

## 飛沫通過量を最小にする最適防風フェンス構造に関する風洞実験

### Wind tunnel experiments on optimal wind protection fence that minimizes the spray transport to the downstream

田中 規夫\*, 高木利光\*\*, 山崎典和\*\*, 児玉 敏雄\*\*, 八木澤順治\*\*\*

Norio TANAKA, Toshimitsu TAKAGI Norikazu YAMAZAKI, Toshio KODAMA  
and Junji YAGISAWA

For decreasing the spray flux by wave-breaking at the shoreline to the landward area, the optimal wind protection fence structure was discussed. For minimizing the salt-spray flux through the fence, the structure with two low circular or L-shaped cylinders in staggered grid arrangement was selected and wind tunnel experiments were conducted with different spacing for cross-stream and stream-wise direction. The salt spray amount settling at the fence and passing through the fence were measured. The spray volume getting through or blowing up the fence was quantified by colored water with dye. The water was sprayed with a sprayer and collected by gauzes setting at downstream points. For the subsidence volume at the bottom in downstream, a tray was put and the mass of the subsiding water was measured. Considering the loss by blowing upward of the fence, the appropriate arrangement was found as 'the two rows of circular cylinders with staggered, 1D cross-stream spacing and 1D-2D stream-wise length, where D is the diameter of a circular cylinder'. This amount of the subsidence is about 90% and more than the value of previous-existed fence structure, 70%.

**Keywords: salt spray, fence structure, staggered grid arrangement, circular cylinder, spacing**

#### 1. はじめに

海岸付近に住む人々は、海からの高波の来襲や海岸

---

\*埼玉大学 工学部 建設工学科

Department of Civil & Environmental Engineering,  
Faculty of Engineering, Saitama University, 255  
Shimo-Okubo, Sakura-ku, Saitama, 338-8570, Japan

\*\*株式会社 アイ・エヌ・エー 海岸部

Coastal Engineering Department, INA Corporation,  
1-44-10 Sekiguchi, Bunkyo-ku, Tokyo, 112-8668, Japan

\*\*\*埼玉大学 大学院 理工学研究科

Graduate School of Science & Engineering, Saitama  
University

侵食などの自然災害の脅威にさらされているだけではなく、強風時には飛沫の被害を受ける場合がある。すなわち、海岸線背後の地域では、海上から飛来する海塩粒子の付着、蓄積により、一般家庭用品、農作物などが様々な被害を受けており、塩害からの被害を防止することが急務となっている<sup>1),2),3),4)</sup>。海岸線に広い土地がある場合には面的な防御として、離岸堤、砂浜、防風林（飛沫や飛砂防止もかねる）の組み合わせで面的に防御することが可能であるが、費用や土地利用の制約で実施が困難な場合も多い。特に、海岸侵食により以前の砂浜が消失し、堤防前面に消波工を整備して海岸線を線的に防護している場合は、強風時に高波が堤防に打ちつけ、波による飛沫が増大し、背後の住宅に多大な塩害をもたらしている場合もある。このため、

陸域において飛沫被害低減を目的とした防潮フェンスの設置が検討されている地点もある。ここで、防風フェンスという観点での既往研究は多いものの、飛沫の通過量を最小化するという視点での最適フェンス構造については不明の点が多い。そこで、本研究では、既存の防風フェンス同士を比較した上で、それ以上に飛沫の通過量を減少させるフェンス構造を把握することを目的とする。

## 2. 実験装置ならびに方法

### 2.1 実験装置ならびに実験方法

3種類の実験を行った。

Experiment-A (模式図を Fig.1(a)に示す)は千鳥配列状の大規模(ほぼ実スケールの)棒状粗度(円柱)群と市販品とを用いて、飛沫通過量や飛沫沈降メカニズムの相違を把握するための実験である。Experiment-Aでは、簡易風洞(風洞断面:幅1 m×高さ2 m×長さ6 m)を作成し、風洞の上部は風が吹き抜けられるように開けて使用した。風速は10 m/sに設定して、フェンスは送風機から2.5 m地点に設置した。

Experiment-B、Experiment-Cは棒状粗度の形状効果と粗度同士の間隔(横断・流下方向)<sup>5)</sup>の最適値を解明するための実験である。Experiment-B、CはFig.1(b-1)に示すような、エッフェル型風洞(風洞断面:幅0.5m×高さ0.5m×長さ5m)を用いて実施した。Experiment-Bは上部を閉鎖し、フェンス位置での吹き上げなしになる形でほぼ実スケールの大規模円柱群(円柱、L型鋼:それぞれ、直径2.6cm、斜辺長2.6cmで流れ方向の投影面積は等しい)を風洞内に設置した(Fig.1(b-2))。また、Experiment-Cは吹き上げ影響が飛沫を沈降量に与える負の効果把握するため、小規模円柱粗度模型(直径0.4cm、高さ10cm)を風洞内に設置した(Fig.1(c-1))。粗度条件はそれぞれの実験方法で詳しく示す。

