

圧電飛砂計を用いた飛砂フラックスの現地観測

Field Observations of Aeolian Sand Transport Rate Using a Piezoelectric Ceramic Sensor

有 働 恵 子¹

Keiko UDO

This study conducted field observations in terms of the number of blown sand impacts and wind velocity in the period of 12 - 16 Jan 2005 at an open ocean beach in Japan, in order to investigate effects of meteorological change on the aeolian sand transport. A regression curve of relationship between wind velocity and impact counts during a no rainfall phase in the field coincided with wind-tunnel experimental results of Ni et al. (2002) and Hotta et al. (2006), indicating that the piezoelectric sensor measuring the impact counts is a useful tool to observe the sand flux in the field. The counts (sand flux) for wind direction in cross-shore direction decreased by one order of magnitude due to a change in the wind direction from longshore to cross-shore and then by more than one order due to an increase in the moisture content.

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。これまで風洞実験結果をもとに導出された多くの飛砂量公式(例えば, Bagnold, 1941; 河村, 1951; Owen, 1964)が提案されており, 飛砂の現地観測も行われてきた(例えば, Greeley, 1996)。1990年代半ば頃まではトラップ(例えば, 堀川ら, 1983; Rasmussen・Mikkelsen, 1998)を用いた飛砂量計測が行われており, 時々刻々と変化する飛砂量の変化を捉えることが困難であったが, 近年では様々な飛砂計測機器が開発され, 風速変化に伴う飛砂状況の変化についてより詳細なデータの取得が可能になっている。

飛砂の高頻度計測機器は大きく2種類に分けられる。一方は飛砂量(Butterfield, 1991; Jackson, 1996; Bauer・Namikas, 1998)を, 他方はある高さにおける飛砂フラックス(Stockton・Gillette, 1990; 保坂ら, 2004)を計測するものである。前者は転倒ます型雨量計と同様の形状をしており, トラップされた飛砂の重さを高頻度で計測し, 飛砂量の変化を把握することが可能である。飛砂を貯める容器が一定量に達すると自動的に転倒し, 継続的に計測することが可能である。後者は圧電振動子に砂が衝突したときに生じる電気信号を利用してある高さにおける飛砂数をカウントする。飛砂量計を用いた計測は計測期間に制約があるのに対し, 圧電飛砂計の場合には半永久的な計測が可能である。

飛砂量計や圧電飛砂計を用いた様々な現地観測はなさ

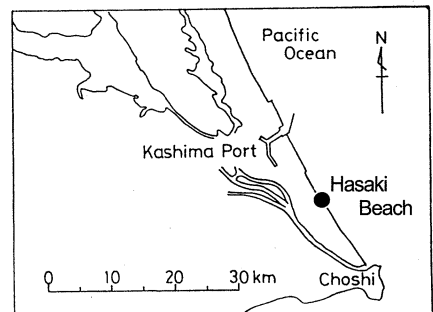


図-1 観測地の位置

れているものの(例えば, Baas, 2004; Gillies・Berkofsky, 2004), 海岸における観測例や荒天時を含む観測例は少ない。有働(2007)は茨城県波崎海岸で現地観測を行い, 飛砂の限界摩擦速度特性について解析を行った。本研究では, 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飛砂フラックス特性を解析し, 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海岸の飛砂特性を調べた。

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(有働, 2007; 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90m陸側の後浜である。計測期間は晴天時の2005年1月12日10:38~13日17:28および大型の低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圧電飛砂計の設置状況を図-2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0.17mm程度であった。

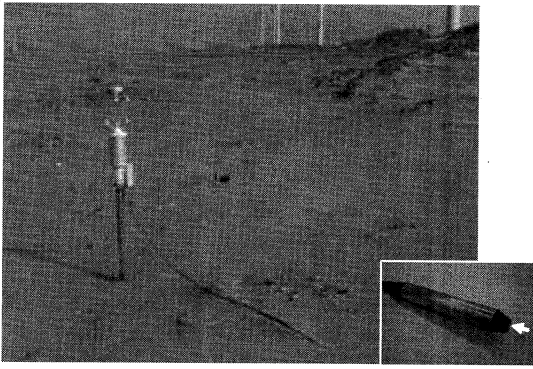


図-2 計測機器の設置状況

(白枠内：圧電飛砂計，白矢印：圧電振動子)

