

海岸における飛砂について

堀川 清 司*・堀田新太郎**・久保田 進***・針 貝 聰****

1. はじめに

かつて日本の海岸が豊かな砂浜に覆われていた頃には、海岸砂防の観点から海岸における飛砂現象に関する研究が盛んに行なわれていた。しかしながら、近年の海岸性状の変化により、海岸における主たる興味の対象が海岸侵食に移ってからは、海岸における飛砂現象についての研究はほとんど忘れ去られたかのように思われる。時折、たとえば海岸道路に季節的に飛砂が路面に堆積し、車両の走行に支障をきたすというような例が報告されても、それを起因として精力的に研究がなされたという報告も寡分にして聞かない。しかしながら、著者等は飛砂もまた海浜変形の一要因として、広義の漂砂に含めて検討すべきものと考えている。従って、飛砂は海浜変形に如何なる寄与をしているのか、狭義の意味の漂砂、すなわち、海中を移動する土砂量に対比して飛砂量はどの程度であるのかなどを評価してみようという立場から飛砂現象について再考することにした。その第一歩として、最も単純な場合、すなわち、汀線に平行に風が吹く場合に汀線に直角な海浜断面を通過する飛砂量を評価することを試み、現地観測を実施したので、その結果を報告する。

2. 飛砂量公式について

既に公表されている飛砂量公式としては、Bagnold (1954)²⁾、河村 (1948)³⁾、Chepil (1945)⁴⁾、Hsu (1974)⁵⁾、Zingg (1952)⁶⁾、O'Brien・Rindaub (1936)⁷⁾、Kadib (1966)⁸⁾ 等によるものがある。上述の公式で注目すべき点は Kadib の式以外、飛砂量 q は摩擦速度 u_* 、あるいは風速 u の 3 乗に比例する形式であることである。これらの諸式に対する検討は多くの人々によってなされており^{9), 10), 11)}、それらの公式中に含まれる係数を適切に与えることができればかなりの精度で飛砂量を計算できることを示している。しかしながら、一般によく使用され

たり、比較検討の対象になっている式は Bagnold 公式と河村公式である。著者等も今後飛砂量に関する公式として Bagnold 公式と河村公式を比較検討の対象にする。両公式は次のように与えられる。

$$q = B \sqrt{\frac{d}{D}} \cdot \frac{\rho}{g} \cdot u_*^3 \quad [\text{Bagnold (1954)}] \cdots \cdots (1)$$

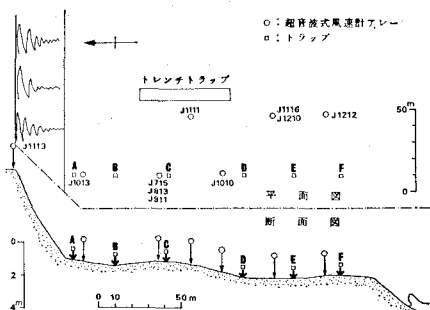
$$q = K \cdot \frac{\rho}{g} (u_* - u_{*c})(u_* + u_{*c})^2 \quad [\text{河村 (1948)}] \cdots \cdots (2)$$

ここに q は単位幅単位時間当りの総飛砂量、 u_* は摩擦速度、 u_{*c} は限界摩擦速度、 ρ は空気の密度、 g は重力加速度、 D は標準粒径、 d は砂の粒径、 B と K は実験または現地観測で与えられる係数である。

3. 現地観測および方法

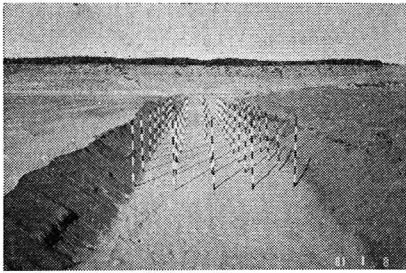
現地観測は昭和 56 年 1 月 7 日より 12 日の間に静岡県 の遠州灘海岸米津浜で実施した。この海岸は冬期において西よりの風が卓越し、風は汀線にほぼ平行に吹き、かつ日常的に飛砂がみられる場所である。風の観測は超音波風速計アレーによって実施した。この風速計アレーは 6 台の 2 方向風速計と、1 台の 3 方向風速計よりなる。また、風速記録はデジタルデータレコーダに記録した。

