

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

Characteristics of Sediment Transport and Short-Term Topographic Change on the Nakatajima Dune

Junaidi¹・青木伸一²・加藤 茂³・片岡三枝子⁴・若江直人⁵・尼崎貴大⁶

JUNAIDI, Shin-ichi AOKI, Shigeru KATO, Mieko KATAOKA
Naoto WAKAE and Takahiro AMASAKI

Short-term topographic changes of the Nakatajima dune, which is located on an eroded beach on the Enshu-Nada coast, have been investigated with continuous field surveys over two years period (2007-2009). Measurements of wind and wind-blown sand transport rate were also carried out several times in winter. Based on the field data, overall properties of the sediment transport on the dune are first described in the paper. Eastward migration of the dune is then indicated with relation to the topographic changes and the distribution of the sediment transport rate. Quantitative estimate of the average volume of transported sand are well predicted by some existing formulae

1. はじめに

浜松市にある中田島砂丘(図-1)は、遠州灘海岸の砂が冬期の西風によって運ばれて形成された砂丘である。現在は東西1km、南北0.6km程度の大きさを有しているが、近年、砂丘前面の砂浜の侵食(図-1中に過去の汀線位置を表示)とともに砂丘面積の減少、砂丘地盤高の低下が顕著になっている。このような砂丘環境の変化の要因としては、海岸侵食だけでなく、砂丘に隣接する公園や保安林整備などの人為的行為によって、砂丘周辺の飛砂環境に変化が生じていることも指摘されている(宇多ら, 2007; 若江ら, 2008)。本研究は、中田島砂丘で約2年間継続的に取得した風データ、定期的なGPS測量で得た地形データ、および飛砂の捕捉調査データ等を用いて、砂丘上での風による砂の輸送特性を明らかにし、飛砂特性と砂丘の短期的な地形変化との関連を論じたものである。

以下では、次の3つの項目について検討を行う。(i) 砂丘全体での飛砂特性: 砂丘上での全体的な飛砂の動きを把握するために、砂丘地形の詳細測量(3次元地形レーザー測量)を行うとともに、砂丘上多地点での風観測、飛砂の捕捉調査および飛砂の方向調査を冬期に実施した。(ii) 大規模地形の変化: 砂丘内に存在する大規模な砂山の形状変化を調べるために、砂山を横切る測線上で

断面地形を定期的に測量し、砂山の動きを捉えた。また、これを砂山上で観測した風および飛砂の特性と関連づけて議論した。(iii) 砂丘端部の拡大: 冬期風により砂丘地形に大きな変化が見られる砂丘東端部に焦点をあて、砂丘端部の形状変化から砂丘の拡大速度および輸送土砂量の概算を行った。さらにこれを、飛砂量公式を用いて風データから推算した値と比較した。

