

耐久性・景観性に優れた高性能防風フェンスの  
開発に関する事業

報告書

平成 27 年 3 月

新潟工科大学 富永禎秀

## 1. はじめに

日本海沿岸では冬季の季節風が強く、強風による様々な被害が発生している。強風による被害を低減するために、防風のための有孔フェンスやネットが設置される場合が多い。またこのような有孔フェンスやネットは、冬季の地吹雪対策などにも用いられる。しかしながら、これらを設置する際の最適な配置方法の検討や効果の予測については、経験的に行われている場合が多く、より定量的な予測手法の確立が期待される。

本研究では、防風用有孔フェンス周辺の風速分布に関する風洞実験を行い、基本的な検証用データを整備するとともに、研究の第一段階として、単純なモデル化に基づく CFD (Computational Fluid Dynamics) 解析を試み、その精度を検証した。また本研究では、既往の研究あまり取り上げられていない接近流の乱れ性状が後方の風速分布に及ぼす影響について検討する。

上記の検討結果に基づき、「フェンスの防風効果は、開口率によって決まり、開口の大きさは影響しない。開口を大きくすることで、材料やデザインの自由度が飛躍的に高まる」というコンセプトに基づき、新たな防風フェンスのデザインを提案する。

## 2. 有孔フェンス周辺の流れ場に関する既往の研究

有孔フェンス周辺の流れ性状に関しては、古くから風洞実験による検討が行われてきた例<sup>1)-4)</sup>。これに対して、最近では CFD による解析が行われているようになってきた。Santiago et al. (2007)は、開口率を段階的に変化させた有孔フェンスを 3 種類の RANS モデル（標準  $k-\epsilon$ ， RNG  $k-\epsilon$ ， realizable  $k-\epsilon$ ）で解析を行い、効果的な防風効果を示す開口率の推定を行っている<sup>5)</sup>。Bourdin and Wilson (2008)は、CFD によって、2 次元の有孔フェンス及び有孔フェンスで囲まれた四角形領域の流れ場を解析し、風洞実験との比較に基づき、メッシュ分割や解析領域、乱流モデルの影響について感度解析を行っている<sup>6)</sup>。Yeh et al. (2010)は、RNG  $k-\epsilon$  モデルを用いた CFD によって、ストックヤードの飛散を防止するための有孔フェンスの効果を検討している<sup>7)</sup>。Guo and Maghirang (2012)は、有孔フェンスや植栽が気流を抑制し、微粒子を捕捉する効果を CFD によって検討している<sup>8)</sup>。

## 3. 基本的な防風フェンスを対象とした風洞実験と CFD 解析の比較

### 3.1 風洞実験の概要

#### 1) 使用風洞

新潟工科大学所有の大型境界層型風洞（回流式境界層風洞）を用いた。

#### 2) 対象とするフェンス

防風防雪用として市販されているネット（閉塞率：約 60%）を 5mm 角の木材で縁取りし、高さ 0.1m × 幅 1.8m の大きさのフェンスとして風洞内に設置した。ネットの繊維径は 2mm である。風洞内における設置状況とネットの拡大写真を図 1 に示す。

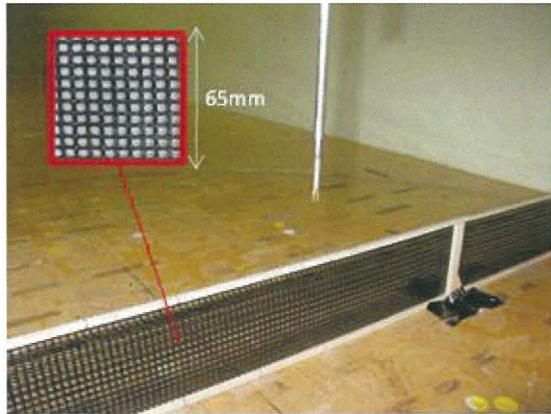


図 1 風洞内のフェンスの設置状況

### 3) 実験ケース

流入風の乱れ性状がフェンス後方の流れ場に及ぼす影響を観察する目的で、上流側の風洞床に何も設置しない場合 (Case I) と 25mm 角のラフネスを風洞上流に設置して流入風の乱れを大きくした場合 (Case II) の 2 ケースとする。図 2 は、両ケースのフェンスを設置しない状態の風洞内の主流方向の平均風速と乱れ強さの鉛直分布を示している。フェンス高さ以下の平均風速分布は大きく違わないが、Case II のフェンス高さの乱れの強さは、Case I の約 2 倍大きい。

