

3次元海浜変形モデルにおける 外力場補正法とその効果について

田島 芳満*

要 旨

海浜変形モデルは、実際の現地海浜地形における地形変化を定性・定量的に予測・把握する手段として非常に有効な数値モデルであり、これまで数多くの現地地形に適用され、実測値との比較から実用上十分な精度が得られることも確認されている。今後は、環境問題への意識の高まりに伴い、さらに長期的なビジョンにたった海岸域の開発が重要視されるようになり、海浜変形予測モデルにおいてもより長期間の予測解析に適用可能で、かつ誤差の蓄積が少ないモデルへと改良していく必要があると考えられる。そこで本報では、平面的な地形変化量を予測することのできる3次元海浜変形モデルに着目し、計算時間の短縮と解析精度の向上を目的として、現在用いられている地形変化計算時の外力場の補正方法を整理するとともにそれらの解析精度について比較検討した。また、得られた結果からこれらの手法の適用限界と今後の課題について考察した。

1. まえがき

3次元海浜変形モデルは、海浜変形の物理的なメカニズムに基づく最も本質的なモデルである。海浜流（定常流）による沿岸方向漂砂に加え、海岸構造物前面で顕著な循環流によって運ばれる沖向き砂移動や、波、戻り流れに起因する岸沖方向漂砂が同時に考慮できる点で、他の海浜変形モデルに比べて優れている。また、数多くの実験データや現地データとの比較から、実用上十分な予測精度が得られることも確認されており（例えば、清水ら¹⁾）、実際の現地における海浜変形予測シミュレーションにも実用的に多く用いられてきている。

さらに、清水ら²⁾によって汀線変化を考慮した3次元海浜変形モデル（3D-SHORE）が提案され、汀線境界位置が変化していく過程を再現することも可能となった。これによって、水深および汀線境界位置の変化に応じて変化する外力場を、時間の経過とともに繰り返し評価する非定常解析を行えば、より長期間の海浜変形予測解析に適用することが理論上可能となった。

しかしながら、長期間の非定常解析で計算誤差を蓄積することなく精度を維持し、数値的に安定な計算を行なうためには、地形変化とともに変化する外力場を適切に評価する必要があり、このためには、非定常解析の繰り返し時間間隔を細かく設定する必要がある。しかしその反面、漂砂を引き起こす外力場である海浜流場の評価には多大な計算時間を必要とする。すなわち、予測解析精度の維持と計算時間の短縮とは相反する関係にあり、現在の計算機のスピードでは、数十年程度の長期海浜変形予測に3次元海浜変形モデルを用いることは現実的では

ない。このため、3D-SHOREを用いて1～5年程度の比較的長期間の海浜変形予測解析を行う際にも、計算時間を短縮し、かつ解析精度を低下させないために、海浜流場の計算の繰り返し計算回数を必要最小限に押さえ、その間の外力場の変化を、地形変化計算の中で簡易的に補正する方法を実際には用いている。そこで、本報ではこれらの外力場補正方法を整理するとともに、それらの解析精度に及ぼす影響を、比較計算を通じて検討する。さらに、得られた結果から、今後の課題と適用限界について考察する。

2. 3次元海浜変形モデルの概要

3次元海浜変形モデルは、計算対象領域の波浪場および海浜流場の平面分布を求め、それらの分布から各地点における局所漂砂量フラックスを評価し、漂砂の連続式に基づいて地形(水深)変化を予測する手法である。すなわち、当モデルは、以下に示す3つのサブモデルで構成されている。本検討に用いる3D-SHOREの具体的な計算方法を以下に示す。

平面波浪場の計算
海浜流場の計算
地形変化の計算

海浜流場の計算では波浪場の平面分布を、地形変化の計算では波浪場および海浜流場の平面分布をそれぞれ初期条件として入力する。前述のように、地形変化の履歴を考慮する非定常解析では、上記の3段階の計算を時間

