

# 双峰型粒度分布を持つ砂層上の飛砂現象について

堀田新太郎\* ・ 久保田 進\*\* ・ 田中寛好\*\*\*  
 池田雅史\*\*\*\* ・ 遠藤路子\*\*\*\*\* ・ 奥山寛史\*\*\*\*\*

## 1. はじめに

漂砂源を複数もつ海岸において, 海浜砂の粒度分布が双峰型 (バイモデル) 分布を成すことがある。このような海浜で飛砂が発生すると表面にある粒径の小さい砂が移動して表面は粒径の大きな砂によって覆われ, 飛砂の発生が減少, あるいは風の強さによっては飛砂の発生は止まることがある。これは大きな粒子によるアーミング効果による飛砂発生抑制現象であり, この現象は飛砂制御の一手段として利用できる可能性がある。一方, (1) 粒度の揃った砂は, 同一のせん断力に対して, 粒径が大きいと飛砂量も多い, (2) 同一の中央粒径であっても, 粒度分布の広い砂は粒度分布の狭い砂より飛砂量が多い, という実験的事実がある。

本研究の目的は, 粒径の揃った (分布範囲の狭い), しかし中央粒径が明確に相違する 2 種の砂を混合した砂層上における飛砂の風洞実験によって, 粒径の大きな砂粒子によるアーミング効果, および飛砂量への粒度分布の寄与について検討しようとする試みである。

## 2. 従来の実験結果

飛砂量を予測する飛砂量則は数あるが, 一般的に Bagnold 公式 (1936) と河村公式 (1951) が用いられている。両式は理論的な考慮のもとに実験結果を導入した半経験式であるが, 多くの場合実験結果をよく表現する。Bagnold 公式, 河村公式は式 (1), (2) にて示される。

$$q = B \frac{\rho_a}{g} \sqrt{\frac{d}{D}} u_*^3 \dots \dots (1) \quad (\text{Bagnold, 1936})$$

$$q = K \frac{\rho_a}{g} (u_* + u_{*c})^2 (u_* - u_{*c}) \dots \dots (2) \quad (\text{河村, 1951})$$

ここに,  $q$  は飛砂量,  $B, K$  は実験にて定まる定数,  $\rho_a$  は空気の密度,  $g$  は重力加速度,  $d$  は粒径,  $D$  は標準粒

径 (0.25 mm),  $u_*$  は摩擦速度である。実験定数  $B$  と  $K$  は砂の代表粒径 (中央粒径あるいは平均粒径) と粒度組成によって定まる値である。従来の研究によれば,  $B$  あるいは  $K$  は 1.0~3.5 の範囲にある。Bagnold (1936) は,  $B$  の値として, 粒径のよくそろった砂 ( $B=1.5$ ), 通常の砂 ( $B=1.8$ ), 粒度分布の広い砂 ( $B=2.8$ ) を与えている。その理由として, Bagnold は, 代表粒径 (中央粒径) が同一であっても粒度分布が広い砂の飛砂量が粒度分布の狭い砂より多いのは跳躍 (saltation) 運動をしている砂粒子が着地するとき, 地表面にある大きな砂粒子に衝突し, 再び空中に跳ね返る (跳躍運動) 確率が大きく (地表面にある砂粒子間に突入して静止する, エネルギーを失う確率が小さくなる), 結果としてエネルギーの損失が少なくなるからであると説明している。

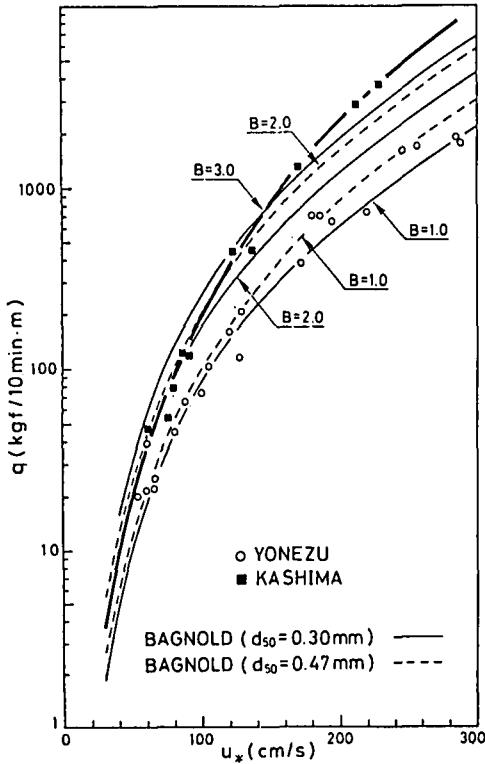
Zingg (1952) の粒径のよく揃った 5 種類の砂 (代表粒径 0.200, 0.275, 0.360, 0.505, 0.715 mm) の風洞実験は飛砂量は摩擦速度の 3 乗に比例し, かつ粒径が大きくなると飛砂量が多くなることを示した。Zingg は実験に基づいて飛砂量式 (3) を得た。

