

湿砂面上における飛砂についての研究

堀 川 清 司*・堀田新太郎**・久保田 進***・香 取 完 和****

1. はじめに

著者等は、季節風が卓越し飛砂が発生している海岸では、飛砂による砂移動も海浜変形の一要因として海岸における土砂収支に考慮すべきであると考えている。

そのために、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算定法を確立すべく一連の研究を重ねてきた。飛砂は乾燥砂面のみならず砂面が湿潤状態であってもしばしば発生する。しかし、現象の複雑さと、実験や現地観測の困難さの故に、既往の研究は少なく、湿砂面上における飛砂現象については、ほとんどわかっていない。海岸における土砂収支の一要因として飛砂量を算定しようとするならば、湿砂面における飛砂現象のメカニズムも明らかにする必要がある。

本研究においては、湿砂面上における飛砂現象のメカニズムを、既往の研究の成果と著者等の一連の現地観測結果等から定性的に説明すると共に、湿砂面上での飛砂量に関する風洞実験を行った。以下にはこれらの結果を概説する。

2. 砂粒子の移動開始限界風速

これまでに湿砂面上における砂粒子の移動開始限界風速についての実験は、秋葉¹⁾、田中ら²⁾、西川ら³⁾、Bisal & Hsieh⁴⁾ によってなされている。図-1 は、それらの結果をまとめて示したものである。これらの実験では、砂粒子が移動を開始する限界条件として、ある高さでの風速を用いており、風速は、砂面上 7 cm から 30 cm の間のある高さで測られている。ここでは特に高さにこだわらず、もとの論文のデータを示している。図より、湿砂面上における移動限界風速は各々の実験によって差異が大きいがわかる。これは、(i) 限界条件の定義が実験者によって異なること、(ii) 砂表面含水比の定義が難しいこと、(iii) 限界風速は砂表面の含水比に密接に関係するが、砂表面の含水比は温度・湿度・風速などに

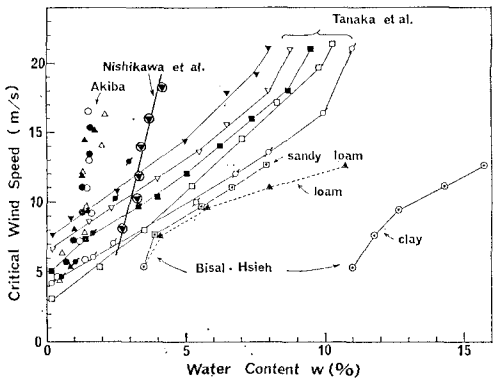
よる蒸発能の影響を強く受けること、などによると考えられる。また、図によると各々の実験結果の相違は大きい。また、図によると各々の実験結果の相違は大きい。また、図によると各々の実験結果の相違は大きい。

湿砂面上における砂粒子の移動限界摩擦速度（あるいは風速）を与える式として、次のような式が提案されている。

$$u_{*cw} = A \sqrt{\frac{\rho_s - \rho_a}{\rho_a} g d} (1.8 + 0.6 \log_{10} w) \\ 0.05 (\%) < w < 4 (\%) \\ \text{[Belly}^5, \text{Johnson}^6] \dots (1)$$

$$u_{15t} = \sqrt{\frac{B'}{A'}} \sqrt{\frac{\rho_s}{\rho_a} g d} \\ A' = -2.0 \times 10^{-7} + 22.0 \times 10^{-7} \exp(-0.39w) \\ B' = 1.0 \times 10^{-5} \exp(-0.34w) \text{ [中島・未益}^7] \\ \dots\dots\dots (2)$$

$$\tau_{*0} = \frac{u_{*c}^2}{\frac{\rho_s - \rho_a}{\rho_a} g d} = A^2 \left\{ \frac{\sin(\varphi - \theta)}{\cos \varphi} \right\} \\ \times \left\{ 1 + \frac{2\sqrt{3}}{5} \sqrt{\alpha_1 \alpha_2} n_0 \frac{\sin 2\varphi}{\sin(\varphi - \theta)} T_k \right\}$$



