

飛砂の限界摩擦速度に関する現地観測

Field Observations of Threshold Wind Friction Velocity for Sand Transport

有働恵子¹

Keiko UDO

This study conducted field observations in terms of the number of blown sand particles and wind velocity in the period of 12–16 Jan 2005 at an open ocean beach in Japan, in order to investigate effects of climate change on the threshold wind friction velocity of blown sand. The data of blown sand number and wind velocity were logged at a frequency of 1 Hz and then divided into 5-minute segments to estimate the threshold wind velocity using Time Fraction Equivalence Method (TFEM). Time-series of the threshold wind velocity (estimated using the TFEM) demonstrated that the threshold corresponded with the value estimated using the Bagnold equation and increased notably during rainfall. The threshold decreased as the mean wind velocity increased.

1. 緒 言

飛砂は砂漠化や海岸に隣接する農地における塩害および道路への堆砂の原因になるなど、様々な分野で深刻な問題となっている。飛砂に関する問題を扱う際には飛砂量の算定が必要となる。飛砂量算定に用いられる飛砂量公式の多くは限界摩擦速度を含み(例えば、河村, 1951; Owen, 1964; Lettau・Lettau, 1978; White, 1979), また、飛砂は摩擦速度が限界摩擦速度を越える場合に発生することを仮定している。限界摩擦速度は飛砂量を推定する上で重要なパラメータであるものの、限界摩擦速度特性については不明な点が残されている。

飛砂の限界摩擦速度は、静止状態から砂粒子が動き始めるときの摩擦速度である流動開始摩擦速度と、跳躍状態にある砂粒子が風速の減少に伴い運動を継続できなくなるときの摩擦速度である衝突移動開始摩擦速度に分けられる。移動開始限界摩擦速度を算定する際には Bagnold 式(1941)が用いられることが多い。Bagnold は、砂粒子の移動開始を支配する外力として抗力(drag force)を仮定する衝力論的な方法により、砂の粒径を用いて限界摩擦速度を定式化した。これによると、限界摩擦速度は粒径が大きくなるにつれて大きくなる。また、風洞実験の結果より、衝突移動開始摩擦速度が流動開始摩擦速度より小さくなるように係数を与えている。これは、砂粒子が跳躍状態にある場合、摩擦速度が徐々に減少し流動開始限界摩擦速度より小さくなっても跳躍粒子の持っている飛砂エネルギーによって砂粒子の運動継続が可能であるためである。このように、風洞実験により風速変動が小さい場合の乾燥した砂の移動開始および衝突移動開始限界摩擦速度に関する知見や推定式は得られているものの、現地海岸における限界摩擦速度については風速や降雨等の気象条件の変化の影響を大きく受けることから、既存の知見および推定式の適用性について

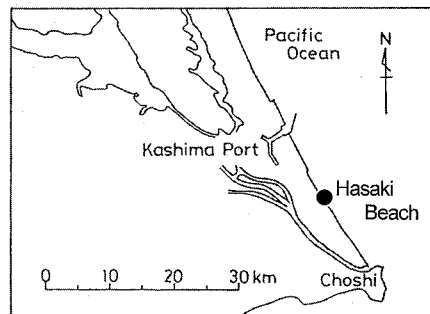


図-1 観測地の位置

検討する必要がある。

Stout・Zobeck (1997) は、瞬間風速および飛砂粒子数データを用いた統計的な限界風速の算定法である Time Fraction Equivalence Method (TFEM) を提案している。限界風速とは、ある高さにおける飛砂発生時の最小風速で、限界摩擦速度に比例する。Stout・Zobeck は、テキサス州 Southern High Plains において、砂面から 2 m の高さにおける風速が 7 ~ 20 m/s で変化する場合には限界風速の時系列解析を行ったものの、限界風速の変化メカニズムに関しては不明である。

本研究では、茨城県波崎海岸において大型低気圧が通過した 2005 年 1 月 12 ~ 16 日の瞬間風速および飛砂粒子数データを用いて TFEM 解析により限界風速の変化を推定し、これと降雨等の気象データとを比較することにより、気象条件の変化に伴う限界摩擦速度特性を調べた。

