

砂丘斜面上の飛砂に関する現地観測

Field Measurement of Aeolian Sand Flux over a Sand Dune Slope

有働恵子¹・満塩将太²・Junaidi³・青木伸一⁴・加藤 茂⁵・真野 明⁶

Keiko UDO, Shota MITSUSHIO, JUNAIDI, Shin-ichi AOKI, Shigeru KATO and Akira MANO

This study conducted field observations in terms of the number of blown sand impacts and wind velocity for two hours on 21 February 2009 at an open ocean beach in Japan, in order to investigate characteristics of the aeolian sand transport flux over a sand dune slope. The Charnock constant, related to wind shear on the sand bed surface, calculated from the wind velocity data on the slope had a larger value over a flat. Furthermore, the aeolian flux on the slope tended to be larger than that on the flat. Knowledge of the Charnock constant and the aeolian flux on the flat and slope was obtained from the field measurements, which will become a great help for further investigation of the aeolian sand transport mechanisms.

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。このような問題に対処していくためには、現地における飛砂現象を詳細に把握する必要がある。特に現地では、地形の起伏や底質の含水比および植物の繁茂率の非一様性等に起因して飛砂量分布も非一様となり、さらに地形の起伏が促進される。風洞実験では、斜面上の飛砂特性は平面上のそれとは異なることが報告されているものの、現地において砂丘のような斜面上の飛砂特性について詳細に解析を行った例はない。

1990年代の情報技術の発達に伴い、飛砂に関しても高頻度で計測可能な機器が開発され、現地において飛砂フラックス (Davidson-Arnottら, 2008; 有働, 2009) や飛砂量 (Jackson, 1996) の計測が行われるようになった。飛砂粒子数 (飛砂フラックス) が計測可能な機器として、Sensit (Stockton・Gillette, 1990) や Safire (Baas, 2004), UD-101 (保坂ら, 2004; Udoら, 2008) があげられる。UD-101は比較的安価で、飛砂カウント性能が高い。

本研究では、UD-101を用いて、含水比および植生の影響が小さい静岡県中田島砂丘の斜面上における風向風速および飛砂フラックスを調べることにより、斜面が飛砂フラックス特性に及ぼす影響について明らかにすること

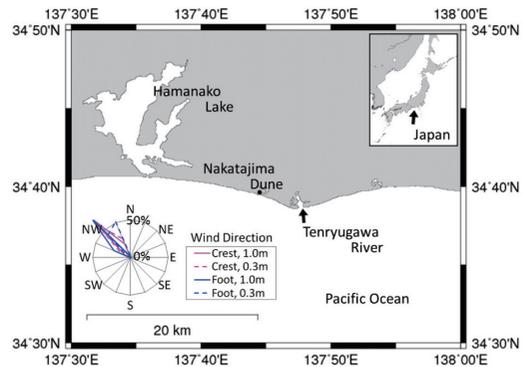


図-1 調査地の位置



図-2 中田島砂丘の2006年の航空写真

を目的とする。

2. 現地観測の概要

現地調査は、遠州灘に面する静岡県中田島砂丘で2009年2月21日に行った (図-1)。観測点は海岸線より200m以上陸側の領域で (図-2)、観測点周辺に植生の繁茂は認められない。観測期間中の卓越風向 (北西) と概ね平行な砂丘勾配0.09程度の測線上に、砂丘風上側 (Foot, 測点F) および風下側 (Crest, 測点C) 測点を設定した

- | | | | | |
|---|------|------|------------------|----------------|
| 1 | 正会員 | 博(工) | 東北大学准教授 | 災害制御研究センター |
| 2 | 学生会員 | | 東北大学 | 工学部 |
| 3 | | 博(工) | 豊橋技術科学大学産学官連携研究員 | 工学部建築・都市システム学系 |
| 4 | 正会員 | 博(工) | 豊橋技術科学大学教授 | 工学部建築・都市システム学系 |
| 5 | 正会員 | 工博 | 豊橋技術科学大学准教授 | 工学部建築・都市システム学系 |
| 6 | 正会員 | 工博 | 東北大学教授 | 災害制御研究センター |

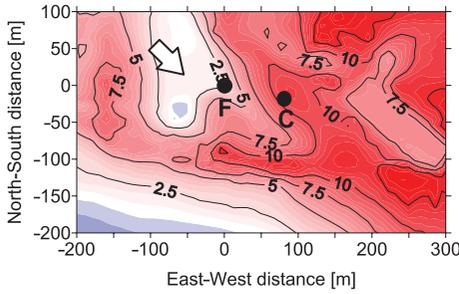


図-3 砂丘斜面上の風上側 (Foot, 測点F) と風下側 (Crest, 測点C) の観測点の位置とその周辺の平面地形 (平面座標の原点: 測点F). 図中数字は標高を, 白矢印は卓越風向を示す.

