移流拡散による土砂供給と沿岸・岸沖漂砂による粒径分級を 考慮した等深浅変化モデル

N-line Model Considering the Effects of the Beach Nourishment and Sorting of the Mixed Sand due to the Longshore and Cross-Shore Sand Transport

澁谷容子¹·黒岩正光²·松原雄平³

Yoko SHIBUTANI, Masamitsu KUROIWA and Yuhei MATSUBARA

The artificial beach nourishment method has been accepted as one of the protection works from beach erosions. For the long term coastal management, it is need to estimate the coastal changes in the future using the beach profile model. When the beach nourishment is carried out, the characteristics of the injected sands are often different from those of the local sands. In this study, the N-line model considering the effects of the beach nourishment and sorting of the mixed sand due to longshore and cross-shore sand transport is suggested. The transport of the nourished sand is estimated by solving the two-dimensional advection diffusion equation. The change of content rate of each grain size is calculated, the result of the numerical model is compared with experimental data.

1. 緒言

養浜事業を実施する際に最も肝要なことは,投入した 土砂が当該海岸にどの程度留まり,等深線あるいは汀線 の回復に寄与するかどうかである.特に対象海域の漂砂 系外から土砂を運び入れた場合,投入土砂の特性値の違 いにより,投入後の地形変化は現地土砂を投入した場合 と異なってくると考えられる.

これまで,こうした土砂投入による海浜地形変化を予 測するモデルとして,澁谷ら(2008)は,投入土砂の移 動を移流拡散方程式で予測する等深線変化予測モデルを 開発している.しかし,このモデルは,単一粒径の投入 土砂を前提とした養浜時の地形変化モデルであって,さ まざまな粒径が混入する養浜工の実態を再現していない という課題が残されていた.そこで澁谷ら(2009)は, 土砂供給と混合粒径砂による分級を取り入れた等深線変 化モデルを示した.このモデルは,投入後の土砂移動量 を2次元移流拡散方程式により算出するものであるが, 沿岸漂砂のみを対象としていた.

一方で,熊田ら (2005) は,岸沖漂砂ならびに混合粒 径を考慮した等深線変化モデルを提案しているが,土砂 投入とその移動・拡散過程については,必ずしも説明的 なモデルとなっていない.そこで,本研究は,澁谷ら (2009)のモデルに岸沖漂砂の寄与分を付加するととも に,その適用性について解析的ならびに数値実験的に検

1	学生会員	修(工)	鳥取大学大学院工学研究科社会基盤工学
2	正会員	博(工)	専攻 鳥取大学准教授 大学院工学研究科社会
3	正会員	工博	基盤工学専攻 鳥取大学教授 大学院工学研究科社会基
			盤工学専攻

証するものである.

2. 数値モデル

本モデルでは澁谷ら(2009)に示すように,間瀬ら (1999)の回折を考慮したエネルギー平衡方程式を用い て波浪場の計算を行い,沿岸漂砂量に加えて岸沖漂砂量 を算定して地形変化計算を行う.

(1) 漂砂量の計算

a)沿岸漂砂量

澁谷ら(2009)と同様,熊田ら(2002)の混合粒径砂 による分級過程を考慮し、さらにKamphuisら(1986)に よる粒径の大きさを考慮した漂砂量係数を導入した.ま た沿岸漂砂量公式には小笹・Brampton公式(1979)を適 用した.

b)岸沖漂砂量

粒径毎の岸沖漂砂量は,熊田ら(2003a)より波浪エ ネルギーフラックスの岸沖成分から算定し,粒径毎の岸 沖漂砂量式を次式に示す.

$$\mathcal{Q}_{x}^{(L)} = \mu^{(L)} A_{x}^{(L)} H_{bs}^{2} C_{gb} \hat{K} \cos^{2} \alpha_{bs} \sin \overline{\beta} \cdot \left(\frac{\cot \beta}{\cot \beta_{c}^{(L)}} - 1 \right)$$
.....(1)

ここに, C_{gb} および a_{bs} は砕波点における群速度および 波向きを表す. $\mu^{(L)}$ は交換層内の粒径毎の体積含有率 (L=1...NN), $A_x^{(L)}$ はKamphuis *et al.* (1986) による粒径に関 する係数で, 次式より求めた.

