

海岸砂防構造物を越える浮遊飛砂 についての風洞実験

WIND-TUNNEL STUDY FOR SUSPENDED WIND-BLOWN SAND CROSSING OVER WIND-BREAKS

鵜飼正志¹・田村貴史²・久保田進³・堀田新太郎⁴

Masashi UGAI, Koichi HOSAKA, Susumu KUBOTA and Shintaro HOTTA

¹非会員 須山建設株式会社 (〒432-8562 静岡県浜松市布橋2-6-1)

²非会員 日本大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台1-8-14)

³正会員 工博 日本大学教授 理工学部土木工学科 (〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台1-8-14)

⁴正会員 工博 日本大学大学院教授 総合科学研究科(〒102-0073 東京都千代田区九段北4-2-1)

A considerable amount of wind-blown sand intrudes into the inland crossing over wind-breaks with several meters high although wind-blown sand on a flat sand surface concentrates near on the sand surface. For explaining this phenomenon, we offered a hypothesis that wind-blown sand flowing downwind is entrained into a local current which generates around wind-breaks, flied high up and crossed over wind-breaks. To verify this hypothesis, a wind tunnel experiment of sand crossing over a non-permeable fence is carried out. The experiment showed evidence that the local current exaggerated motion of blown sand near the fence and increased the amount of crossing over the fence. To examine the hypothesis further, additional experiments are carried out. The results showed the fact that the hypothesis could be acceptable.

Key Words : Wind blown sand, suspension, wind-breaks, crossing over fences, local current, vertical distribution, coastal conservation forests

1. はじめに

飛砂の制御は、海岸管理上の重要な問題である。海浜上平坦部に発生している飛砂は、砂表面付近に集中し、全飛砂量の90%は、20cm以下の層内で移動している。高さ50cmより高い層を浮遊している飛砂は全飛砂量の1%にも満たない。しかし、現地海岸では、かなりの量の飛砂が高さ数mのフェンスを超えて内陸に侵入している例も多い。このような高い構造物を越える浮遊飛砂については、ほとんど分かっていない。著者らは、文献調査と簡単な現地観測から、「平坦な海浜上では、50cmを越える地点に達していない飛砂が地表面上数mの高さの構造物を越えるのは、構造物前面に形成される局所流の乱れが飛砂粒子の運動を増長し、飛砂を局所流に取込み、構造物を超えて後流域に拡散するからである。」との仮説を得た。風洞実験で、平坦な砂面上の飛砂量鉛直分布と模型フェンス上の飛砂量鉛直分布の比較から、この仮説が妥当であることを示した¹⁾。更に仮説の妥当性を検証するために、新しい捕砂器を用いて再実験を実施した。本研究はその結果の報告である。

2. 実験装置と実験方法

(1) 実験施設

実験には幅1m、高さ1.1m、長さ20mの吹出型風洞を用いた。風洞底部に厚さ10cmの実験砂層を設けてある。実験に用いた砂は鹿島海岸の砂で、篩い分けし、粒度を揃えた砂で、中央粒径、0.15、0.48、0.68mmの3種類の砂である。以後、これらの砂をD15、D48、D68と表記する。図-1に粒径加積曲線を示す。

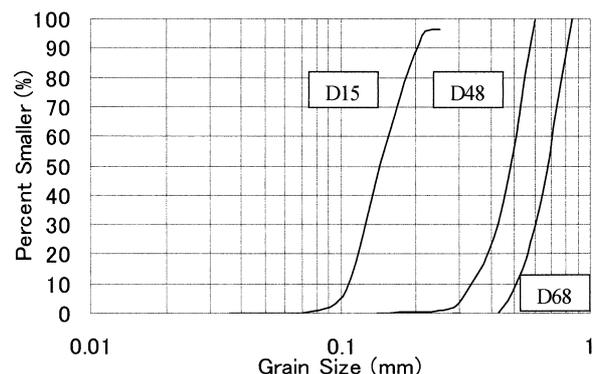
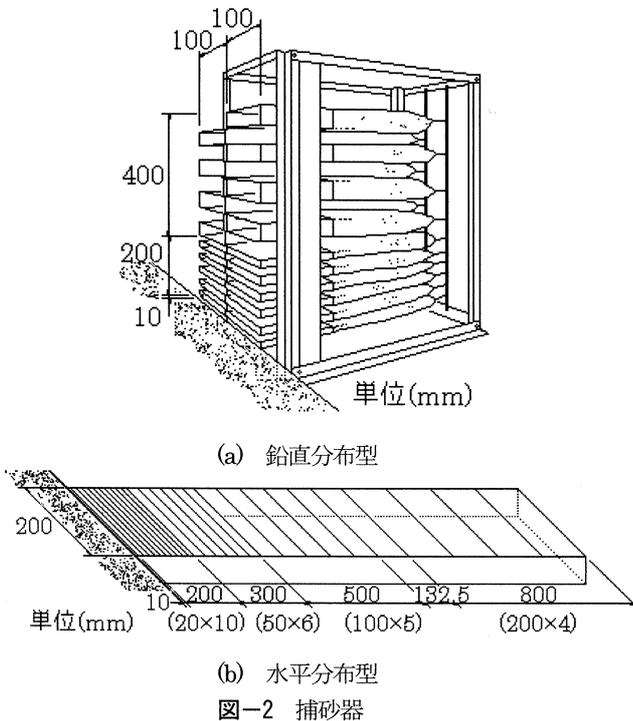