* 技術研究所

の経過とともに繰り返し計算して地形変化を評価する。

また、計算座標は直交座標系を用い、海浜流の流速ベクトル成分、および漂砂量フラックス成分と水深や波高の定義される平面的な位置が半メッシュずれる、スタッガードメッシュとした。モデルのフローチャートを図 - 1 に示し、以下に各サブモデルの概要を示す。また、計算メッシュ上のそれぞれの解析諸量の定義位置を図 - 2 に示す。図 - 2 で、 H : 波高、 α : 波向、 η : 水位、 h : 水深、 U 、 V : x 、 y 軸方向の流速成分、 q_x 、 q_y : x 、 y 軸方向の漂砂量フラックス成分である。

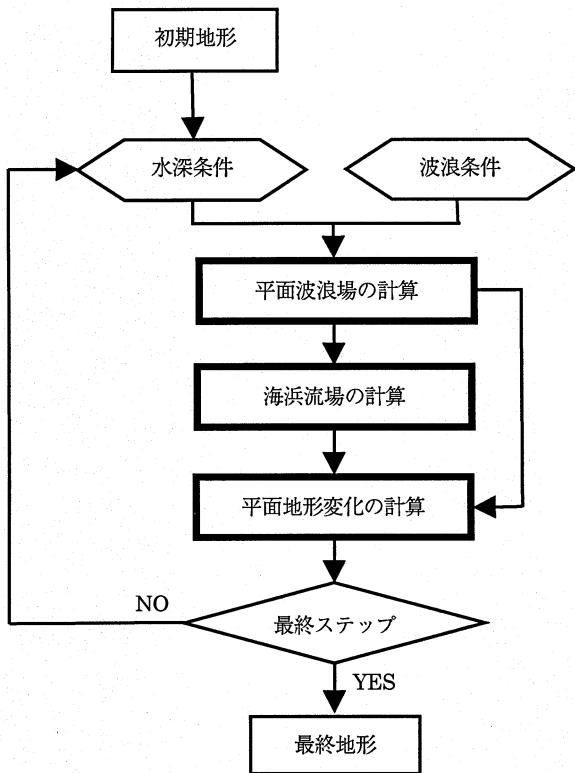


図 - 1 3次元海浜変形モデルの計算フロー

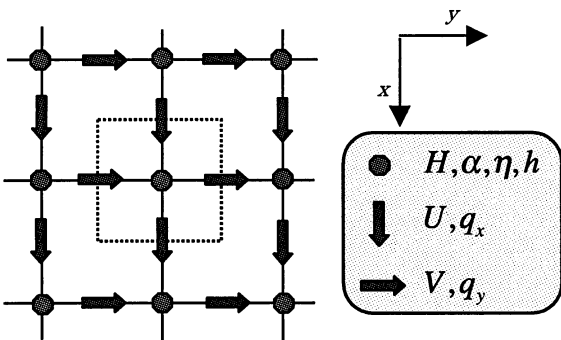


図 - 2 計算メッシュと解析諸量の定義位置

2. 1 平面波浪場の計算

3次元海浜変形モデルの現地適用性を高めるためには、漂砂が活発な砕波帯内を含めて、現地の多方向不規則波浪場を精度良く再現することが重要である。したがって、平面波浪場の計算では、多方向不規則波の屈折、回折、浅水・砕波変形を同時に考慮でき、かつ広範囲の計算を比較的短時間で実行することが要求される。

このような平面波浪場の計算法として、種々の平面波浪場計算法の中でもKarlsson³⁾のエネルギー平衡方程式を用いる方法、ならびに磯部⁴⁾の緩勾配方程式の放物型近似による方法が実用的に用いられており、現地観測や多方向不規則波を用いた水理実験により、現地の複雑な地形に対する適用性もある程度確認されている(例えば、高山ら⁵⁾、清水ら⁶⁾)。

とりわけ、実用的に3次元海浜変形モデルを用いる場合には、計算時間が短く、起伏の激しい現地地形においても比較的安定かつ精度の高い計算が可能なKarlsson³⁾によるエネルギー平衡方程式が多く用いられている。本報ではエネルギー平衡方程式による平面波浪場の計算を、丸山ら⁷⁾による差分法、計算法を用いて行った。