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1Hzで砂面からの高さ $z_s=0.9\text{m}$ 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，圧電飛砂計を用いてサンプリング周期1Hzで計測した。この飛砂計は，風向方向に設置した直径5mmの円形の圧電振動子 (センサー) 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 (坂坂ら，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) におけるセンサーの高さは $z_s=0.04\text{m}$ である。

降水量および全天日射量データとしては，銚子地方気象台の1時間毎のデータを用いた。

3. 圧電飛砂計を用いた飛砂質量フラックスの推定法

圧電飛砂計の性能については，久保田ら (2006, 2007) に詳しい。図-3に粒径0.25mmの砂を用いた実験により得られた圧電飛砂計とトラップによる飛砂質量フラックスの計測値を比較する。圧電飛砂計で計測される飛砂粒子数 n を飛砂フラックス q_{Sensor} に換算する際には，

$$q_{\text{Sensor}} = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{d}{2} \right)^3 \rho_s n = \frac{2 \rho_s d^3 n}{3 d_{PS}^2 t_0} \quad (1)$$

を用いた。ここで， d ：砂の中央粒径， ρ_s ：砂の密度 ($=2.65 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$)， d_{PS} ：飛砂計センサー部の直径 ($=0.012\text{m}$)， t_0 ：計測時間 ($=1\text{s}$) である。図より，圧電飛砂計による計測値 q_{Sensor} はトラップによる計測値 q_{Trap} より小さくなるものの，これらの間には次式で表される比例関係 (相関係数 ($r=0.95$)) が認められた。

$$q_{\text{Trap}} = 10.571 q_{\text{Sensor}} \quad (2)$$

よって， $z_s=0.04\text{m}$ における現地の飛砂フラックス q_s は，

$$q_n(0.04) = \frac{2 \rho_s d^3 n}{3 d_{PS}^2 t_0} \frac{q_{\text{Trap}}}{q_{\text{Sensor}}} n = \frac{7.05 \rho_s d^3 n}{d_{PS}^2 t_0} \quad (3)$$

より算定することとした。

現地観測で得られた飛砂粒子数 n はNiら (2002) およびHottaら (2006) の風洞実験結果 ($q_{\text{Ni}}(0.04)$ および $q_{\text{Hotta}}(0.04)$) と比較する。風速が変動する場合には対数則が成立しないため，摩擦速度 u_* ではなく0.9m地点における風速 u をそのまま用い，実験値は対数則を用いて0.9m地点における風速に換算した。限界風速 u_κ はBagnold (1941) の限界摩擦速度式および対数則

$$u_{*i} = A \sqrt{\frac{\rho_s - \rho}{\rho} g d} \quad (4)$$

$$u_i = \frac{u_{*i}}{\kappa} \ln(z/z_0) \quad (5)$$

を用いて算定した。ここで， κ ：カルマン係数 ($=0.4$)， u ：風速， z ：風速計の砂面からの高さ ($=0.9\text{m}$)， z_0 ：粗度高さ， A ：定数 ($=0.1$)， ρ ：空気密度 ($=1.226\text{kg/m}^3$)， g ：重力加速度 ($=9.81\text{m/s}^2$) である。飛砂が生じている場合の z_0 (z_{0s}) はCharmock (1955) およびOwen (1964) を参考に

$$z_{0s} = c_0 \frac{u_*^2}{2g} \quad (6)$$

で与えた。ここで c_0 ：定数 ($=0.16$; Raupach, 1991) である。 $d=0.17\text{mm}$ の場合には， $u_*=5.82\text{m/s}$ と算定される。

4. 風速と飛砂質量フラックスとの関係

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。0.5mm未満の降雨については0.25mmで表示した。全天日射量の積算時間は1時間である。測定終了後の飛砂計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 $z_s=0.045\text{m}$ 程度で，砂面は5mm程度侵食されていた。詳しくは有働 (2007) を参照されたい。観測データは，風向が沿岸方向で吹送距離が長く，降雨がない状況で飛砂が観測されたObs-1とObs-3，風向が岸沖方向で，0.5mm以上の降雨がない状況で飛砂が観測されたObs-4，なら

