

粒径の小さい砂の飛砂量について

堀田新太郎*・久保田進**・竹澤三雄***

細砂の飛砂制御の観点から細砂の飛砂量についての風洞実験を実施した。実験には篩分けし、粒度の揃えた 5 種類の砂を用いた。3 種類はガラス製造用の珪砂で中央粒径が 0.14, 0.18, 0.23 mm, 他の 2 種類は鹿島海岸の砂で中央粒径 0.15, 0.22 mm の砂である。風速の鉛直分布は砂表面上約 30 cm の高さまで対数則が成立した。飛砂量はバグノルド式あるいは河村式に従った。実験で定められる係数は河村式では、珪砂に対して 3.0, 鹿島砂に対して約 1.0 であった。実験係数の決定に砂層の代表粒径が関係するバグノルド式では、珪砂に対して、3.1~4.0, 鹿島砂に対しては 1.1 と 1.3 であった。飛砂が近似的に平衡に達する距離は約 10 m であった。

1. はじめに

強風時に海浜に飛砂が発生する。海浜上で発生した飛砂は内陸側に移動し、海岸保安林や耕地の埋没、道路上に堆積して車両の走行阻害を惹き起こし、ときには居住地に侵入し側溝を塞ぎ、洗濯物を汚したりする。人工海浜として整備された海浜に飛砂が発生し、緩傾斜堤、通路、レクリエーション施設内に堆積し、見苦しい景観を呈したり、利用を阻害している例が見られる。飛砂の制御は海岸工学上の一課題である。近年、海岸侵食防止や人工海浜造成のために人工養浜が用いられることがある。養浜砂として航路、河口、港内あるいは沖浜から浚渫した砂を使用するが多い。養浜砂の粒径は汀線近傍にある砂より粒径が小さい 0.2~0.15 ミリ程度の細砂が多い。海浜における飛砂についての研究は多い。しかし、細砂（粒径 0.2~0.1 mm 程度）についての研究は限られている。細砂の飛砂制御の観点から細砂の飛砂現象及び飛砂量についての風洞実験を実施した。その結果を報告する。

2. 砂面上における風の性質

後ほどの実験データの検討の便宜のため砂面上における風の性質について簡単に記しておく。

飛砂が発生していない状態での平坦な砂面上の風速の鉛直分布は、式 (1) で表される。

$$u_z = 5.75 u_* \log \frac{z}{z_0} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $u(z)$ は砂面上のある高さ z における風速、 u_* は摩擦速度、 z_0 は粗度長と呼ばれる長さの次元を持つ実験で定まる定数である。

飛砂が発生している状態での砂面上の風速分布は、式 (2) で表される (Bagnold, 1936)。

$$u_z = 5.75 u_* \log \frac{z}{z_0} + u' \dots\dots\dots (2)$$

式 (2) は式 (1) を水平軸に u' 、鉛直軸に $(z' - z_0)$ だけ平行移動したものとなる。 (u', z') は Focal point と呼ばれている。式 (1), (2) 片対数用紙上、高さを対数軸、風速を直線軸に用いて表示すると、 u_* によって直線の傾きが変化する直線になる。式 (1) と (2) 対数則として同一の性質を持つので、以後簡単のために式 (1) を用いて対数則の性質を確認しておく。粗度長 z_0 は砂面の粗さによって決まる定数であり、実験あるいは現地観測から決められる。摩擦速度 u_* は砂面に作用するせん断力を示す指標で、片対数紙上にプロットした風速鉛直分布の傾きを示す。式 (1) の対数則は $z = \infty$ で、風速は ∞ になるまで増加する。しかし、対数則が誘導される境界層理論では、式 (1) は粗面上で形成される境界層内で成立する。境界層厚さを δ とすれば、 δ は砂面の粗さによって決まる値で、実験あるいは現地計測から求められる。砂面上ある高さ 2 点、 z_2 と z_1 の風速値 u_2 と u_1 があれば、 z_0 と u_* を求めることが出来、 z_0 とある高さ z の風速値 u があれば、 u_* を求めることが出来る。しかし、境界層厚さ δ は他の要因からは求められない。ここで δ と z_0 の関係が問題となる。もし、 δ と z_0 が比例するならば境界層外縁の風速が同じであれば、風速鉛直分布の勾配は同じで u_* は同じ値を持つことになる。もし、 δ の増加が z_0 の増加に比例する値より大きい値であれば、鉛直分布の勾配は急となり、 u_* は小さく評価されることになる。筆者らの知る限りでは、飛砂現象に関連して δ と z_0 の関係を扱った研究は無い。

