

粒径の大きい砂の飛砂量について

堀田新太郎*・山谷直昭**・小島崇幸***

中井幹雄****・斉藤裕士*****

1. はじめに

現在日本の海岸は宅地、工業用地など経済的に高度に利用されているが、ある季節には海岸に隣接する砂浜より飛砂が侵入し、その生活空間を汚染したり、あるいは経済活動に支障をきたすような事態を生じさせている。それ故、飛砂の侵入を阻止するための飛砂防止工が必要となっている地域も多い。日本の海浜における砂の粒径は、通常0.1 mm～1.0 mmの範囲にあり、中央粒径は0.2 mm～0.4 mm程度である。しかし、中央粒径が0.4 mmより大きい海浜も少なくはない。これらの海浜でも飛砂が発生し、飛砂防止工を必要としている場合も多々ある。しかしながら、粒径が0.5 mmより大きい砂に対する飛砂の研究は少なく、不明な点が多い。この研究の目的は風洞実験によって、粒径の大きい砂の飛砂量と風速との関係を解明し、合わせて飛砂防止対策への基本的な知識を集積しようとするものである。

2. 実験施設と方法

2.1 実験施設

実験に用いた風洞は、幅100 cm、高さ110 cm、長さ20 mの吹き出し型風洞である。風洞底部に厚さ10 cmの砂層が設置されている。実験で用いた砂は粒径の揃った、中央粒径、0.5, 0.75, 1.0 mmの3種類である。図-1に実験で用いた砂の粒径加積曲線を示す。

風速の鉛直分布は、風洞の風上端より16 mの位置で熱線風速計アレイで測定した。風速が測られた高さは、1, 4, 10, 20, 30, 40, 50, 60 cmである。風速の出力は直接パソコンに取り込み、処理をした。データのサンプリング間隔は1.0秒である。

2.2 実験方法

飛砂量の実験は最初に平坦な砂面上で実施した。飛砂量は砂表面の状態によって相違するという実験結果も報告されているので砂面形状の飛砂量への影響を検討する

ために平坦な砂面の実験が終了した後、波長約4.5 cm波高約3 cmの砂漣を人工的に形成した砂面にて実験を行った。中央粒径 $d_{50}=0.50$ mmの実験が終了した後、0.75 mm, 1.00 mmの砂について実験した。飛砂量の測定時間は風速によって異なり、2分間から10分間であった。なお、飛砂量の実験の進行に伴い熱線風速計プローブの損傷が多く、補充も限られたので鉛直分布の測点数が減っている場合もある。

飛砂量についての実験を終えた後、再び砂を入れ替えて飛砂の発生しない状態での風速鉛直分布を測定した。数個の鉛直分布を測定した後、飛砂の発生、停止の限界に関する測定を行った。

飛砂の発生は弱い風速から徐々に風速を強め、飛砂が砂面一様に発生した瞬間を飛砂発生開始とした。その後、さらに風速を強め十分に飛砂が発生した後、徐々に風速を減じ、砂粒の運動が止んだ瞬間を飛砂停止とした。発生、停止の判断は視覚によった。同様の判定を1人の観測員が10回以上繰り返し、かつ3人の観測員の判定の平均値を限界値として用いた。風速の代表値として砂面上10 cmの高さの風速を用いている。

3. 砂面上の風速分布

粗面上の風速分布は対数則の式(1)に従うとされている。

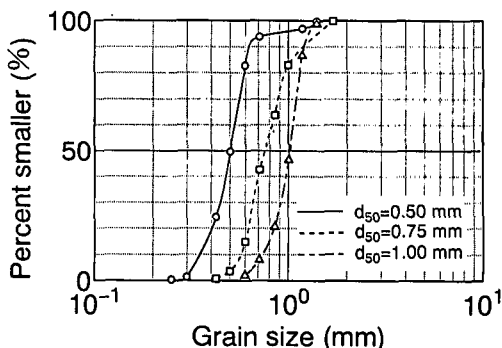


図-1 実験に用いた砂の粒径加積曲線

* 正会員 工博 日本大学教授 短期大学部建設学科
 ** 学生会員 日本大学大学院理工学研究科土木工学専攻
 *** 日本道路公団 (元日本大学理工学部土木工学科)
 **** 川田建設 (元日本大学理工学部土木工学科)
 ***** 植村技研工業 (元日本大学理工学部土木工学科)

$$u_z = 5.75 u_* \log \frac{z}{z_0} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 u_z は粗面より高さ z における風速、 u_* は摩擦速度、 z_0 は粗度長である。式 (1) は風速分布を与える曲線群が z_0 に集中することを示す。

