波崎海岸の飛砂に関する現地調査

柳嶋 慎一¹

¹正会員 国立研究開発法人港湾空港技術研究所 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)
yanagishima@pari.go.jp

波崎海岸における、1982年から2014年までの地形および底質粒径の現地調査結果をもとに、飛砂の実態、海岸の土砂収支におよぼす飛砂の寄与、実測飛砂量と飛砂量公式による計算結果との検討を行った。その結果、波崎海岸における飛砂量は、2006年10月に異常波浪が来襲した後で、 $10\text{m}^3/\text{m}/\text{年}$ から $16\text{m}^3/\text{m}/\text{年}$ に増大し、海岸の土砂収支を考える上で、無視出来ない量であった。飛砂量が増大したのは、前浜における飛砂発生範囲の拡大とバームが侵食され難くなった事が原因と考えられる。波崎海岸における飛砂量は、観測栈橋先端で1時間毎に観測された平均風速を1/2にし、前浜での風速に補正することにより、Bagnoldの飛砂量公式で評価可能であることが明らかとなった。

Key Words : *sediment budget, aeolian sand transport, beach profile change, backshore, foredune, field measurement*

1. はじめに

海岸の土砂管理を行うために、広域土砂収支図の作成が望まれている¹⁾。広域土砂収支図においては、沿岸方向および岸沖方向の土砂移動量を算定する必要があるけれど、現状において、その量を全て正しく評価出来る段階には達していない。

栗山は²⁾、鹿島灘海岸の土砂収支図の作成を試みており、岸沖方向の土砂移動量の一つである飛砂量は、使用する風データによって、数百倍の違いが生じることを指摘している。

本研究では、茨城県波崎海岸にある波崎海洋研究施設周辺における飛砂の実態を現地調査により明らかにし、波崎海岸における土砂収支に占める飛砂の寄与を検討するとともに、飛砂量公式を用い飛砂量を計算し、実測値と比較することを目的とした。

2. 調査方法

調査は、図-1に示す、茨城県神栖市の鹿島灘に面する波崎海洋研究施設(以後、HORSと呼ぶ)周辺海岸で実施した。HORSでは、平均汀線付近にある観測栈橋基部を原点とし、岸沖方向をy軸(沖方向を+)、沿岸方向をx軸(銚子方向を+)とするHORS固有の座標系を使用している(図-2参照)。また、高さの基準は、波崎港工事基準面(D.L.0m=T.P.-0.687m)を使用している。

HORS周辺の平面地形は、観測栈橋を中心に沿岸方向

図-1 調査位置図

400m、砂丘の付け根から干潮時汀線までの約150mの範囲を、沿岸方向40m、岸沖方向5m間隔で、レベル・スタッフを用い干潮時に測量した。砂丘背後の地形を調べるために、陸側方向に測線を延長し、GPS測量器による測量を追加した(3回)。また、2006年11月、2011年5月に実施の航空レーザー計測データも使用した。

砂浜表面底質は、地形測量と同一な沿岸方向測線で、岸沖方向間隔を10mとして、砂浜表面から深さ3cmまでの砂を、地形測量実施日に直接採取した。前浜(13地点)、後浜(3地点)および砂丘背後(8地点)の地点において、深さ1m～2mまで掘削し、地表面から5cm間隔でコアサンプルを、2011年～2013年に採取した。

粒度分析は、試料を水洗い乾燥後、自動砂フルイ装置(ロボットシフターRPS-205)によって行った。分析の際のサンプル量は、約12gである。

風向・風速は、観測栈橋先端の DL+10m の位置に取り付けた、風車型風向風速計により、1 時間毎に正時の平均値を収録した。

3. 飛砂による地形変化の実態

(1) 地形変化

図-2は、観測栈橋が建設される4年前の1982年から2014年までの32年間の地盤高変化の空間分布を示している。飛砂による砂の堆積は、沿岸方向距離 $x=-200\text{m}$ ～ 40m の砂丘海側と、 $x=-80\text{m}$ ～ 120m の砂丘陸側の範囲で顕著で、堆積厚は砂丘の海側地点で最大 5m に達する。堆積位置が砂丘海側と陸側とでずれているのは、図中に青矢印で示す波崎海岸の卓越風向 (NNE) ²⁾ のためである。

