

気流による砂の輸送特性と風速分布

三島 豊秋* ・ 中野 晋** ・ 寒川 章***
土屋 義人**** ・ 三井 宏*****

1. 緒 言

流体による砂の輸送現象の一つに風による砂の輸送現象である飛砂がある。飛砂における風速分布には砂と流体の相互作用の結果としてねじれが生じる。Kink と呼ばれるこの現象は、最初 Bagnold (1954) により発見され、河村 (1951) および土屋・河田 (1975) により砂と流体の運動量の保存則へと結び付けられている。

Anderson and Haff (1988) および辻本・赤城 (1994) は、飛砂特有の現象である splash および乱流モデルとして $k-\epsilon$ モデルなどを考慮した kink における風速分布の数値解析を行っている。最近、Raupach (1991) は Anderson らと同様の数値解析に基づいて saltation layer 内をも含む飛砂における風速分布の表示式を求めている。その風速分布の表示式は、飛砂における風速分布を定量的に評価するうえで重要であると思われるが、必ずしも実験的に裏付けられてはいない。また、飛砂における kink の詳細な現象に関しても未だ不明確な点が多く残されている。

本研究では、小型風洞実験装置を用いた気流による砂の掃流現象に関する実験を行うことにより、飛砂における風速分布および砂の輸送特性について検討する。まず、測定された風速分布と Raupach の理論によるそれとの比較により、風速分布および粗度高さを検討する。さらに、ビデオ撮影により計測された砂の移動速度および個数濃度に基づいて砂の輸送特性の検討をした後に、それらと風速分布に基づいて気流の混合距離について検討する。

2. 実験装置および概要

風洞実験は、送排風機を備えた高さ約 18 cm および幅約 19 cm の断面を持つ全長約 8.5 m の吐き出し型風洞実験装置を用いて行った。図-1 に小型風洞実験装置の概形を示す。風洞上面および片側面はアクリル製であり、

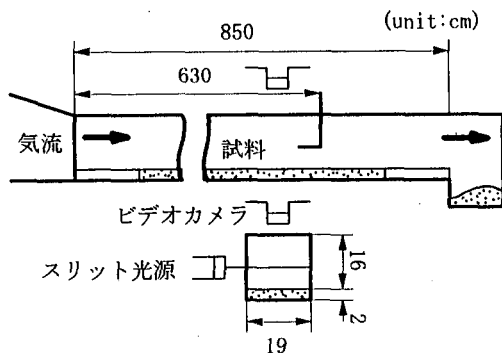


図-1 小型風洞実験装置の概形

風洞の末端部には砂採集用の溝が付けられている。風洞の風上側と風下側の一部は、厚さ約 2 cm のベニヤ板の上に粗度砂粒が貼り付けられたアルミ板を敷いた固定床になっている。残りの区間は厚さ約 2 cm に砂が敷き詰められた移動床になっている。すなわち、移動床実験を行うときの風洞断面の実際の高さは約 16 cm である。また、実験に用いる試料には平均粒径 0.46 mm および乾燥比重 1.80 のイシカワライト 4 号を用いている。

風速分布は風上側から約 6.3 m の地点の断面中心部でピトー管を用いて測定した。砂の移動速度および個数濃度は、映写機およびスリットを用いて厚さ約 2 mm の光を水平方向に風洞内部に当て、このスリット光源内部を通過する砂粒が発する反射光を風洞上面からビデオ撮影することによりその個数と長さから算定した。また、全飛砂量は風洞実験装置末端部の砂採集用の溝に溜る砂と送風時間より算出した。

White and Mounla (1991) が指摘しているように、飛砂に関する実験を行う場合には、風洞に対する Reynolds 数および Froude 数が一定の条件を満足しないと現象の再現性が悪くなる。本実験で用いた小型風洞実験装置はこれらの条件を満たしていない。しかしながら、気流による砂の輸送現象としては類似点があると考えられるため、ここではこれらの点には目をつぶり実験データの解析を行う。

