

飛砂量鉛直分布についての風洞実験

保坂幸一*・鶴飼正志*・久保田進**・堀田新太郎***

粒径の揃った中央粒径0.15 mmと0.48 mmの2種の砂, および2種の砂を等容積で混合した砂, 計3種類の砂について, 全飛砂量および飛砂量鉛直分布を風洞内で測定した. 実験に用いた風洞は断面1.0×1.0 m, 長さ20 mの吹出型風洞である. 実験は次のような結果を示した. 1) 全飛砂量, 飛砂量鉛直分布のいずれも, 河村が提案する式が実験データを良く説明した. 2) 粒径の大きな砂が粒径の小さい砂より高い地点まで飛行していた. 3) 混合砂の実験によれば, 砂面近傍と砂表面から高い層(40 cm以上)で粒径の大きな砂の割合が多く, 中間層では粒径の小さい砂の割合が多かった.

1. はじめに

海岸に発生する飛砂は, 海岸保安林を埋没し, 海浜に隣接する道路・公園・居住地などへ侵入し, 人々の生活環境・経済活動に影響を及ぼしている. 海浜における飛砂制御は海岸工学上の一課題である. 飛砂制御のために堆砂垣・フェンス・前砂丘など, いわゆる海岸砂防構造物が使用されるが, それらを適切に使用するためには, 飛砂量の鉛直分布の理解が重要である. 飛砂量の鉛直分布についての風洞実験・現地調査・理論的な研究がなされてはいるが, 未だ理解は十分でない. Hotta・Hori-kawa (1991) は風洞実験により岩垣(1950)と河村(1951)による理論式を検証し, 河村による式が現象を良く説明することを報告している. しかし, 検証された砂は, 粒径が揃った中央粒径0.3 mmの一種のみであった. 工学的に応用するには, 式の検証は不十分であり, 他の粒径の異なった砂, あるいは複雑な粒度分布を持つ砂に対する検証が必要であろう. 中央粒径が0.15 mmと0.48 mmで粒度の揃った砂, この2種を等分(容積比)に混合した砂について, 飛砂量の鉛直分布についての風洞実験を実施した. その結果を報告する.

2. 実験データの解析に用いた数式

実験データ解析の根拠となる式をここでまとめて表記する.

(1) 飛砂が発生している砂面上での風速鉛直分布 (Bagnold, 1954)

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

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 (式(1)の曲線群の集まる点).

(2) 全飛砂量式 (河村, 1951)

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

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.

(3) 飛砂量鉛直分布式

飛砂量の鉛直分布を予測する理論的な研究は限られている. 岩垣(1950), 河村(1951)による式を検討の対象とする.

岩垣(1950)の式

$$q(z) = c\phi_0 u e^{-(w_0/\eta)z} \dots \dots \dots (3)$$

$q(z)$: 砂表面からの高さ z における飛砂移動量, u : 風速, w_0 : 空気中における砂粒子の落下速度, η : 渦動拡散係数, ϕ_0 : 砂表面での単位体積中に含まれる砂の質量.

河村(1951)の式

$$q(z) = G_0 \left\{ \lambda \left[2\sqrt{2}K_0(\xi) - 2\sqrt{2}\beta\sqrt{\frac{h_0}{g}}\xi K_1(\xi) \right] + \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{a\beta\sqrt{0.75h_0}}{g} \xi^2 \{K_0(\xi) + K_2(\xi)\} \right\} \dots (4)$$

ここに

$$\xi = \sqrt{2z/h_0}, \quad \lambda = \overline{u_1}/\sqrt{2gh_0}, \quad \beta = 3\pi\mu d/m$$

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

$q(z)$: 砂表面から高さ z における飛砂移動量, $\overline{u_1}$: 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.

3. 実験施設と方法

(1) 実験施設 (風洞, 風速計測装置, 捕砂器)

実験に用いた風洞は幅1.0 m, 高さ1.1 m, 長さ20 m

* 日本大学大学院理工学研究科土木工学専攻
** 正会員 工博 日本大学教授理工学部土木工学科
*** 正会員 工博 日本大学大学院教授総合科学研究科

の吹出型風洞である。風洞底部に厚さ10 cmの実験砂層を設けて、断面1.0×1.0 mが確保されている。

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2.5~62.5 cmの間に15台設置した。残りの1台は風洞内風速を制御するために用いた。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。飛砂量鉛直分布測定に用いた捕砂器を図-1に示す。

