

露岩域を有する砂浜海岸に港湾を建設する場合の 3 次元海浜変形数値予測モデルの適用

池野 正明* ・清水 隆夫**・小林 英次***
石井 敏雅****・斉藤 知秀*****

1. はじめに

3 次元海浜変形モデルはこれまで幾つか提案され現地への適用性が調べられている。しかしながら、実際の海浜変形が問題となる海域には、砂層の下に岩礁がある場合や海底に露岩域が混在する場合も珍しくないため、この場合の岩礁上を通過する漂砂量を適切に算定できる 3 次元海浜変形モデルを開発する必要がある。そこで、本研究では、不規則波による浮遊漂砂量・掃流漂砂量モデルを実用化し露岩モデルを導入した 3 次元海浜変形モデルを提案する。ついで、平面実験により露岩モデルを検証した上で、東北電力(株)東通発電所建設地点において、露岩域を含む自然海浜から港湾が建設される過程を対象とした現地海域への適用性を検証する。また、3 次元海浜変形モデルと 1 ラインモデルを比較する。

2. 3 次元海浜変形モデルの概要と主な改良点

(1) 波浪場の計算モデル

本研究では、波浪外力の多方向不規則性・有限振幅性を考慮するため、前報(池野ら, 1998)と同様に、平面 2 次元の修正ブシネスク方程式(Madsen et al., 1991)に波別砕波による運動量拡散項(佐藤・Kabiling, 1994)を付加した式を用いて波浪場を計算する。得られた水深断面平均流速を任意の鉛直座標における水平流速に変換し(Nwogu, 1993), さらに、渦粘性モデルに基づき、砕波による戻り流れの鉛直分布を付加する。本研究では、入射波の周波数スペクトルは Bretschneider-光易型スペクトルを、その方向分布は光易型分布関数を仮定する。

(2) 浮遊漂砂量・掃流漂砂量モデルの実用化

池野ら(1998)は多方向不規則波浪の底面水平流速の時系列を入力値とした浮遊砂量・掃流砂量の時系列モデルを提案している。このモデルでは、浮遊砂量の計算の際、鉛直 1 次元移流・拡散方程式を解くために水深方向に計算メッシュを配置しなければならず、計算時間がか

かるので、本研究の目的のように、5 km 四方程度の計算領域を対象に 1～3 年程度の海底地形変化を計算するには、実用的とはいえない。そこで、本研究では、計算時間を短縮するために浮遊砂・掃流砂モデルの改良を行った。

底質の巻き上げ時の鉛直移流効果を考慮した 1 次元拡散方程式を時間平均すると、次式が導かれる。

$$w_s \frac{\partial \bar{c}(z)}{\partial z} + \epsilon_s \frac{\partial^2 \bar{c}(z)}{\partial z^2} + \frac{\bar{p}}{L_s} \exp\{-(z+h)/L_s\} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

上記の式(1)は、解析的に解くことができ、浮遊砂濃度の鉛直分布の解析解として、次式(2)が導かれる。

$$\bar{c}(z) = \bar{c}_0 \left[\left(\frac{1}{1 - \frac{\epsilon_s}{w_s L_s}} \right) \exp\{-(z+h)/L_s\} + \left(1 - \frac{1}{1 - \frac{\epsilon_s}{w_s L_s}} \right) \exp\{-w_s(z+h)/\epsilon_s\} \right] \quad \dots\dots\dots (2)$$

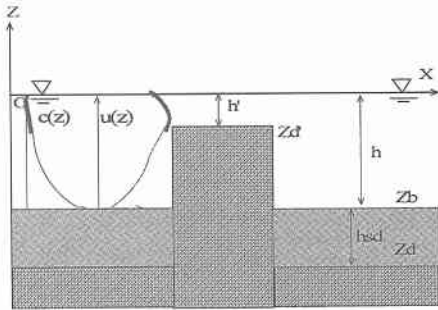
ここに、 $\bar{c}$ は浮遊砂濃度、 z は静水面上向き正の鉛直座標、 w_s は砂の沈降速度である。 ϵ_s と L_s は拡散係数と鉛直移流スケール長であり、Nielsen (1992) の提案式を用いる。 $\bar{c}_0$ は基準点濃度であり、大型海浜変形実験結果に基づく池野ら(2000)の提案式(3)を用いる。また、 $\bar{c}_0$ と巻き上げ量 $\bar{p}$ とは次式のような関係がある。

