

沿岸都市を対象とした防風ネットを用いた 飛砂対策に関する風洞実験

Wind Tunnel Experiment on Prevention of Wind-Blown Sand Movement through the Use of a Windbreak Net for Coastal Cities

神田 貴行*・中井 正則**

Takayuki KANDA and Masanori NAKAI

要旨: 沿岸都市における飛砂対策として、防風ネットおよび沿岸都市の模型を用いて風洞実験を行った。防風ネットを沿岸都市の風上側に位置を変えて配置し、沿岸都市に堆積する砂の量を測定した。また、高さが低いサブネットを配置した実験も同様に行った。その結果、防風ネット風上側からの飛砂に対する防風ネットの最適設置位置は、沿岸都市部(海岸側端)から20-25H (H: 防風ネット高) だけ風上側であることがわかった。なお、沿岸都市部に隣接した位置に防風ネットを配置した場合、堆砂量が増大するため、逆効果となる。さらに、防風ネットの風下側へサブネットを設置することにより、沿岸都市部への堆砂をさらに抑制できることがわかった。

キーワード: 飛砂、沿岸都市、防風ネット、風洞実験

1. はじめに

沿岸都市では、強い海風により発生した飛砂が道路や住宅地へ堆砂する被害が発生しており、その対策が重要な課題となっている。例えば、新潟海岸では、冬季の北西-西北西方向の強い季節風(風速10m/s以上)によって発生する飛砂が著しく、道路上に侵入・堆積した飛砂が車両通行の妨げとなっている(図-1参照)。また、飛砂は、新潟海岸における海岸侵食の原因の1つと考えられている¹⁾。さらに、新潟西海岸では、背後の住宅密集地に対する飛砂が懸念され飛砂調査が進め

られていき²⁾。

このような風侵食の対策に当たって重要な点は、砂粒子の運動、飛砂量および地形変化などを正確に予測し、対策の効果を向上させることである。既往の研究において、防風設備として防風林、防風ネット、防風垣などが取り上げられ、多くの検討が行われてきた。防風ネットについては、佐藤ら³⁾が海岸沿いの道路より海側に配置された防風ネット周辺の堆砂状況を確認している。これによると、防風ネット埋没後は、堆砂が道路を含めた内陸部に達し、飛砂が大量に堆積している。ま

* 非会員 八千代エンジニアリング(株) 水工部, ** 正会員 東京電機大学 建築・都市環境学系

た、密閉度 50%程度の防風ネットを 13H 間隔(H:防風ネットの高さ)で並べた場合、1枚目の防風ネットで減少した風速が回復しないまま連続し



図 - 1 道路への堆砂

(写真提供：国土交通省 北陸地方整備局
新潟港湾・空港整備事務所)

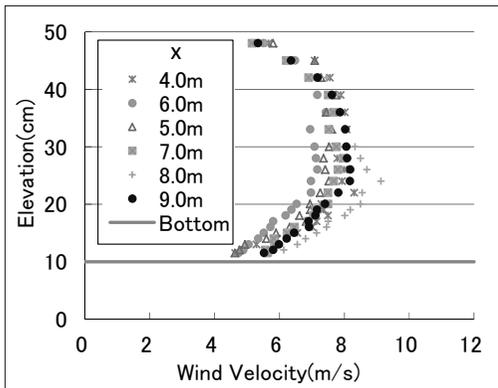


図 - 3 風速鉛直分布

て次の防風ネットで減風する³⁾。

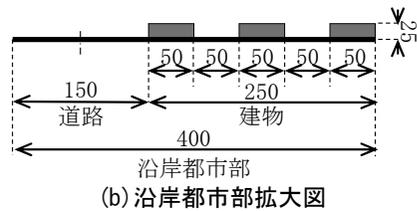
本研究では、簡易防風設備である防風ネットを取り上げ、飛砂対策効果が最大となる防風ネットの活用法を風洞実験により検討した。