* 正会員 博(工) (株)ニュージェック 技術開発部開発室

** 正会員 博(工) 徳島大学助教授 工学部建設工学科

*** 山口県庁周南流域下水道建設事務所

**** 正会員 工 博 名城大学教授 都市情報学部

***** 正会員 工 博 徳島大学助教授 工学部建設工学科

3. 移動床上での風速分布

3.1 Raupach による風速分布の理論

Raupach (1991) は, Anderson and Hallet (1986) および Anderson and Haff (1988) による数値解析手法と同様の手法を用いて飛砂における風速分布の解析を行い, その結果導かれる気流のせん断応力の補間式と混合距離理論に基づいて kink を含む飛砂における風速分布の理論を展開している。彼により導かれた飛砂における saltation layer 内を含む風速分布および saltation layer 外縁のみに対する風速分布はそれぞれ次式のように表される。

$$u = \frac{u_*}{\kappa} \left[\ln \left(\frac{z}{z_0} \right) + (1 - \sqrt{r}) \{ E_1(-z_0/H_s) - E_1(-z/H_s) \} \right] \quad (1)$$

$$u = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{z_{0s}} \right), \quad z_{0s} = (e^{-\gamma} H_s)^{1-\sqrt{r}} z_0^{\sqrt{r}} \quad (2)$$

ここに, κ は Karman 定数, z_0 および z_{0s} は saltation layer 内を含む風速分布および saltation layer 外縁のみに対する風速分布のそれぞれに対する粗度高さ, u_* は摩擦速度, g は重力の加速度, α および β は実験定数, γ は 0.577 で与えられる Euler 定数であり, また r および H_s はそれぞれ摩擦速度の比および saltation layer の層厚に対応する高さであり, それぞれ次式で与えられる。

$$\sqrt{r} = \sqrt{\frac{\tau_a}{\tau}} \Big|_{z=0} = \frac{u_{*t}}{u_*}, \quad H_s = \frac{\beta \alpha^2 u_*^2}{2g} \quad (3)$$

ここに, τ_a および τ はそれぞれ気流のせん断応力および固気二相流としての全せん断応力, u_{*t} は砂表面における気流のせん断応力に対する摩擦速度であり, ここでは衝突による移動開始限界での値 20.9 cm/s を適用している。また, 式 (1) における $E_1(x)$ は次式で与えられる

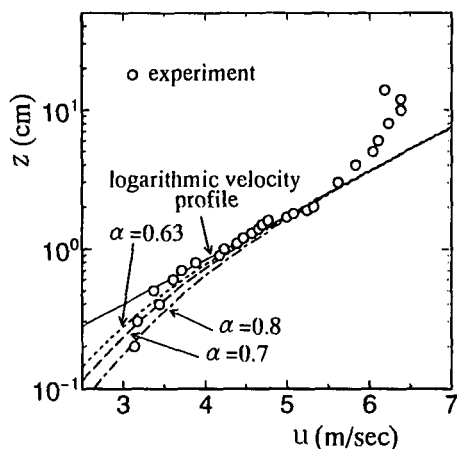
積分関数である。

$$E_1(x) = \int_x^\infty \frac{e^{-t}}{t} dt \quad (4)$$

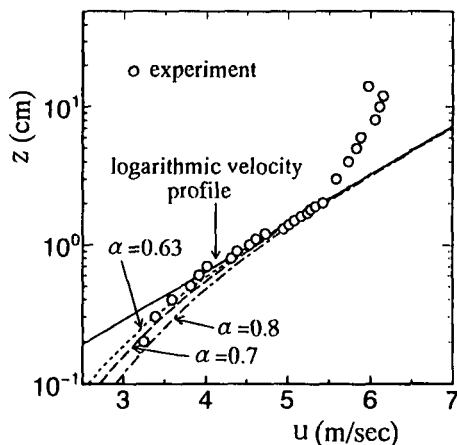
3.2 移動床上での風速分布

移動床上における気流の風速分布には, 輸送されている砂と流体の相互作用の結果として kink と呼ばれるねじれが生じる。図-2 は, 10 cm 風速 $u_{0.1}$ が 6.4 m/s のときの移動床上での風速分布と固定床上でのそれを比較したものである。移動床上での風速分布には, 明らかに kink としての風速分布のねじれが現れている。また, 固定床上でのそれは, 3 cm 以下の高さまでは対数則分布としての傾向が現れているが, 2 mm の高さでの風速はわずかに対数則からはずれている。これは, 風洞内における二次流の影響であると考えられる。

