

準3次元海浜流モデルの現地適用性

FIELD VERIFICATION OF Q-3D NEARSHORE CURRENT MODEL

口石孝幸・黒岩正光²・加藤憲一³・松原雄平⁴・野田英明⁵
 Takayuki KUCHIISHI, Masamitsu KUROIWA, Kenichi KATO,
 Yuhei MATSUBARA and Hideaki NODA

¹正会員 工修 日本建設コンサルタント㈱ (〒105-0004 東京都港区新橋 6-17-19 新御成門ビル)

²正会員 工博 鳥取大学助手 工学部土木工学科 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)

³正会員 工修 日本建設コンサルタント㈱ (〒105-0004 東京都港区新橋 6-17-19 新御成門ビル)

⁴正会員 工博 鳥取大学教授 工学部土木工学科 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)

⁵正会員 工博 鳥取環境大学教授 環境デザイン学科 (〒689-1111 鳥取市青葉台北1-1-1)

The paper presents a quasi three-dimensional model of nearshore currents based on the Energy balance equation with diffraction term under multi-directional random waves. The applicability of the present model to the prediction of the nearshore current in the field is investigated. First, the present model is applied to the prediction of nearshore current with undertow over barred beaches. Secondly, the applicability to the current field around a port is also investigated. Finally, the accuracy of the model is discussed.

Key Words : Nearshore current, Numerical simulation, Quasi-3D model

1. はじめに

海浜変形予測は、縦断地形変化予測(短期)、3次元海浜変形予測(中期)および汀線変化予測(長期)の3つのタイプに大別される。この中で、3次元海浜変形予測は、波、流れによる漂砂の移動機構を取り入れることができ、さらに構造物周辺の3次元的海底地形変化を計算できる有効的なモデルとされている。この3次元の海浜変形を予測する場合、波浪場および海浜流場の予測は必要不可欠である。波浪場については、波の多方向性や非線形性なども考慮され予測精度は向上している。海浜流場については平面2次元モデルが用いられているが、戻り流れが発生するような条件下では適用が困難である。そのような観点から、最近、戻り流れも考慮できる準3次元モデルが提案されている(例えば、信岡ら¹、黒岩ら²)など)。さらに、黒岩らは³現地への適用も試みているが、予測精度は不十分である。

著者らは、中期～長期における海浜流の3次元性を考慮した3次元海浜変形予測モデルを開発することが最終目的としているが、本報はその第一ステップとして、現地に適用可能な、すなわち多方向不規則波浪下および複雑な海底地形を有する領域に適用できる準3次元海浜流モデルの開発を目的としてお

り、本報では、現地観測結果と比較しモデルの現地適用性を検討しようとするものである。

2. 数値モデル

本研究では、波と流れの相互干渉は考慮せず、まず、波浪場を計算し、得られた結果を用いて海浜流場を計算する。以下に、モデルの概要を示す。

(1) 波浪場

長期海浜変形予測を行う場合、計算負荷を低減させることが可能で、なおかつ、実際の現象に適応したモデルが要求される。そこで、波浪場は、最近間瀬ら⁴)によって開発された多方向不規則波、構造物による回折波が考慮できるエネルギー平衡方程式を用いて算定する。基礎式は、

$$\frac{\partial(Sv_x)}{\partial x} + \frac{\partial(Sv_y)}{\partial y} + \frac{\partial(Sv_\theta)}{\partial \theta} = \frac{\kappa}{2\omega} \left\{ \left(CC_g \cos^2 \theta S_y \right)_y - \frac{1}{2} CC_g \cos \theta S_{yy} \right\} - \epsilon S \quad (1)$$

で表される。ここに、 x は沖から岸向きに、 y は沿岸方向に取った座標を表す。 θ は波向を表し、 x 軸から反時計回りを正に取ったものである。 S はエネルギースペクトル、 v_x 、 v_y および v_θ はそれぞれ波のエ