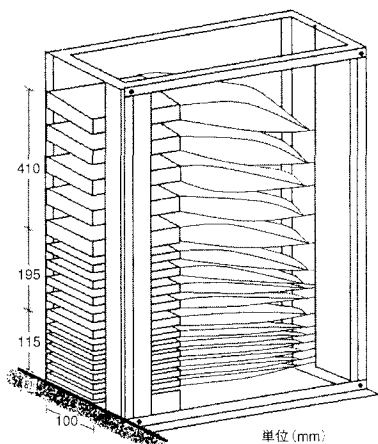


図-1 鉛直分布型捕砂器

(2) 実験に用いた砂の粒度特性

3種類の砂について実験した。実験に用いた砂は鹿島海岸の砂で、篩い分けし、粒度を揃えた砂である。砂の1種は0.22 mmの篩目を通過し、0.075 mmの篩に残る砂で、他の1種は0.6 mmの篩を通過し、0.3 mmの篩に残る砂である。図-2にこれらの砂の篩い分け作業後の粒径加積曲線を示す。0.075 mmと0.3 mmより小さい粒径の砂が多少含まれている。それぞれの中央粒径は0.15 mm（細砂 D15）、0.48 mm（粗砂 D48）となる。第3番目の砂は、前記2種類の砂を容積比1:1で均等に混合した砂（MD28）である。

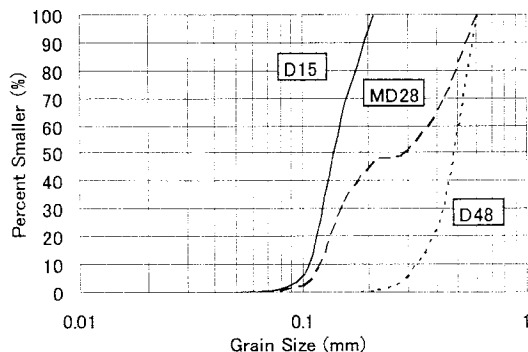


図-2 実験砂の粒径加積曲線

(3) 実験方法

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分から10分の範囲である。実験はD15、D48、MD28の順序で実施した。

4. 実験結果と考察

(1) 風速の鉛直分布

図-3に砂面上の風速の鉛直分布を示す。図中の直線はデータを通る平均的な曲線である。この曲線によりD15、MD28においては高さ30~35 cmまで、D48においては高さ約60 cmまで、対数則式(1)が成立していることがわかる。対数則が成立していれば、風速鉛直分

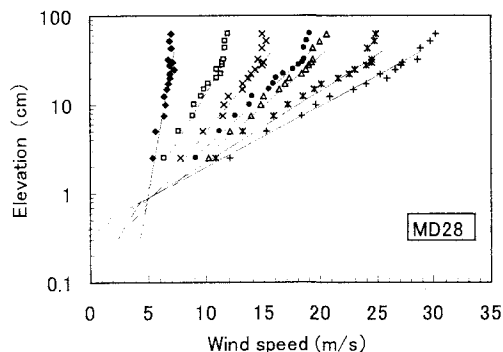
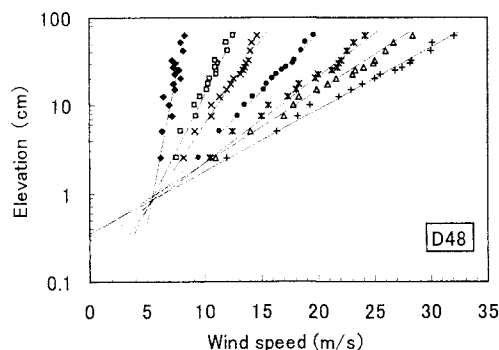
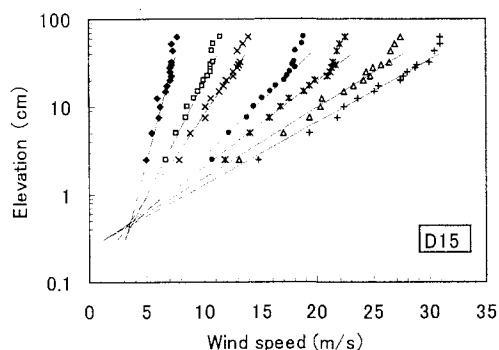


図-3 風速鉛直分布

布から摩擦速度が計算できる。フォーカルポイントの値はD15で(350 cm/s, 0.5 cm), D48で(550 cm/s, 0.8 cm), MD28で(400 cm/s, 0.6 cm)である。