ここに, A_d は粒径の大きさに関する係数, $d_{50}^{(L)}$ は粒径 毎の中央粒径である.また, $\overline{\beta}$ は初期勾配, cot β は海底 勾配の逆数, $\beta_c^{(L)}$ は粒径毎の平衡(安定)勾配である. 式(1)中の*K*は以下で表される.

 $\hat{K} = AK / \left\{ 8(\rho_s / \rho - 1)(1 - \lambda) 1.416^{5/2} \right\} \dots (3)$

ここに*ρ*, *ρ*_sは海水と砂の密度, λは空隙率, *AK*は無 次元の岸沖漂砂量係数である.

(2) 投入土砂の計算

澁谷ら(2009)と同様に,投入された土砂は沿岸・岸 沖方向に拡散しつつ,沿岸流と波の作用により輸送され るものと考え2次元の移流拡散方程式により表す.

(3) 等深線変化の計算

岸沖方向をx,沿岸方向をyとすると,粒径毎の等深線 変化計算の基礎式を以下に表す.

$$\frac{\partial x_m^{(L)}}{\partial t} = -\frac{1}{h_{mx}} \frac{\partial q_{mx}^{(L)}}{\partial x} - \frac{1}{h_{my}} \frac{\partial q_{my}^{(L)}}{\partial y} + q^{(L)} \frac{(m=1...N)}{(L=1...NN)} \cdots (4)$$

ここに,mは等深線番号,Nは等深線の本数,NNは粒 径数である. $x_m^{(L)}$ はm番目の粒径毎の等深線位置(m), h_{mx} および h_{my} はm番目の等深線における岸沖・沿岸方向の砂 の移動高さ(m), $q_m^{(L)}$ および $q_{my}^{(L)}$ はm番目の粒径毎の等深 線の岸沖・沿岸漂砂量である.また, $q^{(L)}$ は投入土砂の計 算により得られた養浜土砂による寄与分である.

全粒径の等深線変化量*X*_mは粒径毎の変化量を合計して 次式となる.

$\partial X_m = \sum_{m=1}^{NN} \partial x_m^{(L)}$	$(m = 1 \dots N)$	(5)
$\frac{\partial t}{\partial t} = \sum_{L=1}^{n} \frac{\partial t}{\partial t}$	(L = 1NN)	(3)

(4) 含有率変化の計算

澁谷ら(2009)同様,熊田ら(2002)の粒径毎の土砂 収支式を用いて算定する.

3. 数値実験および室内実験結果との比較による モデルの検証

(1) 数値実験による検証

図-1のような一様勾配地形において両端を固定境界とし,波を斜め入射させる.底質は中央粒径0.2mmと0.4mmの砂を1:1で混合させ,海底勾配は1/50とした.用いた波浪条件および各種係数は表-1に示す.

図-2は、養浜に伴う土砂投入を行わずに計算を行った 2年後の結果である.図-2(a)より流れの上手側で侵食、 下手側で堆積していること、図-2(b)の粒径の平面分布 より混合粒径砂の分級が確認できる.さらに、この等深 線を初期地形として1年後の計算を行った.養浜を行っ た場合と行わなかった場合の等深線変化結果の一部を取 り出したものが図-3であり、養浜は中央粒径 dd50=0.4mm の養浜砂を10日間で20000m³投入した.土砂投入位置は 侵食域の水深0.8m付近である.

図-3より、養浜土砂により侵食域において等深線の前



表-1 計算条件

$H_{s}(m)$	T _s (s)	α (°)	$A_{d}(m^{0.5})$	$C_{ld}(m^{0.5})$
1.20	7.0	5.0	0.016	0.014
<i>B</i> (m)	U_s	V _s (m/s)	$Kx(m^2/s)$	Ky(m²/s)
5.0	0.023	0.00123	0.00057	0.0023
K_1	<i>K</i> ₂	AK		
0.2	0.324	0.2		





