

# 中田島砂丘の短期的・長期的地形変化 に関する研究

## SHORT- TERM AND LONG-TERM TOPOGRAPHIC CHANGES OF NAKATAJIMA DUNE

若江直人<sup>1</sup>・JUNAIDI<sup>2</sup>・清水翔一郎<sup>3</sup>・片岡三枝子<sup>4</sup>・青木伸一<sup>5</sup>  
Naoto Wakae, Junaidi, Syoichiro Shimizu, Mieko Kataoka, Sin-ichi Aoki

<sup>1</sup>豊橋技術科学大学大学院 建設工学専攻 (〒441-8580 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)

<sup>2</sup>工修 豊橋技術科学大学大学院 環境生命工学専攻 (〒441-8580 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)

<sup>3</sup>福井市 (〒910-8511福井市大手3丁目10番1号)

<sup>4</sup>豊橋技術科学大学技術専門職員 建設工学系 (〒441-8580 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)

<sup>5</sup>正会員 工博 豊橋技術科学大学教授 建設工学系 (〒441-8580 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)

Short-term and long-term topographic changes of Nakatajima Dune associated with beach erosion and coastal forest development were investigated based on aerial photographs and the data of wind and regular field survey. Dynamic properties of the dune development and topographic change were obtained by the field survey showing that the edge of the dune develops 6m - 8m per year although the topography of the dune keeps equilibrium. Sand transport rate was discussed by comparing topographic change with estimates by the practical formulae of wind blown sand. The formulae tend to predict smaller amount of sand transport in winter and larger amount in summer, which may be due to rainfall and vegetation.

**Key Words :** Nakatajima dune, topographic change, wind blown sand, sand management

### 1. 緒言

近年, 我が国では海岸侵食が進行し, 国土保全および沿岸防災の面で非常に大きな問題となっているだけでなく, 沿岸環境の慢性的な劣化を招いている。なかでも, 豊富な土砂を有する海岸砂丘は海岸の貴重な環境財の1つであるとともに, 背後地の防護機能を提供しているが, 近年の海岸侵食の進行とともに砂丘の規模は減少傾向にある。砂浜の長期的な侵食は, 沿岸漂砂の不均衡や河川からの土砂供給量の減少に起因していることが多いが, 砂丘減少の原因には, 隣接する砂浜海岸の侵食による供給砂量の減少以外にも, 保安林の整備や陸上の開発行為などによる風環境の変化なども考えられるため, さらに多面的な検討が必要である。

静岡県にある中田島砂丘は, 後背地を津波や高潮等の災害から守っているだけでなく, ウミガメの貴重な産卵場所にもなっている。近年, 砂丘前面の砂浜の侵食とともに砂丘面積および砂量の減少が顕著になっているが, 公園や保安林整備など, 海岸付近への人為的な行為によって砂丘への飛砂輸送量に変化が生じていることも指摘されている<sup>1)</sup>。本研究では, 過去の空中写真, 中田島砂丘で約1年間継続的に実施した風観測データ, および定期的に行ったGPS地形測量データ等を用いて, 砂丘地形の短期

的・長期的変化の特性を明らかにするとともに, 砂丘における土砂動態の概略を把握して, 土砂管理に資することを目的として行ったものである。

### 2. 対象地域の概要

#### (1) 中田島砂丘

本研究の調査対象である中田島砂丘(図-1)は天竜川の西に位置し, 浜松市内を流れる馬込川に隣接する砂丘である。東西約4km, 南北約0.6kmの規模を有し, 鳥取砂丘と九十九里浜と共に日本三大砂丘の一つに数えられている。砂丘の南側には遠州灘と長大な砂浜海岸が広がっており, 海岸線がやや西向きとなっていることから, 砂丘は冬の風によって砂浜から吹き上げられた飛砂が堆積して形成されたと考えられる。しかしながら, 河道におけるダム建設や砂利採取のために天竜川からの土砂供給が激減したことや, 海岸侵食対策のための離岸堤や馬込川の導流堤の建設の影響などにより, 沿岸漂砂の不均衡が生じ, ここ数十年の間に砂丘前面の砂浜が大きく侵食された。これに呼応するように, 砂丘上でも砂が減少して砂丘の低地化が進行し, 背後住民にとっては津波や高潮に対する防災上大きな問題となっている。これに対応するために, 浜松市は砂丘東側の