空中への飛沫の飛散には噴霧器を用いた。Experiment-Aでは送風機から30 cmの位置、Experiment-Bではフェンスから90 cm、底面から15 cmの位置に設置した。Fig.1(a)に示すように、風洞中央に設置した飛沫捕捉器(寸法20 cm×20 cmのガーゼを取

り付けた枠:図中ではGZと表す)に捕捉させた。GZはJIS屋外暴露試験方法通則の細則として記載されているものを参考<sup>4)</sup>に作成した。実際と同様な塩水を使用すると実験装置が故障すること、ただの水では実験をしている最中に蒸発して定量化が難しくなることから以下のように工夫した。すなわち、染料を混ぜた液を飛散させて飛沫捕捉器により回収した染料を一定量の水に戻し、吸光度計を用いて濃度を計測することにより、染料の絶対量を算出し付着した量の割合を算出した。飛沫の粒径は十分小さいため、実際の飛沫との比重の違いによる沈降速度の違いは無視できるものとする。

噴霧器は、噴霧能力0.5 l/min、タンク容量10 lで、2頭式ノズル(360°回転、噴霧可能)のものを使用し、実験時は濃度3%の染料溶液を噴霧した。噴霧時間は染料溶液の付き具合によって、0.5min~2.0minとした。測定後はすばやくガーゼを枠からはずし回収した。フェンス下流の通過量は、ガーゼに付着した染料量(単位時間(分)・単位ガーゼ面積(20cm×20cm)あたりの染料量)より、ガーゼ付着時の水量を計算した。ここで計算した水量を飛沫捕捉量と定義する。Experiment-Aにおいて底面への沈降量は、底面に設置したトレイに沈降した染料溶液の質量を測定した。横断方向3箇所(風洞の中心にトレイ3枚を横方向に並べた)×流下方向6箇所(フェンス直前、直後、3 m、4 m、5 m、6 m)で測定を行った。

### 2.2 実験測定項目の詳細と実験条件

(1) 既存の防風フェンスと円柱群の比較(Experiment-A)

フェンス条件としては、以下の2種類を考えた。

- ・シリーズI 市販品に対する実験(3種類:有孔折板、サランロック、パラウェブ・フェンス)
- ・シリーズII 円柱群(直径2.6 cm)に対する実験(5種類):市販品よりも性能がよい形状を探す目的

有孔折板は、その断面形状により、孔を通過した風が上下相互に干渉して、風向変更ならびに風を和らげる効果をもつとされる。有孔折板は防風フェンスとしては、すでに数多くの施設に採用されている(図中で

は、H-fence)。サランロックは、サラン繊維をスプリング状にカール加工してつくられた空隙率の大きい素材である（旭化成株式会社ホームページより。図中では、S-fence)。パラウェブ・フェンス（英国のリニアコンポジット社が開発）は、ポリエチレンとポリエステルでできたパラウェブベルトをフェンス状にしたもので防風フェンス、スノーフェンス、牧柵、防砂フェンスなど多方面で使用されている（図中では、P-fence)。

シリーズIIは、風に対し前面部に位置する円柱で風を縮流し後方の円柱に、あるいは、前方の円柱によりできた剥離渦を後方の円柱にぶつけ、飛沫とフェンス面の衝突確率を増大させるものである。通常のフェンスでは吹き上げ量が大きくなって、逆に沈降にはマイナスの効果が生じるものの、この形状では吹き抜けることを認めつつ、接触面積と乱れを大きくし衝突確率を大きくすることで沈降させるものである。

飛沫に対する効果を調べるため、実験項目として通過量、吹き上げ量、沈降量と風速を測定した。飛沫捕捉器の底面からの高さ(中心で)はそれぞれ15cm、65cm、115cmとした。流下方向では送風機から4.5m、6.0m地点で測定を行った。フェンス直前に飛沫捕捉器を水平方向に一枚を設置し、通過方向の測定と一緒に測定を行った。Fig.1(a)の入り口風速は10 m/sに設定し、風速測定はフェンスの前後と流下方向の変化を測定した。

## (2) 粗度間隔による沈降量の定量測定 (Experiment-B)

粗度の横方向間隔  $W$  と流下方向間隔を変化させた。Experiment-B では Experiment-A と同様にフェンス地点の沈降量とフェンス下流の通過量を計測した。実験の状況を示す写真を Fig.1(b-2)に示す。Experiment-B は Experiment-A と異なり、吹き上げがない形で行った。これは配置の違いが沈降量に与える影響と、千鳥配列円柱群の飛沫の通過防止に対する最適間隔を知るためである。また、Experiment-B では2列の千鳥配列円柱群の間隔、形状を変えて実験を行った。

