

飛砂が存在する状態での風速鉛直分布の現地観測

堀川 清 司*・堀田新太郎**・久保田 進***

1. 緒 言

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岸変形の一要因として海岸の土砂収支に考慮されるべきであると考え、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算定方法を確立するための研究を重ねてきた^{1),2),3),4),5)}。飛砂量算定式において(例えば、Bagnold 公式^{6),7)}あるいは河村公式⁸⁾など)、外力である風力は砂表面に作用する摩擦速度 u_* の形で表示されている。摩擦速度 u_* は砂表面上の風速の鉛直分布が対数則を成すならば、鉛直分布より容易に求めることができる。風洞実験において、時間的に変動のない一定の風を吹送した場合に、砂表面上の風速の鉛直分布は対数則を満足することは既に報告されている^{7),9),10),11)}。しかし、時間的に風速が変動する自然風においても、砂表面上の風速の鉛直分布が対数則を満足するかどうかについての検証は十分になされていない。著者等は飛砂の現地観測において一連の風速の鉛直分布の観測を実施した。観測した一連の風速の鉛直分布の観測結果を報告する。

2. 砂表面上における風速の鉛直分布

飛砂が発生していない時の風速の鉛直分布は式(1)で与えられる。

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

ここに u_z は砂表面上ある高さ z における風速、 u_* は摩擦速度、 z_0 は粗度長さである。一方、飛砂が存在するようになると、鉛直分布は飛砂の影響を受けて式(2)で示されるようになる。

$$u_z = 5.75 u_* \log \frac{z}{z_0} + u' \dots\dots\dots (2)$$

ここに (u', z') は通常 focal point と呼ばれる点で、風速の鉛直分布を表わす曲線群が集中する点である。式(2)は風洞実験による飛砂研究に基づいて、Bagnold

(1936, 1954)^{6),7)}によって提案されたものである(Bagnold は focal point を focus と呼んでいる)。図-1は式(1)と式(2)の関係を示したものである²⁰⁾。

Bagnold は focal point について明確な物理的解釈を与えていない。Bagnold は z' は砂表面に形成される砂澁の高さに関係する量であり、 u' は高さ z' における砂粒子の衝突開始移動限界風速であるとしている。

focal point 近傍の鉛直風速分布は、必ずしも図-1に示してある式(2)で表わされるような曲線になるわけではない。図-2は focal point 近傍の鉛直分布の測定例を模式図として示したものである¹²⁾。図中実線は測定値を結んだ直線を示し、点線は十分に上方の分布(対数則)直線を延長した直線を意味している。図-2(a)は Bagnold (1936, 1954)^{6),7)}が測定した風速分布の例である。図よりわかるように focal point 近傍の上方では風速の測定値は式(2)で表わされる曲線より小さくなり、focal point で摩擦速度の大小に関係なく風速はほぼ一定の値となっている。focal point の下方では風速の測定点に限りがあるが、風速の測定値は式(2)で表わされる直線にはほぼ一致している。図-2(b)は Chepil (1945)^{9),10)}が

