

強風下における飛砂についての実験的研究

堀 川 清 司*・堀田新太郎**・久保田 進***・香 取 完 和****

1. 緒 言

季節風が卓越し、飛砂が発生している海岸においては飛砂による砂移動も海岸変形の一要因として土砂収支に加えるべきであると考えられる。そのためには海岸における飛砂量を工学的に妥当な精度で評価できるような推算法を確立する必要がある。そこで、著者らは研究の一手段として一連の現地観測を実施してきた^{1),2),3)}。しかしながら、現地観測で得られた飛砂量は、摩擦速度が 60 cm/s 以下の条件での値であった。摩擦速度 60 cm/s は地表面上 5 m の高さでの風速に換算すれば、10 分間平均風速、11~12 m/s (瞬間最大風速で 17~20 m/s) 以下となる。実際には、これ以上の強風がしばしば出現している。しかし、現地で摩擦速度 60 cm/s 以上の条件下でのデータを得るのは困難なので風洞実験を行った。

2. 実験装置と実験方法

実験に用いた風洞は、幅 100 cm、高さ 110 cm、テストセクションの長さ 20 m の吐き出し型風洞である。テストセクションの末端から 3 m の区間は拡幅されており、その背後には集砂箱が設けられている。底面に厚さ 10 cm に砂を敷き詰めた状態で、断面が 100×100 cm となる。実験には二種類の砂を用いた。1 つは静岡県浜松市米津浜海岸の砂 (以後米津砂と略記する) であり、中央粒径 0.30 mm、均等係数 1.7 と、粒径はよく揃っている。ほかは、茨城県鹿島海岸の砂 (以後鹿島砂と略記する) であり、中央粒径 0.47 mm、均等係数 2.7 と、広い粒径分布を有する。これらの砂の粒径加積曲線を図-1 に示す。

実験は、次のような手順でなされた。風洞底面に厚さ 10 cm に砂を敷き、表面を注意深く平らにした後、風を吹送した。風の吹送時間は風速によって異なり、3~10 分間である。風洞のテストセクション末端を通過した全砂量を飛砂量として計量した。毎回の実験終了後、次回の実験のために、風洞内に砂を補充し十分に混ぜ合わせ

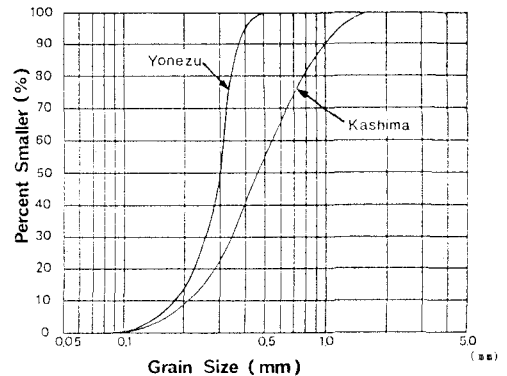


図-1 実験に用いた砂の粒径加積曲線

た後、砂層面を再び平らに均した。

また、飛砂の粒径分布を検討するために、風洞末端を通過して集砂箱に捕捉された砂の粒度分析を、全実験ケースについて行った。さらに、鹿島砂を用いた実験では、風洞内の砂表面に砂のふるい分け効果が観察されたので、テストセクションの風上端から、4 m 間隔の 5 点で表層砂 (厚さ約 5 mm) を採取して粒度分析を行った。

風速の測定は、熱線風速計を砂表面より 1, 2, 10, 20 cm の高さに設置して行った。ただし、鹿島砂の実験においては高さ 1 cm の風速のかわりに高さ 2.5 cm の風速を測定したケースもある。

3. 実験結果と検討

3.1 風速の鉛直分布

図-2 および 図-3 に米津砂と鹿島砂による実験時の風速の鉛直分布の一例を示す。米津砂の場合には、砂面上 20 cm までの高さの範囲では対数則が成立していると判断でき、focal point (u' , z') を求めると、 $u'=250$ cm/s、 $z'=0.6$ cm となる。この値は、昭和 57 年 1 月に米津浜における現地観測で得られた値にほぼ一致し²⁾、また、昭和 56 年 1 月の同海岸における現地観測で得られた値に対しては上限値となる。一方、鹿島砂の場合も多少データのばらつきが見られるものの対数則が成立している。また focal point を通らない例も見られるが focal point の概略の値は $u'=320$ cm/s、 $z'=1.2$ cm となつて

