

現地海浜における飛砂量分布の観測

堀川 清 司*・堀田新太郎**・久保田 進***

1. はじめに

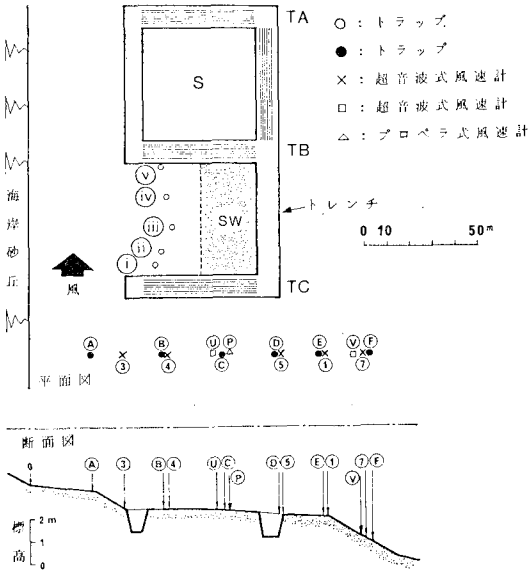
著者等は飛砂による砂の移動を海浜変形の一要因として、広義の漂砂に含めるべきと考えている。従って、飛砂が海浜変形に如何なる寄与をしているか、狭義の意味での漂砂、すなわち海中を移動する土砂量に較べて飛砂量はどの程度であるか、等の評価しようという立場から飛砂現象についての研究を開始した。その第一歩として、最も単純な場合、すなわち風が汀線に平行に吹く場合に汀線に直角な海浜断面を通過する飛砂量を推算することを試みている。研究の一手段として現地観測を実施した。昭和 56 年 1 月に風速分布と飛砂量に関して実施した現地観測¹⁾の経験を基に観測装置、手法等の改良改善を行い、昭和 57 年 1 月に観測を実施した。観測により極めて興味ある結果を得たので以下に報告する。

2. 観測地点および方法

現地観測は昭和 57 年 1 月 7 日から 17 日の間に昭和 56 年 1 月の観測と同地点の静岡県浜松市米津浜において実施した。この海岸では冬期に西寄りの風が卓越し、風は汀線にほぼ平行に吹き、かつ日常的に飛砂が見られる。

観測に用いた機器、方法等は昭和 56 年 1 月の観測とほぼ同様であるが、可能な限りの改良改善が施されている。風の観測には超音波式風速計アレーを用いた。この風速計アレーは 6 台の 2 方向風速計と 1 台の 3 方向風速計より成る。風速はデジタルデータレコーダーに記録した。これまでの観測により砂浜上では風速の鉛直分布は対数則に従うと判断されたので、今回の観測では風速の鉛直分布の観測は 2 例に止め、飛砂量分布に関連する汀線に直角な断面の風速分布を求めることに重点を置いた。飛砂量の観測には 2 つの方法を採用した。第一は従来の研究で使用されているような全量型捕砂器による方法であり、他はトレンチトラップによる方法である。

図一に砂浜地形と観測機器の配置を示す。図中、点 ④～⑥ は全量型捕砂器、③、④、⑤、①、⑦ は砂面上 1



図一 海浜地形と観測装置の配置

m の高さに据え付けた超音波式風速計の位置である。①と②は性能検定のため地表上 5m の高さに置いた超音波式風速計とプロペラ式風速計である。今回の観測ではトレンチトラップを 図一に示す形状に掘削した。最も風上側のトレンチ TC は短期推算飛砂量の検証、あるいは捕砂器の捕砂効率の検証などを目的としたものである。風下側にあるトレンチ TA は、中央のトレンチ TB との間に挟まれた領域 S から失なわれた飛砂量とトレンチ TA によって捕獲された堆積飛砂量とを比較することによって、トレンチによる測定法を検討するためのものである。トレンチ TC と TB に挟まれた領域中の ①～⑦は飛砂量が平衡に達するまでの距離を観測した時の捕砂器の位置であり、領域 SW は湿砂面の乾燥過程の観測を行った場所である。これら 2 種類の観測結果については稿を改める。

トレンチおよび領域 S における砂面の測定には従来と同様にボールアレーを用いた。トレンチ内には風に平行な方向に 1m 間隔で 7 本、直角な方向には 2m 間隔で 26 本 (50m) のポールを打設した。領域 S (50m×50m) には径 16mm、長さ 1m のパイプを格子間隔 2m

* 正会員 東京大学教授 工学部土木工学科
** 正会員 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