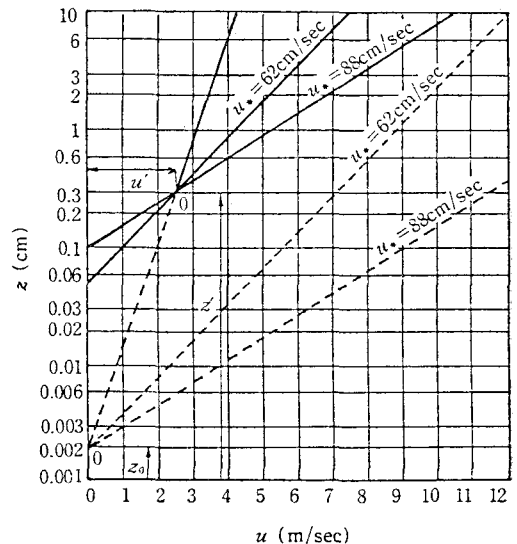


図-1 砂面上における風速鉛直分布(堀川, 1973)²⁰⁾

* 正会員 工博 東京大学工学部長
 ** 正会員 工博 東京都立大学助手 工学部土木工学科
 *** 正会員 INA 新土木研究所 海岸海洋部

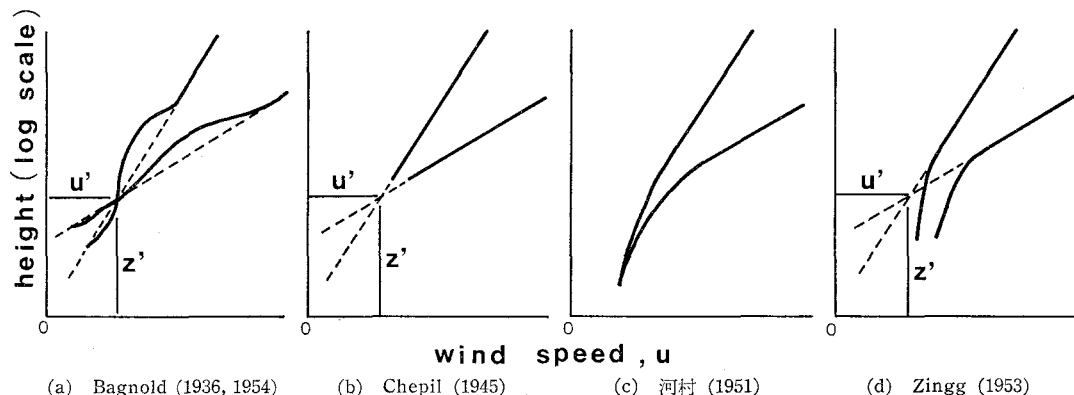


図-2 focal point 近傍の風速分布の模式図

粒径分布の広い耕土が移動する状態で測定した分布の例である。focal point 近傍の風速は実測されていないが、分布を表わす曲線群は明らかにある 1 点に収斂し focal point が存在することを予測している。図-2 (c) は河村 1951)⁸⁾ が実測した風速の分布の例である。摩擦速度の大小に関係なく砂表面での風速は一定の値に近づくことを示しているが、focal point は存在しない。図-2 (d) は Zingg (1953)¹¹⁾ によって実測された分布の例である。式 (2) で表わされる曲線群が集中する focal point は存在するが、focal point 近傍の実測の風速は式 (2) で表わされる曲線より大きくなっている。上述のように、focal point 近傍の風速分布は測定者によって異なっている。

一方、Owen (1964)¹³⁾ は空気中における砂粒子の saltation 運動について解析している。このモデルによると focal point は存在しない。図-2 の風速分布は風洞内で風速が時間的に変動しない一定の風速のもとでピトー管で測定されたものである。高濃度の砂粒子が混在する空気の流れを測定するためのピトー管の有効性に問題がある。また、ただか砂表面上 1 cm 以内での風速分布の測定であり、流動している砂表面の決定にも困難がある。図-2 の風速分布のいずれが正しいか現時点では判断できない。また河村の測定や Owen のモデルのように focal point の存在を否定してしまうほど十分に信頼できる測定がなされているわけではない。砂表面近傍の風速分布は飛砂運動のメカニズムに直接関係する事柄であるから、実体を明らかにすべく今後一層の努力が必要である。

3. 現地観測

現地観測は静岡県浜松市の米津浜で実施した。この海岸は冬期に西よりの季節風が卓越し、飛砂が日常的に発生している。風は汀線にはほぼ平行に吹く。現地観測は昭和 56 年 (1981), 57 年 (1982), 58 年 (1983) の 1 月に行った。図-3 は 56 年における観測時における海浜断面と

