

# 実海岸を対象とした底質移動及び海底地形変化に関する数値実験

水工学研究室 川邊 真  
指導教官 細山田 得三

## 1. はじめに

近年、台風・冬季波浪などの厳しい波浪条件や、漂砂現象、海岸自体の地盤沈下等によって年々砂浜が減少する海岸が多い。

日本海に面した海岸では冬季の風浪から海岸を保全するため、種々の形状の海岸構造物が建設されている。従来、このような海岸構造物の設置などを行うために模型実験が行われていたが、大規模な施設、多大な労力・時間を必要とすると共に、実在の流れの再現性、模型縮尺の問題等があり、その信頼性は完全なものではない。近年は、模型実験の替わりとしてコンピュータによる数値シミュレーションが盛んに行われるようになってきた。そこで本研究では実海岸を対象とした数値シミュレーションを行い、得られた結果と旧運輸省 第一港湾建設局 新潟調査設計事務所 水理実験場で行われた模型実験の結果とを比較し、本研究で用いた数値モデルの妥当性を検討する。

## 2. 数値計算法

本数値計算では、波動場、海浜流場、海底地形変化の支配方程式を1つの時間ステップ内で計算することにより、各要素が互いに影響しながら時間発展するようにしている。

### 2.1 波動場の計算

本研究では、平面2次元の波浪場における基礎方程式の連続式(1)と修正ブシネスク方程式(2),(3)を用いて波動場の計算を行った。

連続式と運動量方程式

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial Q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q_x^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{Q_x Q_y}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + MD \\ & = \left( B + \frac{1}{3} \right) h^2 \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial^2 Q_x}{\partial t \partial x} + \frac{\partial^2 Q_y}{\partial t \partial y} \right) + Bgh^3 \left( \frac{\partial^3 \eta}{\partial x^3} + \frac{\partial^3 \eta}{\partial x \partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial Q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q_x Q_y}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{Q_y^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + MD \\ & = \left( B + \frac{1}{3} \right) h^2 \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial^2 Q_x}{\partial t \partial x} + \frac{\partial^2 Q_y}{\partial t \partial y} \right) + Bgh^3 \left( \frac{\partial^3 \eta}{\partial y^3} + \frac{\partial^3 \eta}{\partial y \partial x^2} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

ここで  $Q_x, Q_y$  は  $x, y$  方向の線流量、 $\eta$  は水面変動量、 $h$  は静水深、 $B$  はブシネスク方程式の形による定数

( $=1/21$ )、 $D$  は全水深、 $t$  は時間、 $MD$  は砕波による運動量減衰項である。

砕波による運動量減衰項は式(4),(5)を用いて計算する。

$$MD_x = v_e \left( \frac{\partial^2 Q_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Q_x}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

$$MD_y = v_e \left( \frac{\partial^2 Q_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Q_y}{\partial y^2} \right) \quad (5)$$

ここで  $v_e$  は渦動粘性係数であり式(6),(7)で示される。

$$v_e = \frac{gd}{\sigma^2} f_D = \frac{\alpha_D sgd}{\sigma^2} \sqrt{\frac{g(Q - Q_r)}{d(Q_s - Q_r)}} \quad (6)$$

$$v_e = 8 \times 10^{-4} \sqrt{gd} \frac{d}{s} \quad (7)$$

ここで  $f_D$  は砕波減衰係数、 $\alpha_D$  は砕波帯で 2.5 となる係数、 $\sigma$  は角周波数、 $Q_s, Q_r$  は次式である。

$$\left. \begin{aligned} Q_s &= 0.4(0.57 + 5.3s) \sqrt{gd^3} \\ Q_r &= 0.135 \sqrt{gd^3} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

ここで  $s$  は海底勾配、 $d$  は平均水深である。本研究では、砕波帯内での地形変化の現象も対象としているため、砕波点の計算を行う必要があり、砕波点の決定は式(6)の平方根内の符号が正であれば砕波したと判定、負であれば砕波しないと判定する。そして、砕波したと判定されれば式(4)、(5)を考慮し、式(6)の渦動粘性係数を用いて運動量方程式を解くようにした。また、砕波しないと判定した場合には式(7)を用いる。

