

海岸砂防構造物を越える浮遊飛砂について

SUSPENDED WIND-BLOWN SAND CROSSING OVER WIND-BREAKS

鵜飼正志¹・保坂幸一¹・久保田進²・堀田新太郎³

Masashi UGAI, Koichi HOSAKA, Susumu KUBOTA and Shintaro HOTTA

¹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)

²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)

³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)

Wind-blown sand that is transported over a flat sand surface is normally concentrated to a layer near the surface. However, considerable amount of wind-blown sand may cross over wind-breaks that are several meters high and be transported inland. At present, there is no comprehensive theory to describe this phenomenon. Based on simple field measurements of the vertical distribution of wind-blown sand transport and a tracer experiment displaying the flow pattern around non-permeable fences, it was observed that wind-blown sand transported downwind is entrained into the local current generated around the wind breaks. The sand is lifted high up in the air and crosses over the wind breaks. To verify these observations, a wind tunnel experiment of sand crossing over a non-permeable fence was carried out. The experiment provided evidence that the local current stirred the motion of blown sand near the fence and increased the amount of sand crossing over the fence.

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

1. はじめに

海岸における飛砂の制御は、海岸管理上の重要な問題である。現在の日本の砂浜海岸では、防風・塩害対策・飛砂防止のための堆砂垣・フェンス・海岸保安林・前砂丘（これらの構造物を海岸砂防構造物と呼ぶ）などが構築されている。一方、海岸侵食が進み、砂浜が狭くなっている海岸では、高波、高潮、津波対策としての護岸、海岸堤防などが構築されている。海浜が広く各種の海岸砂防構造物が構築されている海岸にあって、飛砂が高さ数mの防風・防砂フェンスを越えて陸側に侵入し道路上に堆積して、車両走行を阻害している例、あるいは飛砂が高さ数m、幅30～50m程度の海岸保安林を超えて侵入している例もある¹⁾。海岸侵食対策構造物が構築されている海岸でも構造物前面に狭い砂浜が有る場合には高さ2～3mの直立護岸天端上に飛砂が堆積する例は珍しくない。

平坦な砂面上に発生している飛砂は、砂表面近くを雲が流れるような状況で移動している。飛砂の鉛直濃度分布は砂表面で最大で、全飛砂量の80%は、高さ10cm以下、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²⁾³⁾。平坦な砂面上における飛砂の鉛直分布

から考えて、飛砂が高さ数mのフェンス越える、あるいは2mよりも高い直立護岸天端に達する飛砂のメカニズムを説明することは難しい。またこれらの現象を取り扱った研究は筆者らの知る限りでは無い。これらの現象に対して、筆者らは文献調査と簡単な現地調査、風洞実験から、構造物周辺に生じる局所流によって説明が出来るかと考えるに至った。すなわち、局所流の強い乱れによって、砂粒子が局所流に取り込まれ、移動し、平坦な砂面上での飛砂現象では達するに困難と考えられる高さまで達する、と考えた。

本研究の目的は、上述の仮説への経緯、および局所流の存在により空中を移動する飛砂量が增大する実験例を示し、仮説を実証することにある。大気の流れの中にある構造物周辺の局所流に関する研究は多い。しかし、砂面上にある構造物周辺の局所的な砂面変形、飛砂現象についての研究は筆者らが知る限りでは無い。本研究は、飛砂が高い構造物を越える飛砂現象に限らず、砂面上にある構造物の局所流によって生じる構造物周辺の砂面変形(局所的な洗掘と堆積)といった飛砂現象研究への第一歩である。

2. 従来の研究成果とその意義

(1) 吹流しトラップによる保安林周辺の浮遊飛砂観測

湘南海岸は、東京に最も近い海浜リゾート地域であり、かつ近年の首都圏の膨張により、宅地が海浜近くまで広がっている海岸である。そのため海岸砂防事業が精力的になされている。防風フェンスの高さは普通5m以下であるが、砂防林の高さを5m以上に高める試みとして、“超高防風ネット”と呼ばれている高さ10mの高い鋼製フェンスが試験的に設置されている¹⁾。超高防風ネット前面にサイクリング道路、ボードウォークがあり、その海側にサイクリング道路、ボードウォークを飛砂から防護するために数列の堆砂垣が設置されている。この超高防風ネットを利用しての浮遊飛砂の鉛直分布の観測例、及び周辺の保安林内での浮遊飛砂の観測例がある。これらの観測の中で本研究に関連する事項は次のような結果である。