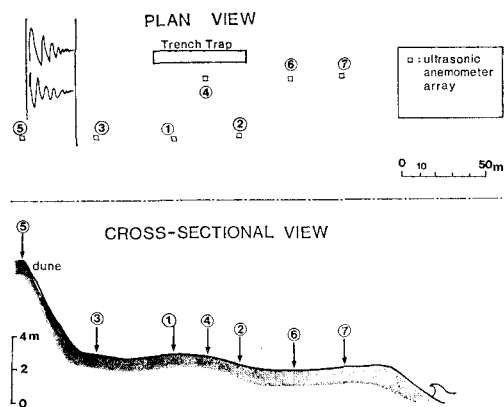


図-3 海浜断面と鉛直分布観測地点

鉛直分布を観測した地点を示す。観測の詳細は文献 1), 4) を参照されたい (57 年, 58 年については観測の数が少ないので海浜断面と鉛直分布の観測地点を示す図を省く^{2), 8)})。風速の鉛直分布は 1 台の 3 成分風速計と 6 台の 2 成分風速計より成る超音波風速計アレーで観測した。鉛直分布は 7 台の風速計による観測を原則とした。

4. 観測結果

表-1 に鉛直分布の観測時間および求められた focal point の値をまとめてある。後の検討のために現地の砂を用いた風洞実験にて求められた focal point の値も記してある^{4), 5), 17)}。

図-4 に 10 分間平均風速の鉛直分布を示す。図中に観測期間中の最大と最小の摩擦速度およびそれらのほぼ中間の摩擦速度を与える鉛直分布の例を示してある。この砂浜の中央粒径 d_{50} は約 0.3 mm であり、対応する流動開始限界摩擦速度 u_* は約 25 cm/s と考えられる。鉛直分布より定まる摩擦速度が 25 cm/s より小さい分布は白スキのシンボルで図示してある。図-4 (g) は後に説

明する。図-4 (k), (l) と図-4 (m) はそれぞれ昭和57年1月および昭和58年1月に観測したものである。観測地点については文献2) および3) を参照されたい (図-4 (k), (l) は文献2) p. 269. 図-1, U および V 地点, 図-4 (m) は文献3) p. 303. 図-1, P 点より海側へ約5m離れた地点で観測したものである)。

図-4 は観測値を通る平均的な曲線より逸脱している点も認められるが、砂浜上平坦部において、10分間平均風速の鉛直分布は対数則を満足し、かつ focal point が定まることを示している。ある高さの風速値が平均的な曲線より逸脱している原因としては、2つの理由が考えられる。ひとつは風速計の0点の移動であり、他は超音波発振プローブが風向とほぼ平行に位置したために、プローブによって風速に乱れを生じ、その影響を受けたものと考えられる。図-4 (g) は鉛直分布を示す曲線の勾配が高さ約1mの位置で変っている。このような例は Nemoto et al. (1969)¹⁴⁾ によっても観測されている。しかし、Nemoto et al. はその理由を明らかにしていない。この観測地点は堤防上の頂部であり、表面は植生に覆われている。風速の鉛直分布は地形や植生の影響を受けているものと考えられる。このような地点は当面の問題と関係ないので、以後考慮しないことにする。

5. focal point についての検討

2章に述べたように、focal point の存在には疑義があるが、図-4 に示されているように、飛砂の存在している状態における風速の鉛直分布を示す曲線の延長上に曲線群が集中する点が存在する。図-4 における曲線群が集中する点は、Owen が指摘したように、分布を示す曲線群は厳密に1点に集中しているわけではない。図中の