$$q = Z \frac{\rho_a}{g} \left(\frac{d}{D}\right)^{3/4} u_*^3 \dots \dots (3)$$

ここに  $Z$  は実験定数で, Zingg は実験から 0.83 としている。堀田ら (1995) は粒度の揃った粒径の大きな 3 種の砂 (中央粒径 0.5, 0.75, 1.0 mm) を用いた風洞実験で, 摩擦速度 0.3~2.5 m/s の範囲に渡って飛砂量は摩擦速度の 3 乗に比例し, かつ粒径が大きくなると飛砂量が多くなることを示し, 実験定数の値として 0.8 を得ている。堀田らは粒度の揃った砂の飛砂量が粒径が大きくなると飛砂量が多くなる事実を Bagnold の解釈を拡大して, 粒径が大きくなると, 運動している砂粒の数が減少し, 砂粒子どうしの衝突によって失われるエネルギー (あるいは運動量) 及び saltation の状態で運動している砂粒子が着地するとき砂表面の粒子と粒子の間に入り込み, 砂粒子の持っている運動量を失う確率が減少し, より多くのエネルギーが砂の輸送に有効に作用するからであろうと推量している。

Zingg や堀田らの実験結果から判断すると, 粒度の揃った砂に対しては式 (3) にて  $Z=0.8\sim 0.83$  程度とす

\* 正会員 工博 日本大学教授国際関係学部国際交流学科  
 \*\* 正会員 工博 日本大学助教授 理工学部土木工学科  
 \*\*\* 正会員 工博 電力中央研究所グループリーダー 水理部  
 \*\*\*\* 共和測量設計  
 \*\*\*\*\* 日本大学理工学部土木工学科  
 \*\*\*\*\* 水草産業



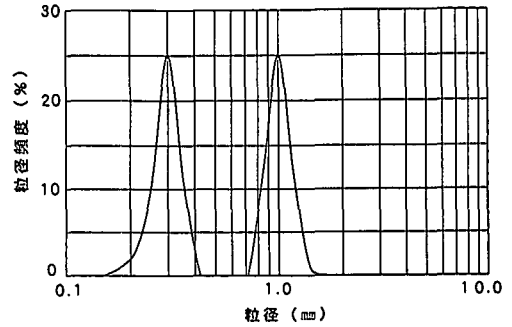
図一 粒度分布の広い砂の飛砂量の例 (堀川ら：1983)

れば、粒径  $d$  を与えると  $(d/D)$  の  $3/4$  乗の値が定まり、飛砂量が計算できることになる。

図一は堀川ら(1983)の実験結果である。中央粒径 0.3 mm、均等係数約 1.7 の粒径の揃った砂の飛砂量は摩擦速度の 3 乗に比例している。しかし、中央粒径 0.47 mm、均等係数約 2.7 の粒度分布の広い砂の飛砂量は粒径の揃った 0.3 mm の砂の結果と相違している。 $u_*$  の小さな領域で飛砂量は摩擦速度の 3 乗にほぼ一致しているが、 $u_*$  が大きくなると  $u_*$  の 3 乗にて予測される値よりさらに大きくなることを示している。この現象は Bagnold の解釈を拡大すれば定性的には理解できるが、摩擦速度が大きくなると  $u_*$  の 3 乗より予測される値より多くなる増分をどのようにして評価するかが問題である。Tsuchiya (1987) は saltation 運動をしている砂粒子が着地した後、再び saltation 運動に入る現象、rebound、に確率的な概念を導入し、粒径および粒径分布の相違による飛砂量の相違を説明することを試みている。

### 3. 実験施設と実験方法

実験に用いた風洞は、幅 1.0 m、高さ 1.1 m、長さ 20 m の吹き出し型風洞である。風洞底面に厚さ 10 cm の砂層を敷設してある。砂層は 2 種類の砂より成っている。1



