飛砂粒子の跳躍水平飛行距離分布

Distribution of Horizontal Distance Traveled by Saltating Sand Grains in Air

保坂幸一1•中村永友2•久保田進3•堀田新太郎4

Koichi HOSAKA, Nagatomo NAKAMURA, Susumu KUBOTA, and Shintarou HOTTA

The distribution of the horizontal distance traveled by the sand grains in saltation, which is equal to the distribution of the falling sand grain rate in the region from the end of the sand bed and down wind, is quite similar to the vertical distribution of sand transport rate above the sand surface. This observation is explained by assuming that the height of the trajectories of transported sand grains in the air is different but the trajectories are similar in form. The wind tunnel experiment showed that the equation for the distribution of horizontal distance traveled by the grains converted from the vertical distribution of sand transport rate can be applied for sand grains smaller than 0.68mm.

1. はじめに

飛砂は匍行・転動,跳躍,浮遊の形態で移動する.移 動量の約85%程度が跳躍運動の形態で移動する.跳躍運 動にて空中に跳び出した砂粒子が再び着地するまでの水 平飛行距離(以後,簡単に水平距離と記す)は運動を記 述する重要な因子であるが、具体的な研究は、岩垣 (1950)によるものに限られている. Hotta • Horikawa (1991)は河村(1951)によって求められた飛砂量鉛直分 布式の地表面から上方z軸を砂床末端から風下側x軸に 変換した式が水平距離分布(砂床末端から風下側領域へ の落下飛砂量分布に等しい)の実験データを説明するこ とを示した. この結果は, 跳躍運動をしている飛砂粒子 の運動軌跡の高さが異なっていても、運動軌跡が相似で ある、と仮定すれば説明できる. Hotta・Horikawaのデー タは中央粒径0.3mmの砂のみに限られていたので、他の 粒径に対しても河村の変換式が適用できるかどうかを検 討するため、中央粒径が0.15、0.25、0.48、0.68、1.0mm の5種類の砂(図中ではD15, D25, D48, D68, D100と 表示) についての風洞実験をした.実験データは変換さ れた水平距離分布式に妥当な精度で一致した. 粒径 0.68mm より小さい粒径に対して,水平距離分布式に含 まれる実験によって決まる係数について、粒径と摩擦速 度を変数とする実験式を求めることができた、本研究の 目的は、この成果を報告することである.

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まとめて表記する.

1	IE.	会	員	修(工)㈱アイ・エヌ・エー河川第二部
2	韭	会	閪	(世),村

(1) 風速鉛直分布式

飛砂が発生している砂面上での風速鉛直分布は式(1) (Bagnold, 1954)で与えられる.

$$u_{z} = 5.75u \cdot \log_{10} \frac{z}{z'} + u' \tag{1}$$

ここに, u_{ι} は砂面上ある高さzにおける風速, u_{ι} は摩 擦速度であり, (u', z')はフォーカルポイント(式(1)の 曲線群が集まる点)である.

(2) 全飛砂量式

全飛砂量に関する算定式はいくつかあるが,ここで, 河村(1951)による式(2)を用いる.

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

ここに、qは全飛砂量、gは重力加速度、 ρ_{o} は空気の 密度、 u_{*} は移動開始限界摩擦速度であり、Kは実験係数 である.

(3) 水平飛距離分布式

検討の対象としたのは,河村(1951)によって求めら れた飛砂量鉛直分布式を前述したように変換した式(3) である.

$$q(x) = G_0 \left[\lambda \left\{ 2\sqrt{2}K_0(\xi) - 2\sqrt{2}\beta \sqrt{\frac{I_0}{g}} \xi K_1(\xi) \right\} + \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{a\beta \sqrt{0.75 I_0}}{g} \xi^2 \{K_0(\xi) + K_2(\xi)\} \right]$$
(3)

 $\beta = 3\pi\mu d / m, \qquad \lambda = \overline{u_1} / \sqrt{2gl_0}, \quad \xi = \sqrt{2x/l_0}, \qquad l_0 = \int_0^\infty lf(l) dl$

ここに、q(x)は砂床末端から風下側の水平距離xにお ける落下飛砂量、gは重力加速度、dは砂粒子の粒径、mは砂粒子の質量、 μ は空気の粘性係数、aは底面近傍 (砂面から10cm以下)の風速の鉛直分布を $u(z) = a\sqrt{z}$ と仮定したときの実験係数、 $\overline{u_1}$ は砂粒子が砂面より跳 び出すときの水平速度の平均値、 G_0 は単位面積より単位 時間内に空気中に跳び出す砂粒子の総質量, K₀, K₁, K₂ は0次, 1次, 2次の変形された第1種ベッセル関数, *l*₀は 砂粒子の跳躍水平距離の平均値である.