2. 現地観測の概要

鹿島灘に面する茨城県波崎海岸において、瞬間風向風速および飛砂粒子数の計測を行った(図-1)。波崎海岸は前浜勾配が 1/50 程度の遠浅の海岸で、計測点は平均汀線より 90 m 陸側の後浜である(図-2)。計測期間は晴天時の 2006 年 1 月 12 日 10:38 ~ 13 日 17:28 および大型の低

1 正会員 博(工) 東北大学助教 災害制御研究センター

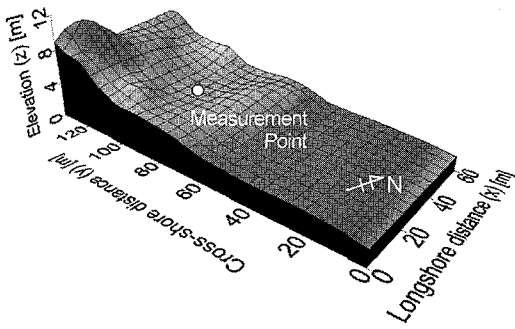


図-2 計測点の位置と周辺地形（基準：鹿嶋港工事用基準面，岸沖方向距離 y ：平均汀線を 0 m とし陸側を正）

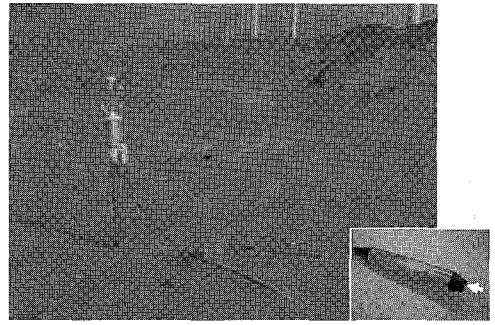


図-3 計測機器の設置状況
（白枠内：飛砂センサー，白矢印：圧電振動子）

気圧が通過した荒天時の 14 日 17:23～16 日 9:19 である。瞬間風向風速および飛砂粒子数を計測する超音波式風向風速計および飛砂センサーの設置状況を図-3 に示す。計測期間中の計測点における地表面の砂の中央粒径 D_{50} は 0.17 mm 程度で、計測点の半径 30 m 以内の領域における地表面の砂の D_{50} は 0.15～0.19 mm であった。

瞬間風向風速は、超音波式風向風速計（Delta OHM 社，HD2003）を用いて、サンプリング周期 1 Hz で砂面からの高さ $z_w=0.9$ m において計測した。風向は N 方向を 0 度として時計回りに正とした。150～330 度のとき陸風となる。

飛砂粒子数は、飛砂センサー（圧電振動子）を用いてサンプリング周期 1 Hz で計測した。飛砂センサーは、風向方向に設置した直径 5 mm の円形の圧電振動子に、砂粒子が衝突する際に発生する電気信号を利用したものである（保坂ら，2004）。12 日 10:38～13 日 17:28 の期間は NW 方向（325 度）に、14 日 17:23～16 日 9:19 の期間は ENE 方向（75 度）に圧電振動子が卓越風向を向くようにセンサーを設置した。測定開始時点（12 日 10:38 および 14 日 17:23）における飛砂センサーの高さは $z_s=0.04$ m である。

降水量データとしては、銚子地方気象台の 1 時間毎のデータを用いた。

3. 観測結果

瞬間風向風速、飛砂粒子数、降水量、ならびに全天日射量の時系列データを図-4(a)～(d) に示す。参考のため、測定期間外（1 月 12 日 1:00～12:00，13 日 17:00～14 日 18:00，16 日 9:00～12:00）の風向風速データとして、銚子地方気象台の 1 時間毎のデータを合わせて示す。0.5 mm 未満の降雨については 0.25 mm で表示した。瞬間風速と飛砂粒子数の短期時系列データ例を図-5 に示す。瞬間風速および飛砂粒子数 n の時系列変化には 1～数秒程度のタイムラグがあり、瞬間風速

