⁾



写真 2-2 固定式防雪柵

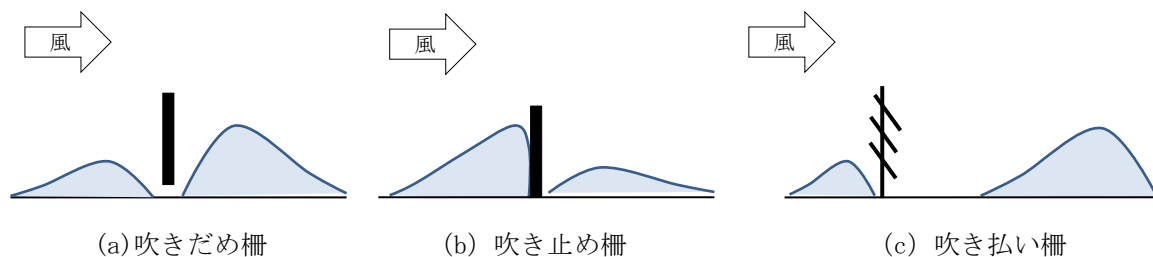


図 2-2 防雪柵の形式と雪の積もり方

3. 環境風洞装置を用および数値解析による防風性能の評価

（1）検討概要

本章では、防風柵の縮小模型を用いた風洞実験および気流の数値解析手法であるCFD(Computational Fluid Dynamics)により、防風柵の仕様の変化と防風性能との関係を明らかにする。風洞実験では柵周囲の風速分布の測定により、柵風下側において減風される範囲を評価する。CFDによる解析では、柵の仕様変更が柵風下側の風の流れに及ぼす影響を評価する。

（2）環境風洞装置による防風性能の評価

1) 実験装置の概要

実験に用いた風洞装置の概要図を図 3-1、装置の諸元を表 3-1 に示す。風洞装置測定部の断面は幅1.8m×高さ1.8m、長さは10mである。測定部風下側にあるターンテーブル上にモデルを設置し、風洞装置を回流型として実験を行った。

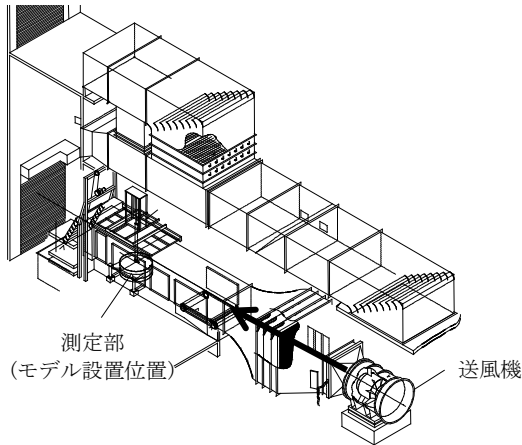


図 3-1 環境風洞装置

表 3-1 環境風洞装置の諸元

風洞本体	型 式	縦型回流・押込開放切替型
	測定胴断面	幅 1.8m × 高さ 1.8m
	測定胴長さ	10m
	縮流比	1 : 4
	ターンテーブル	φ 1.6m
送 風 機	型 式	単段軸流送風機
	風 速	0.5~20m/sec
	風 量	3900m ³ /min (max)
	風 圧	830Pa

2) 実験モデル

風洞実験に用いたモデルの一覧を表 3-2、概要を図 3-2、外観を写真 3-1 に示す。ここでは、一般的な鉄道防風柵を想定し、柵の充実率（柵の表面積から孔の面積を除いた面積割合）を 60%とした。実験では、柵の高さ(H)および下部無孔板(充実率 100%)の高さの変化が防風性能に及ぼす影響を評価する（図 3-2）。柵の高さ(H)の影響については、標準的な防風柵を模した有孔板のモデルにおいて実寸で H=2m、3m、4m と変化させ、下部無孔板の高さ(Lp)の影響については、柵高さ 4m において Lp=1m、2m、3m と変化させた。柵の設置長さ(モデルの幅)は実寸で 160m である。実験モデルはステンレス製のパンチングメタル（厚さ 0.5mm、穴径 2mm、ピッチ 3mm）で製作し、縮尺は 1/100 とした。

表 3-2 実験モデルの一覧

モデルの名称	形式	柵高さ (m)	下部無孔板の高さ (m)
H2m	有孔板	2	—
H3m	有孔板	3	—
H4m	有孔板	4	—
H4m_Lp1m	下部無孔板	4	1
H4m_Lp2m	下部無孔板	4	2
H4m_Lp3m	下部無孔板	4	3

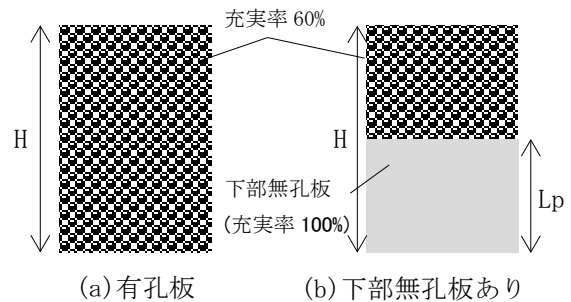
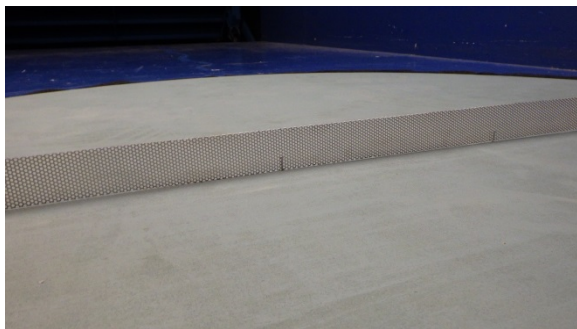
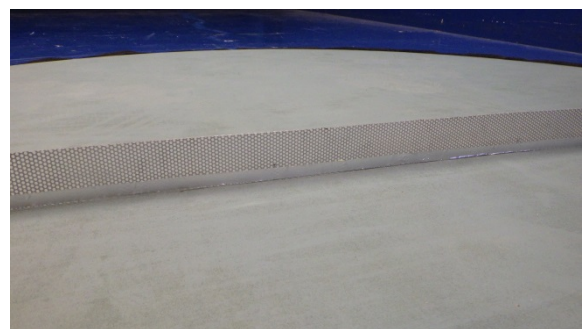


図 3-2 実験モデル



(a) H4m



(b) H4m_Lp1m

写真 3-1 実験モデルの外観

3) 実験方法および実験条件

風洞装置の測定部内にスパイアおよびバリアを設置し、自然風を模擬した乱流境界層を作成した(写真 3-2)。防風柵の設置される環境は平坦な耕作地であることから、風洞内の気流は、地表面粗度区分Ⅱに近似する気流とした¹⁶⁾。風洞内の気流条件を図 3-3 に示す。測定部風上の流入風速は 6m/s とし、風向は柵に対して直交する向きとした。

風速の測定は、無指向性の熱式風速計 (Kanomax 社製 Model 6543-21) を用いて行い、サンプリング間隔 1 秒で 30 秒間の平均風速を求めた。平均風速の測定位置を図 3-4 に示す。モデルの風上 400mm から風下 400mm までの範囲を 20mm 間隔で、風洞床面から 20mm の位置において測定した。



写真 3-2 測定部の状況

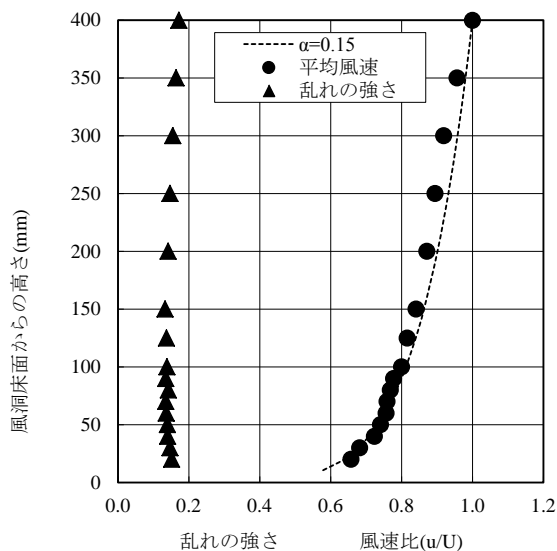


図 3-3 実験気流

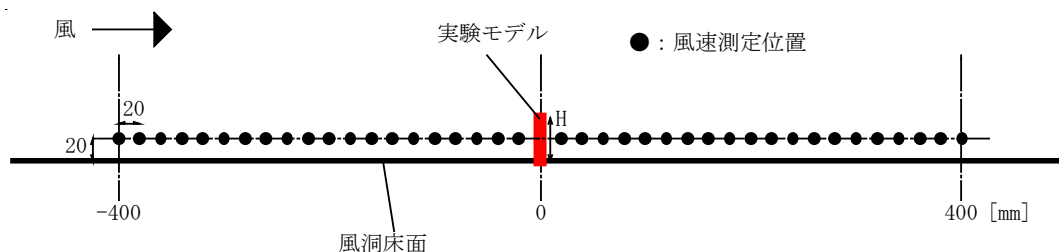
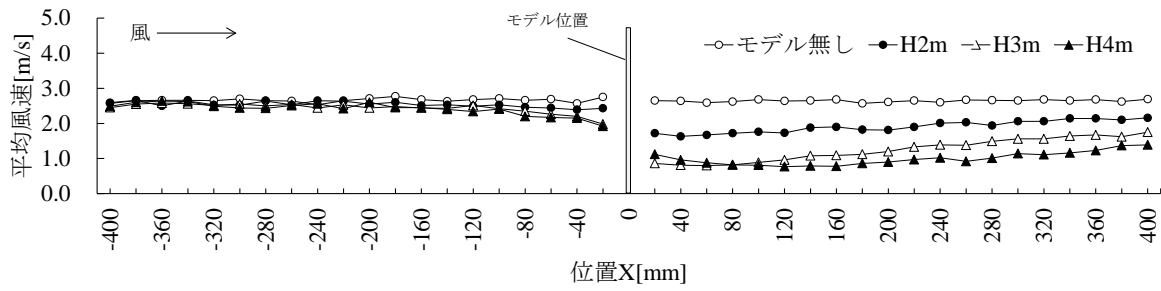


