

独立行政法人港湾空港技術研究所

港湾空港技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH
INSTITUTE

VOL.44 NO.2 June 2005

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

INDEPENDENT ADMINISTRATIVE INSTITUTION,
PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE



港湾空港技術研究所報告 (REPORT OF PARI)

第 44 卷 第 2 号 (Vol. 44, No. 2), 2005年6月 (June 2005)

目 次 (CONTENTS)

1. 台風 0314 号による大韓民国馬山湾の高潮の現地調査と数値計算
.....河合 弘泰・富田 孝史・平石 哲也・安田 誠宏..... 3
(Field Investigation and Numerical Simulation of Storm Surge in Masan Bay, Korea by Typhoon 0314
..... Hiroyasu KAWAI, Takashi TOMITA, Tetsuya HIRAISHI, Tomohiro YASUDA)
2. 台風 0314 号の高潮による大韓民国馬山市街地での浸水に関する数値計算
.....平石 哲也・河合 弘泰・南 靖彦・安田 誠宏 23
(Numerical Simulation on Inundation in Masan City, Korea due to Storm Surge by Typhoon 0314
..... Tetsuya HIRAISHI, Hiroyasu KAWAI, Yasuhiko MINAMI, Tomohiro YASUDA)
3. 非固定航路で不連続的に観測された流況データからの潮汐成分と残差流成分の分離手法について
.....鈴木高二朗・竹田晃・橋本典明..... 39
(Separation of Tidal and Subtidal Currents from Intermittent Currents Data measured at non-Fixed Routes
..... Kojiro SUZUKI, Akira TAKEDA, Noriaki HASHIMOTO)
4. 管中混合固化処理地盤の強度変動と要因分析
.....北詰昌樹・早野公敏..... 57
(Strength Scatter and its Causes of Pneumatic Flow Mixing Treated Ground
..... Masaki KITAZUME, Kimitoshi HAYANO)
5. 海水流動の 3 次元性を考慮した高潮・津波数値シミュレータ STOC の開発と津波解析への適用
.....富田孝史・柿沼太郎..... 83
(Storm Surge and Tsunami Simulator in Oceans and Coastal Areas (STOC)
..... Takashi TOMITA, Taro KAKINUMA)
6. 構造物の沈下挙動を制御する新型基礎に関する基礎的研究
.....水谷崇亮・菊池喜昭..... 99
(Fundamental study on a new type foundation which control settlements of a structure
..... Taka-aki MIZUTANI, Yoshiaki KIKUCHI)
7. 飛砂の限界摩擦速度変化特性を考慮した飛砂量推定
.....有働恵子..... 123
(Sand Transport Rate Estimate Considering Variation in the Threshold Wind Shear Velocity
..... Keiko UDO)

飛砂の限界摩擦速度変化特性を考慮した飛砂量推定

有働 恵子*

要 旨

風速の変化に伴う飛砂の限界摩擦速度の変化特性を調べるため、圧電振動子および風向風速計を用いて飛砂粒子数および瞬間風速データを1Hzのサンプリング周期で取得した。これらのデータを5分間隔で区切り、Time Fraction Equivalence Method (TFEM)を用いて限界風速を求めたところ、平均風速が大きくなるにつれて限界風速は小さくなった。平均風速の変化に伴う限界摩擦速度の変化を考慮した場合および考慮しない場合の、瞬間風速データを用いて算定した推定飛砂量と、捕砂器で計測した飛砂量とを比較したところ、限界摩擦速度の変化を考慮した場合の推定飛砂量は考慮しない場合の約2倍となり、実測値に近い値となった。

キーワード：限界摩擦速度，圧電振動子，SENSIT，TFEM，捕砂器

* 海洋水工部漂砂研究室

Sand Transport Rate Estimate Considering Variation in the Threshold Wind Shear Velocity

Keiko UDO*

Synopsis

Field experiments investigated aeolian sand transport and revealed the effect of variation in the wind velocity on the threshold wind shear velocity of blown sand. Datasets included observations of the number of blown sand particles and wind velocity recorded over periods of several hours. Data were logged at a frequency of 1 Hz and then divided into 5-minute segments. The threshold wind velocity for each segment was calculated using Time Fraction Equivalence Method (TFEM). Threshold wind velocity decreased as the mean wind velocity increased. Estimated sand transport rates owing to the mean wind velocity when variation in the threshold wind velocity was included were twice the rates estimated when threshold variation was ignored. The transport rates agreed with measured values from the field. The formula considering the variation in threshold wind velocity improves the accuracy of aeolian sand transport rate estimates.

Key Words: threshold friction velocity, piezoelectric sensor, SENSIT, TFEM, sand trap

* Littoral Drift Division, Marine Environment and Engineering Department

目 次

要 旨	123
1. まえがき	127
2. 現地計測の概要	127
2.1 計測方法	128
2.2 計測結果	130
3. 限界摩擦速度の変化特性	130
3.1 砂の中央粒径を用いた限界摩擦速度の算定	130
3.2 TFEMによる限界摩擦速度の算定	130
4. 限界摩擦速度の変化特性を考慮した飛砂量算定	131
4.1 限界摩擦速度の変化特性の飛砂量への影響	131
4.2 限界摩擦速度の変化特性を考慮した推定飛砂量と実測飛砂量の比較	132
5. 結論	132
6. あとがき	132
謝辞	133
参考文献	133
付録	134

1. まえがき

季節風が卓越する海岸においては、漂砂に加え、飛砂による砂移動も海浜変形の一要因であると考えられ、飛砂量を工学的に妥当な精度で見積もることが必要とされる。海岸における飛砂量は、Bagnold公式(1941)、河村公式(1951)やZingg公式(1953)等で推定されることが多い(堀川ら, 1981; U.S. Army Corps Engineers, 2002)。飛砂量公式は、風の摩擦速度が限界摩擦速度を越える場合に飛砂が発生することを仮定しており、飛砂量と限界摩擦速度は同じ風速条件下では負の相関関係にある。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が、これに関する知見は少ない。

