

新潟西海岸における飛砂の現地観測

塩澤俊彦* ・ 中谷内信一** ・ 赤澤 守***
玉城重則**** ・ 黒木敬司****

1. ま え が き

新潟西海岸では、昭和63年度から西海岸の現状および今後の展望を考え、海浜を有する優れた防護機能を持続的に発揮できるよう、突堤・潜堤を複合的に配置し、養浜を行う面的防護工法を実施中である。しかし、冬の季節風が強く、今後実施される養浜は飛砂となって内陸に進入し、生活環境への影響が懸念される。

このことから、現状における飛砂現象を把握し、かつ養浜後の飛砂量、飛砂の状況を予測し適切な飛砂防止対策等を計る資料を得るために特に飛砂の水平分布について現地観測を実施した。なお、現況の浜幅は20~30m程度と狭く、養浜後には飛砂量も増大することが考えられ、別途報告されている寺泊海岸の調査結果を参考に検討を行っていくこととする。

2. 現 地 観 測

2.1 調査方法

図-1に示す対象海浜に、トレンチ内外の断面観測、風観測、土砂採取、および、水平全容型・水平分布型捕砂器による捕砂量の観測を行った。観測期間は、平成5年1月8日から1月23日までの16日間である。

a) 風向・風速観測

風は地形の影響を受けやすいため、現地の特異な地形の影響を把握する目的で汀線・砂浜中央・砂丘上の各地点の約5mの高さにおいて風向、風速を観測した。

b) 底質調査

飛砂調査地点の土砂の性質を調べるために、観測地点近傍の4地点において土砂を採取し、粒度試験および比重試験を行った。

c) トレンチ内外の断面変化観測

図-1に示す海浜中央部に沿岸15m、岸沖5m、深さ1.5mのトレンチを掘削した。このトレンチを横断する2本の測線（北側、南側）に目盛りピンを設置し、ピンの高さを測定することによって、断面変化を観測した。

d) 捕砂観測

i) 水平全容型捕砂器による捕砂観測

トレンチ内の風上側壁面に、水平全容型捕砂器を設置して飛砂量（捕砂）観測を行った。飛砂量観測は、1回当たり10分間にホッパー内に溜った砂を採取し、その重量を測定した。観測は飛砂の発生した1月8日、17、19日、21日の4日間実施した。

ii) 水平分布型捕砂器による捕砂観測

トレンチ内の風上側壁面に、図-2に示す水平分布型捕砂器を設置して水平方向の飛砂量分布（砂粒子の飛行距離）観測を実施した。観測は、砂の溜り具合により10、20、30分間に溜った砂の重量を測定した。

2.3 観測結果の整理方法

a) 風向・風速データの整理方法

実測の風向・風速データから10分間平均風速を算出し

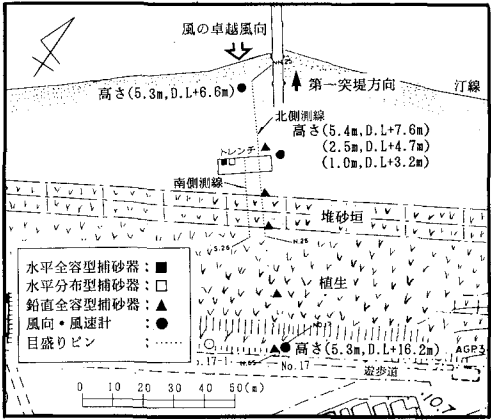


図-1 現地機材配置図

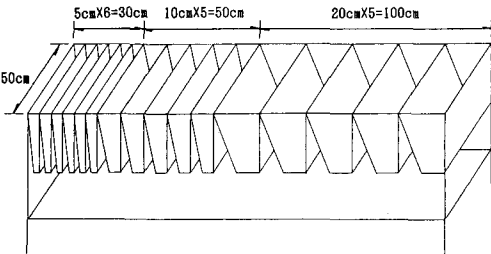


図-2 水平分布型捕砂器

* 運輸省第一港湾建設局新潟港工事事務所 所長
** 運輸省第一港湾建設局新潟港工事事務所 次長
*** 運輸省第一港湾建設局新潟港工事事務所 工務課長
**** 正員 株式会社エコー 第一技術部 解析調査課