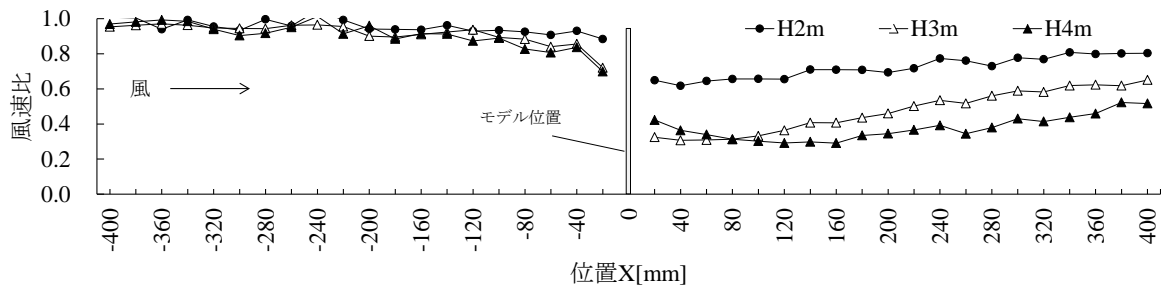
図 3-4 平均風速の測定位置

4) 風速測定結果

図 3-5 に柵高さ と風速分布との関係、図 3-6 に下部無孔板の高さと風速分布との関係を示す。図中の風速比とは、各測定位置における平均風速をモデルがない条件での同じ位置の平均風速で除した値であり、基準風速との比を示す。図 3-5 によれば、柵の風下側において柵からの距離が離れるに従い、減風された風速が徐々に回復する傾向にあるが、柵の高さが増すほど、柵風下側の減風される領域は広くなる。風速比の最小値は、H2m が 0.62、H3m が 0.31、H4m が 0.29 である。図 3-6 より下部無孔板の高さと風速分布との関係を見ると、下部無孔板があると柵風下側 X=20~120mm (X/H=0.5~3.0) の範囲において減風する効果が高まるが、X=120mm (X/H=3.0) より風下側においては、その差が小さくなる。風速比の最小値は、下部無孔板のない H4m が 0.29、下部無孔板のある H4m_Lp1m が 0.22、H4m_Lp2m が 0.14、H4m_Lp3m が 0.18 であり、防風柵の高さの半分程度を無孔板とする仕様が最も防風性能に優れていることが分かった。

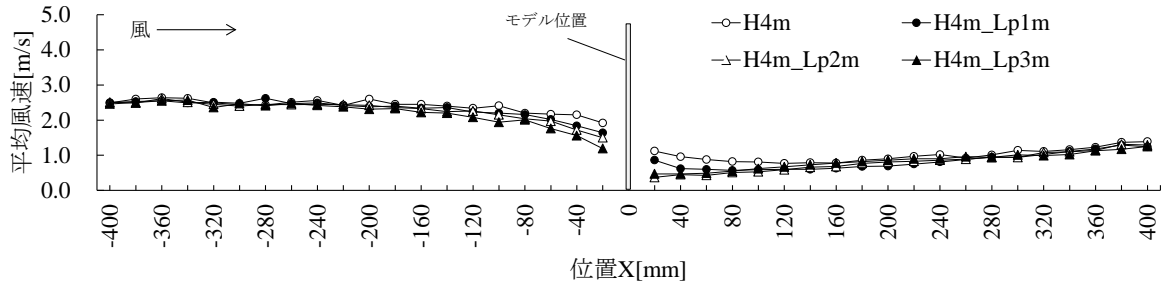


(a) 平均風速

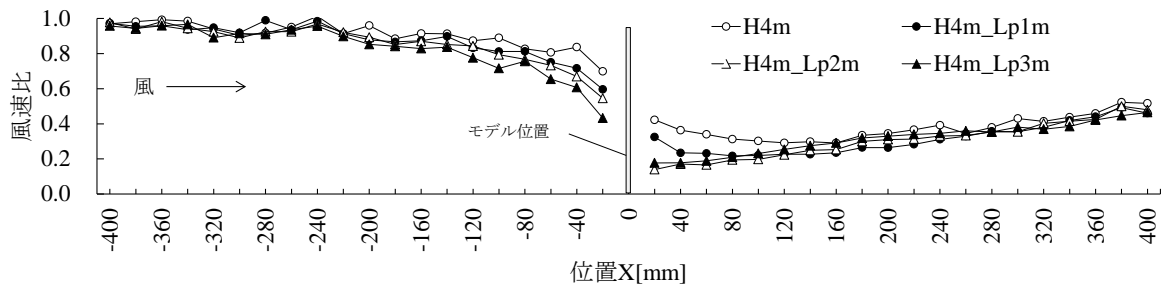


(b) 風速比

図 3-5 柵高さと風速分布との関係



(a) 平均風速



(b) 風速比

図 3-6 下部無孔板の高さと風速分布との関係

(3) CFDによる防風性能の評価

1) 解析条件

解析対象は実験モデルと同じ仕様とし(表 3-2、図 3-2)、解析領域は 80m(X)×10m(Y)×20m(Z)であり、X-Zの2次元計算とした。解析モデルを図 3-7 に示す。解析には流体解析コードのPHOENICSを使用し、有限体積法、Simplest法に基づく定常解析を行った。流入条件は一様流とし、乱流モデルには改良k-εモデルのMMKモデルを用いた¹⁷⁾。防風柵は多孔板として取り扱い、流体が通過できる面積の割合(空隙率)に応じた抵抗係数を与えて圧力損失を計算した。

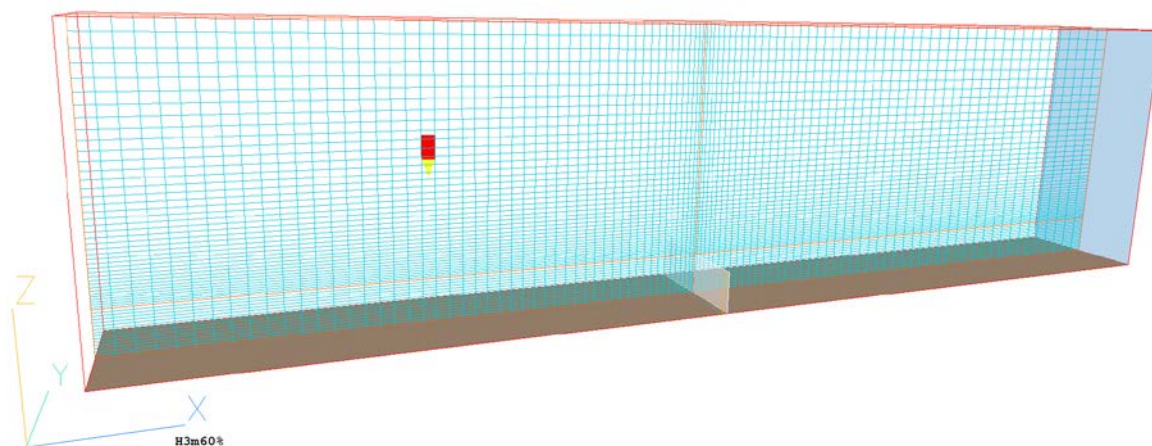


図 3-7 解析モデル

2) 解析結果

図 3-8～図 3-14 に柵周囲の風の流れに関する解析結果を示す。比較のため H2m の充実率を 100%とした解析結果も併せて示す。図 3-8 によれば充実率が 100%の柵の場合、図 2-1(a)と同様の柵風下で風向きとは逆の循環流(渦領域)が発生していることが分かる。一方、充実率が 60%である H2m、H3m、H4m については(図 3-9～図 3-11)、柵を通過した風が主流方向とほぼ平行になっており、柵風下における循環流の発生は見られない。柵高さが増すほど、柵上端からの剥離流が上向きになり、柵風下の風速が弱くなる傾向にある。柵風下における風速分布は風洞実験と概ね同様である。図 3-12～図 3-14 より下部無孔板がある場合の風の流れをみると、下部無孔板により、柵風下側において風向きとは逆の循環流が生じている。循環流の範囲は下部無孔板が高いほど広がっており、防風性能に及ぼす影響が大きくなる。

(4) 3章のまとめ

本章では風洞実験およびCFDによる解析により、防風柵の仕様と防風性能の関係について検討した。その結果、柵の高さを増すほど柵風下側の減風される領域は広くなり、最も高い防風性能を示したのは、下部無孔板の高さを柵の 1/2 とする仕様であった。下部無孔板が柵の 3/4 の高さになると、柵風下側の循環流の範囲が広くなり、防風性能は低下する。次章では下部無孔板と防雪性能との関係について検討する。