(2) 全飛砂量

図-4に全飛砂量(transport rate)を示す。全飛砂量は風洞末端集砂箱と鉛直捕砂器に捕捉された飛砂量を単位時間表示したものである。実験定数 $K=1.0$ の式(2)が実験データを良く説明している。実験誤差内にあるようにも見えるが、詳細にデータを見れば、D48の全飛砂量はD15より大きい傾向がある。この傾向は、粒径の揃った砂では、粒径の小さい砂より粒径の大きな砂の実験定数が大きくなる、という従来の傾向と一致する。MD28の全飛砂量はD15と同じか、あるいは僅かに小さい傾向がある。この事実は、粒径の揃った2種類の砂の混合砂の飛砂量は小さい粒径の飛砂量に近い、という堀田ら(1999)の実験結果と一致する。

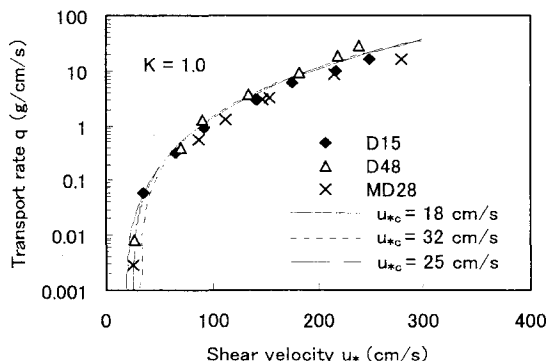


図-4 全飛砂量

(3) 使用した捕砂器の捕砂効率

使用した捕砂器の捕砂効率を検討する。捕砂器の幅は10 cm, 風洞の幅は1 mである。捕砂効率は、 $W_t/(W_t + W_w)/10$ と定義する。ここに、 W_t は捕砂器に捕捉された飛砂全量、 W_w は風洞末端集砂箱に捕捉された飛砂全量である。図-5に捕砂効率を示す。捕砂効率はD15に対して0.4程度、D48, MD28に対して0.6程度である。同一の捕砂器でも、粒径の大きな、あるいは粒径の大きな砂を含む砂に対する捕砂効率が良いという事実を意味する。捕砂器前面の流れは捕砂器の抵抗を受け、両脇に分かれる成分が生じる。粒径の大きい砂粒子の運動は、この局所的な流れに影響を受け難いと考えれば、粒径の大きい砂の方が小さい砂よりも捕砂効率が良い事実を説明できる。

(4) 飛砂量の鉛直分布

図-6に測定された鉛直分布と式(3), (4)の予測結果を示す。(a)はD15, (b)はMD28, (c)はD48の鉛直分布である。図(a), (b), (c)のいずれにおいても、

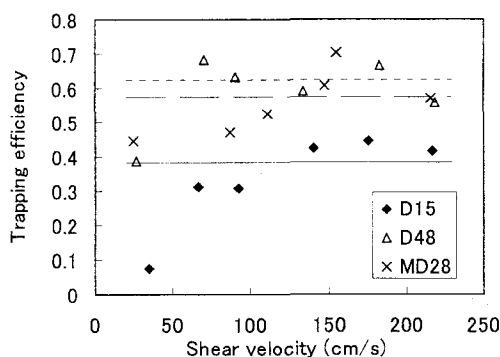


図-5 使用した捕砂器の捕砂効率

i) 式(4)が実験データに良く一致していること, ii) 式(3)は高さ約5-50 cmの間は実験値に良く一致しているが、砂表面近傍と高さ50 cm以上の領域では実測値は予測曲線から外れる、ことを示している。図-6(a), (b), (c)に描かれている曲線の傾きは、図(a), (b), (c)の順に急になっている。この事実は粒径の大きい砂粒子ほど高い地点に達する量が多いことを意味する。粒径の大きい砂粒子の跳躍運動の高さは粒径の小さい砂粒子より高い、と解釈すればこの現象を説明することが出来る。砂粒子が落下する時に保有する運動量(またはエネルギー)は粒径の大きい砂粒子ほど大きい。従って、地表面に落下し、反発して再び跳躍運動に入った時、その跳躍高さは粒径の大きい砂粒子ほど高い、と考えることに矛盾はない。

図-7は図-6に描いてある河村式(4)の曲線群のパラメーター、 h_0 と G_0 である。(a)は h_0 を示す。図中にHotta・Horikawa(1991)のデータもプロットしてある。Hotta・Horikawaの実験砂の中央粒径は0.3 mmである。データは中央粒径が大きいほど、 h_0 の値が大きくなることを示している。これは粒径の大きな砂粒子ほど高い地点に達する量が多いことを示している。D48と粒径0.3 mmの平均的な曲線の傾きは平行の様にも見える。MD28とD15のデータにバラツキが多い。中央粒径と h_0 の関係についての検討は、もう少しデータ量が増えるまで延期したい。