で合計 676 (26×26) 本打設した。砂面の測定はボールの頭を基準として砂面上までの距離をスタッフで読み取ることにより行った。

3. 観測結果の検討

3.1 砂浜上における風について

汀線に直角な断面の高さ 1 m の位置における風速分布を以後風速の断面分布と呼ぶことにする。風速の断面分布の観測は 1 月 13 日, 14 日に飛砂量分布の観測と同時にを行った。風速の鉛直分布の観測は 1 月 15 日に U 点, 16 日に V 点において実施した。これらの結果については文献 2) を参照されたい。本稿に必要な項目については結果のみを再記すれば以下の通りである。

- i) 1 月 15 日, 16 日の風速の鉛直分布は対数則をほぼ満足していた。
- ii) 図-2 に示される 1 月 14 日の風速の断面分布において最も海側の風速計 No. 7 による値が他に較べて若干大きい。風速の断面分布はほぼ一様である。

以上より観測期間中の砂面に作用する摩擦速度 u_* は一様であったと考えられる。

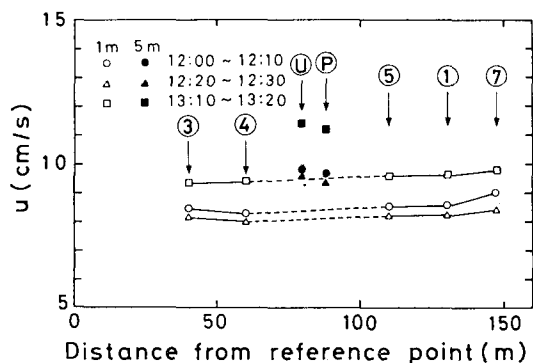


図-2 汀線に直角な断面の風速分布

3.2 汀線に直角な断面の飛砂量分布

汀線に直角な断面の各地点における飛砂量分布を以後飛砂量の断面分布と呼ぶことにする。図-3 (a) は図-2 に示した風速の断面分布の観測と並行して実施した飛砂量の断面分布の観測結果を示す。同図 (b) に 1 月 13 日の観測結果を示す。分布形状は (a) と (b) とでかなり異っている。また同図 (c), (d), (e) は昭和 56 年 1 月 10 日, 9 日, 8 日の観測結果である。これらの図より, 2 つの分布形状を識別することができる。1 つは陸側の砂丘末端より海側に向かうに従って飛砂量が増加し, 砂浜中央部よりやや海側でピークを成し, 汀線際で飛砂量が減ずる形状である。他の形状は砂浜中央部よりやや海側で一度飛砂量が減じてピークが 2 つになる形状である。

3.1 節で述べたように砂浜上の砂面に作用する摩擦速

度が一様であるにもかかわらず、飛砂量が場所により異なるのは矛盾することになる。しかしながら、現地における飛砂は主として砂面上 10 数 cm の高さに雲状に移動しており、飛砂の濃淡は決して一様ではない。従って、このような点観測では捕砂器の設置位置によって捕獲される飛砂量が相違するであろうことは容易に想像できる。観測時に注意深く砂面を観察したところ、次のような事実が明らかとなった。すなわち、砂浜表面は平坦でなく波高数 10 cm, 波長 10 数 m の波状 (dune) を呈していた。dune の峯の部分では乾燥した砂層が厚さ数 cm, あるいは 10 数 cm に及ぶことがあった。dune の谷の部分では乾燥した砂層は薄く、時には湿砂面が露出したり、あるいは粗な砂粒子によって覆われている場合もあった。当然のことながら、峯の部分からは多量の飛砂が発生し、谷の部分での発生は少なかった。捕砂器の前面に dune の峯が迫ってくれば、峯より発生する多量の飛砂を捕獲してしまうことになる。特に surface creep と saltation による飛砂が顕著であった。一方、捕砂器が dune の谷部に位置するか、あるいは峯が捕砂器を通過した後であれば、その前面における飛砂の発生は少な