砂面においても飛砂が存在しない状態での風速分布は式 (1) で与えられる。しかしながら、風速がある値を越えると砂面上に飛砂が発生し、飛砂が発生している状態での風速の鉛直分布は、運動している飛砂の影響を受けて、次式で表されるとされている。

$$u_z = 5.75 u_* \log \frac{z}{z'} + u' \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 (u', z') は Focal point と呼ばれる点で、風速分布を与える曲線群はすべて Focal point を通ることを示す。式 (2) は式 (1) の $(u=0, z=z_0)$ の点を x 軸に u' 、 z 軸に $(z'-z_0)$ だけ平行移動した関係になっている。Focal point の物理的意味は明らかではなく、また、その存在についても検討の余地がある。式 (1) において、砂の粒径が大きくなれば粗度長 z_0 も大きくなる。もし u_* が同一であるならば、ある高さ z の風速 u_z は粗度長の大きい砂面において小さくなる。もしある高さ z における風速が同じであるならば、粗度長の大きな砂面において摩擦速度は大きくなることになる (分布を表す片対数上の直線の傾きが緩やかになる)。

4. 風速の鉛直分布の実験結果と検討

4.1 飛砂が発生していない状態での鉛直分布

図-2 に飛砂が発生していた状態 (低い風速) で測定された風速の鉛直分布の例を示す。図中の実線はデータを通る平均的な曲線である。データに多少のパラツキはあるが、実験したいずれの砂面上にても対数則が成り立つ

と判断してもよい。しかしながら、いずれの砂面上においても、各々の分布は必ずしもある値の粗度長 z_0 に収束していない。 z_0 の値は $d_{50}=0.5$ mm の砂面では $10^{-3} \sim 10^{-1}$ mm、 $d_{50}=0.75$ mm では $10^{-2} \sim 10^{-1}$ mm、 $d_{50}=1.0$ mm では $10^{-2} \sim 10^{-1}$ mm の範囲にある。この原因は分布曲線の「傾き」は砂表面より数 cm から数 10 cm の範囲の高さの風速値から定められたものであり、かつ z_0 は粒径の $1/10$ より小さいオーダーになることに依る。つまり大象の体重を測る秤で、微小な蚤の体重を測定するようなもので、僅かの「傾き」の差が z_0 においては十分に 1 オーダーの差になって表れるからである。明らかに異常な分布を除いて平均的な z_0 を求めると z_0 はそれぞれの砂面に対して、 $d_{50}=0.5$ mm では $z_0=0.01$ mm、 $d_{50}=0.75$ mm では $z_0=0.04$ mm、 $d_{50}=1.0$ mm では $z_0=0.10$ mm となる。図-3 に示されている分布曲線は容易に各々の平均的な z_0 を通るように描き改めることができ、その「傾き」の変動は小さい。「傾き」から計算される摩擦速度 u_* への影響は小さい。

4.2 飛砂の発生している状態での鉛直分布

図-3 に飛砂が発生している状態での風速の鉛直分布の例を示す。データに多少のパラツキはあるが、風速の鉛直分布は対数則に従うと判断してもよい。図-3 においては Focal point は存在するようである。しかし、さらにデータを重ねると、Focal point は明確さを欠くようになる。表-1 に 2、ないし 3 の曲線が交叉する範囲を示してある。下段の () の値はその範囲の中間の値である。表-1 の 5 行目の数値は Zingg (1952) の実験式より予測される値である。本実験における () 内に示される数値を Focal point の値として Zingg の実験式より予測される値と比較すれば、 u' はほぼ等しいが、 z' は約 1 オーダー大きい。Focal point の値を () に示された値とし