- 高さ5mのフェンス、その陸側にある保安林内35－40m（立木の樹高は約4m）の地点の上空に浮遊飛砂がある。高さ6mの位置の浮遊飛砂量は高さ4mの位置における量より多い（文献1, p.68, A, B, D地点）。
- 高さ10mの超高防風ネットを利用して測定された浮遊飛砂鉛直分布を図-1、□、△、×印にて示す。高さ6mを越えると量が少なくなるが、10mの高さにも浮遊飛砂が存在している。浮遊飛砂観測時の風が現地で観測されていないので、飛砂量との風速との量的評価は難しい。
- 現地での目視によると、フェンスのネットへの砂泥付着は高さ6mまで顕著であった。高さ6－8mの間は付着は少なく、高さ8－10mの部分ではネットの塗装の色が識別できた。

(2) 浮遊飛砂の粒径

前節で述べた湘南なぎさ事務所の観測では、浮遊している飛砂粒子の粒径についての情報は得られていない。それ故、著者らは浮遊飛砂粒子の粒度特性を知るため、観測装置を借用し、浮遊飛砂の観測を実施した。風の観測費用が無かったため風は測定されていない。図-1の中、●、▲印にて、観測した浮遊飛砂鉛直分布を示す。

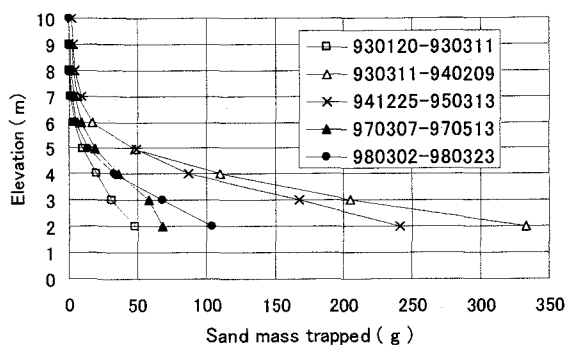


図-1 湘南海岸における浮遊飛砂観測例

飛砂の鉛直分布については文献¹⁾から得られた観測値と著者らによるデータは同じ特徴を持つ。図-2に観測期間中のアメダスの辻堂における日最大風速、日平均風速、日最多風向を示す。風向は北をゼロとして時計回りに360度として示す。飛砂が発生する条件は、風向は135－225度（南南東－南南西）、風速は6m/s以上とすると、飛砂発生可能日は1997年の観測期間中では29日、1998年の観測期間中では4日となる。これらの飛砂発生可能日の積分値として浮遊飛砂量が観測されていることになる。

捕捉した浮遊飛砂の粒度分析結果を図-3に示す。フェンス前面の砂面上（高さ0mで示してある）での中央粒径 d_{50} は約0.3mm。浮遊飛砂の中央粒径は、高さ2－6mで約0.2mm、均等係数 U_c 、篩い分け係数 Sc はそれぞれ1.4、2.0程度で、高さ方向にほぼ一定であった。高さ7m、8mでの捕捉量は少量で篩い分けは出来なかった。しかし、目での観察、指での触感では高さ2－6mにおける粒度と同じであった。

