

風成デューンの風下斜面上における飛砂

The Diffusion of Grains in the Lee Slope of Aeolian Dunes in Nakatajima, Shizuoka Prefecture.

松倉公憲*・泉 耕二**・佐々木巽***・武田一郎***

Matsukura, Y., Izumi, K., Sasaki, T. and Takeda, I.

I はじめに

風成の砂漣やデューンに限らず、砂床河川の河底や砂質の浅海底に形成される砂床形は、風や流れの方向に徐々に前進していることはよく知られた事実である。このデューンの前進プロセスに、風や飛砂がどのように関連しているかを解明しようというのが本研究の出発点であった(松倉・目崎; 1973)。本研究はその第1歩として、特に風成デューンの風下斜面上における飛砂量の分布と飛砂の粒径分布について考察した。

従来この問題に関する研究はそれほど多くはない。風成デューンの研究で最も重要であり、かつ後年の研究に多大の影響を与えたものに Bagnold (1941)の研究がある。彼は、風成砂床形を考察するうえで飛砂現象あるいは飛砂量を解明することが重要であることを提唱した。そして、風洞実験において風の状態と飛砂の性状を詳細に追求し、あわせてリビア砂漠での野外調査をもとにして風成砂床形についての種々の議論を展開した。風洞実験においては、砂漣と飛砂の関連性について詳述しているが、風洞においては、デューンの規模の砂床形が形成されないことと、野外でのデューン測定の高難さも加わり、デューン上の風や飛砂量については定量的な研究はされなかった。

Inman et al. (1966) は Mexico の Baja California の海岸砂丘に存在する波高 6 m のデューン上において風速垂直分布を測定した。そして風速

の大きい場合でも、デューンの slip face を吹きあがる剝離域の逆向きの風速は 5 m/sec を越えず、この風による飛砂はなかったと述べている¹⁾。

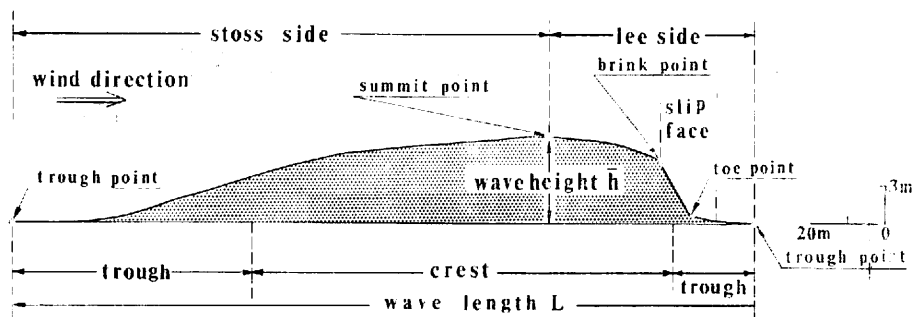
一方、水成の砂床形における流れのパターンと流砂の運動機構については Allen (1965, 1968, 1970) の一連の研究がある。彼は、実験水路の中に、砂でコーティングした木製の sand wave の模型、下流側に流砂の trap 装置をつけた砂からなる sand wave、下流側に移動可能なフリーな状態の sand wave の3種類の実験装置をつくり、sand wave の周辺における流れのパターンや lee slope における砂の堆積量、sand wave 内の堆積構造、slip face 上での avalanche の発生プロセス等について詳細な研究を行なった。しかし、この実験のような流水による砂粒の運搬は、飛砂の運搬様式とは若干異なっているものと思われる。風成デューンに直接適用できないと考えられる。

いずれにしても風成デューン上における風速や飛砂の測定例は極めて少なく、その意味においても本研究のような風や飛砂に関するデータの積み重ねが必要であると思われる。

II 調査対象デューンと測定方法

調査対象としたデューンは、静岡県浜松市郊外にある中田島砂丘地において冬季の卓越風(W~WNW)によって形成されているデューン群の中から、波長(wave length L)がほぼ200m、波高(wave height, h) 6.4 mのものを選んだ(第1