$$\bar{c}_0 = \frac{\bar{p}}{w_s} = A' \rho_w \frac{\max(\psi - 0.05, 0)^{1.5} \nu}{100 d \sqrt{\rho_s / \rho_w - 1} g d} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 ρ_w と ρ_s は流体と海底砂の密度、 g は重力加速度、 d は海底砂の粒径である。 ν は水の動粘性係数である。 A' は係数であり、大型海浜変形実験結果に基づき 3.0 とする。 ψ はシールズ数である。また、基準点濃度を与える鉛直高さは海底面上から砂粒径 d の 100 倍に設定する。

上記の式(2)を用いることにより、水深方向に層分割し各時間ステップ毎に鉛直 1 次元移流・拡散方程式を解くことなく浮遊砂濃度の鉛直分布(時間平均値)を算出できる。同じ鉛直高さにおける濃度と水平定常流速 $\bar{u}$, $\bar{v}$ を、水深方向にフラックス積分することにより、浮遊漂砂量が算定される。

* 正会員 工博 (財)電力中央研究所 我孫子研究所 環境科学部
** 正会員 工修 (財)電力中央研究所 我孫子研究所 環境科学部
*** 正会員 工修 (株)開発計算センター 科学システム第 1 部
**** 正会員 工博 東京電力株式会社 電力技術研究所
***** 正会員 工修 東北電力株式会社 土木建設部



図一 岩礁上を通過する漂砂フラックスの算定方法

$$\bar{q}_{sx} = \int_{-h}^0 \bar{c}(z) \bar{u}(z) dz, \quad \bar{q}_{sy} = \int_{-h}^0 \bar{c}(z) \bar{v}(z) dz \quad \cdots (4)$$

ここに、 x, y は岸沖・沿岸方向座標、 $\bar{q}_{sx}, \bar{q}_{sy}$ は x, y 方向の浮遊漂砂量（時間平均値）である。

つぎに、池野ら（1998）のモデルでは、佐藤・Kabiling（1994）の掃流砂量式を用いていたが、上記の浮遊漂砂量の算定法と整合させるため、時間平均後の掃流漂砂量を算定するために変形し整理すると、次式が導かれる。

$$\bar{q}_{bx} = \alpha_b \cdot A \cdot B^{1.5} \cdot f_w^{1.5} \cdot \bar{u}_b^3 + \alpha_b \cdot A \cdot B^{1.5} \cdot f_w^{1.5} \cdot \bar{u}_b \bar{v}_b^2 - \alpha_b \cdot A \cdot B^{0.5} \cdot f_w^{0.5} \cdot \phi_c \cdot \bar{u}_b \cdots \cdots (5)$$

$$\bar{q}_{by} = \alpha_b \cdot A \cdot B^{1.5} \cdot f_w^{1.5} \cdot \bar{u}_b^2 \bar{v}_b + \alpha_b \cdot A \cdot B^{1.5} \cdot f_w^{1.5} \cdot \bar{v}_b^3 - \alpha_b \cdot A \cdot B^{0.5} \cdot f_w^{0.5} \cdot \phi_c \cdot \bar{v}_b \cdots \cdots (6)$$

ここに、 $\bar{q}_{bx}, \bar{q}_{by}$ は x, y 方向の掃流砂量（時間平均値）、 α_b は係数で 1.0、 f_w は摩擦係数、 ϕ_c は掃流限界シールズ数でここでは 0 とする。上記式中の右边第 1, 2, 3 項中の “ $-$ ” は流速諸量の時間平均を意味する。また、 A, B は式中の値を次のように置き換えたものである。

$$A = \sqrt{(\rho_s/\rho_w - 1)gd^3}, \quad B = \frac{1}{2(\rho_s/\rho_w - 1)gd} \quad \cdots \cdots (7)$$

上記式（5）、（6）を用いて掃流漂砂量が算定される。

全漂砂量は、浮遊漂砂量と掃流漂砂量の和により算定される。

$$\bar{q}_x = \bar{q}_{sx} + \bar{q}_{bx}, \quad \bar{q}_y = \bar{q}_{sy} + \bar{q}_{by} \quad \cdots \cdots (8)$$