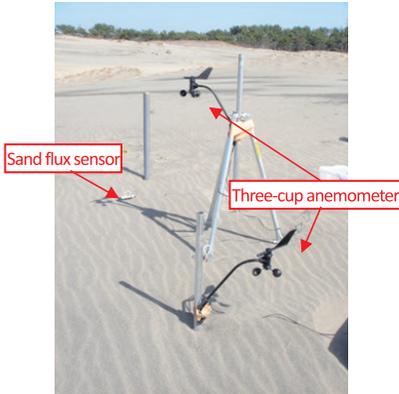


図-4 Crestにおける計測機器の設置状況

(図-3). 北西の風の場合, Footでは風上側から平面上を吹いてきた風により生じた飛砂を, Crestでは斜面上を吹いてきた風により生じた飛砂を捉えることになる. 測点周辺の中央粒径は0.3~0.35mm程度で, Footでは0.33mm, Crestでは0.35mmであった. 本計測と同時に行われた観

測の概要および観測地周辺の地形変化特性および飛砂フラックス分布特性については, Junaidiら(2009)を参照されたい.

各測点上で, 砂面から0.04m ($z = 0.04\text{m}$) 地点において, 圧電飛砂計により1Hzで1秒間の合計飛砂粒子数データを, $z = 0.3\text{m}$ および1.0m地点において, 三杯式風向風速計により1分間の平均風向風速データを, 11:23~13:38の2時間15分の間取得した(図-4).

3. 観測結果

(1) 風向風速および飛砂粒子数データ

風向については, FootとCrestのいずれにおいても北西が卓越していたものの, Crestでは $z = 0.3\text{m}$, 1.0m地点の風配が概ね一致したのに対し, Footでは $z = 0.3\text{m}$ で北北西が卓越する(若干北寄りになる)傾向にあった(図-1). これは, 砂丘周辺地形の3次元性に依存したものと考えられる.

$z = 0.3\text{m}$, 1.0mにおける1分間平均風速 u_{mean} および $z = 0.04\text{m}$ における1秒毎の飛砂粒子数 n の時系列を図-5に, これらの頻度分布を図-6に示す. 風速鉛直分布より求めた u_s も合わせて表示する(次節参照). $z = 0.3\text{m}$ における平均風速はFootとCrestで概ね等しいものの, $z = 1.0\text{m}$ ではFootと比べてCrestで大きかった. 飛砂粒子数についても, Footと比べてCrestで大きかった.

観測点周辺への砂の堆積により, 観測終了時の飛砂粒子数の計測高さはFootでは3.0cm, Crestでは2.5cmと1~1.5cm小さくなった. このことは, 観測終了時には同程度の風速に対する飛砂粒子数が開始時と比べて2倍程度に上昇した可能性もあることを意味する(Udoら, 2008).

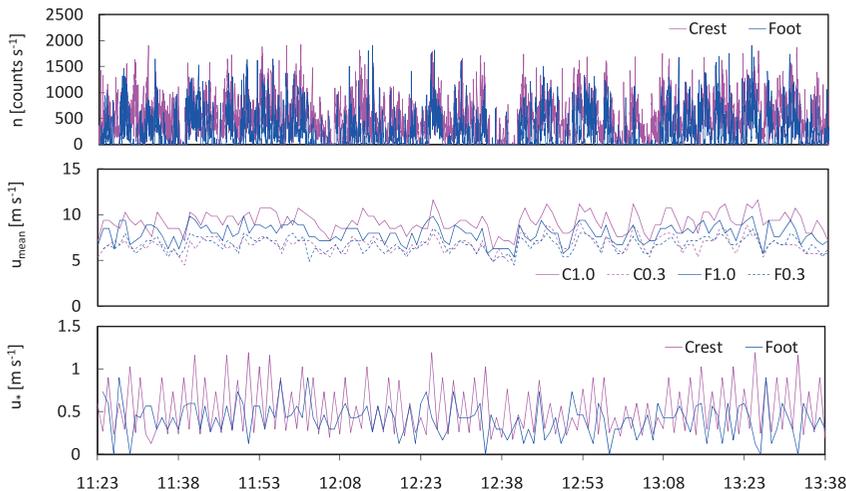


図-5 $z = 0.3\text{m}$, 1.0m地点における u_{mean} , u_{mean} より算定した u_s , ならびに $z = 0.04\text{m}$ における n の時系列