エネルギー輸送速度，右辺第1項目は回折効果を表すもので， κ は影響係数で2.5～3程度である．第2項は砕波によるエネルギー減衰項で高山ら³⁾のモデルが適用されているが，バーが存在するような海底地形上では，波の再生および2次砕波の再現性が不十分であるため，Dallyら⁶⁾のモデルをベースにKuriyama⁷⁾が提案した砕波減衰モデルを以下のように整理して適用する．式(1)における εS を

$$D_b = \frac{K}{h} \left(1 - \frac{Es}{E} \right) SC_g \quad (2)$$

とする．ここに，

$$Es = \frac{1}{16} \rho g (H_{1/3})_S^2 \quad (3)$$

$$(H_{1/3})_S = \Gamma h \quad (4)$$

で， K および Γ は無次元係数，Kuriyama⁷⁾は海底勾配の関数で与えているが，本研究では，計算領域内一定とする．

(2) 海浜流場

海浜流場は黒岩ら³⁾の準3次元モデルを適用するが，不規則波浪下におけるradiation stress，水平および鉛直方向の渦動粘性係数，底面摩擦などの諸量は，Rayleigh分布に基づく有義波高と自乗平均平方根波高との関係 ($H_{1/3} = 1.416 H_{rms}$) から得られる H_{rms} と，波のエネルギーの周波数スペクトルのピーク周期 T_p を用いて計算する．

砕波帯内における海浜流の戻り流れを精度よく再現するためには，砕波による影響をうまく取り入れる必要がある．本研究では，黒岩ら⁸⁾と同様に水面での境界条件に砕波による波のエネルギーの逸散率の関数で表されるせん断応力で与える． x 方向および y 方向におけるせん断応力は

$$\left. \begin{aligned} \rho v_v \frac{\partial U}{\partial z} = \tau_{sx} = A_s \rho^{1/3} D_{bc}^{2/3} \left(\frac{h}{L} \right) \cos \theta \\ \rho v_v \frac{\partial V}{\partial z} = \tau_{sy} = A_s \rho^{1/3} D_{bc}^{2/3} \left(\frac{h}{L} \right) \sin \theta \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

で表される．ここに， A_s は無次元係数， L は波のエネルギーの周波数スペクトルのピーク周期から算定される線形理論に基づく波長である． D_b は砕波による波のエネルギー逸散率であるが，式(2)を直接用いず，Dallyら⁶⁾の式

$$D_{bc} = \frac{Kc}{h} C_g \frac{1}{8} \rho g \{ H_{rms}^2 - (\Gamma_c h)^2 \} \quad (6)$$

を用いて算定する．ここに， H_{rms} は，二乗平均平方根波(Root Mean Square Wave height)， Kc および Γ_c は無次元係数である．

基礎式，計算方法等については，黒岩ら³⁾を参照されたい．

3. バー地形上における波浪場および海浜流場への適用

(1) 現地観測の概要および計算条件

ここでは，Kuriyamaら⁹⁾によって実施された観測結果を用いてモデルの適用性を検討する．現地観測は(独)空港港湾技術研究所(当時：運輸省港湾技術研究所)の有する波崎海洋観測施設で実施されており，バー周辺の波高，岸沖ならびに沿岸方向における流速が測られている．バー付近で，戻り流れが発生していることが報告されている．本研究では，Kuriyama⁹⁾がまとめたデータセットの内，表-1に示す代表的な4つの波浪条件を用いる．

表-1 波浪条件

Case	$H_{1/3}$	$T_{1/3}$	θ	Ho/Lo	T_p
1	2.00	9.69	24.5	0.0165	10.37
2	2.11	9.63	16.5	0.0151	10.31
4	2.91	11.81	19.0	0.0144	12.64
7	2.37	12.16	6.0	0.0092	13.01

(単位：m,sec)

表-1に示す有義波高，周期および主波向は水深6mの沖合いにて測定されたもので，これらの値から入射条件を設定した．入射波の周波数エネルギースペクトルは，JONSWAP型，波の方向関数として光易型を用いた．計算領域は，岸沖方向640m，沿岸方向100mの範囲とし，波浪場および海浜流場の計算における格子間隔は両方向とも10mとした．流れの計算における水深方向の分割は5等分割とし，時間間隔は0.05s，繰り返し回数は10000回とした．

