

飛砂量の鉛直分布についての実験的研究

堀田新太郎*・武田 力**・堀川清司***

1. はじめに

現在、日本の海岸は工業用地、耕地、宅地、道路用地、マリンリゾート用地など経済的に高度に利用されているが、ある季節には隣接する砂浜より飛砂が侵入し、その経済活動に支障をきたすような事態を生じさせ、飛砂防止工を必要とするような例がみられるようになった。飛砂防止工を適切に実施するには飛砂量の鉛直分布を的確に予測することが重要である。飛砂量の鉛直分布については若干の研究がなされ、二、三の理論式も発表され、小風洞の実験や自然海岸上での若干の実測によって、一応はその式の有用性は検証されている。しかし、実測された鉛直分布の積分値は、予測される全飛砂量に比べてかなり少ないなど、実証は十分でない。この研究の目的は全飛砂量、鉛直分布、飛砂粒子の水平飛行距離の分布を総合的に計測し、発表されている式の有用性、式に含まれる係数の決定法について検討し、工学的に妥当な精度で飛砂量の鉛直分布を予測する方法を確立することにある。

2. 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いくつかあるが、工学的な応用に適切と考えられる代表的な研究は岩垣(1950)と河村(1951)によるものであろう。

岩垣(1950)は大気中を移動している砂粒子は浮遊の状態にあると仮定して拡散理論に基づいて次式を与えている。

$$q(z) = c\phi_0 u e^{-(w_0/\eta)z} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに $q(z)$: 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である。ここでは風速は鉛直方向に一定で u 、砂粒子の移動速度は風速に比例し、 cu で表されることが仮定されている。ここで c は定数である。

河村(1951)は空気中の砂粒子は放物線形状の軌跡で跳びはねながら、いわゆる跳躍 (saltation) と定義される運動形式で移動していると考え、砂面から跳び出す砂粒子の数に確率論的な考え方を適用し、次式を与えている。

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

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

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

ここに g : 重力加速度、 $\bar{u}_1$: 砂粒子が砂面より飛び出すときの水平速度の平均値、 μ : 粘性係数、 d : 砂粒子の径、 m : 砂粒子の質量、 a : 風速の鉛直分布を $u(z) = a\sqrt{z}$ と仮定したときの比例係数、 G_0 : 単位面積より単位時間内に空気中に飛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種のベッセル関数、 h_0 : 砂粒子の到達する最高の高さの平均値である。ここで $\lambda=2.0$ 、 β の値は 1.366 1/s (砂の密度 $\rho_s=2.65 \text{ g/cm}^3$ 、 $d=0.3 \text{ mm}$ 、 $\mu=181 \times 10^{-6} \text{ g/s}\cdot\text{cm}$ のとき) あるいは $\beta=2.081 \text{ 1/s}$ ($\rho_s=2.5 \text{ g/cm}^3$ 、 $d=0.25 \text{ mm}$ 、 $\mu=181 \times 10^{-6} \text{ g/s}\cdot\text{cm}$ のとき) となる。

以降、式(1)、(2)を議論の対象としていくことにする。

3. 実験施設と方法

実験は長さ 20 m、断面 $1.0 \times 1.1 \text{ m}$ の吹き出し型風洞で行った。風洞内は風上側より風下側 18 m の区間に、中央粒径約 0.3 mm、均等係数 1.5 程度の粒度の揃った砂で、厚さ 10 cm の移動床を設けてある。移動床風下端は板で砂を留め、風洞中央に試作した鉛直分布型捕砂器、その両端にそれぞれ水平分布型と水平全量型捕砂器を配置した。図-1 に使用した捕砂器の概要を示す。風速は風洞風上端より 12 m の位置で熱線風速計アレイで測定した。風速を測定した砂表面からの高さはそれぞれ 1, 2, 4, 6, 10, 20, 40, 60 cm であった。飛砂の捕砂時間は風速によって異なり、2~22 分であった。実験された風の強度は、風速の鉛直分布より求められた摩擦速度