防砂林に侵入して堆積している砂を、砂丘西側の特に侵食の激しい場所へ運び、砂の流出を防ぐ為に堆砂垣を設置する「堆砂移動工事」を2006年から実施している。これらの応急対策は機能しているが、より有効な砂丘保全対策とするためには、土砂移動特性の把握と量的な検討が必要である。

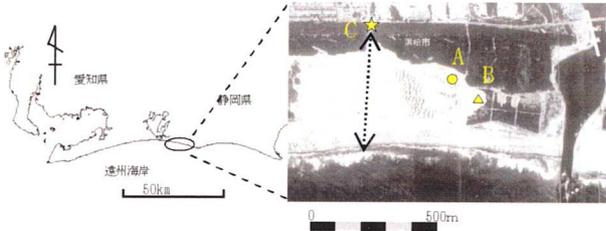


図-1 中田島砂丘

## (2) 風特性

2007年2月から2008年3月までの期間、図-1に示すA点の地上5mの位置で連続観測したデータをもとに、砂丘上の風況を図-2にまとめた。これらより、1～3月は、西北西からの強い風が支配的であり、全体の約30%を占めていることがわかる。4～6月においても、若干ではあるが西北西からの風の発生頻度が多いが、7～9月は、西南西および北東の風が多くなっている。10～12月には西北西および北東の風が支配的である。また、各季節の風向別平均風速を見ると、全体として西寄りの風が強い傾向にあることがわかり、砂丘上では飛砂によって東向きに砂が輸送されることと対応している。

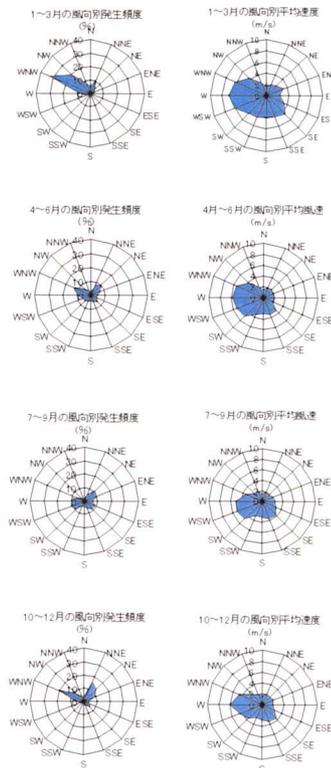


図-2 各季節の風向別発生頻度と平均風速

以下に論じる短期的地形変化については、図-1に示すB地点付近の地形変化に焦点を当てるため、B地点とA地点の風特性の比較を行っておく必要がある。図-3は、比較のために2008年3月に実施した1日の風観測結果であるが、両者(A,B両地点とも砂丘上5mの風速)の対応はよく、A地点での風速を代表風速として用いても差し支えないことがわかる。

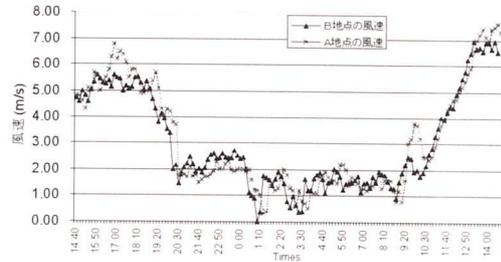


図-3 A地点とB地点の平均風速の比較

## 3. 長期的地形変化

ここでは、過去の空中写真を比較することにより、砂丘地形の長期的な変化を概観する。空中写真は、1962年、1975年、1983年、1991年、1997年、2005年に国土地理院によって撮影されたものを用いた(図-4)。これらの写真を、地図上に重ね合わせて表示し、中田島砂丘の入り口から汀線までの距離を計測したところ、図-5のような結果を得た。砂丘の入り口は、図-1のC点とし、図中の矢印破線が入り口から汀線までの距離を表している。年代が進むにつれて同程度の割合で距離が短くなっており、2005年と1962年を比べてみると、約200m(約5m/年)の後退があることがわかる。これらは主として海側からの砂浜の侵食に起因するものであるが、海岸から砂丘への供給土砂が減少し、砂丘の砂量の減少につながったと考えられる。