砕波帯内の波高を評価するためにはエネルギー平衡方程式に適切な砕波減衰項を組み込む必要がある。また、汀線変化の計算を行う際には、汀線付近の外力場を適切に評価することが重要となるため、遡上域における波高分布も何らかの形で評価する必要がある。本報では、砕波帯内の波高分布計算には磯部⁴⁾の砕波減衰モデルを用い、遡上域の波高の評価には清水ら²⁾の方法を用いた。

2. 2 海浜流場の計算

海浜流のメカニズムは、波浪場の空間的な分布に起因する radiation stress の空間勾配によって説明される (Longuet-Higgins⁸⁾)。このため、岸沖方向の波高変化が大きい砕波帯内で海浜流場が卓越する。対象とする基礎方程式は、連続式と運動方程式で構成され、それぞれ式(1)、(2)で表される。一般的に潮流計算に適用される運動方程式に外力項として波による radiation stress 項を加えたものが基礎方程式となっている。ただし、底面摩擦項の評価については波・流れ共存場における底面摩擦応力を評価できる田中・Sana⁹⁾の底面摩擦則を用い、水平拡散係数には砕波帯内の拡散係数を空間的に変化させる Longuet-Higgins⁸⁾の方法を用いている。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial U(h+\bar{\eta})}{\partial x} + \frac{\partial V(h+\bar{\eta})}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + F_x - M_x + R_x + g \frac{\partial \eta}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + F_y - M_y + R_y + g \frac{\partial \eta}{\partial y} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ただし、

$$\left\{ \begin{aligned} R_x &= \frac{1}{\rho(h+\bar{\eta})} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) \\ M_x &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon \frac{\partial U}{\partial y} \right) \end{aligned} \right. \quad (3)$$

ここで、 η : 水位、 U 、 V : x 、 y 軸方向の流速成分、 F : 底面摩擦項、 M : 水平拡散項、 R : radiation stress 項、 S_{xx} 、 S_{xy} : radiation stress、 ε : 水平拡散係数で、添え字 x 、 y はそれぞれの軸方向の成分であることを示す。

実際の数値計算では、流速値、水位をゼロとした初期条件から計算を開始し、radiation stress項を波浪場の平面分布から求められる値まで徐々に増加させながら、流速分布が平衡に達するまでの過程を時間的に繰り返し計算する非定常計算法を用いる。

また、微分形式の離散化方法は、空間方向に完全中央差分を用いた。ただし、運動方程式第2、第3項の移流項は各点における時々刻々の流速成分の符号を判定し、風上差分法を用いた。また、時間進行法は、Crank-Nicolson法、leap-frog法、前進Euler法(例えば、棚橋¹⁰⁾)などを用いた比較計算を行った結果、最も単純なスキームで、かつ計算時間が短い前進Euler法で十分な計算の安定性が得られ、計算結果には有意な差が見られなかったため、本報では時間進行法に前進Euler法を適用した。

2.3 地形変化の計算

水深変化量は、各地点における漂砂量フラックスの平面分布を用いて、次式で表される漂砂の連続式に基づき算定する。

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \quad (4)$$

ここで、漂砂量フラックス q は、波浪場・海浜流場の平面分布から渡辺ら¹¹⁾の局所漂砂量算定式を用いて算定する。底面摩擦係数の算定には、海浜流場の計算と同様に、田中・Sana⁹⁾の波・流れ共存場における底面摩擦則を用い

て、摩擦係数を場所的に変化させる。

微分形式の離散化方法は時間方向に前進、空間方向に中央差分とした。

汀線変化量の計算は、求められた漂砂量フラックスの平面分布から汀線平行方向の沿岸漂砂量フラックスを取り出し、汀線変化モデルと同様に、漂砂量の連続式を用いて汀線の前進後退量を算定する。

地形および汀線変化の計算では、非定常解析での1ステップの計算時間間隔をさらに細かく分割し、細分化された各ステップ毎に、水深が変化することによる外力場の変化分を補正しながら時間に対する繰り返し計算を行う。