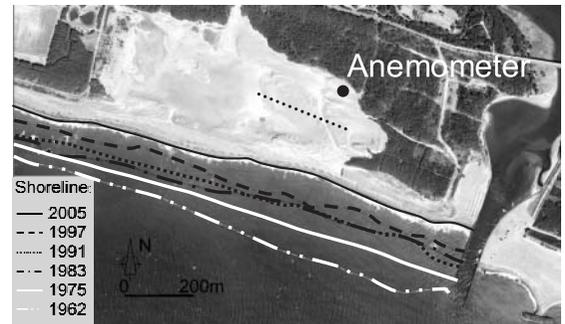


図-1 中田島砂丘

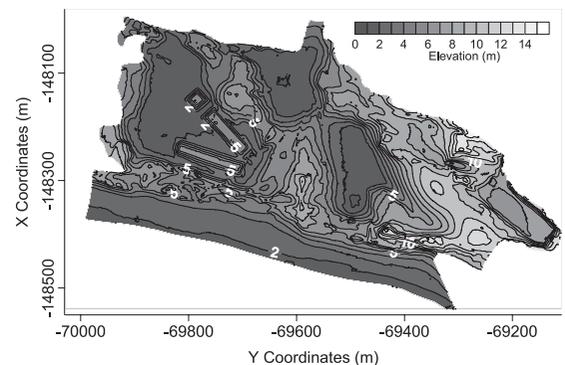


図-2 中田島砂丘の地形

- | | |
|-------|--------------------------------|
| 1 | 豊橋技術科学大学大学院環境・生命工学専攻 |
| 2 正会員 | 工博 豊橋技術科学大学教授工学部建設工学系 |
| 3 正会員 | 博(工) 豊橋技術科学大学准教授工学教育国際協力研究センター |
| 4 | 豊橋技術科学大学技術専門職員 |
| 5 | 修(工) 豊橋技術科学大学元大学院生 |
| 6 | 豊橋技術科学大学大学院建設工学専攻 |

2. 現地調査の概要

(1) 砂丘地形の調査

砂丘地形を詳細に把握するために、砂丘部分について、地上レーザー測量を2009年1月に実施した。その結果を図-2に示す。これより、現在の中田島砂丘は、中央部の大きな砂山をはさんで東西に分断されていることがわかる。また、昔に比べて地形の起伏が大きくなっており、場所によっては著しい低地化が生じている。ここ数年、低地化が進んだ西側に東側の砂を人為的に輸送する事業が実施されており、人工的な砂山（西側の長方形部分）やトレンチ（東北部）の存在など、地形が人工的に改変されていることもわかる。

(2) 風況および飛砂の調査

砂丘上での風観測は、図-1にAnemometerと記した砂丘北側の高台に、風車式風速計（コーナシステム、KDC-S04）を地上5mの位置に設置し、2007年2月より現在まで継続して実施している。データ取得間隔は10分である。図-3は、2年間の観測に基づく風配図であるが、冬期に西北西から吹く季節風が卓越していることがわかる。

飛砂の観測はサンドトラップを砂丘上に複数個設置することにより行った。サンドトラップは、Sauermannら(2003)にならい、塩ビの円筒（直径5cm、長さ80cm）に幅1cmのスリットを設け、スリットの後面に0.06mmメッシュのステンレス網を貼ったものである。これ以外にも、コーン型のトラップも適宜使用した。また、飛砂センサー（保坂ら, 2004；有働, 2007）を利用して飛砂粒子数の計測を行った。なお、飛砂の観測に合わせて複数の風杯式風速計（Davis気象観測装置）を用いて、砂面上0.3mおよび1mの風速を計測した。また、砂丘上広範囲の飛砂の動態を知るために、直径3cm程度の本杭を

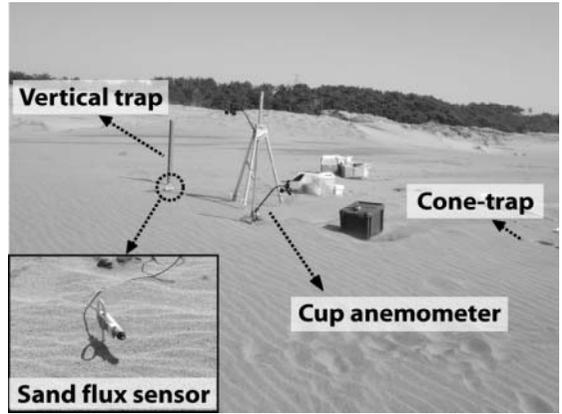


写真-1 飛砂および風速の観測

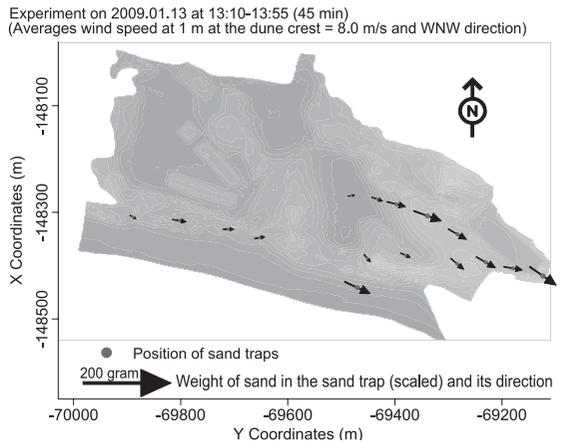


図-4 飛砂量および輸送方向の分布 (2009.1.13)