図-3は、飛砂による砂の堆積が最大な測線 $x=-40\text{m}$ の断面地形変化を示している。地形変化は、岸沖方向距離 $y=-55\text{m}$ を境界に、海側は主として波により、陸側は主として飛砂によって生ずることが分かっている³⁾。飛砂による砂丘から $y=-55\text{m}$ までの堆積は、1982年から2006年までに進み、それ以降は少ない。一方、砂丘背後の堆積は、2006年以前に少なく、2006年以降に急増している。2006年以降、砂丘背後の堆積が急増したのは、砂丘海側の砂の堆積が2006年頃に飽和状態に達したためと考えられる。

図-4は、測線 $x=-200\text{m}$ の断面地形変化を示している。この測線は、小河川 ($x=-250\text{m}$ 付近に存在する) の銚子側に位置し、飛砂による砂の堆積が最も少ない。飛砂による堆積が少ないのは、小河川の存在により、濡筋の部分の地盤高が低くなっているとともに、河川水によって付近の砂が湿潤状態になっているため、飛砂の発生が抑制されるためと考えられる。同様に、観測栈橋および砂丘付近にある建物によって飛砂が抑制されたと考えられる測線 $x=40\text{m}$ ～ 200m の範囲の飛砂による堆積も少なかった。

(2) 土量変化

図-5は、1982年を基準とし、調査範囲の土量変化を区域毎 (図-3の色付矢印) に示している。赤線で示す砂丘海側の飛砂による堆積は、調査範囲全域で2006年までに進み、それ以降は少ない。緑線で示す砂丘背後の飛砂は、2006以降急増している。青線で示す波による前浜の堆積は、2006年以降急激に増大し、堆積したままの状態が継続している。

4. 飛砂の粒径変化

(1) 2006年以前

栗山ら⁴⁾の調査によれば、1997年～1999年の後浜の砂の粒径は、ほぼ 0.16mm であった。前浜から後浜へ運ばれる砂の粒径を確認するため、コアサンプルデータを

図-2 地盤高変化量の空間分布(1982年～2014年の変化)

図-3 飛砂による断面地形変化の代表例($x=-40\text{m}$)

図-4 飛砂の最も少ない断面地形変化例($x=-200\text{m}$)

図-5 調査範囲全域の土量変化

検討する。

図-6は、波が遡上することの無い、後浜コアサンプル採取地点の地盤高の変化とコアサンプルの採取範囲

を示している。地盤高は、1987年から2007年にかけて、ゆっくり高くなるものの、2011年の東日本大震災の際の津波遡上によって侵食され、地盤高は0.4mほど低下した。

採取したコアサンプルは、図中に緑線で示す、2つの期間（1987～1995年、2001～2003年）に、ゆっくりと形成されたことが分かる。

図-7は、後浜コアサンプルの中央粒径、ふるい分け係数、偏わい度の鉛直分布を示している。中央粒径は、表面を除き、ほぼ0.16mmであり、ふるい分け係数、偏わい度とも鉛直的な変化は少ない。つまり、2006年以前に後浜においては、前浜の砂⁹⁾(0.18mm)よりもやや細かな粒径の砂が、継続して堆積したことが分かる。

(2) 2006年以降

HORS周辺の前浜の砂は、2006年の波崎海岸への異常波浪の来襲以降、粗粒化した⁹⁾。

図-8は、台風1012号が通過した直後の前浜および後浜の表面砂の粒径の空間分布を示している。台風通過時の最大風速は24.7m/sであったため、砂丘付近まで粗い砂が(0.73mm、赤矢印)運ばれている。一方、この時には、図中に緑破線で示す範囲は、長周期波の遡上により侵食されるとともに粒径は細くなり、0.2mm以下の砂が表れている。この原因は、長周期波によって細かな砂が、海側から波の遡上端に運ばれたためである⁹⁾。

図-9は、前浜コアサンプル採取地点の地盤高の変化とコアサンプルの採取範囲を示している。地盤高は、波による季節的変動とともに長期的なトレンドが表れている。そして、前浜は、2006年の異常波浪によって大きく侵食されるけれど、それ以降急激に堆積し、その堆積が継続している。コアサンプルは、図中に緑線で示す、2006年以降の4つの期間（2007年、2008年、2009年、2010年）に、砂の急激な堆積で、形成されたことが分かる。

図-10は、前浜コアサンプルの中央粒径、ふるい分け係数、偏わい度の鉛直分布を示している。中央粒径は、全深さで0.2mmよりも粗く、最大は0.8mmに近く、ふるい分け係数、偏わい度とも鉛直的な変化が大きい。この地点に限らず、前浜コアサンプルの中央粒径は粗かったことから、2006年以降に波によって形成されたバームは、全体的に粗い砂で構成されていると判断される。