図-3 は, 移動床上での風速分布と式 (1) および (2) で与えられる Raupach によるそれとを比較したもので



(a) $u_{0.1} = 6.1$ m/s のとき



(b) $u_{0.1} = 6.4$ m/s のとき

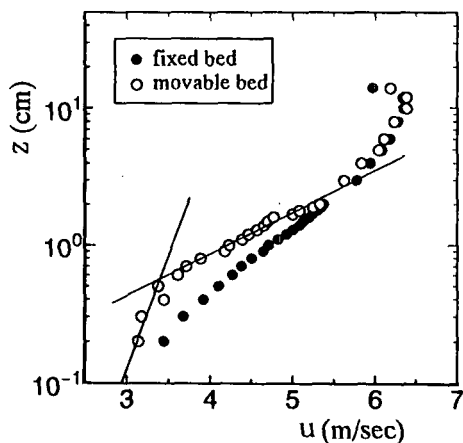


図-2 移動床上と固定床上での風速分布の比較

図-3 実験結果と Raupach の理論曲線の比較

ある。Raupach は砂表面からの砂粒の跳躍速度に Anderson and Hallet (1986) によって与えられた分布を用いており、そのときの実験定数 α の値は 0.63 である。図中には、その値に加え 0.7 および 0.8 の場合も同時に示されている。式 (1) で与えられる $\alpha=0.63$ のときの kink を含む風速分布の理論式は、高さ 2 mm での値を除いて実験値をよく表している。図-2 で述べたように、固定床上においても高さ 2 mm での風速には二次流の影響と考えられる対数則からのずれが現れていたため、この点を考慮するとき、式 (2) で表される風速分布における実験定数 α は 0.63 で与えてよいと考えられる。

3.3 粗度高さ

移動床上での風速分布における粗度高さは、砂の移動開始とともに増大し、固定床上とは異なった値を持つようになる。Owen (1964) に従うとき、saltation layer 外縁の風速分布に対する粗度高さは次式で与えられる。

$$\frac{z_{0s}}{d} = \frac{u_*^2}{2g} e^{-\kappa D'} \dots \dots \dots (5)$$

ここに、 d は砂粒の粒径であり、また D' は 9.7 で与えられる saltation layer の層厚の高さにおける風速より定められる定数である。また、Rasmussen and Mikkelsen (1991) は、彼らの行った実験結果に基づいて $C_0 = e^{-\kappa D'} = 0.022$ としている。

図-4 には、式 (1) および (2) に基づいて実験より得られた粗度高さ z_{0s} および z_0 が Shields 数 $u_*^2 / \{(\rho_s / \rho_a - 1)gd\} (= \tau^*)$ に対する変化として示されている。ここに、 ρ_a および ρ_s は気流および砂粒の密度である。また、固定床上における粗度高さおよび Rasmussen らによる実験結果に加え、 $z_0/d=0.03$ のときの式 (4) で与え

れる粗度高さ z_{0s} の理論曲線および式 (5) で与えられるそれと同時に示されている。

移動床上における saltation layer 外縁での風速分布に対する粗度高さは、Shields 数の大きなところでは Rasmussen らの結果とほぼ同じ値であるが、流動開始限界近傍での値はかなり小さな値となっており、固定床上での風速分布に対する粗度高さとはほぼ同じ値になっている。彼らの実験結果には固定床としての粗度高さが示されていないため正確なことは不明であるが、流動開始限界近くで粗度高さの急激な減少が見られ、式 (5) で表される Owen および Rasmussen らによる表示式とは異なる傾向になっている。これは、流動開始限界近くでは砂粒の運動特性などが多少異なるためであると考えられる。