実験ケースは、粗度配置(7ケース)×粗度形状(2ケース)の計14ケースである。Table1に実験ケース一覧を示す。なお、風速はいずれのケースにおいても10 m/sで実施した。また1D-0Dといった場合、1Dは横断方

向の粗度間隔(円柱間距離)、0Dは流下方向の粗度間隔を示し、以後記号で表すこととする。

## (3) 小規模粗度模型周辺の風速分布測定 (Experiment-C)

小規模粗度模型の実験ケースを Table 1 に示す。Experiment-C では粗度群の前後の鉛直風速分布を計測し、それらのデータを用いて飛沫の通過量を考慮した沈降率を算出した。Fig.1(c-1)、(c-2)にそれぞれ実験の状況を示す写真、風速測定位置を示す。粗度模型は直径  $D = 4$  mm、高さ  $H = 100$  mm の木製円柱を使用した。また、直立フェンスは厚さ4 mm、高さ100 mmの平板を使用した。実験ケースは、粗度の配置を変えたもの(4ケース)、直立フェンス(1ケース)の5ケースについて検討した。なお、風速は Experiment-B と同様、いずれのケースにおいても10 m/sで実施した。

飛沫の沈降量は以下のように算出した。モデルの上流側における濃度フラックス  $q_{in}$  は以下の式で与えられる。

$$q_{in} = \int_0^h C_0(z)u_1(z)dz \quad (1)$$

ここに、 $h$  は風速計測高さ、 $C_0(z)$ は鉛直方向の無次元飛沫濃度、 $u_1(z)$ は Fig.1(c)に示した測線Cにおける流速の鉛直分布(m/s)である。ここで、 $C_0(z)$ は仲座ら<sup>6)</sup>によると、

$$C_0(z) = \exp(Az) \quad (2)$$

で表される。ここに、 $A$  は飛沫量の鉛直方向の減少率を与える係数であり、村上ら<sup>1)</sup>の現地観測値を参考に、 $A = 0.293$ として与えた。