表-1 鉛直分布観測時間と focal point の値

年月日	観測時刻	観測地点	focal point u' (cm/s) z' (cm)		図番号または参考文献
1981.1.7	15:00~16:00	図-3の①	215	0.23	図-4 (a)
" 1.8	13:00~15:50	図-3の①	190	0.25	図-4 (b)
" 1.9	11:00~15:00	図-3の①	205	0.16	図-4 (c)
" 1.10	10:30~11:10	図-3の②	210	0.33	図-4 (d)
" 1.10	13:30~15:10	図-3の③	285	0.36	図-4 (e)
" 1.11	11:00~12:00	図-3の④	320	0.35	図-4 (f)
" 1.11	13:50~14:30	図-3の⑤	—	—	図-4 (g)
" 1.11	16:15~16:50	図-3の⑥	160	0.20	図-4 (h)
" 1.12	10:00~11:00	図-3の⑥	300	0.38	図-4 (i)
" 1.12	13:00~16:30	図-3の⑦	280	0.60	図-4 (j)
1982.1.15	10:40~14:50		245	0.60	参考文献2)
" 1.16	10:30~13:30		—	—	" 2)
1983.1.11	14:40~16:00		230	1.0	" 3)
風洞実験 (一定風速)		乾燥砂	250	0.60	参考文献4)
		湿砂	290	0.50	" 17)

点は、多数の分布曲線の交点が集中するある小さい領域の中心として示してある。しかし、この交点の散らばりの範囲は観測上の誤差範囲以内と考えられる。

飛砂が発生している砂表面近くでの風速分布と focal point の存在に対してはさらに検討の余地があるが、今回の現地観測では砂表面上ある程度の高さ以上では風速の鉛直分布は対数則を満足し、かつこれらの曲線群が集中する「点」と呼べるような小さい領域が曲線群の延長上に存在する。したがって式(2)を、摩擦速度を求めるための近似式として使用することは実用上問題がないと判断される。

表-1 に示したように、focal point の値にはかなりの差異がある。その原因としては、風速の鉛直分布は砂浜上に存在していた波高 20~30 cm、波長 20~30 m の起伏の峯部や谷部で測定されているので、このような地形

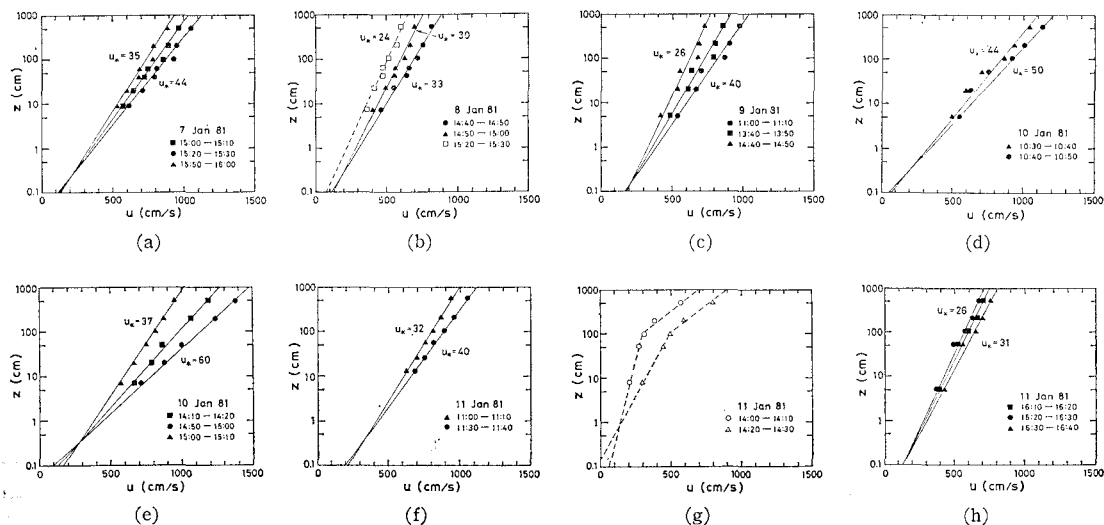
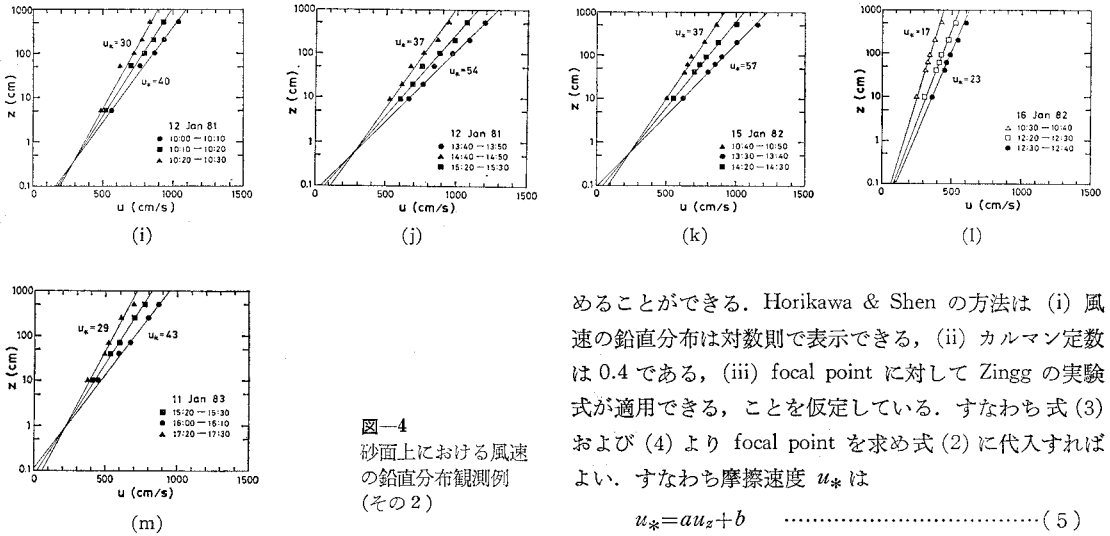