この漂砂量フラックスの補正方法の詳細を次章に示す。

3. 漂砂量フラックス補正方法の概要

前章で述べたように、地形変化計算では非定常解析の計算時間間隔をさらに分割し、地形変化による漂砂量分布の変化分を適宜補正しながら、繰り返し計算を行う。補正方法は、水深が変化することによる流速値の補正、底面摩擦応力の補正および海底勾配による漂砂量フラックスの補正の合計3種類である。それぞれの補正操作を含めた地形変化計算のフローチャートを図-3に示す。

以下に、各々の具体的な補正方法を紹介する。

3.1 流速値の補正

水深変化に伴い流速値が変化する過程を、海浜流場の計算を繰り返さずに、次のような簡易的な補正方法を用いて評価する。

水深の変化による波浪場、radiation stress項の変化は無視して、各点を通る流量のみが保存されるように、計算初期の x 軸方向の流速成分 U と海浜流計算時の初期水深 h_0 と、時々刻々の水深 h を用いて、式(5)のように流速値を補正し、 U' を求める。ここで、過剰な堆積傾向を示す地点では水深が浅くなることによって流出漂砂量が増加するように、また、侵食傾向を示す地点では逆に流出漂砂量が減少するように、各流速成分の向き(符号)に着目して、その上手側の水深変化量が常に用いられるような場合分けをする。式(5)における添え字 i 、 j は計算メッシュにおける x 、 y 軸方向の格子点位置を表している。図-4にそれぞれの値の空間的な位置関係を示す。

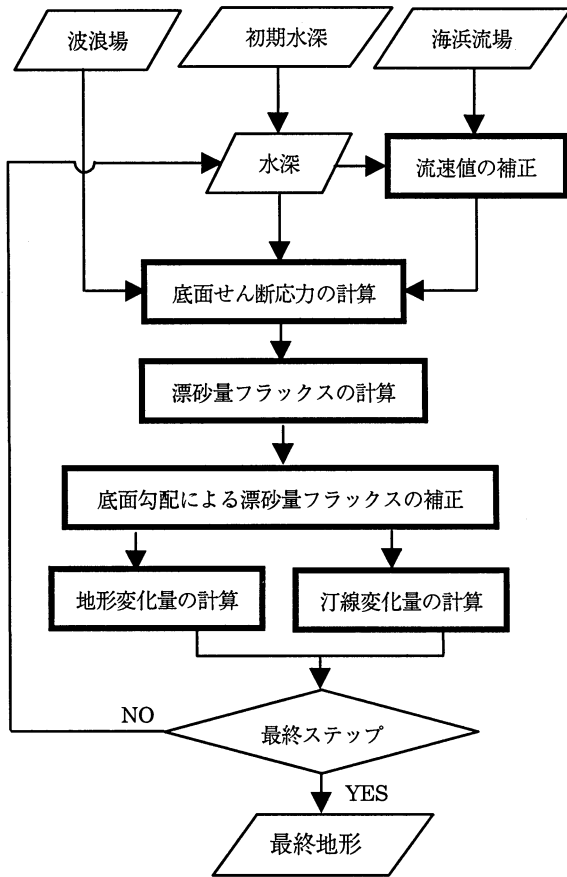


図 - 3 地形変化計算のフローチャート

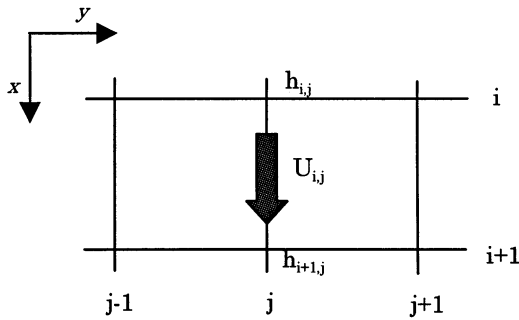


図 - 4 流速値の補正方法

$$U' = \begin{cases} \frac{h_{0,i,j}}{h_{i,j}} U_{i,j} & U_{i,j} \geq 0 \\ \frac{h_{0,i+1,j}}{h_{i+1,j}} U_{i,j} & U_{i,j} \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