Akiba		Tanaka et al.	
weather	temperature (°C)	humidity (%)	grain size (mm)
○ CLOUD	30	53.9	0.1
● FINE	27	70.6	0.2
△ CLOUD	27	81.0	0.5
▲ FINE	26.5	90.0	0.8
✱ CLOUD	6.5 ~ 13.0	55.5 ~ 56.3	1.0

図-1 湿砂面上における砂粒子の移動限界風速

* 正会員 工博 東京大学工学部長
** 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

$$T_k = \sqrt{\frac{\rho_s}{\rho_w}} \frac{T \sqrt{w} \cos \xi}{(\rho_s - \rho_w) g d} \quad [\text{河田・土屋}^{8)}] \quad \dots\dots(3)$$

ここに u_{*cw} は湿砂の限界摩擦速度, u_{15L} は高さ 15cm における限界風速, τ_{*c} は限界掃流応力, ρ_a , ρ_s , ρ_w はそれぞれ空気, 砂粒子, 水の密度, d は粒径, g は重力加速度, T は表面張力, ξ は接触角, w は含水比, φ は静止摩擦角, θ は砂表面と水平軸との角度, α_1 , α_2 , n_0 は係数, A は係数で約 0.1 の値をとる.

$\varphi = 45^\circ$, $\theta = 0^\circ$ と仮定して (3) 式を u_{*cw} 表示に書き直すと次式が得られる.

$$u_{*cw} = A \sqrt{\frac{\rho_s - \rho_a}{\rho_a} g d} \sqrt{1 + \frac{2\sqrt{6}}{5} \sqrt{\alpha_1 \alpha_2} \sqrt{n_0} T_k} \quad \dots\dots(4)$$

一方で乾燥砂の限界摩擦速度 u_{*c} は次式で表わされる⁹⁾.

$$u_{*c} = A \sqrt{\frac{\rho_s - \rho_a}{\rho_a} g d} \quad \dots\dots(5)$$

よって (1), (4) 式は u_{*c} に w に比例する増分が加わる形になっている. 図-2 は (1), (2), (4) 式と田中ら²⁾の実験データを示したものである. (2) 式と田中らの実験値は, Zingg¹⁰⁾ の実験式を用いて粗度長さ z_0 を求め, 対数則を仮定して摩擦速度に換算してある¹¹⁾. (4) 式の数値計算では, 原論文に従って $\cos \xi = 1.0$, $\sqrt{\alpha_1 \alpha_2} \sqrt{n_0} = 0.057$ が仮定されている. (1), (4) 式は, w が 1.0% までは u_{*cw} は急激に大きくなり, w が 1.0% より大きくなるとの増加は緩やかになる. これは, (1) 式では増分は $\log_{10} w$, (4) 式では $\sqrt{w}$ に比例するからである. 図中の田中らの実験結果および 図-1 によれば, w が小さい場合には u_{*cw} は直線的に増加し, ある w に達すると u_{*cw} は急激に増加するという傾向がみられ, (1), (4) 式は実験結果に適合しない. さらに (4) 式は, T_k の分母に d があるので, w が一定のとき粒径が大きくなると u_{*cw} は小さくなり, ここで対象としている粒径 0.1~1.0mm 程度の砂を考えると合理的でない. (2) 式では, 基礎になっている実験は $w < 4\%$ で 1 種類の砂でなされており, $w > 4\%$ の場合や他の粒径の場合に係数 A' , B' がそのまま適用できるかどうかかわからない. 後述するように, 田中らの実験結果は信頼性が高いと判断されたので, (1), (2), (4) 式は u_{*cw} の適切な値を与えないと推定される.

3. 限界摩擦速度の定式化

前節で述べたように限界風速を示す実験値は実験者によってかなり異なる. また, 既に提案されている式は必ずしも適確に限界摩擦速度を与えないと判断された. 以後の議論を進めていく上で限界摩擦速度を量的に求めておくことが必要なので, ここでは, 現在の段階で最も適切であると考えられた田中ら²⁾の実験結果を用いて限界