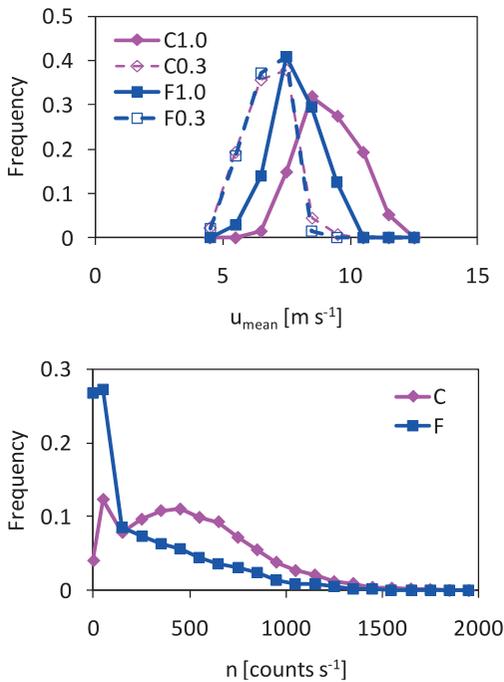


図-6 u_{mean} と n の頻度分布

(2) 鉛直風速分布特性

鉛直風速分布については、風洞実験や砂浜において対数則の成立が報告されている。

$$u = \frac{u_*}{\kappa} \ln(z/z_0) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 κ : カルマン係数 (= 0.4), u_* : 摩擦速度, z : 風速計の砂面からの高さ, z_0 : 粗度高さである。飛砂が生じている場合の z_0 (z_{0s}) については、

$$z_{0s} = c_0 \frac{u_*^2}{2g} \dots\dots\dots (2)$$

で与えられる場合が多い (Charnock, 1955 ; Owen, 1964 ; Raupach, 1991 ; Sherman・Farrell, 2008)。ここで、 g : 重力加速度 (= 9.81ms^{-2}) である。 c_0 は定数 (Charnock constant) で、Raupach (1991) は風洞実験においては0.02程度、砂浜においては0.16程度で与えることを提案した。Sherman・Farrell (2008) は、砂面状態や計測条件によって c_0 が異なり、砂浜におけるこれまでの少ない計測例では c_0 は0.01~0.24程度であることを示し、また、Raupachモデルの妥当性を示した。本観測で得られたCrestとFootのデータについて得られた、 $z = 0.3\text{m}$ および 1.0m における u_{mean} の関係を図-7に示す。これらの関係について、 $c_0 = 0.05, 0.16, 0.29$ として式 (1) と (2) を用いて算定した結果も合わせて示す。最小二乗法により、CrestとFootにおいてそれぞれ c_0 を0.29および0.05で与えた場合に、観測結果が対数則と最も良く一致

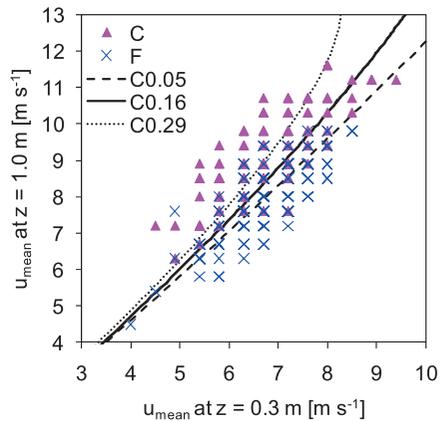


図-7 $z = 0.3\text{m}$ および 1.0m における u_{mean} の関係。C0.05, C0.16, C0.29はそれぞれ $c_0 = 0.05, 0.16, 0.29$ として式 (1) と (2) を用いて算定した関係を示す。

し、いずれも既存の計測結果と同程度の値となった。CrestにおいてはFootの値の6倍程度の値となった。

さらに、観測結果より式 (1) を用いて算定した z_0 と $u_*^2/2g$ の関係からCrestとFootにおける c_0 を算定したところ、それぞれ0.40および0.26が得られ、 u_{mean} の関係から得られた結果とは異なった。この原因については、 u_* の推定誤差が考えられ、次節で考察する。