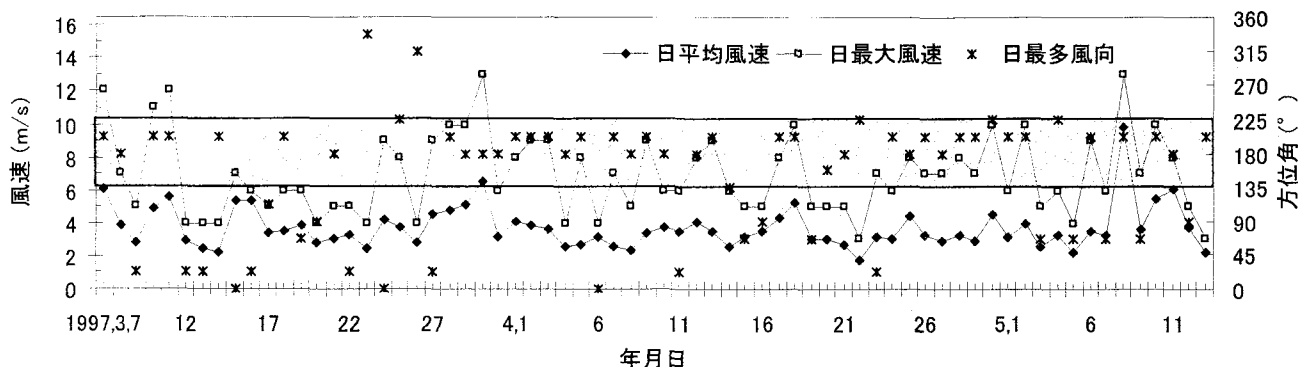
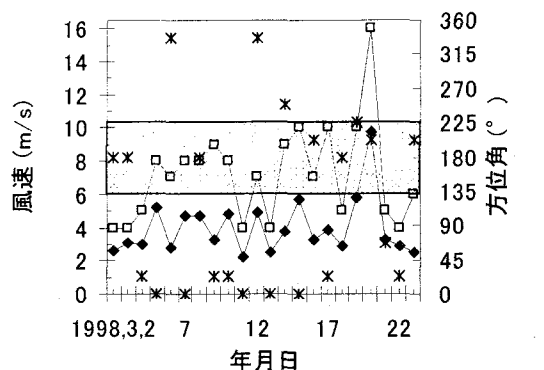
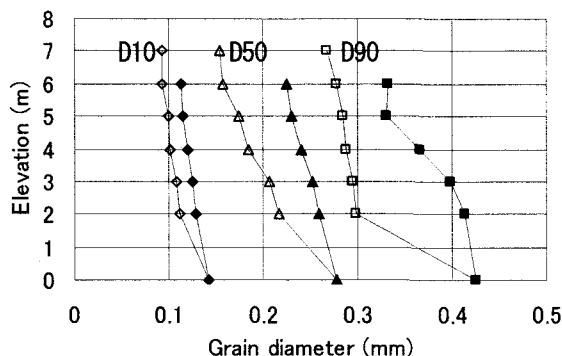


図-2 浮遊飛砂観測期間の風向風速例

◆ 970307-970513 D10 ◇ 980302-980323 D10
 ▲ 970307-970513 D50 △ 980302-980323 D50
 ■ 970307-970513 D90 □ 980302-980323 D90



◆ 970307-970513 U_c ◇ 980302-980323 U_c
 ▲ 970307-970513 S_c △ 980302-980323 S_c

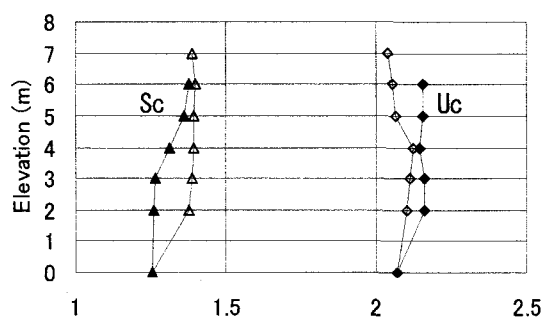


図-3 浮遊飛砂の粒度特性

(3) トレーサー実験による不透過フェンス周辺の流れの状況 (風況)

堀田ら⁴⁾は、人工砂丘の断面形状決定の技術的根拠を求めるために堤体周辺の流れの状況 (風況) についての風洞実験を実施している。図-4は不透過フェンス周辺のトレーサー実験によるフローパターンと等風速線図を示す。図-4はレイノルズ数が十分に大きい乱流状態では、構造物周辺の局所流の大きさは風速によらず同じであることを示している。フェンスの高さをHとしてフェンスから風下側約18Hまでの範囲においてフェンスの上方約8Hの範囲に加速域が生じている。フェンスに循環渦、風下側に大きな後流域が形成されている。後流域の高さは、フェンスの高さHの6~7倍程度に達している。