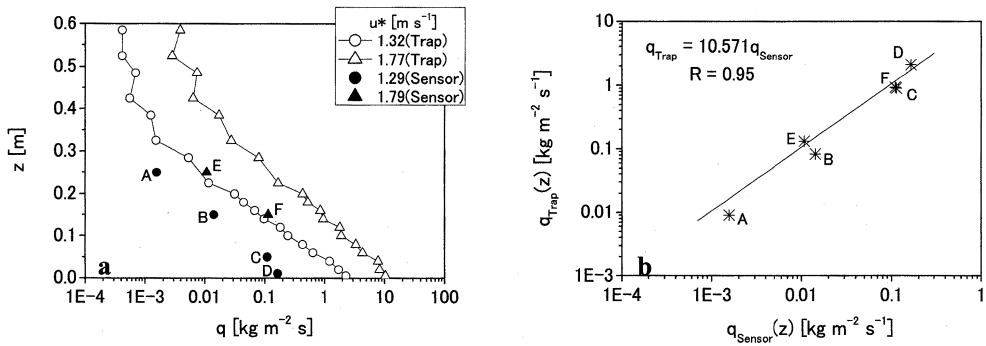


図-3 圧電飛砂計とトラップによる飛砂量の比較

(a)久保田ら(2007)参照. (b)久保田ら(2007)のデータを使用して描画

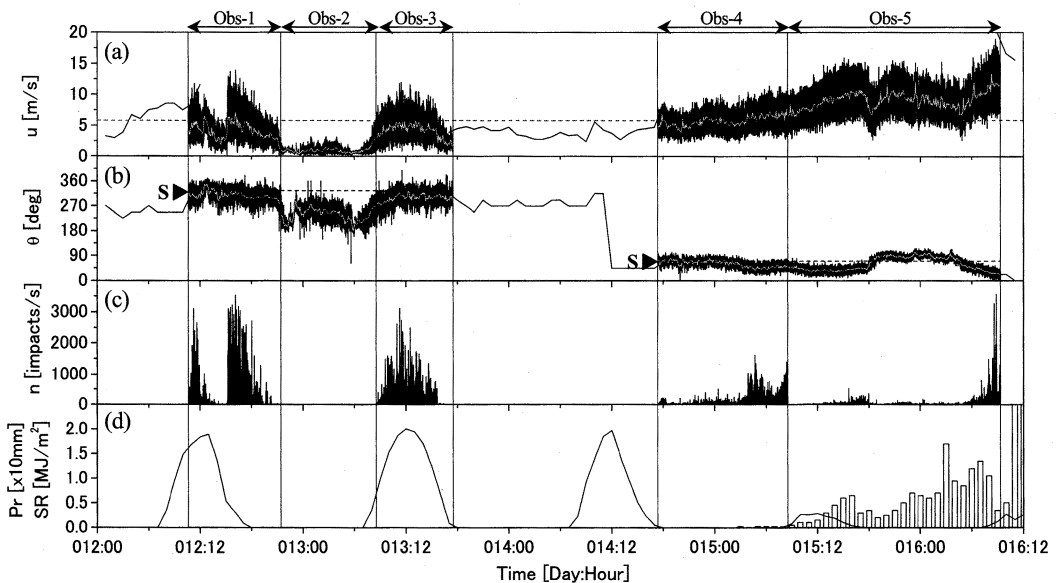


図-4 (a)(b)瞬間風向風速 u , θ , (c)飛砂粒子数 n , ならびに(d)降水量 Pr および全天日射量 SR の時系列

((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: 飛砂計センサーの設置方向, 有働(2007)参照)

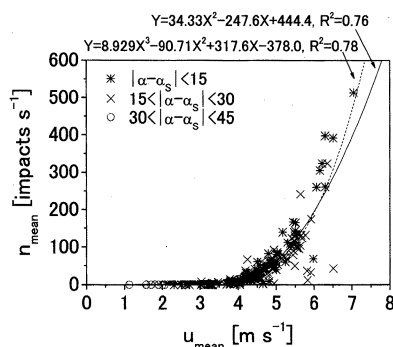


図-5 Obs-1およびObs-3における5分間の平均風速 u_{mean} と飛砂粒子数 n_{mean} との関係

びに風向が岸沖方向で0.5mm以上の降雨がある状況で飛砂が観測されたObs-5に分けられ, 各期間の飛砂フラックス特性について解析を行った.