Wind Rose of Nakatajima Dune (2007-2008)

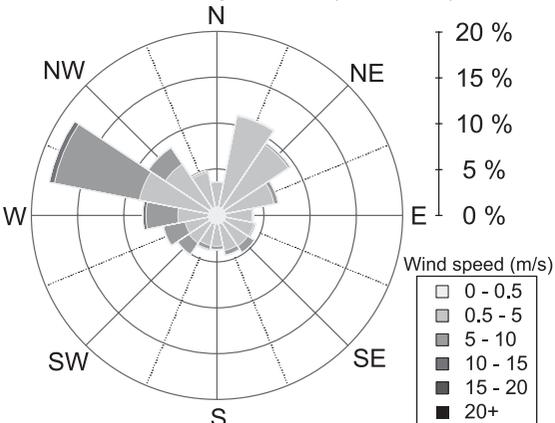


図-3 中田島砂丘上での風の特徴

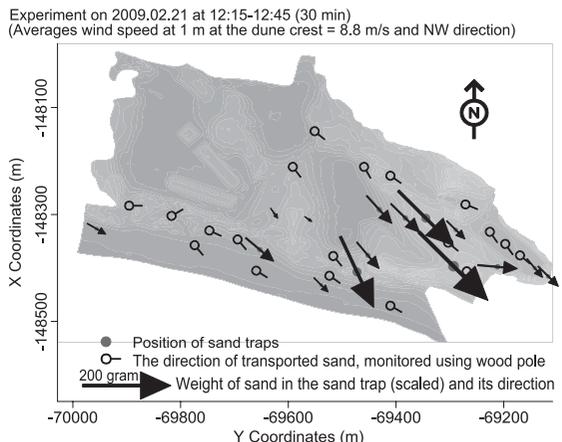


図-5 飛砂量および移動方向の分布 (2009.2.21) : 図中の矢印は飛砂の大きさと方向を、その他のシンボルは移動方向のみを示す。

砂面上に挿し、風下側に細長く形成される凸上の微地形から飛砂の方向を調べた。写真-1に観測の様子を示す。

3. 飛砂の分布特性と地形変化の関係

(1) 砂丘上の平面的な飛砂動態

図-4および図-5は、2009年1月および2月に実施した飛砂量および飛砂の移動方向の調査結果を示したものである。1月の観測時は、観測時間中の平均風速が8m/sで、西北西の風が卓越していた。また、2月の観測時は、平均風速8.8m/sで北西の風が卓越していた。図中の矢印は、サンドトラップで捕捉した砂量とトラップ背後の地形変化から飛砂量をベクトル表示したものである。また、図-5中の「○」で表したシンボルは、木杭背後の地形から類推した砂の移動方向を示している。

これらの図より、砂の移動方向は風向きと良く一致しており、北西風の卓越していた2月には、砂丘から海岸に抜ける砂の移動が生じていることがわかった。また、砂移動は標高の高い部分で大きくなっていること、砂丘の西側では、植生や堆砂垣の設置によって砂移動が小さいことなどが明らかになった。これより、中田島砂丘では、砂丘中央部から東側に堆積している砂が冬期に東に輸送され、西側からの供給がないことにより中央部での低地化が進行していることがわかる。