の変化は飛砂粒子数と比べて遅れる場合があった。Wiggs ら（2004）も南西ウェールズの海岸において同様の観測（ $z_w=0.1$ m， $z_s=0$ m）を行い、1 秒程度のタイムラグがあることを示している。この原因としては瞬間風向風速と飛砂粒子数の計測高さが異なること等が考えられる。測定終了後の飛砂センサーの高さは晴天時および荒天時のいずれの測定期間においても $z_s=0.045$ m 程度で、砂面は 5 mm 程度侵食されていた。

（1）瞬間風向風速

1 月 12 日 10:38～21:24 (Obs-1)，12 日 23:59～13 日 8:31 (Obs-2)，13 日 8:31～17:28 (Obs-3)，14 日 17:28～15 日 8:31 (Obs-4)，ならびに 15 日 8:31～16 日 9:19 (Obs-5) の期間における 5 分間平均風向風速を表-1 に示す。Obs-1 においては、5 分間平均風向は W～N 方向（276～349 度）であったが、Obs-2 において風向は S～W 方向（182～277 度）に変化し、Obs-3 においては再び風向は W～NNW 方向（269～322 度）となった。この平均風向の変化に伴い、平均風速は 1.3～7.0 m/s，0.4～2.8 m/s，1.7～5.7 m/s と変化し、風向が W～N 方向のとき風速は比較的大きかった。

Obs-4 および Obs-5 の期間においては、平均風向は NNE～E 方向（22～103 度）で、比較的标准偏差が小さかった。平均風速は、16 日 8:23 に最大値 12.3 m/s となった。

（2）飛砂粒子数

風速が大きくなるにつれて飛砂粒子数は大きくなっており、目視観測と同様の結果が得られた。しかしながら、Obs-4 および Obs-5 の期間においては風速が大きいかにもかかわらず、飛砂粒子数は小さかった。この原因としては、風向が海風になったことで吹送距離が短くなり、飛砂の発生量が減少したこと、および、降雨による砂面の含水比の増加によって飛砂が抑制されたこと等が挙げられる。12 日 0:00～15 日 2:00 頃には全天日射量が大きく降雨も観測されなかったことから砂面は乾燥した状態にあったのに対し、15 日 3:00 以降は全天日射量

表-1 観測期間中の5分間平均風向風速と限界風速の変化

期間	5分間平均風向 [deg]	5分間平均風速 [m/s]	限界風速 [m/s]
1月12日 10:38-12日 21:24 (Obs-1)	276-349 (5-105)	1.3-7.1 (0.4-1.9)	4.39-5.67
1月12日 23:59-13日 08:31 (Obs-2)	182-277 (5-22)	0.4-2.8 (0.1-0.9)	-
1月13日 08:31-13日 17:28 (Obs-3)	269-322 (10-35)	1.7-5.7 (0.4-1.7)	4.73-5.47
1月14日 17:28-15日 08:31 (Obs-4)	37-80 (5-12)	4.1-7.2 (0.7-1.4)	4.49-6.67
1月15日 08:31-16日 09:19 (Obs-5)	11-103 (4-28)	6.3-12.3 (1.0-2.4)	4.77-9.90