* 正会員 工博 日本大学教授 短期大学部建設学科

** 正会員 日本大学副手 短期大学部建設学科

*** 正会員 工博 埼玉大学教授 工学部建設基礎工学科

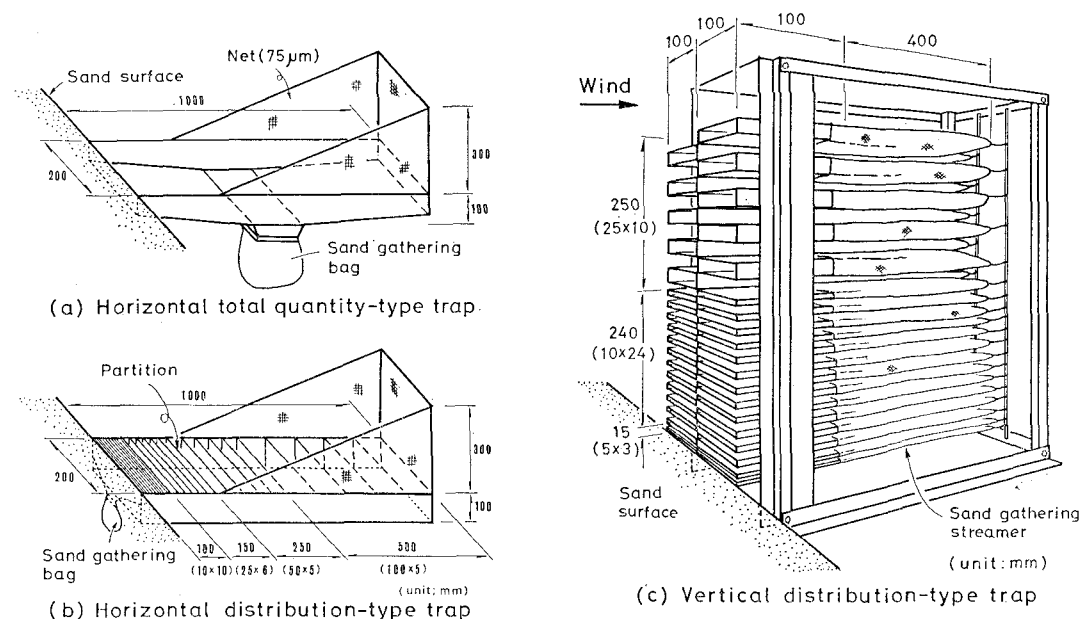


図-1 使用した捕砂器

で 30~100 cm/s の範囲にあった。地表上 50 cm の高さの風速で約 6.5~15.5 m/s であった。

4. 実験結果と検討

4.1 全飛砂量

試作した捕砂器の試用、改良のための予備実験中に、一度ある時間風を吹送した後の砂漣の形成された砂面、あるいは、だいたい平らにした、しかしまだかなり不規則である砂面における全飛砂量は、注意深く平らな砂面にしてから始めた実験に比べて全飛砂量は多いことに気がついた。それ故、より現地の状況に似せるという意味で、砂面の平面化にさほどの注意を払わず、だいたい平らな状態にして実験を行った。図-2 に水平全量型捕砂器によって測定された全飛砂量を示してある。図中に実験係数 1.0, 2.0, 3.0 を与えた場合の全飛砂量に関する河村の式(1951)も示してある。河村の式は、

$$q = K \frac{\rho a}{g} (u_* + u_{*c})^2 (u_* - u_{*c}) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 q : 全飛砂量、 ρa : 空気密度、 u_* : 摩擦速度、 u_{*c} : 移動開始限界摩擦速度、 K : 実験係数である。データは $K=2.0$ と $K=3.0$ の間にプロットされており、平均的に $K=2.5$ の近傍にあると判断できる。Horikawa et al. (1983, 1984) は $K=2.5 \sim 2.8$ を与えた河村式で全飛砂量を妥当な正確さで予測できる現地海浜より採集した砂を用いて、注意深く平らにした砂面で行った風洞実験では K は 1.0~1.1 程度であったことを示している。そしてその差異は多分、砂面形状の相違と風洞にお