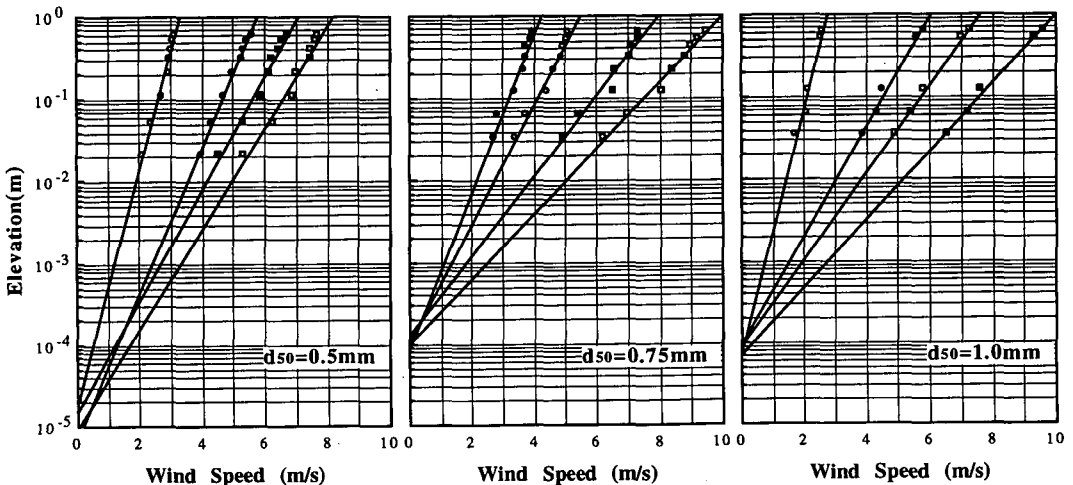


図-2 飛砂のない状態での風速鉛直分布

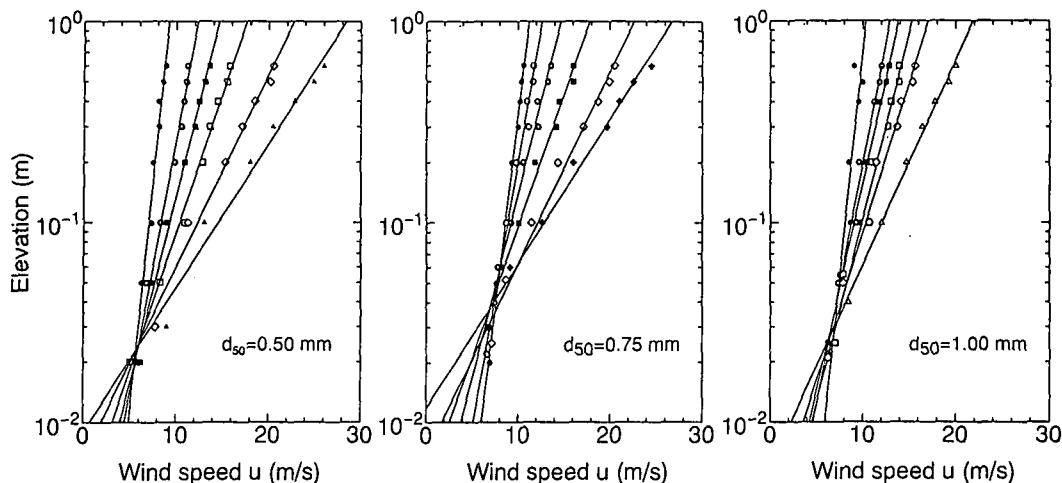


図-3 飛砂のある状態での風速鉛直分布

て、曲線群を Focal point を通るように描き直しても、それぞれの曲線の「傾き」に与える変動は小さく、「傾き」から計算できる u_* の値への変動も小さい。

4.3 ある高さにおける風速と摩擦速度の関係

対数則が成立し、かつ Focal point が存在すれば摩擦速度 u_* はある任意の高さ z での風速 u_z によって求めることができる。すなわち式(1)、(2)は式(3)、(4)に書き変えられる。

$$u_* = a u_z \quad \dots \dots \dots (3)$$

$$u_* = a' u_z - b' \quad \dots \dots \dots (4)$$

ここに a , a' , b' は z_0 , Focal point による定数である。図-4 は曲線の「傾き」より求めた u_* の値と砂表面上 10 cm の高さの風速 u_{10} との関係を示す。図中○△□印は飛砂が発生していない場合、●▲■印は飛砂が発生している場合である。図-4 より(3)式と(4)式が成り立つと判断してよい。データを通る平均的な直線より定まるそれぞれの直線の定数 a , a' , b' は図-4 に示してある。