て解析に用いた。風速は高さによって異なってくるので、飛砂の外力としては、摩擦速度 (u_*) を用いて整理することにした。摩擦速度 (u_* : cm/s) は、ある高さ (z : cm) で観測された風速 (u_z : cm/s) を用いて次式で算出できる。

$$u_z = 5.75 u_* \cdot \log 10 \frac{z}{z'} + u' \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 u_z はある高さ z における風速であり、(1) 式中の z' 、 u' は、focal point と呼ばれる点である。Horikawa et al. (1986) は focal point の存在については検討の余地はあるが工学的には focal point の存在を認め、Zingg (1952) の実験式は従来測定されている focal point の値の平均的な値を与える式 (2) を考えてよいとしている。

$$z' = 10d \text{ (mm)} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$u' = 20d \text{ (mile/hr)} = 8.94d \text{ (m/s)} \quad \dots\dots\dots (3)$$

風速測定結果 (u_{540} : 5.4 m 地点の 10 分間平均風速) を用いて摩擦速度 (u_*) を計算すると次式のようにになる。

$$u_* = 0.0534 u_{540} - 14.3 \text{ (cm/s)} \quad \dots\dots\dots (4)$$

なお、focal point の算出には、新潟西海岸での代表的な粒径 $d_{50} = 0.30 \text{ mm}$ を用いた。

b) 捕砂器による飛砂量の整理方法

水平全容型捕砂器の単位は、従来の研究成果との比較を容易にするため q (kg/10 min/m) という単位を用いた。また、水平分布型捕砂器では各セグメントに溜まる砂量が少なく、観測時間も任意だったため $q(x)$ (gf/cm²/s) という単位を用いて整理した。なお、両者とも捕砂器内に溜まった砂の湿潤重量で処理している。

3. 現地観測結果

3.1 観測期間中の気象条件

調査期間中の気象条件の経時変化を図-3に示す。風向・風速は、新潟港工事事務所における観測結果、降水量、日照時間、気温はアメダスのデータを用いた。顕著な飛砂現象が確認され、捕砂器内に有為な土砂を捕捉できたのは、8, 17, 19, 21日の4日間であった。強風時でも、雨が降った場合などは飛砂は発生しなかった。

3.2 土砂分析結果

トレンチ周辺で採取した土砂の分析結果から、当海浜の粒径は平均的には $d_{50} = 0.30 \text{ mm}$ 、比重は $\gamma = 2.68$ 程度で、ほぼ均一な砂であることが確認された。

3.3 トレンチ内・周辺の断面変化

図-4にトレンチ風上、内、風下側の初期断面からの地形変化量を示す。なお、距離の基準点はトレンチの風上側(海側)の壁とし、風下側(陸側)へ正である。

トレンチ前面では汀線付近で砂面の変化が大きい、トレンチ近傍での変化は少ない。

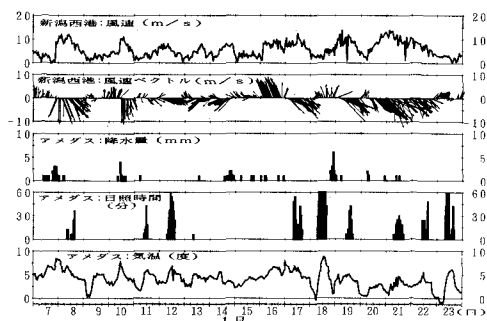


図-3 調査期間中の気象条件

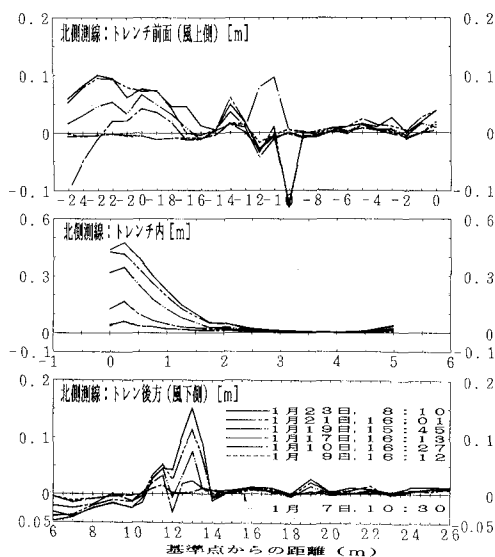


図-4 トレンチ周辺の断面変化量

トレンチ内では、トレンチの壁面から3m程度の距離まで堆積域が形成され、堆積厚は最大で50cm程度とトレンチ内への飛砂の捕捉状況が確認できた。

トレンチ後方(6~26m)の測線では堆砂垣の直前でかなりの堆積がみられる。トレンチ上を飛砂が通過しているとは考えにくく、側方からの移動があったものと考えられる。なお、堆砂垣後方の変化はほとんど見られない。