3. 細砂の飛砂についての従来の研究

飛砂についての研究は多いが、細砂（粒径 0.2~0.1 mm 程度）についての研究は少ない。O'Brien・Rindlaub (1936) は中央粒径 0.195 mm の現地海浜の飛砂量測定から飛砂量 q は風速の 3 乗に比例すること報告している。この現地観測は飛砂量と外力としての風速との量的関係を示した最初の式である。風洞実験から Zingg (1952) は

* 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 日本大学教授 理工学部土木工学科
*** フェロー 工 博 日本大学教授 理工学部土木工学科

粒径 0.2 mm の砂の飛砂量は摩擦速度の 3 乗に比例する, Horikawa・Shen (1960) は粒径 0.2 mm の砂の飛砂量は摩擦速度の 2.4 乗に比例する, Kadib (1964) は粒径 0.145 mm の飛砂量は摩擦速度の 3 乗に比例する, ことを報告している. 通常, 海浜にある粒径 0.25~1.0 mm 程度の砂の飛砂量に関する風洞実験や現地観測の多くは, 飛砂量は摩擦速度の 3 乗に比例することを示し, 3 乗については理論的根拠も与えられている. Horikawa・Shen (1960) は彼らの実験が他の実験の 3 乗と相違し 2.4 乗となっている事実について, その理由は不明であるとし, 更なる研究の必要性を強調している.

4. 飛砂量式

飛砂量算定のために多くの算定式が提案されているが, 代表的な算定式は Bagnold (1936) と河村 (1951) による式 (3), (4) である.

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

$$q = K \frac{\rho_a}{g} (u_* + u_{*c})^2 (u_* - u_{*c}) \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに, q は単位幅, 単位時間に通過する砂の質量, ρ_a は空気密度, g は重力加速度, u_* は摩擦速度, u_{*c} は飛砂発生限界摩擦速度, B, K は実験によって定まる係数, D は Bagnold によって標準粒径と定義された砂の粒径 0.25 (mm) である. 以下本稿では式 (3), (4) を用いて飛砂量を検討する.

5. 実験施設と実験方法

(1) 実験施設

実験には幅 1 m, 高さ 1.1 m, 長さ 20 m の吹出型風洞を用いた. 風洞底部に厚さ 10 cm に砂を敷き, 実験砂層を設けてある. 実験には篩い分けし, 粒度の揃えた 5 種類の砂を用いた. 3 種類はガラス製造用の珪砂で中央粒径が 0.14, 0.18, 0.23 mm, 他の 2 種類は鹿島海岸の砂

で中央粒径 0.15, 0.22 mm の砂である (図一1). 以後, 簡便のためこれ等の砂を, d140, d180, d230, D150, D220 と呼ぶことにする. 風速測定には熱線風速計を使用した. 用いた風速計は実験の初期の段階で 12 台, 実験の後半には 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 2.5~62.5 mm の間に 11 点~15 点測定してある. 残りの 1 台は風洞内風速状況を監視するために用いている.

(2) 実験方法

実験は砂表面を平らに均した後, 所定の風速を吹送した. 風洞末端を通過した砂量を捕捉し, 飛砂量とした. 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. 実験は d140, d180, d230, D220, D150 の順番で実施した. D150 の鹿島砂についてのみ, 砂層長を 10, 15, 20 m と変え, 飛砂量がほぼ平衡に達する距離についての実験をした.