* 正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 東京都立大学助手 工学部土木工学科

*** 正会員 海岸環境工学研究センター研究員

**** 正会員 工修 海岸環境工学研究センター研究員

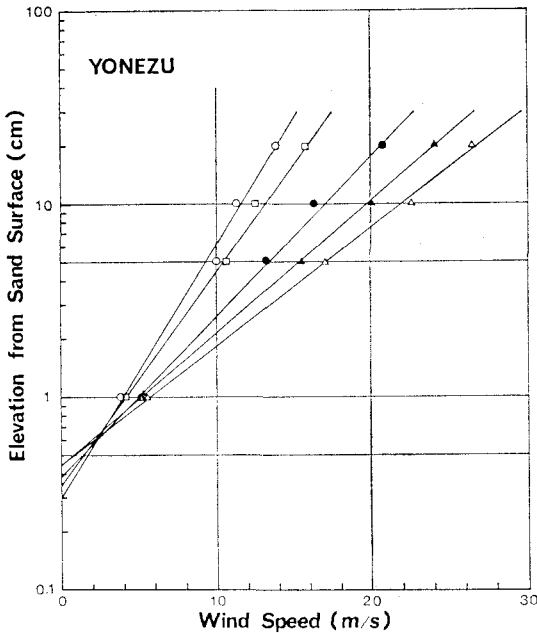


図-2 風速の鉛直分布(米津兵の砂の場合)

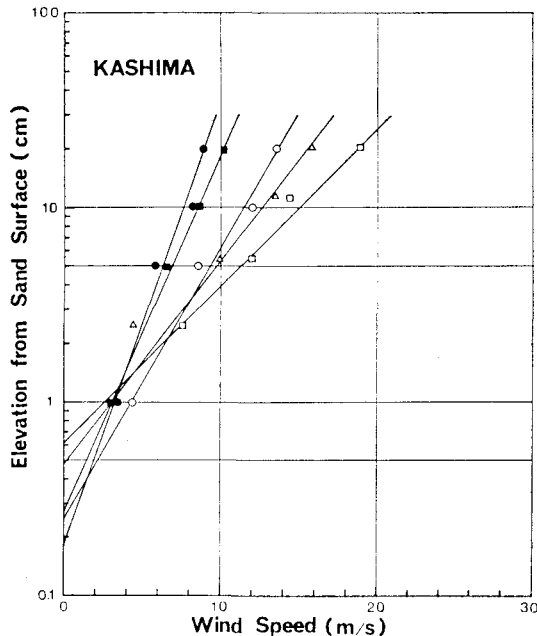


図-3 風速の鉛直分布(鹿島海岸の砂の場合)

いる。

風速の鉛直分布が対数則を満足するとすれば、摩擦速度 u_* は、風速分布の勾配から次式で与えられる。

$$u_* = (u_{10} - u_1) / 5.75 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 u_{10} 、 u_1 は高さ 10 cm と 1 cm での風速である。