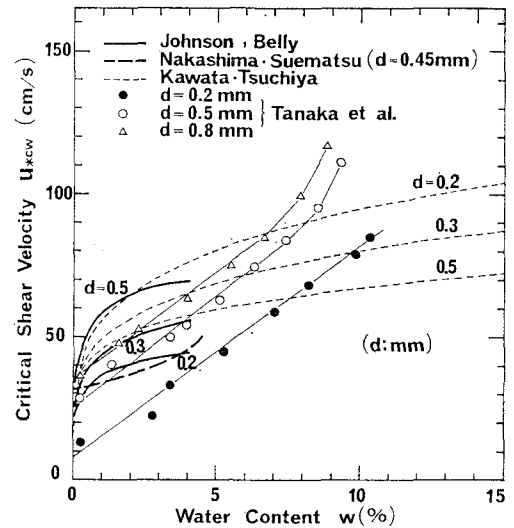


図-2 湿砂面上における限界摩擦速度

摩擦速度 u_{*cw} を定式化しておく. 田中らの実験は実験条件が明確で実験方法も適切と考えられ, 多くの実験結果は定性的に妥当な傾向を示している. 図-2 に示されている結果は, ここで対象としている粒径 (0.1~1.0 mm) で粒度のよく揃った砂に対する結果のみを示したものである.

図-2 で田中らの結果をみると, いずれの粒径も含水比 w が 8% より大きくなると u_{*cw} は急激に増加する. w が 8% までの u_{*cw} の増加率はいずれの粒径に対してもほぼ同じで, 約 7.5 (cm/s)/% である. 一方, $w = 0\%$, すなわち乾燥砂の限界摩擦速度 u_{*c} をみると, 0.2mm, 0.5mm, 0.8mm の粒径に対してそれぞれ 8 cm/s, 25 cm/s, 35 cm/s である. $w = 0.5\%$ のときは 12 cm/s, 30 cm/s, 40 cm/s となる. 乾燥砂に対する限界摩擦速度を与える (5) 式より得られる u_{*c} はそれぞれ 22 cm/s, 32 cm/s, 41 cm/s となる.

田中らの実験では, $w = 0\%$ のときの値は (5) 式より得られる値より小さい. しかし, $w = 0.5\%$ の場合, 0.2 mm の粒径に対しては実験値はやや小さいが, 0.5 mm と 0.8 mm の粒径に対しては実験値と (5) 式より得られる値はほぼ一致する. 気乾状態での砂の含水比を測定すると, $w = 0\%$ であることは稀で, 通常は大気的水分を吸着して $w = 0.2 \sim 0.8\%$ の値を示す. 従って, 田中らの $w = 0.5\%$ における u_{*cw} は乾燥砂面における摩擦速度 u_{*c} と考えてよいであろう. 以上より, 田中らの実験結果から湿砂の限界摩擦速度 u_{*cw} を次式で表すことができるであろう.

$$u_{*cw} = A \sqrt{\frac{\rho_s - \rho_a}{\rho_a} g d} + 7.5w \quad \dots\dots(6)$$

次に, (6) 式の物理的意味を考えてみる. 先ず (4) 式を考えてみよう. (4) 式は, 砂粒子が球体であること,

および重力と粒子間の接点に付着する水分の表面張力の和より成る抵抗力が風より受ける外力と釣り合うことを仮定して導かれている。球体を仮定し、水分による抵抗力を長さに比例する表面張力で求める限り、(3)式での T_k の分母から d を消去することはできない。それ故、水分による抵抗力は d に関係なく、かつ、(4)式の第2ルートの中での T_k が乗される項が1より小さいとしてルートが展開できれば、(6)式の説明ができる。次のようなモデルが考えられる。図-3(a)に示すように砂粒子は球体でなく、粒子の径は最も長い対角線で定まる。砂層内での粒子の接触状態を考えると、(a)図 s にて示されるような、1つの粒子の edge と他の粒子の edge が接触している場合より、A, B, C, D にて示されるように、1つの粒子の edge は他の粒子の平らな部分に接触していると考えの方が自然である。(a)図 A, B, C, D にて示されている状態を (b)図のようにモデル化する。砂粒子の edge は円錐形をなしていると仮定する。edge の先端は粒径の大小にかかわらず形状は同じであると考え。付着している水分が少なく δ が小さいと考えると、 δ の位置における円錐の円周は粒径を問わず同じになる。従って、2つの粒子間に作用する表面張力による力は粒径の大小に関係なく一定となり、水分の付着による抵抗力の増大は単に水分の量に比例することになる。よって (6)式を説明できる。もとより (6)式は現段階で最も適切であると考えられる経験式で、将来、理論的な解析とよく制御された実験によって修正されるべき式である。