本研究では砕波による運動量減衰以外にも海底摩擦による運動量減衰も考慮した。この海底摩擦による運動量減衰は次式で計算される。

$$\tau_x = \frac{gn^2 \times U \sqrt{U^2 + V^2}}{h^{1/3}} \quad \tau_y = \frac{gn^2 \times V \sqrt{U^2 + V^2}}{h^{1/3}} \quad (9)$$

ここで  $n$  はマンニングの粗度係数、 $U, V$  は  $x, y$  方向の断面平均流速である。

### 2.2 海浜流場の計算

海浜流は地形変化に影響を及ぼす要因である。本研究では、海浜流の底面流速を数値計算における代

表的な抵抗則であるバルク公式と Manning 公式の 2 式から底面流速を導く式を誘導し、これから求めるケースと、微小振幅波理論に基づいた伝達関数から求めるケースの 2 ケースについて行った。抵抗則を用いるケースは式(10)、伝達関数を用いるケースは式(11)を用いることで、底面流速を求めている。

$$u_b = \sqrt{\frac{gn^2/h^{1/3}}{f_c}} \times U \quad v_b = \sqrt{\frac{gn^2/h^{1/3}}{f_c}} \times V \quad (10)$$

$$u_b = U \times \alpha \quad v_b = V \times \alpha \quad (11)$$

ここで  $f_c$  は海底摩擦係数、 $\alpha$  は伝達関数である。

### 2.3 底質移動及び海底地形変化の計算

本研究ではベイラードによって提案された、海浜流底面流速をもとに浮遊砂量、掃流砂量といった局所漂砂量を求めるモデル、式(12),(13)を適応し、式(14)によって体積漂砂量とその分布を求めた。

$$\bar{q}_B = \frac{C_f \varepsilon_B}{(\rho_s / \rho - 1) g \tan \phi} \left( \bar{u}_b |\bar{u}_b|^2 - \frac{s}{\tan \phi} |\bar{u}_b|^3 \bar{i} \right) \quad (12)$$

$$\bar{q}_S = \frac{C_f \varepsilon_S}{(\rho_s / \rho - 1) g w_s} \left( \bar{u}_b |\bar{u}_b|^3 - \frac{\varepsilon_S s}{w_s} |\bar{u}_b|^5 \bar{i} \right) \quad (13)$$

$$\bar{q} = \bar{q}_B + \bar{q}_S \quad (14)$$

ここで  $q$  は体積漂砂量、 $q_B$  は掃流砂量、 $q_S$  は浮遊砂量、 $\rho_s$  は底質の密度、 $\rho$  は水の密度、 $C_f$  は抗力係数、 $\tan \phi$  は底質の内部摩擦角、 $w_s$  は底質の沈降速度、 $\varepsilon_B, \varepsilon_S$  はそれぞれ掃流砂、浮遊砂に対する無次元定数、 $u_b$  は海浜流底面流速である。上記に示した式によって求められた体積漂砂量を局所的な勾配の影響を考慮した修正式(15)によって修正し、底質の連続式(16)で地形変化の計算を行う。

$$\bar{q}_m = \bar{q} + \varepsilon |\bar{q}| \nabla \cdot z_b \quad (15)$$

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = (\lambda - 1) \nabla \cdot \bar{q}_m \quad (16)$$

ここで  $q_m$  は局所漂砂量、 $\lambda$  は底質の空隙率、 $z_b$  は地盤標高、 $\varepsilon$  は局所的な勾配の影響を表す係数である。

### 3. 計算対象

本研究が対象とした実海岸は全国的にも浸食性海岸として有名な新潟西海岸で、図-3-1 に示す。計算領域は岸沖方向 2550 m、沿岸方向 2300 m の領域を格子幅  $dx, dy = 5.0 m$  の矩形格子で覆い、460,510 の領域とした。入射波には、実海象波浪である多方向不規則波を用いた。波浪条件は有義波高  $H_{1/3}$  が 4.0 m、有義波周期  $T_{1/3}$  が 9.0 s、波向きは計算領域に対して主波向  $12^\circ$  である。これらを条件として多方向不規則波の発生に必要となる周波数スペクトル (Bretschneider-光型周波数スペクトル) 及び方向

