台風強大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

Sandy beach changes by global warming on the analogy of changes of beach profile and sediment grain size caused by powerful storm

柳嶋慎一¹

Shin-ichi YANAGISHIMA

Based on the observed data for 27 years from 1986 at Hazaki Oceanographical Research Station, the changes of cross-shore profile and the mean sediment diameter at beach surface by huge storms have been extracted. As results, the longshore bar disappears by storm and high waves come to reach the shore. Therefore, the newly formed bar comes to be eroded easily and fine sand cannot stay near the shoreline. On the assumption that the storm is made huge by global warming, it is expected that the former beach slope becomes steep and the grain diameter near the shoreline roughens.

1. はじめに

砂浜は、地球全体の中で不可欠な生態系を形成する場所であるとともに、高潮・津波など海域由来の自然災害に対する緩衝地帯となることにより、防災・減災機能を発揮すると、磯部（2013）は、述べている。

日本有数のまぐりの生産地である鹿島灘海岸において、鹿島灘はまぐり稚貝は、近年減少しており、根本ら（2009）は、砂浜侵食域における汀線付近底質の粗粒化および沖合のバーの消滅と稚貝の減少との関係を指摘している。

一方、地球温暖化にともなう海水面の上昇、台風の強大化、大きな台風の発生個数の増加により、砂浜の消失が想定されており（国土交通省，2008），砂浜の維持管理が求められている。しかしながら、台風の強大化にともなう砂浜の消失に関する研究は、なされていない。

本研究では、地球温暖化による台風の強大化にともない砂浜海岸において想定される、地形および底質粒径の変化を、波崎海洋研究施設周辺で1986年から2012年に観測した地形および砂浜表面の底質粒径データを基に検討した。

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（鉾子方向を+）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

図-1 調査位置図

図-2 調査対象地域の地形
(2006年8月測量、・印は測量地点を示す)

事基準面 (D.L.0m=T.P.-0.687m) を使用している。

観測栈橋に沿う断面地形は、1986年3月12日から2012年10月2日まで、岸沖方向間隔5mで、レベル・スタッフを用い測量した (101地点、6434回)。

広域の地形を把握するために、深浅測量を2006年8月と2007年8月に、図-2に示す範囲について実施した。

海底部の表面底質は、1987年6月には、スミスマッキンタイヤー式採泥器を用い、岸沖方向間隔10mで (詳細は加藤ら1990参照)、2010年7月には潜水し、岸沖方向間隔40～55mで、表面から深さ5cmまでの砂を直接採取した。陸上部の表面底質は、1987年、2010年8月とも岸沖方向間隔10mで、砂浜表面から深さ3cmまでの砂を直接採取した。

粒度分析は、試料を水洗い乾燥後、1987年には、ふるい振とう器を用い、2010年には、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、ふるい振とう器では400gであり、自動砂フルイ装置では約12gである。

3. バーの消滅

断面地形変化の概要を把握するために、1986年3月12日から2012年10月2日までの間のデータ (6434回) を用い、経験的固有関数解析 (例えば、加藤ら、1981) を行った。

経験的固有関数を用いると、地盤高は次式で表される。

$$h(y,t) = \sum_n c_n(t) \cdot e_n(y) \cdots \cdots (1)$$

ここで、 $h(y,t)$ は測点ごとの平均地盤高からの変化量であり平均地盤高よりも高い場合を正としている。 y は岸沖方向距離、 t は時間、 $c_n(t)$ は、モード n の時間係数、 $e_n(y)$ は、モード n の固有関数である。

図-3は、解析対象期間の平均断面を黒実線で、モード1 (寄与率28%)、モード2 (寄与率24%) の固有関数 e_1 、 e_2 の岸沖分布を青線、緑線で示している。

固有関数の値は、 e_1 、 e_2 とも、岸沖方向距離 $y=160\text{m} \sim 350\text{m}$ の間で大きく、かつ両者の位相がずれおり、波崎海岸の地形変化は、栗山 (2001) が述べたバーの発達・移動が特徴的であることが分かる。

図-4は、時間係数 c_1 、 c_2 の経年変化を示している。時間係数の値は、 c_1 、 c_2 とも、図中に赤線で示す2006年10月6日までは、1年～数年周期で0を中心に変動しており、バーが周期的に移動していることが分かる。ところが、鹿島灘に高潮をとまう異常波浪が来襲した10月7日以降、 c_1 、 c_2 とも周期的な変動は見られるものの、値は正の範囲で変化している。つまり、 $y=200\text{m}$ よりも沖側のバーは、平均断面よりも低い範囲で変動するようになったことを示している。