ける一定の速度の風と現地海浜上における不規則な風との相違にあると推測している。この実験では K の値は現地海浜で得られた値に等しく、砂面形状が全飛砂量に強く影響していることを示している。

4.2 使用した捕砂器の捕砂効率

前節で述べた結果より、水平全量型捕砂器の捕砂効率は極めて高く、ほぼ 1.0 と考えられるので、水平全量型捕砂器での捕砂量を基準として、鉛直分布型、水平分布型捕砂器の捕砂効率を評価する。図-3 は鉛直分布型捕砂器で捕砂された全砂量と水平全量型捕砂器で捕砂された量との比、および水平分布型捕砂器で捕砂された全砂量と水平全量型による全砂量との比を示す。図-3 は摩擦速度に関係なく、鉛直分布型の比は 0.3~0.5、水平分布型の比は 0.5~0.6 の間にある。図-3 よりこの実験に用いた鉛直分布型と水平分布型の捕砂器の捕砂効率は約 40% と 60% であったと推定できる。

4.3 飛砂量の鉛直分布

図-4 に測定された飛砂量の鉛直分布の例を示す。図中の破線と実線は係数を適当に定めた(1)式と(2)式を示す。

(1)式と(2)式による実験データの当てはめについてここで検討する。河村の式で実験データを表すには、三つの係数 a , G_0 , h_0 を定めなければならない。 a は風速の鉛直分布が高さの $1/2$ 乗に比例すると仮定したときの比例定数である。この仮定は風速の鉛直分布が対数則に従うという事実(例えば、Horikawa et al., 1986)を考慮すれば必ずしも妥当ではないが、風速の鉛直分布が測定

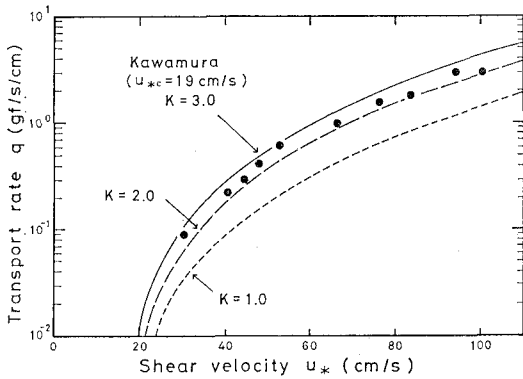


図-2 水平全量型捕砂器で測定された全飛砂量

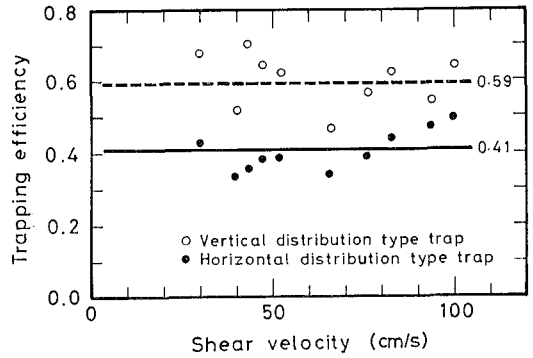


図-3 鉛直分布型・水平分布型捕砂器の捕砂効率

されていれば、一応その平均的な値は容易に求めることができる。 G_0 は砂表面近傍での境界値で、実験的に定められる値であるが、図-4における横軸方向における曲線の位置を定める量で飛砂量鉛直分布の形状に影響を及ぼす量ではない。最も重要なパラメータは h_0 でこれが鉛直分布の形状を定める。 h_0 は実験的に定められるべき量であるが実験で定めるのはかなり難しい。(2)式の特徴は、式中の第2, 3, 4項は砂表面近くでのみ意味を持つことである。 h_0 の値にもよるが3 cm以上の高さでは無視できるほど小さい。