6. 実験結果とその検討

(1) 実験の困難さ

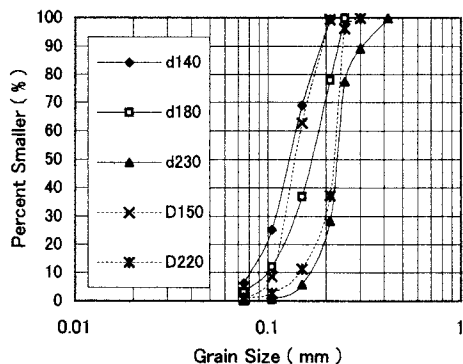
今後の研究の参考のために実験における困難さについて述べておく. 最も困難な事項は飛砂が存在している砂表面近くの風速測定である. 風速の速度勾配を測定するためには可能な限り, 多点の風速値の測定が望ましい. 現時点で風洞実験に使用できる風速計は熱線風速計であるが, 風速計プローブのセンサー部が飛砂の研磨作用を受け耐久性に劣る. 本実験では摩擦速度を風速勾配から求めているので, かなりの本数のプローブを消耗している. 他の難しさは, 砂表面から風速測定点までの高さの決定である. 何故なら砂面高さが実験中に変わるからである. 本実験では風の吹送前と吹送後の平均を用いている.

(2) 風速鉛直分布

図一2 は d140 の珪砂表面上の風速鉛直分布である. 砂表面から高さ約 30 cm までの高さの範囲で対数則が成立し, それより上方では風速は一定と見ることが出来る. 他の 4 種類の砂層においても同様であった. 風速鉛直分布が対数則であれば, 鉛直分布から摩擦速度を求める事ができる.

(3) 飛砂量

図一3 は砂表面上で対数則が成立している 30 cm 以下の勾配から求めた摩擦速度と飛砂量の両対数紙上でのプロットである. 珪砂と鹿島砂の飛砂量は明らかに相違する. しかし, d140, d180, d230 の珪砂の飛砂量はほぼ一致する. D220, D150 の鹿島砂もほぼ一致する. この実験結果は次のように説明できる. 砂面上に形成される乱流境界層の厚さは珪砂と鹿島砂とで相違し, 珪砂面上の境界層が厚い. 従って, 鉛直分布から算定される摩擦速度