(4) 海岸砂防構造物を越える飛砂発生のメカニズム

以上の結果から、著者らは、平坦な海浜上では、地表面近傍に集中している飛砂が地表面上数m~10m程度の高さまで達しているのは、砂粒子がフェンス前面に形成される循環渦に取り込まれ、乱れの強い後流域に拡散するから、と判断した。湘南海岸における浮遊飛砂が観測された鋼製フェンス前面には高さ約1mの堆砂垣群があった。堆砂垣によって形成される後流域の高さを、7~8mとすると、飛砂が顕著に存在する高さネットへの砂泥付着高さ8mとほぼ一致する。

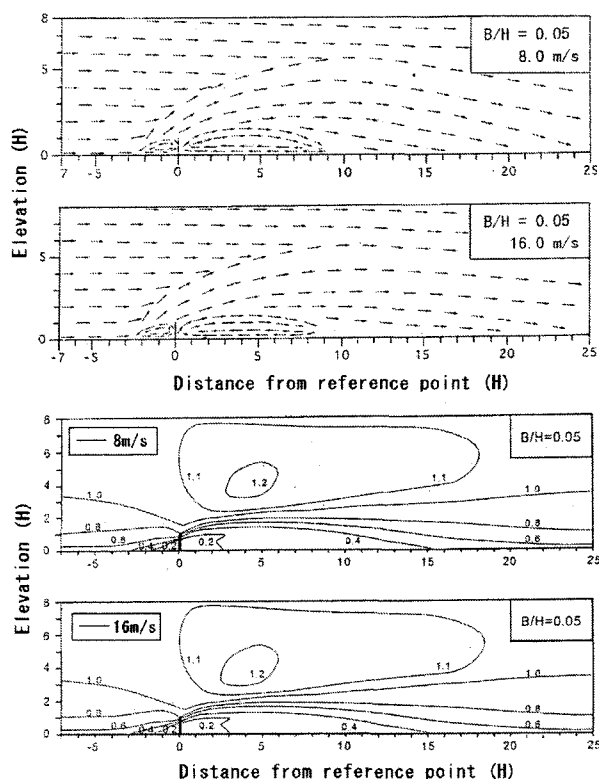


図-4 不透過フェンス周辺の風況例⁴⁾

3. 不透過フェンスを越える飛砂の風洞実験

上記の仮説を検証するには、現地実験が最善であるが、費用が必要で直ちには実行出来ない。それ故、可能な風洞実験によって検証を開始する。風洞実験では、平坦な砂面上での飛砂量の鉛直分布、及び高さ10cmの不透過フェンス上方の飛砂量鉛直分布を測定した。両者を比較することによって、構造物の上方のある空間での飛砂量は、構造物が無い場合に比べて増大する事実を確認した。しかし、この実験には問題がある。飛砂現象はほぼ現地の状況にあるが、模型として使用した不透過フェンスの高さは10cm、現地規模の約1/10である。実験は現地条件を再現していないのは明確である。しかも、不透過フェンスは前面に飛砂を堆積させる機能があり、フェンス周辺の飛砂状況は時間経過とともに変化する。本実験の結果は、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。

(1) 実験施設と実験方法

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、粒度を揃えた中央粒径0.15、0.48mmの2種類の砂である。図-5に粒径加積曲線を示す。以後、簡便のためこれ等の砂をD15、D48と呼ぶことにする。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。風洞末端に飛砂量鉛直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-6に示す。