観測期間中の低気圧の通過に伴い, 1月14日12時頃に大きな気象変化が生じた. これにより, Obs-1およびObs-3の期間においては平均風向がW~NNW方向であるのに対し, Obs-4およびObs-5においては平均風向がN~E方向となり, 沿岸方向から岸沖方向の風へと変化した. Obs-1~Obs-4においては, 最大瞬間風速が13m/s程度であったのに対し, 0.5mm以上の降雨があったObs-5においては, 最大瞬間風速19m/sを観測した. 飛砂粒子数は, 平均風向がW~NNW方向で風速が大きく, 降水がないときに大きくなっていた.

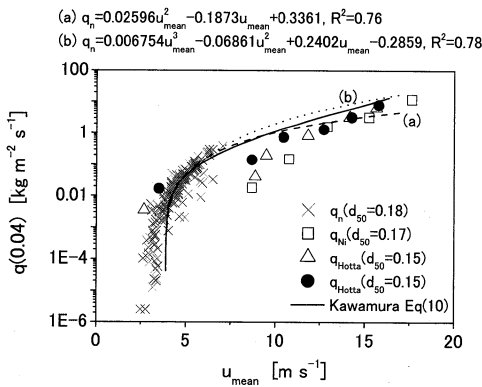


図-6 Obs-1およびObs-3における平均風速 u_{mean} と $z=0.04m$ における飛砂質量フラックス q の関係(q_n :観測結果, q_m :Niら(2002)の実験結果, q_{Hotta} :Hottaら(2006)の実験結果)

降雨がなく、砂面が乾いた状態にあったと考えられるObs-1~Obs-3における、単位時間を5分とした場合の平均風速 u_{mean} と飛砂粒子数 n_{mean} との関係を図-5に示す。有働(2007)によれば、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ったことを考慮し、単位時間を5分とした。 n_{mean} は以下の u_{mean} の2次式(決定係数 $R^2=0.76$)あるいは3次式($R^2=0.78$)で近似された。

$$n_{mean} = 34.33u_{mean}^2 - 247.6u_{mean} + 444.4 \quad (8)$$

$$n_{mean} = 8.929u_{mean}^3 - 90.71u_{mean}^2 + 317.6u_{mean} - 378.0 \quad (9)$$

これらの関係を式(1)および(5)を用いて変形することにより得られる u_{mean} と $q_n(0.04)$ 、 $q_m(0.04)$ 、ならびに $q_{Hotta}(0.04)$ との関係を図-6に示す。現地観測結果より得られた $q_n(0.04)$ の近似曲線式は風洞実験結果と風速範囲は異なるものの概ね一致した。河村(1951)は飛砂質量フラックスの鉛直分布式

$$q(z) = \int_{\sqrt{gh_0}}^{\frac{2G_0}{\sqrt{gh_0}}} K_0 \left(\sqrt{\frac{2z}{h_0}} \right) u_p(z) dz \quad (10)$$

$$G_0 = 42.8(u_* - u_{*c}) \quad (11)$$

を提案している。ここで、 G_0 :単位時間に砂面の単位面積に落下する砂量、 u_p :飛砂粒子の平均水平速度、 h_0 :飛砂粒子の平均サルテーション高さ(跳躍高さ)、 K_0 :0次の第2種変形ベッセル関数である。Niら(2002)の実験結果によればサルテーション層の最大高さ(と風速との間には相関が認められないことから、 h_0 と風速との間にも相関は得られないと考えられる。よって式(10)中で u に依存する変数は $G_0 \sim u$ および $u_p \sim u$ であることから、 $q \sim u^2$ 、すなわち、飛砂質量フラックスの鉛直分布式 q は u の2次