既に，黒岩ら⁸⁾が表-1に示した波浪条件下で，戻り流れに対する適用性を検討しているが，波浪場の計算に波別解析法を適用し，単一方向不規則波浪下における海浜流場を計算している．海浜流場の計算において水平方向の渦動粘性係数にLonguet-Higgins¹⁰⁾のモデルを適用しているが，Jonssonら¹¹⁾やKuriyama⁹⁾などが指摘しているように，モデルそのものの物理的意味が乏しいことから複雑な海底地形上には，適用できないとされている．そこで，本計算では，波向の影響も考慮できる，Jonssonら¹¹⁾のモデルを用いた海浜流場の計算も試み，渦動粘性係数の与え方も再検討する．

(2) 計算結果と実測値との比較

図-1～4は各ケースの有義波高，底面における戻り流れおよび沿岸流速の岸沖分布の計算結果と観測結果を比較したものである．各ケースにおける図(a)中の破線および実線は間瀬らのオリジナルモデル(高山らの砕波減衰項を付加したモデル)および式(2)の砕波減衰項を用いた本モデルによる計算結果を示す．また，図(b)および(c)に示す実線は水平渦動粘性係数の計算にLonguet-Higginsのモデル(Model1)を用いた場合の結果で，破線はJonssonらによるモデル(Model2)を用いた場合の計算結果である．●印は，底面から約0.3mの高さにおいて測定された流速値を表している．最下段(d)は観測時における栈橋下の縦断地形を示している．表-2は本

計算に用いた式(2), (4), (5)および(6)に示す各係数の値を示したものである。ここでは、海浜流モデルの適用性を検討することが第一目的であるため、まず、波浪場の計算結果が実測値とほぼ一致していることが必要である。そこで、波浪場の計算結果が実測値と一致するように試行錯誤的に式(2), (4)における K と Γ を設定した。海浜流場の計算では、 A_s , K_c および Γ はすべて一定とした。

これらの計算結果から明らかなことを列挙すると以下のとおりである。

(a)波高分布

高山らのモデルによる計算結果はトラフ上における波の再生領域での一致度が低い。一方、Dallyらのモデルによる計算結果はすべてのケースにおいて実測値と良く一致するが、本モデルで用いた式(2)中の係数 K は従来のものと与え方が大きく異なる。波浪場の計算においてDallyらのモデルにおける係数 K は一般に0.15程度の値が用いられているが、本モデルでは、0.06~0.07で、Dallyらのオリジナルの係数より小さく設定した。

(b)戻り流れ

Model 1 および 2 による計算結果を比較すると、Model 1 の方が戻り流れの値が大きくなる傾向があるようであるが、両者に大きな差はない。実測結果から $x=400\text{m}$ 付近のバー頂部で戻り流れが最大となるようであり、計算結果も同様な傾向を示していることがわかる。なお、Case 7 については、他のケースに比較して戻り流れの最大値発生位置が大きく異なるが、定性的には戻り流れの特性を再現できていると考えられる。汀線付近の戻り流れ（第3碎波点： $x=500\text{m}$ ）については実測値がないため、詳細な議論は不可能であるが、Case 4 以外は $x=400\text{m}$ 付近の第2碎波点より強い戻り流れが発生している。

(c)沿岸流

Model 1 および 2 の計算結果から、明らかに両者の沿岸流速の分布は異なり、渦動粘性係数が沿岸流速の岸沖分布に多大な影響を及ぼすことがわかる。実測結果から、戻り流れの岸沖分布とは異なり、バー頂部より岸側のトラフ付近の沿岸流速が大きくなるようで、Case 1 の結果については、Model 1 の方が実測値と良く一致する。また、Case 2 については、計算値が過大評価しているが、定性的には、Model 1 の方が実測値と一致するようである。Case 4 については、Model 1 と 2 両者とも過小評価されているが、Model 1 の方が定性的には、沿岸流速の分布を表しているようである。Case 7 については、Model 1 は過小評価されているが、Model 2 の方は過大評価である。定性的には、Model 1 の方が沿岸流速の分布を表しているようである。