進あるいは回復が確認できる.養浜位置に近い,土砂移 動の上手側で等深線の回復は顕著であるが,他の領域で は僅かであった.図-4は,養浜砂の中央粒径ddsg=0.4mm の土砂を養浜した場合の中央粒径の平面分布である.投 入地点から沖に向かって粒径が粗くなっており,投入さ れた土砂は波と流れの作用により沖へ運ばれたと考えら れる.次に,養浜砂にddsg=0.2mmの砂を用いた場合の結 果を図-5および図-6に示す. dd₅₀=0.4mmの砂を養浜した 場合同様に図-2(a) を初期地形として土砂投入1年後の 計算を行った.図-5より養浜による等深線の前進量は, dd₅₀=0.4mmの砂を養浜した場合よりも少ないが,養浜位 置より沖側の侵食域で等深線が前進している.図-6より dd₅₀=0.4mmの砂を養浜した場合とは逆に,養浜地点から 沖に向かって中央粒径の細かい砂が広がっている.以上 のことより,投入土砂の移動速度にもよるが,計算条件 の範囲内では,投入された土砂は急速に沖に運ばれるこ とから,回復を期待する場所より岸側に養浜を行う必要 があることがわかる.









(2) 室内実験結果との比較

熊田ら(2003b)の実験は幅400cm,海底勾配1/10の直 線状海岸を混合粒径砂(中央粒径*d₅₀=*0.2mmと2mmの砂 を体積比1:1で混合)で造り,砕波波向き10°の沿岸漂砂 を卓越させるため,波の入射方向に対して海岸線を18° 傾けて整形し,*H₀=*4.0cm,*T*=0.8secの規則波を安定形に 至る10時間まで作用させている.本計算に用いた波浪条 件および各係数を表-2に示す.

図-7は10時間後の等深線の一部を抽出し実験結果と計 算結果を比較したものである.なお,計算結果は,養浜 はないものとし,沿岸漂砂に加えて岸沖漂砂の影響を考 慮して得られたものである.これより,標高4cmから水 深6cmにかけて等深線間隔が広がり,本計算結果は,実 験結果ならびに澁谷ら(2009)の結果とほぼ一致するこ とがわかる.

表-2 計算条件

H _s (m)	T _s (s)	α (°)	$A_{d}(m^{0.5})$
4.0	0.8	0	0.2
K ₁	K2	AK	B(cm)
0.2	0.324	0.2	30



図-7 10時間後の等深線変化(一部抽出)



また,侵食域(Y=20cm)と堆積域(Y=380cm)におけ る岸沖断面の中央粒径分布を図-8に示す.図-8(a)より 侵食域において,本モデルは実験結果をよく再現してい る.図-8(b)堆積域では,X=80cm付近で実験結果の一 部にばらつきがみられるものの,計算結果との傾向は一 致し,細粒化が再現されている.一方,X=220cm付近で, 実験結果は逆に中央粒径が粗粒化している.これは,熊 田ら(2003b)より実験においては粗砂のアーマリング効 果が生じていることが原因と考えられる.以上のことか ら,本モデルは概ね実験結果を再現することができた.

4. 現地適用

最後に本モデルを字多ら(2008)の現地観測結果に適 用しモデルの検証を行う.字多ら(2008)は九十九里浜 南部に位置する一宮海岸において,およそ60日間かけて 20,460m³の土砂を水深6m付近に投入し,その観測をナロ ーマルチビームによって行った.本計算では,初期地形 を簡単のため平行等深線とし,底質は d_{50} =0.1,0.15, 0.2mmの3粒径の砂を体積比3:4:3で混合させた.波浪条 件は調査が行われた期間(2007年3月9日から2007年8 月6日まで)の有義波高 $H_{1/3}$ =1.26m, $T_{1/3}$ =8.06sを用い, 波向きは5°とした.土砂投入は60日間かけて20,000m³ の土砂が沿岸方向350m,岸沖方向380m(水深6m付近) の地点にポイントソースとして置かれたと想定した.養 浜砂は宇多ら(2008)を参考に dd_{50} =0.15mmとした.計 算条件を表-3に示す.

土砂投入開始から2ヵ月後(土砂投入完了後)の等深 線変化(計算結果および現地観測結果)を図-9に示す.