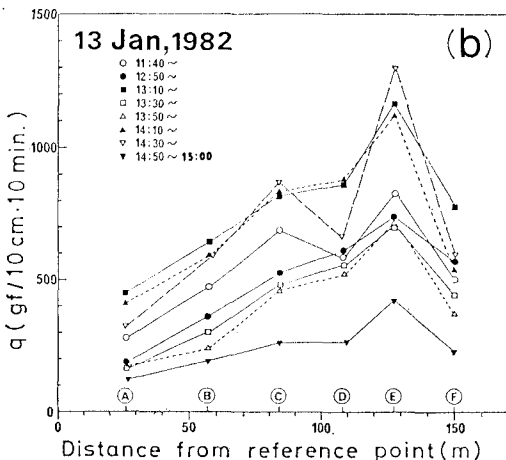
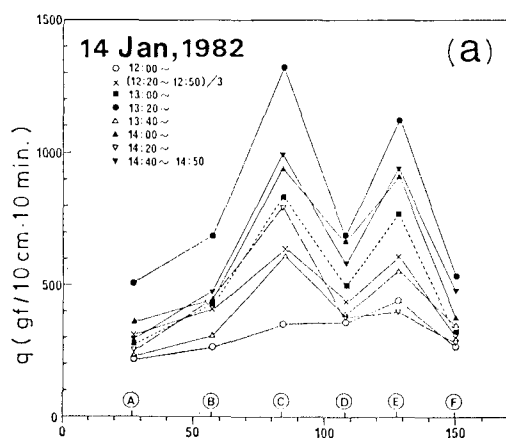
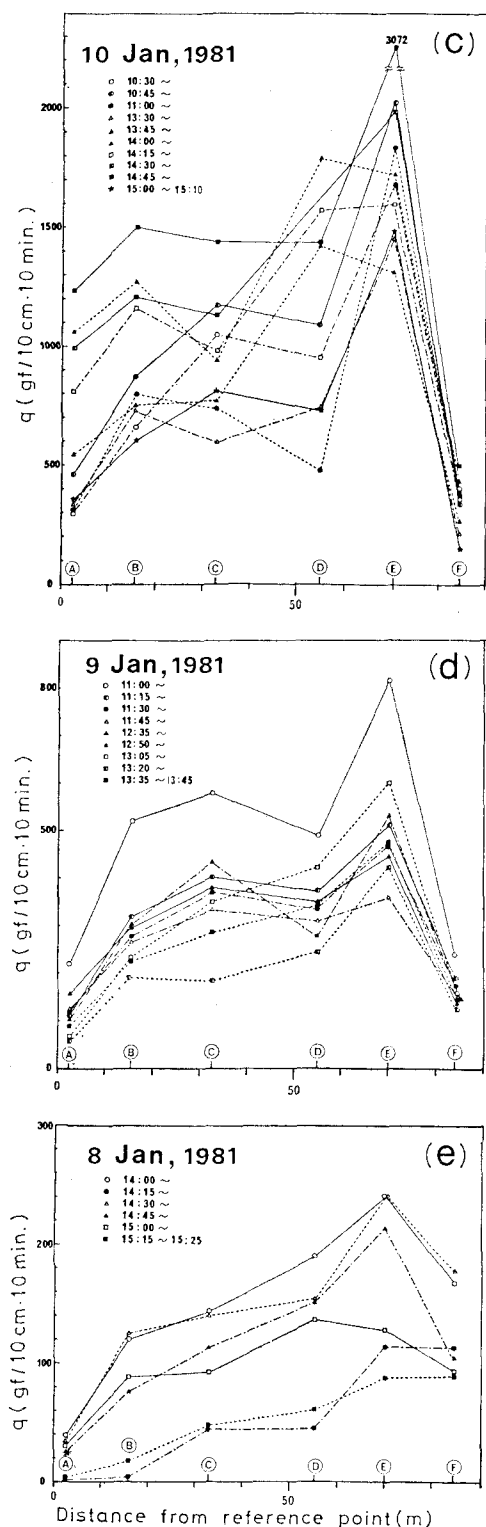


図-3 (a), (b) 汀線に直角な断面の飛砂量分布 (昭和 57 年)