飛砂量の観測には 2 つの方法を採用した。第一の方法は従来の研究において使用されているようなトラップである。6 台のトラップを汀線に直角な方向にほぼ等間隔に配置し、同時に飛砂量を観測した (図一1)。1 回の観測時間は 10 分間である。採用された他の方法はトレン

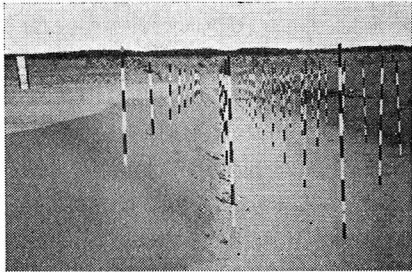


図一1 海岸地形および捕砂器、トレンチ、風速計アレー配置図

* 工博 東京大学教授 工学部土木工学科
 ** 工修 東京都立大学助手 工学部土木工学科
 *** 海岸環境工学研究センター研究員
 **** (株)アイ・エヌ・エー新土木研究所
 (前海岸環境工学研究センター研究員)



(a)



(b)

写真-1 トレンチトラップ (観測開始時, 終了時)

チトラップである。これは従来の研究によれば、浮遊・跳躍している砂粒子の1回の飛行距離はせいぜい数10 cm から数 m の程度であることより¹²⁾、もし数 m 程度の幅のトレンチを掘削すれば、そのトレンチの中に全飛砂量を取り込むことができるであろうと考えられたからである¹³⁾。海岸に幅 6 m, 長さ 50 m, 深さ 1 m のトレンチを掘削し, 5 日間に渡って飛砂量を観測した(写真-1)。

4. 観測結果と検討

4.1 現地海岸の砂の粒度について

砂の粒径および粒度組成は飛砂現象を支配する重要なパラメータである。表-1 に 1 月 8 日の第 1 回目, 9 日の第 1 回目および 10 日の第 10 回目の観測にて捕砂器に捕獲された砂のふるい分け試験結果の中央粒径 d_{50} と均等係数 $U_c = d_{60}/d_{10}$ を示す。同じ表に 10 日の 10 回目の観測時に, C 点における捕砂器の近傍の表層 1 cm 程度

表-1 現地海岸において捕獲された飛砂のふるい分け試験結果

	1 月 10 日		1 月 9 日		1 月 8 日	
	d_{50}	U_c	d_{50}	U_c	d_{50}	U_c
A	0.31	1.50	0.25	1.47	0.27	1.58
B	0.31	1.50	0.27	1.50	0.28	1.55
C	0.31	1.52	0.28	1.58	0.27	1.50
D	0.30	1.45	0.28	1.50	0.28	1.48
E	0.32	1.62	0.27	1.58	0.28	1.50
F	0.26	1.61	0.25	1.53	0.24	1.44
表層	0.4	1.75				
u_*	37.6 (cm/s)		39.5 (cm/s)		30.0 (cm/s)	