限界摩擦速度を算定するには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drag forceとgravitational forceを仮定し、砂の粒径を用いて限界摩擦速度を定式化した。この限界摩擦速度式は無次元係数を含んでおり、風洞実験結果より実験係数が与えられている。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。Greeley・Iversen(1985)は、Bagnoldのdrag forceとgravitational forceに加えて、lift force, aerodynamic moment force, ならびにinterparticle cohesion forceを仮定して定式化した。これを解くには複雑な計算を要する。

限界摩擦速度に関する知見は、風洞実験により得られたものが多い。これらの風洞実験の多くは、風速変動が小さい一定風速下で行われており、風速変動が大きい現地海岸にこれらの知見を適用するのが適切かどうか検討する必要がある。Butterfield(1998)は、風洞実験で風速を周期的に変化させた場合の飛砂量を調べ、飛砂量の風速変化への応答にはタイムラグがあり、平均風速が同じであれば、風速を変化させた場合の方が、飛砂量が大きくなることを示している。

一方、限界摩擦速度に関する現地実験は、1990年頃に飛砂センサーSENSIT(Stockton・Gillette, 1990; Stout・Zobeck, 1997; Stout, 1998; Stout, 2003; Stout, 2004; Gillies・Berkofsky, 2004; Wiggs, 2004)が開発されて以降行われるようになった。Stout・Zobeck(1997)は、風速データおよびSENSITにより得られる飛砂粒子数データを用いて現地の限界風速を算定する手法(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、単位時間における限界風速を求め、これの時系列解析を行っている

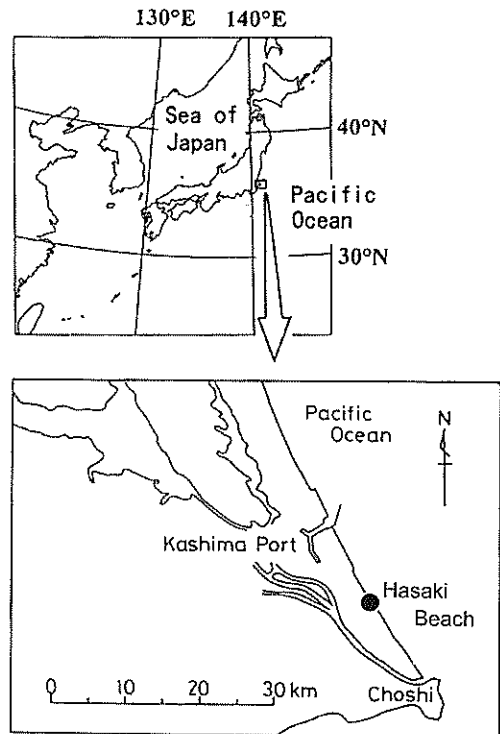


図-1 計測地の位置

が、限界風速変化のメカニズムに関する解析は行っていない。

本研究は、Stout・Zobeckを参考にして風速変動に伴う限界摩擦速度の変化特性を調べ、これを考慮することにより飛砂量の推定精度を向上させることを目的とする。茨城県波崎海岸において瞬間風速および飛砂粒子数データを取得し、TFEM解析により限界摩擦速度を求めた。これにより得られた限界摩擦速度の変化特性を河村公式に導入して求めた飛砂量と、Leathermanトラップ(1978)で計測した飛砂量とを比較して、限界摩擦速度の変化特性を考慮した飛砂量の算定方法の妥当性を検討した。

2. 現地計測の概要

現地計測は、鹿島灘に面する茨城県波崎海岸で行った(図-1, 写真-1)。波崎海岸は前浜勾配が1/50程度で、遠浅の海岸である。計測点は平均汀線より90m陸側の後浜で、計測期間中は砂表面が常に乾燥していた(図-2)。

計測項目は、瞬間風向風速、飛砂粒子数、および飛砂量である。計測日と計測条件を表-1にまとめる。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0.17mm程度で、計測点の半径30m以内の領域における地

表-1 現地計測の概要

	計測日	計測時間	5分毎平均風向風速 $z=0.4m$	圧電振動子向	砂面 D_{50}
(a)	2004/05/27	12:30-15:55	SSE-S (161-186 deg), 2.2-4.1m/s	S (190 deg)	0.17mm
(b)	2004/05/31	07:15-16:00	S -SSW (191-206 deg), 3.4-6.5m/s	SSW (200 deg)	0.17mm
(c)	2004/06/18	11:30-17:15	S -SSW (187-202 deg), 3.2-4.5m/s	S (170 deg)	0.17mm
(d)	2004/06/21	11:40-17:30	SSE-S (164-180 deg), 3.8-6.4m/s	S (170 deg)	0.17mm
(e)	2004/07/05	14:15-23:00	S -SSW (182-210 deg), 2.4-5.4m/s	S (180 deg)	0.17mm
(f)	2004/07/23	14:55-23:45	SE -S (143-192 deg), 0.2-3.8m/s	S (180 deg)	0.18mm
(g)	2004/08/05	10:50-16:50	S -SSW (173-206 deg), 2.9-4.6m/s	S (180 deg)	0.17mm
(h)	2004/08/09	14:55-23:45	S -SSW (176-210 deg), 0.6-4.3m/s	S (180 deg)	0.16mm