3.4 新潟西海岸における風速の分布

地点別の風速を比較することにより風に対する地形の影響について検討した。図-5に示すように、トレンチ横に設置した風速計(No.3:地盤からの高さ5.4m)での風速値に対する、崖上での風速値の比を風向別にプロット(△)した。同様に、トレンチ横と汀線付近の風速比も風速別にプロット(□)した。

トレンチ横(No.3)と崖上(No.5)での風速比は、風向がSE~SSEの場合に2.0程度の値となり、この風向の場合に崖上での風速に比べて砂浜上での風速は半分程度になることが確認された。これに対してトレンチ横

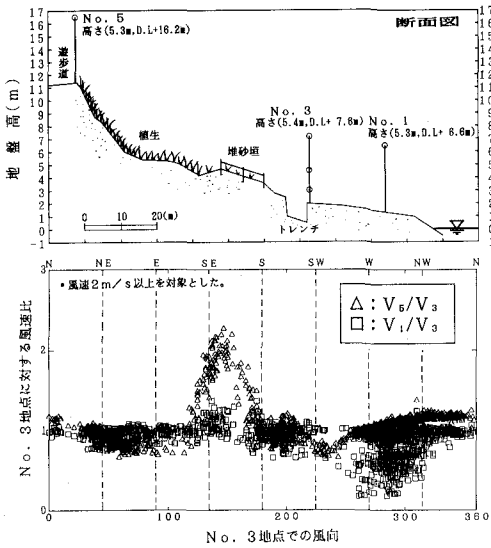


図-5 風向別の風速比分布

(No. 3)と汀線付近 (No. 1)での風速比は, WNW 方向を中心にして 0.2 程度まで小さくなる場合があり, 既設離岸堤等の構造物による風場の変化が生じている可能性も考えられるが, 現在の時点では明らかではない。

4. 観測結果の検討

4.1 水平全容型捕砂器による飛砂量の検討

水平全容型捕砂器を用いた観測結果と, トレンチ横での風観測結果から算出した摩擦速度との関係について検討する。図-6 は縦軸を水平全容型捕砂器による飛砂量 (kgf/10 min・m), 横軸をその飛砂量を観測した時刻の摩擦速度とした結果である。

図中の実線は, (5) 式で示す河村公式に $k=1.0$, 移動限界摩擦速度 $u_{*cw}=20, 27.5, 35, 42.5, 50$ cm/s を与えた曲線である。

$$q = K \frac{\rho_a}{g} (u_* + u_{*cw})^2 (u_* - u_{*cw}) \quad \dots\dots\dots (5)$$

上記の各移動限界摩擦速度 (u_{*cw}) は, 乾燥砂面での限界摩擦速度を $u_{*c}=20$ cm/s としたときに, 堀川ら (1984) の湿砂面上における限界摩擦速度を与える (6) 式で含水比 w を 0, 1, 2, 3, 4 % とした時の限界摩擦速度に相当する。

$$u_{*cw} = A \sqrt{\left(\frac{\rho_s - \rho_a}{\rho_a} g d \right)} + 7.5 w \quad \dots\dots\dots (6)$$

図-6 をみると, 飛砂量は $K=1.0$, 含水比 0 % (乾燥砂面) の曲線をほぼ上限として, それより小さい範囲にプロットされている。摩擦速度が 40 cm/s 以下で飛砂量が小さいのは砂層の含水の影響および飛砂の発生する範囲 (平衡距離) などによるものと考えられる。

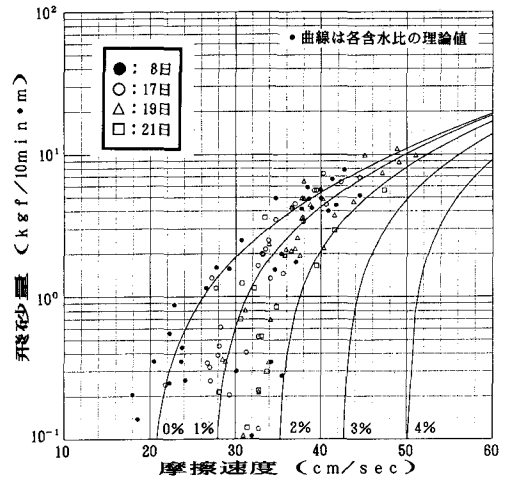


図-6 摩擦速度と飛砂量の関係

4.2 飛砂量の水平分布についての検討

図-7 は, 水平分布型捕砂器による飛砂量の水平分布例 (平成 5 年 1 月 8 日, 13:15~13:40) である。

この図より, 第 1 番目のセグメントの捕捉飛砂量が第 2 番目以降と比較して極めて多い。この理由としては, 転動 (surface creep) と飛行距離が 5 cm 以下である砂粒子の量が多いということが考えられる。