図二 実験に用いた砂の粒度分布

種類は中央粒径 0.3 mm、均等係数 1.5、みかけの単位容積質量  $1,930 \text{ kg/m}^3$ 、他の 1 種は中央粒径 1.0 mm、均等係数 1.6、みかけの単位容積質量  $1,960 \text{ kg/m}^3$  である。前者は灰色、後者は茶色をしており容易に識別できる(以後、便宜上中央粒径 0.3 mm の砂を細砂、中央粒径 1.0 mm の砂を粗砂と呼ぶことにする)。砂粒子を球と考えて、0.3 mm と 1.0 mm との砂粒子の数と砂粒子 1 個の質量の関係は、径の比は  $1.0/0.3=3.33$  あるいは  $1/3.33$ 、従って大きな砂の 1 個の粒子の質量は小さい砂の約 37 倍、逆に小さい砂粒子の数は大きい砂の 37 倍となる。図二に砂の粒度分布を示す。2 種類の砂は 0.6 mm のふるいで完全にふるい分けすることができる。単位容積の質量はほぼ同じなので作業の便宜上、等容量の砂を混合して砂層を用意した。混合した砂を平らにならした後、初期混合割合を確認するため、風洞風上端より 4 m 毎、6 地点で表層約 5 mm の砂を採集した。風を吹送後、砂表面の砂の混合割合を調べるため、風洞全長 2 m 毎に、風洞の横断方向に幅 10 cm 厚さ 5 mm の表面の砂を採集し、ふるい分けた。一実験の風の吹送時間は 5 分間である。12 台の熱線風速計を使用して砂面上 80 cm までの風速鉛直分布を測定し、風速鉛直分布から摩擦速度、 $u_*$ 、を求めた。

## 4. 実験結果と検討

### 4.1 風速の鉛直分布

図三に風速の鉛直分布の例を示す。

図三から砂表面上の風速分布は対数則式(4)、式(5)に従うと判断できる。

$$u_z = 5.75 u_* \log \frac{z}{z_0} \dots \dots \dots (4) \quad \text{飛砂のない場合}$$

$$u_z = 5.75 u_* \log \frac{z}{z_0} + u' \dots \dots \dots (5) \quad \text{飛砂のある場合}$$

ここには  $u_z$  砂表面上の高さ  $z$  における風速、 $u_*$  は摩擦速度、 $z_0$  は粗度長、 $(u', z)$  は Focal point と呼ばれる点である。図より粗度長  $z_0$  は 0.06~0.1 mm 程度、Focal

point の値、 $u'$  は 5.5~6.5 m/s、 $z'$  は 15~25 mm、程度にあると見られる。粗度長、Focal point に対して、Zingg (1952) は式 (6), (7), (8) のような実験式をあたえている。

$$z_0 = 0.081 \log_{10} \frac{d}{0.18} \dots\dots\dots (6)$$

$$z' = 10d \quad (d: \text{mm}, z': \text{mm}) \dots\dots\dots (7)$$

$$u' = 8.94d \quad (d: \text{mm}, u': \text{m/s}) \dots\dots\dots (8)$$

$d = 3.0 \text{ mm}, 6.5 \text{ mm}, 1.0 \text{ mm}$  とした場合の式 (7), (8) より計算される値はそれぞれ  $u' = 2.68, 5.81, 8.94 \text{ m/s}$ ,  $z' = 3.0, 6.5, 10.0 \text{ mm}$  となる。

図中  $u_* = 0.5 \text{ m/s}$  と示されている分布時に飛砂の発生は観察できなかった。有意な飛砂が計測された摩擦速

度は  $0.74 \text{ m/s}$  であった (図中  $u_* = 0.74 \text{ m/s}$  と示してある分布)。摩擦速度  $0.64 \text{ m/s}$  (分布は示していない) にて風の吹送を始めて 2 分間くらいは表層にある細砂のわずかの量の移動が観察されたが、それ以後砂の移動は観察されなかった (飛砂量は計測してない)。粒径  $1.0 \text{ mm}$  の砂の移動開始限界摩擦速度  $u_{*c}$  は  $0.45 \sim 0.5 \text{ m/s}$  程度にあると考えられる (堀田ら, 1995) から移動限界は 20~30% 程度増大したと考えられる。前述の結果は、細砂と粗砂の混合した砂の移動限界摩擦速度は粗砂の限界速度より大きいことを意味する。この現象は細砂が粗砂の空隙に入り込み、砂粒子間のかみ合わせを強固にし、風に対する抵抗を増したものと考えられる。