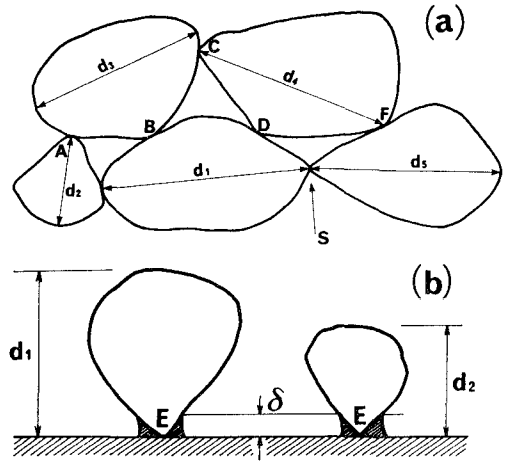


図-3 砂粒子の配列と水分付着状態の模式図

(iii) 風速が小さい場合には湿砂面上における飛砂量は少ない。しかし強風である場合には、砂層含水比が数%であっても、乾燥砂面上における飛砂量に匹敵する量の飛砂が生じる。

上述の事実より、湿砂面上における飛砂のメカニズムは定性的には次のように考えられる。いま、ある含水比を有する砂層を考える。砂層は含水することによって単に抵抗力を増加したと考えるならば、風速が十分に大きく、 $u_* > u_{*cw}$ となったとき砂は移動を始める。たとえ湿砂面であっても、飛砂のメカニズムは乾燥砂面上におけるものと同じであると考えられる。

$u_{*0} < u_* < u_{*cw}$ で砂層の含水比が一定であるならば砂は移動しないが、大気蒸発能により、砂表面より水分が蒸発し、 u_{*cw} が減少し、結果として砂表面で $u_{*cw} < u_*$ となると砂が移動を始める。従って、 $u_{*0} < u_* < u_{*cw}$ のときの飛砂量は u_* と蒸発能の関数となると考えられる。

上述の湿砂面上における飛砂のメカニズムは、限界摩擦速度を含水比の関数として表し、かつ蒸発能による係数を導入して、河村公式で表現できる¹⁸⁾。すなわち、

$$q = K \frac{\rho_a}{g} (u_* + u_{*cw})^2 (u_* - u_{*cw}) \dots \dots \dots (9)$$

$$u_{*cw} = A \sqrt{\frac{\rho_s - \rho_a}{\rho_a} g d + 7.5 w \cdot I_w} \dots \dots \dots (10)$$

ここに w は砂層の含水比であり、 I_w は蒸発能によって定まる係数で、 $I_w = 0.0 \sim 1.0$ の値をとる。 I_w は砂表面の乾燥の速さを砂表面上の限界摩擦速度の減少として示す係数である。(9)、(10)式の関係を図-4に示してある。たとえば、 $u_* < u_{*cw}$ のとき、ある蒸発能によって q_w なる飛砂量が生じたとする。この q_w は (10) 式の第2項に含まれる I_w の効果により、 u_{*cw} が砂表面の見かけの限界摩擦速度 u'_{*cw} にまで減少したものとして計算される。

4. 湿砂面上における飛砂量

湿砂面上における飛砂量についての研究は少ないが、これまでに次のような式が発表されている。

$$q = 0.3(u_{100} - 6) \quad [\text{岩垣}^{12)}] \dots \dots \dots (7)$$

$$q = A' \frac{\rho_a}{g} u_{15} (u_{15}^2 - u_{15t}^2) \quad [\text{中島・未益}^{13)}] \dots \dots \dots (8)$$

ここに u_{100} は地表上 1m の高さの風速 (m/s) であり、(7)式の q は (tf/m·day) で与えられる。 u_{15} と u_{15t} は地表上 15cm の高さの風速および限界風速である。(A' は (2) 式で与えられている。)