図-11は、砂丘背後コアサンプルの中央粒径、ふるい分け係数、偏わい度の鉛直分布を示している。深さが1.7mよりも深い範囲の中央粒径は0.18mmであるけれど、それよりも浅くなると徐々に粒径は粗くなり、表面付近で0.4mmを越えるものの、0.5mmを越えることはない。ふるい分け係数、偏わい度とも鉛直的な変化は小さい。

次に、前浜と砂丘背後のコアサンプルデータの粒度分析結果をもとに、小粒径(0.075～0.212mm)、中粒径(0.212～0.5mm)、大粒径(0.5mm以上)に分け、粒径別構成

図-6 後浜コアサンプル採取地点の地盤高変化とサンプル採取範囲($x=0\text{m}$, $y=-80\text{m}$)

図-7 後浜コアサンプル分析結果($x=0\text{m}$, $y=-80\text{m}$)

図-8 表面砂の中央粒径の空間分布(強風後、2010年9月30日採取、○印、●印は、表面砂およびコアサンプル採取位置)

図-9 前浜コアサンプル採取地点の地盤高変化とコアサンプル採取範囲($x=-160\text{m}$, $y=-40\text{m}$)

図-10 前浜コアサンプル分析結果($x=-160\text{m}$, $y=-40\text{m}$)

図-11 砂丘背後のコアサンプル分析結果
($x=91\text{m}$, $y=-168\text{m}$)

図-12 粒度別構成割合の変化

割合を計算し、その結果を図-12に示す。

飛砂の発生源となる前浜の構成割合は、中粒径が最も多く次いで大粒径、小粒径の順である。一方、飛砂が堆積した砂丘背後の構成割合は、小粒径が最も多く、次いで中粒径であり、大粒径は5%程度である。つまり、25m/s程度の強風が吹いた場合、中粒径の砂は、砂丘背後まで運ばれるけれど、大粒径の砂は砂丘付け根付近までは運ばれるものの、砂丘を越えて運ばれることは無いことが分かる。

風下ほど砂の粒径が細くなるのは、堀川ら⁷⁾が風洞実験において確認した、風による砂表面のふるい分け作用を示すものと考えられる。そして、比較的細かな砂が砂丘背後へ運ばれ続けるのは、年に数回程度生じる長周期波の浜への部分的な遡上の際に、細かな砂が海側から前浜へ供給されるためと考えられる。

5. 飛砂量の変化

飛砂量は、波崎海岸の卓越風向を考慮し、砂丘海側と、砂丘背後のブロックをずらして検討する事にした。

図-13は、飛砂による堆積が最小の砂丘海側の11ブロック（図-2参照）と砂丘背後の22ブロックの土量変化をもとに計算した飛砂量を示している。1982年から2006年までの飛砂量は、 $4\text{m}^3/\text{m}/\text{年}$ であるけれど、2006年以降の飛砂量は、 $7\text{m}^3/\text{m}/\text{年}$ に増えている。

図-14は、飛砂による堆積が最大の砂丘海側の14ブロックと砂丘背後の25ブロックの飛砂量を示している。

飛砂量は、1982年から2006年まで、 $10\text{m}^3/\text{m}/\text{年}$ であり、栗山ら⁴⁾が波崎海岸における現地調査から得た $6\text{m}^3/\text{m}/\text{年}$

図-13 飛砂量の変化(11+22ブロック)

図-14 飛砂量の変化(14+25ブロック)

よりもやや多い。栗山らは、図-13と図-14に示したブロックの間に位置する、測線 $x=-120\text{m}$ 付近で調査を行っており、 $10\text{m}^3/\text{m}/\text{年}$ の飛砂量は妥当な値と判断される。

飛砂量は、2006年以降 $10\text{m}^3/\text{m}/\text{年}$ から $16\text{m}^3/\text{m}/\text{年}$ に増大している。2013年に撮影した波崎海岸の航空写真から、飛砂が明確に生じている範囲を確認すると、鹿島港南護岸から南へ9kmの間であり、この範囲の総飛砂量は、 $144,000\text{m}^3/\text{年}$ と見積もられる。砂丘背後に運ばれた飛砂は、海に再び戻ることは無いので、年間 $144,000\text{m}^3$ の飛砂は、波崎海岸の土砂収支を考える上で無視できない量である。なお、今回得られた飛砂量は、阿字ヶ浦海岸における外崎らの値($25\text{m}^3/\text{m}/\text{年}$)⁸⁾、新潟海岸における佐藤らの値($30\text{m}^3/\text{m}/\text{年}$)⁹⁾と比較すると、少ない。