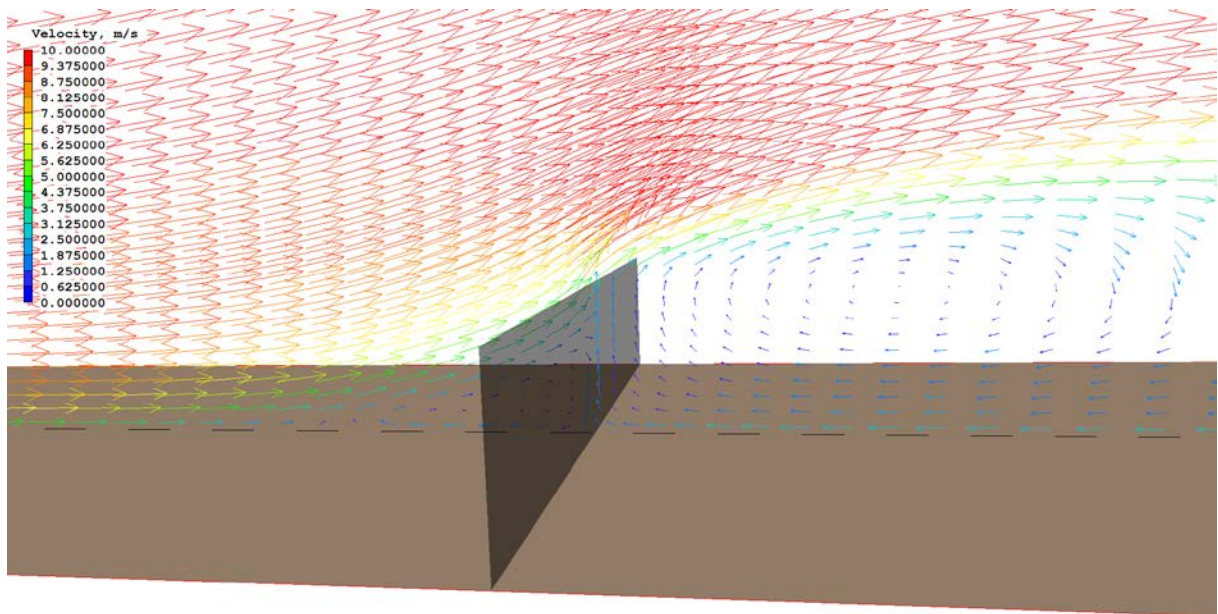


図 3-8 H2m を充実率 100%とした場合の解析結果

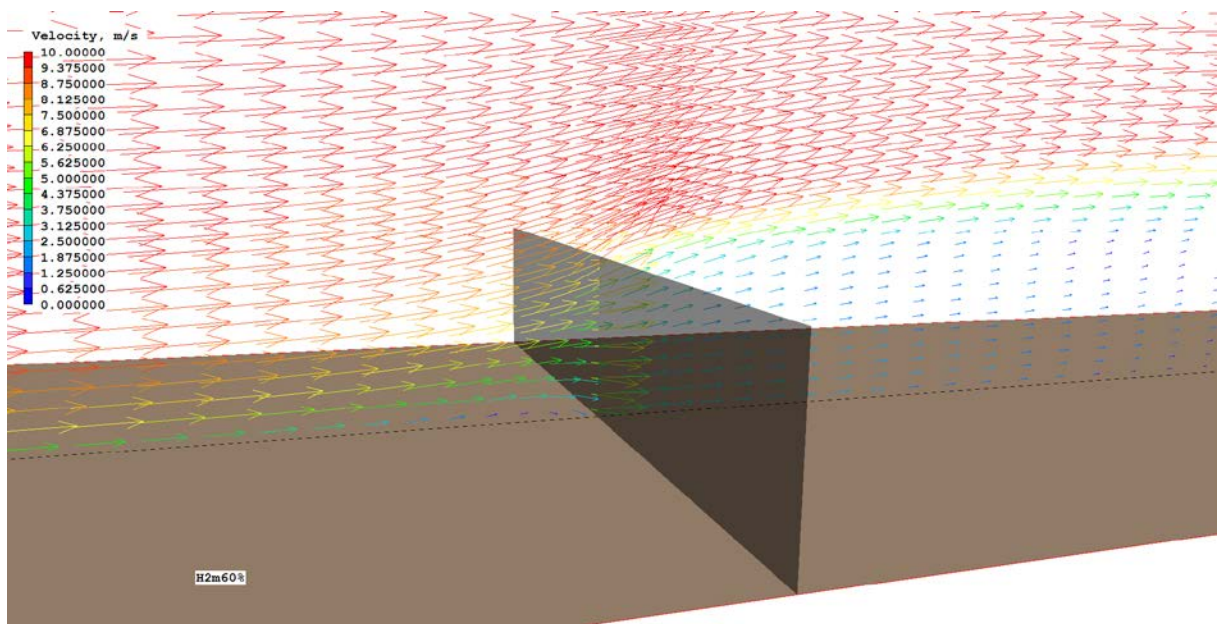


図 3-9 H2m の解析結果

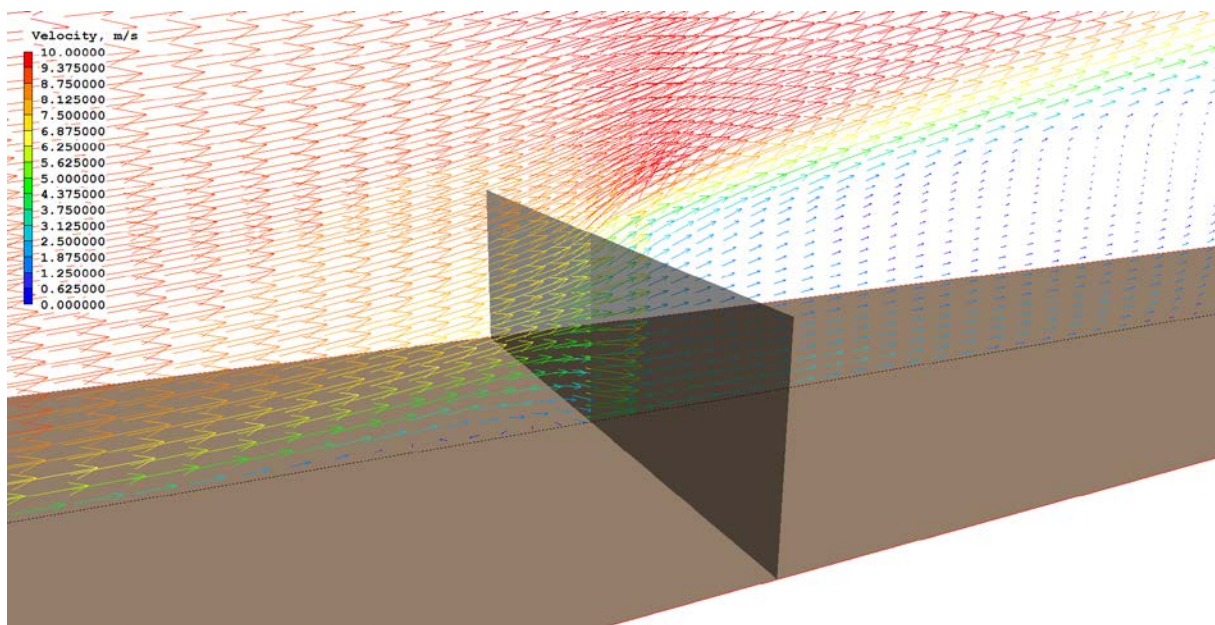


図 3-10 H3m の解析結果

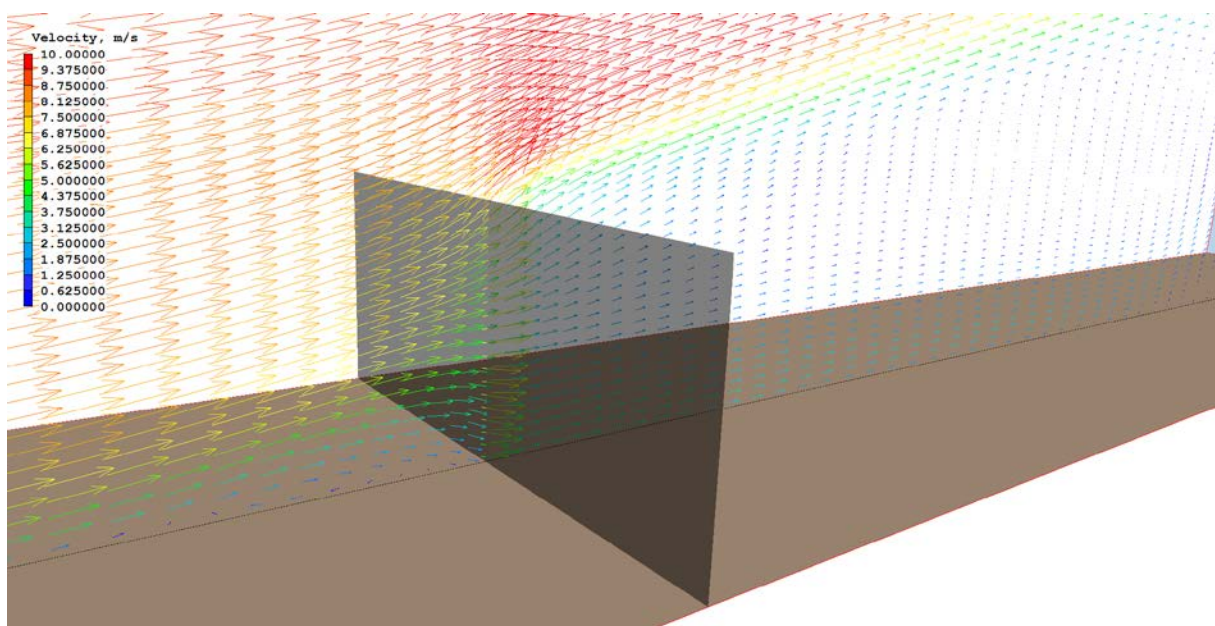


図 3-11 H4m の解析結果

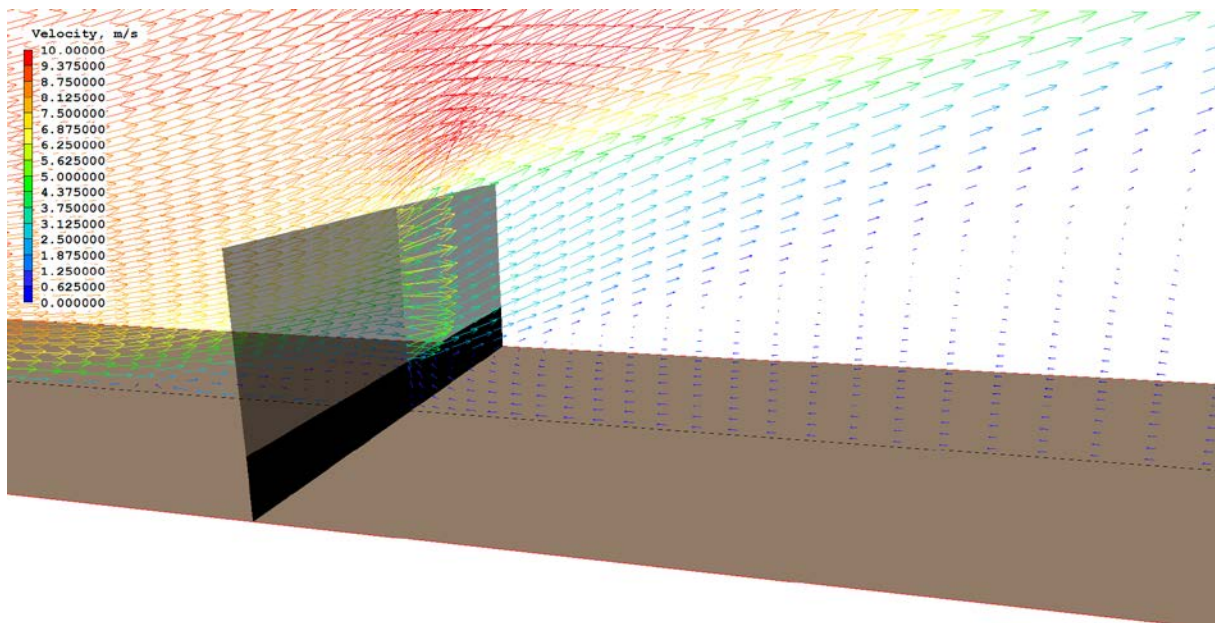


図 3-12 H4m_Lp1m の解析結果

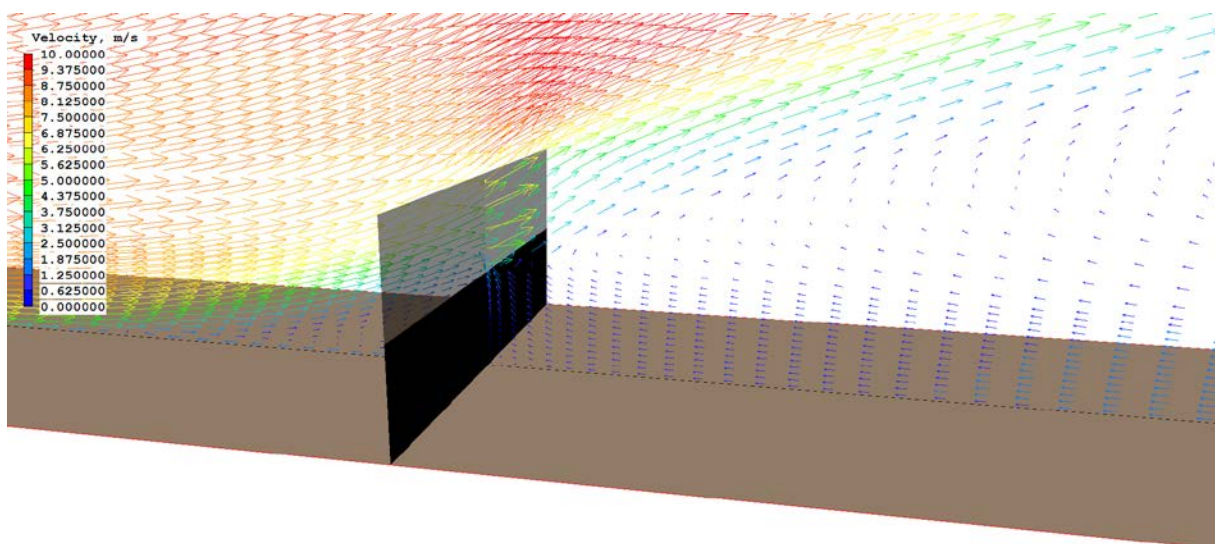


図 3-13 H4m_Lp2m の解析結果

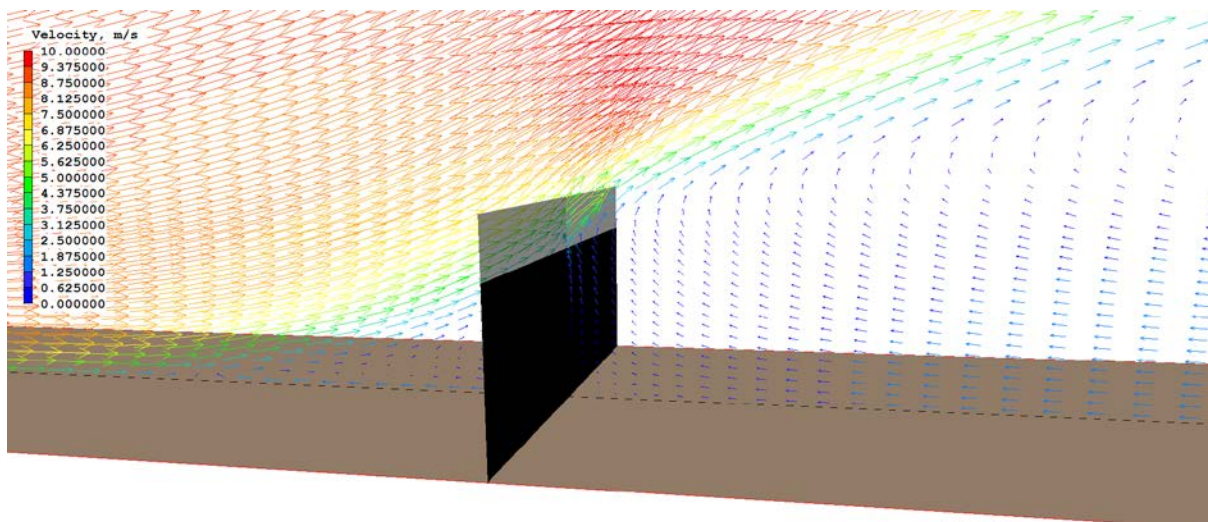


図 3-14 H4m_Lp3m の解析結果

4. 粉体風洞装置を用いた防雪性能の評価

(1) 検討概要

本章では、縮小模型と模擬雪を用いた風洞実験により、防風柵の仕様の変化と防雪性能との関係を明らかにする。防雪性能の評価に際しては、柵風下側の吹きだまりの位置および堆積量に着目して検討を行う。

(2) 粉体風洞装置による防風性能の評価

1) 実験装置の概要

実験に用いた粉体風洞装置の概要図を図 4-1、装置の諸元を表 4-1 に示す。風洞は回流型密閉式で、測定部の断面は幅 1.5m×高さ 0.7m、長さは 9.5m である (写真 4-1)。模擬雪は、粉体供給装置のタンク (写真 4-2) に入れた後、コンプレッサーを使いタンクに圧力を加え、オートフィーダにより所定の量と速度で測定部上流の供給ノズルから風洞内に供給する (写真 4-3)。ノズルから模擬雪を気流中に放出することにより測定部上流に吹雪を発生させ、試験体周囲に模擬雪を堆積させる。試験体に堆積した模擬雪の堆積量は、トラバース装置に取り付けたレーザー変位計 (キーエンス社製 LK500、精度±0.1mm) により計測する (写真 4-4)。