また, 砂層末端より約 40 cm 程度 (風上端より 7 番目, あるいは 8 番目) のセグメントに落下する砂量はワンオーダー小さくなる。すなわち, ほとんどの砂粒子の 1 回の飛行距離は 40 cm 以下であることを意味する。しかし, 全観測期間中においては, 極めて少ない量だが, 強風時にトレンチを越える砂粒子があったことは注目すべきである。

図中に示される曲線は Hotta・Horikawa (1991) にならって, (7) 式に示す河村の提案した飛砂量の鉛直分布式にデータを当てはめたものである。Hotta・Horikawa (1983) が風洞実験で測定した砂粒子の飛行距離の分布が, 飛砂量 (rate) の鉛直分布に極めて類似していることに注目して, 鉛直分布式を飛行距離の分布に適用したものであり, 砂面より飛び出した砂粒子の跳躍運動の高さが違っても, 軌道形状が相似であると仮定すれば結論できる。

$$g(x) = G_0 \left[\lambda \left\{ 2\sqrt{2} K_0(\xi) - 2\sqrt{2} \beta \sqrt{\frac{x_0}{g}} \xi K_1(\xi) \right\} - \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{a \beta \sqrt{(0.75 x_0)}}{g} \xi^2 \{ K_0(\xi) + K_2(\xi) \} \right] \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\xi = \sqrt{(2x/x_0)}, \quad \lambda = \bar{u}_1 / \sqrt{(2gx_0)}, \quad \beta = 3\pi\mu d/m,$$

$$\int_0^\infty x f(x) dx = x_0$$

ここに, G_0 は単位面積より単位時間内に空气中に飛び

出す砂粒子の質量、 x_0 は砂粒子の到達する距離の平均値、 a は風速の鉛直分布を $u(z)=a\sqrt{z}$ と仮定したときの比例係数、 μ は粘性係数、 d は粒径(mm)、 k_0, k_1, k_2 は次数が0, 1, 2の第2種の変形ベッセル関数である。

a は堀田等の実験(1990)により、ほぼ $a=300(\text{cm}^{1/2}/\text{s})$ 程度とされており、今回の当てはめでは G_0 と x_0 の2種類を変化させて、実測値と理論曲線との差が最小になるようにした。

4.3 水平飛砂量の係数検討

各観測時の G_0, x_0 の値が算出されたので、この2種類の値について外力(摩擦速度)との関係を検討する。

a) G_0 と摩擦速度(u_*)の関係

水平分布観測結果から得られた G_0 と摩擦速度(u_*)の関係を図-8に示し、同図にはHotta・Horikawa(1991)の模型実験の結果も×印で示した。

風洞実験の結果は、ほぼ $G_0=1.5 \times 10^{-7} u_*^3$ で表されているが、実測値は $G_0=0.4 \times 10^{-7} u_*^3$ の線を上限としてその下側に分布している。これは、実測値が湿った砂であったためと推定される。また、鉛直、水平の飛砂量の分布については飛砂が十分に発達し平衡状態に達した場合の式を用いていることから、現地調査地点の浜幅が20m程度と狭いことの影響もあると判断される。

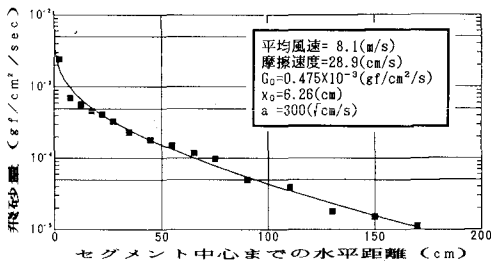


図-7 飛砂量の水平分布 (1月8日, 13:15~13:40)