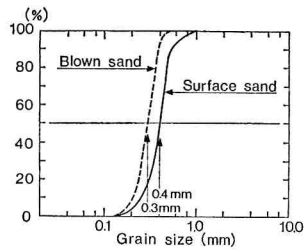


図-2 砂浜表層と捕砂器に捕獲された砂の粒径加積曲線

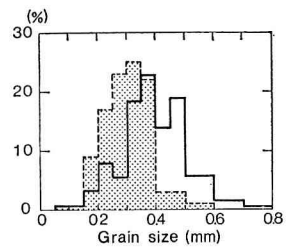


図-3 図-2 に示された砂試料の粒度分布

の厚さに採集した砂のふるい分け試験の結果も示す。図-2 にこの表層と 10 日の 10 回目 C 点において捕獲された砂の粒径加積曲線を示す。表-1 と 図-2 より次のようなことがわかる。すなわち, 捕砂器にて捕獲された砂の中央粒径 d_{50} は約 0.3 mm, 均等係数 U_c は 1.5 程度でよく粒度がそろっていて, かつ海浜の断面のいずれの地点においてもほぼ同じである。表層の砂の中央粒径 d_{50} は約 0.4 mm で均等係数 U_c は 1.75 である。表層の砂は飛砂に較べて, 中央粒径で 0.1 mm, 均等係数で 0.2~0.3 程度大きい。図-3 に 図-2 にて粒径加積曲線を示した試料の粒度分布を示す。ある中央粒径とある範囲の粒径分布の砂層より生じた飛砂の中央粒径は, もとの砂層における中央粒径よりも小さく, かつその分布の範囲も狭くなる(大きい粒径の方で切られる)。飛砂現象における砂に関するパラメータは, もとの砂層から選ぶべきか, あるいは実際に移動している飛砂から選ぶべきか, また前述の現象のメカニズムはどうなっているのか。これらは今後に残された課題であろう。以下, 本論文では移動している飛砂から粒径に関するパラメータを選び, 中央粒径 $d_{50}=0.3$ mm を使用することにする。

4.2 風の鉛直分布について

飛砂量公式 (1), (2) に対して, 外力として u_* を与えなければならない。この u_* は風の鉛直分布が対数則に従うなら, 鉛直分布曲線の勾配として与えられる。砂浜上どの地点でも鉛直分布の対数則が成立するのか, もし対数則が成立しないならば, 如何に u_* を評価すべきかを検討するために 図-1 にて J□□□□ (後の 2 桁の数字は観測開始時間, その前の 1 あるいは 2 桁の数字は観測日を示す。) と示されている地点で風の鉛直分布の観測を実施した。図-4 に J715 と J813 の例を示す。(地表上 1 m の高さの位置にも風速計があるが明らかに出力異常と思われるのでデータは除いてある。) 図-4 より風の鉛直分布は対数則の式 (3) が成立すると判断できる。

$$u = 5.75 u_* \log_{10} \frac{z}{z'} + u' \dots \dots \dots (3)$$

ここに u は地表上ある高さ z での風速, (u' , z') は focal point である。最小自乗法で focal point を求めてみると $u'=139$ (cm/s), $z'=0.114$ (cm) となる。明らか

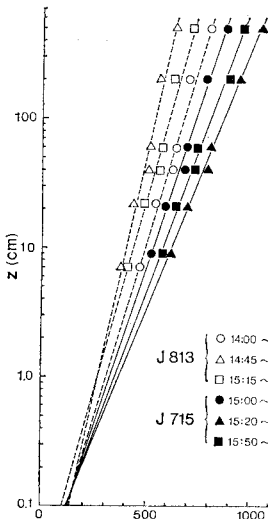


図-4 風の鉛直分布の例

中央粒径 (mm) である。

$d_{50}=0.4\text{ mm}$ として u' , z' を求めてみると、

$$\begin{aligned} u' &= 20d \text{ (mile/hr)} = 8.8 \times 10^3 d \text{ (cm/s)} \\ &= 8.8 \times 10^3 \times 0.4 = 352 \text{ (cm/s)} \end{aligned}$$

$$z' = 10d = 10 \times 0.4 = 0.4 \text{ (cm)}$$

$d_{50}=0.3\text{ mm}$ とすると $u'=264\text{ (cm/s)}$, $z'=0.3\text{ (cm)}$ となる。この観測からみ限りでは Zingg の実験式は観測値より多少過大な値を与える。

速やかに摩擦速度 u_* を知るために、地表上ある高さでの風速 u_z との関係を求めておけばよい。堀川 (1973)¹⁴⁾ は、(i) 対数則が成立する。(ii) focal point は Zingg の実験式で与えられる。(iii) 砂の粒径は 0.3 mm 。(iv) カルマン定数は 0.40 との仮定のもとに地表上 100 cm および 446.5 cm における風速と u_* の関係を (6), (7) のように与えている。

$$u_* = 0.0690 u_{100} - 18.4 \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$u_* = 0.0548 u_{446.5} - 14.7 \quad \dots\dots\dots (7)$$