これらの式は、限定された条件下での経験式であり、湿砂面上の飛砂のメカニズムを十分に説明できない。

既往の研究 (中島・未益¹³⁾、岩垣¹²⁾、河田¹³⁾、荒巻¹⁴⁾、中島¹⁵⁾ や著者ら^{16), 17)}の一連の研究で得られた湿砂面上における飛砂量に関する知見をまとめると次のようになる。

(i) 湿砂面上における飛砂量は蒸発能の影響を強く受ける。

(ii) 含水比が小さい場合に生じている飛砂量は乾燥砂面上における飛砂量とほぼ同じである。しかし、ある含水比に達すると飛砂量は急激に減少する。

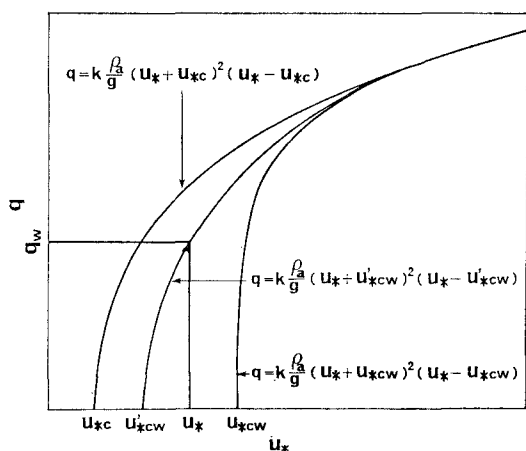


図-4 湿砂面上における飛砂量の状態

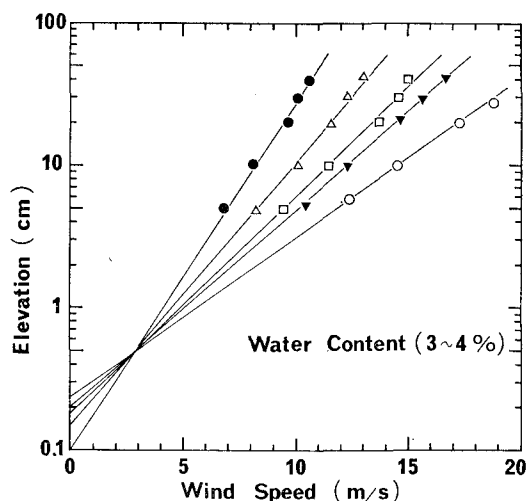


図-5 湿砂面上の風速鉛直分布

5. 湿砂面上における飛砂についての実験

5.1 実験施設

実験には幅 1.0m, 高さ 1.1m, 長さ 20m の片面ガラス張りの吹き出し型風洞を用いた。底面に厚さ 10cm の砂を敷き詰めた状態で風の吹送断面は 1m×1m となる。風速測定には 4 台の熱線風速計と 1 台の超音波風速計を用い、出力をペンレコーダーに記録した。実験に用いた砂は静岡県浜松市米津海岸の砂で、中央粒径 0.3mm, 均等係数 1.5~1.7 程度の粒径の比較的良好揃った砂である。

5.2 実験方法

まず乾燥した砂を風洞内に厚さ 10cm に敷き、砂表面を注意深く平らにした後、砂表面を乱すことなく静かに撒水した。砂表面から砂層の約 1/3 の厚さまで水を浸透させた。その後、ある一定の期間放置し、砂層が所定の含水比となったと推定された時期に実験をした。風洞内の砂表面はところどころ部分的に乾燥する場合が多かったので、実験を始める前に 1~2 分程度強風を吹送し、部分的に乾燥している砂をすべて風洞内砂表面より排除した後、実験を行った。砂層の含水比を測定するために、砂表面より約 5mm の厚さで砂を採集した。砂は実験の前後に風洞の風上端と風下端で各々 2 試料採集し、計 8 個の試料の平均値をその砂層の含水比とした。風の吹送時間は吹送する風速によって異なり、5~10 分であった。