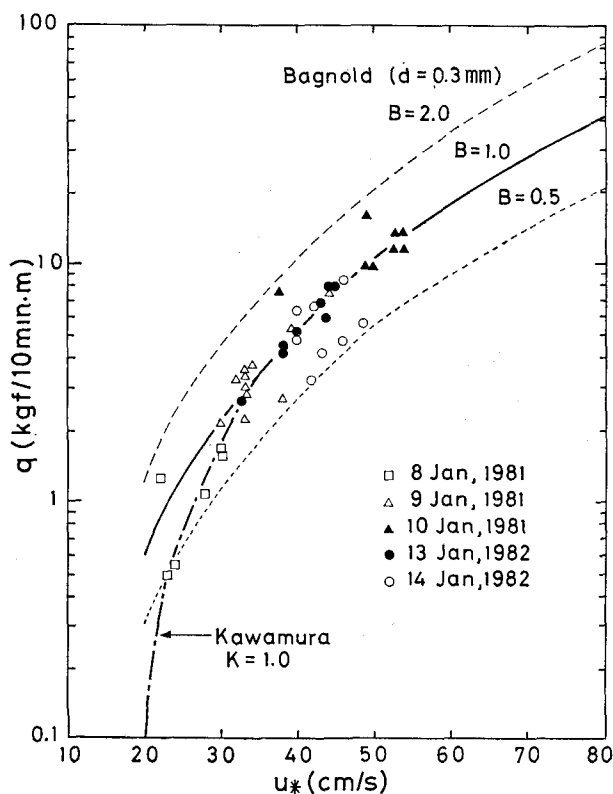
図—3 (c), (d), (e) 汀線に直角な断面の飛砂量分布 (昭和 56 年)

い。さらにその前面の峯より盛んに飛砂が発生しても捕砂器の位置に移動してくるまでに飛砂はある程度拡散してしまい、結果として捕獲される飛砂量は少ないことになる。砂浜中央部より海側の部分の飛砂量の相違は主としてこのような現象に依るものと判断された。最も陸側である A 点はいつでも捕獲される量は少ない。これは捕砂器の前面に一部植生があったり、あるいは流木や塵芥などによって砂面の一部が覆われているからと考えられる。

以上の点から、一点における飛砂量と摩擦速度との関係を求めてもデータのバラツキが大きいと思われるので改めて平均的な飛砂量と u_* の関係を求めてみることにする。図—3 に示されている断面分布を捕砂器 A から F までの間で積分し、断面長 AB 間の距離で除し、単位長さ 1m 当りの飛砂量 q を求め、 u_* に対してプロットしたものが 図—4 である。ここに用いた u_* は、昭和 56 年 1 月 8 日、9 日、10 日の観測では観測時の鉛直分布より直接計算したものである。昭和 57 年 1 月の観測では風の鉛直分布を観測していないので、地表上 1m の高さの風速より昭和 56 年 1 月の観測から得られた次式 (単位 cm/s) を用いて計算した。

$$u_* = 0.0644u_{100} - 18.4 \dots\dots\dots (1)$$

図—4 には今後の飛砂量の推算に便利のように横軸に摩



図—4 平均飛砂量と摩擦速度の関係

擦速度 u_* をとり、縦軸に 10 分間 1m 当りの飛砂量を kgf で示してある。同図に実験係数 $B=2.0, 1.0, 0.5$, 粒径 0.3mm を与えた時の Bagnold 公式³⁾と実験係数 1.0 を与えた時の河村公式⁴⁾の計算値も示してある。ここで Bagnold 公式と河村公式は次のように与えられる。

$$q = B \sqrt{\frac{d}{D}} \frac{\rho}{g} u_*^3 \quad (\text{Bagnold (1954)}) \quad \cdots \cdots (2)$$

$$q = K \frac{\rho}{g} (u_* - u_{*0})(u_* + u_{*0})^2 \quad (\text{河村 (1951)}) \quad \cdots \cdots (3)$$

ここに、 d は粒径、 D は標準粒径、 u_{*0} は砂粒子の移動限界摩擦速度である。図によれば、平均飛砂量は Bagnold 公式、あるいは河村公式に極めて良く一致する。特に u_* が 35 cm/s よりも小さい場合には観測値は河村公式に良く一致し、Bagnold 公式は過大な値を与える。この事実は、既に Horikawa・Shen (1960)⁵⁾ が指摘している。すなわち、河村公式は限界摩擦速度が考慮されている故、摩擦速度の小さい領域で Bagnold 公式より合理的な飛砂量を与える。

ここで、昭和 56 年 1 月の観測と同様にトレンチトラップによる飛砂量との比較を試みる。トレンチの掘削は 1 月 9 日の夕方に終り、有意な飛砂は 1 月 13 日の朝から生じ始め 14 日 17 時頃まで続いた。この間にトレンチの斜面が一部崩壊したため、トレンチ内の測量から求めた堆積飛砂量は昭和 56 年 1 月の観測に較べて精度が劣ると思われるが、TC、TA いずれのトレンチによっても約 0.6 m³/m であった。砂の単位体積重量を 1650 kgf/m³ とすれば飛砂量は約 990 kgf/m となる。一方、この期間中にプロベラ式風速計により得られた風速データを用いて、Bagnold 公式と河村公式の係数を 1.0 として飛砂量を推算すると、それぞれ 661 kgf/m、641 kgf/m となる。トレンチによる実測飛砂量と推算飛砂量とが同一の値をとるには Bagnold 公式の係数 $B=990/661=1.5$ 、河村公式の係数 $K=990/641=1.54$ を与えれば良いことになり、この値は Bagnold がほぼ一様な粒径の場合に与えた値に一致する。