図中に示されている kink を含む風速分布に対する粗度高さは、ここでの実験では Shields 数によらずほぼ 0.03 の一定値になり、Rasmussen らの実験結果に対しては Shields 数の増加に伴い減少するような傾向になっている。Kink における focal point の存在を考慮するとき、この粗度高さは Shields 数によらず一定値となるか、もしくは増加に伴って減少するかのどちらかであると考えられる。この点に関してはさらに精密な実験が必要であると思われる。

4. 砂の掃流現象における内部特性

4.1 砂の輸送特性

前述したように、砂の輸送速度および個数濃度の鉛直分布はビデオ解析により測定できる。これらの値を用いると、砂の体積濃度、抗力、および砂の輸送量の鉛直分

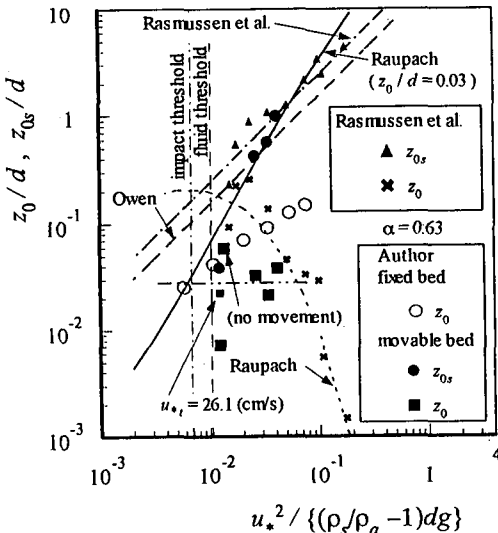


図-4 粗度高さ

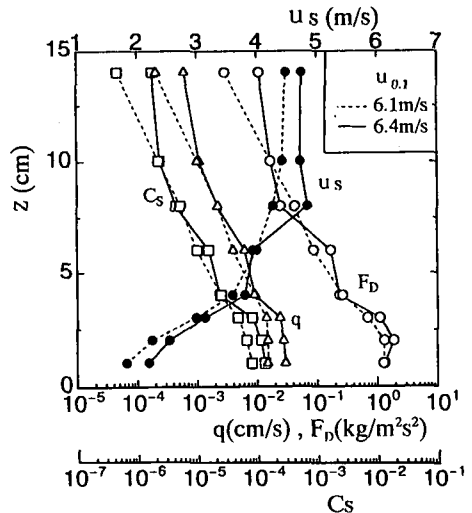


図-5 砂の輸送特性

布が概算される。なお、実験における全飛砂量の Shields 数に対する変化は係数が 1.9 のときの河村の飛砂量則に従っていたため、風洞内における飛砂はほぼ平衡状態に達していたと思われる。

図-5 に測定された砂の輸送速度 u_s 、体積濃度 C_s 、抗力 F_D 、および砂の移動量 q の鉛直分布を示す。このとき、体積濃度は測定された個数濃度に 50% 粒径を乗することにより求めている。図に示されているように、砂の輸送速度は 7 cm あたりの高さまでは増加するが、それより高いところではほぼ一定の速度で輸送される。一方、体積濃度は砂表面に向かって指数的に増加するような分布になっている。その結果、砂の存在によって生じる砂の移動量および流体との相互作用力にあたる抗力および砂の移動量は、個数濃度と同様に砂表面に向かって指数的に増加し、砂表面近傍に集中する。

4.2 風速場の内部特性

砂の移動を伴う気流においては、砂の輸送によって気流の乱れの内部特性に変化が生じる。ここでは、平衡状態における力の釣り合いに基づいて移動床上における気流の内部特性について考察する。平衡状態を仮定したときの高さ z での気流のせん断応力の分布は次式により評価される。

$$\tau_a = \int_z^h F_D dz' + \rho_a u_*^2 \left(1 - \frac{z}{h}\right) \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 h は最大風速が生じる点の砂表面からの高さである。このとき、最大風速が生じる点での気流のせん断応力は 0 になると仮定している。また、式 (7) からわかるように、ここでは固定床上での気流のせん断応力としては三角形分布が仮定されている。