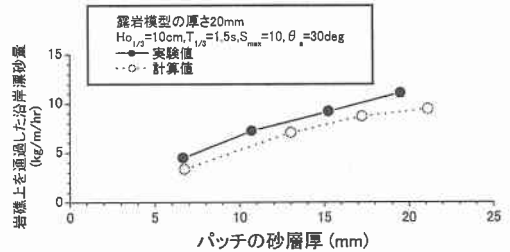
ここに、 $\bar{q}_x, \bar{q}_y$ は x, y 方向の全漂砂量（時間平均値）である。

（3）露岩域における漂砂量と地形変化のモデル化

まず、岩盤上の砂層厚 h_{sd} を次のように定義する。

$$h_{sd} = z_b - z_d \quad (z_b \geq z_d) \quad \cdots \cdots (9)$$

ここに、 z_b と z_d は海底砂面とその下の岩盤面の鉛直高さである。岩盤上の全漂砂量は、岩盤上の砂層厚が限界厚（砂連高さ ξ の 1/2 の厚さ）以上の場合には、前節で算定した漂砂量をそのまま採用する。つぎに、砂層厚が限界厚以下になった場合には、砂層厚が 0 の時に漂砂量も 0 となるように、次式を用いて漂砂量を減少させる。



図二 斜め入射平面実験による岩礁上での沿岸漂砂量と計算との比較例

$$\bar{q}'_x = \frac{2h_{sd}}{\xi} \cdot \bar{q}_x, \quad \bar{q}'_y = \frac{2h_{sd}}{\xi} \cdot \bar{q}_y \quad (0 \leq h_{sd} \leq \xi/2) \quad \cdots (10)$$

以上の全漂砂量を砂層厚変化の連続式（11）に入力し地形変化を計算する。

$$\frac{\partial h_{sd}}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left\{ \bar{q}'_x - \varepsilon_b [\bar{q}'_x] \frac{\partial (h_{sd} + z_d)}{\partial x} \right\} - \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \bar{q}'_y - \varepsilon_b [\bar{q}'_y] \frac{\partial (h_{sd} + z_d)}{\partial y} \right\} \quad \cdots \cdots (11)$$

ここに、 ε_b は海底勾配の影響を表す係数で 10.0 とした。

また、図一に示すように、部分的に露岩地形が存在し、近傍の海底砂面の鉛直高さ z_b よりも露岩部分の岩礁面の鉛直高さ z_d の方が高い場合には、浮遊漂砂量の水深方向へのフラックス積分時に、 z_b から z_d までの鉛直範囲をカットすることにより、露岩上を通過する浮遊漂砂量を遮断する効果を取り入れる。

$$\bar{q}_{sx} = \int_{z_d}^0 \bar{c}(z) \bar{u}(z) dz, \quad \bar{q}_{sy} = \int_{z_d}^0 \bar{c}(z) \bar{v}(z) dz \quad \cdots \cdots (12)$$

また、海底地形変化の凹凸が激しくなることに伴うの流速の不安定を避けるため、全水深 D が 0.5 m 以下の浅海域における水平流速の計算値に対するフルード数の上限を 2 に設定した。

（4）長期海浜変形比較用 1 ラインモデルの概要

波浪変形計算には、砕波減衰項を考慮したエネルギー平衡方程式を用い多方向不規則波を入力した。1 ラインモデルに、岩礁上の砂層厚の減少に伴う沿岸漂砂量の低減効果を露岩関数として導入した。構成モデルの詳細は清水・池野（1996）を参照されたい。

（5）平面水槽実験による露岩モデルの検証

本露岩モデルの妥当性を単純化した条件で検証しておく必要がある。検証時には、岩礁周辺海浜に斜め入射する場合を対象とし、岩礁上を通過する漂砂量を測定した Shimizu and Ikeno（1998）の平面実験結果を用いた。この実験では、1/50 勾配斜面上に、2 m 角の砂のパッチを敷き、これに多方向不規則波を斜め 30 deg の波向きで入射させて沿岸漂砂を起こさせた。パッチには中央粒径 0.17 mm の砂を敷き詰め、砂層厚を 4 mm から 20 mm