*筑波大学地球科学系、**筑波大学水理実験センター、***筑波大学(院)地球科学研究科



第1図 測定対象デューンの縦断形およびデューン各部の名称

図、なお本稿で使用するデューンの各部分の名称については第1図に従う)。このデューンは風下側に slip face をもち、steepness (h/L) が0.032 という値をもつ典型的なデューンである。

調査は1978年2月13日と14日の両日にわたり、デューン上において風と飛砂の測定を行なった。両日ともW~WNWの一定の風向であり、デューンの crest の summit point と slip face 基部の trough point に設置したピラム風速計で10分間の平均風速と、同じく summit point に設置した捕砂箱²⁾で10分間の飛砂を捕捉した。さらに同時に slip face 上に直径4.2cm、深さ7.5cmの円筒形のサンプルビン10~12ヶを斜面下方へ直線状に設置し、brink point から飛び出し slip face 上に落下する飛砂を捕えた。

以上の測定を同時に10分間ずつ10Run 行なった。その結果は第1表にまとめた。2月13日は、crest 上の風速（地上高1.0mの風速で $V_{1.0}$ で表わした）が9~11m/sec とやや大きく、飛砂量 (q) もかなり多い。一方、2月14日は6~8m/sec と風速がやや小さく、飛砂量もそれほど多くない。

捕砂箱および捕砂ビンで採取した飛砂は実験室に持ち帰り、おのおのの粒度組成を測定した。

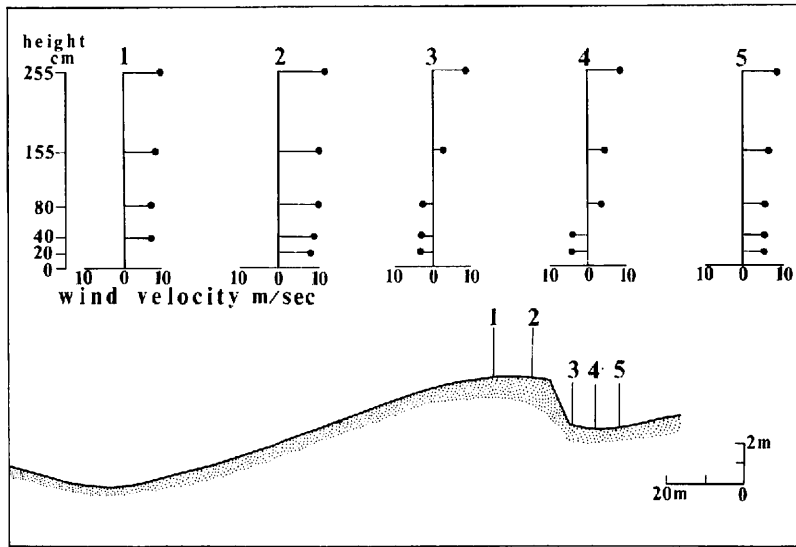
なお、第1表の摩擦速度 U_* については、同じ遠州灘の砂丘地における測定結果より得られた U_* と $V_{1.0}$ との関係式³⁾ (松倉, 1977) によって計算した。

III デューン上における風

Inman et al (1966) の測定にもみられるように、一般的にデューン上を吹く風は、ゆるやかな傾斜をもつ風上斜面 (stoss side) をはい上り、デューンの crest 付近で風速がやや大きくなり、brink point において剥離 (separation) を起す。そして slip face 基部では風が弱く、しかもしばしば crest 上とは逆向きの風向を示す。