図-1 粒径加積曲線

風速測定には熱線風速計を使用した。用いた風速計は16台である。外力算定のための風速鉛直分布を砂表面から高さ2.5~62.5cmの間に15点測定してある。残りの1台は風洞内風速を制御するために用いている。風洞風上端から15m地点に飛砂量鉛直分布測定、飛砂量水平分布測定のための捕砂器を配置した。実験に用いた捕砂器を図-2に示す。



(2) 実験方法

砂表面を平に均した後、所定の風速（モーター回転数を制御）を吹送した。風の吹送時間は実験風速によって異なり2分30秒から10分の範囲である。飛砂量の測定は、1)平坦砂面上の飛砂量鉛直分布、2)高さ10cmの模型フェンス上の飛砂量鉛直分布、3)フェンスのない場合でのフェンス設置予定砂床末端から風下側の落下飛砂量の水平分布、4)フェンス設置後のフェンス風下側の落下飛砂量水平分布、の順に計測した。実験は D15, D48, D68の順番で実施した。

(3) 実験の相似則

この実験の相似則には問題がある。飛砂現象はほぼ現地の状況（風速、砂床構成）にあるが、模型として使用した不透過性フェンスの高さは10cm、現地規模の約1/10である。実験は相似性を満足していない。本実験では図-3 (a) のような跳躍状況にある飛砂層内に (b) のように高さ10cmの不透過性フェンスを立てた場合、図-4に示すような局所流がフェンス周辺に発生し、フェンス前面に発生する循環流あるいは循環流周辺に励起される乱れ成分の増大によってフェンスを越える飛砂が発生する、と考える。フェンスの高さが

10cmであるから、フェンスの無い場合高さ10cm以上の高さを移動する飛砂がある。フェンスが無い場合の10cm以上の高さの領域内を移動する飛砂量とフェンスがある場合のフェンス上方の空間領域を移動する飛砂量を比較し、フェンスがある場合の飛砂量が多ければ、その増分が局所流あるいは局所流周辺の乱れ成分の増大に拠って移動する量になる、と考えられる。

不透過性フェンスは前面に飛砂を堆積させる機能があるが、フェンス設置直後の短時間内では砂面変動も少なく、飛砂現象はほぼ定常でフェンス周辺の飛砂状況は時間経過で変わらない、と仮定する。