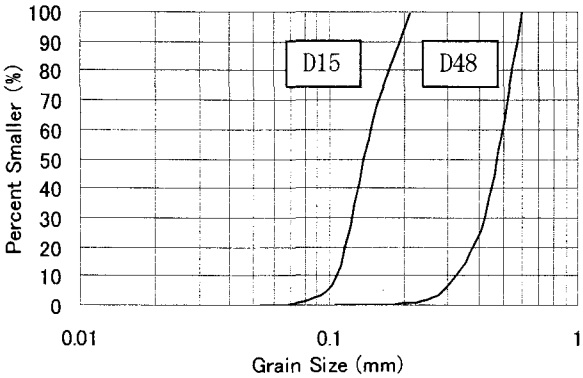


図-5 実験砂の粒径加積曲線

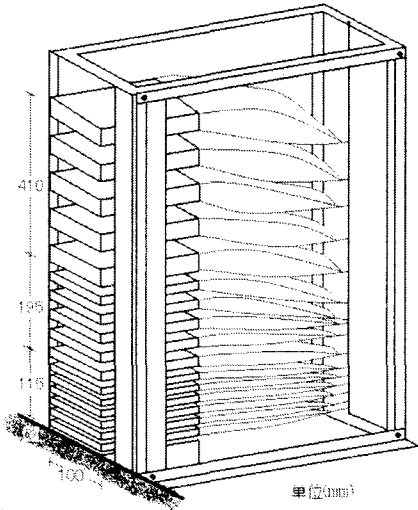


図-6 鉛直分布型捕砂器

実験は砂表面を平らに均した後、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。最初に平坦な砂面で全飛砂量と飛砂量鉛直分布を測定した。その後、風洞末端に高さ10cmの不透過フェンス模型を設置し、高さ10cm以上の飛砂量鉛直分布（不透過フェンスを越える全飛砂量）を測定した。実験は D15、D48の順番で実施した。

(2) 砂面上の風速鉛直分布

図-7に砂面上の風速鉛直分布を示す。図-7から、風速の鉛直分布は、D15においては高さ30～35cmまで、D48においては高さ約60cm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が計算できる。

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

ここに、 u_z ：砂面上のある高さ z における風速、 u_* ：摩擦速度、 (u', z') ：フォーカルポイントである。D15

とD48とで、対数則が成立する高さが異なるのは、砂面粗度の相違によるものと考えられる。図-7から求まるフォーカルポイントの概略値は、D15では (350cm/s, 0.5cm)、D48では (550cm/s, 0.8cm) である。

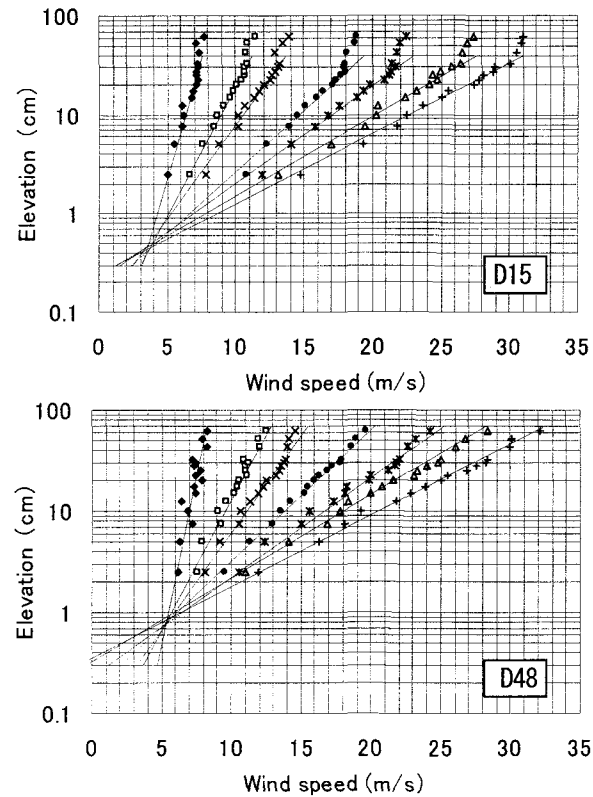


図-7 風速鉛直分布

(3) 飛砂量

図-8に飛砂量と摩擦速度の関係を示す。図-8の曲線は、 $K=1.0$ での河村³⁾の全飛砂量式 (2)である。河村公式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D15、D48に対してほぼ同じ大きさである。