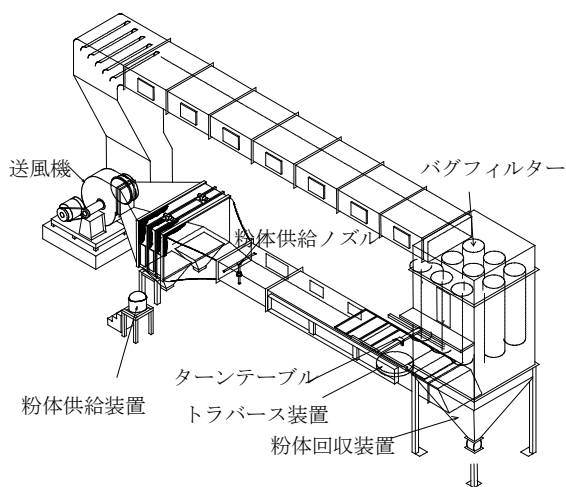


図 4-1 粉体風洞装置

表 4-1 粉体風洞装置の諸元

本 体	型 式	縦型密閉単一回流型
	測定洞断面	幅 1.5m×高さ 0.7m
	測定洞長さ	9.5m
	縮流比	1 : 5
	ターンテーブル	φ1.2m
送風機	型 式	片吸込遠心送風機
	風 速	0.5~10m/sec
	風 量	630m ³ /min (max)
	風 圧	1960Pa



写真 4-1 測定部



写真 4-2 粉体供給装置のタンク

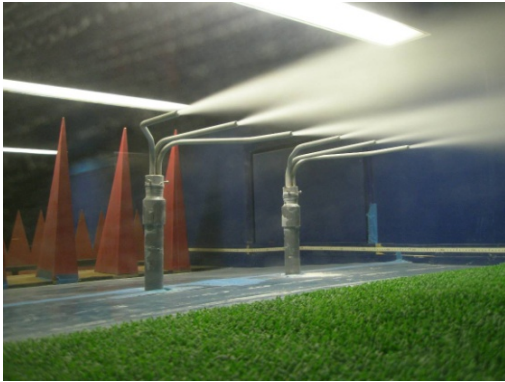


写真 4-3 粉体供給ノズル



写真 4-4 レーザー変位計

2) 実験モデル

実験モデルは3章で使用した実験モデルと同一である。防雪性能の比較のため道路防雪柵の実験モデルを追加したほか、モデルが無い状態での実験も実施した。実験モデルの一覧を表 4-2 に示す。防雪柵の仕様は、高さ 4m、上部有孔板の充実率は防風柵よりも大きく 70%であり、下部無孔板の高さは 2m および 3m とした (図 4-2)。柵の設置長さ(モデルの幅)は実寸で 120m である。実験モデルの材料および縮尺は 3 章と同様である。

実験では、柵の高さ(H)および下部無孔板(充実率 100%)の高さの変化が防雪性能に及ぼす影響を評価する。柵の高さ(H)については、標準的な防風柵を模した有孔板のモデルにおいて実寸で H=2m、3m、4m と変化させ、下部無孔板の高さ(Lp)については、柵高 4m において Lp=1m、2m、3m と変化させ、防雪柵との比較を行った。実験モデルを写真 4-5 に示す。

表 4-2 実験モデルの一覧

モデルの名称	形式	柵高さ (m)	有孔板の充実率 (%)	下部無孔板の高さ (m)
H2m	有孔板	2	60	—
H3m	有孔板	3	60	—
H4m	有孔板	4	60	—
H4m_Lp1m	下部無孔板	4	60	1
H4m_Lp2m	下部無孔板	4	60	2
H4m_Lp3m	下部無孔板	4	60	3
防雪柵_Lp2m	下部無孔板	4	70	2
防雪柵_Lp3m	下部無孔板	4	70	3