3.2 飛砂量について

図-4 に飛砂量についての実験結果を示す。図-4 に実線で示されている曲線は、 $d=0.30$ mm (米津砂の中央

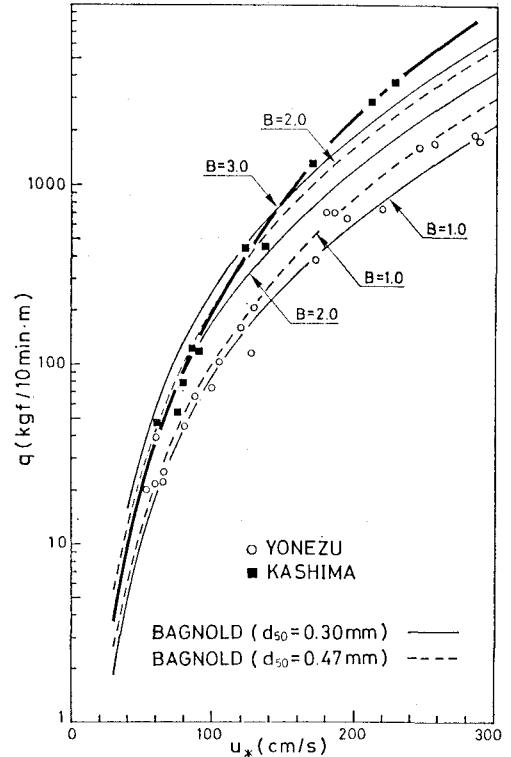


図-4 飛砂量についての実験結果

粒径)、係数を 1.0, 2.0, 3.0 とした場合の Bagnold 公式⁴⁾ による計算値である。この曲線群は移動開始限界摩擦速度 $u_{*c}=20$ cm/s (粒径約 0.30 mm の砂粒子の限界摩擦速度) を仮定した河村公式⁵⁾ に一致する。同じく破線で示されている曲線は $d=0.47$ mm (鹿島砂の中央粒径) とし、係数を 1.0, 2.0 とした場合の Bagnold 公式による計算値である。

Bagnold 公式、河村公式は次のように与えられる。

$$q = B \frac{\rho_a}{g} \sqrt{\frac{d}{D}} u_*^3 \quad (\text{Bagnold}) \quad \dots\dots\dots (2)$$

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

q は単位時間・単位幅の飛砂量、 K と B は係数、 ρ_a は空気密度、 g は重力加速度、 u_* は摩擦速度、 u_{*c} は移動限界摩擦速度、 D は標準粒径 0.25 mm である。

Horikawa and Shen⁶⁾ は河村公式と Bagnold 公式は本質的に同じで、係数が適切であれば、 u_* が大きくなると (約 $u_* = 35$ cm/s 以上) 計算される飛砂量はほぼ等しくなるが、河村公式は砂の移動限界摩擦速度が考慮されているので、 u_* が小さい部分では飛砂量を合理的に与えることを述べている。著者等も従来、実験結果や現地観測の検討に河村公式を用いてきたが、粒径が変化する場合には Bagnold 公式を用いる方が議論しやすいので、

ここでは Bagnold 公式を用いて議論を進めていくことにする。

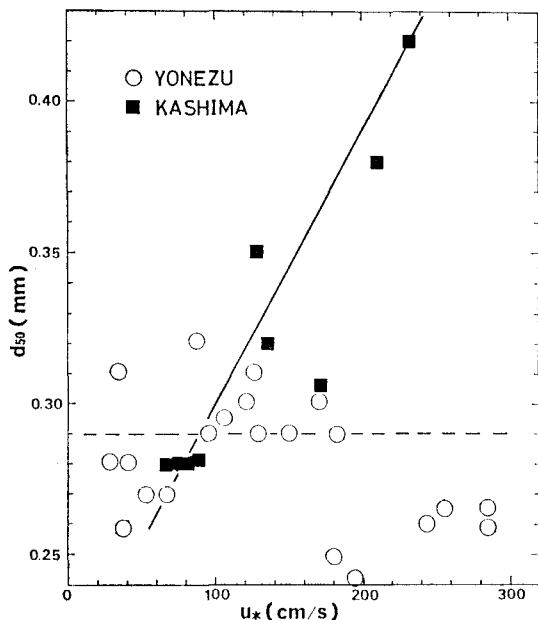
図—4 より、粒径の揃った米津砂については $u_* = 50 \sim 300$ cm/s の間で実験係数 $B=1.0$ を与えた Bagnold 公式によく一致する。一方、砂の粒度分布の広い鹿島砂は米津砂と傾向を異にする。鹿島砂の実験の飛砂量を Bagnold 公式で評価するならば、係数は u_* が小さい部分で約 2.0 で、 u_* が大きくなるほど係数を大きくしなければならぬことを示している。