また、モデル地点における沈降フラックス  $q_{set}$  は

$$q_{set} = \int_0^h \alpha C(z)u_2(z)dz \quad (3)$$

と表される。ここに、 $\alpha$  は円柱粗度配置による沈降量の割合、 $u_2(z)$ は透過流速の鉛直分布(m/s)であり、

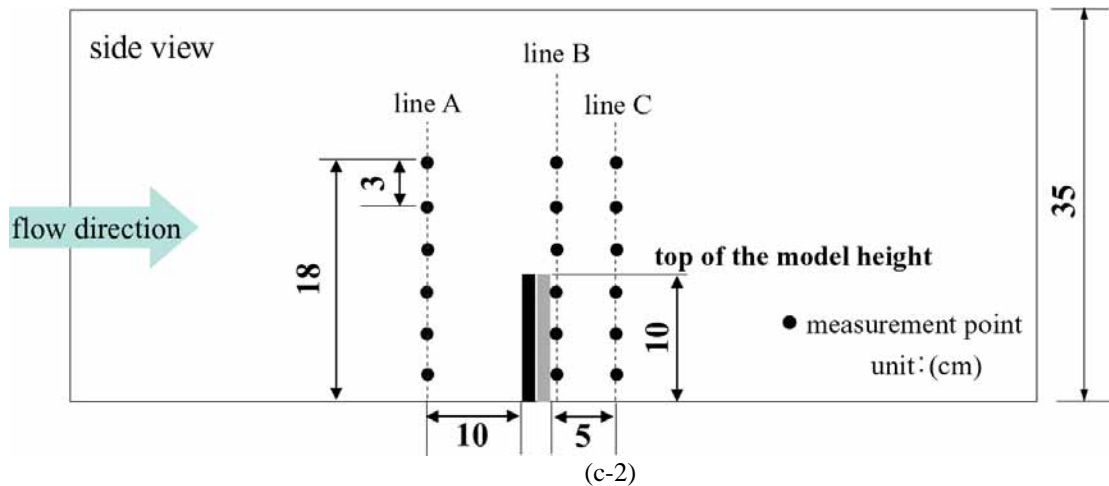
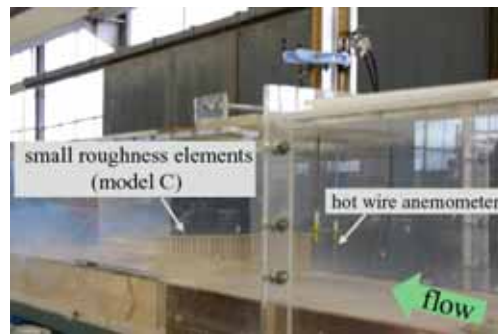
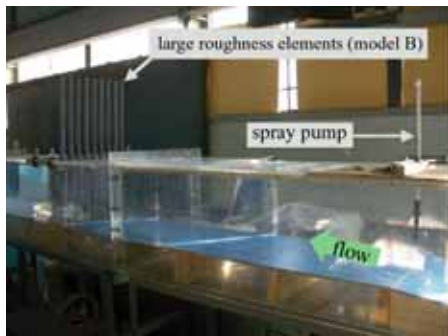
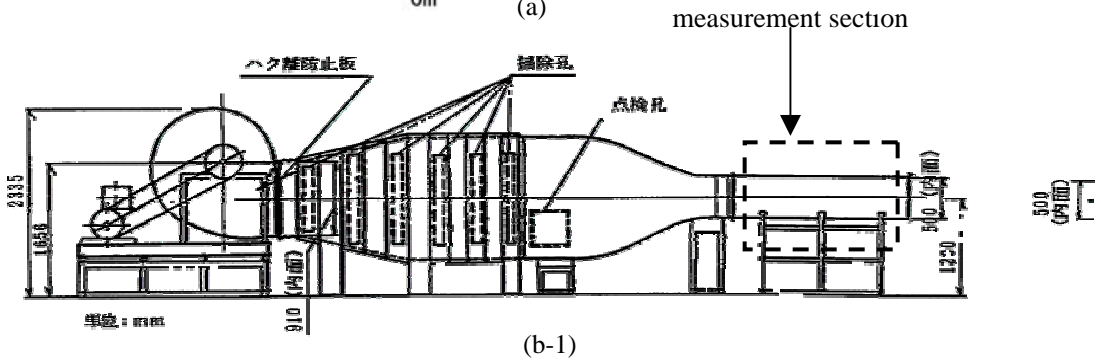
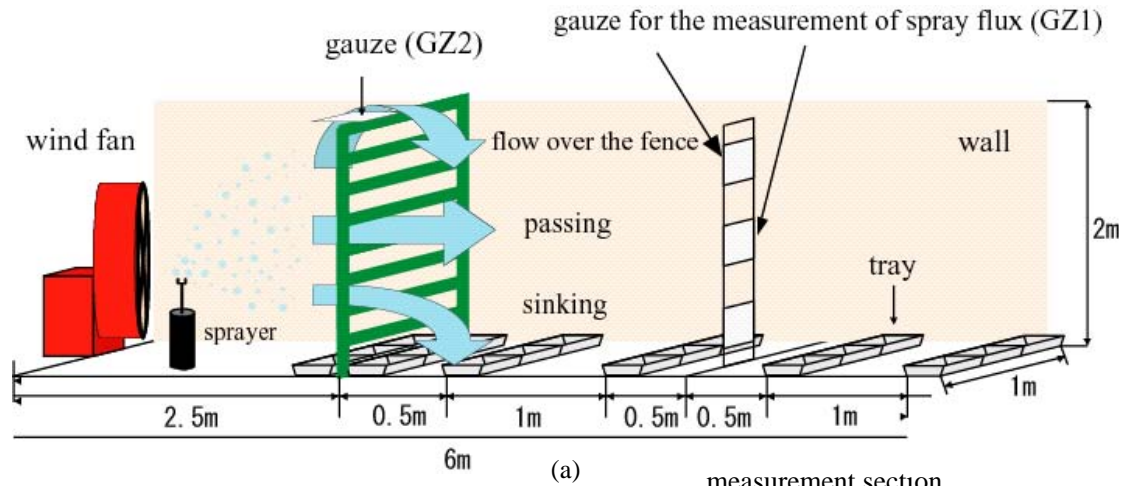


Fig.1 Experimental apparatus and the roughness arrangement, (a)Experiment-A (real scale experiment) , (b-1) Eiffel-type wind tunnel for Experiment-B and Experiment-C , (b-2) Experiment-B (large (circular or L-shaped) cylinders made of vinyl chloride or steel, no upward flow over the roughness), (c-1) Experiment-C (small circular cylinders made of smooth wood) , (c-2) Wind velocity measurement points in Experiment-C

Table 1 Arrangement of roughness and measurement item (Experiment-B, Experiment-C)

Experiment name	Roughness type	Arrangement of roughness		Measurement item	
		Roughness spacing in cross stream direction <i>W</i>	Roughness spacing in streamwise direction <i>L</i>	Velocity distribution	Spray volume
Experiment-B	Circular cylinder	1D	0D	-	-
		1D	1D	-	-
		1D	2D	-	-
		1D	4D	-	-
		2D	0D	-	-
		2D	2D	-	-
		2D	4D	-	-
	L-shaped cylinder	1D	0D	-	-
		1D	1D	-	-
		1D	2D	-	-
		2D	0D	-	-
		2D	2D	-	-
		2D	4D	-	-
		2D	4D	-	-
Experiment-C	Circular cylinder	1D	0D	-	-
		1D	2D	-	-
		1D	4D	-	-
		2D	0D	-	-
	Vertical plate	-	-	-	-