図一1 実験砂の粒径加積曲線

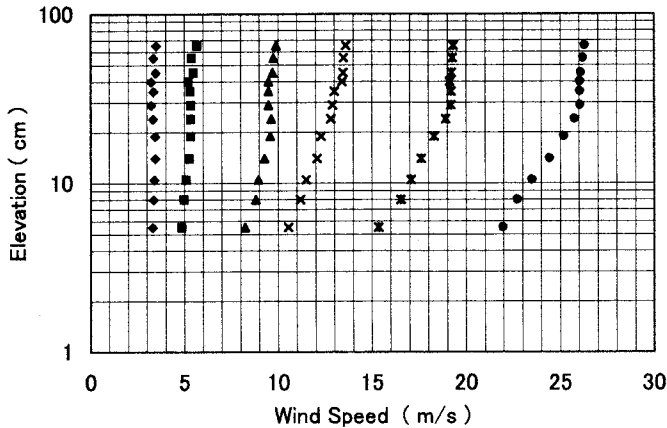


図-2 d140 珪砂表面上の風速鉛直分布

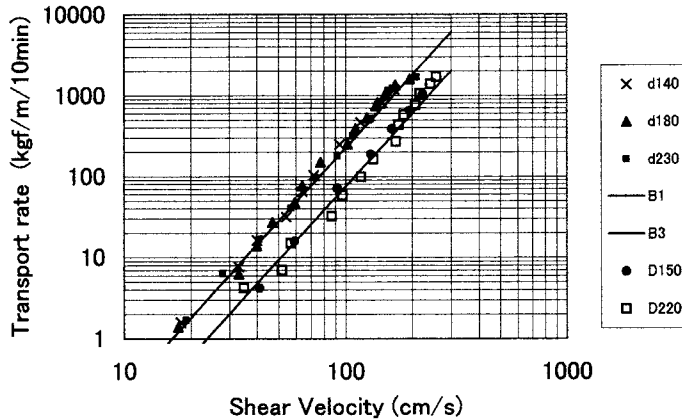


図-3 摩擦速度と飛砂量の関係

は鹿島砂面におけるより小さい値になる。これは篩い分けで定められた粒径はほぼ同じでも人工的に破碎されて造られた珪砂は海岸から採取された鹿島砂より粗な砂表面を形成することを意味する。珪砂と鹿島砂のいずれにおいても、粒径間の差異は小さいので境界層厚さに差異が現れない(実験誤差内にある)。図-3の直線は勾配3の直線である。飛砂量は摩擦速度の3乗に比例すると判断してよい。

図-4は式(3)との比較である。図中の曲線は $d=0.25$ 、すなわち $\sqrt{d/D}=1.0$ とし、実験係数 $B=3.0$ 、 $B=1.0$ を与えた式(3)を描いてある。

珪砂 d140, d180, d230 の飛砂量はほぼ $B=3.0$ の曲線に一致する。しかし、式(3)は代表粒径の取り方で $\sqrt{d/D}$ の値、すなわち B を変えることになる。もし、代表粒径を0.14 mmとすれば $\sqrt{d/D}$ の値は0.75、 B の値は約4.0、代表粒径を0.23 mmとすれば $\sqrt{d/D}$ の値は約0.96、 B は約3.1となる。同様に鹿島砂 D150 では $\sqrt{d/D}$ の値

は0.77、D220では $\sqrt{d/D}$ の値は0.94になる。 B の値はそれぞれ、1.3、と1.06になる。

式(4)において、粒径 d は実験係数の決定に直接関係しない。図-4の曲線から K の値を求めると、珪砂に対して K の値は約3.0、鹿島砂に対して K の値は約1.0となる。

これらの事実は、篩い分けによって定められた中央粒径はほぼ同じでも、破碎されて人工的に作られた砂の飛砂量は自然砂より約3倍多いことを意味している。

(4) 飛砂量が近似的に平衡に達する距離

飛砂は発生可能な点から発生しはじめ、風下の方へ下るとともに飛砂量が増加し、ある地点でほぼ平衡の状態になる。この距離が工学的に重要である。この距離について、河村(1951)は1.2 m(小型風洞実験)、Ishihara・Iwagaki(1952)は約4 m(拡散理論による予測)、堀川ら(1983)は約10 m(現地観測)の値を報じている。図-5にD150の砂層長を20, 15, 10 mに変えて飛砂量を