(2)式の実験データへの当てはめは次のような手順で行った。まず、観測した風速の鉛直分布より平均的な a を求める。 G_0 の値はデータより容易に見当がつく。 h_0 を適当に仮定して、鉛直分布のだいたいの形状を定める。最後に G_0 と h_0 を適当に調整しながら、目視で最もデータと一致すると判断されるまで試行錯誤を繰り返した。これらの作業はパソコン画面上でなされた。使用した、あるいは定められたパラメータは表-1に示してある。

(1)式の対数をとると、

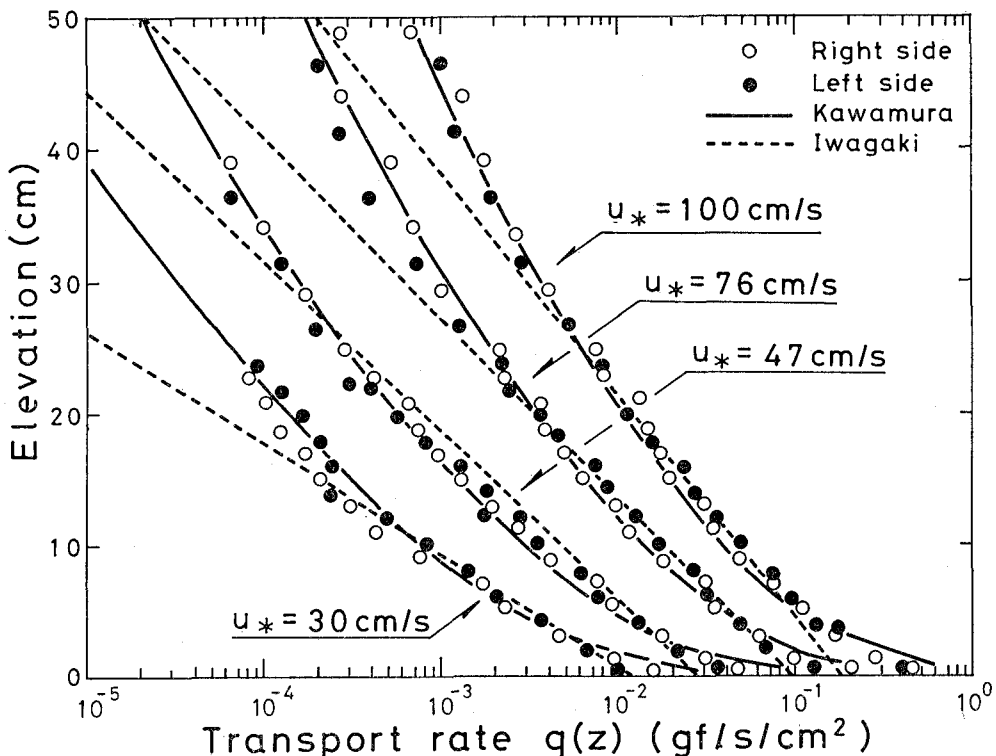


図-4 測定された飛砂量鉛直分布の例

$$\log_{10} q(z) = \log_{10} A - Bz \dots\dots\dots (4)$$

ここに,

$$A = c\phi_0 u, \quad B = w_0/\eta \cdot \log_{10} e$$

(4) 式の実験データへの当てはめは半対数紙上で簡単にできる。図上より読みとった A , 計算された B の値は表—1 の中に示してある。(1) 式の境界値 A と (2) 式の G_0 は同一の値となっている。

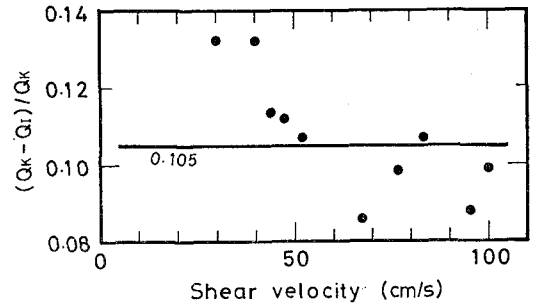
図—4 より, 河村の式(2)は岩垣による式(1)より, 的確に(特に砂面近傍で)飛砂量の鉛直分布を予測しうることを示している。しかしながら, (2) 式はパラメータを定めるのは少々やっかいである。一方 (1) 式では高さ方向に2点の実測値があれば鉛直分布を容易に定めることができる。