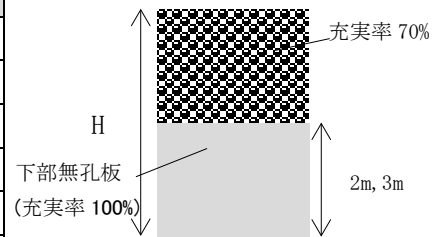
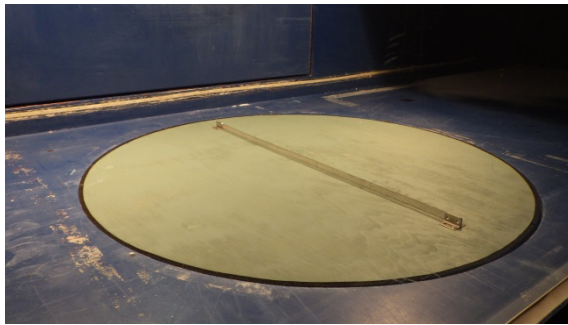
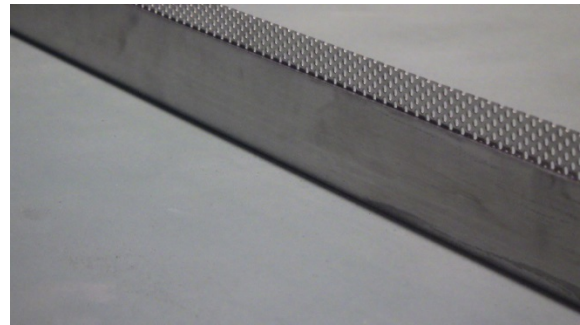


図 4-2 実験モデル (防雪柵)



(a) H2m



(b) 防雪柵_Lp3m

写真 4-5 実験モデルの外観

3) 模擬雪

模擬雪には、防雪柵等の縮小模型を対象とした風洞実験において相似条件が検討され、実現象との比較が多く行われている活性白土を用いた¹⁸⁾⁻²⁰⁾。実験で用いる活性白土と自然雪の物性を表 4-3 に示す^{19), 21)}。粒径比については、自然雪の粒子径は雪質や測定場所により異なるが、表 4-3 より模擬雪の縮尺はおおよそ 1/10~1/100 となり、模型縮尺とほぼ等しい。移動臨界摩擦速度は粒子が風により移動を開始する時の摩擦速度である。安息角は吹きだまりの堆積形状と粒子の粘着性に関する相似パラメータであり (図 4-3)、活性白土は自然雪と概ね近似した値である。模擬雪の総供給量は 50kg、供給時間は約 95~98 分である。時間と長さの縮尺比の関係式(4-1)から、本実験は実現象において約 158~163 時間の降雪が続いた条件に相当する²²⁾。

表 4-3 自然雪と活性白土の物性

項目	自然雪	活性白土
平均粒子径 (mm)	0.2~2	0.020
かさ密度 (g/cm ³)	0.03~0.2	0.47
移動臨界摩擦速度 (m/s)	0.15~0.40	0.16~0.20
安息角 (°)	45~50	46

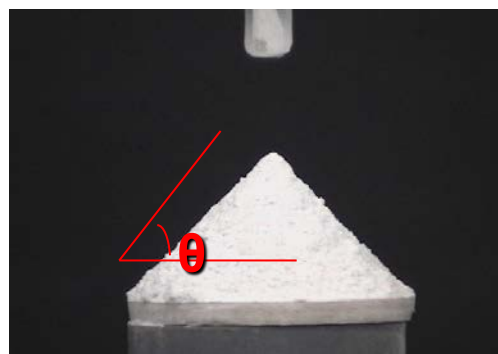


図 4-3 安息角 (θ)

$$L_p/T_p=L_m/T_m \quad (4-1)$$

L_p : 実現象の積雪深, L_m : 風洞実験での積雪深, T_p : 実現象の時間, T_m : 風洞実験での時間

4) 気流条件

第3章と同様、地表面粗度区分Ⅱに近似した気流で実験を行う¹⁶⁾。風洞内の気流条件を図4-4に示す。実験風速は、Anno(1984)¹⁸⁾、老川(2007)²¹⁾を参考に基準風速と粒子の臨界摩擦速度の比として式(4-2)より求めた。Anno(1984)¹⁸⁾によれば活性白土を模擬雪として用いた場合、 $A_m/A_p=1.375$ となる。

$$\frac{U_p}{U_m} = \frac{A_m \cdot U_{*p}}{A_p \cdot U_{*m}} \quad (4-2)$$

U : 風速 (m/s), A : 定数, U_{*t} : 移動臨界摩擦速度, p : 実現象, m : 風洞実験

U_p は防風柵の設置予定地点(秋田県)で観測された吹雪時の平均風速12.5m/sとし、表6-1より U_{*p} を自然雪の上限値と想定すると0.4m/s、 U_{*m} を下限値の0.16m/sとすると、風洞実験における風速 U_m は3.6m/sとなる。風向は柵に対して直交する向きとした。

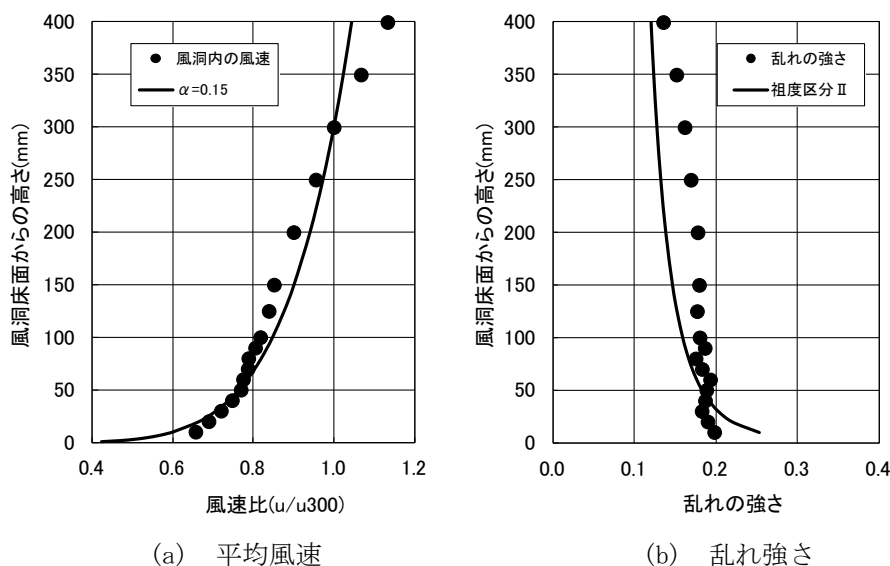


図4-4 風洞実験の気流条件

5) 実験結果

図4-5～図4-7に実験後の計測結果、写真4-6～写真4-13に堆積状況を示す。また、表4-1に吹きだまりに関する諸量の比較として、吹きだまり量および最大高さについて、各モデルとモデル無しとの比を示す。

図4-5によれば、防風柵の下部無孔板が無い仕様(H2m、H3m、H4m)では柵の高さが増すほど、風下側の吹きだまりの最大高さは低くなる傾向にあるが、いずれにおいても、線路が位置する柵の風下側に吹きだまりが発生している。図4-6より防風柵に下部無孔板がある仕様の堆積状況を見ると、H4m_Lp2mおよびH4m_Lp3mは吹き止め柵(図2-2(b))と似た傾向を示し、風上側において、吹きだまりにより堆積量が多くなっているものの、風下側の堆積量は非常に少なく、吹きだまりも発生していない。一方、H4m_Lp1mは風上側の吹きだまりが、下部無孔板の高さを超えたため、風下側に吹きだまりが発生し堆積量も多くなっている(写真4-9)。防風柵に下部無孔板のある仕様(H4m_Lp2m、H4m_Lp3m)と防雪柵との比較を図4-7に示す。防風柵の下部無孔板が防雪柵の仕様と同じ高さであれば、ほぼ同様の防雪性能を示している。表4-1より各モデルの吹きだまりに関する諸量をみると、防風柵の下部無孔板が2m以上あれば、柵風下側の吹きだまり量は通常の防風柵の1/2程度まで減少し、吹きだまりの最大高さも低くなる。

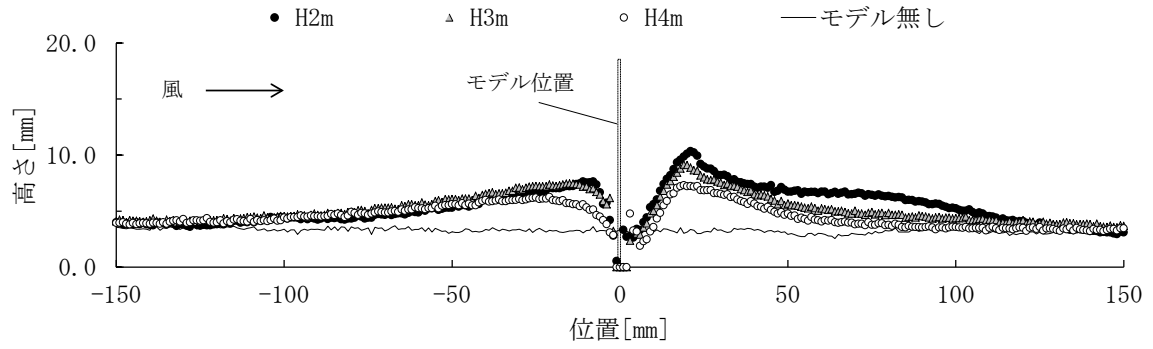


図 4-5 防風柵の高さと堆積状況との関係 (H2m、H3m、H4m、モデル無し)

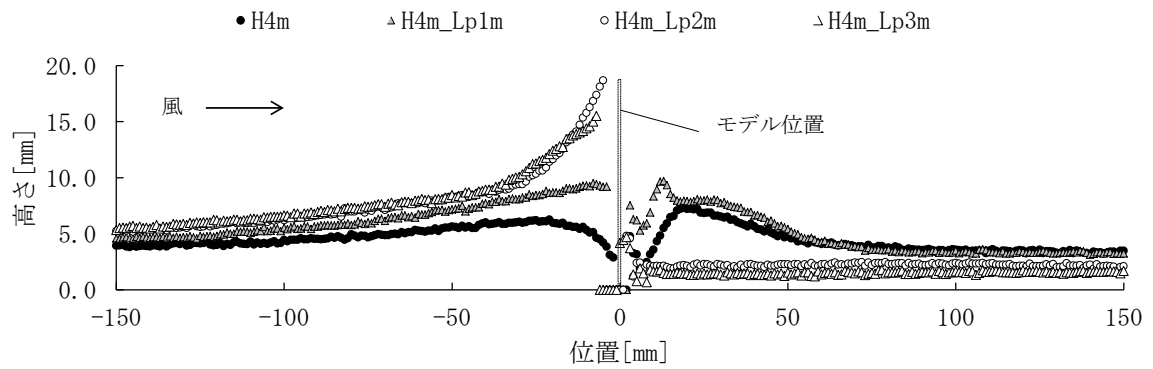


図 4-6 下部無孔板の高さと堆積状況との関係 (H4m、H4m_Lp1m、H4m_Lp2m、H4m_Lp3m)

