

飛砂防止対策について

船越晴世* ・大野正人** ・阿部勝雄***
鈴木幸一**** ・黒木敬司***** ・玉城重則*****

1. ま え が き

日本海沿岸では冬季の季節風により飛砂が発生し、隣接する緑地、駐車場、臨港道路、さらには居住地における経済活動の阻害や生活環境の破壊などの問題が生じている。そこで、浜幅が広く大量の飛砂が発生している新潟県寺泊東海岸をモデル海岸に選び、新たに開発した現地用の鉛直分布型捕砂器による観測結果と飛砂の鉛直分布についての考察、埋め立て地などで用いられている飛砂防止ネットの効果およびフェンスを用いた場合の飛砂防止効果について検討したものである。なお、浜幅の違いによる飛砂発生状況を確認するために、全国でも有数の侵食海岸で、浜幅が20～30 m程度である新潟西海岸においても現地調査を実施した。この結果については別途報告している。

2. 現 地 観 測

2.1 調査方法

現地調査は、図-1に示す対象海滨において、トレンチ内外の断面観測、風速観測、土砂採取、および、トレンチ内に設置した水平全容型・鉛直分布型捕砂器による捕

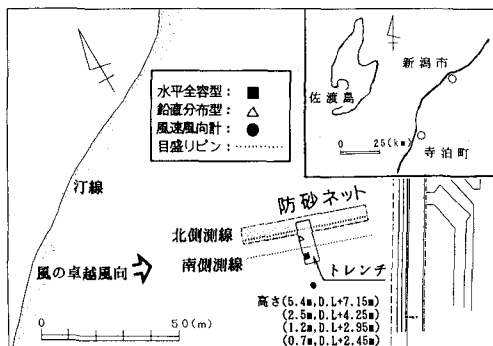


図-1 現地調査位置図

* 正会員	運輸省第一港湾建設局新潟調査設計事務所	所長
** 正会員	工務	運輸省第一港湾建設局新潟調査設計事務所 次長
***	(前)運輸省第一港湾建設局新潟調査設計事務所	調査課長
****	運輸省第一港湾建設局新潟調査設計事務所	調査係長
***** 正会員	株式会社エコー	第一技術部 解析調査課

砂量の観測を行った。観測期間は、平成5年1月24日から2月3日までの11日間である。

a) 風向・風速観測

トレンチ横にプロペラ型風向・風速計を地盤より0.7, 1.2, 2.5, 5.4 mの高さに設置し、トレンチ掘削後の11昼夜連続で風向・風速の連続観測を行った。

b) トレンチ内外の断面変化観測

沿岸方向15 m, 岸沖方向5 m, 深さ1 mのトレンチを掘削した。このトレンチ内を横断する2本の測線(北側, 南側)を設定し、測線上に目盛りピンを設置した。なお、北側の測線には飛砂防止ネットを敷設し、ネットの有無による影響(効果)を確認した。

c) 土砂採取

実際に飛砂となって飛んでいる砂の特性を調べるために、捕砂器内に捕捉された砂について粒度および含水量試験を行った。

d) 捕砂観測

i) 水平全容型捕砂器による捕砂観測

図-1に示したトレンチ内の風上側壁面(■で表示)に、水平全容型捕砂器(ホッパー型: 図-2参照)を設置して捕砂観測を行った。観測は1回当たり10分間とし、捕砂器内に溜まった砂の重量を測定することとし、飛砂の発生した1月28日, 2月1, 2, 3日の4日間に合計71回実施した。

ii) 鉛直分布型捕砂器による捕砂観測

図-1に示したトレンチ内の風上側壁面(△で表示)に、鉛直分布型捕砂器(図-3参照)を設置して鉛直方向の飛砂量(捕砂)観測を19回実施した。観測は、各セグメントへの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。

2.2 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2 sec間隔の風向・風速データから10分間平均風速を算出して解析に用いた。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。

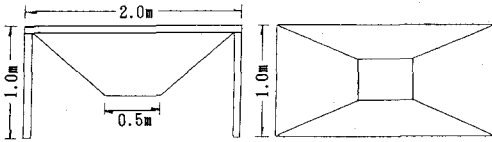


図-2 水平全容量捕砂器 (ホッパー型)