4.4 飛砂の発生限界

Bagnold (1936)によれば、砂粒が静止の状態から運動の状態に入る(飛砂の発生)限界値 (Fluid threshold) と飛砂の状態での運動を停止する限界値 (Impact threshold) がある。飛砂の発生、停止に関する実験においては、明らかに2つの限界は存在した。表-2の2列と3列に各々の粒径における飛砂発生および飛砂停止と判断された砂表面上 10 cm の風速 u_{10} の平均の値を示す。表-2は、飛砂発生と飛砂停止の限界に約 2 m/s の差異があることを示している。本研究で実施した実験の他の幾つかの条件からこれらの限界を定めることも可能である。

① 図-4 に示される式(3)と式(4)の交点は Threshold (Fluid とも Impact とも解することができる)を意味することになる。図-4 において、式(3)と

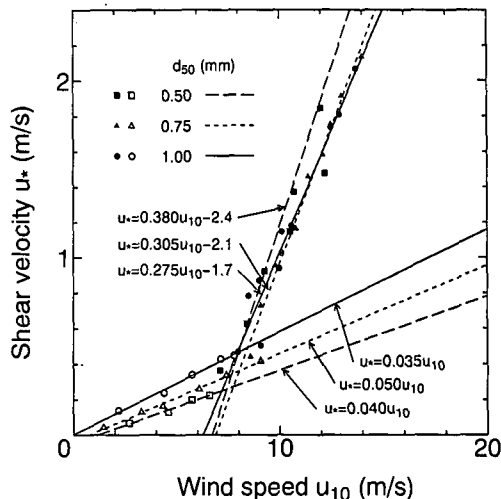


図-4 摩擦速度と砂表面上 10 cm の風速との関係

式(4)の交点より求められた摩擦速度を表-2, Intersection に示してある)。

② 限界風速の値を用いて、図-4 における u_{10} と u_* の関係式から限界値を求めることができる。式(3)に対応する式から Fluid, 式(4)に対応する式から Impact の Threshold condition を定めることができる(表-2 6 列, Experiment)。しかし、粒径 0.50, 0.75 mm の砂に対しては Impact は求まらない。図-4 において、式(4)に対応する実験結果に問題があると思われる。

③ 飛砂量の実験において、最小でかつ有意な飛砂量が測定された場合の実験の摩擦速度はまた Fluid threshold を与えると考えられる。次に示す飛砂量に関する図-5 より求められた限界値は表-2 の 7 列に示してある。

表一 Focal point の値

Grain size	Focal point values					
	0.5mm		0.75mm		1.0mm	
Focal point	u' (m/s)	z' (cm)	u' (m/s)	z' (cm)	u' (m/s)	z' (cm)
Experiment	5.5~6.5 (6.0)	2.0~5.0 (3.0)	6.5~8.5 (7.5)	4.5~7.0 (5.8)	6.0~8.5 (7.3)	2.5~4.5 (3.5)
Zingg's formulas	4.5	0.5	6.7	0.75	8.9	1.0

表二 飛砂の発生・停止の限界風速および限界摩擦速度

Grain size (mm)	Threshold wind speed (m/s)		Threshold shear velocity (cm/s)					
			Bagnold		Inter-section	Experiment		
	Fluid	Impact	Fluid	Impact		Fluid	Impact	Fluid
$d_{50}=0.50$	8.3	5.7	33	26	27	30	?	34
$d_{50}=0.75$	9.1	6.7	40	34	36	40	?	44
$d_{50}=1.00$	10.0	7.9	46	38	46	50	39	50

一方, Fluid threshold は式 (5) で評価できる (例えば, Bagnold, 1936).

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

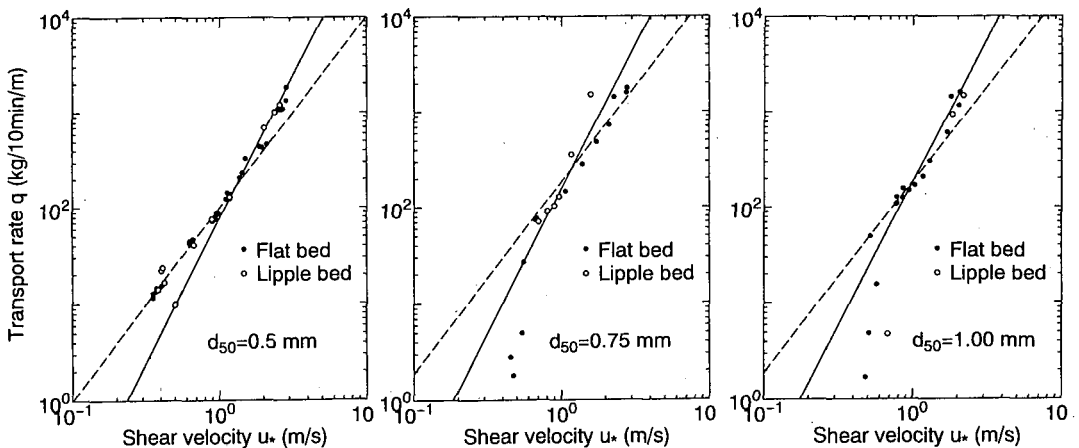
ここに u_{*c} は限界摩擦速度, ρ_a と ρ_s は空気と水の密度, g は重力加速度, d は粒径, A は実験で定まる定数で, 通常の砂では約 0.1 である. 式 (5) で与えられる u_{*c} の値は表二, 4 列 (Bagnold) に与えてある.