2. 実験装置の概要

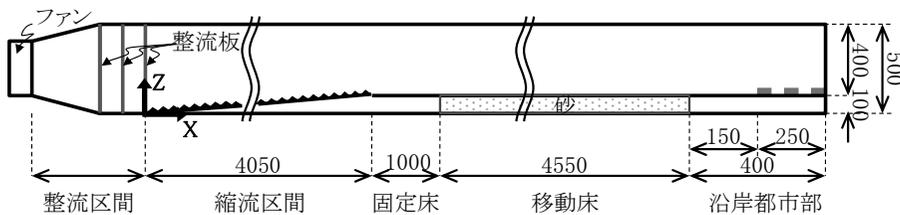
実験は大きく 3 シリーズ(A,B,C)に分かれており、それぞれの詳細については、第 3～5 章で述べ、ここでは装置の概要のみを述べる。

2.1 風洞装置

実験では、長さ 10m×幅 30cm×高さ 50cm の小型風洞装置を使用した(図 - 2 参照)。送風機はスイデン製のジェットスイファン(風量 147m³/min)を用い、整流板を整流区間に 10cm 間隔で 5 枚設置した。風路の風上端(x=0.00m)～x=4.00m に勾配 1/40 の斜面を設け、この斜面上に粗度を付けて底面境界層を発達させた。斜面以降は水平床として、観測・計測区間とした。なお、すべての実験ケースにおいて、風速の変動幅が 0.5m/s となるように設定しており、x=4.0m～9.0m の位置での風速分布は図 - 3 のとおりであり、摩擦速度は 0.3m/s であった。



(b) 沿岸都市部拡大図



(a) 全体図

図 - 2 風洞装置 (単位 : mm)

2.2 試料砂

実験に用いた試料砂は、日光珪砂 6 号とカラーサンドである。両試料砂の粒径加積曲線は図 - 4 のようであり、ほぼ一致している(50%粒径 $d_{50} = 0.26 \text{ mm}$)。ただし、比重については、日光珪砂 6 号が約 2.65 であるのに対し、カラーサンドは約 2.22 である。

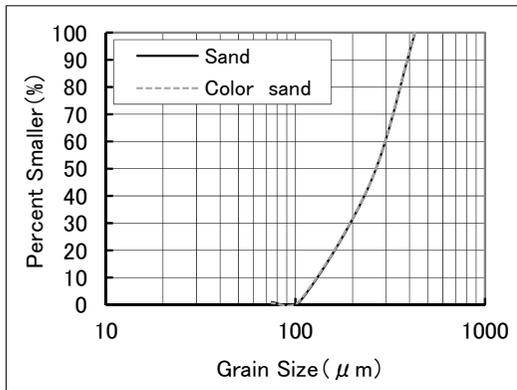


図 - 4 粒径加積曲線

2.3 防風ネットと都市模型

風洞装置の $x=4.00\text{m} \sim 9.55\text{m}$ に試料砂を厚さ 10cm で均一に敷き詰めた。模型縮尺を $S=1/100$ として、飛砂発生位置である $x=5.00\text{m}$ を海岸線(汀線)に見立て、 $5.00\text{m} \leq x \leq 9.55\text{m}$ を砂浜、 $9.55\text{m} \leq x \leq 9.95\text{m}$ を沿岸都市部とした。沿岸都市部の模型は、一般的によく見られる道路と住宅地の組み合わせとした(図 - 2 参照)。実験に使用した防風ネット(模型)は、直径 0.7mm の金網(メッシュサイズ： 5mm)を 2 枚重ねにしたものであり、高さ $H=5\text{cm}$ 、幅 $B=30\text{cm}$ 、密閉度 $a=57\%$ である(後述の実験シリーズ C では、サブネットとして高さ 2.5cm のものも用いている)。なお、防風ネット周辺の堆砂が顕著となる密閉度 a は $50 \sim 60\%$ 程度とされている⁸⁾。

3. 実験シリーズ A

実験シリーズ A では、防風ネットの位置を変化させて沿岸都市の堆砂抑制効果を検討した。

3.1 実験方法

表 - 1 に実験シリーズ A のケースを示す。同表のように、ケース R(防風ネット無し)を基準ケースとして、防風ネットの設置位置を 12 通りに変化させた。実験時間は 15 分であり、実験終了後に風路中央の地形を 5cm 間隔で測定した。