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

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

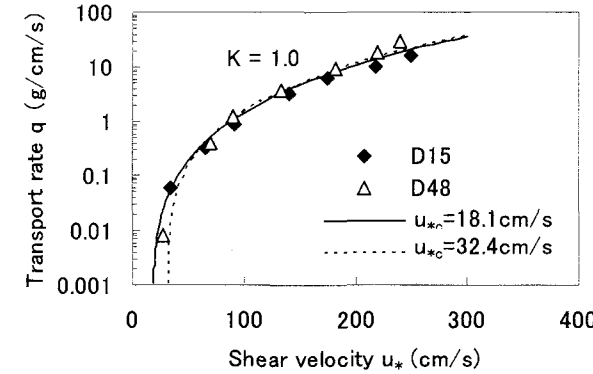


図-8 全飛砂量

(4) 飛砂量の鉛直分布

図-9は飛砂量の鉛直分布を示す。不透過フェンス有りの鉛直分布も同時に示してある。不透過フェンス上方約2Hの間（砂面上1-3H）は、明らかに不透過フェンスの飛砂量が多い。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。図中の曲線は河村⁹⁾による飛砂量鉛直分布式(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。飛砂量鉛直分布では、粒径の大きなD48が高い地点まで分布し、かつその量が多い。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。

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

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

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

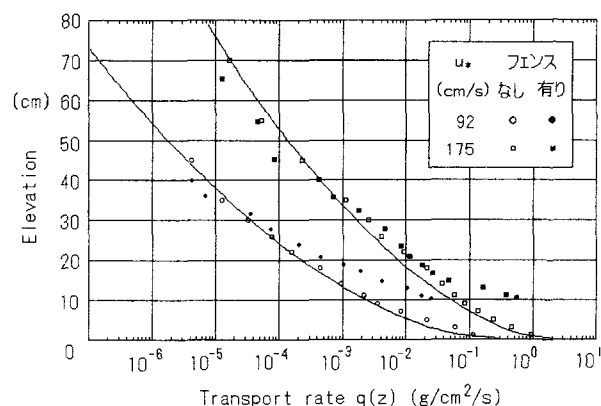
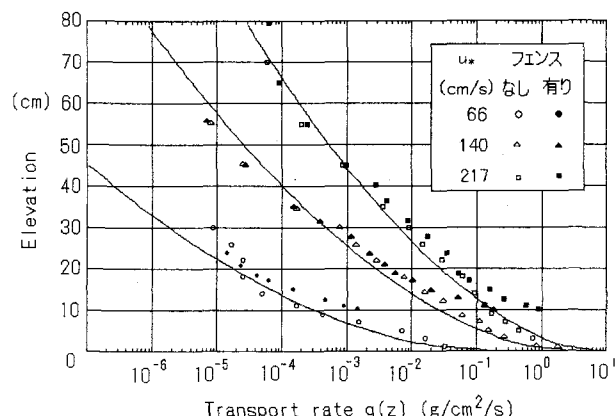
ここに $q(z)$ ：砂表面から高さ z における飛砂移動量、 $\bar{u}_1$ ：砂粒子が砂面より跳び出すときの水平速度の平均値、 μ ：粘性係数、 d ：砂粒子の粒径、 m ：砂粒子の質量、 a ：風速の鉛直分布を $u(z) = a\sqrt{z}$ と仮定したときの実験係数、 G_0 ：単位面積より単位時間内に空气中に跳び出す砂粒子の総質量、 K_0, K_1, K_2 ：0次、1次、2次の変形された第1種ベッセル関数、 h ：飛砂の飛高、 h_0 ：砂粒子の到達する最高の高さの平均値である。