3.2 底面せん断応力の補正

水深が変化することによって波による底面軌道流速、底面せん断応力が変化する。これらの変化による漂砂量フラックスの変化を評価するために、地形変化計算初期の波浪条件と時々刻々の水深を用いて、地形変化計算の底面軌道流速を求め、底面せん断応力を再評価する。また、海浜流の流速値の補正を行う場合には、時々刻々の水深変化と海浜流の流速変化を同時に考慮して底面せん断応力を再評価する。

3.3 水底勾配による影響の考慮

求められた漂砂量フラックスには水底勾配の影響が考慮されていない。このため、計算上は極端な凹凸のある地形や、安息角以上の水底勾配となるような地形変化を生じた場合に、それを抑制するような効果が入り入れられていない。そこで、フローチャート(図-3)に示すように、流速値の補正および底面せん断応力の補正の各操作を施した後に求められた漂砂量フラックス q から、底面勾配をパラメータとして、式(6)のように漂砂量フラックスを補正する。

$$q'_x = q_x - \varepsilon \frac{\partial h}{\partial x} |q_x| \quad (6)$$

ここで、 q_x : x軸方向の漂砂量フラックス成分、 q'_x : 実際の地形変化計算に用いる補正後の x 軸方向の漂砂量フラックス成分、 ε : 底面勾配による補正量の大きさを調整する無次元係数である。

この手法は渡辺ら¹¹⁾によって導入され、その妥当性も確認されている。基本的には海底地形を滑らかにする効果があるので、長期的に安定な海浜変形計算を行う際には有効な手法であると考えられる。

4. 比較計算

先に示した外力場補正法の妥当性を検討するため、モデル地形に対する比較計算を行った。計算に用いた地形は、モデル地形1として、平行等深線地形の中央部を浚渫した地形を、モデル地形2として計算領域の両側にヘッドランドを設置した人工海浜の地形を用いた。それぞれのモデル地形を図-5、6に示す。ここで、平面座標の格子間隔は、 $x = y = 25m$ とした。

4.1 計算条件

2種類のモデル地形に対して、各漂砂量フラックス補正法、波浪場・海浜流場の繰り返し計算時間間隔の違いにより、それぞれ5ケースの計算を行った。ケース一覧を表-1に示す。表-1の地形変化計算における局所漂砂量フラックスの繰り返し計算時間間隔 t については、

本報では比較結果を示さないが、十分に小さな値を設定すれば、計算結果に有意な差異は生じないことが確認された。本報では十分に小さな値として、 $t=0.1$ (日)とした。

また表 - 1 中の波浪場・海浜流場の繰り返し計算回数は、40日間の地形変化計算を行う場合に必要な回数を示している。ケースC'、D'は、ケースC、Dと同じ計算条件で波浪場・海浜流場の繰り返し計算を行わない定常解析を行った場合である。たとえば、40日間の計算をケースC'、D'で行うには、波浪場、および海浜流場を一度だけ計算し、その結果に対して継続日数40日間の地形変化計算を行う。ケースAは外力場の補正を行い、かつ波浪場・海浜流場の繰り返し計算時間間隔を十分に細かく設定しているので、最も精度が高いと考えられるので、以下の検討ではケースAの計算結果との比較を通じて、各ケースの計算精度を評価する。

また、入射波条件は、波高： $H=2.0m$ 、周期： $T=9.0s$ 、波向：汀線直角方向から右側に 11.25° である。

5 . 計算結果および考察

各モデル地形の、初期地形に対する波浪場および海浜流場の計算結果を図 - 7、8 に示す。モデル地形1では等深線に沿って海浜流が生じ、浚渫範囲で流速値が低減していることから、浚渫範囲での漂砂の堆積が予想される。一方、モデル地形2では、ヘッドランドの回折域へ

