BGモデルによる海底地形と粒径変化の予測－北九十九里浜への適用

Prediction of Bathymetric and Grain Size Changes Using BG Model-Application to North Kujukuri Beach

宇多高明¹・水垣 浩²・宇野晃一³・野志保仁⁴

Takaaki UDA, Hiroshi MIZUGAKI, Ko-ichi UNO and Yasuhito NOSHI

Kujukuri Beach has been eroded owing to the decrease in sediment supply from sea cliffs and the obstruction of longshore sand transport by fishing port breakwaters. Eroded zone has been expanding rapidly to the central part of an arc-shaped 33 km long shoreline. Not only beach changes but also grain size changes occurred because fine sand can move faster than coarse sand. These changes were predicted using the BG model (a three-dimensional model for predicting beach changes based on Bagnold's concept). The effect of beach nourishment using fine and coarse material was also investigated.

1. まえがき

沿岸漂砂の場所的の不均衡により海浜変形が生じる場合、海浜地形のみならず底質粒径もまた変化し、これらは海岸域環境に重要な影響を及ぼす。沿岸域での人為改変とともにこのような変化が多く海岸で観察される。したがって海浜地形変化と底質粒径の変化予測は工学的にも重要な課題である。本研究では、北九十九里浜を対象として粒径を考慮したBGモデル (Serizawa et al., 2007) を用いてこの問題について検討した。九十九里浜は両端にある海食崖からの供給土砂が堆積して形成された海浜であるが、1960年代以降進められた海食崖の侵食防止工事、北端・南端に造られた飯岡・太東漁港による沿岸漂砂の阻止、浚渫土砂の沖合投棄などにより海浜への供給土砂量が激減した。この結果、近年では弧状海岸線の両端部から中央部へと侵食域が広がり、九十九里浜の砂浜の大部分が消失するという危機的狀態に陥っている (宇多, 2012)。また、九十九里浜は主に中砂と細砂で構成されているが、沿岸漂砂による粒径分級が起り、細粒成分が粗粒成分より移動しやすく、海浜のほぼ中央にある片貝漁港を超えて南側に流出する結果、広域で粗粒化が起りつつある。ここではこの現象を再現するために、粒径を考慮したBGモデルの適用を図った。

2. 北九十九里浜の汀線変化

飯岡漁港～片貝漁港間に延びた長さ33 kmの北九十九里浜の2010年の空中写真を図-1に示す。また、同じ区域

図-1 九十九里北部の空中写真

図-2 1983年基準での汀線変化

の1983年基準での2010年までの汀線変化量を侵食域と堆積域の区分とともに図-2に示す (宇多, 2012)。汀線の前進域は、飯岡漁港近傍のX=2.5～7.2 kmと、片貝漁港の北東側のX=20～31.6 kmに集中しており、X=7 km付近 (矢指ヶ浦海岸) に設置された離岸堤周辺での局所的な汀線前進を除けば、X=6.5～20 kmの全域で侵食が進んでいる。九十九里浜では、過去、北端の屏風ヶ浦からの崩落土砂が沿岸漂砂により九十九里浜中央部へと運ばれていた。しかし北端から流入する沿岸漂砂が飯岡漁港防波堤と15基の離岸堤群の建設に伴い、飯岡漁港の西側隣接区域に集中的に堆積することになった。また、中央部では沿岸漂砂の供給がほぼ途絶えたため侵食が進んでいる。しかし、さらにその南側では片貝漁港の防波堤により沿岸漂砂が阻止されているため片貝漁港の北東側では汀線が大きく前進している。九十九里浜では、侵食が進むに従い主としてヘッドランド (HL) を用いた侵食対策が進められてきた。図-3には離岸堤やHLなどの構造物の建設履歴を示す。侵食の進行と同時に対策施設の設置区間も広がった。

1 正会員	工博	一般財団法人土木研究センター常務理事
なぎさ総合研究室長兼日本大学客員教授
理工学部海洋建築工学科
2		千葉県県土整備部河川整備課海岸砂防
室長
3		千葉県県土整備部河川整備課海岸砂防
室副主幹
4 正会員	博(工)	日本大学助手 理工学部海洋建築工学科