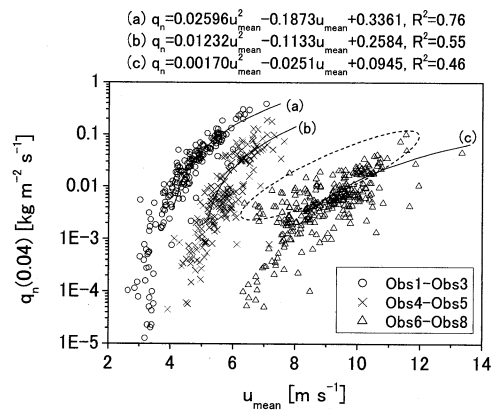


図-7 Obs-1およびObs-3, Obs-4, ならびにObs-5における平均風速 u_{mean} と飛砂質量フラックス q_n の関係

式で表されると考えられる。 u_{mean} と $q_n(0.04)$ の2次の近似曲線式は

$$q_n(0.04) = 0.02596u_{mean}^2 - 0.1873u_{mean} + 0.3361 \quad (12)$$

で表される。Obs-1~Obs-3, Obs-4, ならびにObs-5における u_{mean} と $q_n(0.04)$ との関係を図-7に比較する。Obs-4およびObs-5についても、Obs-1~Obs-3と同じ要領で $q_n(0.04)$ 式を求めると、

$$q_n(0.04) = 0.01232u_{mean}^2 - 0.1133u_{mean} + 0.2584 \quad (13)$$

$$q_n(0.04) = 0.00170u_{mean}^2 - 0.0251u_{mean} + 0.0945 \quad (14)$$

が得られ、決定係数はそれぞれ $R^2=0.55$, 0.46 であった。Obs-5においては、降雨量が大きく変化しているため、Obs-1およびObs-3, Obs-4と比べて相関が低くなっているものの、対数グラフで表示するとObs-5の期間中は気象条件が大きく変化しているにもかかわらず、明確な相関関係が認められる。データのばらつき(原因としては、風向の変化による砂のセンサーへの衝突角度の変化、風向によるフェッチ長の減少(Dongら, 2004)、ならびに降雨による砂面含水比の増加(Cornelis・Gabriels, 2003)等が挙げられる。また、降雨自体の飛砂粒子数への影響はないものの、降雨開始時には湿った飛砂がセンサー周辺に固着することによるセンサー感度が低下し、強雨によりセンサー周辺の砂が洗い流されるまでは感度の低い(カウント数が少なくなる)状態が続く。Obs-5において図中の点線枠内の値が得られた際にはセンサーへの衝突角度が90度に近くなっており、Obs-5の $q_n(0.04)$ 式(14)は過小評価であると考えられる。しかしながら、これらのことを考慮しても、Obs-4(風向:岸沖方向、降雨なし)における $q_n(0.04)$ は、Obs-1およびObs-3(風向:沿岸方向、降雨なし)より最大で1オーダー程度減少し、

さらにObs-5 (風向: 岸沖方向, 0.05mm以上の降雨開始後)はObs-4より少なくとも1オーダー程度は減少したと推定される。

今回の長時間観測を行うにあたり, 飛砂計の存在により飛砂計付近の風場が変化して侵食および堆積が生じるのを避けるため, センサー設置高さを $z_s=0.04\text{m}$ とした。飛砂の発生量が極めて少ない場合にも $z_s=0.04\text{m}$ において飛砂を検知することが可能で, 地形変化も0.005mの侵食と小さかったが, 設置高さによっては飛砂が生じていても検知できない場合や地形変化の影響を大きく受ける場合があるため注意を要する。また, 捕砂器については捕砂器の種類や捕砂高さによって捕砂効率が大きく異なるといわれており, Rasmussen・Mikkelsen (1998)は, 砂面からの高さが0.015m以上の場合には捕砂効率が80%以上となるものの, 0.015m以下の場合には50~70%となることを示している。捕砂効率についても今後検討する必要がある。

5. 結 論

現地海岸において, 圧電飛砂計を用いて瞬間風速および飛砂粒子数を計測し, これと気象データとの関係から気象条件の変化に伴う海岸の飛砂フラックス特性を調べた。砂面からの高さ $z_s=0.04\text{m}$ 地点における現地観測結果より得られた $q_s(0.04)$ の近似曲線式は風洞実験結果と概ね一致しており, 圧電飛砂計により現地の飛砂フラックスの計測が可能であることが示唆された。