表 - 1 実験シリーズ A

Case	Windbreak Net (Tightness : 57% Height : 5.0cm)	
	Position x (m)	Distance from Coastal City(m)※
R	-	-
1	9.55	0.00 (0H)
2	9.30	0.25 (5H)
3	9.05	0.50 (10H)
4	8.80	0.75 (15H)
5	8.55	1.00 (20H)
6	8.30	1.25 (25H)
7	8.05	1.50 (30H)
8	7.80	1.75 (35H)
9	7.55	2.00 (40H)
10	7.30	2.25 (45H)
11	6.05	3.50 (70H)
12	5.05	4.50 (90H)

※括弧内は防風ネットの高さHの倍数で表した距離

3.2 実験結果

図 - 5 に各ケースにおける沿岸都市部の堆砂量を示す(ここでいう堆砂量は、風路中央における地形の縦断分布から求めたものであり、面積 (cm^2) で表現している)。なお、飛砂層は、防風ネットより風上側で $2.5 \sim 3\text{cm}$ 程度、風下側で 2.5cm 程度であった。これにより、沿岸都市部の堆砂は主に浮遊した砂が落下したものと考えられる。

ケース 1 では、防風ネットが道路の海岸側端に

あり、沿岸都市部の風速が大幅に抑制される。そのため、沿岸都市部に激しい堆砂が発生して、堆砂量はケース R よりも 2 倍程度大きくなり、堆砂を促進する逆効果となった。ケース 5、6 では、沿岸都市部の堆砂量がケース R の 1/3 程度まで抑制されており、防風ネットの効果が最大となっている。また、ケース 11、12 では、沿岸都市部の堆砂量がケース R と同程度になっており、防風ネットの効果は認められない。

次に、堆砂状況と地形変化について、ケース R、1、6 の結果を図 - 6~8 に示す。ケース R では、建物の風上や建物の間に堆砂しており、道路も砂で覆われている。ケース 1 では、建物周辺および道路と建物の間にさらに激しい堆砂が見られ、建物と同じ高さまで堆砂している。ケース 6 では、防風ネット風下に多く堆砂が見られる。ちなみにこのケースは、ケース 5 と比べて沿岸都市部の堆

砂領域が 10%程度少ない（図 - 9、10 参照）。また、 $x=9.25\text{m}$ 付近では若干の侵食が発生している。これは、砂の供給量が飛砂量を下回っているからと考えられる。なお、前述のように、建物周辺に対する堆砂はあまり見られない。

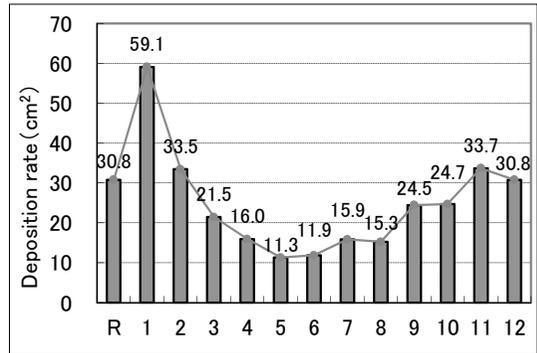


図 - 5 沿岸都市部の堆砂量

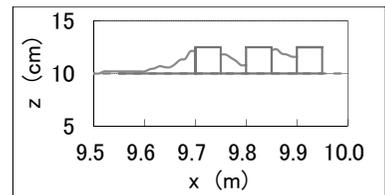
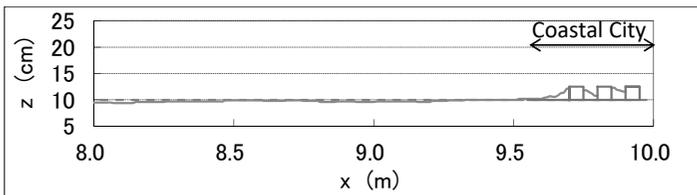


図 - 6 ケース R(防風ネットなし)