以上の結果から、Dallyらのモデルに基づいた碎波減衰項を適用することによってバー地形上の波の碎波、再生および2次碎波のプロセスを表現できる。

本海浜流モデルは、バー地形上の戻り流れ（岸沖流速）を精度良く計算可能である。沿岸流については、波浪条件によっては、過大あるいは過小評価するが定性的には良い傾向を示している。なお、渦動粘性係数については、比較した条件が限られているため、本報では、どのモデルが良いかは判断が困難であるため、以下の計算においては従来通りのLoguet-Higginsのモデルを適用することにする。

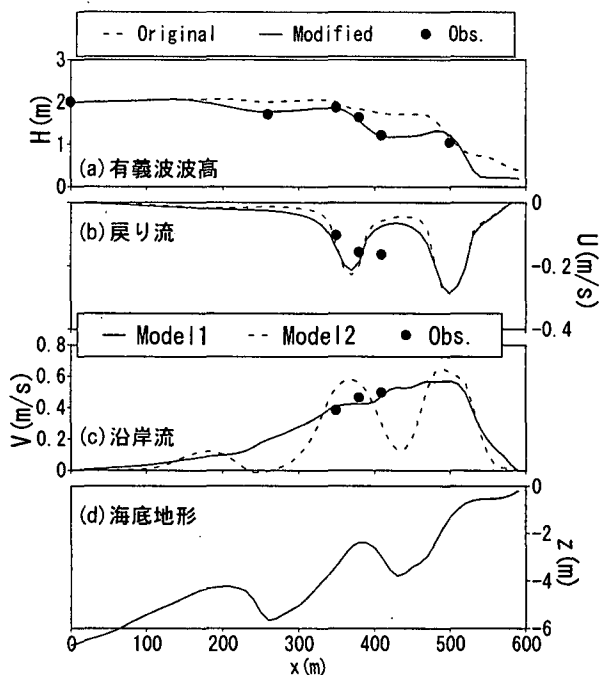


図-1 計算結果と観測結果の比較(Case1)

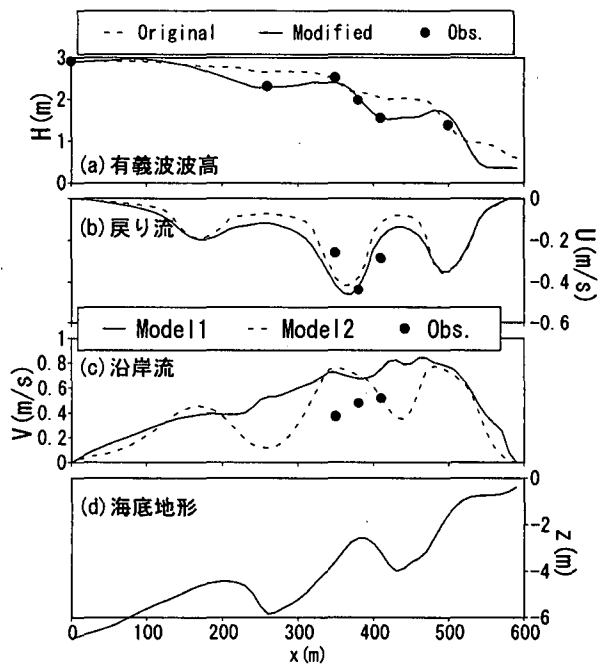


図-2 計算結果と観測結果の比較(Case2)