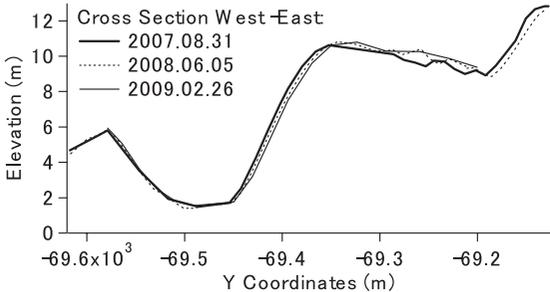


図-6 砂丘中央部東側の砂山部分の地形変化

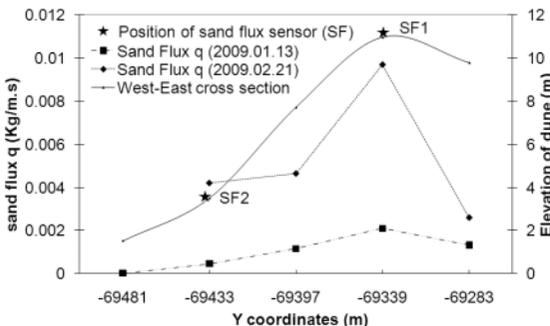


図-7 砂丘中央部東側の砂山部分で観測した飛砂量の分布

(2) 砂丘東側での飛砂と地形変化

砂丘東側での砂の動きと地形変化を詳細に見るために、図-1中に破線で示したライン上での地形変化について考察する。図-6は、2007年8月から1年半の間の断面変化を示したものであるが、低地部分はほとんど変化していないのに対して、砂山の西側の斜面は徐々に(5m/年程度)東側に移動していることがわかる。

図-7は、砂山の西側斜面でのサンドトラップから求めた飛砂量の分布を、地形と合わせて示したものである。これより、飛砂量は標高の高いところほど大きな値を示しており、図-6のような地形変化(砂山の東側への移動)が生じるのは、飛砂量の分布が地形と相似になっていることに起因していることが確認できた。また、図-7中にSF1, SF2で示した点に設置した飛砂センサー(砂表面上4cmの位置に設置、2月21日のみ)の出力値(カウント数)を図-8に風速とともに示す。図中の飛砂センサーのカウント数から求めた飛砂フラックス(例えばUdoら, 2008)の平均値は、それぞれ0.191kg/m²sおよび