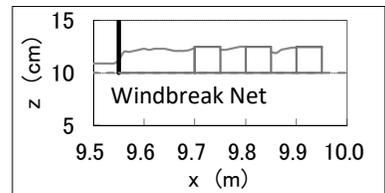
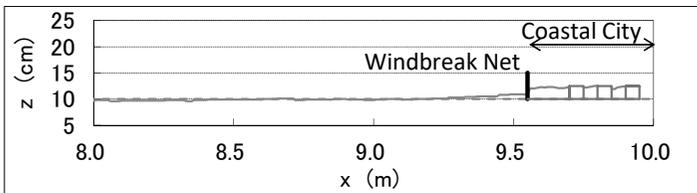


図 - 7 ケース 1(防風ネットの位置 : $x=9.55\text{m}$)

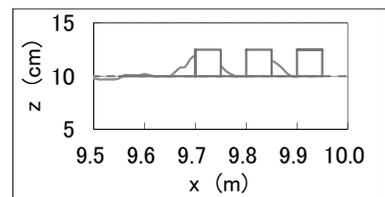
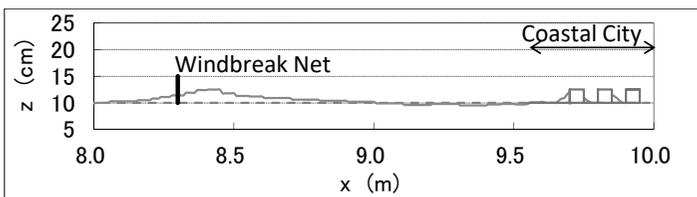


図 - 8 ケース 6(防風ネットの位置 : $x=8.30\text{m}$)



図-9 沿岸都市部の堆砂状況 (ケース 5)

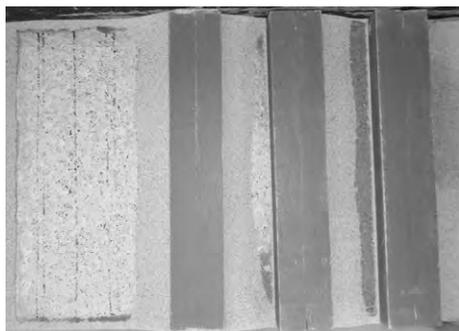


図-10 沿岸都市部の堆砂状況 (ケース 6)

4. 実験シリーズ B

実験シリーズ B では、実験シリーズ A を踏まえて、カラーサンドを用いて沿岸都市に飛来する砂の起源 (位置) を特定する実験を行った。

4.1 実験方法

実験シリーズ A において防風ネットの効果が大きいケース 6 に対して、沿岸都市部の堆砂の起源を調べるため、カラーサンドを使用した実験を行った。なお、ケース 6 よりもケース 5 の方が堆砂量は若干少ないが、実験シリーズ B は沿岸都市部に着目することから、堆砂領域が少ないケース 6 を採用した。表 - 2、図 - 11 に実験ケースとカラーサンドの配置位置を示す。実験時間は 15 分とし、Area1~3(沿岸都市部、図 - 11 参照)におけるカラーサンドの堆砂量を調べた。

4.2 実験結果

図 - 12 に沿岸都市部(Area1~3)におけるカラーサンドの堆砂量を示す(ここでの堆砂量は、Area1~3 から堆積した試料砂をサンプリングし、カラーサンドのみを抽出して、電子天秤により測定したもの(質量)である)。同図より、ケース 6-I における堆砂量が極端に小さいことがわかる(図 - 13 参照)。これは、このケースにおけるカラーサンドの位置の直前(風上側)に防風ネットが設置されており、風速が大きく抑制されているからと考えられる。また、防風ネット風上からの飛砂がカラーサンド付近に落下し、再飛行しなかったことが原因であると考えられる。一方、ケース 6-J~6-L では、沿岸都市部の堆砂量が大きくなっており、沿岸都市部への堆砂には防風ネットの風下側からの飛砂が大きく貢献していることがわかる(図 - 14 参照)。

表-2 実験ケース(実験シリーズ B)