Bagnold は u_* が一定の下で平均粒径は同じであっても、粒径のよく揃った砂より粒度分布の広い砂に対して Bagnold 公式の実験係数が大きくなる——結果として飛砂量が多くなる——理由として、次のように述べている。すなわち、粒度分布の幅が広いと saltation の状態にある砂粒子が着地する時に、砂表面では saltation している粒子より大きな粒子に当たる可能性（確率）が増し、空気中に再度はね返る確率が大きくなる。

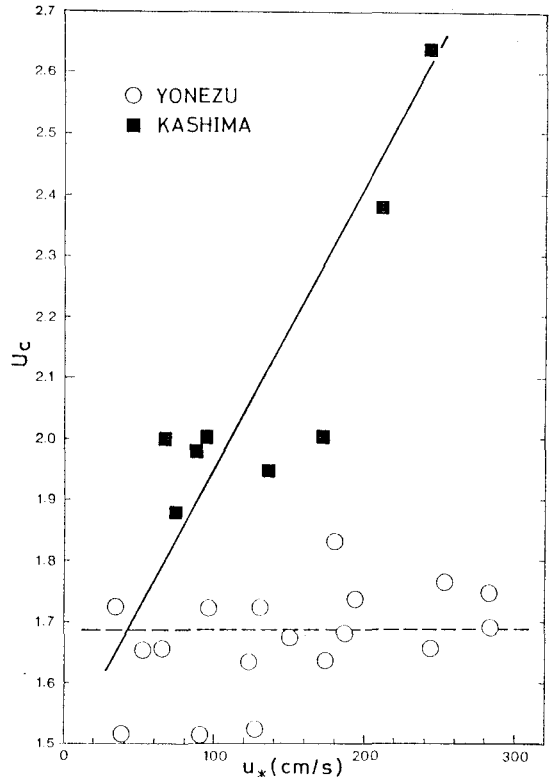
したがって、saltation している粒子が砂面に突込み、エネルギーを失う確率が小さくなる。結果として移動する砂の量が多くなる。

米津砂の d_{50} は 0.3 mm で鹿島海岸の d_{50} は 0.47 mm であり、中央粒径は同じでないが粒径の揃った米津砂よりも粒度分布の広い鹿島砂の係数が大きくなることが理解できる。しかし、鹿島砂の実験にて飛砂量は u_* が大きくなると推算飛砂量よりも多くなる。すなわち、公式の係数が大きくなる理由の説明がつかない。従って、別のメカニズムを考える必要がある。

図—5 と 6 は風洞末端集砂箱より採集した砂のふるい



図—5 摩擦速度と中央粒径の関係



図—6 摩擦速度と均等係数の関係

分け試験の結果を示す。図—5 は中央粒径 d_{50} 、図—6 は均等係数 $U_c = d_{60}/d_{10}$ (d_{60} と d_{10} は粒径加積曲線における 60% と 10% に対する粒径である) を示す。データにばらつきが見られるものの図—5 と 6 にある傾向が認められる。

鹿島砂は u_* が大きくなると捕捉された砂の中央粒径も大きくなり、飛砂の d_{50} と U_c はもとの砂層の d_{50} と U_c に近づいている。米津砂は、 u_* にかかわらず d_{50} は 0.24~0.32, U_c は 1.5~1.8 でほぼ一定である。

Bagnold 公式は、飛砂運動が平衡状態にある単一粒子の saltation 運動を仮定して誘導されたものである。従って、飛砂を発生させている砂層と飛砂の性格の相違は考慮されてなく、Bagnold 公式に用いられている飛砂の代表径として砂質を代表する粒径は、平均粒径あるいは中央粒径を用いている。今回の実験結果によれば比較的粒径の揃った米津砂の場合は砂層の中央粒径を用いた Bagnold 公式（あるいは河村公式）によく一致する。しかし、分布の幅の広い鹿島砂は u_* が大きくなるほど大きな係数を与えなければならぬ。この現象を説明するために、Bagnold 公式における代表径 d に飛砂の代表径（中央粒径）を用いることにすれば、鹿島砂の実験結果が定性的に説明できる。すなわち、Bagnold 公式の砂の代表径は u_* の関数で u_* が大きくなれば代表径 d も