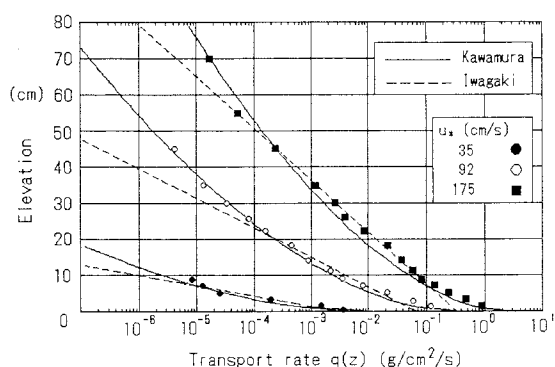
(b)は G_0 の値である。ここでは図-6に用いた値に捕砂効率を乗じて補正した値をプロットしてある。同一の摩擦速度において、中央粒径が小さいほど G_0 が大きくなる傾向があるが、データのバラツキが大きい。これについても更にデータを増した後に検討したい。

MD28の飛砂量鉛直分布において、各々の高さの捕砂器に捕捉された飛砂の篩い分け試験を実施した。篩い分け試験は通常の篩による試験法と青柳ら(1999)の開発した画像解析法の二方法を用いた。篩い分け結果を元の

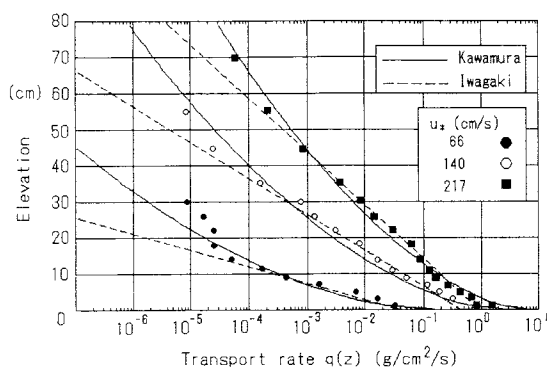
D15に相当する粒径部分とD48に相当する粒径部分の二つに分け、その割合を算出した。図-8は摩擦速度134, 219 cm/s の場合のD15の粒径部分に相当する割合を例示したものである (Ratio of fine sand, %で示してある。記号□, ◆より左側がD15, 右側がD48の粒径に相当する割合になる)。図中□印は通常の篩い分け試験による結果, ◆は青柳らによる粒度分析を用いた結果である。図-8は次のような結果を示している。i) 青柳らによる画像解析法は篩い分けによる結果と実験誤差内にあり、画像解析による粒度分析法は実用できる。ii) 地表面近

傍高さ約5 cm 程度までD48が多く、5-40 cmの層はD15が多く40 cmより高い層では粗砂が多く移動している。ii)の結果は次のように解釈できる。地表面近傍高さ約5 cm 程度まで粗砂が多いのは粗砂の匍匐・転動 (surface creep) による移動が卓越している。5-40 cmの層に細砂が多いのは、細砂と粗砂の移動速度が異なり、細砂の移動速度が速い。40 cmより高い層では粗砂が多いのは、前に述べたように粒径の大きい砂粒子の跳躍高さが高い。