4.2 飛砂量と摩擦速度の関係

図-4 は対数紙上における飛砂量と摩擦速度の関係を示す。図中に描かれている直線は傾き 3 の直線である。図はデータにバラツキはあるが摩擦速度の 3 乗に比例するようにみえる。飛砂量は摩擦速度の小さい方で直線の上側、摩擦速度の大きい方で直線の下側にある傾向がみられる。

4.3 飛砂の細砂と粗砂の割合

図-5 上段に風洞末端にて集められた飛砂を細砂と粗砂にふるい分け、飛砂量の中の細砂の占める割合と摩擦速度の関係を示してある。図中にデータ群中を通る平均的な直線を描いてある。図は細砂の割合が  $u_* = 0.74 \text{ m/s}$ , 約 75% から摩擦速度約  $2.0 \text{ m/s}$  で約 50% までほぼ直線的に減少することを示している。これは飛砂粒子の移動速度は粒径と風速に依存していることを意味している。図-5 下段に飛砂量と摩擦速度の関係を示してある。図中式 (3) に  $Z = 0.83$ , および粒径  $d = 0.3 \text{ mm}$  と  $1.0 \text{ mm}$  およびその算術平均  $0.65 \text{ mm}$  を与えた場合の曲線も描いてある。摩擦速度が約  $1.2 \text{ m/s}$  より大きい領域で、データは  $d = 0.3 \text{ mm}$  の曲線に一致している。

摩擦速度  $0.9 \sim 1.2 \text{ m/s}$  の領域では、 $d = 0.3 \text{ mm}$  の曲線の上方にデータは位置するが、 $d = 0.65 \text{ mm}$  の曲線を越えることはない (みかけの平均粒径  $d = 0.65 \text{ mm}$  を用いた式 (3) で推算される量より少なくなる)。つまり、粒径のよく揃った、しかし平均的粒径が約 3 倍異なる砂粒子の混合した砂粒子群の飛砂量は摩擦速度が大きくなると粒径の小さい砂群の割合が減少する。しかも、飛砂量は粒径の小さい方で予測される 3 乗則に近づくことになる。この結果は粒度の揃った砂あるいは粒度分布の広い砂における飛砂量の結果とも異なる。

4.4 吹送後の砂表面砂の混合割合

風の吹送前の砂表面の 2 種の砂の混合割合はほぼ等しく、 $50 \pm 3\%$  の範囲にあった。

図-6 に実験終了後の砂表面約  $0.5 \text{ cm}$  の厚さに含まれる細砂の割合の例を示す。摩擦速度が  $1.0 \text{ m/s}$  以下で