Mean wind speed is 10 m/s in all cases

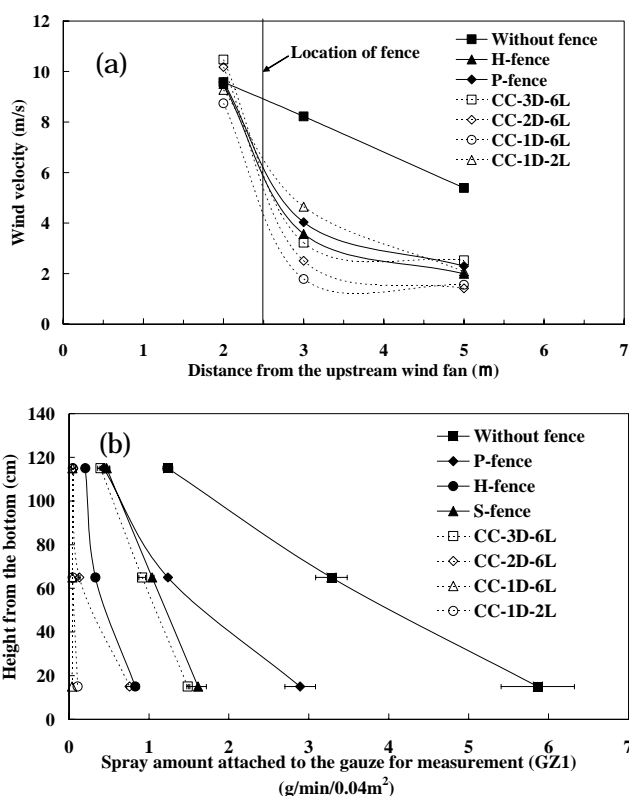


Fig.2 Characteristics of flow and spray amount around each model fence (Experiment-A), (a) Flow velocity in front of and behind a model fence, (b) Spray amount behind the model fence (GZ1 is set at 6 m)

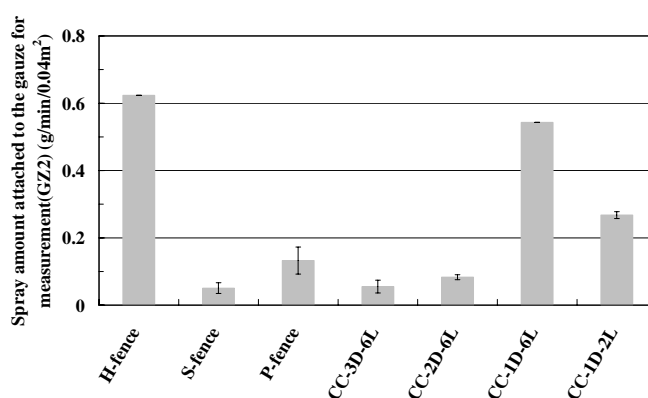


Fig.3 Spray amount attached to the gauze for measurement placed at the top and in front of a model fence(GZ2 in Fig.1) with each model type. Bar represents standard deviation.

$$u_2(z) = \beta(z)u_1(z) \quad (4)$$

と表される。ここに、 $\beta(z)$ は円柱粗度配置による透過流速の変化率である。以上より飛沫の減少量を算出し、各ケースで比較することによって、飛沫防止に最適な円柱粗度群の配置を検討した。

### 3. 実験結果

#### 3.1 吹き上げを考慮した実スケールフェンス模型での風洞実験 (Experiment-A)

Fig.2(a)に全ケースの風速を示す。ここで、1D-2Lとは横断方向の円柱間隔を直径(D)の1倍・流下方向に2列の円柱を千鳥状に並べた物を表す。この図から、既存の防風フェンスのうち、空隙率の低い有孔折板がもっとも風速を減衰させており、千鳥配列円柱群のうち、横間隔が狭いほど風速を減衰させることがわかる。

Fig.2(b)にフェンスを通過する量を示す。既存の防風フェンスのうち、有孔折板が一番効果的に通過量を減少させた。千鳥配列円柱群の場合は、横間隔が3Dになると効果が急激に落ちているものの、2D以下になると有孔折板以上の効果が出ている。また、横間隔が1Dの場合では、2列と6列の効果にあまり差がないため、2列あれば十分に飛沫の通過を防止できると言える。