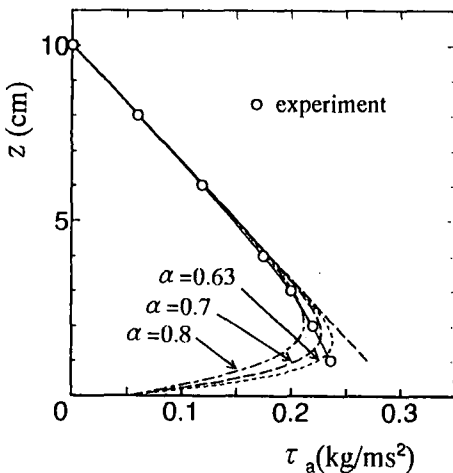
図-6 は、実験結果に基づいて式 (7) より導かれる気

流のせん断応力と Raupach によるせん断応力の分布式とを比較したものである。ただし、Raupach によるせん断応力の分布式は式 (7) において $z/h \ll 1$ を仮定したときのせん断応力分布に対応しているため、図中では式 (7) に対応するように書換えた次式と比較されている。

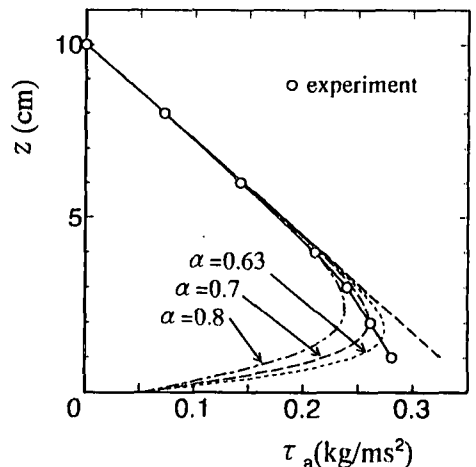
$$\frac{\tau_a}{\rho_a u_*^2} = \{1 - (1 - \sqrt{r})e^{-z/H_s}\}^2 - \frac{z}{h} \dots\dots\dots (8)$$

実験より概算された気流のせん断応力の分布は、Raupach による分布に比べ高い位置からせん断応力の減少が始まっているが、砂表面近くにおいては Raupach による分布に比べかなり大きな値となっている。実験により概算された気流のせん断応力の分布には、特に砂の濃度が高い砂表面近くでビデオ解析上の誤差が含まれているとも考えられるが、砂表面より高いところにおいても砂による相互作用の影響はかなり現れると推察される。

気流の渦動粘性係数 ε および混合距離 l は、それらの定義に基づいて図-6 に示されている気流のせん断応力より算定される。図-7 に実験結果より算定された移動床および固定床上における気流の渦動粘性係数の分布を示す。1 cm 以下の高さにおいては移動床および固定床上での気流の渦動粘性係数は両者ともに対数目盛上で直線分布になっているが、2 cm 以上の高さにおける移動床上でのそれは固定床上での値に比べ大きな値になっている。同様に、図-8 は固定床および移動床上における気流の混合距離の分布を比較したものである。図中には Prandtl の仮定に基づく混合距離を表す直線も比較のため示されている。固定床上における気流の混合距離の分布は、高さ 10 cm におけるいずれの風速の場合もほぼ Prandtl の仮定に従う直線分布になっている。しかしな