全く同様の仮定で、focal point として前述の値の平均的な値として $u'=200\text{ cm/s}$, $z'=0.20\text{ cm}$ を与えて (6), (7) 式を再計算すれば (8), (9) 式を得る。(focal point を与えることで d は直接式に関係なくなる。)

$$u_* = 0.0644 u_{100} - 12.9 \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$u_* = 0.0511 u_{500} - 10.2 \quad \dots\dots\dots (9)$$

図-5 に u_* と u_{100} および u_{500} の関係を示す。当然のことながら良い一致をみる。(J 715 と J 813 では、 u_{100} が異常出力をしていたのでプロットしていない。内挿で得た u_{100} を用いて u_* をプロットすれば良い一致をみるのは明らかである。) 他の風速観測については言及しないが、海岸砂丘近辺、バーム頂部を除いて、砂浜中央部では風の鉛直分布は対数則に従うとみなしてよいようである。

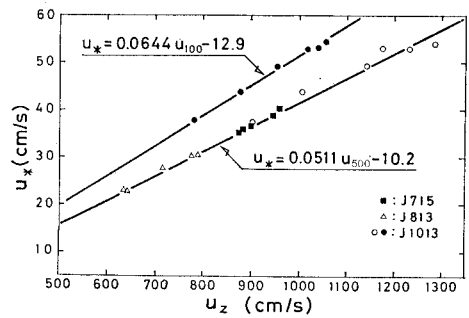


図-5 地表上 1 m および 5 m の高さの風速と摩擦速度との関係

4.3 捕砂器による飛砂量の観測

1月8日、9日、10日の3日間に渡って、汀線に直角な方向の飛砂量分布を観測した。捕砂器の配置は図-1にて○印にて示してある。使用した捕砂器は従来の研究^{9),12)}に用いられた捕砂器を参考にして、新しく製作した全量型形式のものである。2種類の捕砂器が使用され、A, C, D, F 点では A 型、B, E 点では B 型が使用されている。観測後、断面が $1 \times 1\text{ m}$ の風洞で捕砂効率に関する簡単な実験を実施したところ、B 型の捕砂効率は約 60% であった。A 型が B 型より捕砂効率が多少劣ることは現地観測における観察より推定された。捕砂効率実験法に若干の問題があり、捕砂効率について、より詳細な実験と検討を必要とするので、以下に示す観測結果の整理においては捕砂効率について考慮しないことにし、取得できたデータそのものを示すことにする。両捕砂器の捕砂効率は約 60~70% 程度と考えてよい。

図-6 に 1月9日の観測例を示す。図-6 より断面に沿う飛砂量分布について一つの傾向を示すことができる。すなわち、汀線に平行な海岸砂丘の末端 A 点では飛砂量は極めて少なく、海側にいくに従って飛砂量は増大し、浜中央部 B-D 間では飛砂量はほぼ一様である。バーム頂部より内側の E 点で飛砂量は極大を示し F 点では

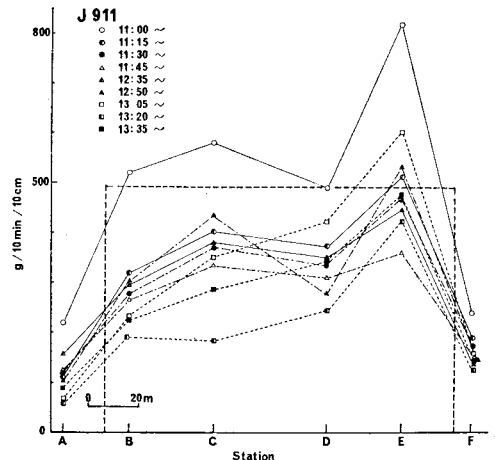
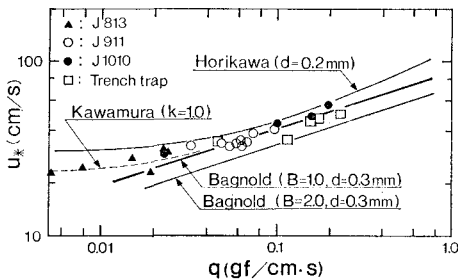