まで変化させた。漂砂の下流に岩礁が海底から露出し飛び出している部分を模擬して、パッチの右半分に厚さ20 mmのモルタルを敷いた。また、パッチ上で水面変動と流速を測定した。有義波高は $H_{01/3}=10$ cm, 周期は $T_{1/3}=1.5$ s, 方向集中度は $S_{max}=10$ (風波) とした。

図-2は、斜め入射する多方向不規則波による岩礁上を通過した沿岸漂砂量と上流側(パッチ左側)の砂層厚との関係について、実験による漂砂量と計算値とを比較した例である。図中の計算値は、パッチ上で測定した水面変動と岸沖・沿岸流速を外力の真値として、本露岩モデルに入力して計算した露岩上を通過する漂砂量である。図-2によれば、計算値は砂層厚の減少に伴う岩礁上の沿岸漂砂量の減少効果を適切に再現できている。

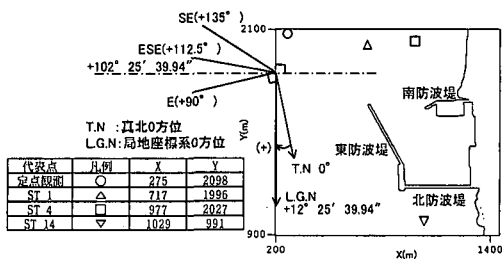
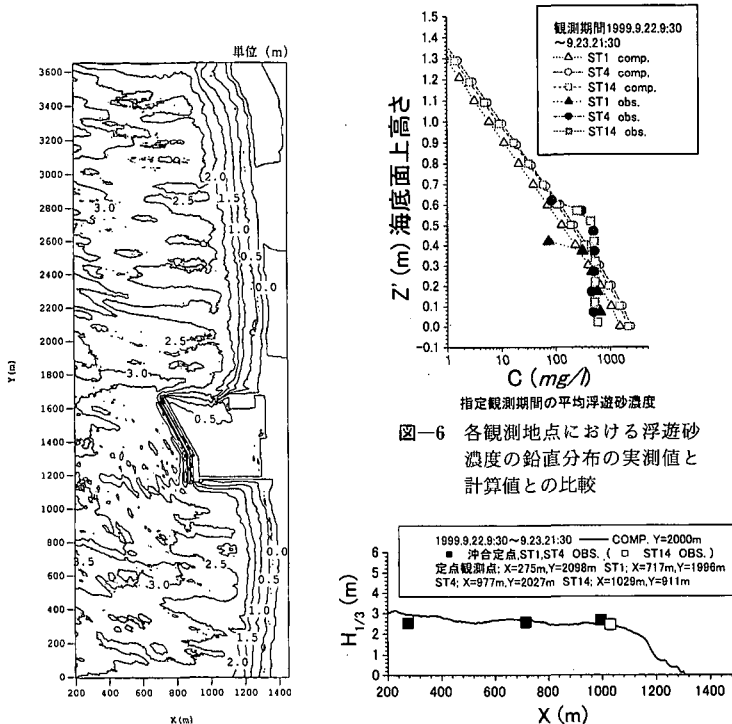


図-3 東通地点と観測地点の配置

3. 現地観測の概要

東北電力(株)東通発電所建設地点(図-3参照)を対象に、まず発電所専用港湾の建設に伴う長期海浜変形特性の把握を目的として、港湾建設開始の1997年7月から港湾形状完成の2000年6月の約3年間の海底地形と岩礁上の砂層厚の測量が実施された。露岩域は東防波堤先端以深 $x=300\sim700$ mに位置する。このうち、1999年8月から10月の3ヶ月間を対象に、港湾周辺海域に3つの観測点(ST1, ST4, ST14; 図-3参照)を設け、沖合い定点波高観測点と併せて、超音波式波高計4台、電磁流速計3台、超音波式砂面計3台等を設置し、短期集中観測が実施された。観測項目の詳細は池野ら(2001)を参照されたい。波高、海浜流、浮遊砂濃度の観測値を本海浜変形モデルによる計算値と比較した。超音波式砂面計による散乱強度データを、現地砂試料を用いたキャリブレーションを経て変換することにより、濁度の鉛直分布データが得られる(川西ら, 1998)。光学式濃度計も上記各観測地点の海底面上0.5 m, 1 mの鉛直高さに配置したが、生物付着等により信頼できるデータが得られなかった。