圧電振動子：2.1(2)参照，砂面 D_{50} ：計測点の地表面における砂の中央粒径

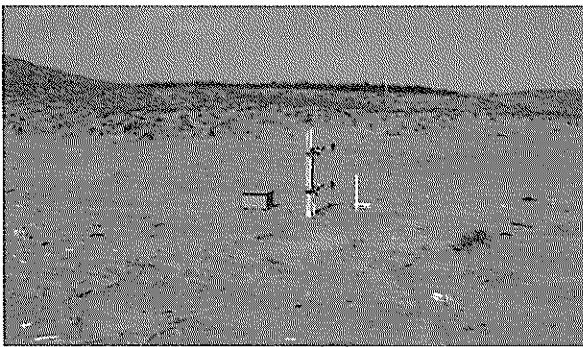


写真-1 計測領域

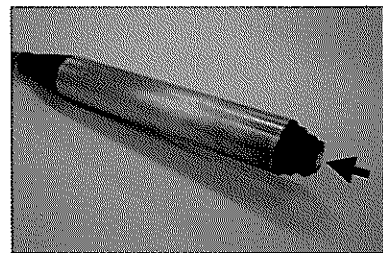
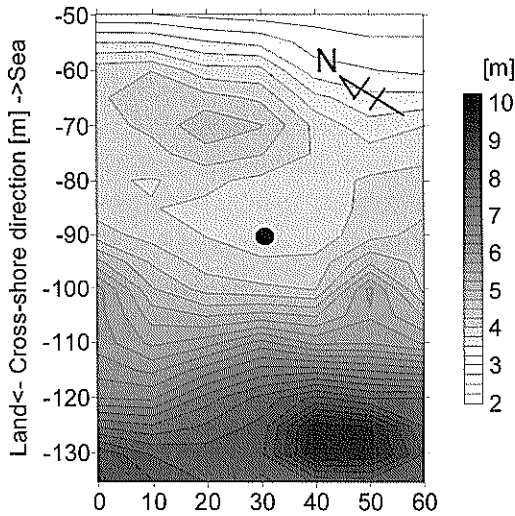


写真-2 飛砂粒子数計測センサー
矢印：圧電振動子部分



Kashima<- Longshore direction [m] ->Choshi

図-2 茨城県波崎海岸の地形と計測点の位置

基準：鹿嶋港工事事用基準面

岸沖方向座標：平均汀線を 0m とし海側を正

表面の砂の D_{50} は 0.15~0.19mm であった。風速以外の計測条件を同等にするため、風向が SSE-SSW 方向で乾砂面の場合に計測を行った。以下に計測方法とその結果を示す。

2.1 計測方法

(1) 瞬間風向風速

サンプリング周期 1Hz で、 $z=0.4m$ の高さにおける瞬間風向風速を取得した。風向は、N 方向から時計回りに 0~360 度とする。

(2) 飛砂粒子数

圧電振動子を用いて、 $z=0.04m$ の高さにおける飛砂粒子数をサンプリング周期 1Hz で計測した(写真-2)。この計測は、風向方向に設置した直径 5mm 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(保坂ら, 2004)、SENSIT と同じ原理である。いずれの計測期間においても圧電振動子の向きが平均風向とほぼ一致するように圧電振動子を設置した(表-1)。

(3) 飛砂量

Leatherman トラップ(写真-3)を用いて、飛砂量の計測を行った。Leatherman トラップは、一般に用いられる捕砂器の一つで(Marston, 1986; Sherman・Hotta, 1990; Greeleyら, 1996; Garesら, 1996; Bennett・Olyphant, 1998; Jackson・Nordstrom, 1998; Rasmussen・Mikkelsen, 1998; White・Tsoar, 1998; Shermanら, 1998; Gomesら, 2002)、Leatherman トラップの精度については、捕砂効率が 30~70% であることや、風向の影響を受けること等が報告さ