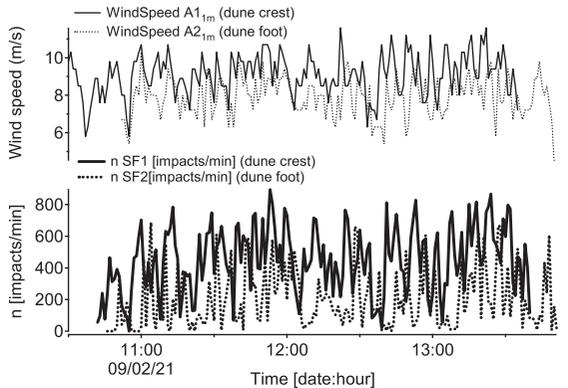


図-8 砂山の頂部と麓部での風速(砂面上1m)と飛砂センサーのカウント数の時系列

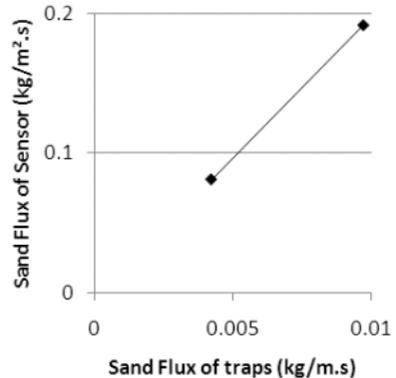


図-9 サンドトラップによる飛砂量と飛散センサーによる飛砂量の比較

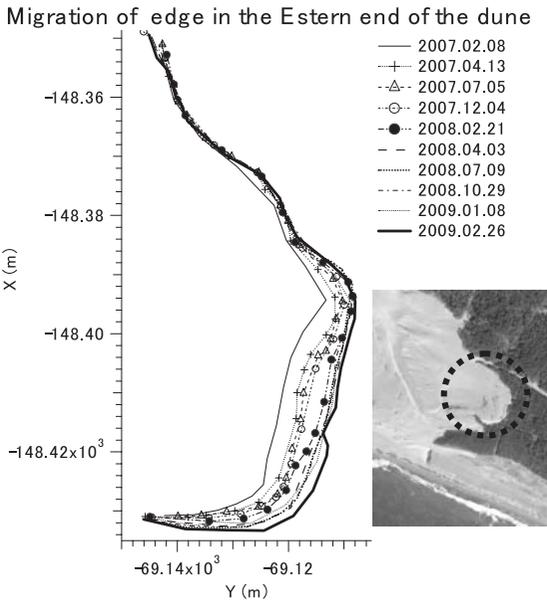


図-10 砂丘東端部の縁辺位置の経時変化

0.081kg/m²sであった。これを、図-7に示したサンドトラップによる飛砂量と比較すると図-9のようになり、両者の間に線形な関係が見られた。

4. 砂丘東端部での地形変化量と飛砂量の評価

(1) 地形変化量

以上の考察から、中田島砂丘では、砂丘中央部から東側への飛砂輸送が継続的に生じて地形が変化していることがわかった。ここでは、砂丘東端部での地形変化を詳細に調べることににより、砂丘の東側への拡大速度およびこれをもたらす飛砂の総量を推定する。

図-10は、図中の写真上に丸印で示す砂丘東端部の縁辺の位置の経時変化(2007.2 - 2009.2の2年間)を示したものである。これより、縁辺の位置は2年間でおよそ10m程度東側に移動していることがわかる。ただし、2007.2から2008.2の変化量に比べて、2008.2から2009.2の変化量が小さくなっている。これは、2007年と継続して秋に東側の砂を西側に搬送する事業(2007年は8,000m³、2008年は10,000m³)が行われており、特に2008年秋の採砂跡が巨大なトレンチ(図-3参照)となって東側への飛砂を抑制しているためであると思われる。空中写真の解析によれば、縁辺部は2005年から2007年の2年間でおよそ5m~7m東に移動していることから、砂の輸送と砂丘の拡大が続いてきたと考えられる。

図-11の最下段の図中に、2年間の砂丘東端部の砂の体積の変化量の累積値(Observed)を、降雨量および月平均風速とともに示した。土量変化については、GPS測量

により求めた地形データから計算している。これより、土量の増加は、冬期に進行し、夏期はむしろ若干減少する傾向にあることがわかる。

(2) 飛砂量式の適用

ここでは飛砂量(飛砂フラックス)の計算式として代表的なBagnold(1941)の式(1)および河村(1951)の式(2)を用いて飛砂量を算定した。

$$q = B \frac{\rho_a}{g} \sqrt{\frac{d}{D}} u_*^3 \dots\dots\dots (1)$$

$$q = K \frac{\rho_a}{g} (u_* + u_{*cr})^2 (u_* - u_{*cr}) \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 q : 飛砂量 (g/s/cm), ρ_a : 空気密度 (g/cm³), ρ_s : 砂粒子密度 (g/cm³), g : 重力加速度 (cm/s²), d : 代表粒径 (cm), D : 標準粒径 (cm), u_* : 摩擦速度 (cm/s), u_{*cr} : 限界摩擦速度 (cm/s) である。なお、対象領域の縁辺部分から採取した砂の中央粒径は0.029cmであり、ほぼ海浜の砂と同程度であったので、これを代表粒径とした。標準粒径はBagnoldによって定義された砂の粒径であり、0.025cmである。