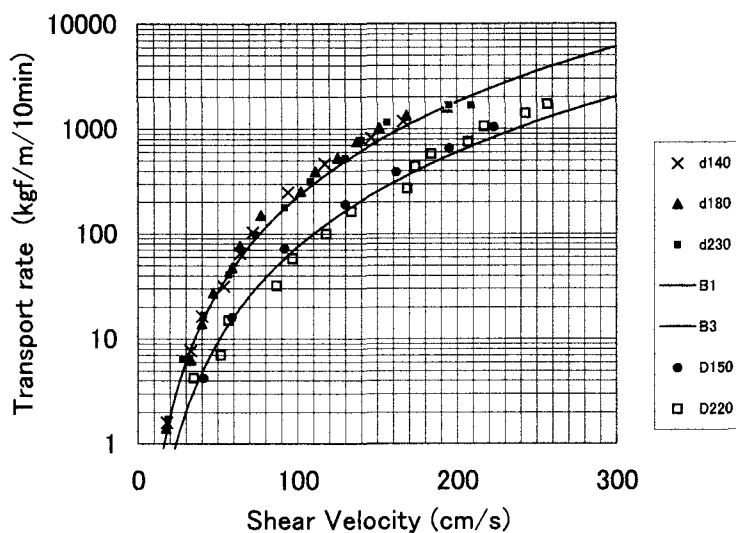


図-4 実測飛砂量とバグノルド式との比較

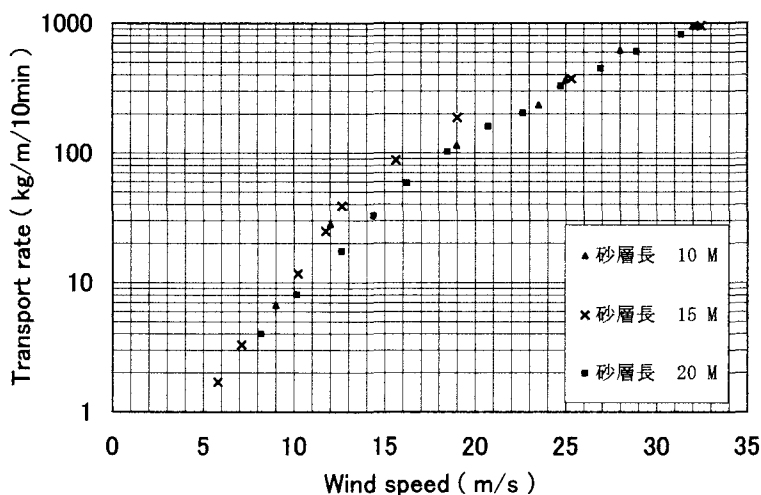


図-5 異なった砂層長上の飛砂量の比較

測定した結果を示してある。感覚的に解り易いように外力として、風洞中心点(砂面上 50 cm)の風速値を用いている。砂層長 15 m, 風速範囲約 10~20 m/s で飛砂量は砂層長 10, 20 m より多少多い飛砂量を示しているが、全体的に見て飛砂量は砂層長 20, 15, 10 m とも実験誤差の範囲内で等しいと判断してよい。それ故、飛砂量が近似的に平衡に達する距離は約 10 m となる。

7. 本実験の結論

粒径の小さい砂(中央粒径約 0.1~0.2 mm)の飛砂量は摩擦速度の 3 乗に比例した。従来の研究によれば粒径が大きくなれば、式(3)、式(4)の実験で定まる係数は大きくなる傾向がある。自然砂である鹿島砂の実験係

数は式(3)、式(4)のいずれに対しても約 1.0 程度である。報告されている従来の数値では小さい方にあり、従来の傾向に矛盾しない。本実験の結論は細砂も通常の海岸砂で得られている従来の研究成果の延長上にある、ということになる。一方、人工海浜の養浜砂として人工的に破碎した碎石砂を用いる場合は、飛砂量は増大することを留意しておく必要がある。

謝辞：本研究は平成 13, 14 年度日本大学学術助成金、国際総合研究「国土侵食防止についての研究」、平成 14 年度科学研究費補助金 基盤研究(C)2, 課題番号 14550515 に拠るものである。記して、著者等は関係諸機関、各位に感謝の意を表する。

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, 第5巻, pp. 95-112.
- 堀川清司・堀田新太郎・久保田進・香取完和 (1983): トレンチトラップによる飛砂量の現地観測, 第30回海講論文集, pp. 303-307.
- Bagnold, R. M. (1936): The movement of desert sand, Proc., Roy., Soc., London, A, 157, pp. 596-620.
- Horikawa, K. and H. W. Shen (1960): Sand movement by wind action (on the characteristics of sand tropes), U. S. Army, Corps of Engineers, BEB, Tech. Memo., No. 119, 51 p.
- Ishihara, T. and Y. Iwagaki (1952): On the effect of sand storm in controlling the mouth of the Kiku River, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto Univ. Bull., No. 2, pp. 1-32.
- Kadib, A. A. (1964): Sand movement by wind, U. S. Army Coastal Engineering Research Center, Tech. Memo. No. 1, pp. III-1-III-24.
- O'Brien, M. P. and B. D. Rindlaub (1936): The transportation of sand by wind, Civil Eng., Vol. 6, No. 5, ASCE, pp. 325-327.
- Zingg, A. W. (1952): Wind tunnel studies of the movement of sedimentary material, Proc. 5th Hydraulics Conf., pp. 111-135.
-