図-6 汀線に直角な断面の飛砂量分布

減少する。捕砂器の捕砂効率に問題があるので、断面に沿う飛砂量分布についてはこれ以上言及しないことにする。

紙面に限りがあるので図は示さないが、指摘しておきたい事実は、ほぼ同程度の u_* であっても飛砂量がかなり相違する場合があることである。飛砂量は u_* に比例すると考えられるから、平均的な u_* は同じであっても、小さい u_* の状態が長く継続するよりも、大きな u_* の状態が短くとも継続する方がより多くの飛砂を生じることありうる。すなわち風の吹き方（風の息）が飛砂量に関係する。 u_* の算出に当っては単なる平均値に依るだけでなく、風の吹き方を示すパラメータをも考慮しなければならないと考えられる。



図—7 飛砂量と摩擦速度の関係

図—7 に 1 月 8 日, 9 日, 10 日の観測データのうちに, 風速計アレーの近くに位置した C 点の捕砂量と u_* との関係を示してある。同図には堀川の $d=0.2\text{ mm}$ の実験結果, $d=0.3\text{ mm}$ で $B=1.0$ と $B=2.0$ を与えた時の Bagnold 公式の計算値, および $K=1.0$ を与えた時の河村公式の計算値が示してある ($u_{*0}=20\text{ cm/s}$ で計算した.)。 u_* が 30 cm/s を越えると $B=1.0$ の場合の Bagnold 公式の計算値と $K=1.0$ の場合の河村公式の値は一致する。図—7 より, 係数さえ的確に与えることができれば, Bagnold 公式でも河村公式でもかなりの精度で飛砂量を推定することが可能であることがわかる。特に u_* が 30 cm/s より小さい領域で河村公式と実測値はよく一致する。

4.4 トレンチトラップによる飛砂量の観測

写真—1 に 1 月 8 日正午の観測開始時と 13 日の観測終了時のトレンチトラップの状況を示してある。写真より, トレンチに侵入してきた飛砂は風上側の斜面に沿って堆積し, 斜面は砂の安息角を維持しつつ斜面を後退させ, 斜面の末端より風下側のトレンチ底部にはほとんど堆積はないことがわかるであろう。これは観測期間中の飛砂は主として, saltation と surface creep によるものであり, suspension による飛砂量が顕著であるような強風が吹かなかったからであろう。斜面の後退は風の強い日中午前 9 時頃より午後 3 時頃の間が顕著であった。こ

の斜面の後退量と実測安息角 $\tan^{-1} 0.7$, 砂の単位体積当りの重量を 1.65 tf/m^3 として求めた堆積量から計算した単位幅単位時間当りの飛砂量と, 風速観測がなされていた時間中の平均的な u_* との関係を図—7 中の口印で示してある (表—2 には計算に用いた時間も示してある)。これによれば, 上記の値は前節の捕砂器による値とほぼ同程度であるが多少大きめである。トレンチトラップの結果を用いての飛砂量公式 (1), (2) の検討および年間飛砂量の推算を次節で行う。

4.5 年間飛砂量の推定

前に述べたように, この海岸では冬期に西よりの風が卓越し, 飛砂現象による砂移動は冬期に集中していると考えられる。よって一応 12 月中旬より翌年 3 月中旬までの間の飛砂量を年間飛砂量としてその量を推算してみる。外力としての風のデータは飛砂観測地点に最も近い, 西に約 8 km 離れた浜名湖口に懸る浜名大橋上の観測記録を用いることにする。この風の記録はある時刻より過去 10 分間の平均を 1 分毎にチャート上に打点する方式である。この記録紙上より, 1 月 7, 8, 9, 10 日にて, 海岸で風速観測を実施していた時刻の値を読み取り, 風速計アレーの地表上 5 m の高さの風速との関係を求めてみた。両風速記録間の相互相関係数はラグ 0 分で最も相関が高く, その値は $0.98\sim 0.99$ であった。また現地の風速 u_{500s} と浜名大橋上の風速 u_h の比 $u_{500s}/u_h=1.1\sim 1.6$ の範囲にあり, 特に $1.2\sim 1.3$ に集中し, 平均は 1.27 であった。よって, $u_{500s}=1.27u_h$ で飛砂観測地点の風速が得られるものとする。この関係の妥当性を検定してみる。1 月 9 日には 11 時より 14 時 20 分までの比較的長い風速計アレーの観測記録がある。この記録は式 (3) を満足し, 直接 u_* を求めることができる。一方, $u_{500s}=1.27u_h$ の関係を式 (9) に代入すると