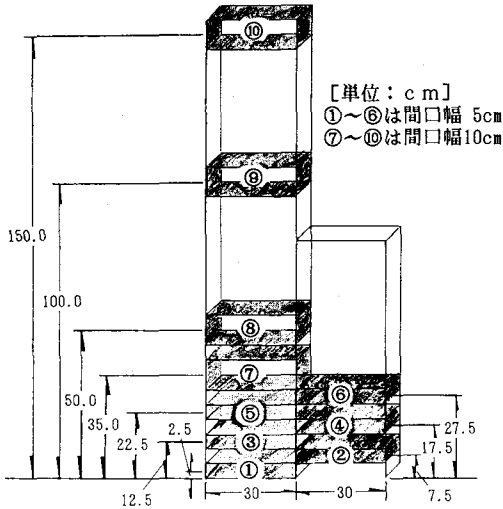


図-3 鉛直分布型捕砂器

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

ここで、(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なになる。

$$u_* = 0.0570 u_{540} - 24.5 \text{ (cm/s)} \quad \dots\dots\dots (4)$$

なお、focal point を算出する際の砂粒子の粒径は、平成 3 年度調査で平均的に $d_{50} = 0.48 \text{ mm}$ 、今回の調査では $d_{50} = 0.40 \text{ mm}$ となっており、本検討では $d_{50} = 0.48 \text{ mm}$ を代表粒径として用いた。

捕砂器内に溜まった砂の含水率は全体的に変化は少なく 1~2% 程度であった。

b) 捕砂器による飛砂量の整理方法

水平全容量型捕砂器の単位は、従来の研究成果との比較を容易にするため $q(\text{kg}/10\text{min}/\text{m})$ という単位を用いた。また、鉛直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 $q(z)(\text{gf}/\text{cm}^2/\text{s})$ という単位を用いて整理した。なお、両者とも捕砂器

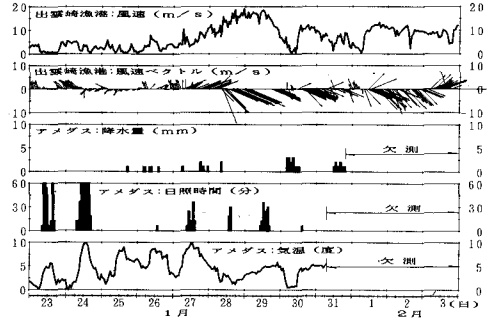


図-4 調査期間中の気象条件

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

ここでは、現地調査期間中の気象条件を含め、トレンチ内の地形変化量、土砂分析結果について整理した。

3.1 観測期間中の気象条件

調査期間中の風速・風向および降水量、日照時間、気温の変化を図-4 に示す。風速・風向は寺泊の南西側に位置する出雲崎漁港での観測結果、その他は寺泊でのアメダスの観測結果を用いている。

調査期間中、風が強かったのは 1 月 28~30 日と 2 月 1~3 日であり、特に 1 月 28 日午後から 29 日午後にかけて風速 15 m/s 以上の強風が続いた。

日照時間は調査期間を通じて少なく、降水量は多くはないがほぼ毎日降雪がある状況であった。

3.2 トレンチ内、周辺の断面変化

図-5 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、 x 軸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(風上側)では北南測線とも堆積傾向にあり、堆積形状に相違はあるが、堆積量に著しい差はない。

トレンチ後方の測線についてみると、南側測線ではトレンチ後方約 10 m の区間は侵食されて砂面が低下し、それより風下側では堆積している。防砂ネットに覆われた北側測線では、南側測線が侵食されている区間でも堆積しており、それより風下側では堆積量はさらに大きい。

トレンチ内では風上からの飛砂のほぼ全量を捕捉してしまうことを示している(Horikawa et al., 1983, 1984)。本観測でも強風時トレンチを越える飛砂が観察できたが、その量は無視できるほど少なかった。しかし、トレンチ後方の断面は大きく侵食されておらず、飛砂量が連続していないことになる。これは次のような理由による。トレンチはこの海岸の卓越風向西北西にほぼ直角になるように掘削されており、目盛りピンも同様であるが、観測期間中に北西あるいは北北西より風が吹き、側方より