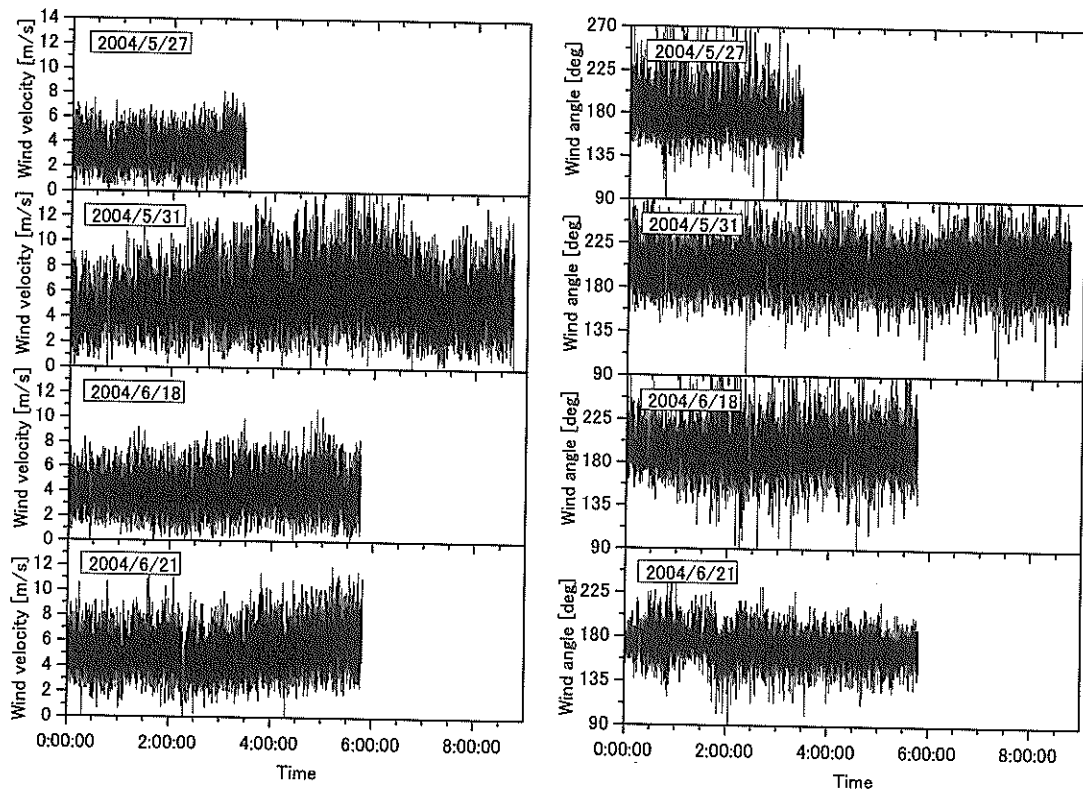


図-3 瞬間風向風速の時系列
風向：N方向から時計回りに0~360度とする

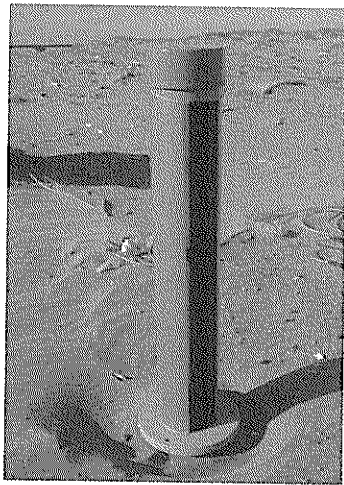


写真-3 Leatherman トラップ

れている。Greeleyら (1996) は、砂粒度分布が0.23mm以下の海岸で $z=0.4\text{m}$ における平均風速が0~5m/sのとき、Leathermanトラップにより捕捉された飛砂量とトレンチトラップ(流下方向長3m×幅10m)によるそれとを比較することにより、捕砂効率率は約30%であること、および、誤差は最大10%程度であることを示している。本研究で用いたLeathermanトラップの開口部の大きさ(幅0.04m×高さ0.40m)はGreeleyらのそれ(幅0.07m×高さ0.48m)

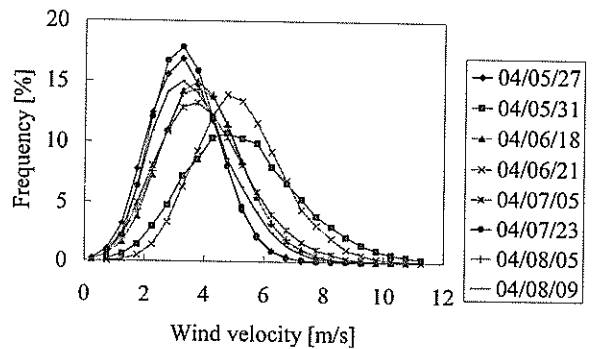


図-4 瞬間風速の発生頻度分布(階級幅: 0.5m/s)

と比べてやや小さく、本研究のトラップの捕砂効率がGreeleyらの30%より大きいことは考えにくいので、捕砂効率は最大30%と仮定した。

飛砂の捕捉時間は約30分間で、2004年8月9日(表-1の計測日(h))の14:56~15:26, 15:26~15:59, 15:59~16:26, ならびに16:26~16:56に計4回計測を行った。開口部の向きは圧電振動子とほぼ同じ方向で、平均風向と一致するように設置した。飛砂量は、捕捉した砂の重量をトラップ幅、捕捉時間ならびに捕砂効率で除して求めた。

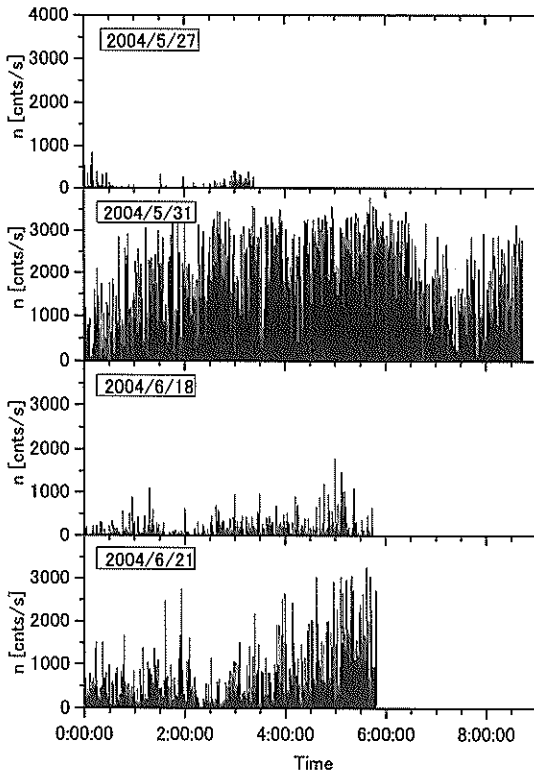


図-5 飛砂粒子数 n の時系列

2.2 計測結果

(1) 瞬間風向風速

瞬間風向風速の時系列データの例として、2004年5月27日、5月31日、6月18日、ならびに6月21日のデータを図-3に示す。計測期間の瞬間風速は0~15m/sであった。5分間平均風向は、平均風速が1m/s未満のときのみSE方向成分がみられたが、1m/s以上の場合にはSSE-SSW方向であった(表-1)。瞬間風速の発生頻度分布(図-4)は、ほぼ正規分布にしたがっていた。

(2) 飛砂粒子数

1秒間にカウントされた飛砂粒子数 n の、2004年5月27日、5月31日、6月18日、ならびに6月21日の時系列データを図-5に示す。目視観測より、風速が大きい場合に飛砂粒子数は大きくなっていった。

(3) 飛砂量

2004年8月9日の(表-1の計測日(h)) 14:56~15:26, 15:26~15:59, 15:59~16:26, ならびに16:26~16:56の時間帯における平均風速、飛砂量および飛砂の D_{50} を表-2に示す。各計測期間における飛砂量は、 $0.21 \times 10^{-3} \sim 1.03 \times 10^{-3}$ kg/m/sであった。また、飛砂量が大きくなるにつれて飛砂の D_{50} は若干大きくなっていった。