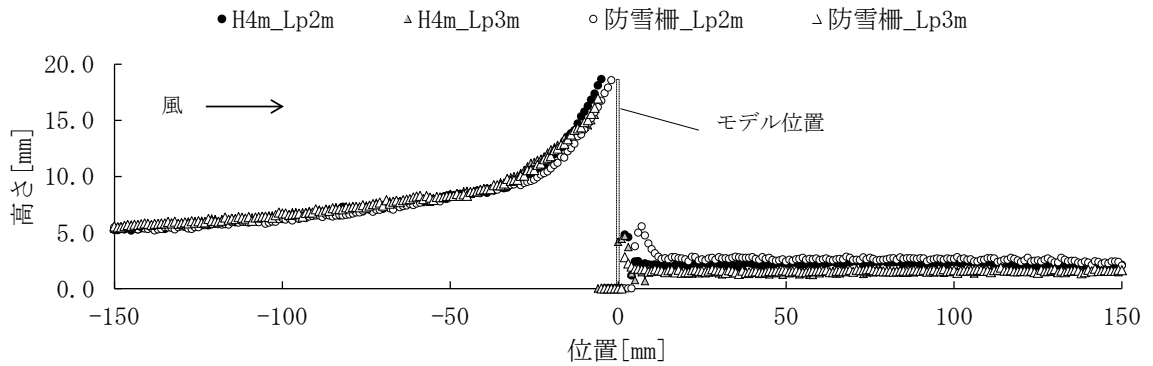
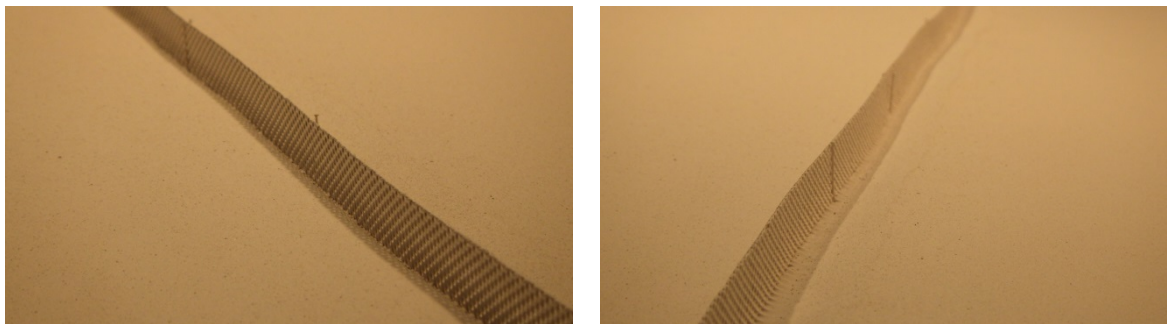


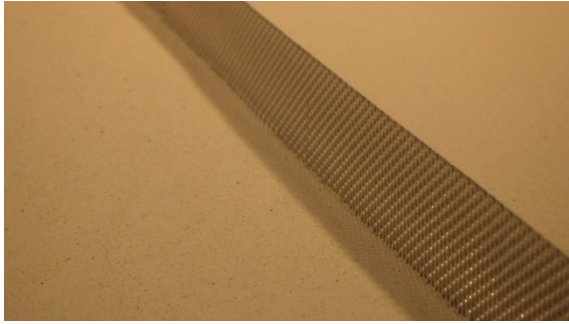
図 4-7 下部無孔板のある仕様と防雪柵との比較 (H4m_Lp2m、H4m_Lp3m、防雪柵_Lp2m、防雪柵_Lp3m)



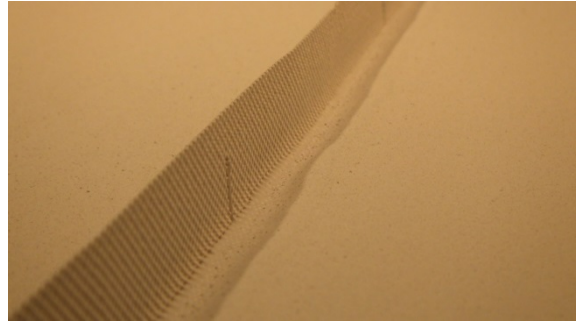
(a) 風上側

(b) 風下側

写真 4-6 H2m の堆積状況

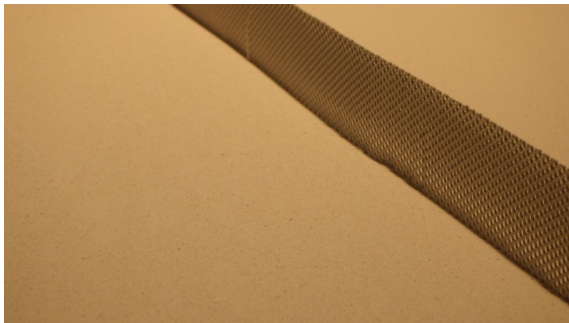


(a) 風上側

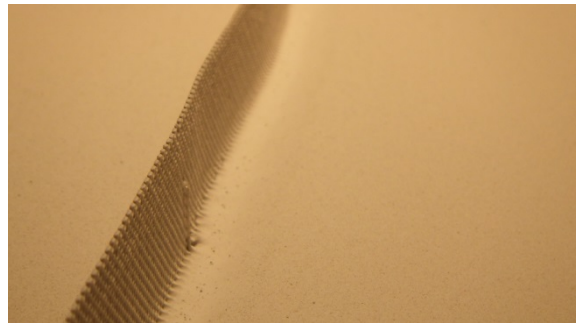


(b) 風下側

写真 4-7 H3m の堆積状況

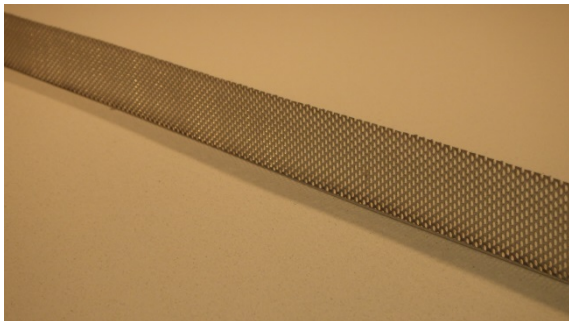


(a) 風上側

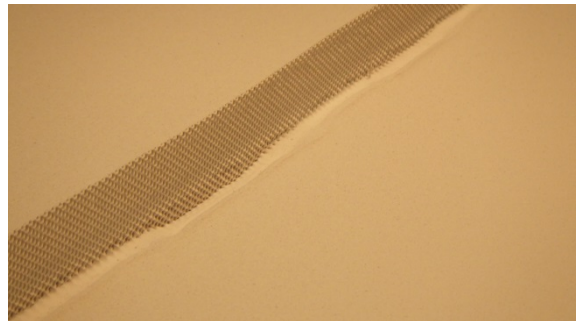


(b) 風下側

写真 4-8 H4m の堆積状況

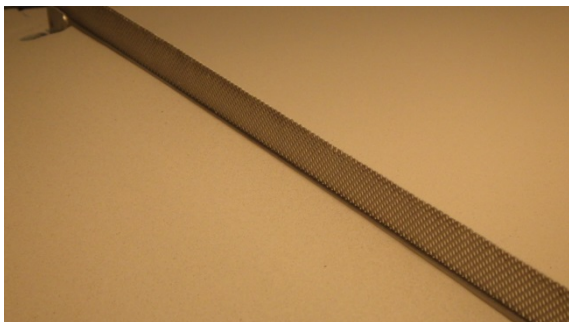


(a) 風上側

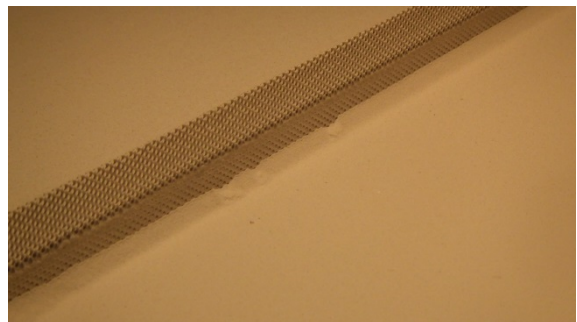


(b) 風下側

写真 4-9 H4m_Lp1m の堆積状況

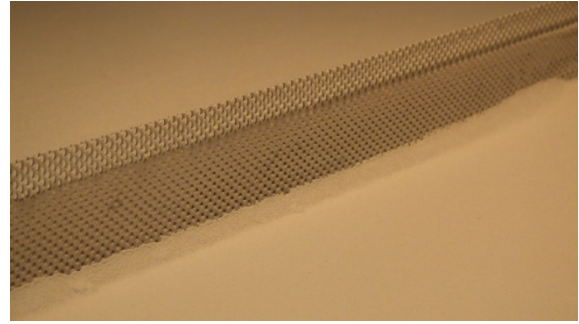
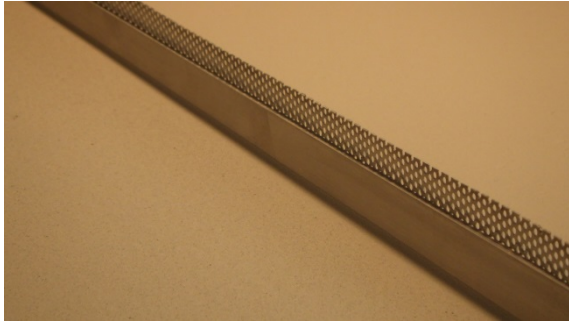


(a) 風上側



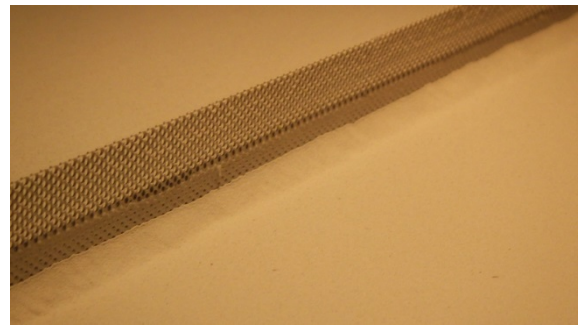
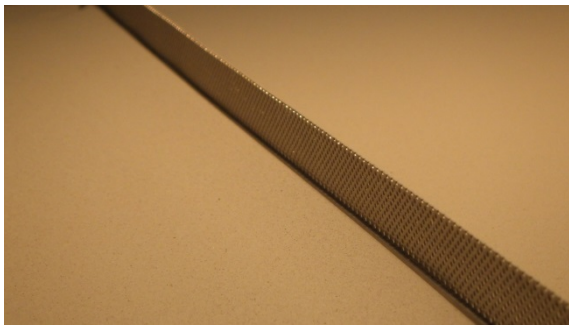
(b) 風下側