(a) $u_{0.1} = 6.1$ m/s のとき



(b) $u_{0.1} = 6.4$ m/s のとき

図-6 移動床上での気流のせん断応力の分布

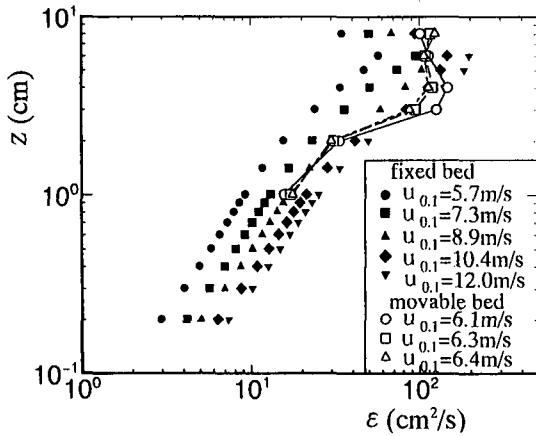


図-7 渦動粘性係数の分布

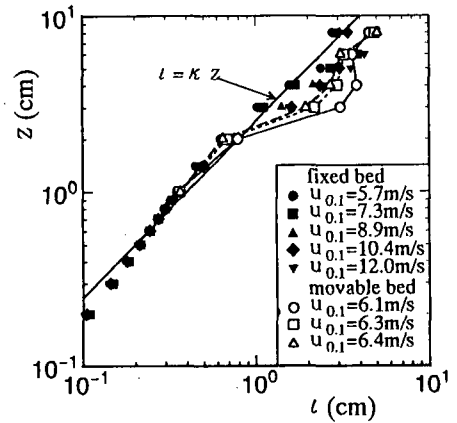


図-8 混合距離の分布

がら、移動床上におけるそれは、高さ1cmまではPrandtlの仮定に従っているが、それ以上の高さでは混合距離が増大しているのがわかる。

図-7および8に示したように、移動床上における渦動粘性係数および混合距離は、高さ2cm以上においてともに固定床上におけるそれらに比べ大きくなっている。これらの結果は、ビデオ解析上の誤差および固定床上での気流のせん断応力に三角形分布を仮定したことなどの影響も考えられるが、砂の移動に伴う粗度の変化により乱れが発達したためでもとも考えられる。一般に、高濃度の固気および固液二相流においては乱流が抑制され、また稀薄な場合には発達させられることが知られている。ただし、これらの結果は飛砂における砂の掃流現象のような saltation とは異なる砂粒の運動形態の場合に対する結果であることから、正確な結論を出すことはできない。しかしながら、これらの図に示した結果より、砂の掃流現象においても濃度の高い砂表面近くにおいては乱れが抑制され、また稀薄なところでは発達させられているとも考えられる。これらの特性を知るために、今後 saltation layer 内も含む Reynolds 応力の正確な測定が望まれる。

5. 結 語

小型風洞実験装置を用いた気流による砂の掃流現象に関する実験を行うことにより、移動床上における風速分布について考察した。さらに、ビデオ解析により測定さ

れた砂の輸送速度および個数濃度の分布に基づいて、砂の輸送特性および気流の内部特性についても検討した。これらの特性は砂の掃流現象の力学機構を知るうえで重要な特性であり、今後これらの特性に関するさらに精密な実験が望まれる。

参 考 文 献

- 河村竜馬 (1951): 飛砂の研究, 東京大学理工学研究報告, 第5巻, pp. 95-112.
- 辻本哲郎・赤城里至 (1994): 不規則連続跳躍モデルと $k-\epsilon$ モデルを用いた飛砂の運動と風の解析, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 386-390.
- 土屋義人・河田恵昭 (1975): 砂粒の saltation に基づく飛砂量則について, 第19回水理講演会論文集, pp. 7-12.
- Anderson, R. S. and B. Hallet (1986): Sediment transport by wind: toward a general model, Geol. Soc. American Bull., Vol. 97, pp. 523-535.
- Anderson, R. S. and P. K. Haff (1988): Simulation of eolian saltation, Science, Vol. 241, pp. 820-823.
- Bagnold, R. A. (1954): The Physics of Blown Sand and Desert Dunes, Mathuen & Co., London.
- Owen, P. R. (1964): Saltation of uniform grains in air, Jour. Fluid Mech., Vol. 20, pp. 225-242.
- Raupach, M. R. (1991): Saltation layer, vegetation canopies and roughness lengths, Acta Mech., Suppl. 1, pp. 83-96.
- Rasmussen, K. R. and H. E. Mikkelsen (1991): Wind tunnel observations of aeolian transport rates, Acta Mech., Suppl. 1, pp. 135-144.
- White, B. R. and H. Mounla (1991): An experimental study of Froude number effect on wind-tunnel saltation, Acta Mech., Suppl. 1, pp. 145-157.