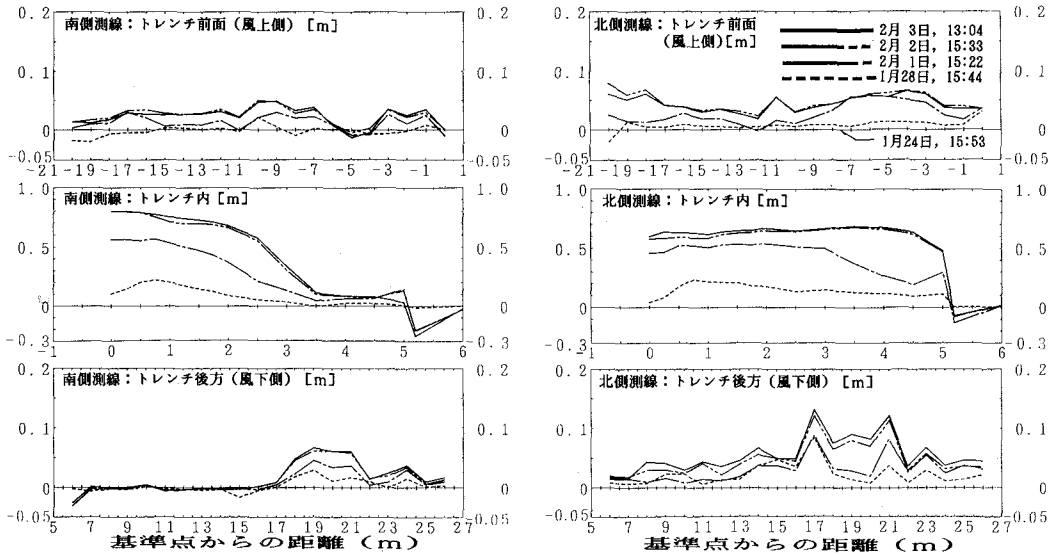


図-5 トレンチ周辺の断面変化量

砂が補給されたものと考えられる。

トレンチ内北側測線で2月1日より2月2日にかけて堆積が大きいが、トレンチの側方からの飛砂によるものである。また、1月28日の荒天時には海浜上に週した波がトレンチに流入するような事態も生じ、トレンチ内の断面測定精度は余りよくない。それ故、今回のデータはトレンチ周辺の砂量についての検討はできない。この観測より確実にいえることは防砂ネットは飛砂の発生を抑えることができるが、いったん砂に覆われてしまうとやはり飛砂防止の効果は期待できないということである。

3.3 土砂分析結果

水平分布型捕砂器および鉛直分布型捕砂器に捕捉された砂について粒土分析及含水率の分析を行った。また、平成3年1月に行った同様の観測結果から、寺泊海岸において飛砂現象を起こしている土砂の粒径は中央粒径で0.4～0.5 mmの範囲に分布しており、含水率は1～2%程度であることが確認された。

また、鉛直分布型捕砂器に捕捉された砂の含水率は、地盤近傍で2%程度、地盤から50 cm程度の高さで1.5%程度と、地盤より離れる（高くなる）につれて小さくなる傾向にあった。

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。

図中の点線は、(5)式で示す河村公式に $K=1.0$ 、移動限界摩擦速度 $u_{*cw}=20.0, 27.5, 35.0, 42.5, 50$ cm/s を与えた曲線である。実線は河村公式の $K=3.0$ として同様に計算した結果である。

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

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、Horikawa 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。

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

図-6をみると、飛砂量は $K=3.0$ 、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。

4.2 飛砂量の鉛直分布についての検討

図-7は、鉛直分布型捕砂器による飛砂量の鉛直分布例(平成5年1月28日 10:55～11:25)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) と飛行高さが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。

全観測期間中においては、極めて少ない量だが、強風時に1 mを越える高さの地点でも飛砂が捕捉された。このことは、対策工を検討する際に留意すべき点である。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鉛直分布式にデータ