一方、砂丘内部に目をやると、1962年および1975年の写真には様々なスケールのサンドウェーブが砂丘上および砂浜に見られ、砂量が多く活発に砂が動いている様子が見える。これに対して、砂丘西側の保安林整備が進んだ1983年以降の写真には明確なサンドウェーブは見られず、海岸からの土砂供給および砂丘上の土砂輸送量が減少していることが推定できる。また、砂丘の東側に注目すると、1991年には馬込川右岸に保安林が整備されているが、1997年から2005年にかけて次第に砂丘が保安林を侵食していることがわかる(図-6)。1991年から1997年の間に約5m、1997年から2005年の間では15m東へ境界が移動しており、近年砂丘が低地化していることから判断すれば、この東側への土砂輸送と海岸からの供給土砂がバランスしていないことが中田島砂丘の本質的な問題であると言えよう。以下では、この東端部の地形変化に着目し、土砂輸送量の算定を行った。

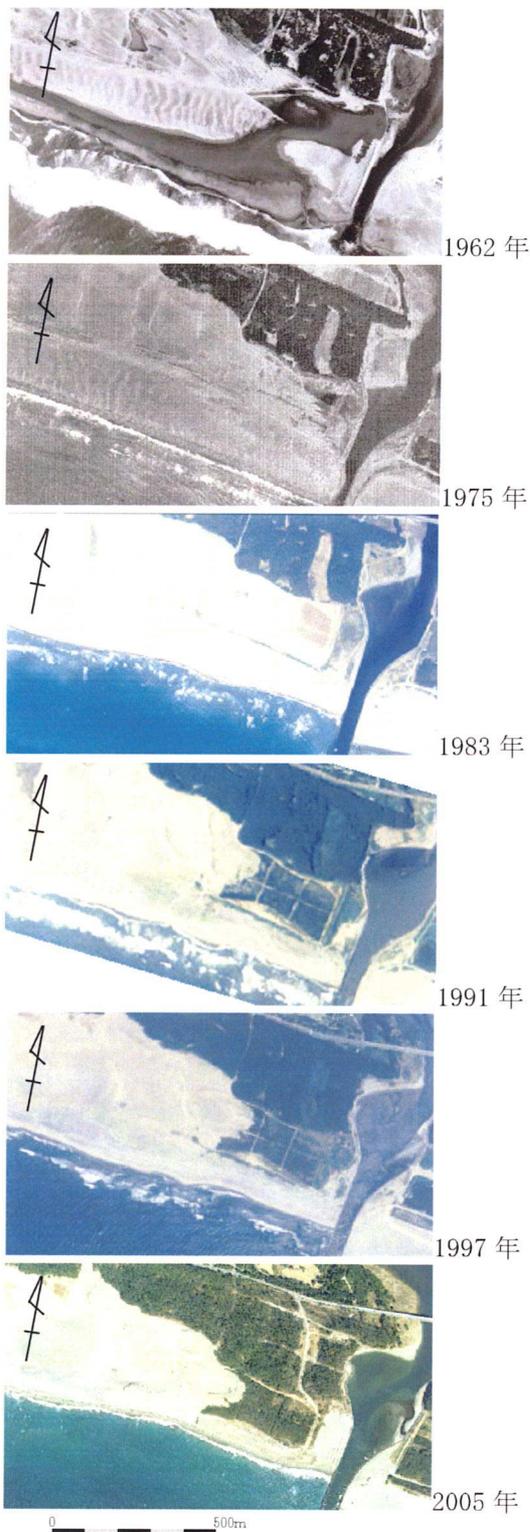


図-4 中田島空中写真(1962-2005年)