(a) 有義波高平面分布の計算結果 (b) 有義波高岸沖分布の計算結果と実測波高との比較

図-4 短期集中観測期間に対応した港湾周辺海域における有義波高分布の比較

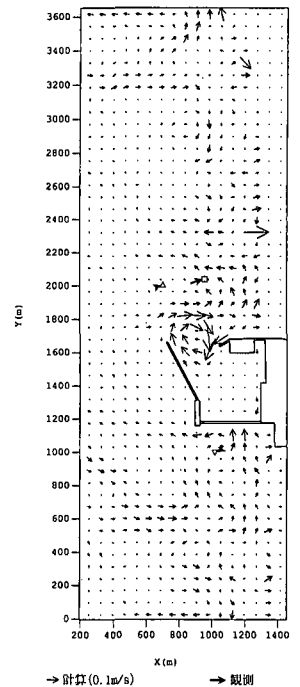


図-5 港湾周辺海域における海浜流平面分布の計算結果と観測地点における実測値との比較

観測期間中の海底砂の中央粒径は0.25 mm とほぼ同様であった。

4. 短期集中観測結果との比較検討

(1) 計算条件

短期集中観測期間中に東通地点に来襲した大きな時は、1999年9月20日21時30分～9月25日9時30分の期間に認められる。この時化の来襲前と来襲後の観測結果と計算結果とを比較することにより、本海浜変形モデルの検証を行うことにした。この期間に来襲した時化の波浪特性から、ステップ1(9月20日21時30分～9月22日9時30分： $H_{1/3}=1.8\text{ m}$, $T_{1/3}=6.0\text{ s}$)、ステップ2(9月22日9時30分～9月23日21時30分： $H_{1/3}=2.7\text{ m}$, $T_{1/3}=7.5\text{ s}$)、ステップ3(9月23日21時30分～9月25日9時30分： $H_{1/3}=2.1\text{ m}$, $T_{1/3}=8\text{ s}$)の3ステップの時化にモデル化できる。なお、主波向きは $\theta_a=110\text{ deg}$ (図-3参照)、方向集中度は $S_{\max}=50$ と一定とする。始めのステップの時化を計算し、地形変化量を計算して海底地形を更新した後、次のステップの時化を計算する。1999年8月の測深データを初期海底地形とし、これが上記の時化の直前まで変化しないものとする。3ステップの時化が通過後、最終更新後の海底地形が1999年10月の測深時まで変化しないものとする。

(2) 波高、海浜流、浮遊砂濃度、地形変化量の比較

図-4(a)に、上記のステップ2に対応した有義波高平面分布の計算結果を示す。また、図-4(b)に、ステップ2に対応した有義波高岸沖分布の計算結果と観測地点結果との比較を示す。観測地点4箇所のうち、沖合い定点観測点、ST1, ST4の3地点は、図-4(a)中のY座標(沿岸座標)が2000 m 付近に対応するので、計算結果の代表値として $Y=2000\text{ m}$ での有義波高値を出力している。また、観測地点のY座標は異なるが、比較のためにST14における有義波高の観測値も図中に併記している。有義波高の実測値と計算値との対応は良好であり、計算結果は波高の浅水変形特性をよく再現している。

図-5に、ステップ2に対応した海浜流平面分布の計算結果と観測地点における実測値との比較を示す。海浜流は、岸沖・沿岸方向の線流量の時間平均値を全水深の時間平均値で除して算定した。海浜流ベクトルの向きや強さの実測値と計算値との対応は概ね良好であり、計算結果は定常流特性を概ね再現している。

図-6に、各観測地点における浮遊砂濃度の鉛直分布の実測値と計算値との比較を示す。ここで、比較に用いた濃度の実測値は、超音波式砂面計による散乱強度データから海底面上鉛直高さ10 cm ピッチの濃度へ変換したものである。図-6によれば、各観測地点における浮遊砂濃度の鉛直分布形状が、実測では若干上に凸であるの