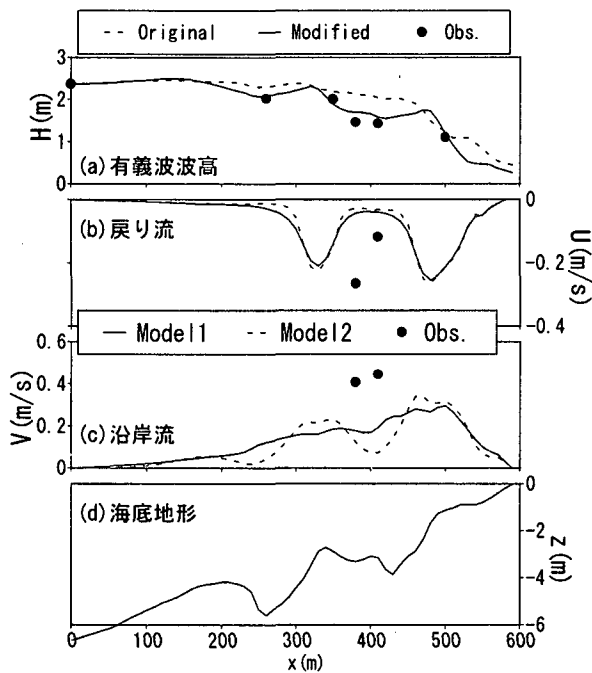


図-3 計算結果と観測結果の比較(Case4)

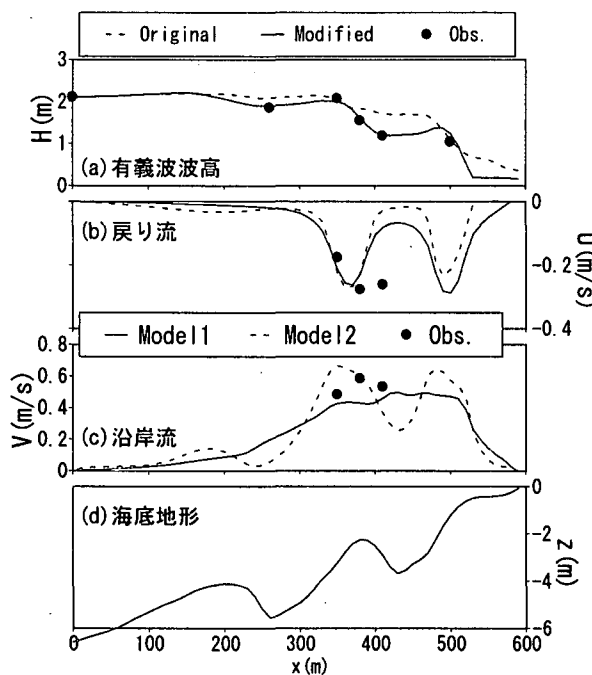


図-4 計算結果と観測結果の比較(Case7)

表-2 各係数の値

Case	K	Γ	A_s	K_c	Γ_c
1	0.06	0.4	2.0	0.15	0.4
2	0.07	0.45	2.0	0.15	0.4
4	0.06	0.48	2.0	0.15	0.4
7	0.065	0.4	2.0	0.15	0.4

4. 構造物周辺における波浪場および海浜流場への適用

最後に、鳥取県中部に位置する赤碕港において実施された現地観測結果⁵⁾に基づいてモデルの適用性を検討する。現地観測は赤碕港における埋没対策を検討するため、1997年12月25日から翌年4月まで実施された。