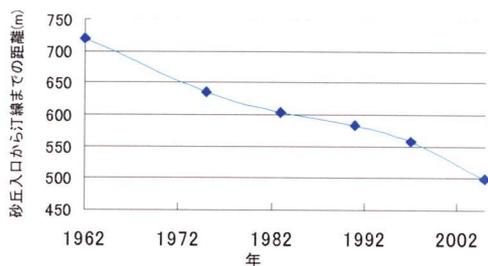


図-5 砂丘入口から汀線までの距離の変化

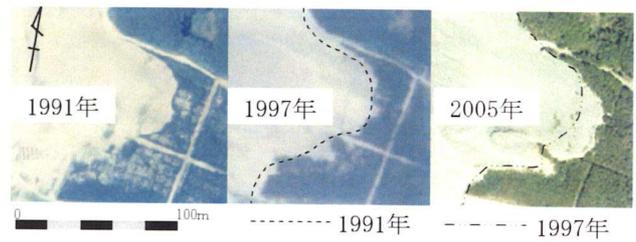


図-6 砂丘と保安林の境界の変化(1991, 1997, 2005年)

#### 4. 短期的地形変化

砂丘東側端部の地形変化をより詳細に把握するために、図-6に示した領域を対象に、RTK-GPSにより定期的な地形測量を行った。測量は2007年2月から2008年の2月までの1年間、計17回である。測点は砂丘東側端部に沿って約1m間隔で測量した。

##### (1) 測量結果

図-7には、2007年2, 4, 8, 12月, 2008年1, 2月の年間を通しての測量結果を示している。図中のマーカー付きの曲線は、砂丘縁辺の境界線を表している。これより、北側と南側の境界は年間を通してほとんど変化しておらず、東側(南東部)の境界が徐々に移動していることがわかる。その変化量は、2007年2月から4月で約4m, 4月から8月にかけては約1m, 8月から12月にかけては約0.5m, 12月から2008年2月にかけては約2.5mであり、1年間で約8m移動していることがわかった。図-2に示したように、中田島砂丘では冬期に西北西からの風が支配的であることから、冬期の風による飛砂によって砂丘が保安林を侵食していることが測量結果から確認できた。また、GIS上で2005年2月の空中写真と測量結果を比較すると、2005年2月から2007年2月までの2年間では境界が約12m移動しており、近年は、年間約6m～8m程度の移動が発生していることが明らかになった。