5分間平均飛砂フラックスは平均風速 U_{mean} の2次式で近似され, 河村式(1951)と同様の曲線となった。風向が岸沖方向で降雨がない場合における $q_s(0.04)$ は, 風向が沿岸方向で降雨がない場合より最大で1オーダー程度減少し, さらに風向が岸沖方向で0.05mm以上の降雨がある場合には風向が岸沖方向で降雨がない場合より少なくとも1オーダー程度は減少したと推定された。

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(現 沿岸環境研究領域 沿岸土砂管理研究チーム)にご協力頂き, また, 栗山善昭室長には有益なご助言を頂いた。日本大学 堀田新太郎教授および久保田進教授には実験データを提供していただいた。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

有働恵子(2007): 飛砂の限界摩擦速度に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第54巻, pp.536-540.

- 河村龍馬(1951): 飛砂の研究, 東大理工研報告, No.5, pp.95-112.
- 久保田進・保坂幸一・小栗保二(2006): 圧電振動子を用いた飛砂量計の開発—飛砂粒子衝突時のセンサー出力に関する実験—, 日本大学理工学研究所所報, 第114号, pp. 93-103.
- 久保田進・保坂幸一・田村貴史(2007): 圧電振動子を用いた飛砂量計の開発(2)—高速度カメラによる飛砂衝突状況の可視化—, 日本大学理工学研究所所報, 第115号, pp. 141-149.
- 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.
- 堀田清司・堀田新太郎・久保田進・香取完和(1983): トレンチトラップによる飛砂量の現地観測, 海岸工学論文集, 第30巻, pp. 303-307.
- Baas, A.C.W. (2004): Evaluation of saltation flux impact responders (Safires) for measuring instantaneous aeolian sand transport intensity, *Geomorphology*, vol. 59, pp.99-118.
- Bagnold, R.A. (1941): *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*, Methuen, London, 265p.
- Bauer, B.O. and Namikas, S.L. (1998): Design and field test of a continuously weighing, tipping-bucket assembly for aeolian sand traps, *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 23, pp.1173-1183.
- Butterfield, G.R. (1991): Grain transport rates in steady and unsteady turbulent airflows, *Acta mechanica*, [Supple.] 1, pp.97-122.
- Charnock, H. (1955): Wind stress on a water surface, *The Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 81, pp.639-640.
- Cornelis, W. M. and Gabriels, D. (2003): The effect of surface moisture on the entrainment of dune sand by wind: an evaluation of selected models, *Sedimentology*, vol. 50, pp.771-790.
- Dong, Z., Liu, X., Wang, X., Li, F., and Zhao, A. (2004): Experimental investigation of the velocity of a sand cloud blowing over a sandy surface, *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 29, pp.343-358.
- Gillies, J.A. and Berkofsky, L. (2004): Eolian suspension above the saltation layer, the concentration profile, *Journal of Sedimentary Research*, vol. 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*, vol. 43, pp.41-52.
- Hotta, S., S. Kubota, N. Nakamura, and K. Hosaka (2006): Wind tunnel study of vertical distribution of sand transport rate by wind, *Proceedings of the 30th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, pp.2604?2616.
- Iversen, J. D., and K. R. Rasmussen (1999): The effect of wind speed and bed slope on sand transport, *Sedimentology*, 46, pp.723?731.
- Jackson, D.W.T. (1996) A new, instantaneous aeolian sand trap for field use. In: *Sedimentology*, 43, pp.791-796.
- Ni, J.R., Li, Z.S. and Mendoza, C. (2002): Vertical profiles of aeolian sand mass flux, *Geomorphology*, vol. 49, pp.205-218.
- Owen, P. R. (1964): Saltation of uniform grains in air, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 20, pp.225-242.
- Rasmussen, K.R. and Mikkelsen, H.E. (1998): On the efficiency of vertical array aeolian field traps, *Sedimentology*, vol. 45, pp.789-800.
- Raupach, M.R. (1991): Saltation layers, vegetation canopies and roughness lengths, *Acta mechanica*, [Supple] 1, pp.83-96.
- 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.