$$u_*=0.065u_h-10.2 \dots\dots\dots (9')$$

が得られる。式 (1), (2) を, それぞれ $B=1.0$, $K=1.0$, $d=0.3\text{ mm}$, $D=0.25\text{ mm}$, $\rho/q=1.25\times 10^{-8}\text{ gf}\cdot\text{s}^2/\text{cm}^2$, $u_{*0}=20.0\text{ cm/s}$ の条件のもとで計算してみると, u_h を用いた Bagnold 公式による飛砂量 $q_B=58\text{ kgf}/10\text{ min}\cdot\text{m}$, 河村公式飛砂量 $q_K=53\text{ kgf}/10\text{ min}\cdot\text{m}$ を得る。一方, 直接のデータから $q_B=59\text{ kgf}/10\text{ min}\cdot\text{m}$, $q_K=55\text{ kgf}/10\text{ min}\cdot\text{m}$ を得る。よって $u_{500s}=1.27u_h$ の関係は十分に現地の風速の関係を再現できていると判断される。

次にトレンチトラップの堆積飛砂量について検討する。以下すべて風は 10 分間平均値を 10 分毎に用い, 単位幅 m を使用することにする。さて, 上述の風の検定に用いた条件でトレンチトラップの観測時間内の飛砂量を式 (1), (2) より推算した結果を表—2 の第 7, 8 列に示す。数字を見ると 9 日の例を除いて, 河村公式は Bagnold 公式よりわずかに大きめにでる。これは図—7 および 4.3 節で述べたように u_* が 30 cm/s より小さい

表-2 トレンチ内堆積飛砂量

月 日	時 間	堆積量の実測値		単位時間 飛 砂 量 (gf/s・cm)	u_s (cm/s)	堆積量の推算値 (kgf/m)		推算値/実測値	
		(m ³ /m)	(kgf/m)			Bagnold	Kawamura	Bagnold	Kawamura
1. 9	9:00~16:00	0.071	117	0.046	33	102	92	0.87	0.79
10	9:00~15:15	0.314	518	0.23	50	425	452	0.82	0.87
11	9:00~15:40	0.171	282	0.118	35	218	222	0.77	0.79
12	9:00~12:00	0.086	141	0.141	45	222	232	0.73	0.75
12	12:00~15:00	0.100	165	0.165	45				
平 均								0.8	0.8

領域では河村公式が飛砂量を正確に表わすが Bagnold 公式では小さくなり、実測値に適合しなくなるからである。表-2 の 9, 10 列に各々の推算値と実測値の比を示す。推算値はだいたい実測値の 0.7~0.9 倍の間に有り、その平均は Bagnold 公式でも河村公式でも 0.8 になっている。ここで 4.4 にてトレンチにより求めた単位時間、単位幅当りの飛砂量は捕砂器により求めた量よりも多少大きめであったことを思い出して欲しい。この 0.8 は捕砂器の捕砂効率を示すことになる。

以上をまとめると、トレンチトラップはすべての飛砂を捕獲する。係数 $B=1.0$, $K=1.0$ を与えた式 (1), (2) からの推算値はトレンチトラップに捕獲される量の 80% である。これは捕砂器の捕砂効率を意味する。捕砂器の捕砂効率は簡単な風洞実験により 60~70% 程度と推定したが、実は実験方法に問題があり、実際の捕砂効率は 80% であったと考えれば話にまとまりがつく。よって、式 (1), (2) の係数 B, K は 0.8 の逆数 1.25 であれば妥当な飛砂量を推定できることになる。

