# 仙台湾南部海岸におけるヘッドランド周辺の土砂輸送解析

Sediment Transport around Headlands in the Southern Sendai Coast

三浦佑輔<sup>1</sup>•南將人<sup>2</sup>•有働恵子<sup>3</sup>•真野明<sup>4</sup>

# Yusuke MIURA, Masato MINAMI, Keiko UDO, and Akira MANO,

The Southern Sendai Coast is facing the Pacific Ocean in the northern part of Japan, where is a typical coastal erosion area in this country. To prevent the erosion and to control the longshore sediment transport, eight headlands have been constructed at intervals of 1km since 1997 to present. The purpose of this study is to understand beach topographic features in the vicinity of the headlands from field data, and to simulate this features using FUNWAVE based on the fully nonlinear Boussinesq model of Wei et al. (1995). The field data showed a long and slender depositional area in the point of the headlands on the offshore side and the numerical simulation could explain the depositional area qualitatively from both the results under ordinary and stormy conditions.

# 1. はじめに

近年,沿岸における構造物の建設や河川からの土砂供 給の減少などによって沿岸漂砂の土砂収支バランスが崩 れるここにより,日本各地で海岸侵食が問題となってい る.この対策として突堤や離岸提など様々な構造物が建 設されてきたが,季節によって波向が変化するような海 岸に対してはヘッドランド工法により,海岸線をいくつ かに分割してポケットビーチ化を図る手法がとられてい る(宇多ら,1994).ヘッドランドの長さによる沿岸漂砂 の捕捉率の違いや(佐藤ら,1998),ヘッドランドの効果 的な形状(宇多ら,2007)に関する研究はなされているも のの,建設中のヘッドランド群を含む広領域における土 砂輸送に関する知見は得られてない.

本研究では、現在もヘッドランド建設が進められてい る仙台湾南部の山元海岸において現地調査結果より地形 変化特性を調べるとともに、拡張型の強非線形 Boussinesqモデル(FUNWAVE; Weiら, 1995)を用いた 数値計算によりこの特性のメカニズムを明らかにするこ とを目的とする.

# 2. 調査対象地域

仙台湾南部海岸は、仙台市から福島県境まで総延長約 65kmに及ぶ長大な砂浜海岸であるとともに、日本でも 有数の海岸侵食地帯である(図-1).この領域における等 深線は水深30m以浅で海岸線とほぼ平行な海岸であり、 水深10m以浅の海底勾配は1/30~1/40である(田中ら、

1 学生会員	東北大学大学院工学研究科土木工学専攻
2 正 会 員	博(工)八戸高等専門学校准教授建設環境工学科
3 正 会 員	博(工)東北大学助教 災害制御研究センター
4 正 会 員	工博 東北大学教授 災害制御研究センター



図-1 仙台湾沿岸の海底地形



図-2 山元海岸における推定沖波波向の出現頻度 (a)夏季(2004年2月~2004年11月) (b)冬季(2004年11月~2005年2月)

1995). また,年平均波向が東から南東方向であること から,北向きの沿岸流が卓越しているが,冬季は北東方 向からの波も卓越しており波向が季節的に変動する海岸 である(図-2).

この海岸では1970年代初めから徐々に侵食され始め, 近年その度合いが急激に進んでいる. 汀線の変化が50m も後退する個所もあり、堤防の倒壊などの災害リスクを 高めている.このような急激な侵食の原因として、最大 の土砂供給源であった福島の崖海岸での侵食防止対策や、 福島県の重要港湾に指定された相馬港の整備が進んだこ とにより、沿岸流の上手側である南方からの土砂供給が 激減し、土砂収支のバランスが崩れてしまったこと等が 挙げられる.

対象領域である山元海岸は仙台湾南部海岸の中でも侵 食や越波が特に顕著で,1997年よりこれまで8基のヘッ ドランドが1km間隔に設置されており,将来的には既存 のヘッドランドの中間地点にヘッドランドが設置される 予定である.2005年11月時点のヘッドランドの長さは, 1~11号については100m,S4号については200mであり, 2056年には全長200mのヘッドランドが合計16基設置さ れる.