Fig.3にフェンスの違いによる吹き上げ量の変化を示す。有孔折板の吹き上げ量が一番大きく、千鳥配列円柱群の吹き上げ量は有孔折板に比べて少ない。Fig.4はフェンスの違いによる底面への沈降量の変化、Fig.5は飛沫の沈降、吹き上げ、(風洞断面より下流への)通過の割合を示す。有孔折板はフェンス地点1m以内での沈降量は70%程度と円柱群に劣るものの、下流での沈降も含めれば90%程度はあることがわかる。しかし、下流に飛沫を撒き散らすよりはフェンス地点で落とすことが理想である。通過量と吹き上げ量を総合的に判断すると、千鳥配列円柱群の横間隔2D以下の場合が飛沫の通過減少効果にもっとも優れていると言える。

#### 3.2 吹き上げを考慮しない実スケールフェンス模型での風洞実験 (Experiment-B)

Fig.6にExperiment-Bのフェンス地点での通過量と沈

降量の割合を示す。千鳥配列円柱群の横間隔が1Dの方が2Dより沈降量が多く、通過量が少ない。1Dの場合では、1列目と2列目の間隔が1Dを越えると通過量が増え沈降量が減るため、1列目と2列目の間隔が1D以下の時が適していると言える。2Dの場合では、流下方向の間隔を変えても沈降量と通過量の変化が少ない。従って、流下方向の間隔の変化より横断方向の方が飛沫を落とす効果に影響を与えやすいと言える。

千鳥配列円柱群の形状をL字に変えても、同じ配列間隔だと円柱とL字の差がほとんど見られない。よって、同じ千鳥配列群のフェンスを用いれば、形状は円柱に限る必要がなく、他の形状においても実現可能であることがわかる。ただし、本研究はL字型粗度1つしか試していないため、形状による最適配置の差については更なる検討が必要と考えられる。

#### 3.3 風速分布・吹き上げを考慮した場合の最適間隔 (Experiment-C とその結果を用いた計算結果)

Experiment-Bの結果(Fig.6)からは、2列目の円柱は近ければ飛沫の通過量を減少させるという結果になる。しかし、Experiment-Aのように吹き上げにより飛沫が上方に飛散される場合には、必ずしも近ければよい、あるいは空隙が少なければよい、と言うものではない。すなわち円柱間隔(もしくはフェンスの空隙)には最適値があると考えられる。それを計算するために行ったExperiment-Cの結果をFig.7に示す。Fig.7(b)に示すように、円柱群が密に配列されているケースにおいて、モデル背後において風速を減少させ、モデル上方で風速を加速させていることがわかる。この吹き上げ効果を考慮し、Experiment-Cのケースに関して、流下方向間隔を変化させ沈降率を算出した結果をFig.8に示す。Experiment-B(吹き上げを考慮しない)での1D-0Dと1D-2Dの沈降率の差(Fig.6)は少ないものの、Experiment-Cでは1D-0Dは1D-2Dよりも沈降率が小さくなる(Fig.8)。すなわち、Fig.8より、円柱群が流下方向に2列の場合で流れを横断する方向の間隔が1Dの場合において、流下方向の間隔に関して、

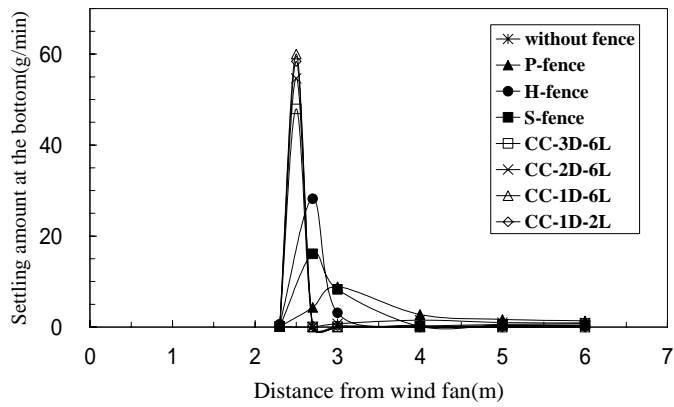


Fig.4 Settling spray amount to the tray at the bottom for each fence

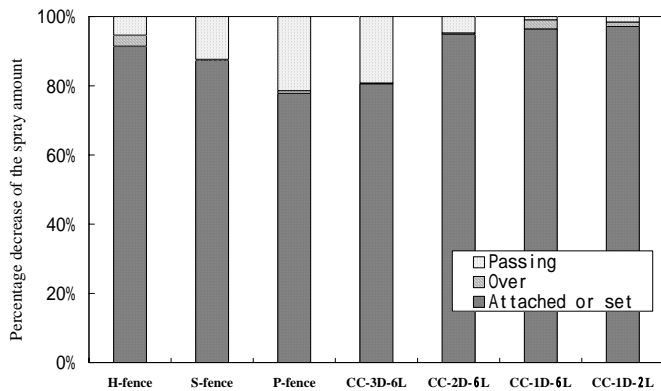


Fig.5 Percentage decrease of the spray flux in a wind tunnel. 'Attached or set' means attached to the model or set to the bottom. 'Passing' means 'transported spray to the downstream of the wind tunnel. 'Over' means 'transported over the model fence' (experiment-A)