さて、式 (1), (2) で $B=K=1.25$ として、昭和 55 年 12 月 15 日午前 9 時より昭和 56 年 3 月 23 日午前 9 時までの u_h の記録を用いて飛砂量を推算すると Bagnold 公式では 32.5 tf/m, 河村公式では 31.0 tf/m となる。図-6 に飛砂量分布を示した。この分布を積分して断面長で除せば、飛砂量分布が断面にわたって一様であると仮定して計算するときの係数を求めることができる。しかし、分布形状には若干問題があるので、形状分布を眺め、図-6 に目見当で破線によって示したような幅(有効幅)にわたって一様な飛砂があると考え、海岸の幅は 180 m, その有効幅は 140 m, よってこの断面を昨冬通過した飛砂量は概略 $32.5 \times 140 = 4\,928$ tf ~ $31.0 \times 140 = 4\,340$ tf 程度になる。

5. 結 果

多大な労力と時間を費したにも拘らず、Bagnold 公式、河村公式の係数について得られた数値は従来の研究で得られていた値と大差がなかった。しかしながら、トレンチトラップを使用することによって、短期間ながらもその期間中の推算飛砂量について検証することが出来たので、得られた係数に対する信頼性は格段に増したと考え

られる。

なお、現地観測を実施するにあたって、静岡県浜松土木事務所管理課長名倉光男氏に御配慮を頂いた。また、浜名大橋上の風速データは道路公団浜名バイパス管理事務所より提供していただいたものである。同事務所の野原映一氏、鏡美喜男氏(現第 3 京浜道路管理事務所)、および東京第一管理局補修第一課の井口哲也氏にはお世話になった。紙上を借りて感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 例えば、榑場重正・川村満紀・小泉 徹: 海浜自動車道における防風・飛砂について, 第 29 回年次学術講演会, 第 4 部, pp. 108~109, 土木学会, 1974.
- 2) Bagnold, R. A.: The physics of blown sand and desert dunes, Methuen & Co. Ltd., London, 265 p., 1954, あるいは金崎肇訳: 飛砂と砂丘の理論, 創造社, 304 p., 1963.
- 3) 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.
- 4) Chepil, W. S.: Dynamics of wind erosion, III, The transport capacity of the wind, Soil Science, Vol. 60, No. 6, 1945.
- 5) Hsu, S. A.: Computing aeolian sand transport from routine weather data, Proc. 14th Conf. Coastal Eng., pp. 1619~1626, 1974.
- 6) Zingg, A. W.: Wind tunnel studies of the movement of sedimentary material, Proc. 5th Hydraulics Conf., pp. 111~135, 1952.
- 7) O'Brien, M. P. and B. D. Rindlaub: The transportation of sand by wind, Civil Eng., 6 (5), pp. 325~327, 1936.
- 8) Kadib, A. L. A.: Mechanics of sand movement on coastal dunes, Proc. ASCE, Vol. 92, WW Division No. 2, pp. 27~44, 1966.
- 9) Horikawa, K. and H. W. Shen: Sand movement by wind action (on the characteristics of sand traps), B.E.B., Tech., Memo., No. 119, 1960.
- 10) Phillips, C. J. and B. B. Willetts: A review of selected literature of sand stabilization, Coastal Engineering, 2 [2], Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam, pp. 133~147, 1978.
- 11) 中村 宏: 飛砂と海岸砂防に関する調査, 電力中央研究所技術第二研究所報告, 71002, 125 p., 1971.
- 12) Ishihara, T. and Y. Iwagaki: On the effect of sand storm in controlling the mouth of the Kiku River, Disaster Prevention Res. Inst., Kyoto Univ., Bull. 2, pp. 1~32, 1952.
- 13) 石原藤次郎・岩垣雄一: 網代港埋没防止工に関する研究, 鳥取県漂砂対策調査報告書, pp. 5~31, 1950.
- 14) 堀川清司: 海岸工学, 東京大学出版会, pp. 233~236, 1973.