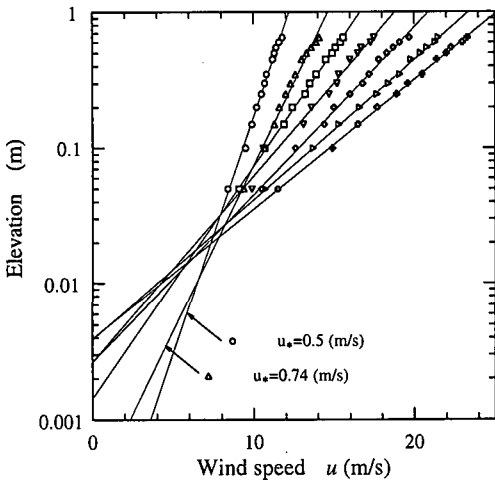


図-3 砂表面上の風速鉛直分布

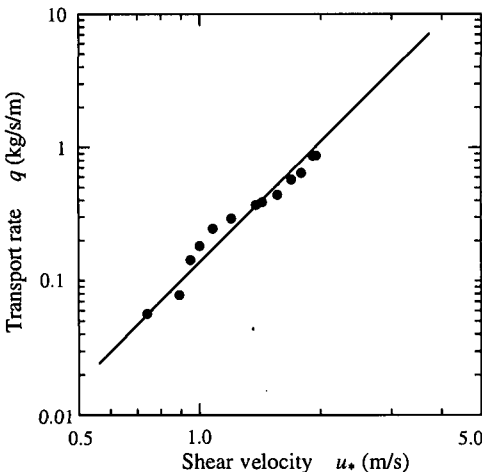


図-4 飛砂量と摩擦速度の関係

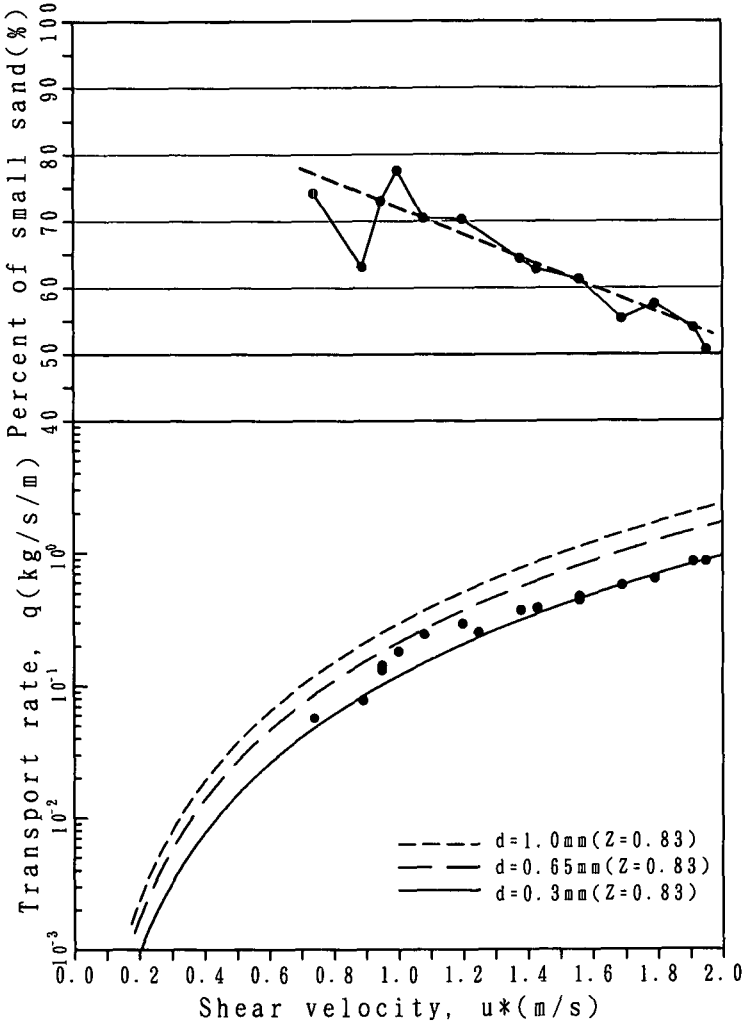


図-5 飛砂における細砂と粗砂の割合

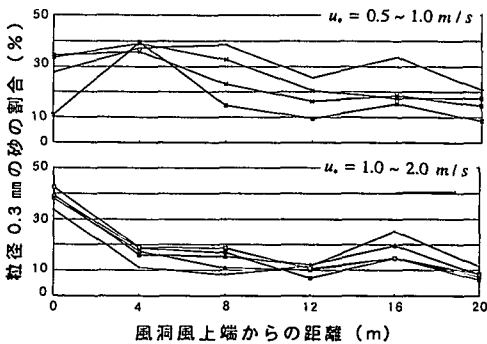


図-6 砂表面における砂の混合割合

は風洞風上端 8 m までの範囲で細砂の割合は 30~40% 程度であるが、8 m より風下の範囲では細砂の割合は 20% 以下となる。摩擦速度が 1.0 m/s 越えると風洞風上端より 4 m の地点より風下側で細砂の割合は 20% 以下となっている。もちろんある風速度から急速に減風したが、砂の運動が停止するまでに若干の時間を要したので砂の運動が平衡状態にある状況での砂表面ではないことに留意は必要である。観察によれば明らかに砂表面は 1.0 mm の砂に覆われていた。

4.5 飛砂量についての考察

4.3 節及び 4.4 節の実験事実は、粒径が大きくなる、あるいは粒度分布が広がると飛砂量は多くなるのは saltation 運動をしている砂粒子が着地するときの rebound の割合が増加するからであるとの考え方では説明できない。粒径の異なる 2 つの砂粒子が運動しているの

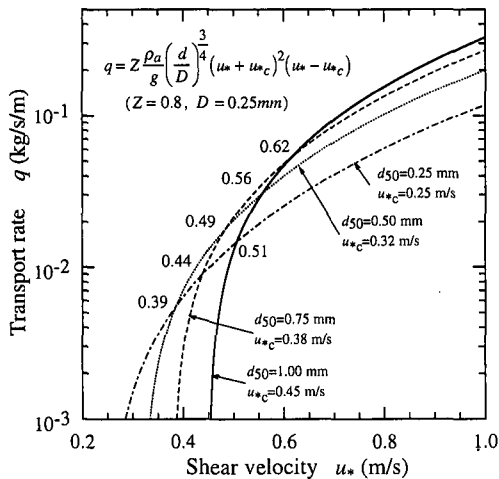


図-7 移動限界による表面砂の置換効果

であるから、着地するとき小さい粒子が rebound する確率は多くなることは予想できる。rebound の確率の上昇に反して飛砂量は減少している。ここでは小さい粒子の rebound の確率の上昇より、むしろ saltation の運動中に小さい粒子が大きい粒子に衝突し、小さい粒子の運動方向が反転して小さい粒子が持っている運動量を失う確率が多くなり、結果として飛砂量が減少すると考えれば実験結果を説明できる。