(3) 風速・摩擦速度と飛砂フラックスとの関係

次に、 n の1分間平均値を求め、平均風速または摩擦速度 (観測結果より式 (1) を用いて算定) と平均飛砂粒子数 n_{mean} との関係について調べた (図-8)。 $z = 0.3\text{m}$ の風速と n_{mean} との関係を見ると、同程度の風速において、Crestの n_{mean} はFootのそれより若干大きくなるという結果が得られたものの、 $z = 1.0\text{m}$ では、同程度の風速におけるFootとCrestの n_{mean} に明確な差異は認められず概ね一致した。

一方、 u_* と n_{mean} との関係については、風速との関係と比べて顕著にばらつきが大きくなる結果となった (図-9)。既存の飛砂フラックス鉛直分布式 (河村, 1951) より得られる n_{mean} と u_* の関係 (Udoら (2008) 参照 ; 式 (11) は $G_0 = 4.28\rho(u_* - u_{*c})$ に訂正) と比較すると、 $u_* < 0.5\text{ms}^{-1}$ においてはCrestとFootのいずれの地点においても河村式より過大であるものの、 $u_* > 0.5\text{ms}^{-1}$ 程度の場合に n_{mean} は河村式 (1951) の曲線と同オーダーで一致した。

Crestでは $u_* = 0.2 \sim 0.3\text{ms}^{-1}$ 付近に高相関のプロット群が認められた。Crestにおけるプロット群出現および前節の c_0 の算定方法による差異の原因としては、観測期間中に概ね2分周期で小さい u_* 値が出現している (図-5参照) 影響が考えられる。この小さい u_* 値の出現原因としては、地形の3次元性による周期的な流れ場の発生、あるいは、三杯式風速計の特性が考えられる。後者については、本

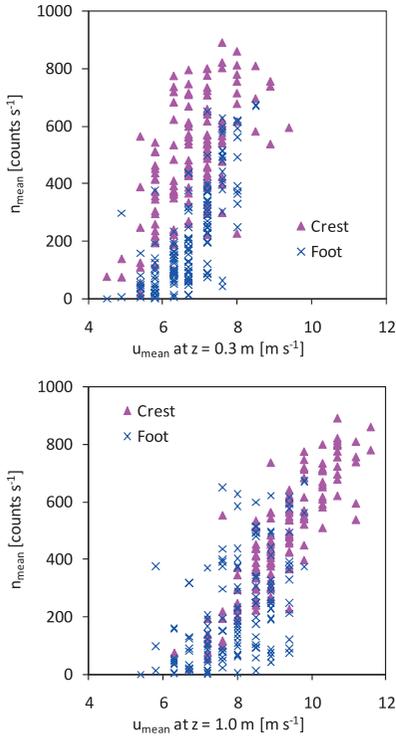


図-8 $z = 0.3\text{m}$, 1.0m 地点における u_{mean} と n_{mean} の関係

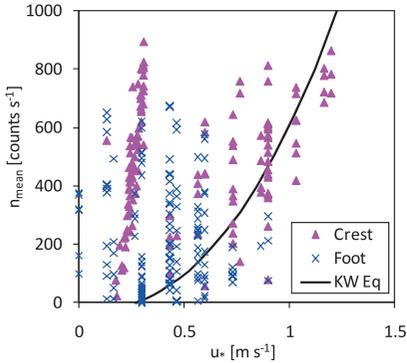


図-9 u_* と n_{mean} の関係. KW Eqは河村 (1951) の鉛直分布式

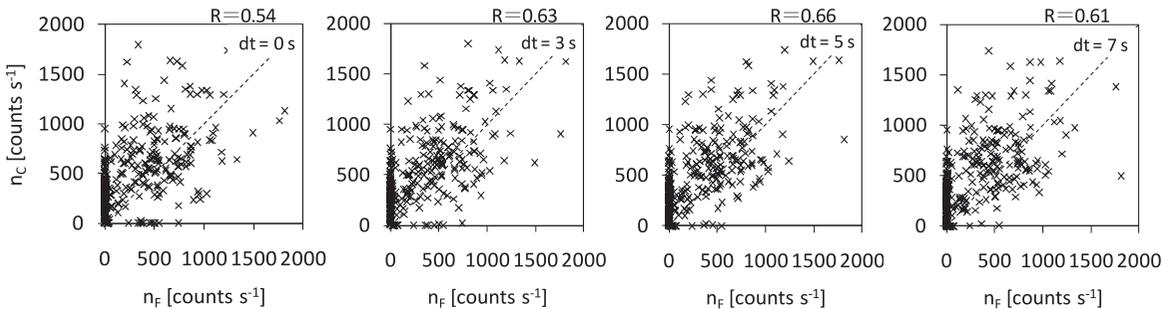


図-10 Footで12:23～12:28に取得された1秒毎の n_{mean} (n_F) とその dt 秒後にCrestで取得された n_{mean} (n_C) との関係