#### 3. 地形データ解析

#### (1) 現地観測データ

国土交通省東北地方整備局仙台河川国道事務所により 取得された2002年2月,2003年2月,2004年2月,2004年 11月,ならびに2005年2月の地形データを用いて,ヘッ ドランド8基(期間中に建設されていたもの2基)を含む山 元海岸全体の広域地形変化について解析した.広域の地 形変化は,沿岸方向7.9km×岸沖方向1kmの領域に沿岸 方向500m毎に設定された測線17本(2002年2月のみ沿岸 方向6.5km×岸沖方向1km,測線14本)のデータを用いた. 2003年2月時点における山元海岸(Area2)の海底地形およ び測線Co70に沿った断面地形変化をそれぞれ図-3,図-4に示す.

#### (2) 結果と考察

2002年2月~2005年2月の3年間の地盤高変化を図-5に 示す. ヘッドランド周辺では堆積傾向にあるが,各ヘッ ドランド間ではやや侵食傾向にあった.また,領域全体 としては沿岸流の上手側は堆積傾向に,下手側は侵食傾 向にあった. HLS4号付近では顕著に堆砂しているが, これは2003年~2005年の工事により全長200mのヘッド ランドの突堤部が完成したことによるものと考えられる. また,ヘッドランドの先端よりやや沖側付近で堆積傾向 がみられた.

次に季節毎の変化を見るために2004年2月~2004年11 月(夏季)および2004年11月~2005年2月(冬季)の地盤高 変化を図-6に示す.夏季は概ね3年間の変化と類似した 傾向が見られ各ヘッドランド先端付近で堆積傾向にあり, HL9号周辺ではその傾向が特に顕著であった.一方, 2004年11月~2005年2月においては,領域全体で侵食傾 向にあった.2004年11月~2005年2月の期間の断面変化 図(図-3)よると,ヘッドランドの先端付近では約1~3m





程度の侵食が、その沖側で若干の堆砂が認められた. こ れは2005年1月16日~17日の大型低気圧通過に伴う高波 浪によるものと考えられる. また、観測期間中に200m 延伸工事中であったHLS4号付近では顕著な堆積が見ら れたが、これはヘッドランドによる侵食軽減の効果であ ると考えられる.

★-1 山元海岸における半均波浪デ
-------------------

	夏季	冬季
沖波波高(m)	1.16	4.0
沖波周期(s)	8.2	12.7
波向(真北0°)	102.8	90.0

# 4. 数値計算

# (1) 波浪場解析

対象領域に最も近い亘理観測所(水深20m)の波浪デー タは欠測や異常値が多いことから三浦ら(2007)と同様に, 相馬観測所(水深17.1m)の2002年1月~2005年12月にお けるNOWPHAS(全国港湾海洋波浪情報網)データを用い て沖波波高 $H_0$ ,周期 $T_0$ ならびに波向 $\theta_0$ を与えた.得ら れた $H_0$ , $T_0$ を図-7に, $\theta_0$ の推定出現頻度を図-2に示す.

計算負荷を軽減するためまずは、エネルギー平衡方程 式を用いて電子海図を元に作成した広領域(図-1, Areal) における波浪場を計算し、それを入射波条件として用い て山元海岸(図-1, Area2)における水位と底面流速の空 間分布をFUNWAVE(Weiら, 1995)を用いて算出した.

Area1における波浪条件としては卓越する波向の違いに より夏季と冬季に分け,2004年2月~2004年11月(夏季) および2004年11月~2005年2月(冬季)における季節毎の 平均波浪データ(表-1)を用い計算を行った.FUNWAVE は拡張型の強非線形Boussinesqモデルであり,以下のよ うに運動量方程式は式(1),連続式は(2),(3)のように表 わされる.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \overrightarrow{u_{\alpha}}}{\partial t} + (u_{\alpha} \cdot \nabla) \overrightarrow{u_{\alpha}} + g \nabla \eta + z_{\alpha} \left[ \frac{1}{2} z_{\alpha} \nabla \left( \nabla \cdot \frac{\partial \overrightarrow{u_{\alpha}}}{\partial t} \right) + \nabla \left\{ \nabla \cdot \left( h \frac{\partial \overrightarrow{u_{\alpha}}}{\partial t} \right) \right\} \right] \\ + \nabla \left[ \frac{1}{2} \left( z_{\alpha}^{2} - \eta^{2} \right) \left( \overrightarrow{u_{\alpha}} \cdot \nabla \right) \left( \nabla \cdot \overrightarrow{u_{\alpha}} \right) + \frac{1}{2} \left\{ \nabla \cdot \left( h \overrightarrow{u_{\alpha}} \right) + \eta \nabla \cdot \overrightarrow{u_{\alpha}} \right\}^{2} \right] \\ + \nabla \left[ \left( z_{\alpha} - \eta \right) \left( \overrightarrow{u_{\alpha}} \cdot \nabla \right) \left( \nabla \cdot \left( h \overrightarrow{u_{\alpha}} \right) \right) - \eta \left\{ \frac{1}{2} \eta \nabla \cdot \frac{\partial \overrightarrow{u_{\alpha}}}{\partial t} + \nabla \cdot \left( h \frac{\partial \overrightarrow{u_{\alpha}}}{\partial t} \right) \right\} \right] \end{aligned}$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla \left[ \left( h + \eta \right) A \right] = 0 \tag{2}$$