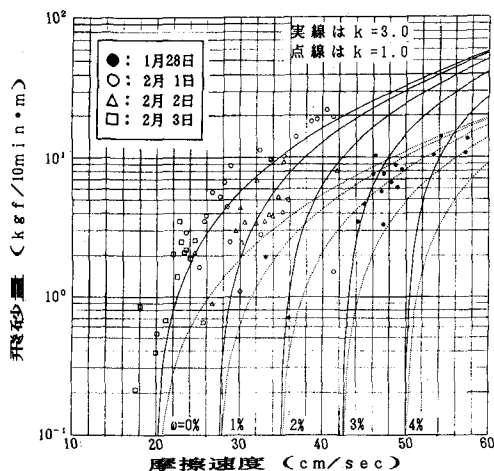


図-6 摩擦速度と飛砂量の関係

を当てはめたものである。両者の関係から、(7)式によって時間平均的な飛砂の鉛直分布を十分に表現できることが確認された。

$$g(z) = G_0 \left[\lambda \left\{ 2\sqrt{2} K_0(\xi) - 2\sqrt{2} \beta \sqrt{\frac{h_0}{g}} \xi K_1(\xi) \right\} + \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{a\beta\sqrt{(0.75h_0)}}{g} \xi^2 \{K_0(\xi) + K_2(\xi)\} \right] \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\xi = \sqrt{(2z/z_0)}, \quad \lambda = \bar{u}_1 / \sqrt{(2gz_0)}, \quad \beta = 3\pi\mu d/m,$$

$$\int_0^\infty z f(z) dz = h_0$$

ここに、 G_0 は単位面積より単位時間内に空気中に飛び出す砂粒子の質量、 h_0 は砂粒子の到達する高さの平均値、 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 $a = 300 \text{ cm}^{1/2}/\text{sec}$ 程度とされており、今回の当てはめでは G_0 と h_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 鉛直飛砂量の係数検討

各観測時の G_0, h_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) h_0 と摩擦速度の関係

図-8は、横軸に摩擦速度、縦軸に h_0 をとった関係を示し、図中の×印は堀田等の実験結果である。摩擦速度と h_0 の関係は、実験値が実測値に比べて小さめの値となっており、 h_0 と摩擦速度との間に顕著な関係は見いだせないが、現地データから判断すると概ね図中の実線($h_0 = u_*/30$)により、両者の関係を表現できるものと判断した。

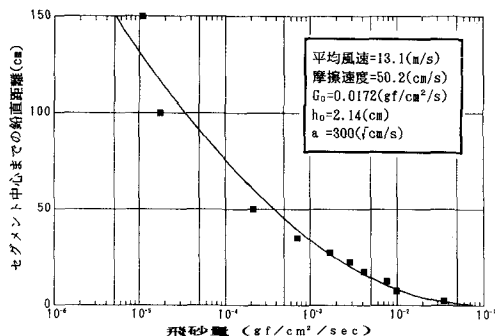
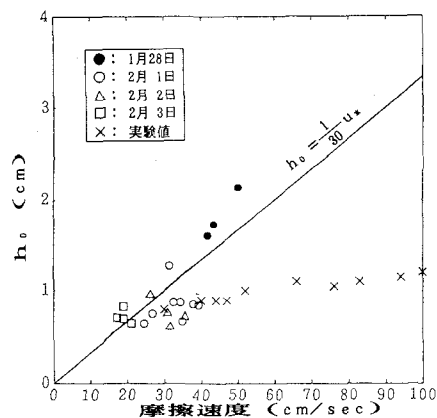
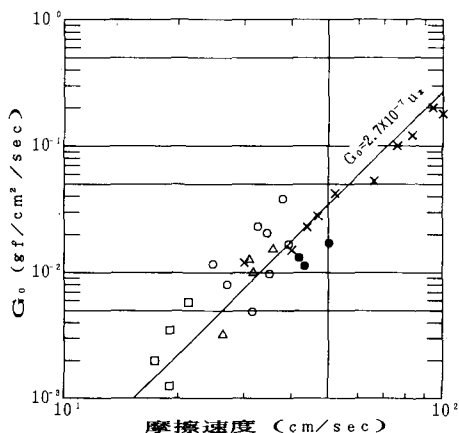


図-7 飛砂量の鉛直分布 (1月28日, 10:55~11:25)

図-8 摩擦速度 (u_*) と飛砂到達高 (h_0) の関係図-9 摩擦速度 (u_*) と飛砂発生量 (G_0) の関係

b) G_0 と摩擦速度の関係

図-9は、横軸に摩擦速度、縦軸に G_0 をとった時の関係を示したものである。同図には堀田等による実験結果を×印で示している。実測値と実験結果はほぼ直線上($G_0 = 2.7 \times 10^{-7} u_*^3$)に分布しており、 G_0 についても全飛砂量と同様に摩擦速度 (u_*) の3乗で評価することが可