図-3 平均断面および固有関数の岸沖分布 (1986～2012年)

図-4 時間係数 c_1 、 c_2 の経年変化

図-5 異常波浪来襲前後の断面地形変化

柳嶋 (2012) によれば、この時常陸那珂港において、有義波高7.59m、有義波周期10.4s (常陸那珂港の既往最大を更新) が観測されており、欠測していた鹿島港の波浪を、常陸那珂港の波浪から、加藤ら (1989) にならって推定すると、有義波高8.9m、有義波周期11.3sを得る。鹿島港の既往最大は、有義波高7.5m、有義波周期10.5s (清水ら2007) であり、この時の波高は、既往最大よりも1.4m高くなっていた。更に、もう一つの特徴は、周期が長く (10s以上で最大13.8s) 波高が5mを越える波が32時間余り継続したことである。

図-5は、異常波浪が来襲した前後の断面地形を示している。異常波浪の来襲により、10月6日に $y=80\text{m}$ よりも陸側に存在したバーが完全に侵食されるとともに、 $y=260\text{m}$ 付近にあったバーが沖に移動・減衰した。その後、

10月24日の低気圧の通過（有義波高7.0m, 周期11.2s）に伴いバーはさらに沖に移動・減衰し, 12月27日の低気圧の通過（有義波高5.1m, 周期11.4s）によって, バーは完全に消滅している. この時, 栗山（2001）が明らかにした, バーの減衰過程で生ずる岸向き漂砂による, $y=150\text{m}$ （太黒矢印）付近への砂の堆積は生じなかった.

図-6は, D.L.0mよりも高い範囲（陸上部）と低い範囲（海中部）に分け, 1986年3月12日を基準とし, それぞれの断面土量の変化を示したものである. 陸上部の土量は, 台風もしくは低気圧通過時にバームが侵食されるため, 一時的に減少傾向を示すが, バームが再び形成される事と, 波崎海岸の卓越風である北寄りの風によって, 汀線付近の砂が後浜に運ばれ, 堆積するため, 年々増加傾向にある. 図中, 赤線で示す異常波浪来襲時に土量は大きく減少するが, その後急激に回復し, 増加の一途をたどっている.

一方, 海中部の土量は, 異常波浪が来襲するまでの間, はほぼプラス側で変動（平均 $+198\text{m}^3$ ）しているが, 来襲後はマイナス側に転じ（平均 -63m^3 ）, 約 260m^3 の砂が失われたことになる. つまり, バーを形成していた砂は, 異常波浪とその後連続した低気圧によって観測栈橋よりも水深の深い沖に移動したものと考えられる.

この時の砂の広い範囲での移動を検討するために, 異常波浪来襲前後の深浅測量結果を比較した.

図-2に示した異常波浪来襲2ヶ月前の2006年8月の地形図において, $y=200\text{m}$ 付近に存在するバーを含め, -7m までの等深線は, 海岸線とほぼ平行になっている. なお, $y=200\text{m}$ 付近に存在するバーは, 2006年9月1日～8日の荒天の間に, 図-5に示す $y=260\text{m}$ 付近に移動した.

図-7は, 異常波浪来襲から10ヶ月经過した2007年8月の地形測量結果を示している. バーよりも沖側の -6m から -7.5m の等深線は, $x=-300\text{m}$ および 0m 付近で陸側に凹み, $x=-200\text{m}$ 付近で逆に沖に張り出しており, 図-2に示した2006年8月のほぼ直線的な形状とは, 大きく異なっている.

図-8は, 2006年8月から2007年8月までの間の地盤高変化量の空間分布を示している. 図-5に示したとおり, バームの存在した $y=0\text{m} \sim 80\text{m}$ およびバーの存在した $y=200\text{m} \sim 300\text{m}$ 付近の地盤高の低下量が多くなっている（侵食）. さらに, 観測栈橋よりも沖側の $y=400\text{m} \sim 700\text{m}$ の範囲（図-2から, $-4\text{m} \sim -6.5\text{m}$ の等深線に相当）の地盤高は低下し, $y=700\text{m}$ よりも沖側の地盤高は高く（堆積）なっている.

以上の結果から, 異常波浪により, バーが存在した位置から -6.5m の等深線までの広い範囲で侵食が生じ, この範囲の砂は, さらに深い沖合へ移動したことが分かる.