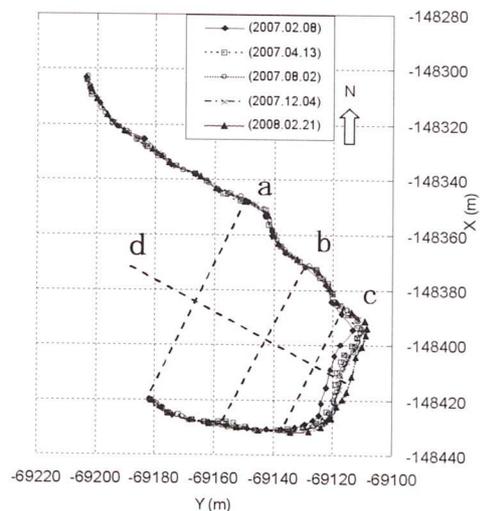


図-7 東側縁辺部の測量結果

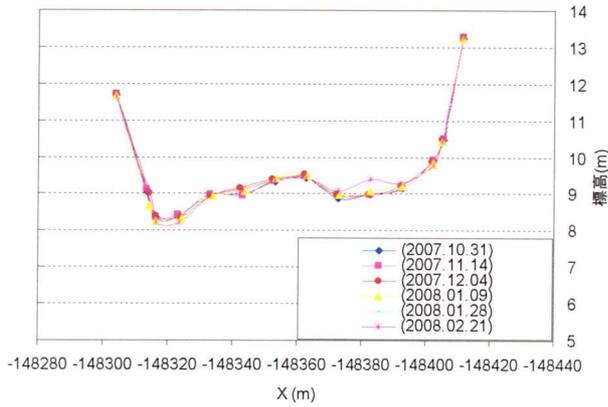


図-8 a 断面の地形変化

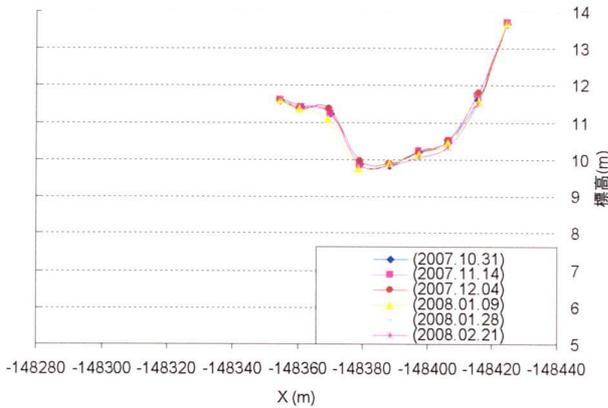


図-9 b 断面の地形変化

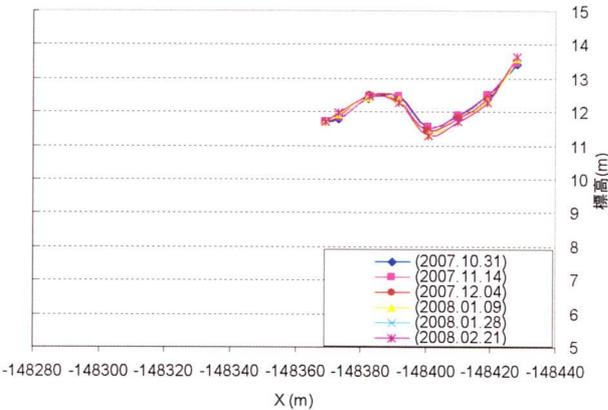


図-10 c 断面の地形変化

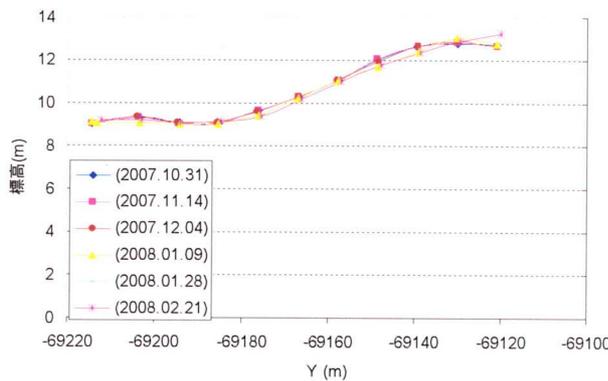


図-11 d 断面の地形変化

次に、対象領域内に設定した4つの測線（図-7中に a-d の点線で示してある）での断面測量結果を比較する。図-8～図-11 は、飛砂量が大きくなる10月から2月までの冬期の地形変化を断面ごとに比較して示したものである。東側縁辺の境界線はこの間に3m程度移動しているにもかかわらず、対象領域内の地形の変化は小さく、断面の土砂量はあまり変化していないことがわかる。すなわち、対象領域内の砂丘地形はほぼ平衡状態になっており、見かけ上は西側から輸送されてきた砂は、領域内にほとんどストックされることなく東側の保安林部分に輸送されて、砂丘領域が飛砂量分だけ拡大している状況にあるとみなすことができる。

## (2) 飛砂量の推定

地形変化を砂量として定量的に捉えるため、地形データ解析ソフト（Surfer8）を用いて測量結果から土量変化を求め、既存の飛砂量算定式により実測した風データから推定した結果と比較した。

### a) 土砂量解析

図-12は、2008年2月21日の測量結果を3次元マップに表現したものである。図中の点線は2007年2月9日の縁辺境界を示している。対象領域内の土砂量変化を計算すると、2007年2月から2008年2月までの1年間に約2800m<sup>3</sup>の土量変化があることがわかった。