写真 4-10 H4m_Lp2m の堆積状況



(a) 風上側 (b) 風下側

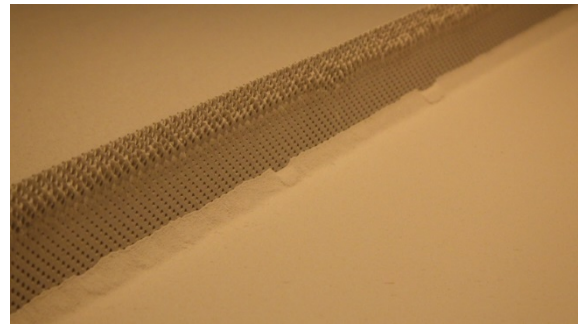
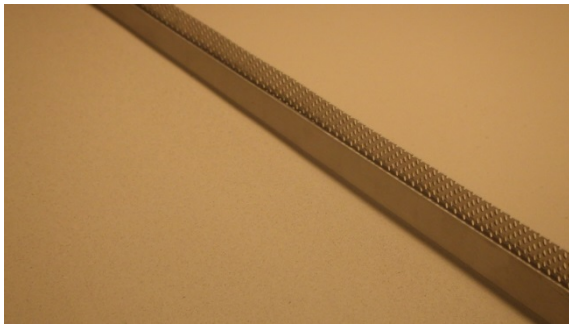
写真 4-11 H4m_Lp3m の堆積状況



(a) 風上側

(b) 風下側

写真 4-12 防雪柵_Lp2m の堆積状況



(a) 風上側

(b) 風下側

写真 4-13 防雪柵_Lp3m の堆積状況

表 4-1 吹きだまりに関する諸量の比較

区分	モデル	吹きだまり量 ^{※1}			風下側の最大高さ ^{※2}
		風上側	風下側	合計	
防風柵	H2m	1.5	1.8	1.6	2.8
	H3m	1.6	1.6	1.6	2.5
	H4m	1.4	1.3	1.4	2.0
防風柵+下部無孔板	H4m_Lp1m	1.8	1.5	1.7	2.6
	H4m_Lp2m	2.3	0.7	1.5	1.3
	H4m_Lp3m	2.3	0.5	1.4	1.3
防雪柵	防雪柵_Lp2m	2.3	0.8	1.6	1.5
	防雪柵_Lp3m	2.3	0.5	1.4	0.8
モデル無し	—	1.0	1.0	1.0	1.0

※1 吹きだまり量：モデル無しの堆積量に対する比

風上側(X=-150~0)、風下側(X=0~150)、合計=風上側+風下側

※2 最大高さ：モデル無しの最大高さに対する比

(3) 4章のまとめ

本章では模擬雪を用いた風洞実験により、防風柵の仕様と防雪性能の関係について検討した。その結果、防風柵の高さを増すことにより柵風下側の吹きだまり量は軽減されるが、線路がある柵風下側において吹きだまりが発生し、その最大高さも大きい。防風柵の下部に無孔板を付けると柵風下側の吹きだまり量は 1/2 程度まで減少する。しかしながら柵の風上側の吹きだまりが下部無孔板の高さを超えると、柵風下側の堆積量が多くなるなど防雪性能が低下する。このため、下部無孔板の高さは、防風柵の設置場所の吹きだまり量に応じて設定する必要がある（図 4-8）。

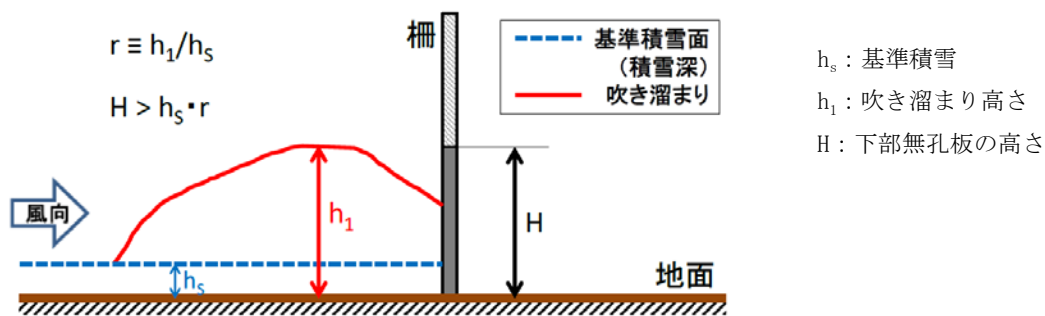


図 4-8 下部無孔板の高さの設定²³⁾

5. 防風性能と防雪性能を満たす仕様の検討

(1) 防風性能と防雪性能を満たす仕様の整理

防風性能と防雪性能を満たす仕様について、第3章における防風性能の検討と第4章における防雪性能を整理すると表5-1のようになる。表5-1を踏まえると、防風柵において下部無孔板の高さを柵の1/2程度とすることが総合的に最も性能が良い。

表5-1 仕様別の防風性能と防雪性能の比較

区分	モデル名	防風性能	防雪性能	総合評価
防風柵	H4m	○	×	△
防風柵+下部無孔板	H4m_Lp1m	○	×	△
	H4m_Lp2m	◎	○	◎
	H4m_Lp3m	○	○	○

(2) 実際の設置環境を想定した検討

第3章、第4章では主風向が柵と線路に対し直交方向を想定して検討した。しかしながら、実際の設置環境では柵および線路に対し斜めから風が来る斜風も一般的である。ここでは斜風時の状況を想定した風洞実験により検討を行う。

1) 検討概要

検討モデルを表5-2に示す。モデルの仕様および縮尺等は第3章、第4章と同様である。風向角45°の斜風とし(図5-1)、粉体風洞装置を用いて斜風時の防雪性能を比較した。実験風速、模擬雪の供給量、供給時間等の流入条件は第4章と同じである。

表5-2 検討モデル

区分	モデル名
防風柵	H2m
	H4m
防風柵+下部無孔板	H2m_Lp1m
	H4m_Lp2m

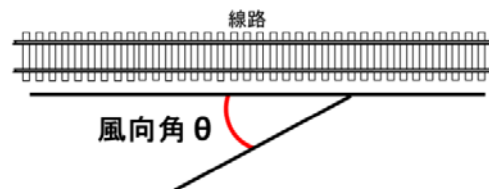


図5-1 線路と風向角の関係²³⁾

2) 検討結果

図5-2～図5-3に実験後の計測結果、写真5-1～写真5-4に堆積状況を示す。また、表5-2に吹きだまりに関する諸量の比較として、吹きだまり量および最大高さについて、各モデルとモデル無しとの比を示す。表5-2に示すように、斜風の条件であっても、防風柵に下部無孔板を付けることにより、防雪性能は向上する。しかしながら、風下側の吹きだまり量、吹きだまりの最大高さは直交風の条件よりも増加しており、斜風の条件では防雪性能は幾分低下している。これは斜風の条件では柵に沿った流れが形成され、柵上端から剥離する流れが弱まり粒子が柵の後方に回り込みやすくなるためと考える。

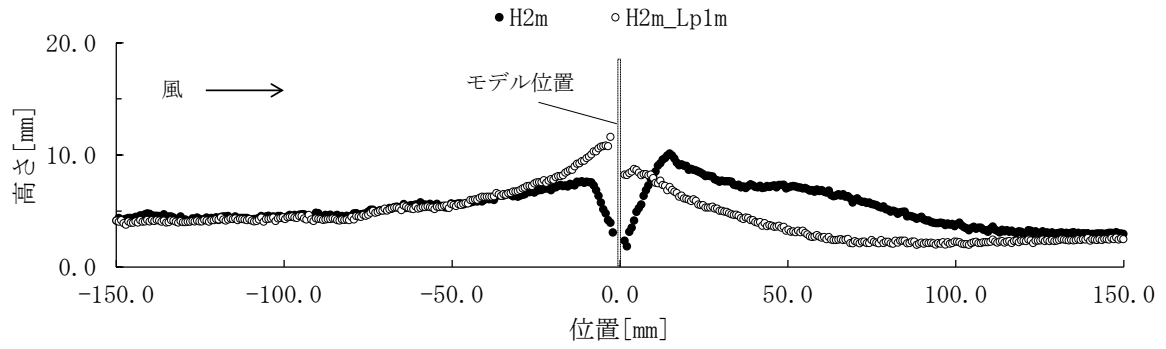


図 5-2 風向角 45° における防風柵 (H2m) と下部無孔板のある仕様 (H2m_Lp1m) との比較

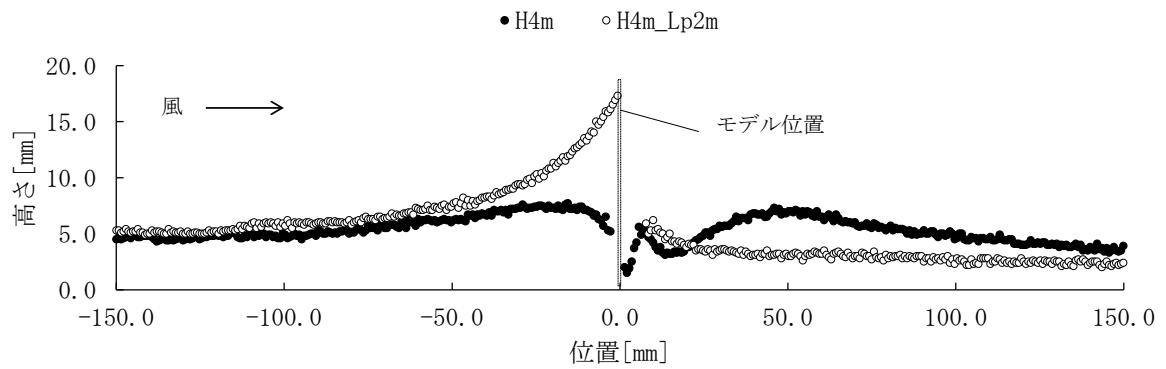
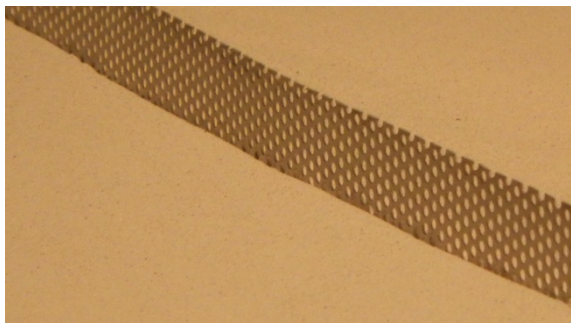