実験の結果は、現地での砂防構造物を越える飛砂量評価への第一歩の試みとしての定性的な傾向を知る程度と解して頂きたい。

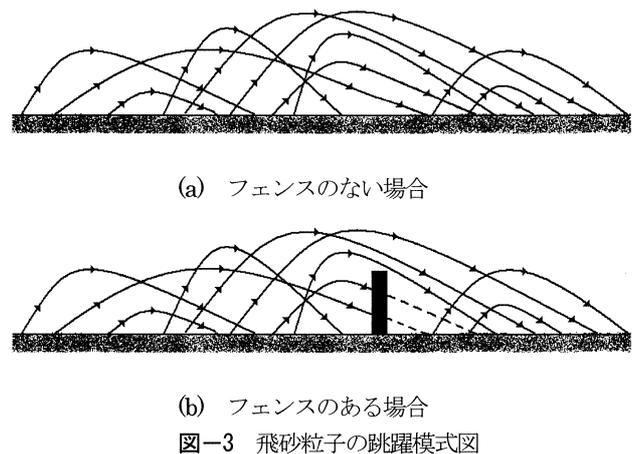


図-3 飛砂粒子の跳躍模式図

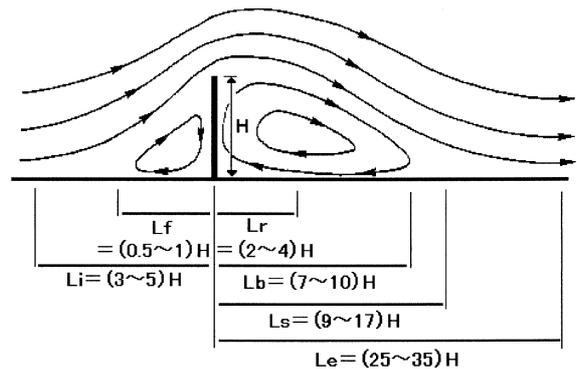


図-4 フェンス周辺の風況

3. 実験結果と検討

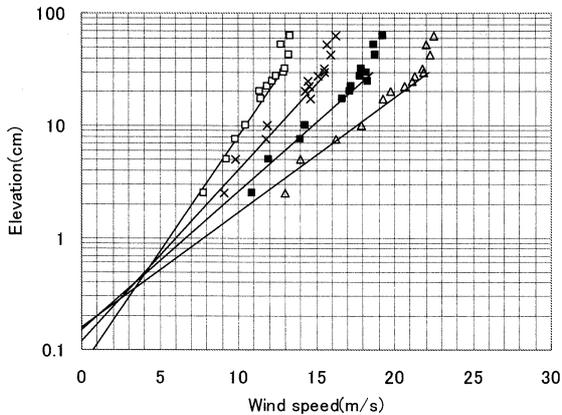
(1) 砂面上の風速鉛直分布

図-5に砂面上の風速鉛直分布を示す。図-5から、風速の鉛直分布は、D15, D48, D68においては高さ30~35cmまで、対数則式(1)が成立している、と判断してもよい。対数則が成立していれば、風速鉛直分布から摩擦速度 u_* が計算できる。

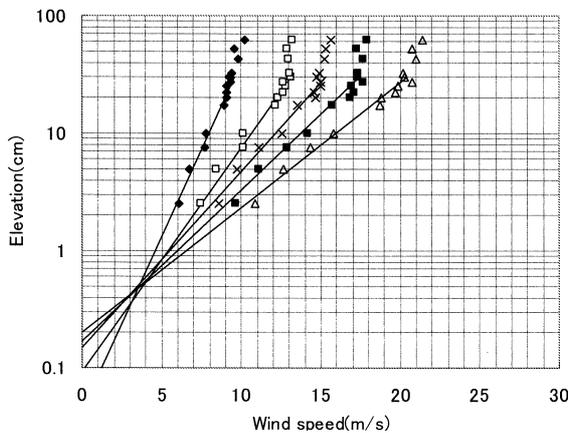
$$u_z = 5.75u_* \log_{10} \frac{z}{z'} + u' \quad (1)$$

ここに u_z はある高さ z における風速、 (u, z) はフォーカルポイントと呼ばれる点で、砂表面上の砂粒子が運動の状態にあるときの風速の鉛直分布を表す直線群がすべて集中する点である³⁾。D15とD48とD68で、対数則が成立する高さがほぼ同じであるのは、砂面粗度変化が境界層厚さの変化にまで影響を及ぼしていないから、と考えられる。

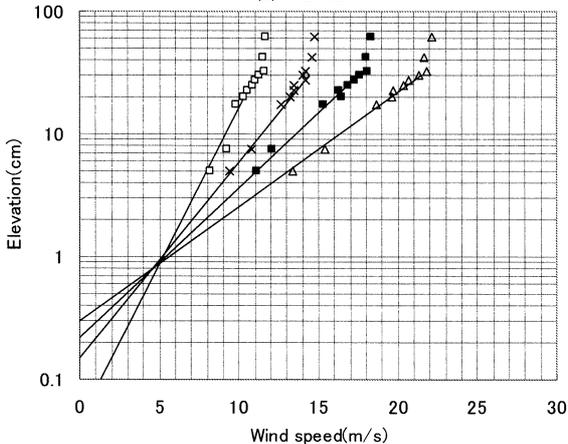
図-5から求まるフォーカルポイントの概略値は、D15では(250cm/s, 0.3cm)、D48では(350cm/s, 0.5cm)、D68(450cm/s, 0.8cm)である。