Case	Color Sand Position x (m)	Case	Color Sand Position x (m)
6-A	5.15~5.25	6-G	7.55~7.65
6-B	5.55~5.65	6-H	7.95~8.05
6-C	5.95~6.05	6-I	8.35~8.45
6-D	6.35~6.45	6-J	8.75~8.85
6-E	6.75~6.85	6-K	9.05~9.15
6-F	7.15~7.25	6-L	9.45~9.55

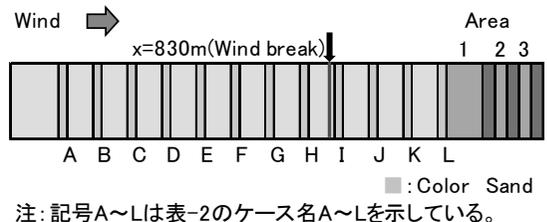


図 - 11 カラーサンドの配置位置

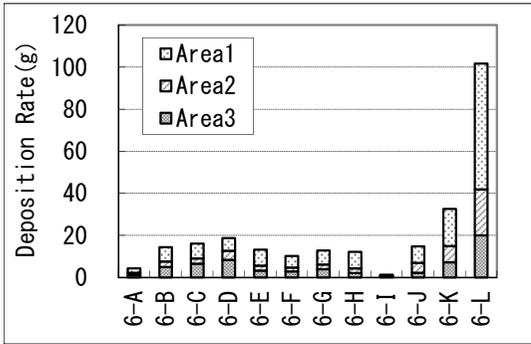


図 - 12 カラーサンドの堆砂量



図 - 13 ケース 6-1



図 - 14 ケース 6-L

5. 実験シリーズ C

実験シリーズ C では、実験シリーズ A, B を踏まえて、防風ネットと沿岸都市部の間にサブ防風ネットを追加設置したケースの実験を行った。

5.1 実験方法

実験シリーズ B より、ケース 6 では防風ネットの風下側からの飛砂が多いことが判明したため、この部分にサブネットを置くことを検討した。表 - 3 に実験ケースを示す。サブネットの高さは $H_s=2.5\text{cm}$, 5.0cm の 2 通りであり、設置位置を 5 通りに変化させた。参考として、ケース 6-5 ($H_s=2.5\text{cm}$) の状況を図 - 15 に示す。実験時間は 15 分とし、実験開始から 5, 15 分後に沿岸都市

部の堆砂状況を写真撮影した。また、実験終了後に風路中央の地形を 5cm 間隔で測定した。

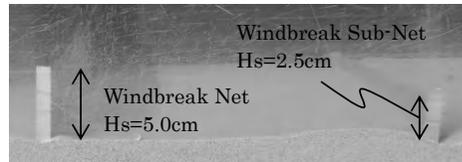


図 - 15 サブネットの設置(ケース 6-5)

5.2 実験結果

図 - 16 に沿岸都市部の堆砂量を示す(ここでの堆砂量は、図 - 5 のそれと同じである)。同図より、 $H_s=2.5\text{cm}$ のケースの方が $H_s=5.0\text{cm}$ のケースよりも全体的に堆砂が少ないことがわかる。また、サブネットの最適設置位置は $x=9.05\text{m}$ (ケース 6-3, $H_s=2.5\text{cm}$) であり、この時の沿岸都市部の堆砂量をケース 6 (サブネットが無い場合) と比較してみると、堆砂量が $2/3$ 程度になっている。一方、ケース 6-1 では沿岸都市部の堆砂量がケース 6(サブネットが無い場合) よりも増大しており、サブネットが負の効果を与えている。図 - 17~20 にケース 6-1, 6-3 の地形変化を示しておく。