図-4 砂面上における風速の鉛直分布観測例 (その1)



図—4
砂面上における風速
の鉛直分布観測例
(その2)

や砂表面に存在する砂澁の大きさによる影響の他、砂澁の存在している不規則な現地砂面上の原点の決定方法などに問題があると考えられる。

focal point の値に対して、Zingg (1952)¹¹⁾ は一連の風洞実験から次の実験式を与えている。

$$u' = 894d \quad \text{..... (3)}$$

$$z' = 10d \quad \text{..... (4)}$$

ここに d は砂の粒径で単位は mm である。 u' および z' はそれぞれ (cm/s) と (mm) で与えられる。

図—6 は従来の研究で得られている u' と z' の値を粒径値に対してプロットしたものである。 Hsu (1973)¹⁵⁾ による観測値は砂の粒径を 0.25 mm としてプロットしてあるこの粒径値については原論文に記述されていなかったで、著者が直接原著者に確認したものである。 図中に著者等の現地観測および実験より求められた値の最大値と最小値および平均値 (⊗) も示してある。 図—6 によるとデータにはかなりのバラツキがあるが、Zingg の実験式はバラついているデータの平均的な値を与えるものと考えてもよいと思われる。

focal point の値が与えられるなら、Horikawa & Shen (1960)¹⁶⁾ によって提案されている方法によって、ある任意の一点の高さの風速値より摩擦速度 u_* を求

めることができる。 Horikawa & Shen の方法は (i) 風速の鉛直分布は対数則で表示できる、(ii) カルマン定数は 0.4 である、(iii) focal point に対して Zingg の実験式が適用できる、ことを仮定している。 すなわち式 (3) および (4) より focal point を求め式 (2) に代入すればよい。 すなわち摩擦速度 u_* は