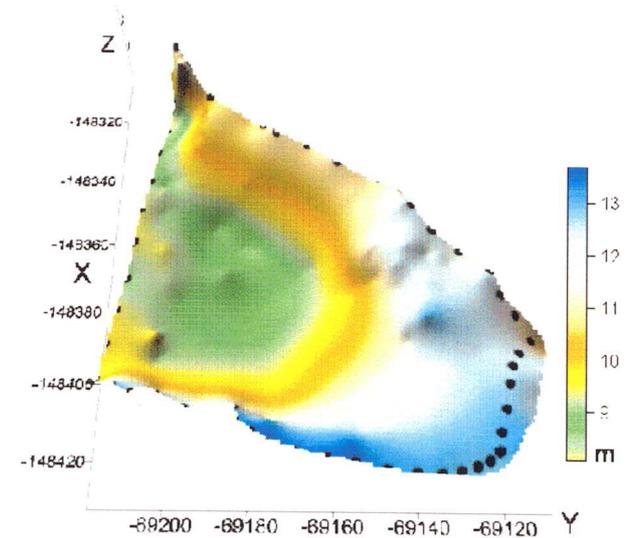


図-12 対象領域の3次元地形図

### b) 飛砂量算定式による解析

既往の研究によれば、乾燥した砂面上における飛砂量は工学的に十分な精度で推定することができる。本研究では飛砂量（飛砂フラックス）の計算式として代表的なBagnold(式(1)), Kawamura(式(1)), およびHsu(式(1))の3つの式を用いて飛砂量を算定した。

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

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

$$q = k \left( \frac{u_*}{\sqrt{gD}} \right)^3 \quad (3)$$

ここに、 $q$  : 飛砂量 (g/s/cm),  $\rho_a$  : 空気密度 (g/cm<sup>3</sup>),  $\rho_s$  : 砂粒子密度 (g/cm<sup>3</sup>),  $g$  : 重力加速度 (cm/s<sup>2</sup>),  $d$  : 代表粒径 (cm),  $D$  : 標準粒径 (cm),  $u_*$  : 摩擦速度 (cm/s),  $u_{*ct}$  : 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。

$$u_z = 5.75 u_* \log \frac{z}{z'} + u' \quad (4)$$

ここで、 $u_z$  はある高さ  $z$  における風速であり、(4) 式中の  $z'$ ,  $u'$  は、focal point と呼ばれる点である。Zingg<sup>4)</sup> は風洞実験より focal point について次のような実験式を得ており、これらの式は工学的に十分有効であることが確認されていることより、本研究でも用いることとした。

$$z' = 10d \quad (5)$$

$$u' = 8.94d \quad (6)$$

限界摩擦速度 ( $u_{*ct}$ ) は、乾燥砂面での移動限界摩擦速度とし、次式で算出した。湿砂面上における移動限界摩擦速度は考慮しておらず、データ不足の点から降雨による影響は考えないものとした。

$$u_{*ct} = A \sqrt{\frac{\rho_s - \rho_a}{\rho_a} gd} \quad (7)$$

ここで、式(1), (2), (3), (7)の定数  $B$ ,  $K$ ,  $k$ ,  $A$  は、過去の実験や現地観測の例<sup>5)</sup>より、1.8, 2.78, 0.000273, 0.118 とした。

飛砂量算定に用いた風速は、砂面上より 5m の位置での 1 時間平均風速を使用し、図-12 の西端を通過する飛砂量を算出しており、西端の幅は 110m で

ある。

これら 3 つの異なる算定式より導かれた結果を比較する形で、図-13 および図-14 にプロットした。図-13 は 2007 年 2 月から 2008 年 3 月までの各月別の飛砂量を、図-14 は 2007 年 2 月からの累積飛砂量を示している。図-13 より、Kawamura 式は飛砂量の小さな条件で他の 2 式より小さいことがわかる。これは、(4) 式より  $u_*$  は風速と比例関係にあるため、風速が小さく、 $u_*$  が  $u_{*ct}$  を下回る頻度が多く発生した月ほど他の 2 式に比べて小さい値が算出されたためである。図-14 には、2007 年 7 月から 2008 年 3 月までの地形測量の結果から推定した 2008 年 2 月からの土砂変化量をシンボル (◆) で示してある。累積飛砂量と地形変化量を比べて見ると、両者の変動はほぼ一致している。夏場は飛砂の移動量が少なく、風速が平均的に大きくなる冬場にさしかかる 11 月を境に飛砂量が上昇している。しかし、測量結果では夏場はほとんど地形変化がないのに対して、飛砂量式では夏場にもある程度の飛砂量が予測されている点に違いが見られる。これは、降雨や植生の影響で夏場の砂移動が抑制されているためではないかと推測される。