4.4 岩垣式と河村式の積分値の比較

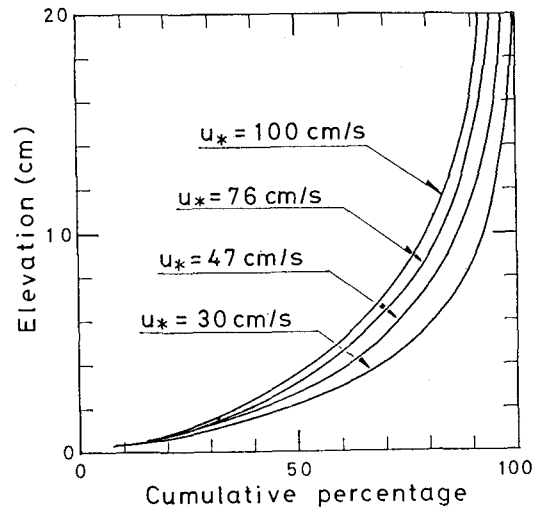
図—5 は表—1 に示してある諸量を与え, 砂表面から高さ 50 cm までの河村式の積分値(鉛直分布型捕砂器で捕砂された全飛砂量に等しい) Q_K と, 岩垣式の積分値 Q_I との比較である。($Q_K - Q_I$) は岩垣式の砂表面近傍での過小評価分を示すことになる。図—5 の縦軸のスケールが大きいののでデータは散らばって見えるが, ($Q_K - Q_I$) / Q_K の値は 8~14% の間にある。この程度のデータのバラツキは十分に実験上の誤差と考えられ, ($Q_K - Q_I$) / Q_K は一定であると考えてよい。その平均値は約 10% である。岩垣式におけるこの過小評価分を surface creep によるものと考え, 一定量 10% を岩垣式に加算してやると, 岩垣式と河村式より積分される全飛砂量は等しいことになる。

4.5 高さ方向における累加飛砂量の割合

図—4 は, 飛砂は砂表面近傍に集中しており, その transport rate は地表上 10 cm の高さでワンオーダー小さくなっていることを示している。図—6 は表—1 に示してある諸量を与えた (2) 式にて, 地表面からある高さ z までの積分値(鉛直分布型捕砂器で捕砂された飛砂量



図—5 岩垣式と河村式の積分値の差異



図—6 砂表面からある高さまでの累加飛砂量

の最下段セグメントよりある高さまでのセグメントの累計にほぼ等しい値となる。) Q_h と地表面から高さ 50 cm までの積分値(鉛直分布型捕砂器で捕砂された全飛砂量にほぼ等しい値) Q_K との比を % で示したものである。

図—6 は摩擦速度によって異なるが, 摩擦速度 100 cm

表—1 定められたパラメータ及境界値

Run No.	u_* (cm/s)	a ($\sqrt{\text{cm}}/\text{s}$)	G_0 (gf/s/cm^2)	h_0 (cm)	A (gf/s/cm^2)	B ($1/\text{cm}$)
1	30	275	0.012	0.80	0.012	0.270
2	40	288	0.015	0.90	0.015	0.208
3	44	304	0.023	0.90	0.023	0.216
4	47	339	0.028	0.90	0.028	0.180
5	52	348	0.042	1.00	0.042	0.166
6	66	371	0.053	1.10	0.053	0.153
7	76	381	0.100	1.05	0.100	0.170
8	83	400	0.120	0.10	0.120	0.153
9	94	436	0.200	1.15	0.200	0.151
10	100	442	0.180	1.20	0.180	0.135

s 以下では、全飛砂量の 90% が砂表面から 15 cm, 80% が砂表面から 10 cm 以下の層内で移動していることを示している。

5. 簡単な現地観測による飛砂量の鉛直分布の求め方

4.1 節から 4.4 節までの結果を用いると、砂表面近傍 2, 3 cm の高さまでの範囲は過小評価されるが、それ以上の高さの分布量は、(1) 式を応用して簡単な現地観測で求めることができる。すなわち、現地において水平全量型捕砂器で全飛砂量を、小さいボックスを利用して高さ方向に 2 ないし 3 点での飛砂量を測定すればよい。次に、(i) 半対数紙上に高さ方向における実測値をプロットし、式(4)の A, B を定める。(ii) A, B を与えた式(4)において高さ方向の積分値を求める。図-4 よりわかるように積分値は高さ 50 cm 程度までで十分であるが、高さ方向に無限大まで積分すると簡単に求まる。