Impact threshold に関する研究は特に見当たらないが Bagnold (1936) は実験結果としてのグラフを与えている.

5. 飛砂量についての実験結果と検討

5.1 飛砂量と摩擦速度の関係

図一5 は, 両対数紙上での飛砂量と摩擦速度の関係を示す. ここに飛砂量の単位 (Transport rate) は従来のデータと比較するため kg/10 min/m を用いている (kg は質量). 平坦な砂面における飛砂量と砂漣砂面における飛砂量の間に有意な差異は見当たらない. 実線は「傾き」3, 破線は「傾き」2 の曲線を示し, いずれの粒径においても飛砂量は u_* が 1.2~1.5 m/s より大きくなると「傾き」3 の実線近傍にあり, それより小さい u_* の範囲では「傾き」2 の破線の近傍にある. 言い換えると, 飛砂量は u_* が 1.2~1.5 m/s より小さい範囲では, u_* の 2 乗, それより大きい範囲では u_* の 3 乗に比例することを意味する. 今まで得られている多くの実験あるいは現地観測の結果は, 粒径が 0.5 mm より小さく, かつ u_* の範囲は約 1.0 m/s 以下に限られており, その範囲内では飛砂量は u_* の 3 乗に比例している. 粒径が 0.5 mm より大きいデータは著者らの知る限りでは Kadib (1965) の実験 ($d_{50}=0.88$ mm, $d_{50}=1.00$ mm) と Zingg (1952) の実験 ($d_{50}=0.505$ mm, $d_{50}=0.715$ mm) に限られ, かつ u_* の範囲は約 1.0 m/s より小さい. Zingg と Kadib の実験結果は相違している. すなわち, Zingg の結果は飛砂量は u_* の 3 乗に比例し, また u_* が同値であるとき粒径の大きい砂の飛砂量が多い. Kadib の結果は, 飛砂量は粒径 0.88 mm の場合, u_* の約 4.4 乗, 粒径 1.00 mm の場合は u_* の約 2.6 乗に比例し, u_* が同値であるとき粒径の大きい砂の飛砂量が少ない (例えば Horikawa, Hotta and Kraus, 1986). 本実験の結果は Zingg と Kadib のいずれの結果とも異なる. べき乗に限っていえば, 本実験の結果を u_* の小さい範囲で 3 乗則で予測