このような dune 上の風についての野外での実測値は少ないと思われるので、今回の測定ではないが、筆者の1人松倉が日崎と1973年3月3日に行なった測定例を示す(第2図参照)。本稿と同じ中田島デューン群の中の1つで、波長110m、波高2.4mと本測定対象デューンのほぼ半分の大きさのデューン上の5地点において、ロビンソン風速計を用いて風速の垂直分布を測定した。風上斜面をはい上った風は、brink point で剥離し、測点3においてはほぼ地上高1.0mの高さまで、また測点4においては地上高40~50cmの高さまで crest 上の風向とは逆向きの風となっていることから、この部分では剥離域に入っているものと認められる。また測点5においては、すべての高さで風上斜面上と同じ風向を示していることから、附着点 (attachment point) は測点4と5の間であり、剥離域は slip face 基部から風下側にデューンの波高のほぼ5~6倍の距離のところまで存在していることが明らかになった。

本測定時(2月13日の例)においても、crest 上



第2図 デューン上の各地点における風速垂直分布 (1973年3月3日の松倉・目崎の測定による)

第1表 測定値および測定値からの計算諸値

| RUN | DATE | TIME | $V_{1.0}$ (m/sec) | WIND DIRECTION | U_* (cm/sec) | q (gm/cm ² ·sec) | Md (ϕ) | $V_{1.0}$ (m/sec) |
|-----|-------------|-------------|----------------------|-------------------|-------------------|----------------------------------|------------------|----------------------|
| 1 | Feb. 13 '78 | 11:20-11:30 | 9.38 | W-WNW | 41.58 | 0.0679 | 1.951 | 3.87 |
| 2 | " | 11:40-11:50 | 9.08 | " | 40.12 | 0.0564 | 1.956 | 3.17 |
| 3 | " | 13:00-13:10 | 10.40 | " | 46.52 | 0.0700 | 1.853 | 3.00 |
| 4 | " | 13:20-13:30 | 9.84 | " | 43.81 | 0.0848 | 1.963 | 3.58 |
| 5 | " | 13:50-14:00 | 10.45 | " | 46.76 | 0.1120 | 1.913 | 3.43 |
| 6 | " | 14:25-14:35 | 10.85 | " | 48.70 | 0.1402 | 1.828 | 3.99 |
| 7 | " | 14:50-15:00 | 9.72 | " | 43.23 | 0.0788 | 1.923 | 3.97 |
| 8 | Feb. 14 '78 | 10:50-11:00 | 6.77 | W-WNW | 28.92 | 0.0058 | 2.047 | — |
| 9 | " | 11:10-11:20 | 7.83 | " | 34.06 | 0.0218 | 1.988 | — |
| 10 | " | 11:30-11:40 | 7.57 | " | 32.83 | 0.0200 | 2.023 | — |

$V_{1.0}$: 地上高1.0mにおける平均風速, U_* : 摩擦速度, q : 飛砂量
Md: 飛砂の平均粒径, $V_{1.0}$: slip face 基部における地上高1.0mにおける平均風速

での風速 ($V_{1.0}$) が大きく, slip face 基部での風速 ($v_{1.0}$) は小さく, しかも crest 上での風向 (W~WNW) と逆向きの風向 (E~ESE) を示していることより, 上述とほぼ同様の風の分布を示していると考えられる。この風速 ($v_{1.0}$) は小さい (3~4 m/sec) とはいえ, 少量ではあるが slip face を吹きあがるような飛砂を起しているように

観察された。

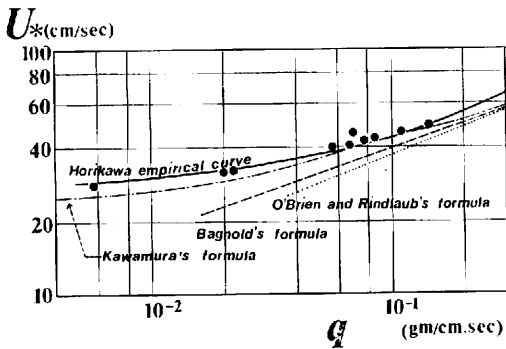
IV デューン上における飛砂

1) デューンの crest 上の飛砂

2月13日のように風速の大きい時には, デューン上の crest においては, ほぼ砂床面上30cmの層の中を多量の砂が saltation しあい (Owen, 1964