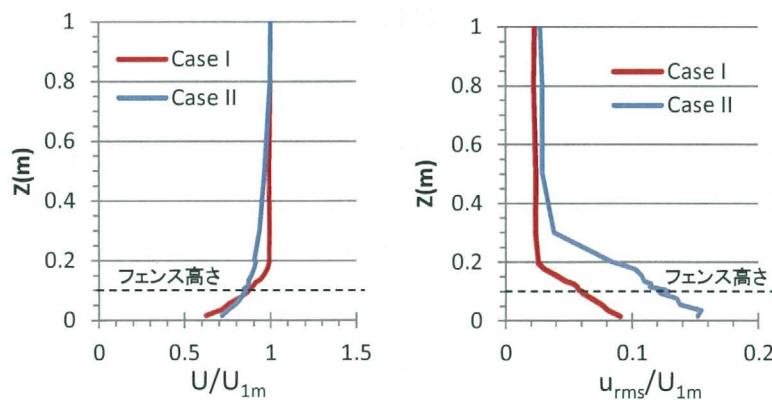


図 2 接近流の平均風速と乱れ強さの鉛直分布

### 4) 測定方法

風洞内の主流直交方向に防風フェンスを設置し、トラバース装置にサーミスタ風速計（芝浦電子 PA1616, センサー AS301-10）を取り付けて、中心断面において平均スカラ風速を測定した。風洞内の風速は、約 5m/s とした。ラフネスを配置しない Case I については、乱流エネルギーを得るためにスプリットファーバープローブ (DANTEC 55R55) による計測も行った。

### 3.2 CFD 解析

#### 1) 解析条件

実験と同じ高さ 0.1m の防風フェンスを対象とし、解析領域は 2m(x) × 1.8m(y) の 2 次元計算とした。メッシュ分割及び解析領域を図 3 に示す。解析は ANSYS Fluent 12.5 を使用した。流入境界条件は、実験の分布（図 2）を与えた。乱流モデルは、RNG 型  $k-\epsilon$  モデルを使用し、SIMPLE 法に基づく定常解析を行った。

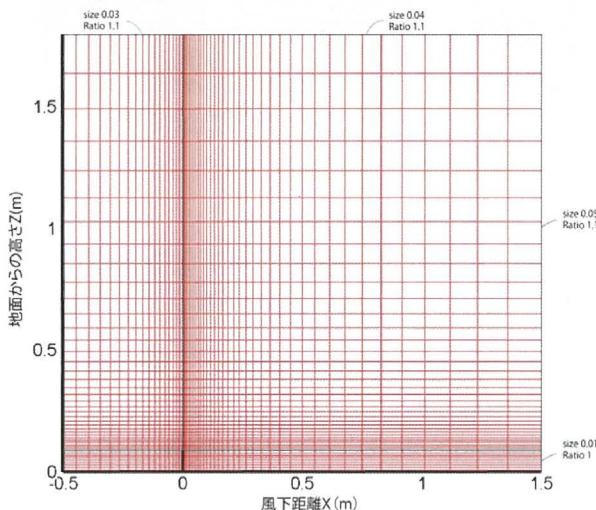


図 3 解析領域とメッシュ分割

#### 2) 有孔フェンスのモデル化

フェンスは porous media としてモデル化する。本研究では実用的な適用を考慮して、フェンスの厚みを考慮しない多孔質ジャンプ (porous jump) 条件として設定した。本研究で使用したソフトウェアでは、Porous media は次式のように Viscous loss term (I) と Inertial loss term (II) によってモデル化される<sup>9)</sup>。この項が sink 項として運動方程式に加わる。

$$S_i = - \left( \frac{\mu}{\alpha} v + C_2 \frac{1}{2} \rho v^2 \right) \quad (1)$$

I                  II

ここで、 $\alpha$  は媒体の浸透率 ( $m^2$ )、 $C_2$  は慣性抵抗 ( $m^{-1}$ )、 $v$  は多孔質フェースに垂直な速度、 $S_i$  は porosity による圧力損失に対応する。本解析対象では、第 2 項に比べてその寄与は小さいと考え、第一項は無視する<sup>6)</sup>。 $C_2$  は有孔フェンスの圧力損失係数  $K_r$  と関係付けて次式で表現できる<sup>6)9)11)13)</sup>。

$$C_2 = \frac{K_r}{W} \quad (2)$$

ここで  $K_r$  は有孔フェンスの形状や開口率に依存するパラメータで、 $W$  はフェンスの厚みである。既往研究より、有孔フェンスでは、 $K_r=4$  とされる<sup>5)6)13)</sup>。

本研究対象のフェンスの厚み  $W=0.002m$  より  $C_2=2.0 \times 10^3$  が最適値と推定されるが、この

パラメータの感度を検討するため、Case I, II それぞれにおいて、 $C_2$  の値を変化させた解析を行った。

### 3.3 風洞実験結果及び考察

図 4 は、2 つのケースのスカラー風速分布を比較したものである。値は、それぞれのケースの模型を設置しない場合のフェンス高さの流入風速  $uH$  で基準化してある。Case I (ラフネス配置せず) では、風速比が 0.3 以下の領域が風下距離  $x/H=15$  より風下側まで到達している。それに対して、Case II (ラフネス配置) では、風速比 0.3 以下の領域は、およそ風下距離  $x/H=12$  までとなり、風速が低減する範囲はやや小さくなつたと言える。図 5 は、風下距離  $x/H=2, 5, 10, 15$  におけるスカラー風速の鉛直分布を比較したものである。 $x/H=2, x/H=5$  では、フェンス高さ以下の風速分布に明確な差異は見られない。しかしながら、 $x/H=10, x/H=15$  の下流側の位置では、Case II の方の風速が、特に地表面に近い方で大きくなつておらず、風速が回復していることが分かる。これは後述するように、Case II では流入風の乱れが Case I に比較して大きいことから、運動量の拡散がより活発に行われ、下流域の風速の回復が早くなり、結果として図 4 に見られるように、風速低減範囲が狭くなつたものと考えられる。すなわち、流入風の性状の違いは、フェンス後方の風速分布に比較的大きな影響を及ぼすことが明らかとなつた。