過去の深浅測量結果を調べたところ, 深い範囲まで侵

図-6 観測栈橋に沿う断面の土量変化

図-7 異常波浪来襲後の平面地形（2007年8月測量）

図-8 異常波浪来襲前後の地盤高変化量の空間分布（2006年8月-2007年8月）

食が生じたのは, 2002年8月から2003年7月の間（ $-3\text{m} \sim -5\text{m}$ の等深線の範囲）だけであった.

根本ら（2009）が指摘した鹿島港北側海岸のバーの消

減は、ここに示したような機構で、生じたものと考えられる。

バーを含め通常はほとんど変化することのない深い範囲まで侵食が生じたのは、2006年10月の波浪が異常に大きかったためであり、これらの現象が、地球温暖化に伴い想定される砂浜海岸における変化の一つと考えられる。

4. 浅海域の地形変化

次に、異常波浪来襲後の地形変化を経験的固有関数法により詳しく調べる。解析に用いた断面データは、2006年10月10日から2012年10月2日までの間の1149回分である。

図-9は、解析対象期間の平均断面を黒実線で、モード1（寄与率35%）、モード3（寄与率12%）の固有関数 e_1 、 e_3 の岸沖分布を青線、赤線で示している。

図-3に示した、1986年から2012年までの平均断面形状と異なるのは、D.L.0m付近の前浜勾配が急になり、 $y=280\text{m}$ 付近の地形が下側に凸になっている形状である。

モード1の固有関数は、 $y=220\text{m}$ 付近に正のピークがあり、図-3に示した、全期間のモード1のピークと同様である。しかし、同図において $y=310\text{m}$ 付近に存在した負のピークは、図-9において無くなっており、異常波浪来襲後、この位置にバーが形成されなくなったことを示している。

1986年から2012年までの断面データによる解析では抽出できなかったモード3の固有関数は、 $y=20\text{m}$ 、 $y=180\text{m}$ に負のピークがあり、関数値のほとんどは負の値である。

図-10は、モード3の時間係数の経年変化を示している。時間係数は、2008年の始まで0を中心に変動しているが、それ以降、0付近からプラス側へ急激に変化しその後ゆっくり0付近へ戻る変動を繰り返している。

モード3の固有関数がほとんど負の値であること、時間係数の変化を併せ考えると、 $y=0\text{m}$ から $y=240\text{m}$ の範囲の地盤高は、大きな波浪が来襲した時に急激に低下（侵食）し、その後波が穏やかになるとゆっくり高くなる（堆積）ことを繰り返しているものと考えられる。

図-11は、図-10に矢印で示した時の断面変化事例を示している。2008年2月4日の断面（緑線）には、 $y=140\text{m}$ 付近に小規模なバーが、その陸側にトラフが形成されている。しかし、有義波高2～3.6m、周期8～11sの波が継続した4日後の8日（青線）には、バーが消滅するとともにその沖側に砂が移動している。そして、2月8日以降も荒天が続き、有義波高5.2m、周期10.3sの波が来襲した後の2月13日（赤線）には、干潮時汀線付近が侵食され、前浜勾配は急になっている。この期間、 $y=240\text{m}$ より沖側にバーは存在せず、フラットな形状になっている。

その後も、穏やかな状況が継続すると、前浜勾配は緩

図-9 平均断面及び固有関数の岸沖分布 (2006年10月7日以降)

図-10 時間係数（モード3）の経年変化

図-11 浅海部の断面地形変化事例 (2008年2月)

くなり、小規模なバーも $y=140\text{m}$ 付近に再び形成されるけれど、波が大きくなると直ぐにバーは消滅するとともに前浜勾配も急になった。

浅海域において侵食が頻繁に生じるのは、図-5において、 $y=260\text{m}$ 付近に存在したバーが消滅したため、波が減衰することなく汀線付近まで到達するためと考えられる。

5. 干潮時汀線よりも陸側の底質の粗粒化

図-12は、異常波浪来襲前の地形である1987年6月17日と、異常波浪来襲後の地形である2010年8月24日の断面地形を示している。

1987年6月17日の断面において、バーム頂は、+2mであり、 $y=0\text{m}$ 付近のバーム斜面の勾配は急であるものの、 $y=40\text{m} \sim 80\text{m}$ の間の前浜の勾配は緩くなっている。そして、 $y=210\text{m}$ 付近にトラフ（水深-5m）が、 $y=300\text{m}$ 付近に明瞭なバー（頂部水深-2.5m）が存在している。

図-12 断面地形の比較 (1987年, 2010年)

図-13 底質中央粒径の岸沖分布 (1987年, 2010年)