$$\left\{\overrightarrow{u_{\alpha}} + \left(z_{\alpha} + \frac{1}{2}(h-\eta)\right)\nabla\left(\nabla \cdot \left(h\overrightarrow{u_{\alpha}}\right)\right) + \eta\left(\frac{1}{2}z_{\alpha}^{2} - \frac{1}{6}(h^{2} - h\eta + \eta^{2})\nabla\left(\nabla \cdot \overrightarrow{u_{\alpha}}\right)\right)\right\}$$
$$= A \qquad (3)$$

ここで $\eta$  は水面変位, $u_a$  は水深 $z_a$ =-0.531hにおける水 平流速,hは水深,gは重力加速度である.計算領域は沿 岸方向7840m,岸沖方向2510mの領域とし,メッシュ幅 は10mとした.



#### (2) 土砂輸送場解析

得られた結果を用いて山元海岸における2時間分の地 形変化量を求めた.摩擦速度および底面せん断力はそれ ぞれ式(4), (5)を用いた.

$$\frac{u_b}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0} \tag{4}$$

$$\tau_b = \rho u_* |u_*| \tag{5}$$

ここで $u_b$ は底面流速,u・は摩擦速度, $z_b$ は粗度高さ,Kは カルマン定数である.ここでKajiura(1968)の式を用いて, 排除厚 $\delta$ 式(6)と境界層厚さの関係を求めると,式(7)の ようになる.

$$\delta^* = \frac{\hat{U}}{\sigma}C = \frac{T\hat{U}}{2\pi}C \tag{6}$$

$$\delta \cong \frac{\kappa}{\sqrt{C}} \delta^* \tag{7}$$

ここで $\hat{U}$ は流速の振幅, *C*はKajiura(1968)によって定義 された摩擦係数である.いま, *K*=0.4, *C*=0.01と仮定 すると式(8)のようになる.

$$\delta = 4\delta^* \tag{8}$$

砕波点付近では $\delta^* \cong 1.0 \text{cm}$ となるので、境界層は約4cm と算出される. これより摩擦速度は式(4)のzを境界層厚 さ $\delta$ に置き換えた式(9)で計算した.

$$\frac{u_b}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{\delta}{z_0} \tag{9}$$



図-8 山元海岸の地盤高変化(a)数値計算結果(夏季の波浪条件使用),(b)数値計算結果(冬季の波浪条件使用),(c)2004年2月~2005 年11月の観測値,(d)2004年11月~2005年2月の観測値



図-9 山元海岸の流れ場分布. (a)夏季の波浪条件使用, (b)冬季の波浪条件使用(表-1参照)

また, 漂砂量を求めるためにMayer-Peter and Muller (1948)の定常流における漂砂量式(10)を用いた.

$$\Phi = 8(\theta_a - \theta_{ar})^{1.5} \tag{10}$$

ここで $\theta_{e}$ はShields数, $\theta_{e}$ は限界Shields数(=0.05)で ある.ちなみにこの式を半周期平均し変形すると,式 (11)のようになり,観測結果と相関の高いSoulsby(1997) の振動流における漂砂量式(12)と近い結果となる.

$$\Phi_{1/2} \cong 3.4\hat{\theta}_c^{1.5} \tag{11}$$

$$\Phi_{1/2} = 5.1(\hat{\theta}_w - \theta_{cr})^{1.5}$$
(12)

ここで $\theta_{u}$ は波によるShields数である.