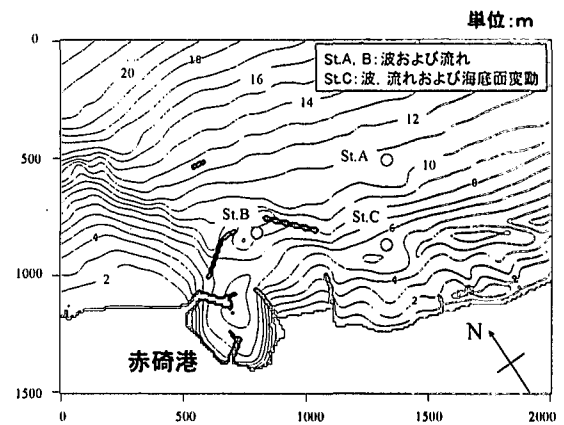


図-5 鳥取県赤碕港周辺の海底地形および計算領域

(1) 現地の波浪特性および計算条件

図-5は1997年10月に実施された港周辺の海底地形を示したもので、図中に示す●印は波浪、海浜流速の観測点を示す。図に示すように、St.Cにおいてのみ海底面の変動が測られている。観測期間中、1月15日、St.Aで有義波高で4mを超える波浪を記録し、St.Cでは約70~80cm/sの海浜流が発生している。また、同時に堆砂が生じ海底面が約80cm上昇している。実際には、時々刻々と変化する波と流れによって海底地形も変化するため、海浜流計算と同時に海底地形の変動も計算し、モデルの検証を行う必要があるが、かなりの労力がかかり困難であるため、海底地形が顕著に発生した以前の観測結果を検証用データとする。図-6は12月25日~翌年1月15日までのSt.Aにおける波向きと有義波高(St.A)および海浜流速(St.A,C)との関係を示したものである。この図からSt.Aにおける波向きNNEでなおかつ有義波高が2.5m程度を超えるとSt.AおよびCで約20cm/s以上の海浜流速が発生している。有義波高3~4mの波に対しては、St.Cで0.6~0.8m/sの海浜流が発生している。一方、St.AにおけるNNWの波に対して、St.Aで20数cm/sの流れが発生していることがわかる。

以上のことから、表-3に示す冬季の波浪を代表する2ケースについて計算を試みる。表中には同港の東方50kmの位置にある鳥取港沖水深20mの地点で測られた波浪データも示している。表中の波向はNE寄りの波を正、NW寄りのそれを負で表している。なお、実際の計算における入射条件は、表中の最下段に示したとおりであるが、St.Aにおける観測点は水深13m程度であり、ここで実測されたデータをそのまま計算領域における入射条件とするのは困難である。そこで、鳥取港沖で観測データを参考に、試行錯誤的にSt.Aにおいて実測された有義波高および波向きに計算結果がほぼ一致するように設定した。

計算領域は図-5のように岸沖方向に1500m, 沿岸方向に2000mで, 格子間隔は岸沖および沿岸方向とも20mとし, 海浜流場の計算において水深方向は5等分割した. 波浪場の計算における S_{max} は25とし, 周波数スペクトルはJONSWAP型を用いた. 計算に用いた式(2), (4), (5)および(6)中の各係数は表-4に示すとおりである.

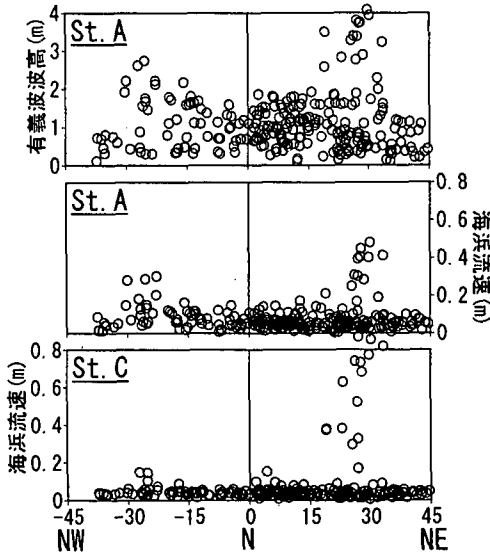


図-6 波向, 有義波高および海浜流速との関係

表-3 各観測点における波浪特性および計算条件

		Case1	Case2
観測日		1月6日	1月15日
観測時刻		14:00	06:00
鳥取港	波向	NW	ENE
	波高	4.41	4.0
	周期	8.5	8.0
St.A	波向	-25.5	26.2
	波高	2.73	3.92
	周期	8.5	8.6
入射条件	波向	-30	21.4
	波高	4.41	4.0
	周期	8.5	8.6

表-4 各係数の値

Case	K	Γ	A_s	K_c	Γ_c
1	0.08	0.3	2.0	0.15	0.35
2	0.064	0.43	2.0	0.15	0.35

(2) 計算結果と観測結果との比較

a) 波浪場

図-7および8はCase 1および2の波浪場の計算結果で, 図-9は全ケースにおける波向と有義波高の実測値に対する計算値を示したものである. Case 2については, 計算値は実測値とほぼ一致するが, Case 1のNNWからの波浪に対しては過大評価して

いる.