一方, 2010年8月24日の断面において, バームは高くなり, バーム頂からD.L.-2.5mまで ($y=-20\text{m} \sim 80\text{m}$) 急な一様勾配の形状になっている。そして, バームは存在しない。

図-13は, 図-12に対応した1987年6月17日と, 2010年8月24日の砂浜表面の底質中央粒径の岸沖分布を示している。なお, 2010年の海中部の底質粒径データは, 7月20日に採取した結果であるが, 7月20日から8月24日の間, 波は穏やかであり, この間に, 海中部の断面地形が変化しなかったことを確認している。

異常波浪来襲前の底質の中央粒径は, トラフの位置に相当する $y=230\text{m}$ 付近で 0.5mm と大きくなっている。その他の地点の中央粒径は, $y=80\text{m}$ 付近にピーク (0.25mm) を持ち, 陸側および海側へ離れるほど, 細かくなっている。

異常波浪来襲後の底質の中央粒径は, $y=130\text{m}$ よりも沖側の海中部は, 異常波浪来襲前と同様で細かい。しかし, 干潮時汀線よりも陸側の底質の中央粒径は, 最大 1mm になっており, 異常波浪来襲前に比べ大きくなっている。

干潮時汀線よりも高い範囲の底質が粗粒化したのは, 沖のバームの消滅により, 波が砕けることなく進入し, 汀線付近で巻波砕波し, 細かな粒径の砂は留まらずに, 粗い砂のみがバーム上へ運ばれるためと考えられる。

このように, 干潮時汀線よりも高い範囲の底質が粗粒化することが, 地球温暖化に伴い想定される砂浜海岸における2番目の変化と考えられる。

6. おわりに

地球温暖化による台風の強化, 大きな台風発生数の増加にともない砂浜海岸において想定される地形変化, 底質粒径の変化を, 波崎海岸で観測した地形データ (1986~2012年), 底質粒径データを基に検討した。温暖化により砂浜海岸においては, 以下のような変化が生じる可能性がある。

- (1) 減衰過程にあるバームが消滅し, バームを形成していた砂は, 沖合に運ばれる。

- (2) 岸寄りに形成される小規模のバームは容易に侵食され, 汀線付近まで波が到達し, 巻波砕波するため, 細かな粒径の砂は留まれないため, 前浜勾配が急になる。
- (3) 干潮時汀線よりも高い範囲の底質は, 粗粒化する。

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。2010年の海中部の底質サンプルは, 東京大学大気海洋研究所助教清家弘治氏が採取してくださった。鹿島港および常陸那珂港の沖波データは, 国土交通省港湾局から提供していただいた。本解析に用いた断面地形データは, (株)エコー, (株)プライア・コンサルタント, 国際気象海洋(株)の観測補助員の皆様および沿岸土砂管理研究チームのメンバーによって観測されたものである。ここに記し, 深謝の意を表する。

参考文献

- 磯部雅彦 (2013): 砂浜の機能と現状－海岸の変遷と海岸工学の展開を踏まえて－, 土木学会誌, 第98巻, 第5月号, pp.6-9.
- 加藤一正・田中則男・灘岡和夫 (1981): 前浜の二次元的地形変化と潮位・波について, 第28回海岸工学講演会論文集, pp.207-211.
- 加藤一正・柳嶋慎一・磯上知良・村上裕幸 (1989): 波による汀線付近の水位上昇量－波崎海洋研究施設における現地観測－, 港研報告, 第28巻, 第1号, pp.3-41.
- 加藤一正・柳嶋慎一・栗山善昭・磯上知良・村上裕幸・藤田誠 (1990): 砕波帯内の底質粒度の変動特性－波崎海洋研究施設における現地調査－, 港研報告, 第29巻, 第2号, pp.37-61.
- 栗山善昭 (2001): 沿岸砂州の長期変動特性と底質移動特性, 土木学会論文集, No.677/II-55, pp.115-128.
- 国土交通省 (2008): 平成19年度国土交通白書, 228p.
- 清水勝義・佐々木誠・永井紀彦 (2007): 2006年の台風等による高波の観測結果 (NOWPAS2006特別号), 港空研資料, No.1160, 42p.
- 根本 孝・松浦健郎・仁平 章・岡安章夫 (2009): 鹿島灘砂浜域の地形と底質粒径の経年変化およびそれらがチョウセンハマグリ稚貝の分布に及ぼす影響について, 水産工学論文集, Vol.46, No.1, pp.51-64.
- 柳嶋慎一 (2012): 波崎海岸における大規模な侵食, 港空研資料, No.1256, 21p.