表-3 計算条件

$H_{s}(m)$	$T_{s}(s)$	α (°)	$A_{d}(m^{0.5})$	$C_{ld}(m^{0.5})$
1.26	8.06	5.0	0.016	0.014
<i>B</i> (m)	U_{S}	V _s (m/s)	$Kx(m^2/s)$	$Ky(m^2/s)$
5.0	-0.0005	0.00015	0.00057	0.0023
K_1	<i>K</i> ₂	AK		
0.2	0.324	0.2		

水深6mの等深線が舌状に前進しており現地観測結果と 同様の計算結果が得られた.図-10には土砂投入完了か らさらに3ヶ月後(土砂投入開始から5ヶ月後)の等深 線変化の計算結果(図-10(a))および実測結果(図-10(b)) を示す.土砂投入完了時に舌状に突出していた等深線が 徐々に後退し元の地形に戻りつつある状況を示してお り,現地観測結果も同様の傾向にある.





投入土砂の時間的変化を図-11(a)~(c)に示す.ポイント ソースとして同一地点に連続的に投入され,土砂が徐々 に拡散しつつ沿岸方向に移動していることがわかる.こ の連続投入により,図-9(a)のような舌状の突出ができ たものと考えられる.

5. 結語

本研究では、養浜された海浜において沿岸方向ならび に岸沖方向の土砂移動と粒径の分級効果を考慮したモデ ルを提案し、その適用性について検討した.得られた結 果を以下に示す.

1) モデル地形での計算より, 養浜は等深線の回復に効



(-) -----



果的であること,また養浜砂の粒径はその後の地形変 化に大きく影響することがわかった.

- 2) 熊田ら(2003b)の実験結果との比較より本モデルは 実験結果を概ね再現できた.
- 3)九十九里浜において、養浜の現地観測データをもと にその適用性を検討し、概ね現地スケールの計算が可 能であることがわかった。
- 4)最後に土砂の移動速度の同定については未だ課題が 残っているため、詳細なデータとの比較等を行い、更 なるモデルの向上に努める。

謝辞:本研究を遂行するにあたり,波浪場の計算におい ては,間瀬ら(1999)を参考にさせて頂いたことをここ に記して感謝いたします.

参考文献

- 小笹博昭 · A.H.Brampton (1979) : 護岸のある海浜のてい線 変化計算,港湾技術研究所報告,第18巻,第4号, pp. 77-104.
- 宇多高明・河野茂樹(1996):海浜変形予測のための等深線 変化モデルの開発,土木学会論文集,No539/II-35, pp.121-139.
- 宇多高明・田代洋一・長山英樹(2008):ナローマルチビー ム測量による沖合養浜時の土砂移動観測,海岸工学論文 集,第55巻, pp.776-780.
- 熊田貴之・小林昭男・宇多高明・芹沢真澄・星上幸良・増田 光一(2002):混合粒径砂の分級過程を考慮した海浜変 形モデルの開発,海岸工学論文集,第49巻, pp.476-480.
- 熊田貴之・小林昭男・宇多高明・芹沢真澄(2003a):沿岸・ 岸沖漂砂による粒径分級を考慮した等深線変化モデル, 海岸工学論文集,第50巻, pp.481-485.
- 熊田貴之・小林昭男・酒井和也・柴崎 誠・宇多高明・芹沢 真澄(2003b):沿岸漂砂卓越場における混合粒径砂の3 次元分級に関する実験と計算,海洋開発論文集,第19巻, pp. 905-910.
- 澁谷容子・黒岩正光・松原雄平(2008):養浜土砂の移流拡 散を考慮した等深線変化予測モデルに関する研究,海岸 工学論文集,第55巻,pp.761-765.
- 澁谷容子・黒岩正光・松原雄平(2009):混合粒径砂による 分級と移流拡散による土砂投入を考慮した等深線変化モ デル,海洋開発論文集第25巻,pp.1131-1136.
- 間瀬 肇・高山知司・国富将嗣・三島豊秋 (1999) : 波の回 折を考慮した多方向不規則波の変形計算モデルに関する 研究,土木学会論文集,第628号,Ⅱ-48, pp.177-187.
- Kamphuis, J.W., M.H.Devies, R.B.Narin and O.J.Syao(1986) : Calculation of littoral sand transport rate, Coastal engineering, Vol.10, pp. 1-12.