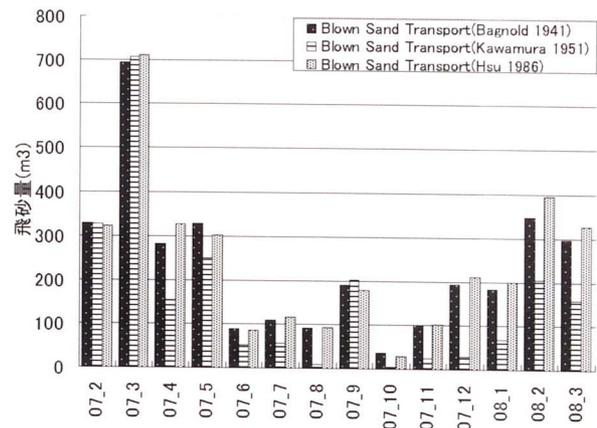


図-13 各月毎の飛砂量(2007. 2-2008. 3)

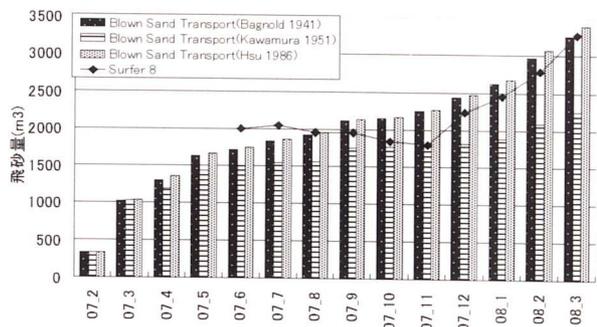


図-14 各月毎の累積飛砂量(2007. 2-2008. 3)

## 5. 結語

本研究により得られた知見をまとめると、以下の通りである。

(1) 中田島砂丘では、ここ数十年の間に前面海岸の

侵食により海浜から砂丘への砂供給が減少し、冬期季節風により砂丘の西から東へ輸送される砂によって、砂丘西部と中央部では土砂量の減少が、砂丘東部では保安林の侵食が発生している。

- (2) 東側の砂丘の成長速度は、現在では年間6m～8m程度であり、輸送される土砂は、夏場に降雨や植生の影響で少なく、冬場に上昇する傾向にあり、量としては年間約3000m<sup>3</sup>程度と推定される。また東側の砂丘地形はほぼ平衡状態にある。
- (3) 飛砂量公式による推定土量は、測量結果から求めた地形変化量を概ね説明しているが、夏期の飛砂量を過大評価している傾向が見られた。またKawamura((2)式)の式は他の2式よりも小さい値となった。

以上の結果より、砂丘上の土砂管理法としては、西側および中央部での飛砂防止に加えて、平衡状態にある東側砂丘上でトレンチ等による貯砂、運搬が有効であることが示唆された。今後は、浜松市が実施している土砂輸送の追跡調査を行い、砂丘上の効率的な土砂管理法を提示することを目指したい。

謝辞：本研究を実施するにあたり、特に地形測量に関しては、豊橋技術科学大学建設工学系海岸工学研究室の皆さんにご協力頂いた。また、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，豊橋技術科学大学）に関連して行った研究であることを記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 宇多高明・青木伸一・三波俊郎・芹沢真澄・古池鋼・石川仁憲：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.1021-1025，2007.
- 2) Gomes N, Domingos J, Jardim N, and Santos R, 2002. *Wind Distribution Over Beach/Dune Surface: Improvement Aeolian Sand Transport Estimation*. Journal of Coastal Research, Special Issue 36:317-324.
- 3) Huang JD, Jackson DWT, Cooper JAG, 2002. *Morphological Monitoring of a High Energy Beach System Using GPS and Total Station Techniques Runkerry, Co.Antrim, Northern Ireland*. Journal of Coastal Research, Special Issue 36:390-398.
- 4) A.W.Zingg : *Wind tunnel studies of movement of sedimentary material*, Proc. 5<sup>th</sup> Hydraulics Conf., pp.111-135 (1952)
- 5) U.S Army Corps of Engineer (USACE) 2002. *Coastal Engineering Manual*. Engineering Manual 1110-2-1100;U.S.Army Corps Engineers, Washington D.C.(in Part III).