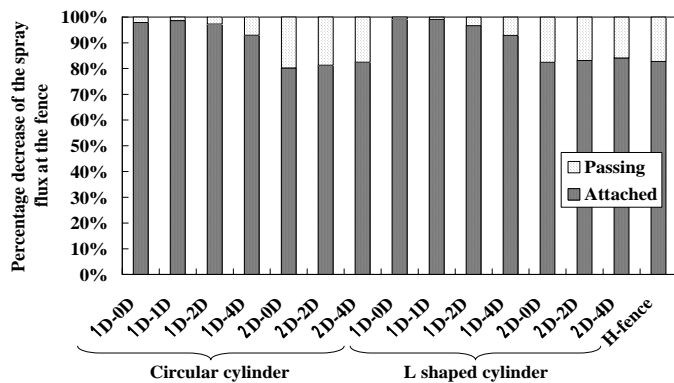


Fig.6 Percentage decrease of the spray flux at each fence. 'Attached' means attached to the model or sunk at the fence position (Experiment-B)

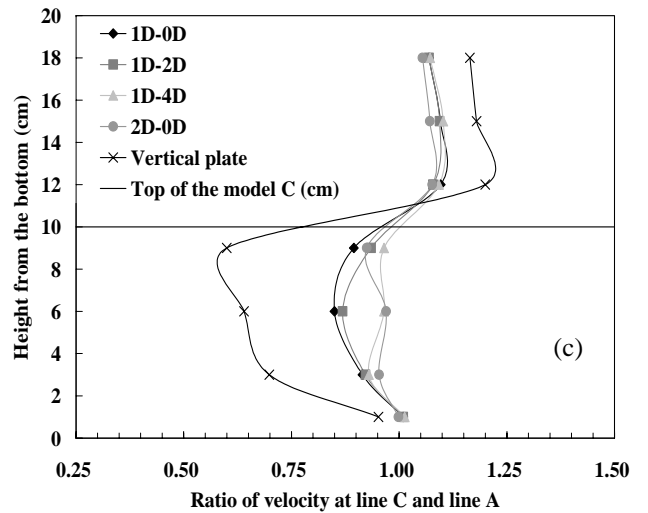
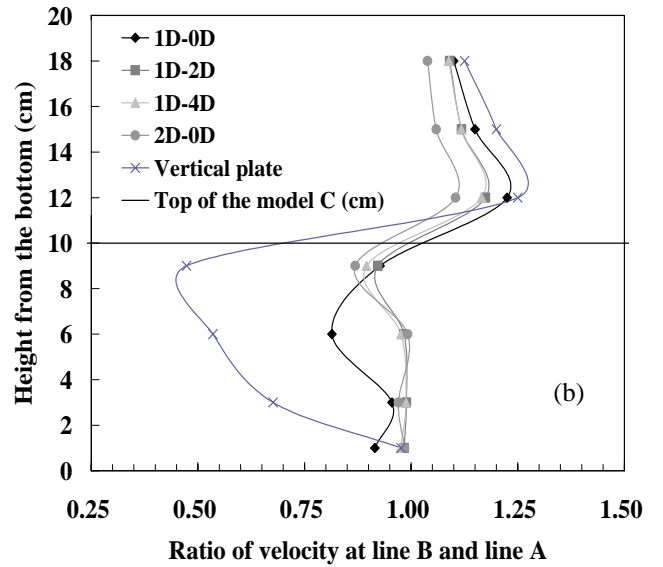
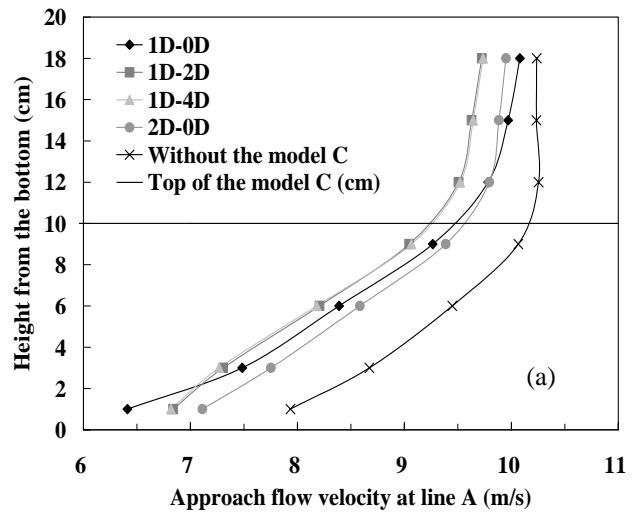