6. 飛砂量増大要因の検討

(1) 風外力

飛砂量が2006年以降急増している原因を検討するため、まず飛砂の外力である風について調べる。

一般的に飛砂量は、風速の3乗に比例するので、観測桟橋先端で1時間毎に観測されたデータのうち、海側から陸に向かって吹く風（海風）で、かつ平均風速 10m/s 以上のデータを検討の対象とした。なお、HORSにおける観測を実施する前の1982年～1986年の風データおよび観測開始後、何らかの原因でデータが欠測になった場合、栗山ら⁴⁾にならって、銚子気象台の風向・風速データからHORSにおける風向・風速を推定し、用いた。

図-15は、1982年～2013年までの海風の風速別発生頻度の経年変化を示している。ここで、1982年～1985年までの値が小さい原因は、不明である。風速20m/s以上のデータは、2006年以前よりも2006年以降の方が増加していると判断できるが、風速10m/s以上、15m/s以上のデータとも、2006年を境とした明確な違いは見いだせない。

(2) 飛砂発生範囲の違い

次に、飛砂は、前浜で発生するので、2006年前後の前浜地形の違いを調べた。

図-16は、図-5の青線で示す前浜土量変化に、地形測量結果から得た $y=30\text{m} \sim -50\text{m}$ の範囲の土量変化を●印で示したものである。2006年以前の土量は、1998年～2002年を除き荒天時に減少し、静穏時に増大する季節的な変化を繰り返している。一方、2006年以降、2010年までの間に急激な土量の増加があり、その後堆積した状態が継続している。そこで、前浜断面地形の詳細を検討する。

図-17は、1987年～2006年までの $y=-115\text{m}$ よりも海側の断面地形の重ね合わせを示している。図中の赤丸は満潮位を、青丸は前浜の勾配が急になる（植生が始まる）位置を示しており、飛砂は両者の間で発生する。2006年までの間の平均飛砂発生範囲は、53.7mである。なお、台風等でバームが侵食されるため、飛砂が発生し易い、秋冬期の飛砂発生範囲は、更に狭くなる。一方、2007年以降（図-18）の平均飛砂発生範囲は、バーム頂が2006年以前よりも高くなるとともに、年間を通じバームが維持される事が多いため⁹⁾、約35m広い87.8mになっている。

飛砂量が2007年以降増大した要因は、バーム頂が高くなるとともに侵食され難くなり、飛砂発生範囲が拡大したためと考えられる。

7. 飛砂量公式による飛砂量の検討

現地調査によって得られた波崎海岸の飛砂量を、飛砂量公式を用い確認する。飛砂量公式は、砂の粒径を考慮可能な(1)式に示す Bagnold 式を用い、風速の鉛直分布が対数則を満足すると仮定すると、摩擦速度は(2)式から求められる¹⁰⁾。

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

$$u_z = 5.75 u_* \log \frac{z}{z'} + u' \quad (2)$$

ここで、 q は飛砂量、 B は定数（ ≈ 1.8 ）、 g は重力加速度、 ρ_a は空気の密度、 D は標準粒径（ $\approx 0.25\text{mm}$ ）、 d は砂の粒径、 u_* は摩擦速度速、 u_z は標高 z （ $\approx 0.5\text{m}$ ）の風速、 u' 、 z' は focal point の座標である。砂の単位体積重量は、 1.67tf/m^3 、 $u' = 8.94d$ 、 $z' = 10d$ とした。

計算に用いる風速は、飛砂の発生する前浜から後浜に

図-15 海風の風速別発生頻度の経年変化

図-16 前浜(波による地形変化範囲)の土量変化

図-17 平均飛砂発生範囲(2006年10月以前, $x=-160\text{m}$)

図-18 平均飛砂発生範囲(2007年6月以降, $x=-160\text{m}$)

おいて観測されたデータを用いるべきであるけれど、全期間を通じ、前浜における風速データは観測していない。

そこで、2003年に前浜の砂浜表面上0.5mで観測した風速とその時の観測栈橋先端風速との比が、0.4～0.6であった²⁾事から、観測栈橋先端で1時間毎に観測された風速値を1/2にし、前浜における風速値に補正した。

図-19 計算飛砂量を用いた土量変化と実測土量変化との比較

飛砂量を計算する風向は、海から陸に向かう成分のみとし、飛砂量は、砂丘に対し直角方向成分を計算した。

前浜の砂の粒径は、2007年以降粗くなったものの、4-(2)で述べたとおり、砂丘背後に運ばれた砂は、細かな砂がほとんどなので、全期間を通じ $d=0.18\text{mm}$ とした。