$$u_* = au_* + b \quad \text{..... (5)}$$

で与えられる。 ここに a と b は定数である。

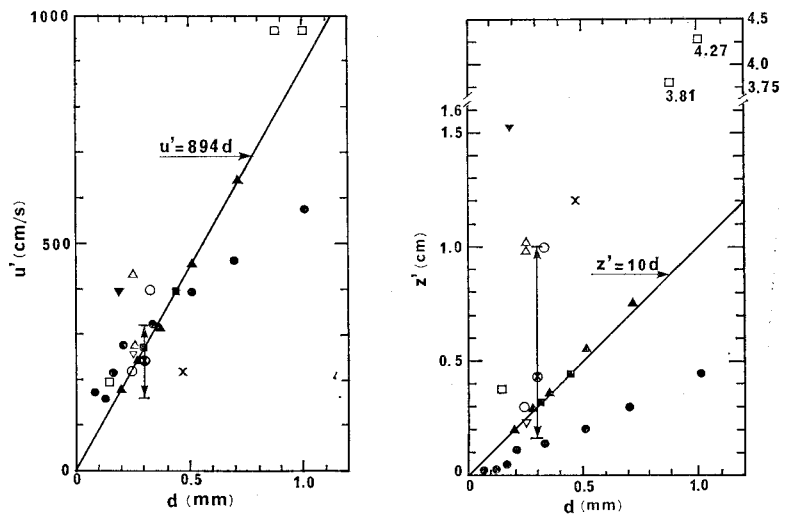
Horikawa & Shen の方法に従って、観測された focal point (u' (cm/s), z' (cm)) の最大値 (320, 1.0), 最小値 (160, 0.16), 平均値 (245, 0.43) および粒径 0.3 mm の場合に Zingg の実験式 (3), (4) 式より予測される値 (268, 0.3) を式 (2) に代入して、高さ 1 m での風速値 u_{100} (cm/s) と摩擦速度 u_* (cm/s) との関係を求めると、それぞれ次式のようなになる。

$$u_* = 0.0870u_{100} - 27.8$$

$$(u' = 320 \text{ cm/s}, z' = 1.0 \text{ cm}) \quad \text{..... (6)}$$

$$u_* = 0.0622u_{100} - 10.0$$

$$(u' = 160 \text{ cm/s}, z' = 0.16 \text{ cm}) \quad \text{..... (7)}$$



○ Bagnold^{6,7)} ● Chepil^{9),10)} ▲ Zingg¹¹⁾ ■ Belly¹⁸⁾
□ Kadib¹⁹⁾ △ Hsu¹⁵⁾ △ Nemoto et al.¹⁴⁾ × Horikawa et al.⁴⁾
▼ Horikawa & Shen¹⁶⁾

図—5 実測されている focal point の値の比較

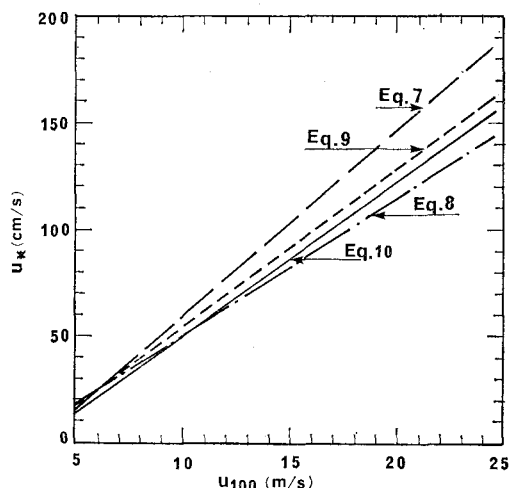


図-6 異なった focal point の値より予測される摩擦速度の比較 ($d=0.3$ mm の場合)

$$u_* = 0.0735u_{100} - 18.0$$

$$(u' = 245 \text{ cm/s}, z' = 0.43 \text{ cm}) \dots\dots\dots (8)$$

$$u_* = 0.0689u_{100} - 18.5$$

$$(u' = 268 \text{ cm/s}, z' = 0.3 \text{ cm}) \dots\dots\dots (9)$$

図-6 は式 (6)~(9) をプロットしたものである。

風速の大きさによっても異なるが、風速 8~20 m/s の間では式 (6) は式 (7) に比べて 10~30% 大きい摩擦速度を与える。式 (8) は式 (9) より 5~10% 大きい摩擦速度を与える。式 (8) と式 (9) の差異は小さく、Zingg の実験式による focal point の値を用いた式 (9) は観測された平均の focal point の値を用いた式 (8) とほぼ等しい摩擦速度を与え、Horikawa & Shen の方法は妥当な値の摩擦速度を算出するのに有効な方法であると判断できる。