観測では1分間平均データを使用しているためこの影響は大幅に除外できたと考えられるものの、データを小数第1位までしか記録しておらず、これが影響した可能性も否定できない。また、Footでは u_* 値が極めて小さくなる ($z = 0.3\text{m}$, 1.0m 地点の風速が同じとき 0ms^{-1} ; 図-5参照) 場合が出現している。本研究では、風速の鉛直分布が対数則に従うことを仮定して u_* を求めたものの、 $z = 0.3\text{m}$, 1.0m 地点の風速が同じ場合が出現したことは、これらの高さで計測された風速が対数則に従わない場合があることを意味する。砂丘周辺では風向によっては3次元性の流れ場が生じるものの、本観測では空間的なデータは取得しておらず、また、3次元性の流れ場により飛砂フラックスの空間分布も変化する可能性があるが、飛砂フラックスの鉛直分布等の計測を行っていない。今後これらについても詳細な検討が必要とされる。

$z = 1.0\text{m}$ における結果を、茨城県波崎海岸で $z = 0.9\text{m}$ において得られた降雨がない場合の結果 (Udoら, 2008) と比較すると、同程度の風速に対する n_{mean} は同程度の値であった。 $n_{\text{mean}} > 0$ となる風速 (限界風速) については、波崎海岸で 3ms^{-1} 程度であるのに対し、本観測では $5 \sim 6\text{ms}^{-1}$ 程度と大きくなった。計測点周辺の10%粒径 D_{10} が 0.2mm 程度で波崎海岸のそれ (0.1mm 程度) より大きく、また、Bagnold (1941) によれば、限界摩擦速度は粒径の0.5乗に比例することを考慮すると、本観測の限界風速は波崎海岸のその1.4倍程度になる。本観測で得られた $z = 1.0\text{m}$ における限界風速を波崎と同じ $z = 0.9\text{m}$ における限界風速に換算すると若干小さく考えられ、得られた結果は妥当と判断される。

(4) Foot-Crestにおける飛砂フラックスのタイムラグ

FootおよびCrestで取得された n のデータを5分毎に区切った26データセットについて、各地点における同時刻の n の値 (それぞれ n_F , n_C) を比較した (図-10; $dt = 0\text{s}$)。さらに、 n_F と n_C のタイムラグを調べるため、ある時刻の n_F とその dt 秒後の n_C の値を比較した (同図; $dt > 0\text{s}$)。

R の最大値が0.5を超えたのは、26データセット中8データセットであった。 R が最大のときの dt を調べたとこ

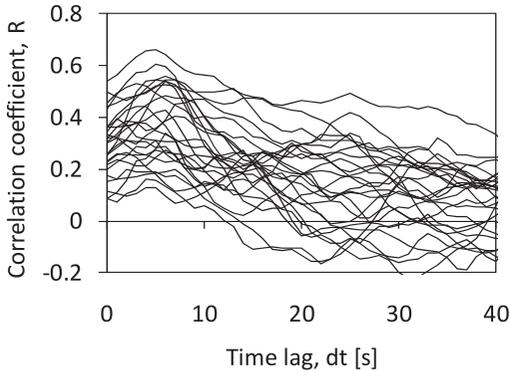


図-11 26データセットにおける n_F と n_C のタイムラグと R の関係

ろ3~6sで(図-11), これらのデータセット期間の平均風速は7~10 ms^{-1} 程度であった。 $z = 0.04\text{m}$ は掃流砂層内にある可能性が高く(有働, 2009), 飛砂フラックスの極大値は, 局所的な風速と連動して出現するケースが多いと考えられることから, FootとCrestにおける局所的な風速に3~6s程度のタイムラグが生じていたことが考えられる。換言すれば, FootからCrestまでの斜面上距離が80m程度であることから, 風速の時間変動(風の息)の風上から風下への伝播速度が10~16 ms^{-1} 程度で, 平均風速より若干大きかったと考えられる。