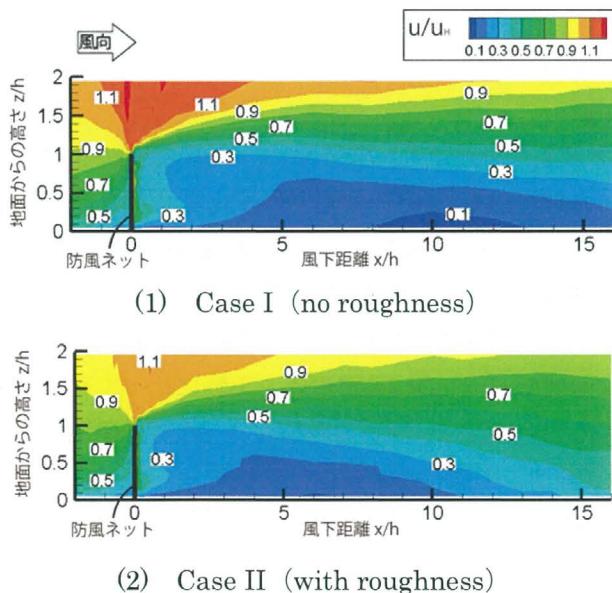


図 4 基準化されたスカラー風速のコンター（風洞実験）

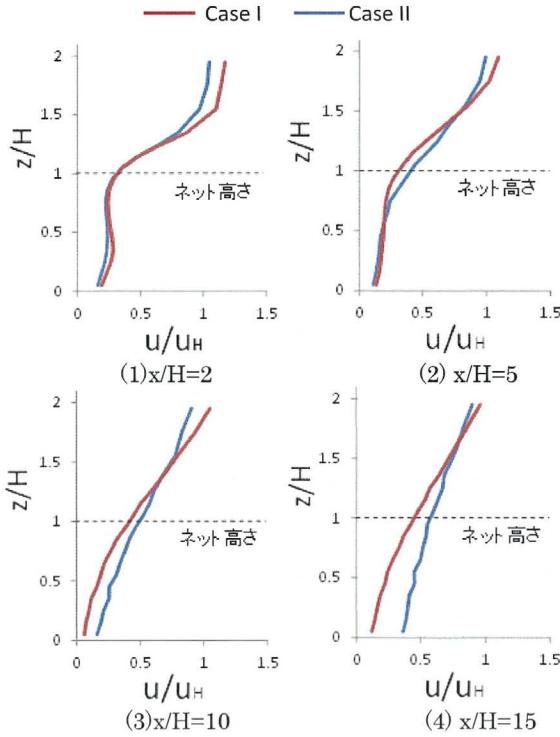


図 5 各ケースのフェンス後流における風速分布の比較

### 3.4 CFD 解析結果

#### 1) パラメータの最適化

図 6 に、Case I (ラフネス配置せず) の条件で、(2)式に現れる数値パラメータ  $C_2$  を  $1.5 \times 10^3$ 、 $2.0 \times 10^3$ 、 $2.5 \times 10^3$ 、 $3.0 \times 10^3$  の 4 通りに変化させた場合のスカラ一風速分布の比較を示す。当然ながら、 $C_2$  が大きくなるに従い、抵抗が増すため、フェンス後方の風速は弱くなる。Fig. 7 は、同じく Case I の条件で、 $x/H=1.0, 3.0, 5.0, 10.0$  の測定ラインの実験と CFD によるスカラ一風速の相関を示したものである。両者の相関はいずれも比較的高い。 $C_2=1.5 \times 10^3$  では低風速域で CFD の結果が風速を実験に比べてやや過大評価しており、 $C_2=3.0 \times 10^3$  では風速の速い領域で、風速を実験に比べて過小評価している。図は省略するが、Case II (ラフネス配置) の条件でも傾向は同様であった。より定量的にパラメータの影響を検討するため、以下の Metric を用いた。

① Fractional bias (FB):

$$FB = \frac{[O] - [P]}{0.5([O] + [P])} \quad (3)$$

② Normalized mean square error (NMSE):

$$NMSE = \frac{[(O_i - P_i)^2]}{[O][P]} \quad (4)$$

③ Fraction of predictions within a factor of 2 of observations (FAC2):

$$FAC2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n_i \text{ with } n_i = \begin{cases} 1 & \text{for } 0.5 \leq \frac{P_i}{O_i} \leq 2 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (5)$$