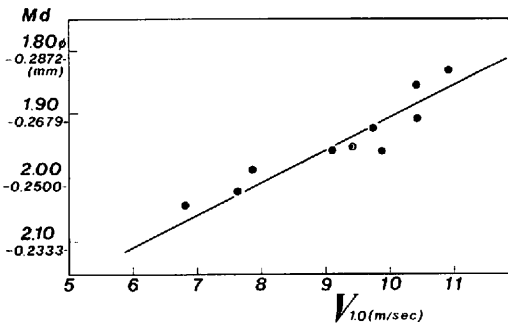
のいう saltation layer に相当すると考えられる)、飛砂量も多く砂床には砂漣は認められない。2月14日のように風速のやや小さい時には飛砂量が少なく、saltation の高さや飛距離が小さいように観察され、この時砂漣の形成が顕著であった。そこでまず、crest 上での飛砂量とその飛砂の粒度組成について調べた。

デューンの crest 上の風速 ($V_{1.0}$) が大きくなれば当然そこでの飛砂量は多くなる (第1表参照)。従来、Bagnold (1941) や河村 (1950) らの理論式によれば、飛砂量 (q) は摩擦速度 (U_*) の3乗あるいは風速の3乗に比例すると言われている。第3図に示した実線および破線群は、従来の研究によって描かれた U_* と q との関係である。このグラ



第3図 デューンの summit point 付近における摩擦速度 (U_*) と飛砂量 (q)

(Horikawa & Shen: 1960 の図をもとに一部改変)



第4図 デューンの Summit Point 付近における風速 ($V_{1.0}$) と飛砂の平均粒径 (Md)

フに、デューンの crest 上で測定した $V_{1.0}$ から換算した U_* と q との値をプロットすると、Horikawa & Shen (1960) によって風洞実験の結果得られた関係にほぼ一致する。

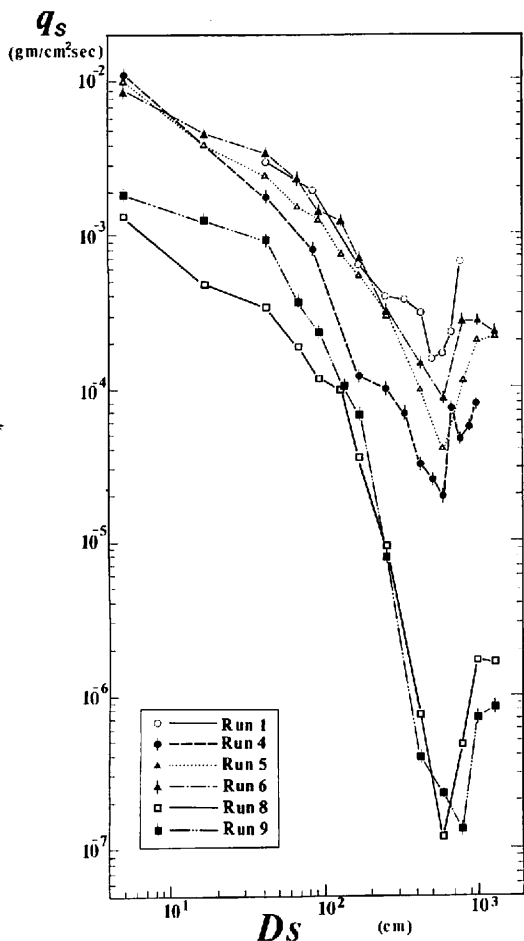
また、風速 ($V_{1.0}$) と捕砂箱で捕えた飛砂の平均粒径 (Md) との関係は第4図のようになり、風速が大きくなるに従い飛砂の平均粒径が大きくなる傾向が認められる。このことは、風が強くなるとそれに従い surface creep で運搬される砂粒子の量が多くなることと、saltation で運搬される粒子の粒径が大きくなることによるものと考えられる。