分布関数の積である方向スペクトルを求め、次いでこれを用いて各成分波を重ね合わせて入射波の時系列を作成した。なお、計算時間間隔は 0.1 秒である。

本研究では実地形を取り込むために模型実験の模型床設計図を用いて、DEM の作成と構造物の抽出を行った。DEM は等深線をマウスでクリックして、標高を読み取っていき、各グリッドの標高を決めていく。標高の無いグリッドの標高は既知点との距離の逆数に関する重み付き平均によって求めていく方法で行っている。構造物の抽出には巻き付き判定法を用いて行った。巻き付き判定法とは、各グリッドの位置が構造物であるか流体部であるかを判別する方法で、物体の外形の凹凸に関係ない汎用性の高い方法である。

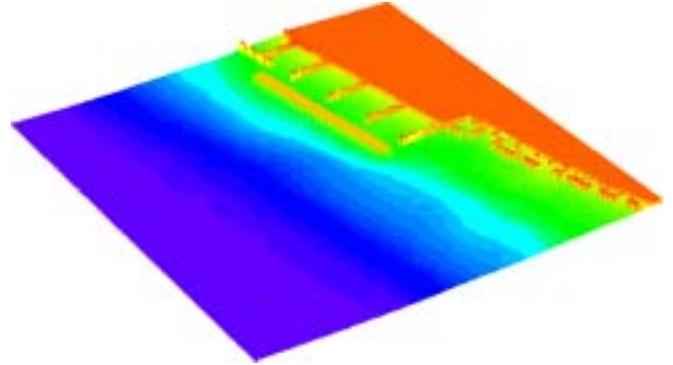


図-3-1 新潟西海岸の地形図

## 4. 計算結果

### 4.1 水位変動の計算結果

図-4-1 に計算開始から 35 分後の水位変動の瞬時値を可視化したものを示す。この結果より、沖側では多方向性、不規則性を持った波が発生しており、これより、多方向不規則波が発生していることが分かる。潜堤周辺では波高の減衰と波峰線が汀線に対して平行になる傾向が見られる。そして、突堤先端部、周辺では突堤による波の反射、回折によると考えられる波峰線の湾曲が見られる。

### 4.2 海浜流底面流速の計算結果

図-4-2 に計算開始から 3 時間 20 分後の海底摩擦係数 0.0026 のケースの海浜流底面流速の瞬時値のベクトル図を示す。また、図-4-3 に同時間経過後の伝達関数を用いたケースのベクトル図を示す。比較すると計算領域中央、突堤間で循環流が発生している、潜堤周辺では汀線に対して平行に流れる沿岸流が発生している、等の共通点が見られる。図-4-4 に潜堤周辺を拡大した海浜流底面流速の計算結果を、図-4-5 に模型実験で得られた海浜流底面流速の実験値を示す。比較すると、領域右から 2 本目までの突

堤までの海浜流の流況は一致しているが領域左側では不一致となっている。これは、模型実験では潜堤に開口部を設けているのに対して本研究では設けていないために起こった不一致であると考えられる。

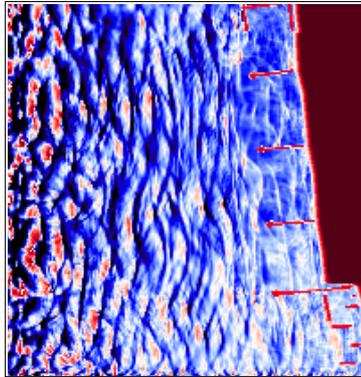


図-4-1 計算開始から35分後の水位変動の瞬時値

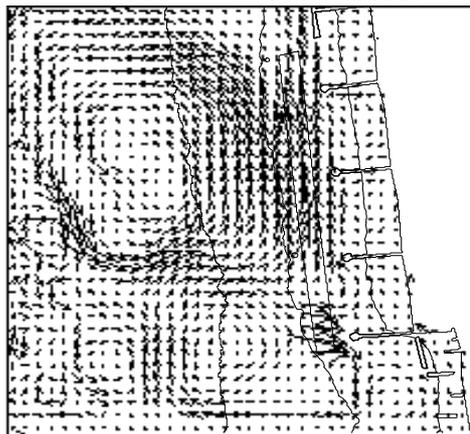


図-4-2 3時間20分後の海浜流底面流速(m/s)  
(海底摩擦係数 0.0026 のケース)