ここで  $O_i$  と  $P_i$  はそれぞれ  $i$  点の実験値と予測値を表す。 $N$  は全データ数で、[ ]は全データの平均を示す。完全なモデルでは、FB と NMSE は 0、FAC2 は 1 となる。

表 1 に、図 7 に示した測定点の実験結果と CFD の結果から上記の Metric を算出した結果を示す。総合的に判断すると、 $C_2=2.5 \times 10^3$  とした場合が最も実験との対応が良いという結果となった。すなわち(2)式において、既往研究と同様に  $Kr=4$  と与えて  $C_2$  を推定する方法は、概ね妥当な結果を与えるが、今回の解析においては、やや大きめの  $Kr=5$  程度と仮定して与えた  $C_2$  が最も実験に近い結果となった。

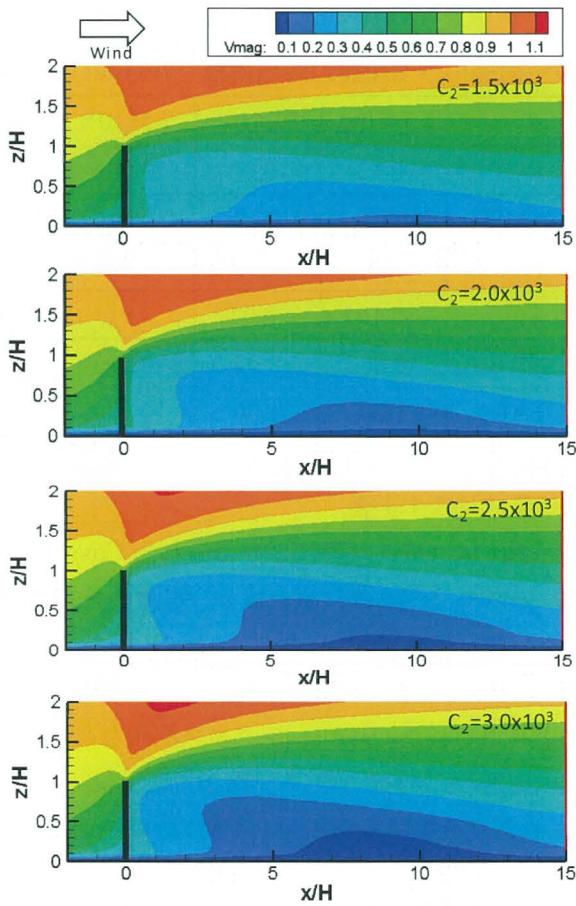


図 6 係数  $C_2$  が風速分布に及ぼす影響 (Case I)

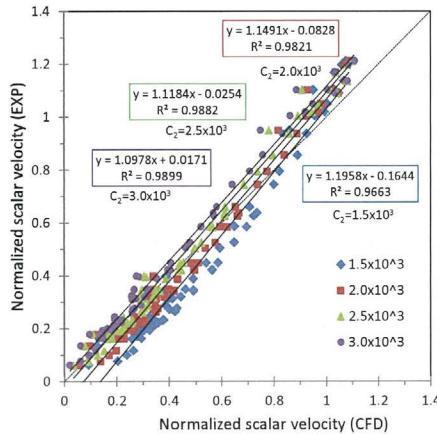


図 7 スカラー風速の実験と CFD 解析との比較 (Case I)

表 1 スカラー風速の予測精度の評価指標 (Validation Metrics)

		$1.5 \times 10^3$	$2.0 \times 10^3$	$2.5 \times 10^3$	$3.0 \times 10^3$
Case I	FB	-0.13	-0.03	0.06	0.13
	NMSE	0.04	0.02	0.01	0.02
	FAC2	0.96	1.00	1.00	0.97
Case II	FB	-0.16	-0.07	0.01	0.08
	NMSE	0.06	0.02	0.01	0.01
	FAC2	1.00	1.00	0.99	0.96

## 2) 流入風の性状が防風効果に及ぼす影響

図 8 は、 $C_2=2.5 \times 10^3$  を用いた CFD 解析により得られた Case I (ラフネス配置なし) と Case II (ラフネス配置) のスカラー風速分布である。実験の分布 (図 4) をよく再現している。実験結果と同様に、CFD 解析においても、Case II では、フェンス後方における風速の回復が早く、風速が低減する範囲はやや小さくなっている。

図 9 は、CFD 解析により得られた Case I (ラフネス配置なし) と Case II (ラフネス配置) の乱流エネルギー  $k$  を比較したものである。図 10 は、Case I (ラフネス配置なし) の条件での風洞実験で得られた乱流エネルギー  $k$  と CFD の値を比較したものである (乱流エネルギーは Case I の条件のみで計測)。全体的な分布の傾向は対応しているものの、風洞実験で見られる  $x/H=1.0$  や  $2.0$  での乱流エネルギーのピークを CFD では過小評価している。これは、フェンスの効果が  $k$  の輸送方程式で直接的に考慮されていないためであると考えられる。この点を改善するためには、 $k$  の輸送方程式への抵抗体による乱れの生成効果の導入が考えられるが<sup>14)</sup>、今後の課題としたい。図 9 を見ると、Case I の条件では、フェンスより離れた下流域 ( $x/H=12 \sim 15$ ) に乱流エネルギーのピークがあるのに対して、Case II の条件では、フェンス風下側直近でピークが形成されており、分布の傾向が異なる。これ