2) デューンの slip face 上の飛砂

デューンの crest 上において上述のような飛砂が起っているのと同時に、風の剝離とともに brink point から飛び出した砂粒が、slip face の斜面上にどのような落下分布を示すかについてみた。

まず、slip face 上における飛砂量 (前述のサンプルビンによる捕砂) の分布について5第図に示した。横軸は slip face 上の測点の brink point からの水平距離 (D_s : 対数で表示) を示し、縦軸は単位面積・単位時間あたりに換算した捕砂量 (q_s : 対数で表示) を示している。この図から次の3点が読みとれる。

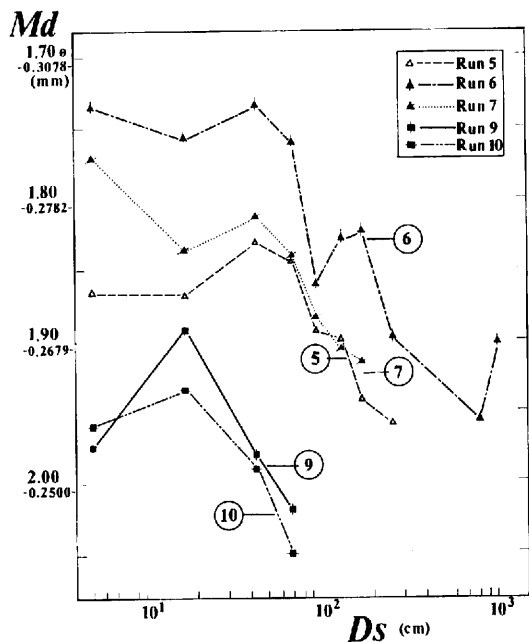
1点目は、crest 上での飛砂量 (q) に対応して、風速が大きい時 (第5図の Run 1, 4, 5, 6) は飛砂量 (q_s) が全体的に多く、風速の小さい時 (図5の Run 8, 9) は飛砂量 (q_s) が全体的に小さいということである。2点目は、斜面下方に行くに従い飛砂量が急激に減少することであり、しかも飛砂量の減少傾向をみるとほぼ2つの直線部に分けられるようにみえる。すなわち、斜面上方における直線の勾配の緩やかな部分と斜面下方における直線の勾配の急な部分とである。言い換えると斜面上方における飛砂量の減少の仕方が緩やかな部分と、斜面下方における飛砂量の減少の急激な部分とである。さらにその傾斜の変換点が、風速の大きい時には $D_s=70\text{cm}$ 位の所に存在し、風速のやや小さい時には 40cm 位の所に存在することが判る。このことは、もし surface creep によ



第5図 slip face 上における飛砂量 (q_s) の分布 (D_s は slip face 上の brink point からの水平距離)

って転動してきた粒子が斜面上方に落下し、斜面下方への落下が saltation の粒子だけだと仮定すると、あるいはこの直線勾配の変換点が surface creep によって転動してきた粒子の落下する限界の距離にあたりと考えられる可能性がある。読みとれる3点目のことは、slip face の斜面末端から基部にかけての部分において飛砂量が若干多くなっていることである。この部分の飛砂は、前述の slip face 基部での逆向きの風によってもたらされたものである。