次に、領域 S とトレンチ TA の砂の収支を検討してみる。領域 S の測量は 1 月 11 日 15 時、12 日 15 時、14 日 17 時、および 16 日 9 時に実施した。1 月 11 日 15 時の砂面高を 0 として各測量時の領域 S における砂量の増減を式 (4) で計算した。

$$V = \frac{ab}{4} (\Sigma h_1 + 2\Sigma h_2 + 3\Sigma h_3 + 4\Sigma h_4) \quad \cdots \cdots (4)$$

ここで、 V は領域 S における変化量 (体積)、 a, b は測定格子の各辺の長さ、 h_1, h_2, h_3, h_4 は各格子点の地盤高の変動量であり、添字 1~4 は計算に使用される回数を表す。計算の結果、地形変動量は 1 月 11 日 15 時から 12 日 15 時までが +2.4 m³、14 日 17 時までが -48 m³、16 日 9 時までが -59 m³ であった。上述したよう

に、有意な飛砂が生じたのが 1 月 13 日朝からであることより、トレンチトラップによる観測と同じ 1 月 13 日朝から 14 日 17 時までの領域 S における砂の減少量は 48 m³ と考えて良い。すなわち、単位長さ当り約 1 m³、重量にして約 1650 kgf が領域 S から減少したことになり、トレンチトラップ内の堆積飛砂量 990 kgf/m と収支が合わない。今回の観測においては風上からトレンチに落下した砂がトレンチ内からさらに風下に移動することは観察されていない。ただ、風が汀線にほぼ平行といっても若干偏っており、領域 S の砂が海側の汀線に平行なトレンチに一部落下していた。しかしながら、領域 S より減じた砂量が過大に評価された最大の原因は測量方法にあると考えられる。

4. 強風下における飛砂量に関する実験

現在までに得られている飛砂量に関するデータは図 4 からわかるように、たかだか u_* が 60 cm/s 程度までである。地表上 5m の高さでの風速で言えば、瞬間最大風速 18~20 m/s、10 分間平均風速 12~13 m/s である。今までの観測結果によれば、少なくともこの範囲では Bagnold 公式あるいは河村公式が良い適合性を持っていることが明らかになった。しかしながら、現地観測では現地の自然条件を人為的に変えることが不可能であること、また目的とするような条件を満たすまで現地で待機することは種々の条件によって困難な場合が多い。そこで u_* が 60 cm/s を越える強風時の飛砂量に関する風洞実験を実施した。以下にその結果を述べる。

実験はテストセクションの断面 1.1m×1.0m 長さが 20m のエッフェル型風洞で実施した。テストセクションの両端底部には 1/10 の勾配がある。厚さ 10cm に砂を敷き詰めて 1.0m×1.0m の断面が確保できるようになっている。風速は送風機の回転数を変えることによって、3~30 m/s の間で任意の風速を得ることができる。風速の測定には熱線風速計を使用した。熱線風速計を砂面上の高さ 1, 5, 10, 20 cm の位置に取り付け、風速の鉛直分布を測定し、 u_* を求めた。紙面に限りがあるのでデータは示さないが、砂面上 20 cm 内では対数則が十分に成立していた。 u_* は、対数則の性質を利用し、高さ 1 cm と 10 cm の風速を用いて次式より求めることができる。

$$u_* = (u_{10} - u_1)/5.75 \quad \cdots \cdots (5)$$

実験に用いた砂は現地観測を行った米津浜海岸の砂である。

風洞末端の砂面がなくなる断面を実験断面と考え、この断面を通過した全砂量を飛砂量とした。風の吹送時間は u_* が小さい場合には 10 分間、 u_* が大きい場合には 2~3 分間とした。結果を図 5 に示す。図によれば、 u_* が 300 cm/s までは係数 1.0~1.2 を与えた場合の Bagnold 公式あるいは河村公式と良く一致することがわかる。