6. 結 語

現実の問題として、実際にある海岸において、ある期間に移動する総飛砂量を推算しようとするとき、摩擦速度を求めるための風速の鉛直分布が観測されている例はほとんどなく、ある高さ一点での風速値より摩擦速度を推定しなければならないのが実情である。このようなとき Horikawa & Shen によると式 (5) が応用できることは工学上極めて好都合である。そして、本現地観測による検討の結果は式 (5) によって摩擦速度を推定する方法は実用的に十分に妥当であることを示したと云える。

謝 辞： 現地観測の実地に当って静岡県浜松土木事務所のご配慮を頂いた。関係各位に感謝の意を表する。

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回海岸工学講演会論文集，pp. 574~578, 1984.
- 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.
- 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.
- Horikawa, K., S. Hotta, S. Kubota and S. Katori: On the sand transport rate by wind on beach, Coastal Eng. in Japan, Vol. 26, JSCE, pp. 100~120, 1983.
- Horikawa, K., S. Hotta, S. Kubota and S. Katori: Field measurement of blown sand transport rate by trench trap, Coastal Eng. in Japan, Vol. 27, pp. 213~232, 1984.
- Bagnold, R. A.: The movement of desert sand, Proc. R. Soc. London, Ser. A.157, pp. 211~235, 1936.
- Bagnold, R. A.: The Physics of blown sand and Desert Dunes, 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.
- Chepil, W. S.: Initiation of soil movement, Soil Science, Vol. 60, pp. 397~411, 1945.
- Chepil, W. S. and R. A. Mile: Wind erosion of soils in relation to size and nature of the exposed area, Scientific Agriculture, Vol. 21, pp. 479~488, 1941.
- Zingg, A. W.: Wind tunnel studies of the movement of sedimentary material, Proc. of Fifth Hydraulics Conf., pp. 111~135, 1953.
- Task Committee on Preparation of Sedimentation Manual: Sediment transportation mechanics: wind erosion and transportation, Journal of Hydraulics, Proc. ASCE, pp. 251~266, 1965.
- Owen, P. R.: Saltation on uniform grains in air, Journal of Field Mech., Vol. 20, Part 2, pp. 225~242, 1964.
- Nemoto, S., M. Mitsudera, K. Takahashi, H. Uotsu and S. Kobayashi: On the threshold friction velocity for saltation of sand, 気象研究所報告，第20巻，第4号，pp. 365~383, 1969.
- Hsu, S. A.: Computing eolian sand transport from shear velocity measurement, Journal of Geology, Vol. 81, No. 6, pp. 739~742, 1973.
- Horikawa, K. and H. W. Shen: Sand movement by wind action—on the characteristics of sand traps—, U. S. Army Corps of Eng., Beach Erosion Board, Tech. Memo., No. 119, 51 p., 1960.
- 堀川清司・堀田新太郎・久保田進・香取完和： 湿砂面上における飛砂についての研究，第31回海岸工学講演会論文集，pp. 391~395, 1984.
- Belly, P. Y.: Sand movement by wind (with Addendum III by A. A. Kadib), U. S. Army, Corps of Engrs., Coastal Eng. Res. Center, Tech. Memo. No. 1, 79 p., 1964.
- Kadib, A. A.: A function for sand movement by wind, Institute of Eng. Res. Tech. Report HEL-2-12, Univ. of Calif., Berkeley, 91 p., 1965.
- 堀川清司： 海岸工学，東京大学出版会，東京，317 p, 1973.