次に、これら slip face 上の飛砂の平均粒径を



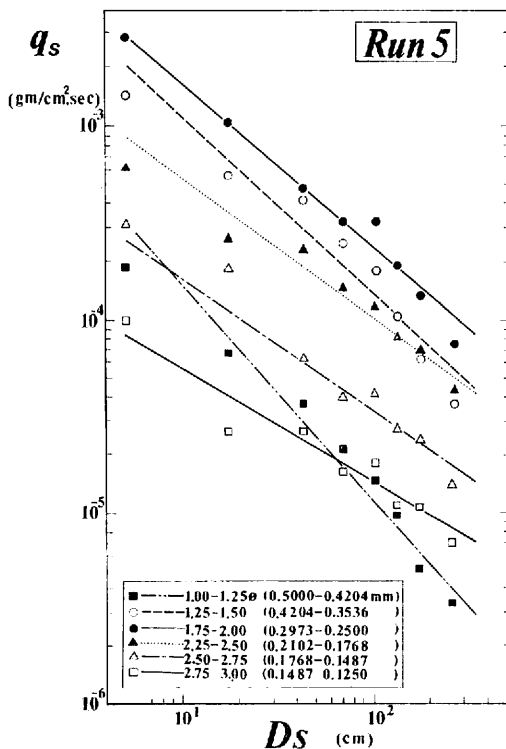
第6図 slip face 上における飛砂の平均粒径 (M_d) の分布 (図中黒丸で囲んだ数字の示す線は summit point 付近の飛砂の平均粒径を示す)

みてみよう。第6図に示したように、風の強い Run 5, 6, 7 の場合には飛砂の平均粒径は全体的に大きく、風の弱い Run 8, 9 の場合にはその平均粒径は小さい。これは前述した crest 上での風速と飛砂の平均粒径の議論 (第4図参照) と全く同様である。また大局的にみれば brink point から遠ざかるに従い飛砂の平均粒径は小さくなっている。特に斜面上部に落下する砂粒の平均粒径は crest 上の飛砂の平均粒径よりかなり粗く (1φ以上の差異のあるものもある)、逆に斜面下方に落下する砂粒の平均粒径はかなり細くなっている⁹⁾。しかしこの場合、必ずしも単純に斜面下方ほど平均粒径が小さくはなく、斜面上方では平均粒径がほとんど変化しないか、あるいは逆に brink point に近い部分がやや細粒である。すなわち、風の強い Run 5, 6, 7 においては、 D_s が 40cm の所で平均粒径が1つの極大値をもち、風の弱い Run 9, 10では約20cmの所に極大値をもってい

る。このことは、前述したように風が強くなると飛砂の中において相対的に粒径の大きいものの brink point からの飛距離が増大することを示しているものと考えられるが、平均粒径が斜面のある距離の所で極大値をもつ理由については不明である。

上記の第5図および第6図に関する議論より、各粒度階ごとに slip face 上での飛砂量 (q_s =落下量)の分布が異なっていることは明らかである。そこで各サンプルピンで捕砂したものの粒度分析を行ない、各粒度階ごとの飛砂量(q_s)を求めてみた。第7図はその1つの例 (Run 5 の場合)を示したものである。繁雑さをさけるため、図には0φから4φまで1/4φ間隔で節分けした18階級の中から6階級のものを選んで示した。

Run 5 の場合には、全体的にどの階級のものも



第7図 slip face 上における各粒度階ごとの飛砂量(q_s)分布 (Run 5 の例)

斜面下方へ行くほど飛砂量は減少する傾向にある。その中で、1.75~2.00φの階級が最大の飛砂量を示し、これより粗くても細かくても飛砂量は少ない。特に、粒径の粗いものは斜面下方への飛砂量の減少の仕方が急激 (第7図において直線とみなした傾向線の傾きが大きい) であり、逆に、粒径の細かいものほど斜面下方への飛砂量の減少の仕方が緩やか (第7図において傾向線の傾きが小さい) である。すなわち、このことから粒径の大きいものは斜面の上方により多く落下し、粒径の小さいものほど斜面の下方まで飛ばされるということが再確認される。

以上の slip face 上における飛砂について、粒度階ごとの飛砂量分布 (第7図) を、全飛砂量の分布の折れ曲がり (第5図) や、平均粒径の折れ曲がり (第6図) とあわせて考察すると次のことが考えられる。すなわち斜面上方においては crest 上を surface creep で転動してきた粗い粒子と saltation してきたやや粗い粒子が多量に落下し、斜面の下方においては saltation してきた粒子が、その粒子の大きさとその時の風速に応じた飛距離の所に落下して堆積するというを示しているものと考えられる。