(5) 飛砂量鉛直分布の検討

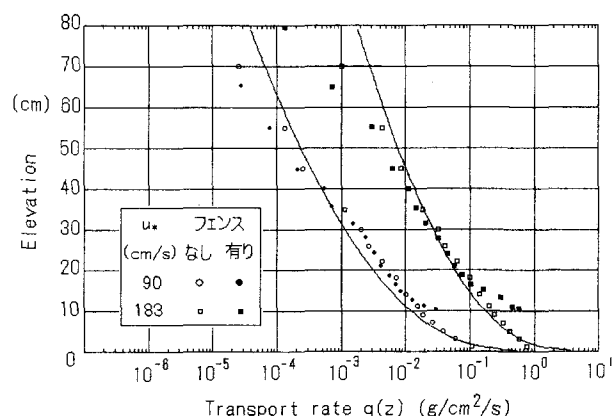
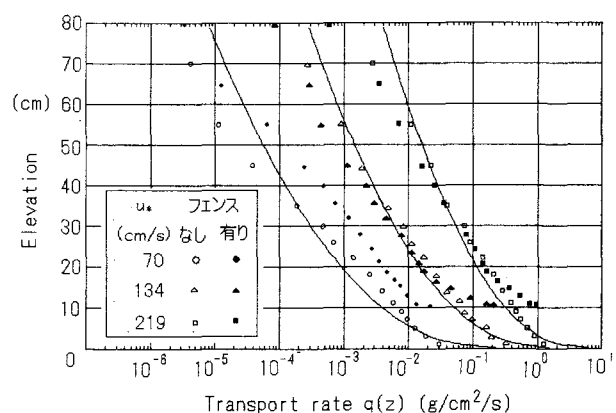
図-10は上述の飛砂量鉛直分布の模式図である。平坦な砂面上の砂表面から飛砂量が測定された高さまでの飛砂量の積分値を A 、高さ10cmから測定された地点までの積分値を A_{10} 、不透過フェンスの分布で、砂表面10cmの高さ（フェンス上端）から飛砂量が観測された高さまでの積分値を A_{f10} （フェンスを超えた全飛砂量）とする。

図-11は A_{10}/A 、 A_{f10}/A のプロットである。 A_{10}/A の値は10cmより高い空間を飛んでいる量の割合である。従来の研究^{2),3),6)}では、これらの値は10%を超えることはない。本実験のD48の場合 A_{10}/A の値は10%~25%にある。従来の研究で対象とした砂の中央粒径は0.3mmより小さい。(4)節で述べたように、「大きな砂粒子の跳躍高さが高い」と考えると、実験値はあり得る値である。 A_{f10}/A の値はフェンスを超える量とフェンスのない場合の全飛砂量との比である。 $A_{f10}/A > A_{10}/A$ であり、明らかにフェンスがない場合の高さ10cm以上の空間を通過する飛砂量より多いことを示す。実験エラーと見られる点もあるが、 A_{10}/A 、 A_{f10}/A の値は摩擦速

度に比例して増加し、かつ A_{f10}/A の値は A_{10}/A の値から一定に増加しているように見える。



a) $d_{50}=0.15\text{mm}$



b) $d_{50}=0.48\text{mm}$

図-9 飛砂量鉛直分布

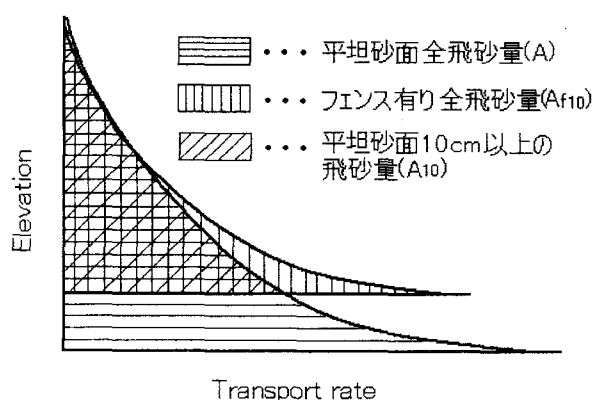


図-10 飛砂鉛直分布の模式図

この増分が不透過フェンス前面を流下してきた砂粒子が局所流に取り込まれ、後方の後流域に拡散した量であり、平坦な砂面上での砂粒子の跳躍運動では達することができない高さに飛砂が浮遊するメカニズムによる、と考えられる。事実、風速がある範囲にある場合（10～16m/s程度）、フェンス上端近傍にて、図-4のトレーサー実験で見られるような飛砂の流れが観察された。しかし、風速の小さい場合と大きい場合には視覚で現象を確認することは困難であった。