## (3) 観測結果との比較

数値計算により得られた季節毎の地盤高変化及び現地 観測による地盤高変化を図-8(a)~(d)に、季節毎の波浪 条件を用いて計算した流れ場分布図-9(a)~(b)に示す。

図-8(a)と(c)を比較したところ,夏季の波浪条件のも とで領域内北側における堆積傾向やヘッドランド先端よ りやや沖側付近(水深5~10m付近)の堆積域を再現でき た.この領域は沿岸漂砂の通り道と考えられる.また, その他の汀線付近では侵食傾向にあった. これは対象領 域が侵食海岸であることを示している. 砂村ら(1974)の 式(13)によると,山元海岸は平常時の穏やかな波浪状況 でも侵食が進む海浜地形であるが,そのこととも合致す る.

$$\frac{H_0}{L_0} = C_s (\tan\beta)^{-0.27} \left(\frac{d}{L_0}\right)^{0.67}$$
(13)

図-8(b)と(d)を比較したところ,冬季の観測結果に見 られた対象領域全体に広がる侵食傾向が,計算結果によっ て再現されていた.冬季は低気圧の通過などにより荒天 の日が多く,沖向き漂砂によって地形が急激に侵食され ることから(例えば,加藤ら,1992),図-9(b)のような 強い沖向きの流れが卓越し,これによって汀線周辺のヘッ ドランド基部から沖側に土砂が運ばれたと考えられる. またヘッドランドの先端付近でも堆積域やその更に奥側 (水深10m付近)の侵食域も定性的には再現できたが,定 量的な再現には至らなかった.

# 5. まとめ

ヘッドランドが既設され,現在も建設が進められてい る山元海岸を対象として,ヘッドランド周辺の地形変化 特性およびヘッドランドの効果について調べ,以下の結 果がえられた.

- 山元海岸における3年間の地形変化からヘッドランドの先端よりやや沖側付近では堆積傾向に各ヘッドランド間ではやや侵食傾向にあった。
- 山元海岸では夏季はヘッドランドの先端付近で堆積傾向に、冬季は領域全体が侵食傾向にあった.
- ・数値計算の結果,夏季は卓越した北向きの沿岸流が、
  冬季は強い沖向きの流れが再現できた。
- ・数値計算の結果,季節ごとによる侵食堆積の傾向は再

現できたが、定量的な再現には検討の余地がある.

謝辞:本研究を行うにあたり,数値計算に関して Budianto Ontowirjo氏の多大なるご協力をいただきまし た.ここに記して謝意を申し上げます.

## 参考文献

- 宇多高明・斉藤光司・横田喜一郎・大原茂・川中島洋二・内 田恵三(1994):大野鹿島海岸のヘッドランド周辺の海浜 流の観測,第41回海岸工学論文集, pp.576-580.
- 宇多高明・青木高臣・星上幸良・古池 鋼・長山英樹(2007): ヘッドランドの沿岸漂砂阻止機能の定量的評価,海洋開 発論文集,第23巻, pp.1237-1242.
- 加藤一正・柳嶋慎一(1992):長周期波によるバーム侵食,土 木学会論文集, No.452, pp41-50.
- 佐藤慎司・山本幸次・和田一範・伊澤武仁・大谷靖郎・橋本 新+(1998):大曲海岸におけるヘッドランド周辺の漂砂 観測と海浜変形予測,第45回海岸工学論文集, pp.556-560.
- 田中茂信・山本幸次・鴨田安行・柳町俊章・小野松輝美・後 藤英生(1995):仙台湾南部海岸における土砂移動機構の 観測,第42回海岸工学論文集,pp.666-670.
- 堀川清司・砂村継夫・近藤浩右(1974):波による二次元海浜 変形に関する実験的研究,第21回海岸工学論文集, pp.193-200.
- 三浦佑輔・有働恵子・真野明(2007):仙台湾南部海岸におけ る海浜変形特性,第54回海岸工学論文集,pp.716-720.
- Kajiura K (1968): A model of the Bottom Boundary Layer in Water Waves, Bulletin of the Earthquake Research Institute, Vol.46, pp.75-123.
- Mayer-Peter, E., M?ller, R., (1948) : Formulas for bed-load transport. Report on the 2nd Meeting International Association Hydraulic Structure Research. Stockholm, Sweden, pp39-64.
- Soulsby, R., (1997) : Dynamics of Marine Sands, A Manual For Practical Applications. Thomas Telford, H.R. Wallingford, England, ISBN 0-7277-2584X
- Wei, G., J.T.Kirby, S.T.Grilli and R.Subramanya (1995) : A fully nonlinear Boussinesq model for surface waves. Part 1. Highly nonlinear unsteady waves, Jour. Fluid Mech., vol. 294, pp.71-92.