つまり、

$$\left. \begin{aligned} B &= \frac{w_0}{\eta} \log_{10} e \\ B' &= \frac{B}{\log_{10} e} = \frac{w_0}{\eta} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

A, B' を(1)式に代入して、

$$\left. \begin{aligned} q(z) &= Ae^{-B'z} \\ q_s &= \int_0^{\infty} q(z) dz = \int_0^{\infty} Ae^{-B'z} dz = \frac{A}{B'} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

(iii) 積分値を 1.1 倍した値と水平全量型捕砂器で捕砂された値 q とが等しくなるように、鉛直分布を測定した捕砂器の捕砂効率を補正してやれば妥当な鉛直分布を求めることができる。つまり、 q_s に過小評価分 10% を加え、鉛直分布型捕砂器の捕砂効率を T_e とし (7) 式を仮定すれば、

$$T_e q = 1.1 q_s \dots\dots\dots (7)$$

$$T_e = \frac{1.1 q_s}{q} \dots\dots\dots (8)$$

結局、

$$q(z) = \frac{1}{T_e} Ae^{-B'z} \dots\dots\dots (9)$$

となり、簡単な現地観測から飛砂量の鉛直分布を求めることができる。

6. 結 論

飛砂量の鉛直分布は河村による式 (2) によってよく説明できる。特に砂表面近傍で飛砂量が集中している状況を的確に表す。しかしながら、式中に含まれる実験係数の決定は少々やかいかである。一方、岩垣による (1) 式は、砂表面近傍で飛砂量を過小評価するが、簡単に式中の実験係数を決定することができ、実用的と云える。

移動する飛砂量の 90% 以上は高さ 15 cm 以下で移動しており、この事実は飛砂防止工の設計・施工において考慮されなければならない事柄であろう。

なお、実験的に定められる定数、 a, G_0, h_0, A, B' についてはもう少し検討が必要である。近く稿を改めて、Coastal Engineering in Japan に投稿する。

謝辞：実験は電力中央研究所の飛砂風洞を用いて行った。前水理部長白砂孝夫氏、主席専門役鹿島遼一氏、元構造水理研究室長田中伸和氏、前構造水理研究室長田中寛好氏、主任研究員故斉藤昭三氏にお世話を願った。ここに記して感謝の意を表する。特に故斉藤昭三氏にはこの実験のみならず著者らが 1981 年頃より、この風洞を用いて行った一連の実験すべてにお世話になっている。氏の御助力なくして、今までの成果は考えられない。改めて多年の氏の御助力に感謝し、謹んで同氏の御冥福をお祈りする次第である。

この研究は平成元年度日本大学学術研究助成金、一般研究、および平成元年文部省科学研究費、一般研究(c) (課題番号 63550381) の助成を受けている。記して関係諸機関各位に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 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, Vol. 5, No. 3~4, pp. 95-112.
- Horikawa, K., S. Hotta, S. Kubota and S. Katori (1983): On the sand transport rate by wind on beach, Coastal Eng. Japan, Vol. 26, pp. 100-120.
- Horikawa K., S. Hotta, S. Kubota and S. Katori (1984): Field measurement of blown sand transport rate by trench trap, Coastal Eng. Japan, Vol. 27, pp. 213-232.
- Horikawa, K., S. Hotta and S. Kubota (1986): Field measurement of vertical distribution of wind speed with moving sand on a beach, Coastal Eng. Japan, Vol. 29, pp. 163-178.