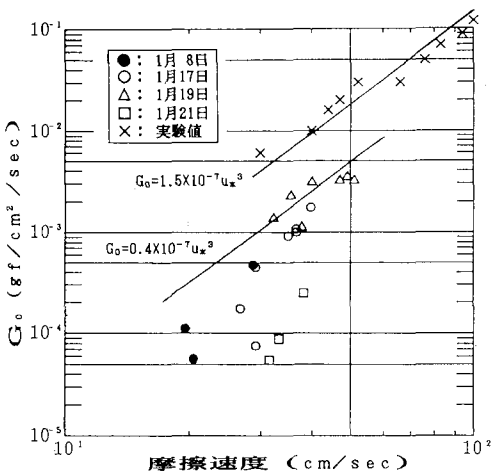


図-8 摩擦速度 (u_*) と飛砂発生量 (G_0) の関係

b) x_0 と摩擦速度(u_*)の関係

摩擦速度と飛行距離(x_0)の関係を図-9に示す。同図にはHotta・Horikawaの実験結果を×印で示してあるが両者の間には顕著な傾向はみられなかった。これは、浜幅が十分に広がらなかったことや、含水比の影響があったものと推定される。そこで、飛行距離(x_0)と到達高さ(h_0)の関係から、若干の考察を行った。

まず、飛んでいる砂は砂の到達高さ(h_0)から自由落下するものと考え、落下距離と落下時間(t)および着底時の速度(v_0)の関係は式(9)、(10)によって表される。

$$h_0 = gt^2/2 \dots\dots\dots (9)$$

$$v_0 = \sqrt{2gh_0} \dots\dots\dots (10)$$

ここで、着底時の速度と飛砂が飛び出す時の速度が同じで、飛び出し角度を $26 \sim 30^\circ$ であると仮定すると、飛び出す時の水平方向速度は $u_0 = 2v_0$ で表されることから、飛行距離(x_0)は次式で表すことができる。

$$x_0 = 2tu_0 = 8h_0 \dots\dots\dots (11)$$

以上のように試算した結果、飛行距離は到達高さの8倍程度と推定される。飛砂の到達高さについては、寺泊での観測により摩擦速度との関係が明らかになっており、この結果を用いて摩擦速度と飛行距離の関係を示したものを図-9に破線で示してある。

4.4 水平飛砂量と全飛砂量の関係

これまでの検討で、水平分布の飛砂量に関する諸係数について摩擦速度との関係が整理された。

ここでは、水平方向の飛砂量式に当てはめた結果(G_0, x_0)を代入して、水平方向の飛砂量分布を計算した後に、水平方向に累積することによって水平方向の全飛砂量を算出した。この結果と同時刻に観測した水平全容型捕砂器による飛砂量観測結果を比較したものが図-10である。