(a) D15



(b) D48



(c) D68

図-5 風速鉛直分布

(2) 全飛砂量

図-6に飛砂量と摩擦速度の関係を示す。図-6の曲線は、 $K=1.0$ での河村の全飛砂量式(2)である。河村公式⁴⁾は全飛砂量をよく説明している。従来の実験では、実験係数 K の値は、砂の粒径が大きくなると K の値も大きくなる傾向がある。本実験ではD25, D48, D68に対してほぼ同じ大きさである。

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

ここに q : 全飛砂量, g : 重力加速度, ρ_a : 空気の密度, u_{*c} : 移動開始限界摩擦速度, K : 実験係数である。

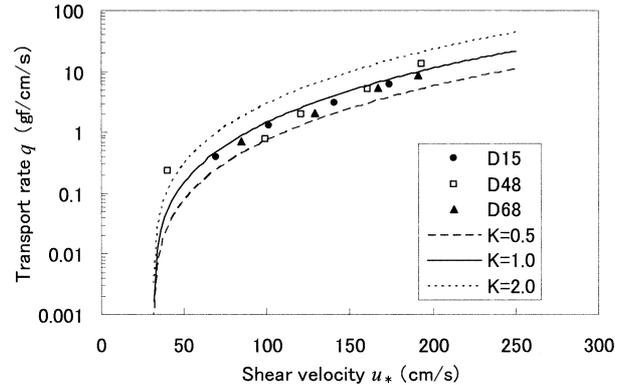


図-6 全飛砂量

(3) 捕砂効率

捕砂器の幅は10cm, 風洞の幅は1mである。捕砂率は、 $Wt / \{Wt + Ww\} / 10$ と定義する。ここに、 Wt は捕砂器に捕捉された飛砂全量, Ww は風洞末端集砂箱に捕捉された飛砂全量である。図-7に捕砂効率を示す。

図-7(a)より、鉛直分布型捕砂器の捕砂効率は、1)摩擦速度が大きくなると効率は良くなる、2)粒径が大きくなるほど良くなる傾向がある。しかし、捕砂効率は、粒径D48で約50%、粒径D68で約60%になっておりほぼ一定と見てもよい。