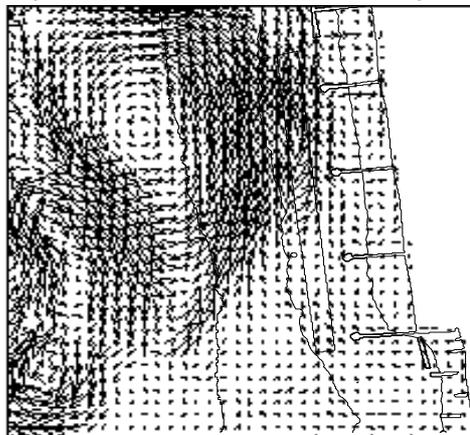


図-4-3 3時間20分後の海浜流底面流速(m/s)  
(伝達関数のケース)

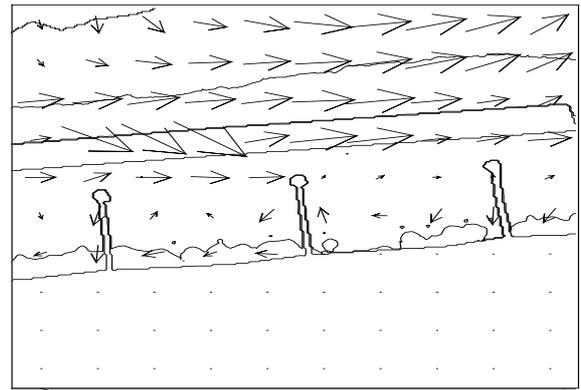


図-4-4 潜堤周辺の海浜流底面流速  
(海底摩擦係数 0.0026 のケース)

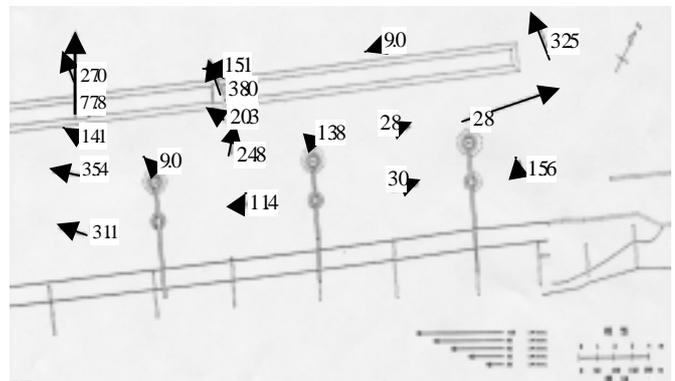


図-4-5 平面模型実験の海浜流底面流速の実験値

#### 4.3 地形変化の計算結果

図-4-6 に計算開始から3時間20分後の海底摩擦係数を用いたケースと伝達関数を用いたケースの地形変化の瞬時値を示す。比較すると、潜堤背後での局所的な洗掘の発生、また、地形変化の浸食、堆積の傾向がほぼ一致していることが分かる。これより、海浜流底面流速の導き方による、地形変化への影響はほとんど無いと考えられる。

図-4-7 に計算開始10時間後の地形変化の瞬時値(海底摩擦係数のケース)を示す。比較すると、潜堤背後で局所的な洗掘が発生している共通点が見られる。また、海底摩擦係数の大小による影響については、海底摩擦係数が小さくなるにつれて地形変化量が大きくなっていることが分かる。これは、海底摩擦係数が小さくなるにつれて、海底面における摩擦損失が小さくなり、流速が大きくなることから、底質の移動が促進されたためであると考えられる。また、先にも述べた潜堤背後での局所的な洗掘は新潟西海岸の实地観測で報告されたことと一致している。

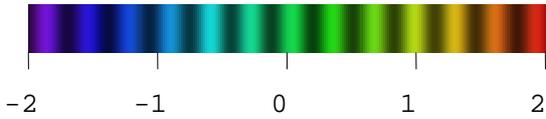
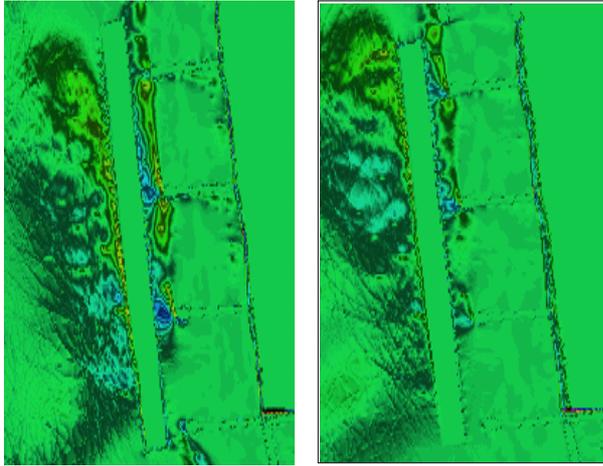