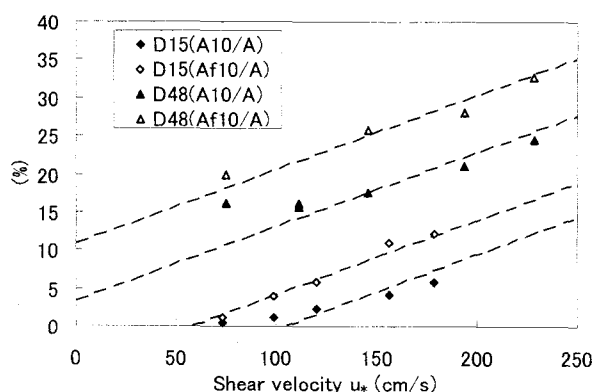


図-11 砂面上10cmより高い断面と全断面を通過する全飛砂量との比

図-12は A_{f10}/A_{10} のプロットである。フェンスを超える飛砂量とフェンスが無い場合の砂表面上10cm以上の上空を通過する飛砂量との比である。実験エラーと見られる点を除外して全体をみると、図-12は、フェンスを超える飛砂量は、フェンスが無い場合の砂表面上10cm以上の上空を通過する飛砂量より多く、その割合は摩擦速度に関係なく一定、D15で約1.9倍、D48では約4.2倍である、という結果が読み取れる（図-11で、 A_{f10}/A と A_{10}/A の直線は平行であることを意味する）。

以上結果をまとめれば、フェンスを超える飛砂量は、フェンスが無い場合の砂表面上10cm以上の上空を通過する飛砂量より多い。その増加分は摩擦速度の増加に比例して増大する。しかし、増加の割合は一定である。フェンス周辺に形成される局所流の規模は変化しないが、乱れが強くなり、乱れの強さに比例して、局所流

に取り込まれる飛砂粒子が多くなり、風下側に飛散する量が増大すること、を意味する。

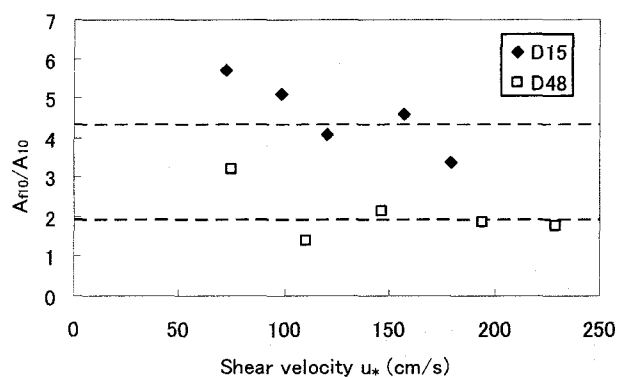


図-12 砂面上10cmより高い断面を通過する飛砂量

4. 結論と今後の課題

平坦な砂面上では砂面近傍に集中している飛砂が、高い（少なくとも1mより高い）構造物を越えて風下側に流下するのは、構造物周辺に発生する局所流による、と考えることで現象を説明できた。現象が局所流に関連するならば、現象の解析的な取り扱いが困難である。現象の解明は実験や現地観測によることになる。数値モデルを構築するにしても、基礎となる情報が不足している。今後、系統的な現地観測や大型風洞による実験を実施する必要がある。

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—研究代表者：長林久夫 日本大学工学部教授」、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) 神奈川県湘南なぎさ事務所：平成6年度海岸緑地整備事業（分割-5）、クロマツ砂防林調査報告書、pp.16-20, pp.61-69, 1995.
- 2) 塩澤俊彦・中谷内信一・赤澤守・玉城重則・黒木敬司：新潟西海岸における飛砂の現地観測、海岸工学論文集、第40巻、土木学会、pp.281～285, 1993.
- 3) Hotta, S. and K. Horikawa : Vertical distribution of sand transport rate by wind, Coastal Eng., in Japan, JSCE, pp.81～100, 1991.
- 4) 堀田新太郎・畑中勝守・田中寛好・小泉圭右・大塚香織：人工砂丘周辺の風の場による砂丘形状決定に関する研究、砂防学会誌、Vol.53, No.2, pp.22～33, 2000.
- 5) 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.
- 6) Hashimoto, S. Y. Ohtani, S. Satoh and S. Hotta : A field study of wind-blown sand at the Niigata Coast, Proc. of 27th Int. Conf. on Coastal Eng., ASCE, pp.2547-2560, 2000.