図-7(b)は、水平分布捕砂器の捕砂効率を示す。捕砂効率は粒径に関わらず、風速が強くなるほど低くなっている。

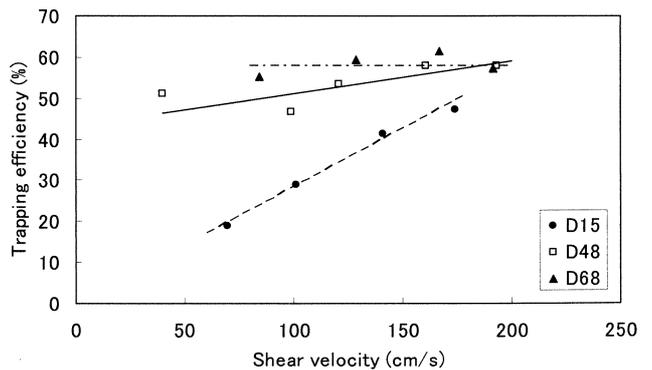


図-7(a) 鉛直分布型捕砂器の捕砂効率

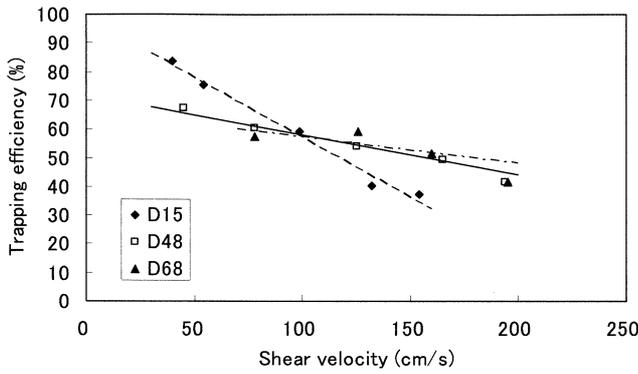


図-7(b) 水平分布型捕砂器の捕砂効率

(3) 鉛直分布の実測例

河村⁹⁾による飛砂量鉛直分布は式(3)で与えられる。

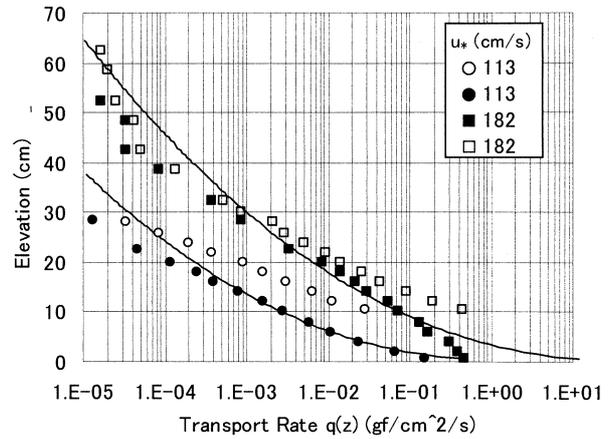
$$q(z) = G_0 \left[\lambda \left\{ 2\sqrt{2} K_0(\xi) - 2\sqrt{2}\beta \sqrt{\frac{h_0}{g}} \xi K_1(\xi) \right\} + \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{a\beta \sqrt{0.75 h_0}}{g} \xi^2 \{ K_0(\xi) + K_2(\xi) \} \right] \dots\dots\dots (3)$$

$$\xi = \sqrt{2z/h_0} \quad \lambda = \bar{u}_1 / \sqrt{2gh_0} \quad \beta = 3\pi\mu d/m$$

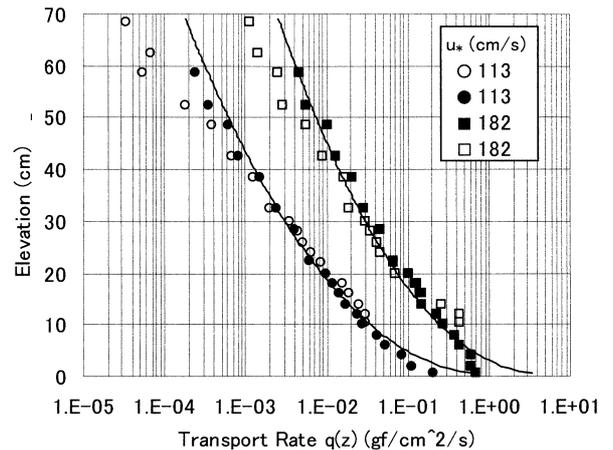
$$\int_0^\infty hf(h)dh = h_0$$

ここに $q(z)$ ：砂表面から高さ z における飛砂移動量， \bar{u}_1 ：砂粒子が砂面より跳び出すときの水平速度の平均値， μ ：粘性係数， d ：砂粒子の粒径， m ：砂粒子の質量， a ：風速の鉛直分布を $u(z) = a\sqrt{z}$ と仮定したときの実験係数， G_0 ：単位面積より単位時間内に空気中に跳び出す砂粒子の総質量， K_0 ， K_1 ， K_2 ：0次，1次，2次の変形された第1種ベッセル関数， h ：飛砂の飛高， h_0 ：砂粒子の到達する最高の高さの平均値である。

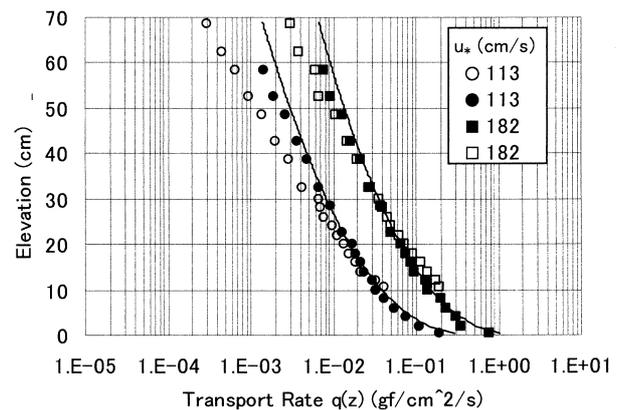
平坦砂面上の飛砂量鉛直分布と高さ10cmの模型フェンス上の飛砂量鉛直分布の例を図-8に示す。図中の黒の塗り潰しはフェンスを設置していないとき、白抜きはフェンスを設置したときの飛砂量を表している。図中の曲線は飛砂量鉛直分布式(3)である。河村の式は平坦な砂面上の飛砂量の鉛直分布をよく説明している。D15とD48において、構造物の上方のある空間での飛砂量は、構造物が無い場合より明らかに多い。それ以上の高さの領域では平坦な砂面上での飛砂量分布と不透過フェンスのある場合の鉛直分布の差異は小さく、実験誤差内にある。また、D68においては、どの地点でもフェンス設置時とフェンスがない時の差は、あまり見られない。