によって、Case II では、上空との運動量の交換が大きくなり、フェンス後流域の風速分布の回復が早くなったものと考えられる。これらのフェンス後方の乱れ性状の違いは、雪や砂などの飛散の予測に大きな影響を及ぼす可能性があるため注意が必要である。

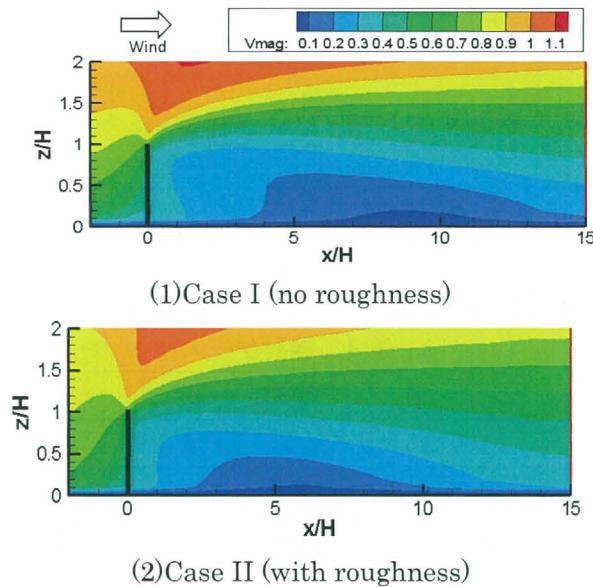


図 8 CFD によるスカラー風速のコンター

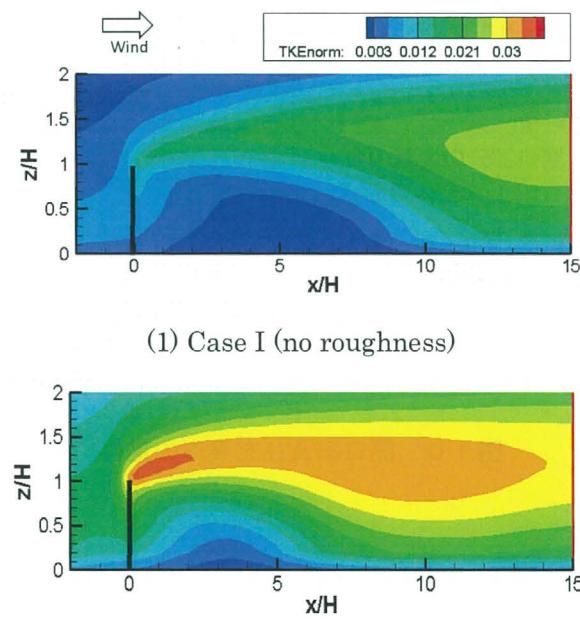


図 9 CFD による各ケースの乱流エネルギーの分布

## 4. 開口率と防風効果の関係に関する風洞実験

### 4.1 目的

防風板の風速低減効果を、縮尺模型を用いた風洞実験によって定量的に調査することを目的とする。

### 4.2 実験方法

#### 1) 実験場所

新潟工科大学 大型境界層型風洞（回流式境界層風洞）

#### 2) 実験期間

2014年8月7日

#### 3) 実験ケース

表2の通りの5通りとする。

表2 検討ケース

ケース名	充実率	段	フェンス隙間
P-7-8	80%	6	8mm
P-7-10	76%	5	10mm
P-7-15	68%	5	15mm
P-7-20	62%	4	20mm
P-7-30	52%	4	30mm

なお開口率及び充実率は以下のように定義される。

- 開口率  
$$= \frac{\text{開口部分の面積の合計}}{\text{フェンス全体の面積}}$$
- 充実率(閉そく率、遮へい率)  
$$= 1 - \text{開口率}$$