5.3 結果と検討

図-5 に砂層の含水比が 3~4% の場合の実験における風速分布の例を示す。図より、明らかに鉛直分布は対数則を満足し、かつ focal point が存在する。focal point の値は $u' = 290 \text{ cm/s}$, $z' = 0.5 \text{ cm}$ となる。乾燥砂の実験で得られた値は $u' = 250 \text{ cm/s}$, $z' = 0.6 \text{ cm}$ であった¹⁹⁾。湿砂面上における focal point の値は乾燥砂面上における

値とほぼ一致する。focal point が存在し、 u' と z' の値が乾燥砂面上における値とほぼ一致することは、湿砂面上においても乾燥砂面とほぼ同じような状態で飛砂が生じていることを意味する⁹⁾。

図-6 は飛砂量についての実験結果を示す。プロットされているデータは、8 個の試料の含水比がすべて平均値 $\pm 1\%$ 以下にある均一な含水比の砂表面におけるものに限定されている。図-6 には $K=1.0$, $I_w=1.0$ とした場合の (9), (10) 式による曲線も示してある。データに若干のばらつきがみられるものの、実験結果は、摩擦速度が湿砂面上における限界摩擦速度より大きいとき、(9), (10) 式に一致することを示している。乾燥砂面上における実験では、 $K=1.0$, $I_w=1.0$, $u_{*cw} = u_{*c}$ を与えた (9) 式が成立した¹⁹⁾。故に、湿砂面であっても、摩擦速度 u_* が湿砂面の限界摩擦速度 u_{*cw} より大きい場合には乾燥砂と等量の飛砂量が生じ、前に述べたような考え方が正しいことを示している。図-6 において u_{*cw}

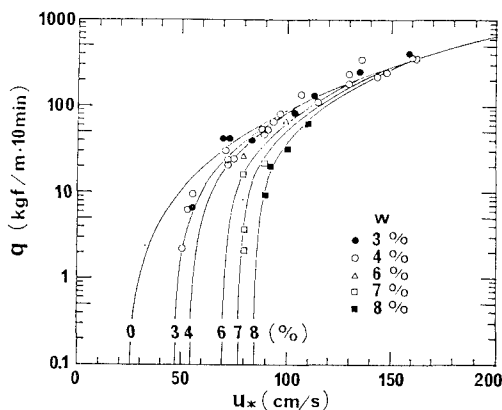


図-6 湿砂面上における飛砂量

の近傍でデータのばらつきが大きいのは、限界摩擦速度は大気の蒸発能の影響を微妙に受けるためと思われる。

6. I_w と u_{*cw} についての検討

実際に (9), (10) 式を用いて飛砂量を算定しようとするとき, I_w と u_{*cw} を与えなければならない。しかしながら現在の段階では I_w の評価はできていない。そこで, I_w についてさらに若干考察してみる。湿砂面より発生した飛砂は、風下に移動するにともない、飛砂の状態にある砂粒子の表面より水分を蒸発させ、また、移動する砂の量が多くなる。飛砂の発生可能な境界より十分風下であるならば、たとえ砂層は湿っていても、風上より移動してきた乾燥した飛砂が運動する状態になり、乾燥砂面における飛砂と同じになる。故に、湿砂面上のある点の飛砂量は、飛砂が発生可能な境界からの距離と時間によって変化することになる。この現象によって、降雨後、砂面が速みやかに乾燥状態を呈し、かつ相当量の飛砂が生じる原因となる。

結局、ある地点の u_{*cw} は、蒸発能と飛砂が発生し得る境界からの距離と時間に関係することになる。このように、 $u_{*c} < u_* < u_{*cw}$ の場合の飛砂量は、支配する要因が互いに複雑に絡み合っている現象である。従来の湿砂面上における飛砂量に関する実験や研究は、上述の湿砂面における飛砂移動のメカニズムを考慮することなくなされたものといえる。

I_w を評価することが今後の課題であるが、前に述べたように、 I_w と u_{*cw} は互いに複雑に関係するので、解析的に求めることは困難である。それ故、今後実験や現地観測の結果に基づいて I_w と u_{*cw} をより正しく表現する必要がある。