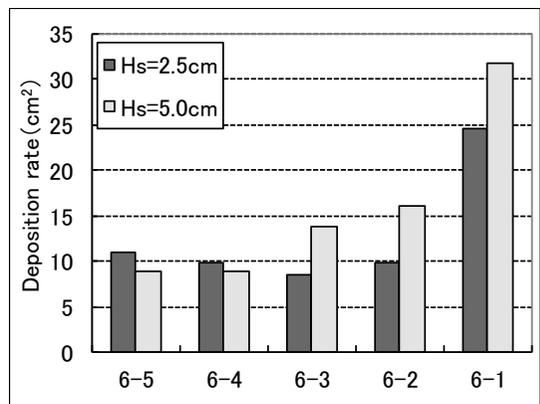


図 - 16 サブネット設置時の堆砂量

表 - 3 実験ケース (実験シリーズ C)

Case	Windbreak Sub-Net Tightness : 57% Height : Hs=5.0cm, Hs=2.5cm	
	Position x (m)	Distance from Coastal City (m) ※
6-1	9.55	0.00 (0H)
6-2	9.30	0.25 (5H)
6-3	9.05	0.50 (10H)
6-4	8.80	0.75 (15H)
6-5	8.55	1.00 (20H)

※括弧内は防風ネットの高さHの倍数で表した距離

6. 結論

本研究では、沿岸都市における飛砂対策として、防風ネットを用いた方法を取り上げ、その最適化について実験的に検討した。以下に主な結論を示す。

- (1) 沿岸都市部の堆砂量はケース 5,6 において少なくなり、防風ネットの最適設置位置は沿岸都市部(海岸側端)から 20~25H だけ海岸側である。

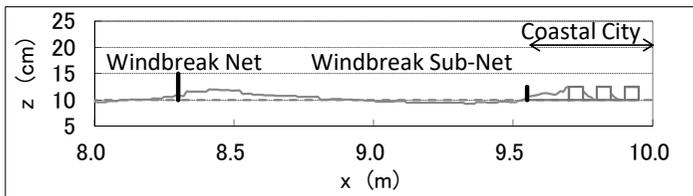


図 - 17 ケース 6-1 (Hs=2.5cm)

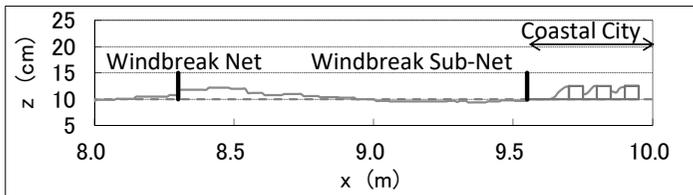
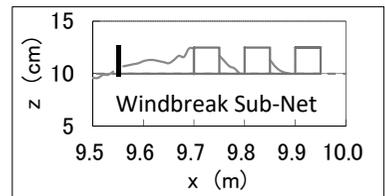


図 - 18 ケース 6-1 (Hs=5.0cm)

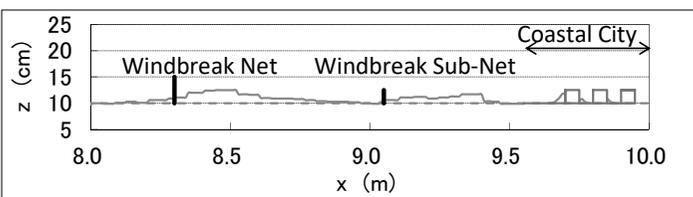
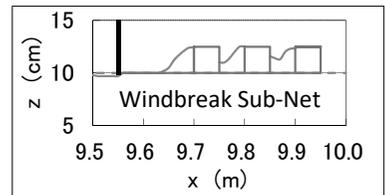


図 - 19 ケース 6-3 (Hs=2.5cm)

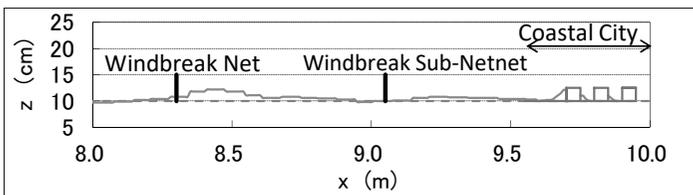
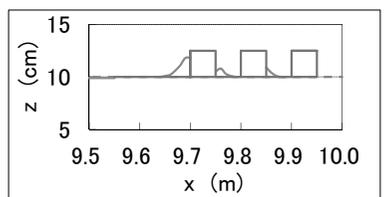
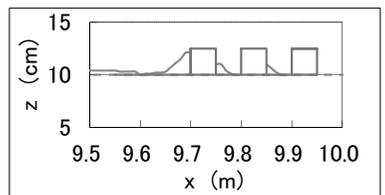