図 5-3 風向角 45° における防風柵 (H4m) と下部無孔板のある仕様 (H4m_Lp2m) との比較

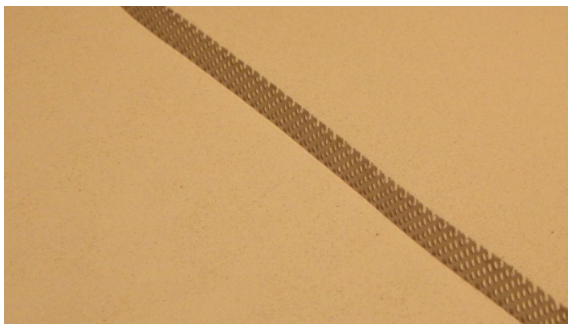


(a) 風上側

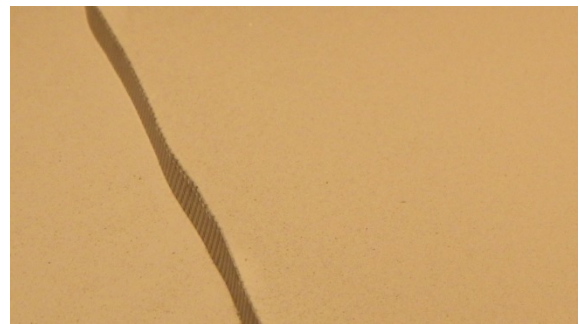


(b) 風下 (モデル左側)

写真 5-1 H2m の堆積状況



(a) 風上側



(b) 風下 (モデル左側)

写真 5-2 H2m_Lp1m の堆積状況

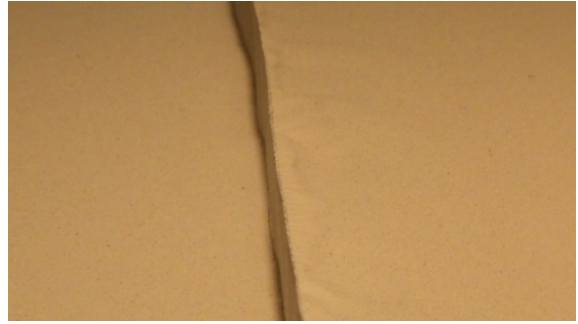
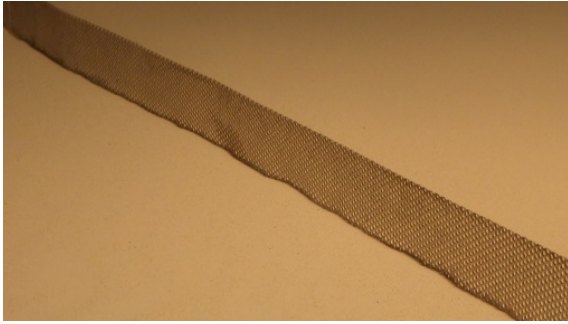


写真 5-3 H4m の堆積状況

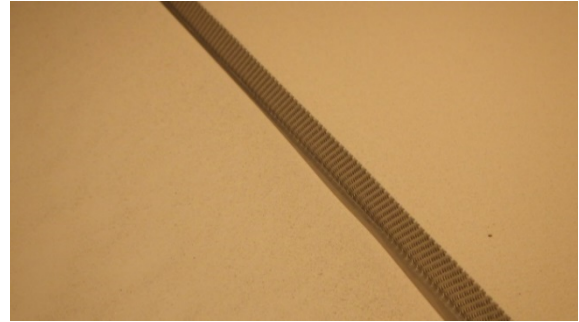
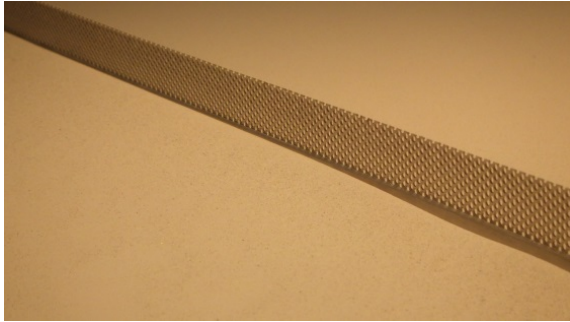


写真 5-4 H4m_Lp2m の堆積状況

表 5-2 吹きだまりに関する諸量の比較

区分	モデル	吹きだまり量 ^{※1}			風下側の 最大高さ ^{※2}
		風上側	風下側	合計	
防風柵	H2m	1.6	2.0	1.8	2.8
	H4m	1.7	1.7	1.7	2.0
防風柵+下部無孔板	H2m_Lp1m	1.8	1.1	1.5	2.3
	H4m_Lp3m	2.4	1.0	1.7	1.7

※1 吹きだまり量：モデル無しの場合の堆積量に対する比

風上側(X=-150~0)、風下側(X=0~150)、合計=風上側+風下側

※2 最大高さ：モデル無しの場合の最大高さに対する比

(3) 5章のまとめ

仕様別に防風性能と防雪性能を整理し、比較した結果、防風柵において下部無孔板の高さを柵の 1/2 程度とすることが総合的に最も性能が良いことが明らかとなった。実際の設置環境を想定した斜風の条件においても、下部無孔板により防雪性能が向上することが分かった。

6. まとめ

本研究では北日本地域における高速鉄道の安全性向上に資するため、防風柵の防雪性能を明らかにすると共に、防風柵の防雪性能を改善する仕様を明らかにした。風洞実験および数値解析により従来の充実率60%では柵風下側に吹きだまりが形成されるが、防風柵に柵の高さの1/2程度の無孔板を取り付けることにより、防風性能を損なわずに防雪性能が大幅に向上することが分かった。

なお、本研究で明らかにした仕様に基づき、実物大のモデルによる検証実験を秋田県にて実施中である（写真6-1）。引き続き実用化に向けた検討を進める予定である。



写真 6-1 秋田県にて実施中の実大実験の様様

[参考文献]

- 1) 運輸安全委員会：東日本旅客鉄道株式会社 奥羽線 神宮寺駅～刈和野駅間 列車脱線事故，鉄道事故調査報告書，RA2014-4，2014. 4
- 2) 風工学研究所：ビル風の基礎知識，鹿島出版会，pp. 73-80，2005. 12
- 3) 高瀬知章，村上周三，小峯裕己，出口清孝：実物大の防風フェンスを用いたフェンスの防風効果に関する風洞実験，日本建築学会研究報告集，No. 51，pp. 9-12，1980. 7
- 4) 吉田正昭，眞田早敏，本郷剛，中村修：防風ネットフェンスに関する実験的研究，鹿島建設技術研究所年報，No. 23，pp. 259-264，1975. 6
- 5) 枝元勝哉，畠中真一，宮地真一：道路に対する横風軽減用防風柵の実験的検討，構造工学論文集，Vol. 45A，pp. 1129-1136，1999. 3
- 6) 日本鋼構造協会編：構造物の耐風工学，東京電機大学出版会，pp. 496-499，1997. 11
- 7) 村木義男，大平正浩，竹内政夫，佐伯浩：ネット型防風柵による風と風波の制御に関する実験的研究，海岸工学論文集，No. 39，pp. 516-520，1992
- 8) 荒木啓司，日比野有，鈴木実：列車運行と強風規制，日本風工学会誌，No. 142，pp. 10-16，2015. 1
- 9) 鉄道強風対策協議会：防風設備の手引，pp. 5-13，2006. 9
- 10) 武田勝昭，安田軌世史，竹内政夫，金田安弘：防風・防雪柵の性能に関する風洞実験，日本風工学会誌，No. 25，pp. 15-32，1985. 9
- 11) Tabler, R.D. : Controlling Blowing Snow and Drifting Snow with Snow Fences and Road Design, 2003. 8
- 12) 寒地土木研究所：道路吹雪対策マニュアル，第3編防雪柵編，2011. 3
- 13) 島村誠，鈴木博人：鉄道林・成立経緯と施業の変遷，土木史研究，No. 16，1996. 6
- 14) 鈴木修：JR 東日本における雪対策の現状と近年の技術開発，日本雪工学会誌，No. 123，pp. 74-78，2016. 4
- 15) 穴戸真也：鉄道の防雪柵，RRR (Railway Research Review)，鉄道総合技術研究所，Vol. 75，No. 2，pp. 32-35，2018. 2
- 16) (財)日本建築センター：建築物風洞実験ガイドブック，pp. 22-39，2008. 10
- 17) 村上修三：CFDによる建築・都市の環境設計工学，pp. 252-264，東京大学出版会，2000. 9
- 18) Anno, Y : Requirements for Modeling of a Snowdrift, Cold Regions Science and Technology, Vol. 8, pp. 241-252, 1984.
- 19) 老川進，苔米地司，石原孟：建物近傍の雪吹きだまりの風洞相似則に関する考察，日本雪工学会誌，Vol. 23，No. 2，pp. 13-32，2007. 4
- 20) 堤拓哉，高橋章弘，千葉隆弘，苔米地司：模擬雪を用いた風洞実験における乱れ強さの変化が吹きだまり性状に及ぼす影響，日本建築学会構造系論文集，No. 613，pp. 29-34，2007. 3
- 21) 前野紀一，福田正己，雪氷の構造と物性（基礎雪氷学講座），古今書院，pp. 157-158，1986. 1
- 22) 江守一郎：模型実験の理論と応用，技報堂出版，pp. 24-43，1985. 7
- 23) 原田貴智，南雲洋介，鈴木博人：防雪機能を付加した防雪柵の検討，第24回鉄道技術・政策連合シンポジウム (J-RAIL2017)，2017. 12