5分間平均風向・風速の括弧内：標準偏差，平均風向：150～330度のとき陸風，限界風速：第4節参照

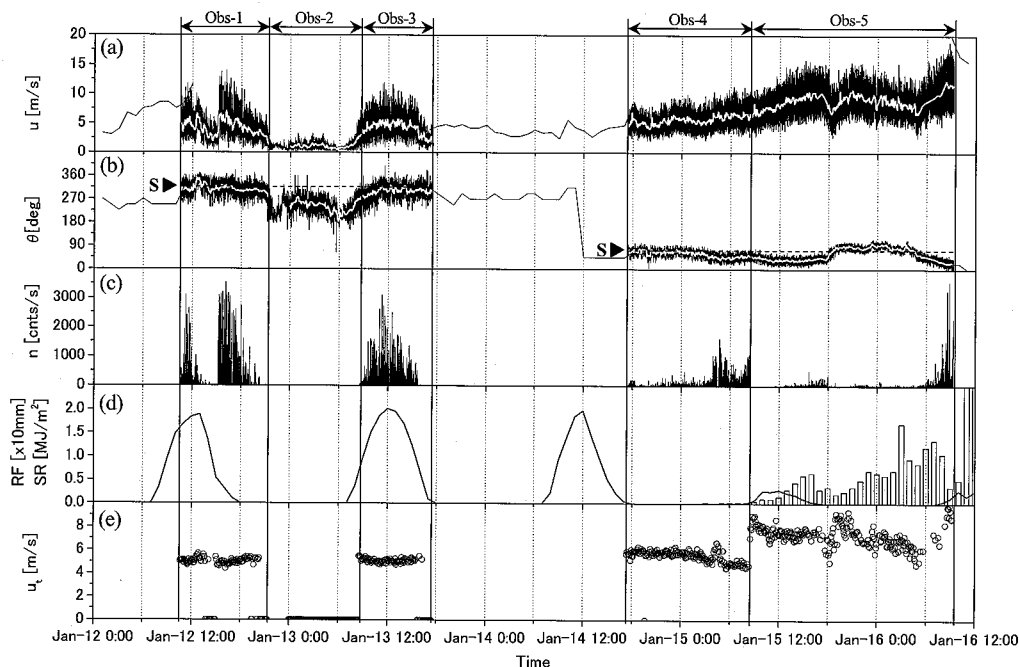


図-4 (a) (b)瞬間風向風速 u , θ , (c)飛砂粒子数 n , (d)降水量 RF および全天日射量 SR, ならびに (e) 限界風速 u_t の時系列 (Obs-1 ~ Obs-5: 表-1 参照, (a) (b) 内の白線: 5分間平均風速および平均風向, (a) (b) 内の測定期間外の実線: 銚子地方気象台における1時間毎の風向風速, S: 飛砂センサーの設置方向, 限界風速: 第4節参照)

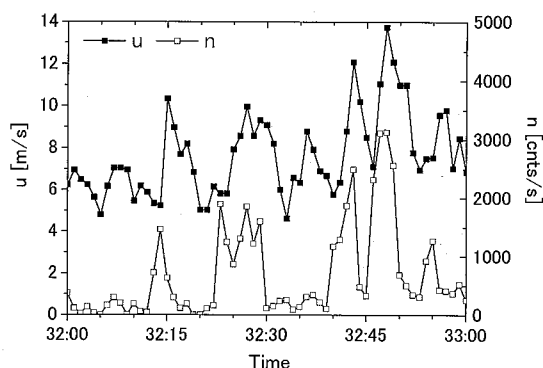


図-5 2005年1月12日 15:32 ~ 15:33の瞬間風速および飛砂粒子数の時系列データ

が小さく降雨が観測されたことから砂面は含水比の大きい状態にあったと考えられる。15日3:00以降の少雨の観測と同時期に飛砂粒子数が増加した原因については現時点では不明である。

4. 飛砂の限界摩擦速度特性

現地における飛砂の限界摩擦速度の算定法について検討し，限界摩擦速度特性について議論する。

(1) 砂の中央粒径を用いた限界摩擦速度の算定

飛砂の限界摩擦速度は，Bagnold (1941) の式を用いて算定される場合が多い。

$$u_{*t} = A \sqrt{\frac{\rho_s - \rho}{\rho} g d} \dots \dots \dots (1)$$

ここで， u_{*t} : 限界摩擦速度， ρ_s : 砂の密度 ($=2.65 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$)， ρ : 空気密度 ($=1.226 \text{ kg/m}^3$)， g : 重力加速度 ($=9.81 \text{ m/s}^2$)， d : 砂の粒径 ($=0.17 \times 10^{-3} \text{ m}$) である。Bagnold は，移動開始摩擦速度 u_{*tf} および衝突移動開始摩擦速度 u_{*ti} の実験係数 A の値として 0.1 および 0.08 を与えている。Chepil (1945) は，風洞実験により砂粒径別に u_{*tf} および u_{*ti} の A の値を調べ，砂粒径が 0.10 mm 以上の場合には Bagnold とほぼ等し