V おわりに

以上の調査結果および考察から、デューンの crest を運搬されてきた砂粒が、brink point を飛び出してから slip face 上でどのように分布 (量的な分布と粒度組成からみた分布) しているかについて若干の知見が得られた。

しかし、これを surface creep や saltation という砂粒の運搬様式との対応で考察することはできなかった。これは今後に残された問題であり、そのアプローチには、砂粒の個々の saltation の運動軌跡を追うという土屋・河田の研究方法を導入することも1つの有効な手段であろうと思われる。

本研究は松倉・日崎 (1973) の調査方法と同様の手法で行なわれたものであり、その第2報である。本研

究を進めるにあたり終始御指導を頂き、本報告に発表の機会を与えて下さった井口正男教授に心より感謝致します。また研究のはじめから種々の議論と助言を頂いた琉球大学の目崎茂和助教授に感謝の意を表します。本研究の研究費の一部は昭和52年度文部省科学研究費補助金(課題番号278096)による。記して謝意を表する。

注

- 1) Inman (1966) の p.795 の Fig.6 をみると、デューンのクレストにおける地上高 1.0m の風速は 7 m/sec 程度であり、この時 slip face 基部の逆向きの風速は 2~3 m/sec 程度であり、文中の値と一致していない。
- 2) 捕砂箱は砂の飛び込み口の幅 2 cm、高さ 30cm で、surface creep と saltation の両者を捕捉する機構になっている(松倉: 1977 の p.411 の photo. 2 参照)
- 3) $U_* = 0.048 V_{1.0} - 0.039 (U_*, V_{1.0} \text{ の単位はいずれも m/sec})$
- 4) slip face の斜面傾斜はほぼ 32° であったので、斜面上の実距離に $\cos 32^\circ$ を乗じて D_s を求めた。
- 5) 斜面下方へ行くほど飛砂量が極めて少量になるため第 5 図中にプロットした以下の斜面下方で捕砂したものは粒度分析が行えなかった。

参考文献

- 河村竜馬 (1950) 飛砂の理論と実測。防災林に関する調査報告, 治山事業参考資料第 II 輯, 林野庁, 23-34.
- 松倉公憲・目崎茂和 (1973) 浜松市中田島におけるバルハン砂丘上の風と飛砂, 日本地理学会予稿集, 5, 55-56.
- 松倉公憲 (1974) 遠州灘海浜上の風成デューンについて, 砂丘研究, 21, 29-40.
- 松倉公憲 (1977) 風成砂床形の形態とその形成条件——遠州灘海岸における観察と測定——地理学評論, 50, 402-419.
- 土屋義人・河田恵昭 (1971) 飛砂における砂粒の運動機構(2)——砂粒の saltation の特性について——京都大学防災研年報, 14-B, 311-325.
- Allen, J.R. L. (1965) : Sedimentation to the lee of small underwater sand waves : an experimental study. *Jour. Geol.*, 73, 95-116.
- Allen, J.R. L. (1968) : The diffusion of grains in the lee of ripples, dunes, and sand deltas. *Jour. Geol.*, 38, 621-633.
- Allen, J.R. L. (1970) : The avalanching of granular solid on dune and similar slopes. *Jour. Geol.*, 78, 326-351.
- Bagnold, R. A. (1941) : *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*. Methuen, 265p.
- Horikawa, K. and Shen, H. W. (1960) : The sand movement by wind action……On the characteristics of sand traps……. *B. E. B. Tec. Memo.*, 119, 1-51.
- Inman, D. L., Ewing, G. C. and Corliss, J. B. (1966) : Coastal sand dunes of Guero Negro, Baja California, Mexico. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 77, 787-802.
- Owen, P. R. (1964) : Saltation of uniform grains in air. *Jour. Fluid Mech.*, 20, 225-242.