図-3 防波堤やヘッドランドなどの構造物の建設履歴

表-1 計算条件

数値計算法	Bagnold 概念に基づいた地形・粒径変化予測モデル (Serizawa et al., 2007)
計算対象	飯岡漁港～片貝漁港
計算ケース	再現計算: 1990～2012年 予測計算 (2062年) 1: 配置, 2, 3: 細砂, 粗粒材養浜 $5 \times 10^5 \text{ m}^3$
初期地形	1: 1983年の汀線形状から作成した地形 2: 1990年再現地形 予測計算: 2012年現況再現地形
底質粒径	細砂 (0.1 mm), 中砂 (0.3 mm), 粗粒 (2.0 mm)
平衡勾配	$d = 0.1 \text{ mm}: 1/60, 0.3 \text{ mm}: 1/50, 2.0 \text{ mm}: 1/10$
入射波条件	夏季の波浪条件 砕波波高 $H_b = 1.5 \text{ m}$, 砕波波向 $\alpha_b = 32.0^\circ$ (N113°E) 冬季の波浪条件 砕波波高 $H_b = 2.0 \text{ m}$, 砕波波向 $\alpha_b = 63.0^\circ$ (N79°E)
水位条件	M.S.L. 0.0 m
地形変化範囲	波による地形変化の限界水深 $h_c = 5.0 H$, バーム高 $h_b = 3 \text{ m}$
境界条件	左側境界: $1.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$, 右側境界: 通過境界 構造物境界: 防波堤, 護岸, 突堤, ヘッドランド (芹沢ら, 2002)
漂砂量係数	漂砂量係数 $A = 0.5$, 小笠ランプトン項の係数 $\xi = 1.62$ 岸沖漂砂量係数 $K_c/K_s = 0.7$
漂砂量の水深分布	宇多・河野 (1996) の3次式
土砂落ち込みの 限界勾配	陸上: 1/2, 水中: 1/3
計算範囲	沿岸方向: $X = 0.0 \sim 32.0 \text{ km}$ 岸沖方向: $Y = 0.0 \sim 6.0 \text{ km}$
計算メッシュ	$\Delta X = 50 \text{ m}$, $\Delta Y = 20 \text{ m}$
計算時間間隔	$\Delta t = 1 \text{ hr}$
計算ステップ数	1年間: 8,760 ステップ
数値計算法	陽解法による差分法

3. 海浜変形計算の手法

(1) 波浪場の計算

波浪場の計算は、図-1に示す区域を対象とした。九十九里浜北部に作用する波浪は、鶴岡ら (2009) による銚子沖の波浪観測データ分析結果を参照すると、夏季は1.5 m ($T=11.3 \text{ s}$) と相対的に静穏であるが、冬季は2.0 m ($T=7.9 \text{ s}$) と波高が高まる。また、波向は夏季にN113°Eと南寄りから、冬季はN79°Eと北寄りからの入射となる。九十九里浜北部は、図-1からも分かるように飯岡漁港から片貝漁港まで緩く弓形に湾曲した海岸線を有している。この海岸線形状によれば、夏季には $X=20 \sim 32 \text{ km}$ での汀線への法線方向 (N113°E) と波向 (N113°E) が一致するため沿岸漂砂量は0となる。一方、 $X=2 \sim 20 \text{ km}$ 区間では、汀線への法線方向と波向とのなす角が大きく、したがって沿岸漂砂量も大きい。すなわち、夏季波浪が

地形変化に著しく影響を及ぼす区域は $X=2 \sim 20 \text{ km}$ となる。一方、冬季のN79°E方向からの入射波に対しては、飯岡漁港防波堤の西側に広大な波の遮蔽域が形成され、遮蔽域内では波高の低下により沿岸漂砂量も0に近づく。すなわち、冬季波浪が地形変化に及ぼす影響は飯岡漁港周辺ではほとんどないが、飯岡漁港から南西方向に離れるにしたがい増大すると推察される。

九十九里浜北部は大きく湾曲した地形を有しているため、波が漂砂帯に到達するまでに屈折の影響が大きいと予想される。そこで、波浪場の計算には回折だけでなく屈折も同時に考慮できる間瀬ら (2001) の高精度差分による位相平均不規則波浪変形計算モデルを使用した。波浪場の計算に用いた地形は、2011年3月の測量データをもとに設定し、水深5 m以下は水深5 mの平坦地形とした。この理由は、九十九里浜北部に設置されている構造物の先端水深は3～5 mであり、漂砂の移動範囲では、構造物の設置等による回折の影響が卓越すると考えたためである。銚子での波浪観測データを基に夏季・冬季波浪の作用頻度は同じとし、初期地形は海食崖の侵食防止のための消波堤建設、および飯岡漁港の防波堤が概成した1983年当時の地形を与えた。