表-2 2004年8月9日の5分間平均風速、飛砂量および飛砂の中央粒径

計測時間	平均風速 [m/s]	飛砂量 [kg/m/s]	飛砂 D_{50} [mm]
14:56-15:26	3.97	1.03×10^{-3}	0.161
15:26-15:59	3.81	0.51×10^{-3}	0.157
15:59-16:26	3.20	0.21×10^{-3}	0.156
16:26-16:56	3.72	0.69×10^{-3}	0.159

3. 限界摩擦速度の変化特性

第2節で得られたデータを用いて限界摩擦速度の算定を行い、風速変動の限界摩擦速度への影響について検討する。

3.1 砂の中央粒径を用いた限界摩擦速度の算定

飛砂量を算定する際に必要となる限界摩擦速度は、Bagnold (1941) の式(式(1))を用いて算定される場合が多い。

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

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

3.2 TFEM による限界摩擦速度の算定

TFEMの概要について述べる。TFEMは風速が変動することを前提とした限界風速の算定法である。TFEMでは、ある単位時間 T のうち風速 u が限界風速 u_{*c} より大きくなる時間 $T(u > u_{*c})$ の割合 $\gamma_u (= T(u > u_{*c})/T)$ は、 T のうち飛砂が発生している時間 $T(n > 0)$ の割合 $\gamma_p (= T(n > 0)/T)$ と等しいと考える(Stout・Zobeck, 1997; Wiggsら, 2004)。 n は飛砂粒子数である。単位時間の瞬間風速および飛砂粒子数の時系列より、 $\gamma_u = \gamma_p$ となるように試行錯誤で u_{*c} を定める。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、対数則(式(2))を仮定すると、限界摩擦速度に比例する。

$$u = \frac{u_*}{\kappa} \ln(z/z_0) \quad (2)$$

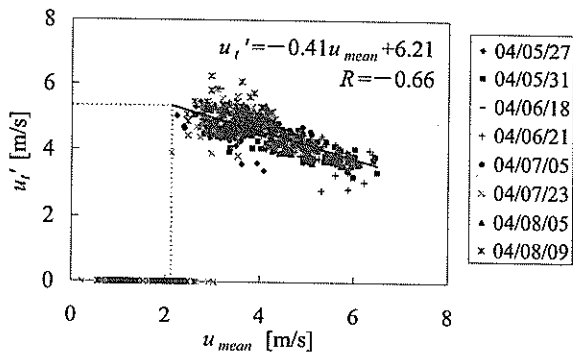


図-6 5分間平均風速 u_{mean} と限界風速 u_t' の関係
 $u_t' = 0$: 飛砂発生なし

ここで、 u_* : 摩擦速度、 κ : カルマン係数 (=0.4)、 z : 風速 u の計測高さ (=0.4m)、 z_0 : 粗度長である。

Stout (1998) および Wiggsら (2004) は TFEM の単位時間が短くなるにつれて急激に限界風速が大きくなることを示しており、限界風速が概ね一定値となる40s以上の単位時間が必要であることを示している。ここでは、Stout・Zobeck (1997) が単位時間を5分間としているのを参考にして、飛砂粒子数および風速データをそれぞれ5分、10分、15分ならびに20分間隔に区切り、TFEMを適用して限界風速 u_t' を求めた。 $\gamma_p = 1/T$ すなわち $T(n>0) = 1$ の場合、ならびに、 $\gamma_p = T/T$ すなわち $T(n>0) = T$ の場合には、 u_t' はそれぞれ u の最小値および最大値となるため、データを無効とした。

限界風速 u_t' と5分間平均風速 u_{mean} の関係を図-6に示す。図中の $u_t' = 0$ は飛砂が発生していないことを意味し、 $u_{mean} \geq 2.12$ m/s のとき飛砂が発生していた。TFEMを用いて求めた飛砂発生時の u_t' は u_{mean} が大きくなるにつれて小さくなる傾向にあった。 $u_{mean} < 2.12$ m/s における流動開始限界風速 u_t' は近似式より 5.34 m/s 程度であると考えられる。これは、対数則 (式(2)) において粗度長を砂粒径の1/30 (= 5.7×10^{-6} m) とすると $u_* = 0.20$ m/s に相当し、Bagnold式 (式(1)) に $A = 0.1$ 、 $d = 0.17 \times 10^{-3}$ m を与えて得られる $u_* = 0.19$ m/s とほぼ等しい。

図中の線形近似式より、 u_t' および u_t' は、

$$\begin{aligned} u_t' &= u_t'(u_{mean} < 2.12) = 5.34 \\ u_t' &= u_t'(u_{mean} \geq 2.12) = -0.41u_{mean} + 6.21 \end{aligned} \quad (3)$$

で表される。5分間隔の場合の相関係数 R は -0.66 であった。単位時間が長くなるにつれてばらつきが小さくなり、15分間隔のとき $R = -0.79$ で最も相関が高かったが、いずれの間隔においてもほぼ等しい近似式が得られた。

u_t' と u_{mean} の負の相関関係は、 u_{mean} が大きくなり、跳躍

粒子のもつ飛砂エネルギーが大きくなるにつれて、飛砂の慣性により、一時的に u が小さくなくても飛砂が運動を継続しやすくなるためと考えられる。風から跳躍粒子に与えられるエネルギーは跳躍粒子の飛砂エネルギーとなり、跳躍粒子はそのエネルギーが消費されるまで運動を継続する。Jackson (1996) も同様に跳躍粒子の慣性の飛砂への影響について示唆している。