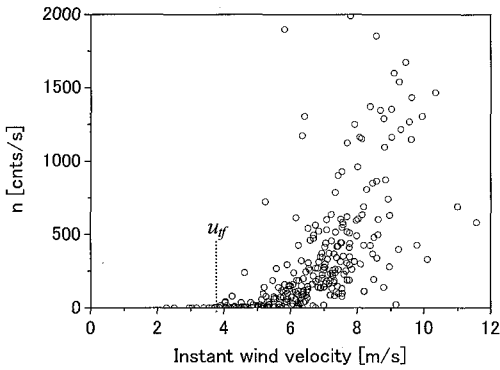


図-6 1秒間のタイムラグを考慮した2005年1月12日15:30～15:35の瞬間風速と飛砂粒子数の関係 (u_{if} : 4. (2) 参照)

い値を与えている。観測地の砂粒径 0.17 mm を Bagnold 式に代入すると、 $u_{*if} = 0.19$ m/s および $u_{*ti} = 0.15$ m/s が得られる。

(2) 瞬間風速を用いた限界摩擦速度の算定

1秒間のタイムラグを考慮した場合の瞬間風速 u と飛砂粒子数 n の関係の例として、晴天時で風速が大きい1月12日15:30～15:35の5分間の関係を図-6に示す。風速が大きい場合に飛砂粒子数が大きくなる傾向は認められたものの、両者の間に明確な相関は得られなかった。この結果は Wiggs ら (2004) の結果と一致する。

飛砂粒子数が $n > 0$ となる最小の風速を移動開始限界風速 u_{if} と仮定すると、 $u_{if} = 3.72$ m/s となる。ある高さにおける風速は、対数則

$$u_i = \frac{u_{*i}}{\kappa} \ln(z/z_0) \dots \dots \dots (2)$$

を仮定すると限界摩擦速度に比例する。ここで、 κ : カルマン係数 (=0.4), z : 風速の計測高さ (=0.9 m), z_0 : 粗度長 ($=d/30 = 5.7 \times 10^{-6}$ m) である。これに $u_{if} = 3.72$ m/s を代入すると、 $u_{*if} = 0.13$ m/s が得られ、Bagnold 式による算定値と比べて小さい値となった。風速が小さい時間帯には、 $u_{if} = 0.98$ m/s ($u_{*if} = 0.03$ m/s) となる場合もあった。

瞬間風速と飛砂粒子数の間に相関が認められなかった原因としては、風速および飛砂粒子数データを同一地点で取得するのは不可能でありこれらのデータが必ずしも時間的に一致しないことや、風向と飛砂センサーの向きが完全には一致しないこと、長時間の観測を行う場合には飛砂センサーを砂面付近に設置できないこと等が考えられる。これらを考慮すると、瞬間風速データから限界摩擦速度の算定を行うことは適当でない。

(3) TFEM による限界摩擦速度の算定

統計的に限界摩擦速度を算定するため、Stout・Zobeck (1997) が提案した Time Fraction Equivalence

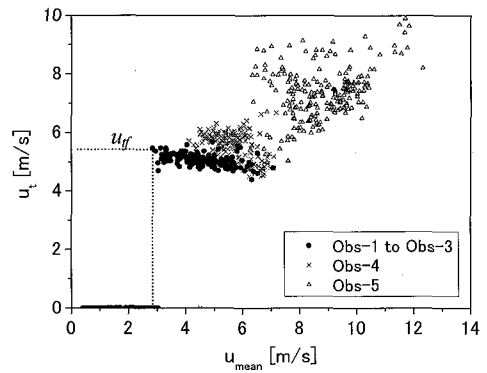


図-7 平均風速と限界風速の関係 ($u_{if} = 0$ m/s: 飛砂無し)