図 - 20 ケース 6-3 (Hs=5.0cm)



- (2) 沿岸都市部に隣接した位置に防風ネットを配置したケース 1 は、堆砂量が増大し、逆効果となるため、注意が必要である。
- (3) ケース 6 における沿岸都市部の堆砂には、防風ネットの風下側からの飛砂が大きく貢献している。
- (4) ケース 6 に対して、防風ネットの風下側へサブネットを設置することにより、沿岸都市部への堆砂をさらに抑制できる。ただし、サブネットの設置位置を誤ると、逆に堆砂量が増大するため、注意が必要である。

なお、(1) については、現場での最適位置は相似則が完全に成立しないため、20~25H ではないものの、沿岸都市から相当離れた位置となると考える。

引用・参考文献

- 1) 佐藤ら：新潟海岸における飛砂の実態と防砂フェンスの機能，海岸工学論文集，46，pp. 496-500，1999
- 2) 田中ら：新潟西海岸での飛砂対策の有効性検討，海岸工学論文集，54，pp. 546-550，2007
- 3) 真木：防風網に関する研究，農業気象，pp161-170，1982
- 4) 真木：二列堆砂垣の機能についての実験的研究，海岸工学論文集，39，pp331-335，1992
- 5) 真木：風と自然，開発社，pp. 185-192，1989.
- 6) 保坂ら：飛砂粒子の跳躍水平飛行距離分布，海岸工学論文集，55，pp. 556-560，2008.
- 7) 松倉：風成砂床形の形態とその形成条件，地理学評論，50(7)，pp. 402-419，1977.
- 8) 堀田ら：堆砂垣の機能についての実験的研究，海岸工学論文集，37，pp. 444-448，1990.

Wind Tunnel Experiment on Prevention of Wind-Blown Sand Movement through the Use of a Windbreak Net for Coastal Cities

Takayuki KANDA and Masanori NAKAI

ABSTRACT : A wind tunnel experiment was carried out to investigate the effects of a windbreak net for the prevention of wind-blown sand movement in coastal cities. In the experiment, sediment deposition rate in a coastal zone was measured in the presence of a windbreak net under various conditions. The optimal location of a windbreak net for prevention of sediment deposition was 20-25H(H : height of a windbreak net) far from the edge of a coastal city in the upwind direction. When a windbreak net was located around the edge of a coastal city, however, it negatively contributed for sediment deposition. In addition, sediment deposition could be greatly suppressed by setting a windbreak sub-net in the downwind direction of the windbreak net.

KEYWORDS : *Wind-blown sand movement, Coastal city, Windbreak net, Wind tunnel experiment*

著者紹介

神田 貴行 (非会員)



八千代エンジニアリング株式会社 水工部 (東京都台東区浅草橋 5-20-8 CSタワー), 昭和 58 年生まれ, 平成 22 年 3 月東京電機大学大学院理工学研究科建設環境工学専攻修了, 同年 4 月株式会社アイ・エヌ・エーに入社, 平成 25 年八千代エンジニアリング株式会社に入社。現在同社水工部主任。

E-mail: tk-kanda@yachiyo-eng.co.jp
<http://www.yachiyo-eng.co.jp/>

中井 正則 (正会員)

東京電機大学理工学部建築・都市環境学系 (埼玉県 比企郡鳩山町石坂), 昭和 36 年生まれ, 昭和 62 年 3 月東京大学大学院工学系研究科土木工学専攻修了, 昭和 63 年東京大学工学部土木工学科勤務, 平成 4 年株式会社東京久栄に入社, 平成 9 年東京電機大学理工学部建設工学科勤務, 現在同大学建築・都市環境学系教授, 工学博士, 土木学会会員。
E-mail: nakai@g.dendai.ac.jp