流れ込む循環流が生じており、ヘッドランド基部への漂砂の堆積が予想される。

5 . 1 流速補正の効果の検討

ケースA～Dの40日後の等深線変化を図 - 9、10 に示す。さらにモデル地形1における10日後の地形変化を拡大して図 - 11 に示す。

モデル地形1、2ともに、漂砂量の補正を行わないケースBでは、侵食・堆積が過剰に現れている地点がある。また、水深変化のみを考慮して底面せん断応力を算定し直すケースCは、モデル地形1でケースAと等しい地形変化を示しているが、モデル地形2ではヘッドランドに沿った舌状地形が極端に張り出している。これに対し、水深変化に伴う流速変化も考慮して底面せん断応力を評価し直すケースDでは、モデル地形1の計算で、この舌状地形の沖側への張り出しが、ケースAに比べてやや滑らかに計算されているものの、ほぼ等しい計算結果が得られている。モデル地形2では、ケースCと異なり安定で滑らかな地形変化が計算されたが、ケースAに比べて、ヘッドランド基部における堆積がやや過大に評価されている。これは等深線が沖側に前進することによって、実際には波向に対する等深線角度が直角に近づき、等深線平行方向のradiation stress 勾配が減少するのに対して、本報で用いた漂砂量補正方法にはこの現象が考慮されていないことが原因として考えられる。

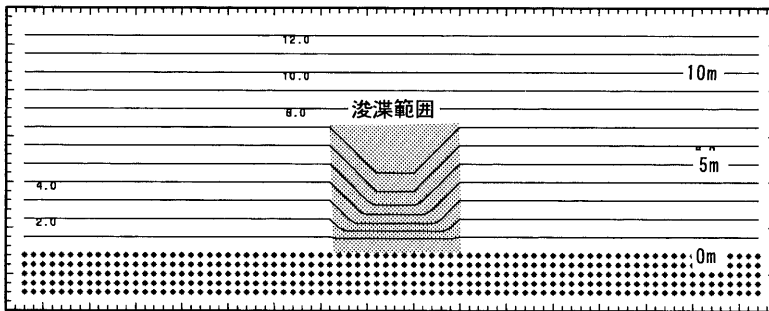


図 - 5 モデル地形1

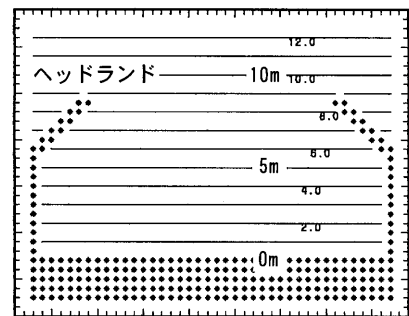


図 - 6 モデル地形2

表 - 1 検討ケース一覧

ケース	A	B	C	D	E	C'	D'
波浪場・海浜流場の繰り返し計算時間間隔(日)	1.0	10.0	10.0	10.0	10.0	-	-
波浪場・海浜流場の繰り返し計算回数	40	4	4	4	4	1	1
地形変化計算の計算時間間隔(日)	0.1	10.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
底面せん断応力の補正(流速補正未考慮)		-	-			-	
底面せん断応力の補正(流速補正考慮)		-					
底面勾配による補正	-	-	-	-		-	-

また、図 - 11で、流速値の補正を行わないケースCと行うケースDを比較すると、ケースCの計算結果の方がケースAに近い等深線形状を示している。このことから、本報で用いた流速値の補正法は、水深変化が局所的に顕著に発生する地点の地形を滑らかに計算することがわかる。

以上の結果から、長期的な計算では水深変化に伴う流速補正を考慮した方が安定な計算が行えるが、局所的に生じる地形変化は本報で用いた流速補正法では計算結果をやや過剰に滑らかに計算する場合があることがわかった。この原因は、底面摩擦の影響や radiation stress の変化の影響を考慮せずに、単純に水深に反比例させて流速値を補正する方法を用いていることに原因があると考えられる。しかしながら、次節に示すように、地形変化の定量的な比較では十分な精度を有しており、かつ全体的な地形変化特性も十分に再現できていることから、長期解析に耐えうるモデルという観点では、水深変化とそれに伴う流速変化の両者を考慮した底面せん断応力補正が非常に有効であることが示された。