Method (TFEM) を用いる。TFEM は風速が変動することを前提とした算定法で、単位時間 T_0 のうち風速 u が限界風速 u_i より大きくなる時間 $T(u > u_i)$ の割合 $\gamma_u (= T(u > u_i)/T_0)$ は、 T_0 のうち飛砂が発生している時間 $T(n > 0)$ の割合 $\gamma_p (= T(n > 0)/T_0)$ と等しいと仮定する。瞬間風速および飛砂粒子数データを用いて、 $\gamma_u = \gamma_p$ となるように試行錯誤で u_i を定める。

Wiggs ら (2004) は、単位時間 T_0 が短くなるにつれて限界風速が急激に大きくなるため、 $T_0 \geq 40$ s となる必要があることを示している。ここでは、Stout・Zobeck を参考にして単位時間を5分間とし、5分間隔に区切った風速および飛砂粒子数データに TFEM を適用して限界風速 u_i を求めた。 $\gamma_p = 1/T_0$ すなわち $T(n > 0) = 1$ s の場合、ならびに、 $\gamma_p = T_0/T_0$ すなわち $T(n > 0) = T_0$ の場合には、 u_i はそれぞれ u の最大値および最小値となるため、データを無効とした。

u_i の時系列を図-4(e)に示す。図中の $u_i = 0$ は飛砂が発生していないことを意味する。 u_i は u_{mean} と逆相関で変化していた。図-7に u_i と u_{mean} との関係を示す。平均風向が概ね海岸線と平行であった Obs-1 および Obs-3 においては、 u_{mean} が大きくなるにつれて u_i が小さくなるという負の相関関係が認められ、線形近似式は以下のようなになった。

$$u_i = -0.11u_{mean} + 5.58 \dots \dots \dots (3)$$

$u_{mean} \geq 2.84$ m/s のとき飛砂が発生していたことから、 u_{if} は近似式(式(3))より 5.27 m/s 程度であると考えられる。これは、対数則(式(2))を仮定すると $u_{*if} = 0.18$ m/s に相当し、Bagnold 式(式(1))より得られる $u_{*if} = 0.19$ m/s と概ね等しい。一方、観測で得られた u_i の最小値は 4.39 m/s で、これに対数則を適用して得られる u_{*i} は 0.15 m/s となり、Bagnold 式より算定される $u_{*ti} = 0.15$ m/s より小さい値は得られなかった。

概ね海風が卓越していた Obs-4 についても同様の関係が認められたものの、線形近似式は、

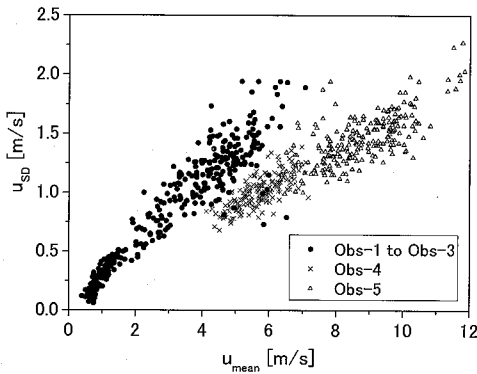


図-8 平均風速と風速の標準偏差との関係

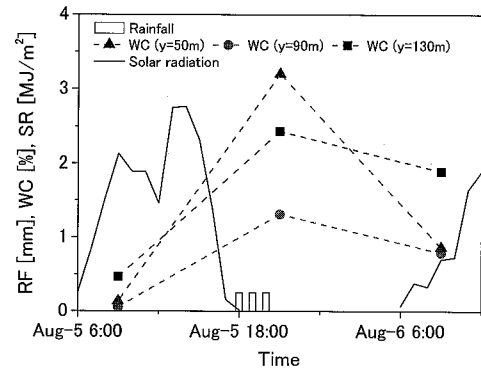
$$u_t = -0.21u_{mean} + 6.72 \dots\dots\dots (4)$$