4. 限界摩擦速度の変化特性を考慮した飛砂量算定

4.1 限界摩擦速度の変化特性の飛砂量への影響

第3節で述べた限界風速の減少を考慮しない場合 (u_t) および考慮した場合 (u_t') の、河村公式 (1951) を用いて計算した飛砂量 Q および Q' を比較する。風速の対数則 (式(2)) を仮定すると、 Q 、 Q' は河村公式より以下のように表される。

$$Q = K \frac{\rho}{g} (u + u_t)^2 (u - u_t) * \left\{ \frac{\kappa}{\ln(z/z_0)} \right\}^3 \quad (4)$$

$$Q' = K \frac{\rho}{g} (u + u_t')^2 (u - u_t') * \left\{ \frac{\kappa}{\ln(z/z_0)} \right\}^3 \quad (5)$$

ここで、 K は実験係数である。 K の値として、河村 (1951) は 2.78 を、堀川ら (1981) は 1.0 を与えている。河村が実験に用いた砂の中央粒径 D_{50} は 0.2~0.3 mm、堀川らが観測を行った海岸の砂の D_{50} は 0.4 mm で、本研究の D_{50} は 0.17 mm であったため、 K の値には 2.78 を与えた。Dongら (2003) は、等しい風速条件下では砂の粒径が大きくなるにつれて飛砂量が小さくなることを示しており、この K の与え方に矛盾はない。

式(3)より、式(4)および(5)は次式のように変形される。

$$Q = Q'(u_{mean} < 2.12) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} &= K \frac{\rho}{g} (u + 5.34)^2 (u - 5.34) * \left\{ \frac{\kappa}{\ln(z/z_0)} \right\}^3 \\ Q' &(u_{mean} \geq 2.12) \end{aligned} \quad (7)$$

$$= K \frac{\rho}{g} (u - 0.41u_{mean} + 6.21)^2 (u + 0.41u_{mean} - 6.21) * \left\{ \frac{\kappa}{\ln(z/z_0)} \right\}^3$$

なお、 $Q < 0$ 、 $Q' < 0$ のときはそれぞれ 0 とする。

以上より得られる、 u および u_{mean} に対する Q' 、 Q および $\Delta Q (= Q' - Q)$ の分布を図-7に示す。TFEM解析を行った、 u_{mean} および u ($u_{mean} \pm \sigma$ 、 σ : 標準偏差) の範囲 (0.2~6.5 m/s および 0~9 m/s 程度) では、 u_{mean} が大きくなるにつれて、 ΔQ は大きくなっていった。

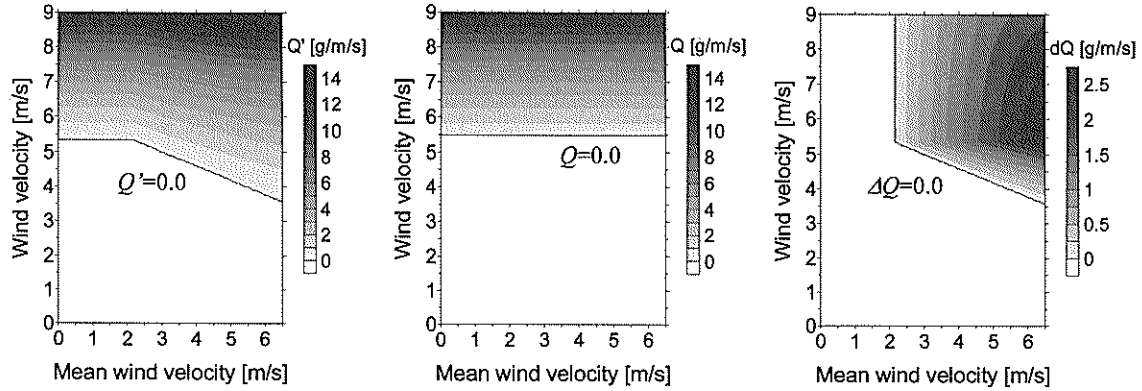


図-7 推定飛砂量 Q' 、 Q および ΔQ の分布

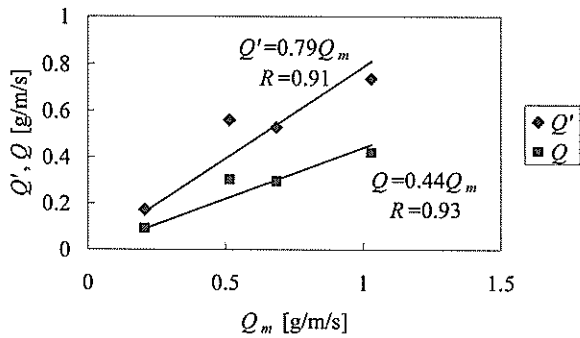


図-8 計測飛砂量 (Q_m) と推定飛砂量 (Q' 、 Q) の比較

4.2 限界摩擦速度の変化特性を考慮した推定飛砂量と実測飛砂量の比較

河村公式で、平均風速の変化に伴う限界摩擦速度の変化を (i) 考慮しない場合および (ii) 考慮した場合の飛砂量と、Leathermanトラップで計測した飛砂量を比較する。(i) については、瞬間風速データが限界風速を越える場合に式(6)を用いて算定した飛砂量 Q の瞬間値を30分間積算した。(ii) については、瞬間風速データを5分間隔で区切り、各区間の平均風速を求めて、(i)と同様に式(6)および(7)を用いて飛砂量 Q' の瞬間値を積算した。15:26~15:59および15:59~16:26の時間帯については、飛砂捕捉時間がそれぞれ33分間および27分間であるため、30分間および25分間について積算した。得られた積算値は1秒当りの平均飛砂量に換算した。