係数a, G_{0} , hは,実験で定められる定数である. λ は本 来実験により求める値であるが $\overline{u_{1}}$ の測定は難しい. 河 村(1951)は写真の軌跡より平均的な $\overline{u_{1}}$ の値を求め, λ の値としては平均的な値2.0を与えている. 以後の解析 においても,この値を使用するものとする.

3. 実験施設と方法

(1) 実験施設

実験に用いた風洞は幅1.0m,高さ1.1m,長さ20mの吹き出し型風洞である。風の吹き出し口から風下15mの地 点まで,風洞底部に厚さ10cmの実験砂層が敷設されて おり,断面1.0×1.0mが確保されている。風洞末端には, 2重金網構造の集砂室が設置されている。

(2) 風速計測装置

外力算定のため風速鉛直分布を測定した.風速の測定 には熱線風速計アレイを使用した.用いた風速計は砂表 面から2.5~62.5cmまでの高さに16台設置した.

(3) 捕砂器

飛砂量水平分布の測定には図-1に示す捕砂器を使用した.図-1のように,実験砂層からの距離別に27箇所の砂 の入口があり,砂表面から跳び出して各距離に落下する 飛砂粒子を捕砂できる構造となっている.捕砂器は,砂 床末端風下側に設置した.





(4) 実験に用いた砂の粒度特性

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. 図-2にこれらの砂の粒径加積曲線を 示す. それぞれの中央粒径は0.15, 0.25, 0.48, 0.68, 1.0mmとなる.

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の例を示す. 横軸を風 速,縦軸を砂面からの高さとし,縦軸を対数表示してい る. 図中の直線は,片対数グラフ上で実験データを近似 する直線である. 高さ30cm程度まで,対数則式(1)が成 立していることがわかる.全ケースについて対数則は成 立しており,これより摩擦速度を計算した.



(2) 全飛砂量

水平分布型捕砂器と風洞末端集砂室に捕捉された全飛 砂量(transport rate q)を図-4に示す. 図中の曲線は式(2) $cu_{x}=23$ cm/s, K=0.5, 1.0, 2.0のときの曲線である. データに多少のバラッキが見られるが、実験係数 K=1.0での式(2)が実験データを説明している. 粒径による差 異はなく、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い砂の実験定数が大きくなるとい う従来の研究の傾向は見られない.



(3) 使用した捕砂器の捕砂効率

捕砂器の幅は20cm,風洞の幅は1mである.捕砂効率 は、Wt/{(Wt+Ww)/5}と定義する.ここにWtは捕砂器 に捕捉された飛砂量、Wwは風洞末端集砂室に捕捉され た飛砂量である(Wt+Wwは1m幅を通過する全飛砂量 であり、(Wt+Ww)/5は20cm幅を通過する全飛砂量に相 当する).

図-5に捕砂効率を示す. 粒径による差異は小さく, 摩擦 速度が大きくなると捕砂効率は小さくなる傾向がある. *u*⋅=60cm/sで捕砂効率は0.7程度, *u*⋅=300cm/sで捕砂効 率は0.2程度である.





(4) 水平距離分布

図-6に測定された飛砂量水平分布の例を示す.水平距離分布は捕砂効率で補正されている.図中の曲線は式(3)による推定値である.曲線は次のような手順で決定した.砂面から高さ10cmまでの風速を用いて*a*を求める.*G*。

んは、試行錯誤により、図上において視覚で最もデータ に一致する値を決定した.



データに多少のバラッキが見られるが,推定された水平 距離分布曲線はデータに良く一致している.水平分布型 捕砂器の開口面積の変化点(風下21cm,110cm)でデータ の不連続が見られる.図-6は,水平分布型捕砂器の開口 部毎に捕砂された砂量を,開口面積で除することによっ て,単位面積当たりの落下飛砂量で表示している.この ことから,データの不連続性は,開口部が風下側に広が ることによって生じる飛砂量平均計算上の実験誤差であ ると考えられる.

(5) 式(3)の係数推定法

図-7にaと摩擦速度uの関係を示す.図-7はaとu・は近 似的に直線関係となることを示す.粒径D15~D68の範 囲においては、多少のバラツキはあるが、粒径による差 異はなく、実験式(4)を得る.D100については、式(5)で 表される.式(5)は式(4)と比べ、傾きは等しいものの、 切片が大きくなり、D100は、D15~D68の範囲に比べ、 等しいu・に対するaが大きくなる.

 $a = 1.33u_* + 104.5$ (0.15mm $\leq d \leq 0.68$ mm) (4)

 $a = 1.33u_* + 251.0$ (d = 1.0mm) (5)



図-8に両対数紙上の G_0 と u・の関係を示す. G_0 は粒径 による差異はあるようであるが、明確ではない. G_0 の値 はu・が大きくなるにつれて直線的に大きくなる. 図-8で G_0 とu・の直線関係を仮定すると、実験式(6)を得る.