となり、 u_t は Obs-1 ～ Obs-3 と比べてやや大きく、ばらつきも大きかった。この原因としては、海風が卓越することによって吹送距離が短くなり飛砂が平衡状態に達していなかったことや、岸沖方向の地形勾配の影響を受けたこと等が考えられる。Obs-1 ～ Obs-3 と Obs-4 ～ Obs-5 では平均風速 u_{mean} と風速の標準偏差 u_{sd} との関係(図-8)が異なり、それぞれ $u_{sd} = 0.27u_{mean}$ および $u_{sd} = 0.17u_{mean}$ の比例関係にあった。この風速変動特性の差異も一因として考えられる。

降雨があった Obs-5 については、 u_t が顕著に増大し、降雨前にみられた負の相関関係は認められなかった。これは、降雨により含水比が大きく変動したためと考えられる。図-9 は、2003 年 8 月 5 ～ 6 日の砂面の含水比、全天日射量、ならびに降水量の変化を示したものである。全天日射量および降水量データとしては銚子地方気象台のデータを用いた。含水比は 8 月 5 日 17:00 ～ 20:00 の 0.5 mm 未満の少雨により数%上昇し、その 12 時間後には減少していた。このように少雨であっても含水比は大きく変動することから、降雨時には含水比の変動がかなり大きいと考えられる。また、目視観測によれば砂面の含水比が大きくても強風時には砂面が剥ぎ取られて大量の乾燥した飛砂が発生する場合があります、これも u_t 増大の一因として考えられる。

5. 結 論

現地海岸において、TFEM 解析による飛砂の限界摩擦速度推定の妥当性を検討し、気象条件の変化に伴う限界摩擦速度特性を調べた。TFEM 解析による限界摩擦速度の算定結果はいずれも Bagnold の限界摩擦速度式より得られる衝突開始摩擦速度 (0.15 m/s) 以上の値に、また、移動開始限界摩擦速度は Bagnold 式を用いて算定される 0.19 m/s とほぼ等しい値になり、妥当な結果が得られた。平均風速と限界風速の関係を調べたと

図-9 2003 年 8 月 5 ～ 6 日の降水量、全天日射量、ならびに $y = 50, 90, 130$ m における砂面の含水比の変化 (0.5 mm 未満の降雨は 0.25 mm で表示)

ころ、限界風速は一定ではなく、平均風速が大きくなるにつれて小さくなった。

降雨時には限界風速が顕著に大きくなった。これは砂の含水比が大きくなることにより飛砂の発生が抑制されたことを意味する。

謝辞：現地観測においては、独立行政法人港湾空港技術研究所 海洋・水工部 漂砂研究室にご協力頂いた。また、栗山善昭室長には有益なご助言を頂いた。本研究は、科学研究費補助金(若手研究(B) 16760417、代表者：有働恵子)の援助を受けて行われた。記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 河村龍馬(1951): 飛砂の研究, 東大理工研報告, No. 5, pp. 95-112.
- 保坂幸一・鶴飼正志・久保田進・小栗保二(2004): 圧電振動子による飛砂粒子数の計測, 海洋開発論文集, 第 20 巻, pp. 1091-1096.
- Bagnold, R.A.(1941): The Physics of Blown Sand and Desert Dunes, Methuen, London, 265p.
- Chepil, W.(1945): Dynamics of wind erosion, II: Initiation of soil movement, Soil Science, vol. 6, pp. 397-411.
- Lettau, K. and H. H. Lettau (1978): Experimental and micrometeorological field studies of dune migration. In: Lettau, H.H., Lettau, K. (Eds.), Exploring the World's Driest Climate, pp. 110-147, Madison, University of Wisconsin.
- Owen, P. R.(1964): Saltation of uniform grains in air, Journal of Fluid Mechanics, vol. 20, pp. 225-242.
- Stout, J. E. and T. M. Zobeck (1997): Intermittent saltation, Sedimentology, vol. 44, pp. 959-970.
- White, B. R.(1979): Soil transport by winds on Mars, Journal of Geophysical Research, vol. 86, pp. 4643-4651.
- Wiggs, G. F. S, R. J. A. Atherton and J. Baird (2004): Thresholds of aeolian sand transport: establishing suitable values, Sedimentology, vol. 50, pp. 95-108.