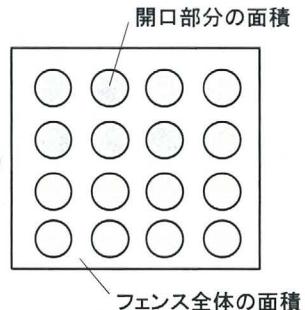


図10 開口率及び充実率の定義

### 4) 実験模型

実際に使用した模型を写真1に示す。



写真1 実験模型（全体）



写真2 風洞内への模型の設置状況

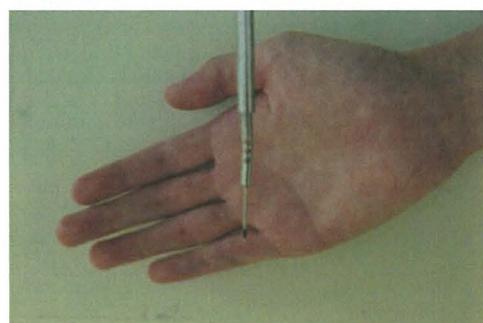


写真3 サーミスタ風速計

#### (5) 風速の測定方法

以下のように、支柱と支柱の間の中心断面（風洞中心断面）のみにおいて行う。

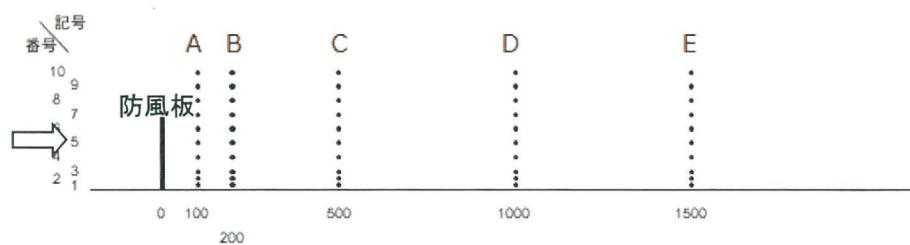


図4 測定点

### 4.3 実験結果

- ・P-7-20 と P-7-15、P-7-10 と P-7-8 は、それぞれ風速分布が近い。
- ・すなわち充足率 62%以上とすることで防風効果は高くなる。それ以上にした場合は、差は比較的小さい。