大きくなると考えればよい(図-5)。

前述のように考えれば、米津砂の場合、もとの砂層の中央粒径も飛砂の中央粒径もほぼ等しいから、 u_* が大きくなっても係数が大きくなる必要はないことがわかり、実験結果の解釈に矛盾を生じない。

そこで、従来の研究成果と今回の実験結果も表現できる飛砂量式を考えてみる。下記のような表現が考えられる。

$$q = B \cdot C \frac{\rho_a}{g} \sqrt{\frac{d_{50}}{D}} (u_* + u_{*c})^2 (u_* - u_{*c}) \dots (4)$$

d_{50} は飛砂の中央粒径で u_* の関数、 D は飛砂を発生している砂層の中央粒径、 C は飛砂の粒径分布により与えられる係数で u_* の関数、 B は係数である。

鹿島砂の場合、図-4, 5, 6 のデータを利用して次式を得る。

$$q = \frac{\rho_a}{g} B \cdot U_c^\alpha \sqrt{\frac{d_{50}}{D}} (u_* + u_{*c})^2 (u_* - u_{*c}) \dots (5)$$

ここに

$$B = 1.18$$

$$\alpha = 1.95$$

$$U_c = 4.6 \times 10^{-3} \frac{T_1}{L_1} u_* + 1.5 \dots (6)$$

$$d_{50} = 9 \times 10^{-4} T_2 u_* + 0.21 \text{ (mm)} \dots (7)$$

ここに T_1/L_1 , T_2 は次元を合わせるための定数、鹿島砂の場合 1.0 とした。

式(5)に

$$D = 0.47 \text{ (mm)}$$

$$u_{*c} = 32 \text{ (cm/s)}$$

を代入した値を図-4に示してある。

3.3 風による砂表面のふるい分け作用について

図-7に、乾燥した鹿島砂を用いた実験の、風による砂表面のふるいわけ効果を調べた例を示す。 u_* が 89 cm/s の場合、風上側では小さい粒子の suspension および saltation による速やかな風下側への移動のために、中央粒径が大きく、かつ分布の範囲の狭い粒度組成になる。逆に風下側では風上側より移動してきた小さい粒子のために粒度組成は中央粒径を小さくし、その分布の幅を広げている。 u_* が 125 cm/s を越えれば、全砂粒子は速やかに移動し、 u_* が 89 cm/s の場合のように砂粒子の移動速度の差による砂表面の粒度分布の変化は起きない。

実際の海岸においては、風向、風速は絶えず変化しており、砂表面におけるふるい分け作用は風洞におけるより複雑になる。

図-8は、著者等が現地観測を実施している静岡県浜松市米津浜の調査結果である。調査はこの海岸における飛砂が卓越する期間(冬季)が終了したと思われる昭和

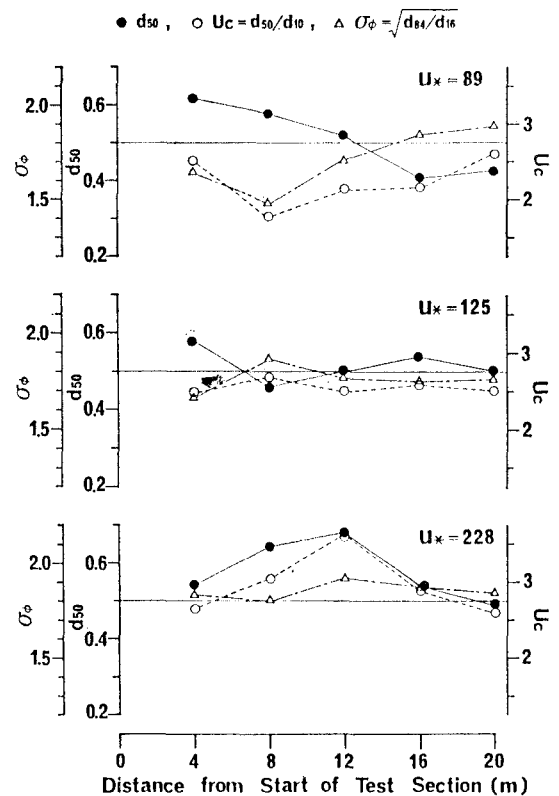


図-7 飛砂に伴う砂表面のふるい分け効果の例(鹿島砂の例)