摩擦速度 u_* は、ある高さ z で観測された風速 u_z を用いて次式で算出できる (Horikawa, and Shen, 1960)。

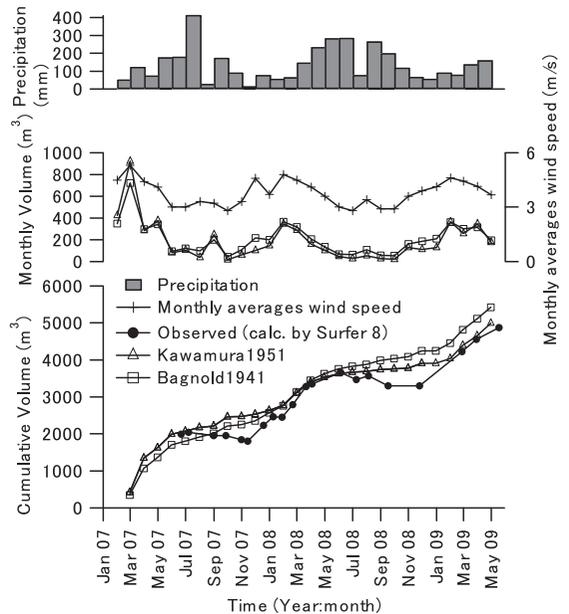


図-11 砂丘東端部の土量変化と飛砂量の計算値の比較

$$u_z = 5.75u_* \log \frac{z}{z'} + u' \dots\dots\dots(3)$$

ここで、 u_z はある高さ z における風速であり、(3) 式中の z' 、 u' は、focal point と呼ばれる点である。Zingg (1952) は、風洞実験より focal point について次のような実験式を得ている。

$$z' = 10d \dots\dots\dots(4)$$

$$u' = 89.4d \text{ (m/s)} \dots\dots\dots(5)$$

限界摩擦速度 u_{*cl} は、乾燥砂面での移動限界摩擦速度とし、次式で算出した。ただし、湿砂面上における移動限界摩擦速度は考慮していない。

$$u_{*cl} = A \sqrt{\frac{\rho_s - \rho_a}{\rho_a} gd} \dots\dots\dots(6)$$

式 (1), (2), (6) の定数は、これまでの実験や現地観測の例より、 $B=1.8$, $K=2.78$, $A=0.118$ とした。また、飛砂量算定に用いた風速は、10分間平均風速とし、砂丘東端部への飛砂の侵入幅は110mとした。

図-11には、Bagnoldおよび河村の式による推定値を実測値と比較してプロットしてある。これより、両方の予測式とも実際の土量変化を概ね再現している。観測値において夏場に土量が減少する理由については明確でないが、夏から秋にかけての風による飛砂を考慮できていないことが原因であろう。

5. おわりに

本研究では、中田島砂丘を対象に、継続的な地形モニタリングデータと飛砂調査に基づき、砂丘地形の短期的な変動の特性を土砂動態と関連づけて議論した。得られた主な知見をまとめると以下の通りである。

- (1) 中田島砂丘では、西からの砂の供給が絶たれた状態で冬期には東側への砂輸送が継続して生じており、砂丘中央部での低地化と東端部での砂丘の拡大が問題と

- なっている。
- (2) 砂丘中央部の砂山は年間5m程度東へ移動している。これは、冬期の飛砂量が標高が高いところほど大きいという分布特性と良く対応している。
- (3) 砂丘東端部では、人為的な砂の搬送の影響を受けてはいるものの、砂丘の拡大は続いている。
- (4) 飛砂量については、主要な飛砂量公式である程度予測可能であるが、夏期の土量減少に対して更なる検討が必要である。

謝辞：本研究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)の関連研究として実施した。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

宇多高明・青木伸一・三波俊郎・芹沢真澄・古池 鋼・石川仁憲 (2007)：遠州灘の馬込川河口部の地形変化と中田島砂丘の保全，海洋開発論文集，第23巻，pp.1021-1025。
 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。
 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。
 若江直人・Junaidi・清水翔一郎・片岡三枝子・青木伸一 (2008)：中田島砂丘の短期的・長期的地形変化に関する研究，海洋開発論文集，第24巻，pp.1291-1296。
 Bagnold, R.A. (1941): The physics of blown sand and desert dunes. Mineola, New York: Dover Publication, Inc., 265p.
 Horikawa, K. and H.W. Shen (1960): Sand Movement by Wind Action (On the Characteristics of Sand Traps), U.S. Army, Corps of Engineers, BEB, Technical Memo, No. 119, 51p.
 Sauermann, G., J.S. Andrade Jr., L.P. Maia, U.M.S. Costa, Araújo, and H.J. Hermann (2003): Wind velocity and sand transport on a barchan dune. Geomorphology, 54, pp. 245-255.
 Udo, K., K. Yoshiaki and D.W.T. Jackson (2008): Observation of wind-blown sand under various meteorological conditions at beach, Journal of Geophysical Research, vol. 113, F04008.
 Zingg, A.W. (1952) : Wind tunnel studies of movement of sedimentary material, Proc. 5th Hydraulics Conf., pp.111-135