(a) D15



(b) D48



(c) D68

図-8 飛砂量鉛直分布

(4) 鉛直分布模式図

図-9は、議論を明確にするために図-8を模式化した図である。Aは平坦な砂面上の砂表面から飛砂量が測定された高さまでの飛砂量の積分値， A_{10} は平坦砂面上で高さ10cmから測定された地点までの積分値， A_{n0} は不透過フェンスの分布で、砂表面10cmの高さ（フェンス上端）から飛砂量が観測された高さまでの積分値（フェンスを超えた全飛砂量）である。

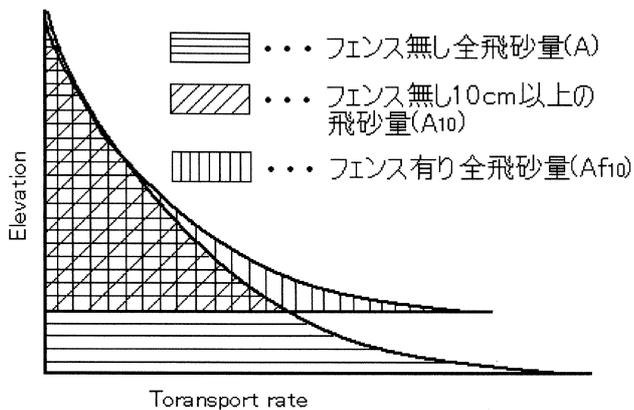


図-9 鉛直分布の模式図

(5) 平坦砂面上における10cm以上の高さを移動する飛砂量

図-10に (A_{10}/A) と摩擦速度との関係を示す。A, A_{10} , A_{f10} は図-7の捕砂効率で補正してある。図-10から高さ10cm以上の領域を通過する飛砂量は摩擦速度に比例して多くなり、D15で0~5%、D48で9%~16%、D68で19%~21%である。これは、飛砂量が底面近傍10cm以内の層内に集中しているという、既存の研究と一致する。また、この事実は、飛砂は跳躍(saltation)の運動形式で移動し、粒径の大きな砂粒子の跳躍高さが高いことを示している。

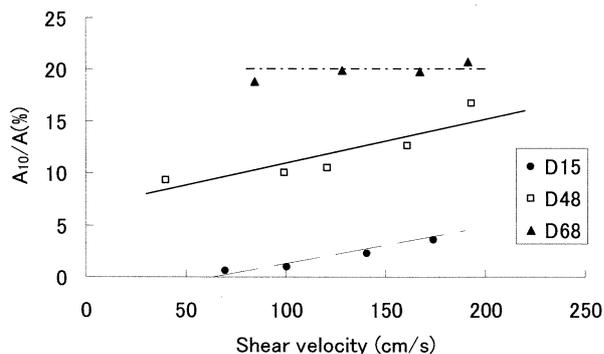


図-10 平坦砂面上における10cm以上の高さを移動する飛砂量

(6) フェンス上方を移動する飛砂量

いずれの場合にも $A_{f10} > A_{10}$ で、フェンスの存在によりフェンス上を通過する飛砂量が増大していた。図-11に、増加した量 $(A_{f10} - A_{10})$ と摩擦速度の関係を示す。図中の曲線の勾配は3である。図-11から、増加量は摩擦速度の3乗に比例して増加していることがわかる。構造物周辺に発生する局所流は飛砂量を増大させ、構造物を越えて風下側に飛砂を移動させる、との仮説は妥当である、と判断できる。

図-12は、増加した量の全飛砂量に対する割合 $(A_{f10} - A_{10})/A$ と摩擦速度の関係を示す。フェンスを設置したことにより増加する10cm以上の飛砂量の割合は、D15で10~40%と風速によって大きく変化し、D48では7%程