に対し、計算ではほぼ直線的(指数関数的)となっているが、濃度の鉛直分布値の対応はほぼ良好である。

図-7に、短期集中観測期間の海底地形の侵食・堆積量の実測と計算との比較を示す。地形変化量の計算と実測との対応は概ね良好である。

5. 長期地形変化観測および1ラインモデルとの比較検討

(1) 計算条件

北・南・東防波堤がほぼ完成し、前節の短期集中観測時と同じ港湾形状とみなせる期間(1999年6月～2000年5月)を対象に観測結果との比較を行う。まず、本3次元海浜変形モデルの計算を効率よく行うために、上記の期間に来襲した波浪のうち、大きな海底地形変化を引き起こすと考えられる波浪を抽出する。有義波高2 m 以上の波浪観測データを対象にすると、時化は1年に12回来襲している。また、ESE, E, SE 方向の順に頻度が高く、

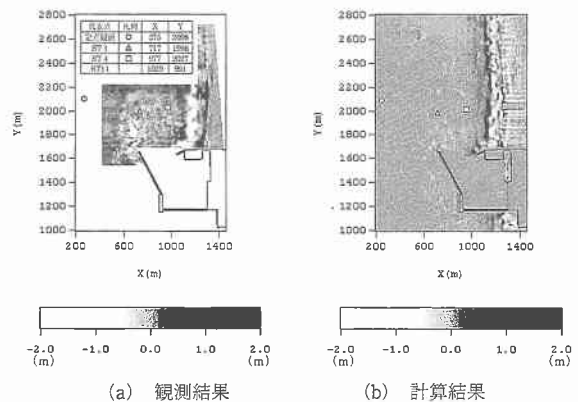


図-7 短期集中観測期間における港湾周辺海域の海底地形変化量(侵食・堆積量)の実測と計算との比較

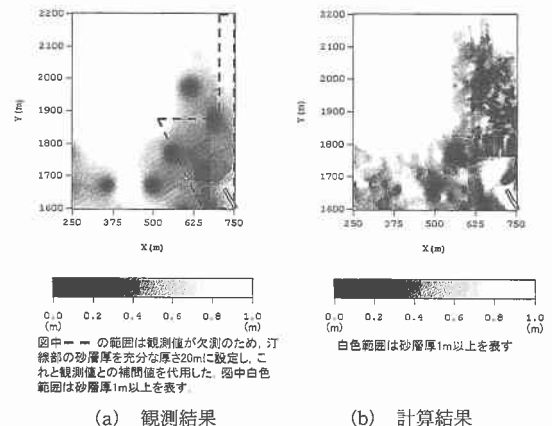


図-8 長期観測期間における港湾周辺の岩礁上砂層厚の実測と3次元海浜変形モデルによる計算との比較

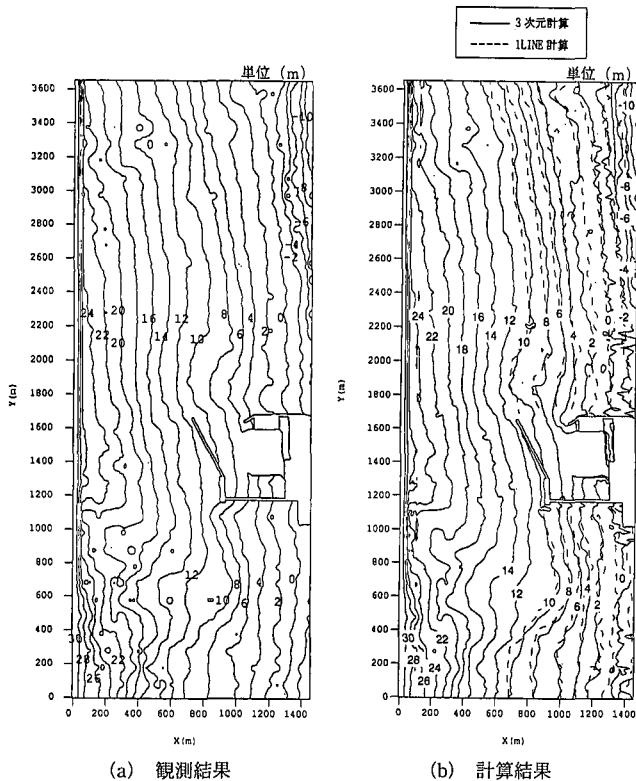


図9 長期観測期間における港湾周辺の海底地形等深線の実測と3次元海浜変形モデルおよび1ラインモデルによる計算との比較

特に高波浪はESEとEに集中している(図-3参照)。時化の作用時間は、3m以上の高波浪で約3日、2mの波浪で約1.5日である。以上を考慮して、上記の期間の時化をモデル化した。計算に用いる初期地形として1999年6月の海底地形を用い、時化モデル間で海底地形の更新は行わない。つぎに、1ラインモデルに入力する波浪は、2時間毎の波浪観測データのうち、1日2波浪(6時と18時)の有義波データを入力した。さらなる詳細は池野ら(2001)を参照されたい。

(2) 岩礁上砂層厚と地形変化の比較検討

図-8に、長期観測期間終了時の港湾周辺海域の岩礁上砂層厚の実測と3次元海浜変形モデルによる計算との比較を示す。図-8によれば、露岩域での地形変化は小さかったが、岩礁上の砂層厚の計算と実測との対応は概ね良好である。

図-9に、海底地形等深線の実測と3次元海浜変形モデルおよび1ラインモデルによる計算との比較を示す。1ラインモデルでは、水深11m程度の深さまで等深線を動かして計算している。

図-9によれば、水深が比較的深い領域における3次元海浜変形モデルによる等深線と実測との対応は概ね良好である。また、1ラインモデルと3次元海浜変形モデル

による等深線を比較すると、海岸線付近では3次元海浜変形モデルの等深線の変動が1ラインモデルのものよりも若干過大になっている。この原因としては、東通地点に来襲する有義波高2m以下の波浪が実際には多数あり、この波浪の1年間の総作用時間は2m以上の波浪の総作用時間よりも長い。このため、2m以下の波浪による地形変化の寄与分が無視できないと推察される。

6. 結 論

- 1) 実験結果と比較すると、砂層厚の減少に伴う岩礁上漂砂量の減少効果を本モデルで適切に再現できる。