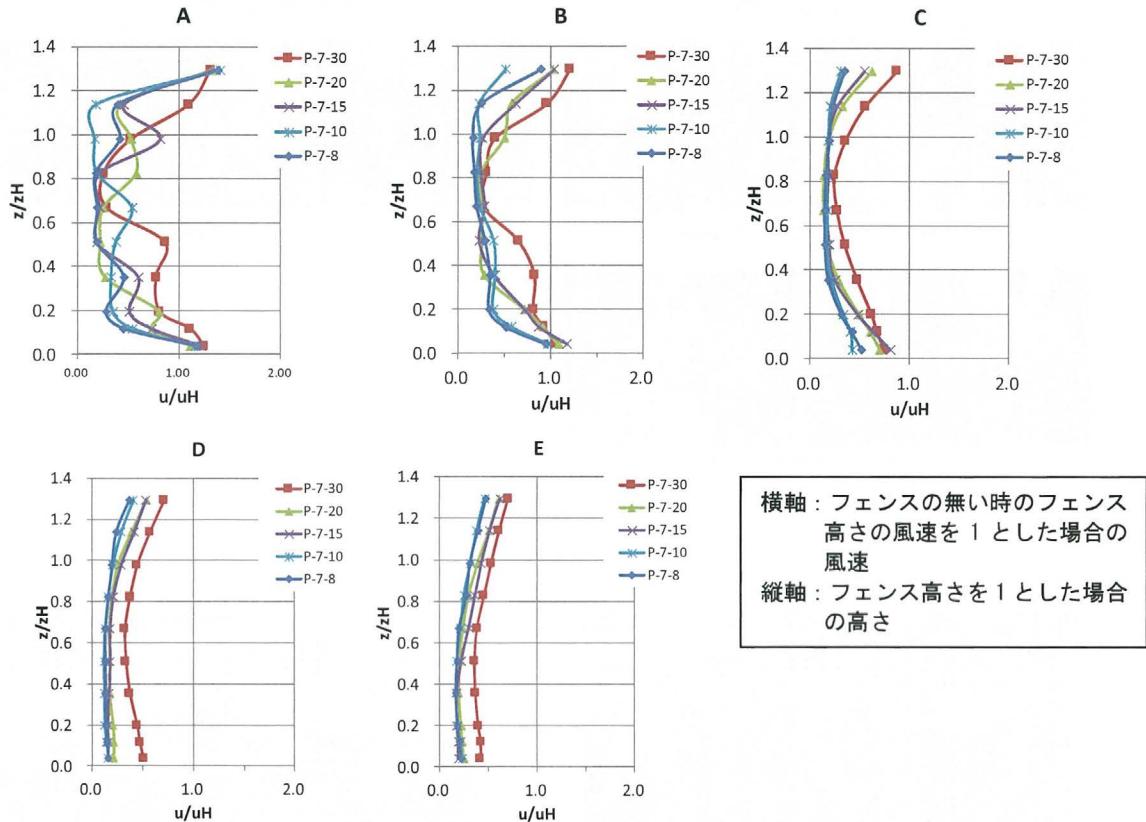


図 12 各ライン上の風速比分布

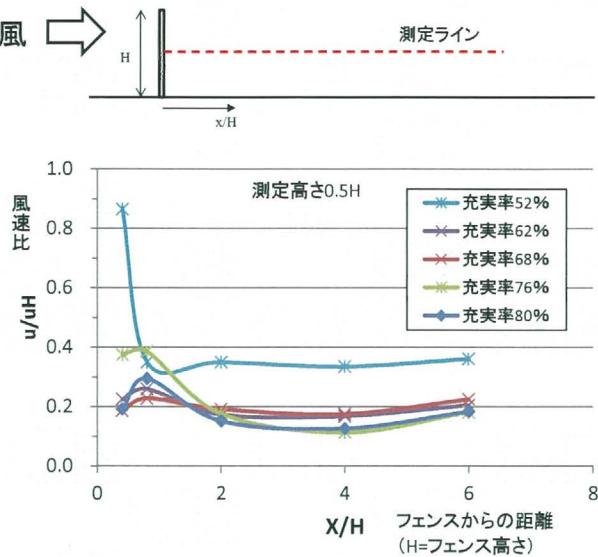


図 13 フェンス中心高さの流れ方向の風速比分布

## 5. 新しいフェンスデザインの提案

### 5.1 提案条件

これまでの検討結果を踏まえ、以下のような条件とした。

#### ①条件

充実率（100%－開口率）を65%程度とする。それ以外は自由。

#### ②制作するもの

以下のサイズのフェンスの模型とする。厚みは自由。材質も自由（ただし風でたわまない程度の剛性を持つもの）とする。

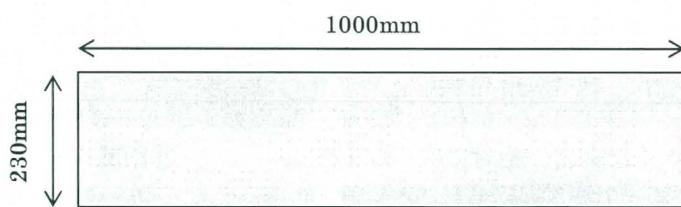


図 14 制作するフェンスのサイズ

#### ③デザインの提案

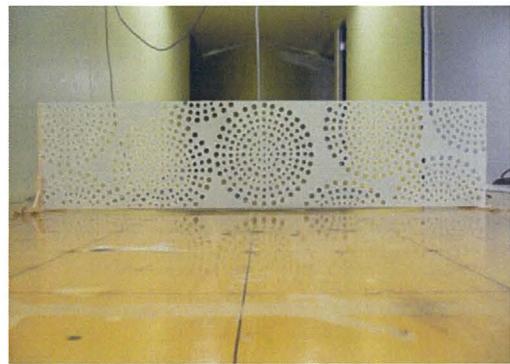
若者の視点を活かして、新規性のあるデザインを提案したいと考え、新潟工科大学建築学科の学生に協力を依頼した。