4. 結論

これまでに高時間分解能での風速および飛砂フラックス解析が行われていない, 現地の砂丘斜面上の風上側および風下側において風速および飛砂粒子数を計測し, 風速の鉛直分布や飛砂フラックス特性, ならびに風速と飛砂フラックスとの関係について調べた。

本観測で計測された風速の鉛直分布については, 平面上の飛砂においてはCharnock constantを0.05とした場合に, 斜面上の飛砂においては0.29とした場合に, 既存の関係と一致し, 斜面上のCharnock constantの方が大きかった。

砂面からの高さ $z = 0.04\text{m}$ 地点における n_{mean} については, $z = 0.3\text{m}$ における風速との関係では, 斜面上の n_{mean} は平面上のそれより若干大きくなるという結果が得られたものの, $z = 1.0\text{m}$ では明確な差異は認められず概ね一致した。一方, $z = 0.3\text{m}, 1.0\text{m}$ における u_{mean} を用いて対数則より推定した u_* と n_{mean} との関係については, $u_* < 0.5\text{ms}^{-1}$ の場合にはばらつきが大きいものの, $u_* > 0.5\text{ms}^{-1}$ 程度の場合には既存の関係式と概ね一致する結果となった。

FootおよびCrestで取得された n (それぞれ n_F, n_C)のタイムラグを比較したところ, $dt = 3 \sim 6\text{s}$ 程度のとき n_F

と n_C は最も相関が高くなった。この結果より, Foot~Crest間の風速変動(風の息)の伝播速度は平均風速より若干大きい値であったと推察される。

砂丘周辺では風向によって複雑な3次元性の流れ場が生じ, また, これにより飛砂フラックスの空間分布も複雑になる可能性があるものの, 本観測ではこれらを空間的には取得していない。今後, 高頻度かつ空間的なデータを取得し, 詳細な検討を行うことが必要とされる。

謝辞: 現地観測においては, 豊橋技術科学大学海岸工学研究室のメンバーにご協力頂いた。また, 本研究の一部は, 科学技術振興調整費「先端技術を用いた動的土砂管理と沿岸防災」(代表: 青木伸一, 豊橋技術科学大学)の関連研究として実施された。記して謝意を表する。

参考文献

- 有働恵子 (2009) : 現地海岸における飛砂量の高頻度観測, 土木学会論文集B2 (海岸工学), 第65巻, pp. 546-550.
- 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・鶴岡正志・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.
- Baas, A.C.W. (2004) : Evaluation of saltation flux impact responders (Safires) for measuring instantaneous aeolian sand transport intensity. *Geomorphology*, 59, pp. 99-118.
- Bagnold, R.A. (1941) : *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*, Methuen, London, 265p.
- Charnock, H. (1955) : Wind stress on a water surface, *The Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 81, pp. 639-640.
- Davidson-Arnott, R.G.D., Yang, Y., Ollerhead, J., Hesp, P.A., and Walker, I.J. (2008) : The effects of surface moisture on aeolian sediment transport threshold and mass flux on a beach. *Earth Surface Processes and Landforms*, 33, pp. 55 - 74.
- Jackson, D.W.T. (1996) A new, instantaneous aeolian sand trap for field use. *Sedimentology*, 43, pp. 791-796.
- Junaidi・青木伸一・加藤茂・片岡三枝子・若江直人・尼崎貴大 (2009) : 中田島砂丘における飛砂の特性と短期的地形変化に関する研究, 土木学会論文集B2 (海岸工学), 第65巻, pp. 546-550.
- Owen, P. R. (1964) : Saltation of uniform grains in air, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 20, pp. 225-242.
- Raupach, M.R. (1991) : Saltation layers, vegetation canopies and roughness lengths, *Acta mechanica*, [Supple] 1, pp. 83-96.
- Sherman, D.J. and Farrell, E.J. (2008) : Aerodynamic roughness lengths over movable beds: Comparison of wind tunnel and field data, *Journal of Geophysical Research*, 113, F02S08, doi:10.1029/2007JF000784.
- Stockton, P.H. and Gillette, D.A. (1990) : Field measurement of the sheltering effect of vegetation on erodible land surfaces, *Land degradation & rehabilitation*, vol. 2, pp. 77-85.
- Udo, K., Kuriyama, Y., and Jackson, D.W.T. (2008) : Observations of wind-blown sand under various meteorological conditions. *Journal of Geophysical Research*, 113, F04008, doi: 10.1029/2007JF000936.