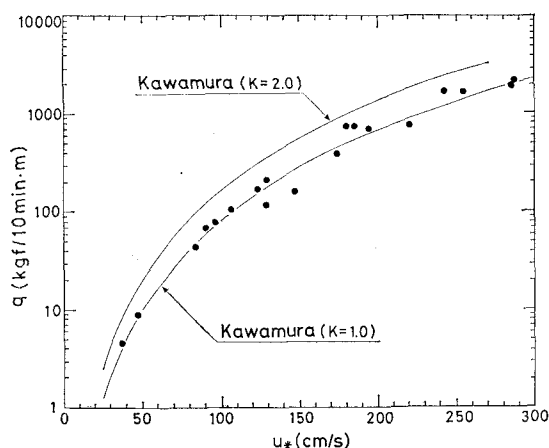


図-5 強風下における飛砂量と摩擦速度の実験結果

5. Bagnold 公式と河村公式の係数についての検討

昭和 56 年 1 月の観測では風速の鉛直分布を測定したすぐ側の C 点の捕砂器による飛砂量と摩擦速度の関係は、係数 1.0 を与えた場合の Bagnold 公式あるいは河村公式に良く一致した。3.2 節に示したように捕砂器による断面平均飛砂量と摩擦速度との関係は同じく係数 1.0 を与えた場合の Bagnold 公式あるいは河村公式に良く一致する。これは 図-3 の (c), (d), (e) からわかるように C 点の飛砂量がほぼ断面平均飛砂量に等しい値を示すことから推定できる。

一方、トレンチトラップが全ての飛砂を捕獲するとして、昭和 56 年 1 月の観測におけるトレンチ内の堆積飛砂量から求めた Bagnold 公式あるいは河村公式の係数は共に 1.25 であった。また、昭和 57 年 1 月の観測によるトレンチ内の堆積飛砂量から求めた値は Bagnold 公式では 1.5、河村公式では 1.54 となった。両公式による推算値が正しいと仮定すれば昭和 56 年 1 月と昭和 57 年 1 月のいずれかのトレンチ内における堆積量の測定に誤差があったことになる。逆に、トレンチ内の測定が正しいとすれば Bagnold 公式と河村公式に与えた u_* の測定に誤差があったことになる。昭和 57 年 1 月の観測においては観測期間中にトレンチの斜面が一部崩壊していたこと、また、 u_* の評価に用いた風速記録が昭和 56 年 1 月では観測地点の風上約 8km の浜名大橋上でのものであるのに対して、昭和 57 年 1 月では観測地点で直接得られたものであることを考えると、トレンチ内の測定と u_*

の計算のいずれにも誤差が含まれていたと考えるのが妥当である。従って、上述した程度の係数の差異はやむを得ないものと思われる。

以上のように捕砂器による飛砂量がトレンチによるそれよりも小さいのは捕砂器の捕砂効率に依ると考えられる。ここで用いた捕砂器の捕砂効率をトレンチによる飛砂量を基に推定すれば、 $1/1.54 \sim 1/1.25$ すなわち $0.65 \sim 0.8$ となる。

前述した現地砂を用いた風洞実験においては、Bagnold 公式、河村公式の係数は 1.0~1.2 と評価された。また、Horikawa・Shen (1960) は標準砂 (粒径 0.2mm) を用いた実験から両公式に対して係数 1.0 を与えている。先のトレンチにより求めた係数は 1.25~1.54 であり、現地における飛砂量を推算するには風洞実験から得られたよりも多少大きな係数を与えなければならないことになる。これは、観測および実験上の測定誤差もさることながら、主として現地と風洞内では風の性質が異なるためと考えられる。すなわち、平均風速は同じであっても、風洞内のほぼ一定の風速下における飛砂量よりも現地の変動する風速の基での飛砂量の方が大きいことになる。

以上述べてきたように、現地データおよび実験データを基にして得られる Bagnold 公式、河村公式の係数には若干違いがあり、これは主に風の違いによるものと考えられる。従って、今後は風の吹き方、すなわち風の息あるいはガストファクター等と飛砂量との関連性について研究する必要がある。

謝 辞： 現地観測を実施するに当って、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、本稿では直接引用しなかったが、浜名大橋上の風速データを利用して頂いた道路公団浜名バイパス管理事務所長野原映一氏に御世話になった。紙上を借りて感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 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 回海講論文集，pp. 574~578, 1981.
- 久保田 進・堀田新太郎・堀川清司： 海浜上の風の特性について、第 37 回年講講演概要集，II, 1982.
- Bagnold, R. A.: The Physics of Blown Sand and Desert Dune, Methuen & Co. Ltd., London, 265 p., 1954.
- 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.
- 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.