(2) 海浜変形計算

地形変化計算にはSerizawa et al. (2007) のBGモデルを用いた。計算範囲は、図-1に示したように漂砂供給源となる屏風ヶ浦 (飯岡漁港東側約2 km) から片貝漁港まで33 kmの海岸線とした。宇多ら (2002) は、実測データを基に h_c と未超過確率95%波高の関係を調べ、決定係数0.81で $h_c = 3.64 H_{95}$ という関係式を得ている。本研究でもこれにない、波による地形変化の限界水深 h_c については、 h_c と波高 H が線形関係にあると仮定し、 $h_c = aH$ と与えた。ここに、係数 a は次のようにして定めた。まず、九十九里浜の深浅図によると、片貝漁港周辺では水深は10 m付近まで等深線の蛇行が見られることから、片貝漁港周辺における h_c は最大値として10 mと与えられる。一方、波高 H にはエネルギー平均波を用いるが、冬季の波高が高く、エネルギー平均波高は $H_{\max} = 2 \text{ m}$ である。よって係数 a は5.0となる。この式によれば、波高 H に比例して波による地形変化の限界水深 h_c が異なることから、夏季と冬季で h_c も異なる。飯岡漁港防波堤の遮蔽域では h_c が小さく、一方で片貝漁港に向かうにつれて遮蔽物がなくなるため h_c は大きくなる。夏季では $H_{\max} = 1.5 \text{ m}$ なので、 h_c の最大値は7.5 mとなる。

(3) 計算条件

底質は、宇多ら (2014) の粒度組成分布を基に2粒径 (0.1, 0.3 mm) からなるとし、それぞれ平衡勾配を1/60, 1/50とした。境界条件として北東側境界 ($X=0 \text{ km}$) では、宇多ら (2010) が空中写真による汀線変化解析により推

図-4 2012年までの波浪場の計算結果(夏季)

図-5 2012年までの波浪場の計算結果(冬季)

定した沿岸漂砂量 $1.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ (西向き)を与えた。一方、南西端は自由境界とした。このとき境界を通過する砂の粒度組成は、北東側が細砂65%、中砂35%とし、南西側は上手側と同様とした。地形変化計算では、冬季、夏季の波浪場を設定し、夏季冬季波浪の作用頻度は同じとした。再現計算では、図-3に示すように1990, 2000, 2012年までの構造物の建設経緯を考慮した。計算における構造物の取り扱いについては、芹沢ら(2002)に従った。表-1に計算条件を示す。

4. 再現計算の結果

波浪場の計算は、1990, 2000, 2012年時点の構造物形状を考慮して行ったが、冬季の北寄りの入射波条件で飯岡

図-6 初期地形と初期粒径(1983年)

図-7 2012年の再現地形と1990年からの地形変化量および平均粒径(2012年)

漁港防波堤による波の遮蔽効果が強く現れ、夏季と比べ冬季の波高比が沿岸方向に大きく変化している。2000～2012年の計算に用いた夏季と冬季の波浪場を図-4, 5に示す。一方、波向については、夏季・冬季ともに飯岡漁港周辺では防波堤による波の遮蔽域へと向かう波向となる。さらに夏季よりも冬季の波向の方が全体に北側への傾きが大きいため、より南西向きに漂砂の卓越が予想される。図-6は、1983年の深浅図をもとに設定した初期地形と平均粒径の分布を示す。粒径は細砂(0.1 mm)と中砂(0.3 mm)の混合砂とし、含有率は現地調査の結果から得られた平均値、細砂65%、中砂35%とし、沿岸方向に一様に分布させた。

2012年の再現地形と1990年地形からの地形変化量、および底質平均粒径の分布を図-7に示す。図-7 (a)によれば、 $X=10 \sim 20 \text{ km}$ ではヘッドランドの上手堆積下手侵食という特徴を示しつつ全体的に侵食が進んだことが分かる。対照的に $X=22 \text{ km}$ より下手では堆積が進んでいる。図-8, 9は図-7に示す矩形区域A, Bの詳細地形と粒径分布を示す。侵食の進んだ $X=17 \sim 20 \text{ km}$ 区間では、細粒分が局所的に堆積したHLの上手側直近を除き、底質粒径が増大している。一方、片貝漁港の近くでは南西方向への細

図-8 区域A内の平均粒径分布

図-9 区域B内の平均粒径分布

図-10 前浜の粒径含有率および平均粒径の沿岸分布(2011年11月観測)

図-11 1983年基準の汀線変化量(2012年再現)

砂の選択的移動のため粒径が細くなった。図-10は、2011年11月18日に測定された前浜砂の粒径含有率と平均粒径の沿岸方向分布(宇多ら, 2014)を示す。図-10の測定結果と図-9の計算結果はかなりよい対応を示す。さらに1983～2012年の汀線変化を図-11に示すが、 $X=20\sim25$ km区間や片貝漁港の北側直近を除けば、実測・計算汀線はほぼ一致している。

5. 将来予測計算

2062年の海浜地形と、これに重ねて表示した2012年基準の水深変化量を図-12に示す。全体に侵食が進んでいるが、とくにHLの北側隣接部での集中的な堆砂と下手側での局所

図-12 2062年の予測地形と2012年基準の水深変化量(ケース1: 放置)

図-13 7～12号HL周辺での堆積侵食状況(ケース1: 放置)

図-14 浜幅(ケース1: 放置)