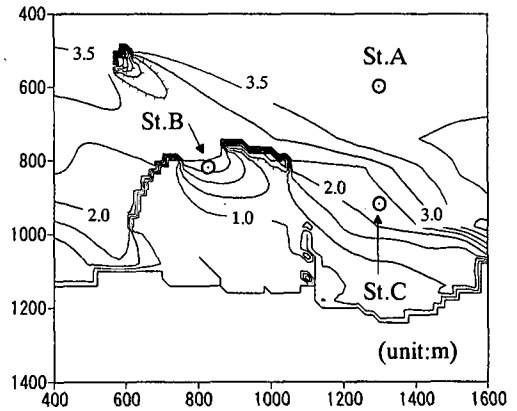


図-7 有義波高の計算結果 (Case 1)

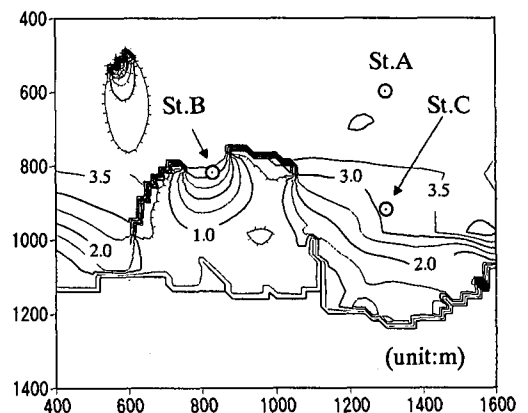


図-8 有義波高の計算結果 (Case 2)

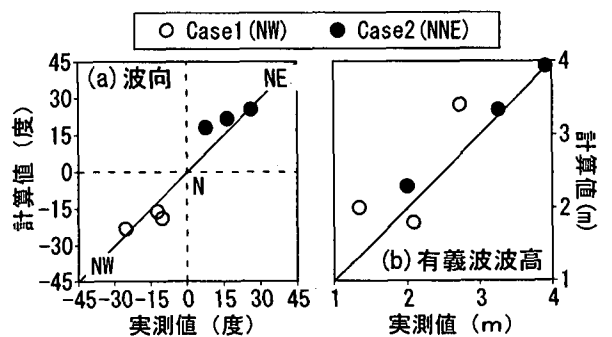


図-9 波向および有義波高の実測値に対する計算値

b) 海浜流場

図-10はCase 1の港付近における海浜流場(底面流速)の計算結果を示したもので, 図中に示す太矢印は観測結果を示している. 港東側が西寄りの波に対して遮蔽域となり, 時計周りの循環流が発生していることがわかる. 観測結果と比較すると, St.A.では流速値の大きさは異なるが流向はほぼ一致している. St.C.では, 流向および流速値両者とも異なっているが, 現地においても, 港東側では, NNWからの波によって時計周りの循環流が発生し, それに

よってSt.AおよびCでは、東向きの流れが発生したと考えられる。St.Bでは観測値が小さく計算結果との比較は困難であるが、西からの流れがSt.Bの開口部を通過する流れが再現されている。このような観点から計算結果は概ね現地の流れを定性的に再現できていると考えられる。

図-11はCase2の同様の結果を示したものである。この図からSt.BおよびCにおける計算結果は実測値と良く一致しているが、St.Aでは流向および流速値が大きく異なっている。

以上のことから本モデルは概ね現地における流れを再現できるようであるが、定量的な評価はまだ困難である。実際には、日本海側における冬季には、波浪による流れだけでなく、風による吹送流も発生していると考えられ、本モデルに風の影響が考慮されていないことなどが、現地観測値との相違の原因と考えられる。今後の研究課題として、詳細な風のデータを収集し、海浜流モデルに風による吹送流の影響を考慮し、再検討する必要がある。また、表-2および4に示した係数は波浪条件、海底条件によって異なっており、その与え方も検討する必要がある。