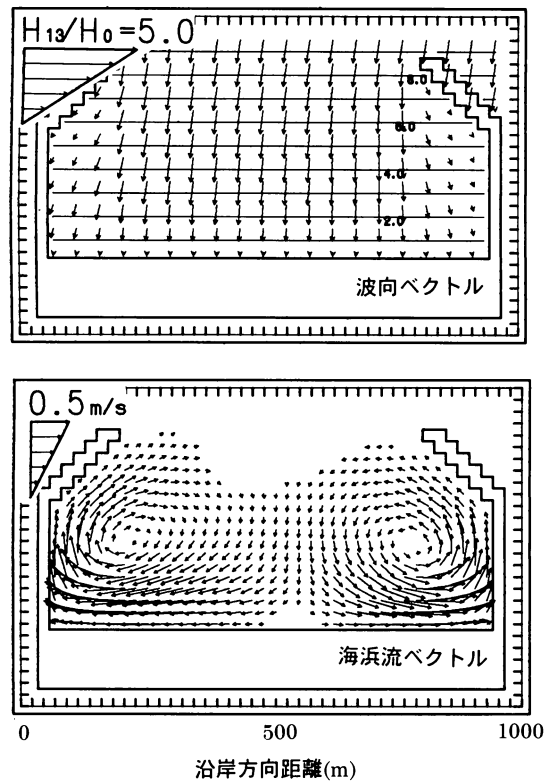


図 - 8 波浪場・海浜流場の計算結果 (モデル地形2)

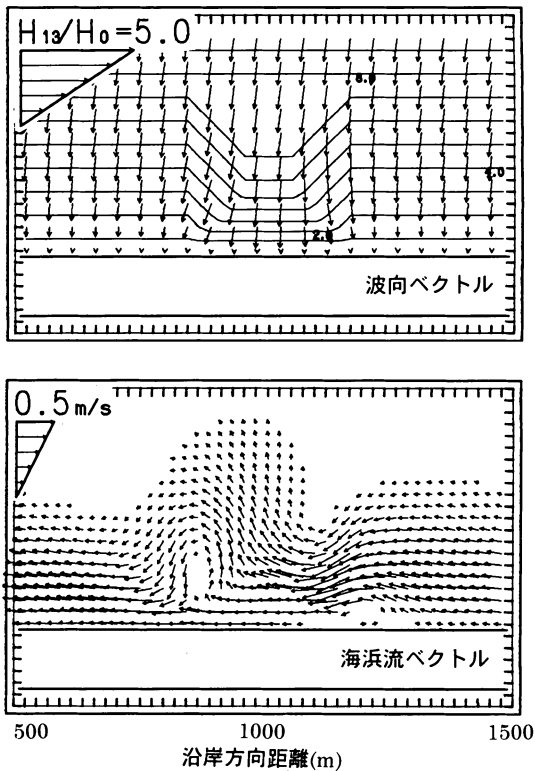


図 - 7 波浪場・海浜流場の計算結果 (モデル地形1)

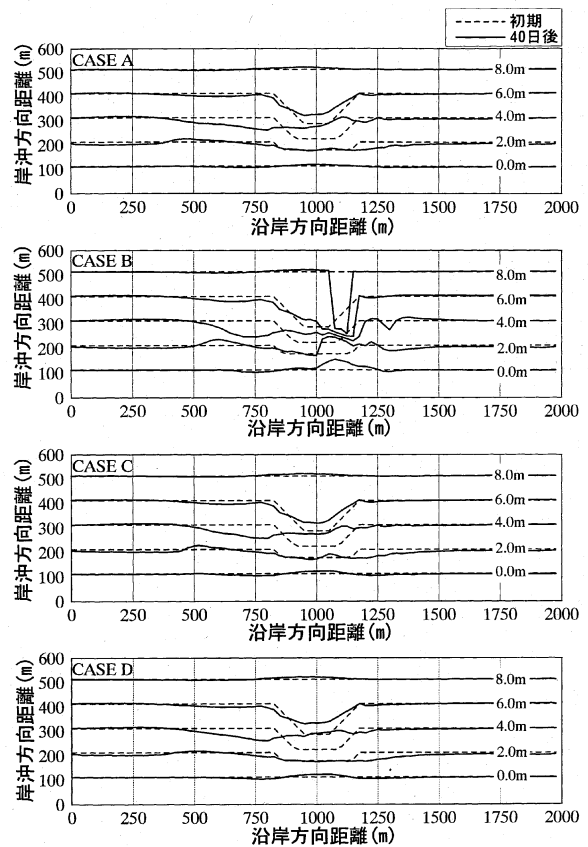


図 - 9 等深線比較図 (モデル地形1, 40日後)