図-4-6 3時間20分後の地形変化

(左：海底摩擦係数 0.0026 右：伝達関数)

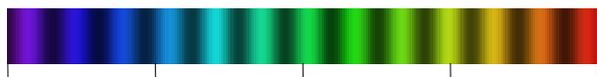
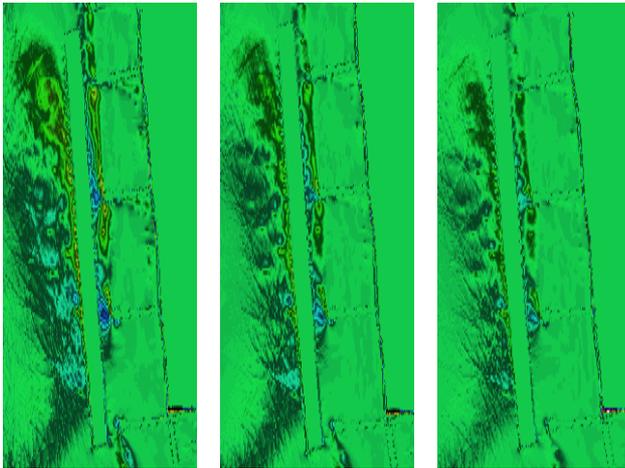


図-4-7 10時間後の地形変化(海底摩擦係数)

(左：0.0026 中：0.0035 右：0.004)

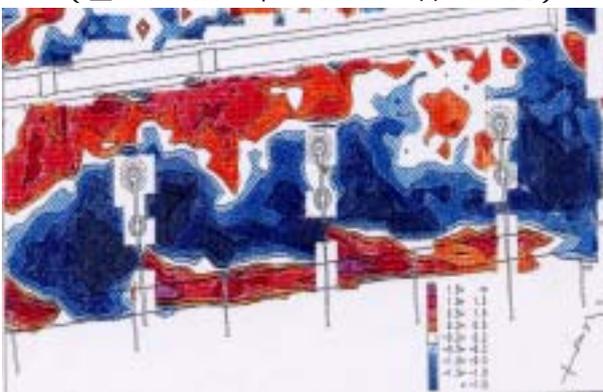


図-4-8 模型実験波作用10時間後の地形変化量

図-4-8 に平面模型実験の結果で波の作用時間 10 時間後の地形変化量を示す。

本研究で得られた結果と模型実験結果を比較すると、潜堤背後での局所的な洗掘の発生、汀線の後退現象などの定性的な一致が見られる。実現象との比較をすると、汀線の変化量が突堤間の中央付近で最大の後退量となっていることから、実現象と類似していると言える。そして、さらに時間発展させることにより汀線の後退現象の再現が可能となると考えられる。

## 5. 結論

本研究は実海象波浪である多方向不規則波を用いて、旧運輸省 第一港湾建設局 新潟調査設計事務所 水理実験場で行われた模型実験の結果と比較し、本研究で用いた数値モデルの妥当性について検討した。得られた結論は以下に示すとおりである。

- 1.修正ブシネスク方程式により、多方向不規則波を再現、計算することができた
- 2.上方程式により、波の屈折、回折、反射等の波の各現象を再現、計算することができた。
- 3.ベイラードによる漂砂モデルを時間発展させ、地形変化の計算をすることができた。
- 4.模型実験の結果と本研究で得られた結果には定性的な一致が見られた。

今後の検討課題としては、より実現象に近づけるため、時間に依存した方向スペクトルの作成、新潟県を対象とするならばさほど重要ではないと思われるが、潮汐の導入等が考えられ、これらを考慮することにより、より実現象に近づくことが期待される。

## 参考文献

- 1.土木学会、海岸工学委員会、研究現況レビュー小委員会(1994)：海岸波動(波・構造物・地盤の相互作用の解法),pp.72-78
- 2.佐藤慎司・Michael Kabilng(1993)：Boussinesq 方程式を用いた波浪・海浜流・海浜変形の数値計算,土木学会,海岸工学論文集,第 40 巻,pp.386-390
- 3.James A. Bailard(1981):An energetics total load sediment transport model for a plane sloping beach, journal of geophysical research, Vol,86, No. C11. pp.10938-10954