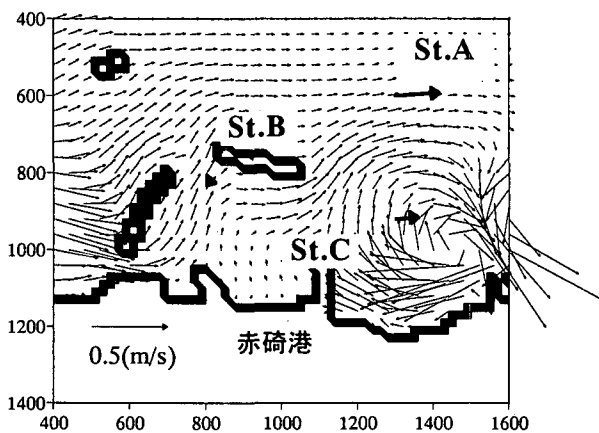


図-10 底面における海浜流場の計算結果(Case1)

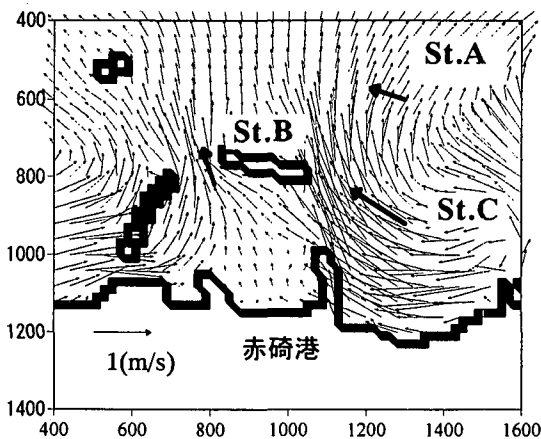


図-11 底面における海浜流場の計算結果(Case2)

5. おわりに

本研究では、多方向不規則波浪下における準3次元海浜流モデルを構築し、現地適用性を検討した。その結果、バー地形や構造物が存在する領域における波に起因する戻り流れを含む海浜流場を定性的に予測可能であることが確認されたが、係数の与え方、風の影響等について検討の余地がある。

今後の課題として、本モデルに風による吹送流の影響を考慮しモデルの再検討を行う予定である。

謝辞：波浪場の計算に際して、間瀬ら⁴⁾を参考にさせていただいた。ここに、感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 信岡尚道, 加藤始, 三村信男 : 多層3次元海浜流モデル, 海岸工学論文集, 第44巻, pp.156-160, 1997.
- 2) 黒岩正光, 野田英明, 芳地康征 : 準3次元海浜流場の数値シミュレーションに関する研究, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 151-155, 1997.
- 3) 黒岩正光, 野田英明, 加藤憲一, 谷口 丞, 孫 彰培 : 準3次元海浜流モデルを用いた構造物周辺の3次元海浜変形予測, 海岸工学論文集, 第46巻, pp.616-620, 1999.
- 4) 間瀬 肇, 高山知司, 国富将嗣, 三島豊秋 : 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, 1999.
- 5) 高山知司, 池田直太, 平石哲也 : 砕波および反射を考慮した波浪変形計算, 港湾技術研究所報告, 第30巻, 第1号, pp.21-67, 1991.
- 6) Dally, W. R., R.G. Dean and R.A. Dalrymple: A Model for Breaker Decay on Beaches, *Proc. 19th ICCE*, pp.82-97, 1984.
- 7) Kuriyama, Y.: Numerical model for longshore current distribution on a bar-trough beach, *Proceedings of the 24th ICCE*, 2237-2251, 1984.
- 8) 黒岩正光, 野田英明, 孫彰培, 中嶋孝昌 : バー地形周辺の戻り流れと地形変化予測に関する研究, 海岸工学論文集, 第47巻, pp.626-630, 2000.
- 9) Kuriyama, Y and Nakatsukasa, T. : Undertow and Longshore current on a Bar-Trough Beach Beach, -Field Measurements at HORS and Modeling-, *Rep. Port and Harbor Res. Inst.*, Vol.38, No.1, 1999.
- 10) Longuet-Higgins, M.S.: Longshore current generated by obliquely incident sea waves, 1, 2, *J. Geophys. Res.* Vol.75, pp.6778-6801, 1970.
- 11) Jonsson, I.G., Skovgaard, O. and Jacobsen, T.S.: Computation of longshore currents, *Proc. of 14th ICCE*, pp.699-714, 1974.