 $G_0 = 1.75 \times 10^{-7} \times u_*^{2.5}$ (0.15mm $\leq d \leq 1.0$ mm) (6)

ここに、 G_0 の単位はgf/cm³/s, u・はcm/sである. 図-9に $_{lb}$ とu・の関係を示す、 $_{lb}$ とu・は直線に近似しており、式(7)の形で表すことができる.

$$l_0 = B' u_* + C' (7)$$

ここに, B'はs, C'はcmの次元を持つ値となる. 図-9 に示されるとおり, D15~D68の範囲において, 式(7)の



傾きは、粒径が小さいほど急になり、切片は、粒径が大 きくなるほど大きくなる. D100については、傾きがD68 と同程度、切片はD48とD68は中間程度であり、他の粒 径との関連性は確認できない. 傾きB'とdの関係を図-10 に示す. 図-10からD100の結果を除いてB'とdの関係を 調べると、直線関係が得られ式(8)で示される.

B' = -6.2d + 0.45 (0.15mm $\leq d \leq$ 0.68mm) (8)

次に式(7)の切片C'と粒径aの関係を図-11に示す.上述したとおり、D100については、他の粒度の砂に対して関連性が確認できないため、ここでも、D100は除いて検討を行うものとする.検討の結果、D15~D68の範囲では、B'と同様に直線関係が得られ式(9)で示される.

C' = 873 d - 26.8 (0.15 mm $\leq d \leq 0.68$ mm) (9)

式(7)に式(8), (9)を代入すると、 *l* についての実験式 (10)を得る.

$$U_0 = (-6.2d + 0.45)u_* + 873d - 26.8$$

 $(0.15 \text{mm} \le d \le 0.68 \text{mm})$ (10)





図-11 Cとdの関係

以上をまとめると

$$a = 1.33u_* + 104.5 \tag{11}$$

 $G_0 = 1.75 \times 10^{-7} \times u_*^{2.5} \tag{12}$

 $l_0 = (-6.2d + 0.45)u_* + 873d - 26.8 \tag{13}$

 $(0.15 \text{mm} \leq d \leq 0.68 \text{mm})$

となる.

実験係数 a, G₀, L が求まった. 従って, 粒度がよく 揃った中央粒径0.15mm~0.68mmの範囲の砂について, 水平距離分布の計算が可能となる.

5. 係数 a, G, L についての検討

式(3)は飛砂量鉛直分布式から変換された式である. もし、仮定のように飛砂粒子の軌道が相似であるならば、 飛砂量鉛直分布から求められる係数*a*とG₀は一致するは ずである.

久保田ら(2006)は飛砂量鉛直分布から

$$a = 1.88u_* + 210.0 \tag{14}$$

$$G_0 = 2 \times 10^{-9} d^{-2} u_*^{2.5} \tag{15}$$

を得ている.

式(11)と式(14),式(12)と式(15)は一致していない.紙 面に限りがあるので,詳しい検討は稿を改めるが,係数 aについての式(11)と式(14)の差異は式(3)に大きな影響 を与えない.

しかし, G_0 が問題となる.式(15)は粒径dがパラメター となっているが,式(12)はdがパラメターとして導入さ れない. G_0 は砂床末端近傍ある微少距離xにおける式(3) の境界値である.実験において最も計測が困難で,計測 値に誤差が生じやすい地点である.図-8にプロットされ たデータは粒径の差異を表すことができるまでの精度に 測定されていないと考えられる. G_0 の推定にはさらなる 実験と検討が必要である.従って, G_0 の値としては,実 験が精度よくなされた飛砂量鉛直分布測定より得られた 式(15)を適用するのが妥当であろう.

*h*は x 軸方向の曲線の形を与える係数であって, G₆に は関係しない. 図−6にみられるように推定曲線はデータ によく一致しているので, *h*についての実験式は問題が ないと考えられる.

6.結論

飛砂量の鉛直分布を表す式より変換された式(3)は, 飛砂量の水平距離分布の測定結果を説明した. 粒径0.15 mm~0.68mmの砂については,式(3)中の係数*a*, *G*, *l*。 の実験式を求めることができた. 粒径1.0mmにおいては, 他の粒径の砂と傾向が異なり,求められた実験式の適用 範囲(粒径0.15mm~0.68mm)外となった. 粒径0.68mm以 上の砂における係数については,今後の研究課題となる. 本実験によるG₀の推定については,精度上の問題があ

り、さらなる検証が必要である。

本研究により,粒径がよく揃った中央粒径0.15mm~ 0.68mmの範囲の砂について,式(11),(15),(13)から飛 砂量の水平距離分布(砂床末端から風下側領域への落下 飛砂量分布)の計算が可能となった.

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, 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.
- 久保田進・保坂幸一・鵜飼正志・堀田新太郎(2006):風洞実 験データに基づく飛砂量鉛直分布予測法の確立,海岸工 学論文集,第53巻, pp.431-435.
- Hotta, S. and K, Horikawa. (1991) : Vertical distribution of sand transport rate by wind, Coastal Eng. in Japan, JSCE, Vol.36, pp.81-100.

560