計測飛砂量と推定飛砂量の比較を図-8に示す。計測飛砂量は捕砂効率を30%として計算した。限界摩擦速度の変化を考慮した場合の推定飛砂量 (Q') は、考慮しない場合 (Q) の約2倍となっており、限界摩擦速度の変化を考慮することで、飛砂量の推定精度は大幅に向上していた。捕砂効率には誤差が含まれるものの、想定される最大値を用いており、実際の飛砂量はここで示した値より大きいと考えられることから、いずれにしても飛砂量の

推定精度は向上していたと判断される。

なお、従来の飛砂量の推定方法、すなわち、瞬間風速データではなく、平均風速データを用いた場合（ここでは5分間平均風速）についても同様に飛砂量を算定したところ、5分間平均風速が (i) および (ii) の限界風速を越えることはなく、飛砂量は0g/m/sであった。この結果は、堀川ら (1981) も指摘しているように、飛砂量を推定する際には風速変動（風の息）を考慮する必要があることを示唆している。

5. 結論

以下に主要な結論をまとめる。

- (1) 風速条件の変化に伴う限界摩擦速度の変化特性を調べるため、TFEMを用いて限界風速の変化を調べたところ、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。
- (2) 限界摩擦速度の変化を考慮した場合および考慮しない場合の、瞬間風速データを用いて推定した飛砂量と、Leathermanトラップで計測した飛砂量を比較したところ、限界摩擦速度の変化を考慮した場合の推定飛砂量は考慮しない場合の約2倍となり、実測値に近い値となった。

6. あとがき

本研究では、TFEMにより得られた限界摩擦速度と平均風速の関係を調べ、限界摩擦速度の変化特性を調べた。今回得られた限界摩擦速度の変化特性は、最も基本的な条件、すなわち、乾燥砂面上で風速以外の条件が等しい場合の結果である。今後、含水比や植生等、風速以外の限界摩擦速度に影響を与える要素についても検討する必要がある。

平均風速とその風速変動はいずれも限界風速に影響を与えていると考えられる。しかし、今回の現地実験では付録Aに示すように平均風速とその標準偏差の間には強い相関があり、これらの影響をそれぞれ評価することができなかった。風速変動の影響についても検討を要する。

(2005年2月10日受付)

謝辞

本研究を行うにあたり、海洋・水工部漂砂研究室 栗山善昭室長に御助言を頂いた。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。記して感謝の意を表する。

参考文献

- 河村龍馬 (1951) : 飛砂の研究, 東京大学理工学研究所報告, 第5巻, 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, 第29回海洋開発シンポジウム, pp.1091-1096.
- 堀川清司・堀田新太郎・久保田進・針貝聰一 (1981) : 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.
- BAGNOLD, A. (1941) : *The physics of blown sand and desert dunes*, Methuen, London, 265p.
- BENNETT, S.W. and Olyphant, G.A. (1998) : Temporal and spatial variability in rates of eolian transport determined from automated sand traps: Indiana dunes national lakeshore, USA, *Journal of Coastal Research*, 14, pp. 283-290.
- BUTTERFIELD, G.R. (1998) : Traditional behaviour of saltation: wind tunnel observations of unsteady winds, *Journal of Arid Environments*, 39, pp. 377-394.
- CHEPIL, W. (1945) : Dynamics of wind erosion, II: Initiation of soil movement, *Soil Science*, 6, pp. 397-411.
- DONG, Z., LIU, X., WANG, H. and WANG, X. (2003) : Aeolian sand transport: a wind tunnel model, *Sedimentary Geology*, 161, pp. 71-83.
- GARES, P.A., DAVIDSON-ARNOTT, R.G.D., BAUER, B.O., SHERMAN, D.J., CARTER, R.W.G., JACKSON, D.W.T. and NORDSTROM, K.F. (1996) : Alongshore variations in Aeolian sediment transport: Carrick Finn Strand, Ireland, *Journal of Coastal Research*, 12, pp. 673-682.
- GILLIES, J.A. and BERKOFISKY, L. (2004) : Eolian suspension above the saltation layer, the concentration profile, *Journal of Sedimentary Research*, 74, pp. 176-183.
- GREELEY, R., BLUMBERG, D.G. and WILLIAMS, S.H. (1996) : Field measurements of the flux and speed of wind-blown sand, *Sedimentology*, 43, pp. 41-52.
- GREELEY, R. and IVERSEN, J.D. (1985) : *Wind as a geological process: on Earth, Mars, Venus, and Titan*, 333 pp., Cambridge University Press, Cambridge.
- GOMES, N., DOMINGOS, J., JARDIM, N. and SANTOS, R. (2002) : Wind distribution over beach/dune surface: Improving aeolian sand transport estimation, *Journal of Coastal Research*, SI 36, pp. 317-324.
- JACKSON, D.W.T. (1996) : Potential inertial effects in aeolian sand transport: preliminary results, *Sedimentary geology*, 106, pp. 193-201.
- JACKSON, N.L. and NORDSTROM, K.F. (1998) : Aeolian transport of sediment on a beach during and after rainfall, Wildwood, NJ, USA, *Geomorphology*, 22, pp. 151-157.
- LEATHERMAN, S.P. (1978) : A new aeolian sand trap design (Short Communication), *Sedimentology*, 25, pp. 303-306.
- MARSTON, R.A. (1986) : Maneuver-caused wind erosion impacts, South Central New Mexico, *Aeolian Geomorphology*, Allen and Unwin, Boston, MA, pp. 291-308.
- RASMUSSEN, K.R. and MIKKELSEN, H.E. (1998) : On the efficiency of vertical array aeolian field traps, *Sedimentology*, 45, pp. 789-800.
- SHERMAN, D.J. and HOTTA, S. (1990) : Aeolian sediment transport: theory and measurement, *Coastal Dunes: Form and Process* (Ed. by Nordstrom, K. F., Psuty, N. P., Carter, R. G.), Wiley, New York, pp. 17-37.
- SHERMAN, D.J., JACKSON, D.W.T., NAMIKAS, S.L. and WANG, J. (1998) : Wind-blown sand on beaches: an evaluation of models, *Geomorphology*, 22, pp. 113-133.
- STOCKTON, P.H. and GILLETTE, D.A. (1990) : Field measurement of the sheltering effect of vegetation on erodible land surfaces, *Land degradation & rehabilitation*, 2, pp. 77-85.
- STOUT, J.E. (1998) : Effect of averaging time on the apparent threshold for aeolian transport, *Journal of Arid Environments*, 39, pp. 343-547.
- STOUT, J.E. (2003) : Seasonal variations of saltation activity on a high plains saline playa: yellow lake, Texas, *Physical Geography*, 24, pp. 61-76.
- STOUT, J.E. (2004) : A method for establishing the critical threshold for aeolian transport in the field, *Earth Surface*