7. 結 語

従来の研究成果を整理し、かつ著者らの実験や現地観測で得られた成果を考慮することによって、湿砂面上における飛砂現象をかなり定量的に説明できた。実験は、摩擦速度が湿砂面上における限界摩擦速度を超えたとき、飛砂は乾燥砂面におけると同様なメカニズムによって生じることを示した。しかしながら、湿砂面上における飛砂については、依然として不明な点が多い。今後、 I_w を量的に表示すること、(6) 式の再検討、また、砂層の含水比がある値 ($w > 8\%$) を超えると限界風速が急激に上昇することは、(9), (10) 式が成立する上限があることを意味する。これらを明らかにすることが今後の課題である。

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、環境部調査役鹿島遼一氏、同部研究員斉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。

訂 正： 同一著者による論文「強風下における飛砂についての実験的研究¹⁹⁾」第 30 回海岸工学講演会論文集, pp. 297~301, にて転記による誤りがあったので訂正する。pp. 300 (5) 式にて $B=1.18$ を $B=2.2$, $\alpha=1.95$ を $\alpha=0.55$ に訂正する。

参 考 文 献

- 1) 秋葉満寿次：砂土含水量と飛砂限界風速度との関係、農業土木研究, 5 (1), pp. 157~174, 1933.
- 2) 田中貞雄・佐野 洋・柿沼 計：風蝕防止に関する研究, (1) 土壌含水量と移動開始風速, 農業気象, 10 (1-2), pp. 57~60, 1954.
- 3) 西川 貢・田中一夫・池田 茂：飛砂固定に関する研究 (3)——砂表層含水比と飛砂との関係について——, 鳥取大学演習林報告, 8 号, pp. 63~81, 1975.
- 4) Bisal, F. and J. Hsieh: Influence of moisture on erodibility of soil by wind, Soil Science, 102 (3), pp. 143~146, 1966.
- 5) Belly, P. Y.: Sand movement by wind, Tech. Rept. of Univ. of Calif., Inst. of Eng. Res. Issue 7, 91 p., 1962.
- 6) Johnson, J. W.: Sand movement on coastal dune, Tech. Rept. of Univ. of Calif., Inst. Eng. Res. HEL 2-3, 18 p., 1963.
- 7) 中島勇喜・末益隆裕：飛砂におよぼす砂表層含水比の影響 (Ⅲ)——飛砂量、限界速度、飛砂粒径と含水比の関係——, 第 87 回日本林学会大会発表論文集, pp. 361~362, 1976.
- 8) 河田恵昭・土屋義人：飛砂における砂粒の移動限界と飛砂量に及ぼす含水比の影響, 土木学会論文報告集, 249, pp. 95~100, 1976.
- 9) Bagnold, R. A.: The Physics of Blown Sand and Desert Dune, Methuen & Co., Ltd., 265 p., London, 1954.
- 10) Zingg, A. W.: Wind tunnel studies of the movement of sedimentary material, Proc. of Fifth Hydraulics Conf., pp. 111~135, 1953.
- 11) Horikawa, K. and H. W. Shen: Sand movement by wind action—on the characteristics of sand traps—, U.S. Army Corps Eng., Beach Erosion Board, Tech. Memo., No. 119, 51 p., 1960.
- 12) 岩垣雄一：網代港埋没に関する飛砂の影響について, 土木学会誌, 35 (6), pp. 264~271, 1950.
- 13) 河田三治：飛砂に関する実験, 海岸砂地造林に関する調査報告, 治山事業参考資料, pp. 1~22, 1950.
- 14) 荒巻 孚：新潟北部海岸における飛砂 (砂丘形成の営力に関する研究), 地理誌, 42 (3), pp. 170~175, 1969.
- 15) 中島勇喜・末 勝海・長沢 喬：飛砂に及ぼす砂表層含水比の影響 (予報), 砂丘研究, 20 (1), pp. 67~73, 1973.
- 16) Horikawa, K., S. Hotta and K. Kubota: Experimental study of blown sand on a wetted sand surface, Coastal Eng. in Japan, Vol. 25, pp. 177~195, 1982.
- 17) 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飛砂量の現地観測, 第 30 回海岸工学講演会論文集, pp. 303~307, 1983.
- 18) 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.
- 19) 堀川清司・堀田新太郎・久保田進・香取完和：強風下における飛砂についての実験的研究, 第 30 回海岸工学講演会論文集, pp. 297~301, 1983.