図一5 摩擦速度と飛砂量の関係

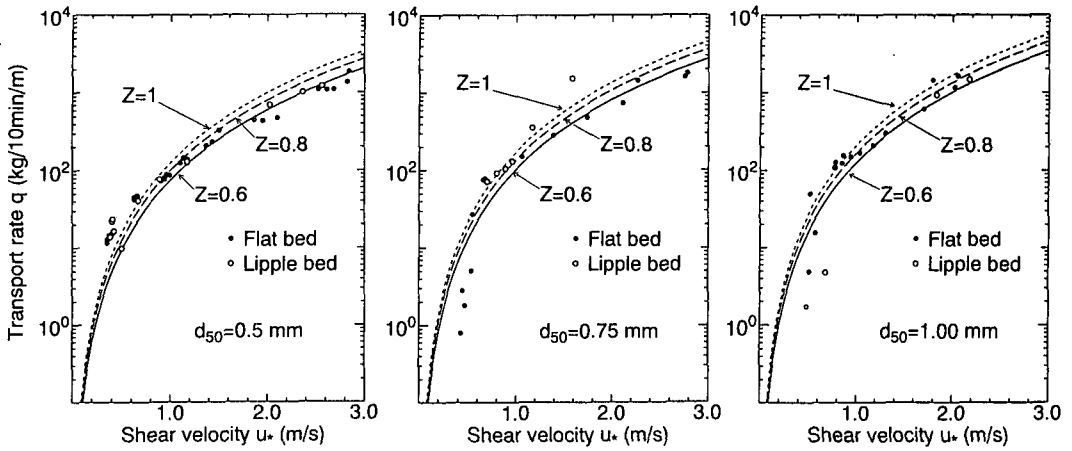


図-6 摩擦速度と飛砂量の関係

される値より多少大きい u_* の3乗に比例するとみることもできる。さらに興味ある事実は、 u_* が同値の場合粒径が大きくなると飛砂量も多くなり、粒径0.75 mmと1.00 mmの飛砂量は平均的に粒径0.5 mmの場合の約1.4倍と約1.7倍になっている。

従来の研究で飛砂量算定式に粒径の効果が考慮されている式の代表的な式はBagnold (1936) とZingg (1952)の式である。

$$q = B \frac{\rho_a}{g} \left(\frac{d}{D} \right)^{1/2} u_*^3 \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$q = Z \frac{\rho_a}{g} \left(\frac{d}{D} \right)^{3/4} u_*^3 \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに q は飛砂量、 d は粒径、 D は標準粒径(0.25 mm)、 B 、 Z は実験によって定まる係数である。BagnoldとZinggの式の相違は (d/D) のべき乗が $1/2$ と $3/4$ であることで、とくに $1/2$ 、 $3/4$ に理論的根拠があるわけではなく、実験結果より得られているものである。本実験の $(d/D)^{3/4}$ の値は0.5 mm、0.75 mm、1.00 mmに対してそれぞれ1.68、2.28、2.83となる。粒径0.5 mmの $(d/D)^{3/4}$ の値で粒径0.75 mmと1.00 mmの $(d/D)^{3/4}$ の値を除すればそれぞれ1.36、1.69となり、ほぼ1.4と1.7に等しい。結局本実験の結果はZinggの式によって記述できると推定される。

図-6は片対数紙上のデータのプロットと係数 $Z=1.0$ 、 0.8 、 0.6 を与えたZinggの式を示す。摩擦速度 u_* が0.8 m/sより小さい範囲で飛砂量は多くなるが、データは $Z=0.8$ を与えたZinggの式によって説明できると判断できる。Zinggは $d_{50}=0.200$ 、 0.275 、 0.360 、 0.505 、 0.715 mmの粒径の一連の実験において $Z=0.83$ を得て

いるが、本実験の結果はZinggの結果にほとんど一致することになる。本実験とZinggの結果を含めていえる一つの事実は u_* が同一であっても粒径が大きくなれば飛砂量が多くなることである。つまり砂面に作用するせん断力は同じであっても、飛砂となって運ばれる砂の質量は粒径が大きくなると多くなることになる。これは粒径が大きくなると、運動している砂粒の数が減少し砂粒同士の衝突によって失われるエネルギー（あるいは運動量）及びSaltationの状態で運動している砂粒子が着地するとき砂表面の粒子と粒子の間に入り込み、砂粒子の持っている運動量を失う割合が減少し、より多くのエネルギーが砂の輸送に有効に作用するからであると考えられることができる。

謝辞：実験は電力中央研究所の飛砂風洞を用いて行った。元水理部長片野尚明氏、構造水理グループ、グループリーダー田中寛好氏に便宜を計って頂いた。ここに記して感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 堀川清司 編 (1985): 海岸環境工学, 東京大学出版会, 582 p.
- Bagnold, R. A. (1936): The movement of desert sand, Proc. Roy. Soc. London, Ser. A, Vol. 157, pp. 211-235.
- Kadib, A. A. (1965): A function of sand movement by wind, Inst. Eng. Res. Tech. Rep. HEL-2-1-2, Univ. of Calif., Berkeley, 91 p.
- Horikawa, K., S. Hotta and N. C. Kraus (1986): Literature review of sand transport by wind on a dry sand surface, Coastal Eng., Vol. 9, Elsevier, pp. 503-526.
- Zingg, A. W. (1952): Wind funnel studies of the movement of sedimentary material, Proc. 5th Hydraulics Cnf., IAHR, pp. 111-135.