### 5.2 実験を行ったフェンス

デザイン案に基づいて作成した実験用のフェンスを写真4に示す。



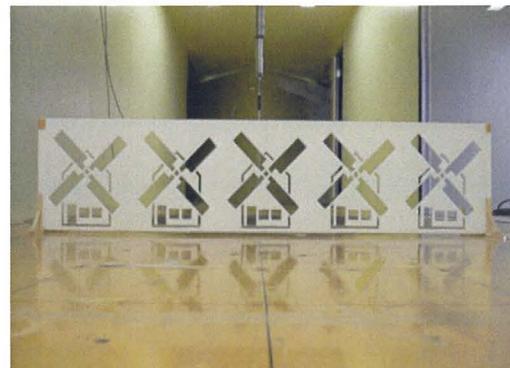
①地上のテトラポッド



②柏崎花火



③Triangle & Square



④風車小屋



⑤吹くなよ、吹くなよ、、、絶対に吹くなよ！



⑥雨風フェンス



⑦バーコード



⑧風



⑨Fish wave  
写真4 実験を行ったフェンス案

### 5.3 実験結果

フェンス後方の風速分布を測定した結果を図15に示す。

風洞実験の結果、フェンスの開口率を合わせることによって、開口の大きさや形が異なっていても、概ね一定の防風効果を達成できることが確認できた。

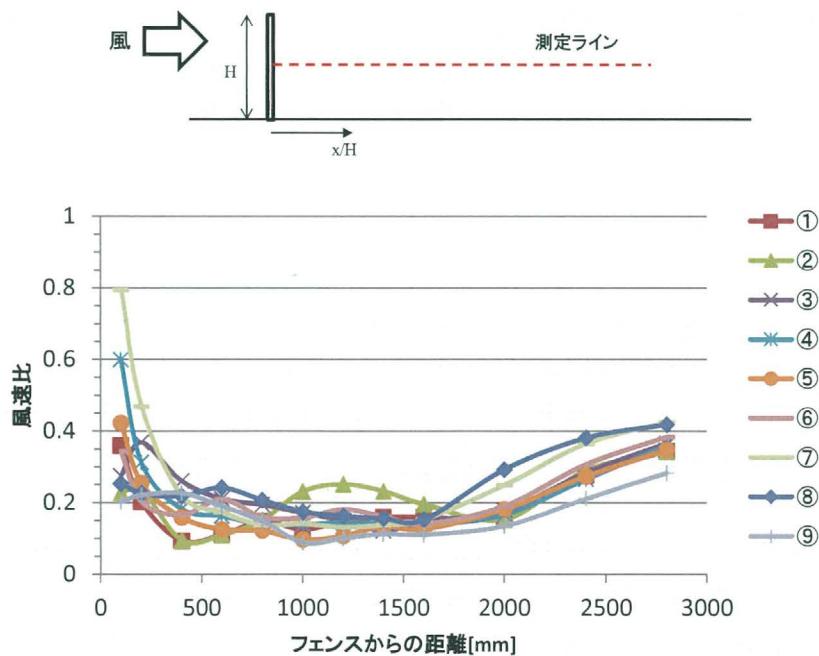


図15 フェンス後方の風速分布

学生及び教職員を対象として、デザイン面に対する人気投票を行った結果、No. ②のデザインの評価が高かった。

## 6. まとめ

本研究では、防風フェンスとして一般的に用いられている金属製の孔あき板の持つ欠点、すなわち塩害等への耐久性に劣る、眺望を阻害するという点を解消する新しい防風フェンスを開発するために必要な、フェンス周辺の詳細な気流分布の特性を風洞実験によって得るとともに、CFD（数値流体力学）を利用した予測技術の開発及び検証を行った。さらに、その成果を踏まえ、新たな棒風フェンスのデザインを提案した。

- [1] 風洞実験の結果より、フェンス後方の風速分布は、ラフネス配置による接近流の乱れ性状の違いの影響を受けることを確認した。接近流の乱れが大きくなった場合、フェンス後方の風速分布の回復が早くなり、防風効果の範囲は相対的に小さくなる。フェンスの防風性能を正確に予測するためには、接近流の乱れ性状を適切に再現する必要がある。
- [2] 運動方程式の sink 項として、Inertial loss term のみを考慮した単純なモデル化方法に基づく CFD でも、フェンス後方のスカラー風速分布を概ね精度よく予測できることが確認できた。また Inertial loss term の係数  $C_2$  ((2)式) は、既往の研究の推奨値である  $K_r=4$  で概ね実験結果と良い対応を与えるが、本研究の条件では、やや大きめの  $K_r=5$  が最適となる可能性が示された。
- [3] 風洞実験の結果、フェンスの開口率を一致させることによって、開口の大きさや形が異なっていても、概ね一定の防風効果を達成できることが確認できた。
- [4] その性質を利用して、様々なデザインの防風フェンスの提案が可能であることを示した。

## 参考文献

- 1) Castro, I.P., "Wake characteristics of two-dimensional perforated plates normal to an air-stream" Journal of Fluid Mechanics, 46 (1971), pp. 599-609.
- 2) Bradley, E.F. and Mulhearn, P.J., "Development of Velocity and Shear Stress Distributions in the Wake of a Porous shelter Fence" Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 15 (1983), pp. 145-156.
- 3) Yaragal, S.C., Govinda Ram, H.S. and Keshava Murthy, K., "An experimental investigation of flow fields downstream of solid and porous fences" Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 66 (1997), pp. 127-140.
- 4) Lee, S.-J. and Kim, H.-B., "Laboratory measurements of velocity and turbulence field behind porous fences" Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 80 (1999), pp. 311-326.
- 5) Santiago, J.L., Martín, F., Cuerva, A., Bezdenejnykh, N. and Sanz-Andrés, A., "Experimental and numerical study of wind flow behind windbreaks" Atmospheric Environment, 41 (2007), pp. 6406-6420.

- 6) Bourdin, P. and Wilson, J. D., "Windbreak Aerodynamics: Is Computational Fluid Dynamics Reliable?" *Boundary-Layer Meteorology*, 126 (2008), pp. 181-208.
- 7) Yeh, C.-P., Tsai, C.-H. and Yang, R.-J., "An investigation into the sheltering performance of porous windbreaks under various wind directions," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 98 (2010), pp. 520-532.
- 8) Guo, L. and Maghirang, R.G., "Numerical Simulation of Airflow and Particle Collection by Vegetative Barriers" *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 6 (2012), pp. 110-122.
- 9) ANSYS, Inc., ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide (2009)
- 10) Guo, L., Maghirang, R. G., "Numerical simulation of airflow and particle collection by vegetative barriers", *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 6 (2012), pp. 110-122.
- 11) Tiway A., Morvan H.P., Colls J.J., "Modelling the size-dependent collection efficiency of hedgerows for ambient aerosols", *Journal of Aerosol Science*, 37 (2005), pp. 990–1015.
- 12) Wang H., Takle E.S., "A numerical simulation of boundary-layer flows near shelterbelts", *Boundary-Layer Meteorology*, 75 (1995), pp. 141-173.
- 13) Wilson, J.D., "Numerical studies of flow through a windbreak", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 21 (1985), pp. 119-154.
- 14) Mochida, A., Tabata, Y., Iwata, T., Yoshino, H., "Examining tree canopy models for CFD prediction of wind environment at pedestrian level", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96 (2008), pp. 1667-1677.