4.6 アーマリング効果と飛砂制御

飛砂の発生限界と飛砂量から飛砂制御の効果を検討するには式 (10) の様な表現が考えられる。

$$u_{*c} = A \sqrt{\frac{\rho_s - \rho_a}{\rho_a} g d} \dots\dots\dots (9)$$

$$q = Z \frac{\rho_a}{g} \left(\frac{d}{D}\right)^3 (u_* + u_{*c})^2 (u_* - u_{*c}) \dots\dots\dots (10)$$

ここにAは実験定数(A=0.1)、ρ<sub>s</sub>とρ<sub>a</sub>は砂粒子と空気の密度である。図-7はZ=0.8として、d=0.25, 0.5, 0.75, 1.00 mmとして式(10)をプロットしたものである。例えば、0.25 mmの砂を1.0 mmの砂に置換した場合を考えてみる。少なくとも飛砂の発生は粒径1.0 mmまでの移動限界、式(9)によって計算されるu<sub>\*</sub>=0.45 m/sまではない。u<sub>\*</sub>が0.45 m/s越えると飛砂が発生する。しかし、u<sub>\*</sub>が0.51 m/sまでは粒径0.25 mmの砂の飛砂量よりは少ないがu<sub>\*</sub>0.51 m/sを越えると飛砂量は粒径1.0 mmの曲線(図-7における実線)にて示される量となり、粒径0.25 mmの砂を1.0 mmに置換したこと

によって、かえって飛砂量が増大することになる。つまり、小さい粒径の砂を大きな粒径に置換することは飛砂の移動開始限界摩擦速度u<sub>\*c</sub>を大きくし、飛砂の発生を抑えることができるが、ある程度摩擦速度が大きくなると飛砂量は多くなることになり、飛砂量の抑止という観点からは大きな粒径の置換は好ましくないことになる。

次に本実験に基づいて2種の砂を混合した場合について考えてみる。本実験は粒度の揃った2種の砂の混合砂の移動開始限界摩擦速度は大きな粒子単独の移動限界より大きくなることを示した。これは小さな粒子が粒子間の噛み合わせを強固にし、大きな粒子のアーマリング効果をより大きくしたと解することができる。

この事実は海浜の表面に大きな径の砂を補給し、表面砂を混合することによって飛砂の発生を抑制することが可能であることを意味する。従って、2種の砂の混合は移動開始限界を大きくし、飛砂発生抑止という観点からは効果があることになる。しかし、飛砂が発生した後、摩擦速度が十分に大きくなると、飛砂量は小さい粒径の飛砂量より多少大きくなるか、あるいはほぼ等量となり、飛砂量減量という観点からは混合もまた意味を持たないことになる。

5. 結 論

本実験に基づけば、砂の粒径が0.1~1.0 mm程度の通常の海浜砂面上にて飛砂の発生を制御しようとするならば、大きな粒径の砂に、飛砂量の減少目的とするならば、粒径の小さい砂に置換あるいは混合すればよいことになる。

参 考 文 献

河村竜馬 (1951): 飛砂の研究, 東京大学理工学研究所報告 5, pp. 95-112.  
 堀川清司・堀田新太郎・久保田進・香取完和 (1983): 強風下における飛砂についての実験的研究, 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 297-301.  
 堀田新太郎・山谷直昭・小島崇幸・中井幹雄・斉藤裕士 (1995): 粒径の大きい砂の飛砂量について, 海岸工学論文集第42巻, pp. 476-480.  
 Bagnold, R. A. (1936): The movemet of desert sand, Proc. Roy. London Ser. A. Vol. 157, pp. 211-235.  
 Tsuchiya, Y. (1987): Sand transport by wind: Transport rates of uniform and graded sand, Coastal Sediments '87. ASCE, pp. 175-187.  
 Zingg, A. W. (1952): Wind tunnel studies of the movement of sedimentary material, Proc. 5th Hydraulics Conf., IAHR, pp. 111-135.