度で風速に関わらずほぼ一定になっており、D68でも風速に関わらずほぼ一定で3%程度である。粒径が大きな砂ほど乱れの影響を受けにくい事実を示している。

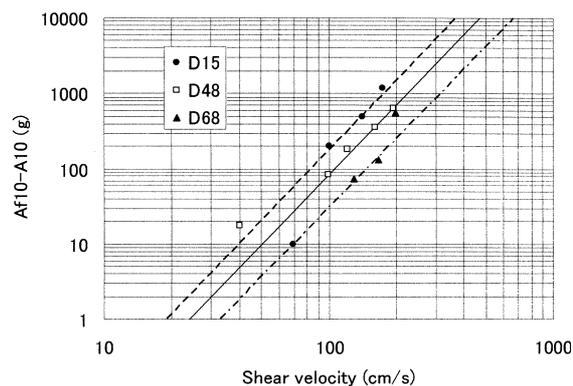


図-11 フェンスを設置したことにより増加する10cm以上の飛砂量

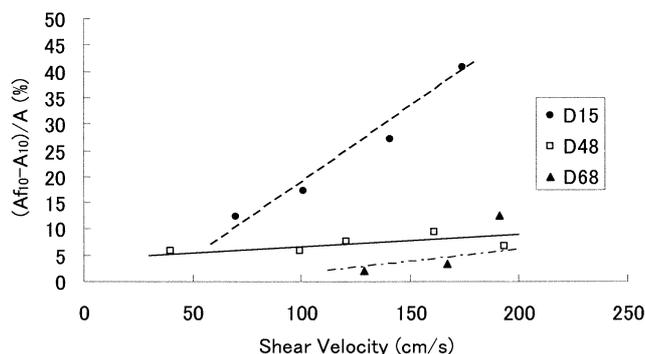


図-12 フェンスを設置したことにより増加する10cm以上の飛砂量の割合

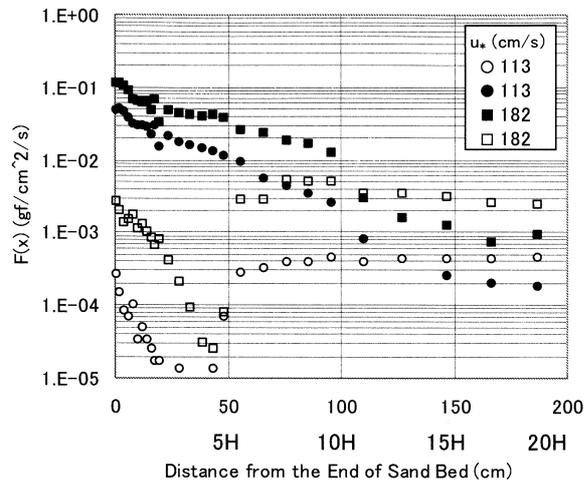
(7) フェンス風下側における落下飛砂量の水平分布

図-13に、砂床末端から砂床の無い領域への落下飛砂量の水平分布を黒の塗り潰し印で示してある。このデータは、飛砂粒子の跳躍水平距離分布を示すことになる。白抜き印は、砂床末端でフェンスを設置した場合のフェンスを越えて風下側に落下した飛砂量の分布を示す。横軸に水平距離とフェンス高さHを単位とした距離の両方を示してある。

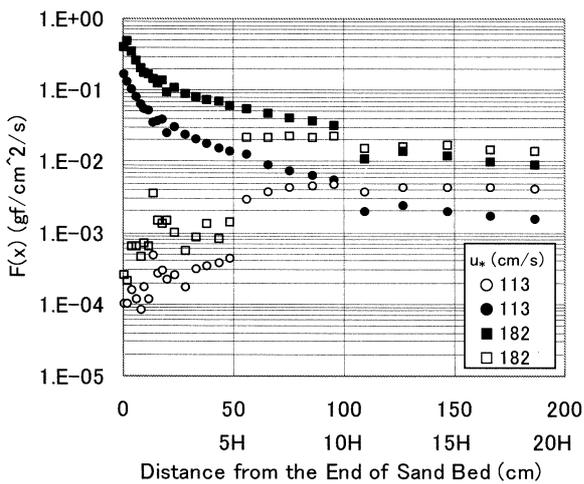
図-13(a), (b), (c)は、砂床末端から約100cm (10H)の地点での砂粒子の落下量は末端直後の値より2オーダー小さくなっている、ことを示している。この事実は、飛砂粒子の水平移動距離が小さいことを意味している。これは跳躍している砂粒子の跳躍高さが小さく、80%以上の砂粒子が高さ10cm以下の層で移動しているという事実に相当する。