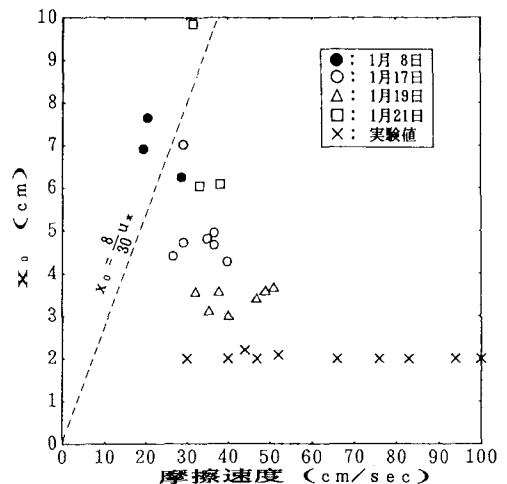


図-9 摩擦速度 (u_*) と飛行距離 (x_0) の関係

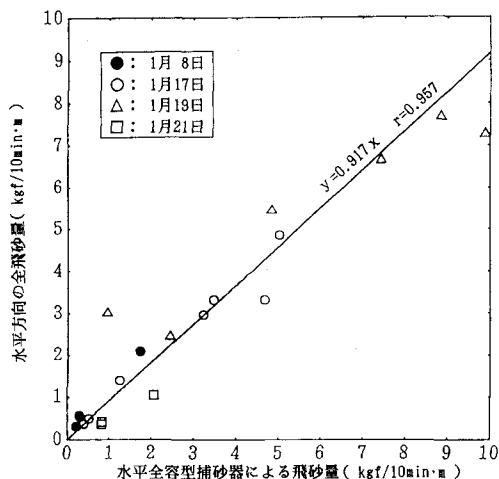


図-10 全飛砂量と水平飛砂量の関係

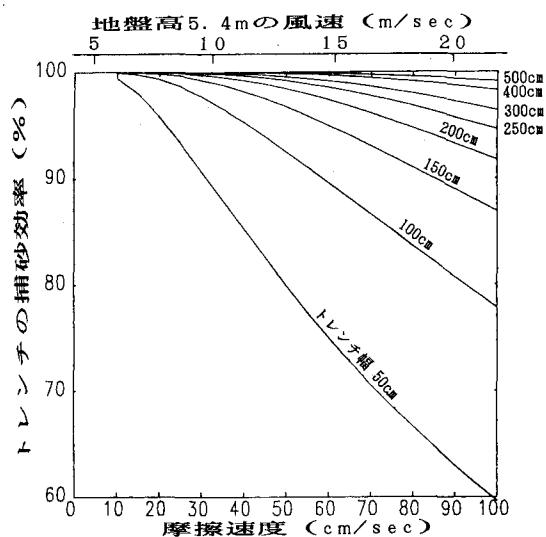


図-11 トレンチによる飛砂対策の効果

同図より、飛砂量の多少にかかわらず非常に相関がよく、全飛砂量の90%を捕捉した結果となった。今回用いた水平分布型捕砂器の捕砂効率が極めてよいことになる。

4.5 トレンチによる捕砂効率

トレンチによる飛砂対策の効果について、飛砂の水平方向分布の観測結果を基に検討する。水平方向分布に係わる諸元として以下の条件を用いた。

$$a = 300\sqrt{\text{cm/s}}, x_0 = 8 \times u_* / 30 (\text{cm}), G_0 = 2.7 \times 10^{-7} u_*^3$$

なお、新潟西海岸の解析結果からは $G_0 = 0.4 \times 10^{-7} u_*^3$ となっていたが、飛砂量が非常に多い場合を想定して、 G_0 の値を大きめに設定してある。

これらの係数を摩擦速度を変化させ、前出の(7)式より、飛砂の水平方向分布を計算した。この結果に対して、

トレンチの幅を変化させた時捕砂効率を試算した結果が図-11である。試算結果からトレンチの幅が5mあると、摩擦速度が100 cm/s になっても99.2%の砂をトレンチ内に捕捉できることが確認された。

5. あとがき

今回の観測結果から得られた成果を要約すると以下のようである。

① 摩擦速度が40 cm/sを越えたときには、たとえ湿砂面であっても、また平衡距離がたとえ約数十m(現在の西海岸)と限られていても、適当な係数値($K=1$)を与えた河村式で飛砂量を推定できる。

② 浜幅が広い寺泊では、 $K=3$ を上限とした飛砂量となっており、養浜後の西海岸も同様の飛砂量になることが予想され、適切な対策が必要となる。

③ 摩擦速度が小さい場合であっても乾燥砂面(含水比0%)を上限として、それより小さい含水比(2%)の曲線内にある。堀川ら(1984)の湿砂面上における飛砂現象を説明する仮説で湿砂面上の飛砂のメカニズムを説明できる可能性がある。

④ 今回用いた水平分布型捕砂器は、捕砂効率が良く、水平方向の分布を十分に把握することができた。この結果、飛砂の水平方向分布は河村の提案した(7)式によって、推定できるということが確認された。

④ トレンチによる飛砂対策は、トレンチ幅5m程度で99%以上の飛砂を捕捉できる。

なお、現地調査の実施およびデータの整理、解析に当たって、日本大学の堀田教授にご協力、ご助言を頂いたことを付記し、謝意を表するものである。

参考文献

- 船越晴世・大野正人・阿部勝男・鈴木幸一・黒木敬司・王城重則(1993): 飛砂防止対策について, 海岸論文集, 第40巻, pp. 291-295.
- 堀田新太郎・堀川清司(1990): 堆砂垣の機能についての実験的研究, 海岸論文集, 第37巻, pp. 444-448.
- Horikawa, K. et al. (1984): Field Measurement of Blown Sand Transport Rate by Trench Trap, Coastal Eng. Japan., JSCE, Vol. 27, pp. 213-232.
- Horikawa, K. et al. (1986): Literature Review of Sand Transport by Wind on a Dry Sand Surface, Coastal Eng. Vol. 9, No. 6, pp. 503-526.
- Horikawa, K. et al. (1983): On the Sand Transport Rate by Wind on Beach, Coastal Eng. Japan., JSCE, Vol. 26, pp. 101-120.
- Hotta, S., and K. Horikawa (1991): Study of wind-blown sand on beaches, pp. 3-20.
- Zingg, A. W. (1952): Wind Tunnel Studies of the Movement of Sedimentary Material, Proc. 5th Hydraulics Conference, IAHR, pp. 111-135.