図-19は、土量変化の実測値と飛砂量公式による計算値の経年変化を示している。計算値は実測値に良く一致し、波崎海岸の飛砂量は、Bagnold式で評価可能である。

以上の結果から、飛砂量の算定に用いる風データとして、観測桟橋先端（汀線から約400m、海面上10m）で観測された平均風速の半分程度の値を用いれば良いと考えられる。

8. おわりに

本研究で得られた主要な結論は、以下のとおりである。

- (1)波崎海岸における飛砂量は、2007年以降 $10\text{m}^3/\text{m}/\text{年}$ から $16\text{m}^3/\text{m}/\text{年}$ に増えており、波崎海岸の土砂収支を考える上で、無視できない量である。
- (2)2007年以降飛砂量が増大したのは、飛砂発生範囲の拡大とバームが侵食されずに維持されるためと考えられる。
- (3)波崎海岸の飛砂量は、Bagnoldの飛砂量公式により評価できる。

謝辞：本論文の作成にあたり、港湾空港技術研究所上席研究官中村聡志氏から有益な助言をいただいた。2011年の航空レーザー計測データは、国土地理院から、銚子気象台のデータは、気象庁から提供していただいた。2006年および2011年の航空レーザー計測データの変換処理は、筑波大学の武若聡教授に行っていただいた。地形測量の実施に際し、(株)エコー、(株)プライア・コンサルタント、国際気象海洋(株)および沿岸土砂管理研究チーム諸氏の協力を得た。ここに記し、深謝の意を表する。

参考文献

- 1) 栗山善昭: 広域土砂収支図作成の試み, 水工学シリーズ 01-B-5, pp.B-5-1B-5-13, 2001.
- 2) 柳嶋慎一: 後浜地形変化におよぼす植物の影響に関する現地調査, 港空研資料, No.1091, 35p., 2004.
- 3) 柳嶋慎一: 波崎海岸における後浜の大規模な侵食, 港空研資料, No.1256, 21p., 2012.
- 4) 栗山善昭, 中島剛, 上堂園孝一, 望月徳雄: 後浜から砂丘前面にかけての植生が地形変化に及ぼす影響に関する現地観測と植生を考慮した飛砂量の数値計算, 港研報告, 第40巻, 第1号, pp.47-80, 2001.
- 5) 柳嶋慎一: 波による汀線付近における底質粒径の空間的変動特性, 土木学会論文集B2, Vol.70, No.2, pp.I_551-I_555, 2014.
- 6) 柳嶋慎一: 台風強化に伴い砂浜海岸で想定される地形変化と底質粒径変化に関する検討, 土木学会論文集B2, Vol.69, No.2, pp.I_551-I_555, 2013.
- 7) 堀川清司, 堀田新太郎, 久保田進, 香取完和: 強風下における飛砂についての実験的研究, 海岸工学論文集, 第30巻, pp.297-301, 1983.
- 8) 外崎公知, 宇多高明, 五十嵐靖之, 岩崎福久, 畑中達也: 阿字ヶ浦海岸における砂丘の発達と変形, 海岸工学論文集, 第40巻, pp.286-290, 1993.
- 9) 佐藤慎司, 大谷靖郎, 橋本新, 堀口敏洋: 新潟海岸における飛砂の実態と防砂フェンスの機能, 海岸工学論文集, 第46巻, pp.496-500, 1999.
- 10) 水理公式集: 平成11年版, 土木学会編, 713p., 1999.

(2015.3.18 受付)

FIELD MEASUREMENT OF AEOLIAN SAND TRANSPORT in HASAKI COAST

Shin-ichi YANAGISHIMA

Geographical features and sediment grain diameter are investigated on the beach around Hasaki Oceanographical Research Station (HORS). The situation of sand accumulation caused by blown sand is shown. The contribution of blown sand for the sediment budget of the coast is presumed. It is thought that the volume of blown sand is different before and after the storm in 2006. The volume of the blown sand has increased from $10\text{m}^3/\text{m}/\text{year}$ to $16\text{m}^3/\text{m}/\text{year}$. As the reason why the volume of the blown sand increases, one is expansion of generation area of blown sand and another continuance of berm feature on foreshore. And the volume of measurement blown sand and the volume predicted by blown sand formula are compared. It is possible to predict the volume of blown sand by using Bagnold's type formula of blown sand and half of mean wind velocity at the tip of HORS pier for the conversion into the wind velocity of 0.5m height on foreshore.