Processes and Landforms, 29, pp. 1195-1207.

STOUT, J.E. and ZOBECK, T.M. (1997) : Intermittent saltation, *Sedimentology*, 44, pp. 959-970.

U.S. ARMY CORPS ENGINEERS (2002) : Wind blown sediment transport, *Coastal Engineering Manual* 1110-2-292, Washington, DC.

WHITE, B.R. and TSOAR, H. (1998) : Slope effect on saltation over a climbing sand dune, *Geomorphology*, 22, pp. 159-180.

WIGGS, G.F.S., ATHERTON, R.J.A. and BAIRD, J. (2004) : Thresholds of aeolian sand transport: establishing suitable values, *Sedimentology*, 50, pp. 95-108.

ZINGG, A.W. (1953) : Wind tunnel studies of the movement of sedimentary material, *Proceedings 5th Hydraulic Conference*, State University of Iowa, Studies in Engineering, Bulletin, 34, pp. 111-135, 1953.

付録A

平均風速 u_{mean} およびその標準偏差 u_{dev} がそれぞれ限界風速 u_t に及ぼす影響について検討する。2004年5月31日の5分間隔の場合の計測点における u_t' , u_{mean} , ならびに u_{dev} の時系列を図-A. 1に示す。 u_t' は u_{mean} および u_{dev} と逆相関で変化しており、いずれも u_t' に影響を及ぼすと考えられるが、図-A. 2に示すように u_{mean} と u_{dev} は強い比例関係(相関係数 $R=0.73$)にあり、これらの影響をそれぞれ評価するのは困難であった。

付録B

瞬間風速データを用いた限界摩擦速度の算定について検討を行った。瞬間風速と飛砂粒子数の関係の例として2004年5月31日7:20~7:25の結果を図-B. 1に示す。目視観測では風速が大きい場合に飛砂粒子数が大きくなっていたものの、両者の間に明確な相関は認められなかった。限界風速は、飛砂発生時の最小風速と定義されており、図に示す u_t' であるとも考えられる。しかし、この限界風速をこえても飛砂が発生していない場合があり、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。他の計測期間についても同様の結果が得られ、この結果はWiggsら(2004)の結果と一致する。

相関が認められなかった理由としては、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、

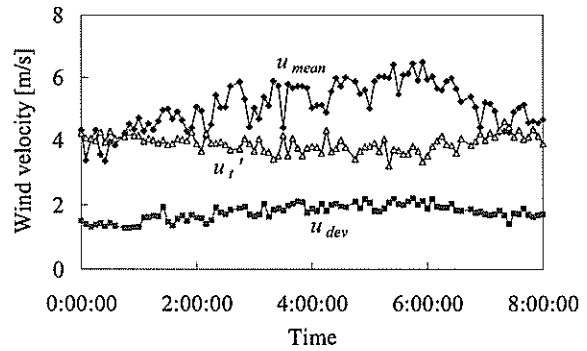


図-A. 1 2004年5月31日の5分間平均風速 u_{mean} および標準偏差 u_{dev} と限界風速 u_t' の時系列

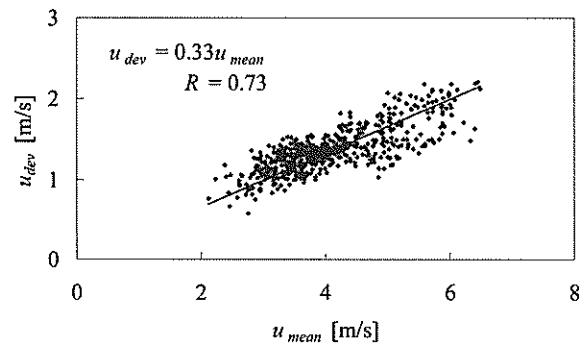


図-A. 2 5分間平均風速 u_{mean} と標準偏差 u_{dev} の関係

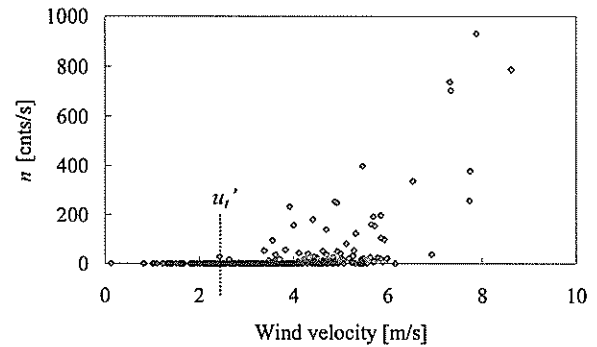


図-B. 1 2004年5月31日7:20~7:25の瞬間風速と n の関係

これらのデータが必ずしも時間的に一致しないことや、第3節で述べたように跳躍粒子のもっている飛砂エネルギーによる風上からの飛砂の移流分があることが考えられる。Jackson (1996) は、Butterfield (1998) 等に示される飛砂量の風速変化への応答のタイムラグの原因として、慣性の効果を挙げている。