- 2) 現地観測結果と比較すると、本3次元海浜変形モデルは、有義波高、定常流速、浮遊砂濃度、露岩域を含む海底地形変化を良好に再現できる。

参 考 文 献

- 池野正明・清水隆夫・久保道仁・定森良夫(1998): 波の多方向不規則性と浮遊漂砂を考慮した3次元海浜変形数値予測モデルの開発と検証, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 531-535.
- 池野正明・宇野善之・後藤宏志・田中正博・森 信人・片山裕之・岡安章夫(2000): 混合粒径砂を用いた大型海浜実験による粒径別浮遊砂フラックスとモデル化, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 556-560.
- 池野正明・清水隆夫・石井敏雅・斎藤知秀(2001): 露岩域を有する砂浜海岸に港湾を建設する場合の海浜変形予測モデルの適用, 電力中央研究所報告, 研究報告(印刷中).
- 佐藤慎司・M. B. Kabiling(1994): 波打ち帯を含む3次元海浜変形の数値モデル, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 401-405.
- 川西 澄・内田卓志・松山幸彦・余越正一郎(1998): 浅海域におけるADCPを用いた濁度分布の観測, 沿岸海洋研究, 第35巻, 第2号, pp. 203-210.
- 清水隆夫・池野正明(1996): 東通原子力発電所1号機建設に伴う海浜変形の予測, 電力中央研究所報告, 依頼報告U 96503.
- Madsen, P. A., R. Murrar and O. R. Sorensen(1991): A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics, Coastal Eng., Vol. 15, pp. 371-388.
- Nielsen, P.(1992): Coastal bottom boundary layers and sediment transport, Advanced Series on Ocean Engineering, Vol. 4, World Scientific, pp. 201-262.
- Nwogu, O.(1993): Alternative form of Boussinesq equations for nearshore wave propagation, J. of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, Vol. 119, No. 6, pp. 618-628.
- Shimizu, T. and M. Ikeno(1998): Experimental study on sand transport and diffusion due to multi-directional random waves, Book of Abstracts, 26th Int. Conf. on Coastal Eng., pp. 154-155.