Fig.7 Wind velocity distribution around a model-C fence (Experiment-C), (a) approach flow (line A), (b) ratio of velocity at line B and line A, (c) ratio of velocity at line C and line A

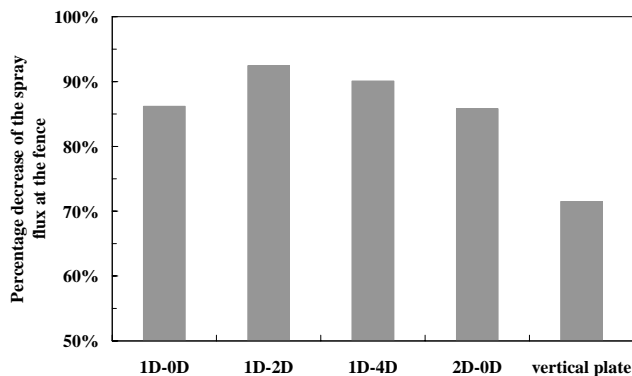


Fig.8 Calculated percentage decrease of the spray flux at each fence (Experiment-C)

1D-2D 付近に飛沫通過量を最小化するフェンス構造上の最適値が存在すると言える。

最適値は円柱群の列数や柱状粗度の形状、接近風速の分布、飛沫濃度分布にも影響すると考えられることから、一般化するにはさらなる検討が必要である。

#### 4.おわりに

Experiment-A において、既存の防風フェンスの中では、空隙率の低い有孔折板は風速減衰や飛沫のフェンス通過量に関してフェンス地点で 70% (下流を含めて 90%) の効果があった。千鳥配列円柱群の飛沫沈降効果に関しては、横間隔が 2D 以下になると有孔折板以上の効果が出るのが判明した。横間隔が 1D の場合では、流下方向の列数に関してあまり差が見られないため、2 列あれば十分に飛沫の通過を防止できると言える。また、千鳥配列円柱群の吹き上げ量は有孔折板に比べて少ないため、その点でも横間隔が 2D 以下の千鳥配列円柱群は優れていた。吹き上げによる飛沫の飛散を考慮しない場合は、流下方向間隔に関しては 1D 以下、横間隔に関しては、2D よりも 1D の方が飛沫防止に適している。しかし、円柱群が密に配列されているケースでは、モデル背後において風速を減少させ、モデル上方で風速を加速させる。吹き上げ効果を考慮し、1D ケースに関して、流下方向間隔を変化させ沈降率を算出したところ、2 列目の円柱は近ければよいわけではなく、流下方向の間隔に関して、1D-2D 付近にフェンス構造上の最適値が存在することがわかった。

また、粗度の形状を変化させた場合に同じ配列で比

較してみると差がほとんど見られないことから、同じ千鳥配列群のフェンスを用いれば、形状は円柱に限る必要がないことも示唆された。

#### 謝辞

本研究成果をもとに特許出願 (2005.03.14、「大規模粗度群を用いた飛沫防止フェンス」、田中規夫・高木利光・児玉敏雄・山崎典和・山本文雄、国立大学法人埼玉大学・株式会社アイ・エヌ・エー・積水樹脂株式会社、日本、特願 2005-71721 (申請中)) を行った。共同特許出願者である株式会社アイ・エヌ・エー、積水樹脂株式会社のその他関係者、ならびに出願にご協力いただいた埼玉大学の知的財産部、実験を行うにあたってご協力いただいた 2004 年度当時の大学院生・城野裕介氏、卒論生・佐野文一氏に謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 村上和男・加藤一正・清水勝義・福田真人・宮崎啓司：碎波帯内における海塩粒子の発生に関する現地調査 海岸工学論文集 第 39 巻 pp.1046-1050, 1992.
- 2) 石田昭, 花田昌彦, 細川正延：飛沫の発生に関する実験的研究, 海岸工学講演会論文集, 第 29 回, pp. 385-388, 1982)
- 3) 仲座栄三・津嘉山正光・照屋雅彦：大気環境アメニティの一要素としての飛塩量特性, 海岸工学論文集, 第 38 巻, pp. 896-900, 1991.
- 4) 寺部本次：海塩粒子の測定法-JIS および ISO を中心にして,P.P.R,Vol.18,pp.25-29,1987.
- 5) 岡本史記・中村友道・椎名正樹・楢林利之・山村敏之ら：弾性支持された円柱群まわりの流れに及ぼす円柱間隔比の影響, 日本機械学会論文集 (B 編), 第 62 巻 598 号, pp. 2113-2119, 1996.
- 6) 仲座栄三・津嘉山正光・山路功祐・日野幹雄：飛塩 (海塩粒子) 拡散の数値流体力学的解析, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp.1036-1040, 1993.