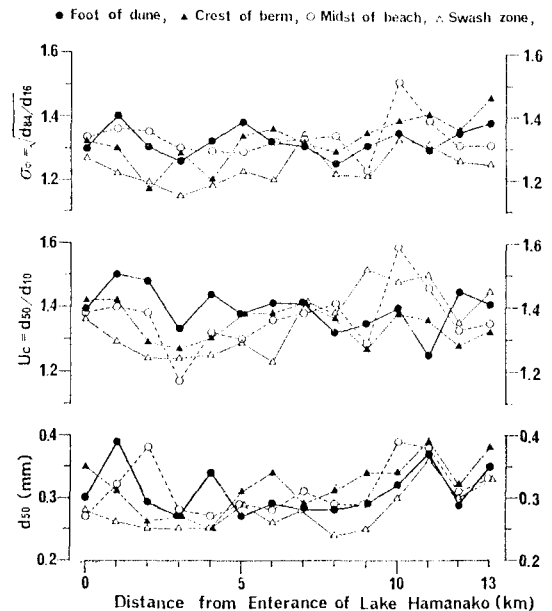


図-8 米津浜の粒径分布

58年4月3日に実施したものである。砂は西方の境界である浜名湖湖口より、東の境界と考えられる芳川河口まで約1km間隔で採集した。各地点では、汀線にほぼ平

行な海岸砂丘の根元、砂浜の中央、バームの先端、および swash zone の上端の4点で砂を採集してある。砂は表層の厚さ 2~3 cm で採集されている。

図-8 は、swash zone におけるより海岸砂丘の根元あるいは砂浜中央にて中央粒径が大きく、また分布の範囲が広い傾向を示す。また中央粒径は東西の境界である浜名湖湖口と芳川河口にて大きい。これは飛砂によるものよりむしろ2つの河口は漂砂の供給源であるためと思われる。この海岸では、海岸を構成する砂の粒度分布の範囲が狭く風も変動するので、飛砂による砂のふり分け作用は顕著でないと判断される。

4. 結 語

実験は、Bagnold 公式が飛砂量を合理的に与えることを示した。粒度の揃った米津浜の砂に対しては実験係数は約 1.0 程度であった。しかし、粒度分布の広い鹿島海岸の砂は u_* が約 120 cm/s 以下で係数は約 2.0 であった。また、 u_* が 120 cm/s より大きくなると係数はより大きくなった。 u_* が大きくなると Bagnold 公式の係数が大きくなる事実は、Bagnold 公式中の粒径を再定義することによって定性的に説明できた。

風洞実験は、鹿島砂に対して、風のふり分け作用を示した。米津砂に対しては顕著でなかった。また、米津

浜における粒度分布の調査は風のふり分け作用をとくに示さなかった。

謝 辞： 実験は、電力中央研究所の飛砂風洞によってなされた。また実験を遂行するに当って同研究所海岸環境水理研究室長鹿島遼一氏、同研究室研究員齊藤昭三氏に特別のご配慮を頂いた。紙上を借りて感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 堀川清司・堀田新太郎・久保田進・針貝聡一： 海岸における飛砂について，第 28 回海岸工学講演会論文集，pp. 574~578, 1981.
- 2) 堀川清司・堀田新太郎・久保田進： 現地海浜における飛砂量分布の観測，第 29 回海岸工学講演会論文集，pp. 269~273, 1982.
- 3) 堀川清司・堀田新太郎・久保田進・香取完和： トレンチトラップによる現地飛砂量の観測，第 30 回海岸工学講演会論文集，1983.
- 4) Bagnold, R. A.: The physics of blow sand and desert dune, Methuen & Co. Ltd., London, 1954.
- 5) 河村竜馬： 飛砂の研究，東京大学理工学研究所報告 5, pp. 95~112, 1951.
- 6) Horikawa, K. and H. W. Shen: Sand movement by wind action (on the characteristics of sand traps), B.E.B., Tech. Memo. No. 119, p. 51, 1960.