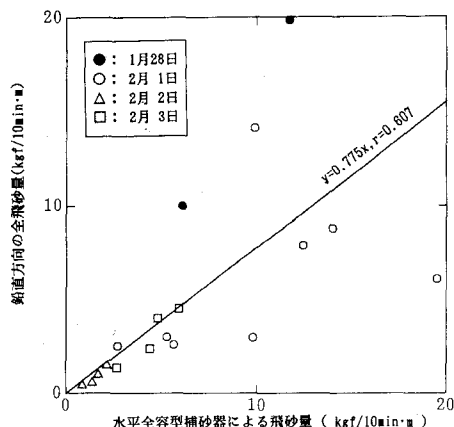


図-10 全飛砂量と鉛直全飛砂量の関係

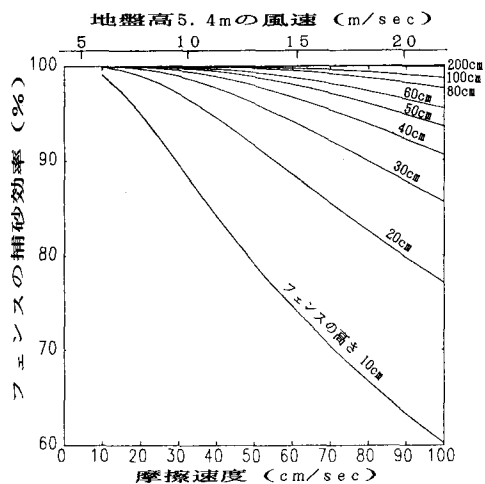


図-11 フェンスによる飛砂対策の効果

能と考えられる。

c) 鉛直飛砂量と全飛砂量の関係

これまでの検討で、鉛直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。これらの検討結果をもちいて飛砂の鉛直分布を計算した後に、高さ方向に累積して鉛直方向の全飛砂量を算出した。この結果と、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。飛砂量の多い場所で相関は良くないが、 $5 \text{ kg}/10 \text{ min} \cdot \text{m}$ 程度迄の分布は相関が良く、水平全容型の8割程度の飛砂量が観測されており、この観測のために新しく開発した鉛直分布型捕砂器の捕砂効率が良いことを示している。

5. 飛砂防止対策の検討

鉛直方向の飛砂量分布に関する検討の結果を用いて、海岸にフェンスを用いた飛砂防止対策を施工した場合の効果について検討する。図-11は、摩擦速度 (u_*) と飛砂の発生量 (G_0) および飛砂の飛行高さ (h_0) に関する

検討結果を用いてフェンスの高さを変化させた時の捕砂率を試算した結果である。

同図より、フェンス高が200 cm程度あると、摩擦速度が100 cm/s以上の場合でも99.9%以上の砂を捕捉することが可能であることが確認された。なお、本試算ではフェンスの砂透過は無く、トラップされた飛砂がフェンス前面に堆積しフェンス高が変化することは考慮していない。

6. 結 論

今回の調査結果を以下に要約する。

- ① 浜幅が広く飛砂量の多い海岸(寺泊)での観測から、飛砂量は川村公式の $K=3$ (乾砂面) を上限とした分布となる。これに対して、別途報告している浜幅の狭い海岸(新潟西)では、 $K=1$ 程度が上限となり、浜幅の違いによって飛砂量に大きな差が生じることが確認された。
- ② 今回用いた鉛直分布型捕砂器は、捕砂効率8割程度と捕砂効率が高く、鉛直方向の分布を十分に把握することができた。
- ③ 飛砂の鉛直方向分布は、河村の鉛直分布式を用い、堀田らの方法に習って当てはめた理論曲線によって十分に表現できる。
- ④ 飛砂防止ネットは、飛砂発生を抑えるが、表面が覆われてしまうとその効果は期待できない。
- ⑤ フェンスによる飛砂対策は、フェンス高2 m程度で十分な効果が期待できる。

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

- 塩沢俊彦・中谷内信一・赤澤 守・王城重則・黒木敬司 (1993): 新潟西海岸における飛砂の現地観測, 海岸論文集, 第40巻, pp. 281-285.
- 堀田新太郎・堀川 清 (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.