的な侵食がセットで起きている。これは図-12に破線で示す矩形域の拡大図(図-13)からも見てとれる。図-14には2012年の護岸(土堰堤)位置を基準とした浜幅の変化を示す。前浜のない箇所が南に広がることが予測された。

ケース1の予測計算によれば、侵食が著しく対策の優先度が最も高いと考えられる区域は野手海岸($X=12\sim18$ km)の8～12号HL間である(図-15参照)。そこで図-15で破線により囲まれた区域で 5.0×10^5 m³の細砂および粗粒材養浜(ケース2: 細砂養浜, ケース3: 粗粒材養浜)の効果を予測した。養浜箇所は7～12号HL間とし、各HL間で海岸線と平行に100 m幅で養浜した。この場合の初期地形は、2012年の現況再現地形とし、HLが全て完成したとして50年後の地形を予測した。まず、ケース2について養浜直後の2012年基準の水深変化量を図-16に示す。また、50年後の予測地形と、ケース1との比較として求めた水深変化量を図-17に示す。各HL間に養浜された細砂は南西方向に移動し、前浜にはほとんど寄与しないという結果となった。2012年の護岸(土堰堤)を基準とした浜幅の変化を図-18に示すが、野手海岸では10～11号HL間の中央部と12号HLの北東側で若干の浜幅の回復が見られるものの、ほぼ全域で浜幅は0 mとなり、対策の効果

図-15 養浜区域(ケース2,3)

図-16 養浜直後の地形と2012年基準の水深変化量(ケース2,3)

図-17 2062年の予測地形(ケース2: 細砂養浜)とケース1との比較として求めた水深変化量

は見られない。沖側の地盤を維持するための養浜として位置付けることは可能ではあるが、海岸保全の視点から見ると細砂養浜には限界がある。ケース3では、ケース2と同様7～12号HL間で $5.0 \times 10^5 \text{ m}^3$ の粗粒材養浜を行った。2062年の予測地形と、ケース1との比較として求めた水深変化量を図-19に示す。粗粒材は前浜に集中的に堆積し、地盤高上昇量は平均で0.7 mとなり、50年後も前浜が維持可能である。図-20は、同様にして求めた浜幅の変化を示す。7～12号HL間での浜幅の回復が著しい。

6. まとめ

北九十九里浜での地形変化と粒度組成の変化がBGモデルによりうまく再現でき、調査区域の海浜変形が沿岸漂砂の不均衡と細砂の選択的移動によって起きたことが明らかになった。九十九里浜北部においては、既に細砂が枯渇状態にあるが、粗粒材養浜を行えば砂浜の完全消失を避けることが可能なことがBGモデルによる計算により示すことができた。

図-18 浜幅(ケース2: 細砂養浜)

図-19 2062年の予測地形(ケース3: 粗粒材養浜)とケース1との比較として求めた水深変化量

図-20 浜幅(ケース3: 粗粒材養浜)

参考文献

- 宇多高明・芹沢真澄・熊田貴之・加留部亮太・三浦正寛 (2002): 沿岸漂砂量、波による地形変化の限界水深および波候特性の関係, 海洋開発論文集, 第18巻, pp.803-806.
- 宇多高明・酒井和也・清野聡子・星上幸良 (2010): 飯岡漁港南防波堤の延伸に伴う漂砂上手側での砂浜形成と環境変化, 海洋開発論文集, 第26巻, pp.1071-1076.
- 宇多高明 (2012): 急速に進む九十九里浜の侵食, 科学, Vol.82, No.11, pp.1229-1238.
- 宇多高明・水垣 浩・宇野晃一・大木康弘・酒井和也 (2014): 九十九里浜北部における海浜砂の粒径分級, 土木学会論文集B3 (海洋開発), Vol.70, No. 2, (印刷中)
- 芹沢真澄・宇多高明・三波俊郎・古池 鋼・熊田貴之 (2002): 海浜縦断形の安定化機構を組み込んだ等深線変化モデル, 海岸工学論文集, 第49巻, pp.496-500.
- 鶴岡春美・宇多高明・芹沢真澄・古池 鋼・福本崇嗣・星上幸良・宮原志帆 (2009): 南九十九里浜における沖合養浜の追算と連続土砂投入の効果検討, 海岸工学論文集, 第56巻, pp.711-715.
- 間瀬 肇・沖 和哉・高山知司・酒井哲郎 (2001): 高精度差分による位相平均不規則波浪変形計算モデルに関する研究, 土木学会論文集, No.684/II-56, pp.57-56.
- Serizawa, M., Uda, T., San-nami, T., Furuike, K., Ishikawa, T. and Kumada, T. (2007): Model for predicting beach changes on coast with sand of mixed grain size based on Bagnold's concept, Coastal Sediments '07, pp. 314-32.