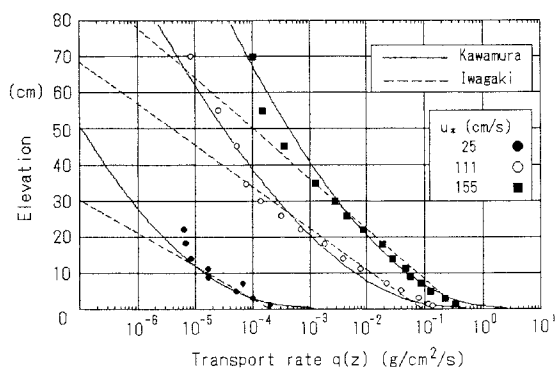
この事項についてはデータに限りがあるのでさらなる



(a) D15



(b) MD28



(c) D48

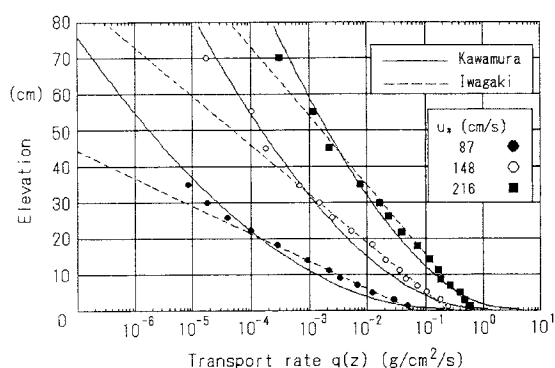


図-6 飛砂量鉛直分布

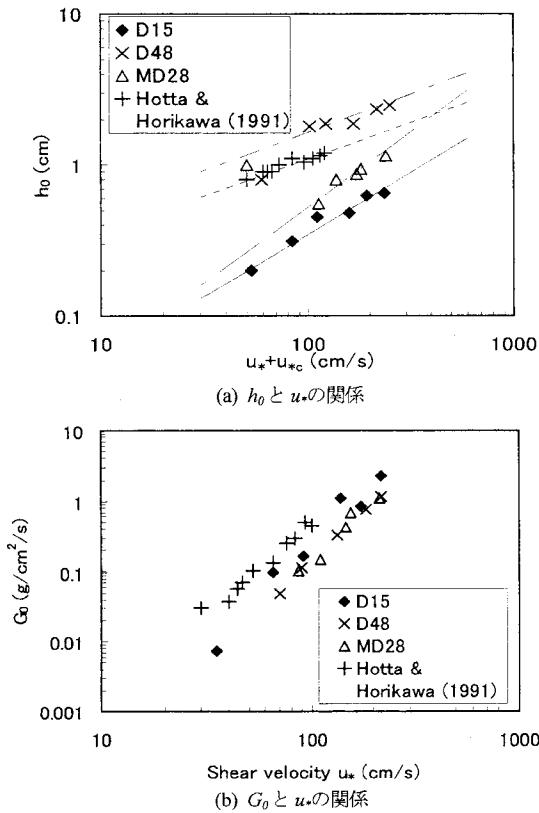


図-7 パラメータ値の比較

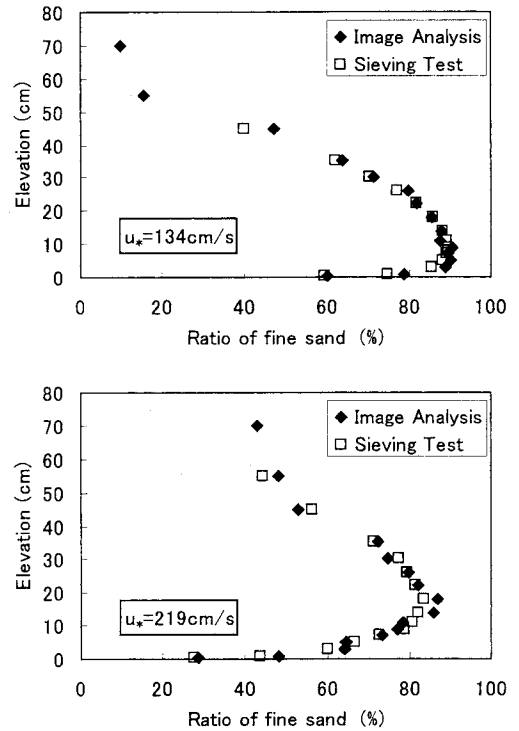


図-8 飛砂の鉛直方向粒度組成変化の例

議論は将来に持ち越すことにする。

5. 結 論

飛砂量鉛直分布を表示する河村 (1951) の式 (4) は実験データを良く説明した。少なくとも、中央粒径が 0.5 mm 程度までの粒径の揃った砂に対して、式 (4) は適用可能、と結論できよう。しかし、中央粒径が 0.5 mm より大きい粒径の砂、あるいは複雑な粒度組成を持つ砂に対する実験検証は未だなされていない。今後の課題である。

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」、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

- 青柳明・田中勝也・香取完和・久保田進・竹澤三雄(1999)：砂粒径分布の画像解析手法の開発，海洋開発論文集，第15巻，pp. 231-236
- 岩垣雄一(1950)：網代港埋没に関する飛砂の影響について，土木学会誌，35巻6号，土木学会，pp. 19-25.
- 河村龍馬(1951)：飛砂の研究，東京大学理工学研究所報告，第5巻，pp. 95-112.
- 堀田新太郎・久保田進・田中寛好・池田雅史・遠藤路子・奥山寛史(1999)：双峰型粒度分布を持つ砂層上の飛砂現象について，海岸工学論文集，第46巻，pp. 511-515.
- Bagnold, R.M. (1954) : The Physics of Blown Sand and Desert Dunes, Methuen & Co. Ltd., London, 265p.
- Hotta, S. and K. Horikawa (1991) : Vertical distribution of sand transport rate by wind, Coastal Eng. in Japan, JSCE, pp. 81-100.