図-13の黒の塗り潰し印と白抜き印との関係に注目する。フェンスが存在する場合、

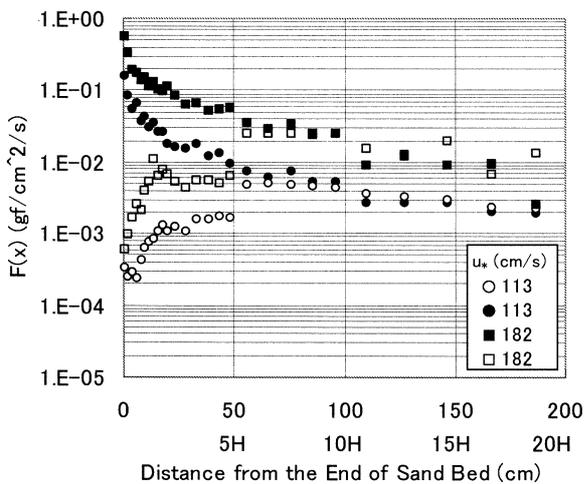
- 1) フェンスのある場合、風下側5Hまで飛砂落下量は極めて少量である。
- 2) 約12H程度より風下側ではフェンスのある場合に落下量は多くなる。



(a) D15



(b) D48



(c) D68

図-13 飛砂量水平分布

しかし、5Hから12H程度までの範囲ではフェンスの在る場合の落下量はフェンスのない場合より小さい。粒径が大きくなるとその差は小さくなり、D68ではほぼ等量に近い。粒径が大きくなるとフェンスの効果が少なくなることを意味する。

図-4にあるように、フェンス風下側に循環流が形成され、循環流末端は9~10H程度の地点にある。循環セルの downstream 底面近傍の風上方向の風速が最も強くなる位置は5H付近、12~13H付近によどみ点がある。

図-13の結果は図-4の風況から次のように説明できる。フェンス前面に形成される局所流による乱れによって取り込まれた砂粒子はフェンスを越えて後方に拡散する。後方に拡散した砂粒子は風下側5H付近から落下し始める。よどみ点から風下側に落下する量はフェンスの在る場合は無い場合より多くなり、その落下量は粒径の小さい砂ほど多い。つまり、粒径の小さい砂ほど、局所流に取り込まれる量が多くなり、より風下側に運ばれることを意味する。

4. 結論

実験結果の要点をまとめれば

- 1) フェンスの存在はフェンス上方を通過する飛砂量を増大させた。
- 2) 粒径の小さい砂ほどフェンスを越える飛砂量が多い。
- 3) フェンス風下側に形成される循環流末端から落下飛砂量が増大した。

以上のことより、「平坦な海浜上では、50cmを越える地点に達していない飛砂が地表面上数mの高さの構造物を越えるのは、砂粒子が構造物前面に形成される局所流の乱れによって局所流に取り込まれ、乱れの強い後流域に拡散する。」との仮説は妥当と考えられる。

今後の課題

フェンス風下側に形成される後流域の高さがフェンス高さHの数倍、6~8Hであることを考慮すれば、限られた規模の風洞での実験は、相似則の問題がつかまとう。計画的な現地観測の実施が望まれる。

謝辞：本研究に久保田、堀田は、平成17年度日本大学学術助成金、総合研究「水域開発と環境保全に資する工法の総合研究」、堀田は、平成14年度科学研究費補助金 基盤研究(C)2、課題番号14550515の助成金の一部を利用した。記して、著者らは関係諸機関、各位に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 鶴飼正志・保坂幸一・久保田進・堀田新太郎：海岸砂防構造物を越える浮遊飛砂について、海洋開発論文集，VOL.21，土木学会，pp.415~420，2005
- 2) 堀田新太郎・堀川誠司：堆砂垣の機能についての実験的研究，海岸工学論文集，第40巻，pp.281~258,1990.
- 3) Bagnold, R.M.(1954) : The Physics of Blown Sand and Desert Dunes, Methuen & Co.Ltd., London, 265p.
- 4) 河村龍馬：飛砂の研究，東京大学理工学研究所報告，第5巻，pp.95~112, 1951.