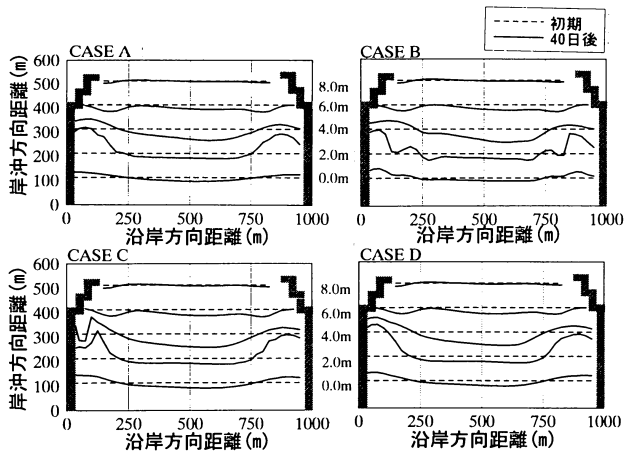


図 - 10 等深線比較図(モデル地形2, 40日後)

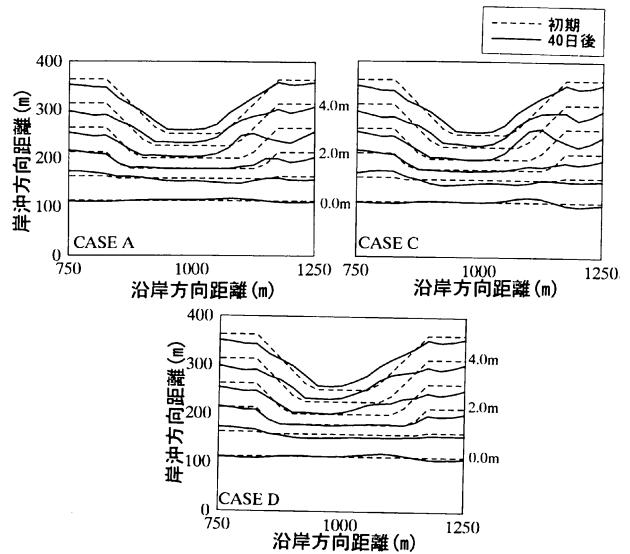


図 - 11 等深線比較図(モデル地形1, 10日後)

5.2 定量的な解析精度の比較

モデル地形1のケースA、C、D、C'、D'について、図-5に示す浚渫範囲における総地形変化量の比較結果を図-12に示す。図-12における横軸の日数は計算期間を示している。ケースC'、D'ではそれぞれ初期の外力場を用いて20、30、40日間の定常解析を行った。図-12より、20日を越えると定常解析では極端に精度が低下しているのがわかる。一方、ケースC、Dのように波浪場・海浜流場の繰り返し計算時間間隔を10日間とした非定常解析を行った場合には、誤差の蓄積が起らず、精度良く地形変化量を計算できる。以上の結果から、水深変化および流速変化に伴う底面せん断応力の補正を適切に行うことによって、波浪場・海浜流場の繰り返し計算時間間隔をある程度長く設定しても、計算精度を劣化させることなく地形変化予測できることがわかった。しかしながら、この繰り返し計算時間間隔の延長には限界があり、入射波条件の設定とともに計算結果に大きな影響を及ぼすので、事前に十分な検討を行い、適切な条件設定を行う必要がある。

5.3 底面勾配による

漂砂量フラックス補正の効果

モデル地形1におけるケースDと、さらに底勾配による漂砂量補正も行ったケースEにおける10日後の地形変化計算結果の等深線の比較を図-13に示す。図-13では、 σ の値を現地スケールにおける計算で一般に用いられる値として $\sigma=10$ 、 $\sigma=20$ の2ケースの計算結果を示している。計算結果から、底勾配による漂砂量補

正の効果は、等深線が平行等深線に近づく方向に作用し、 σ の値が大きくなるほどその効果が大いことがわかる。ケースC、Dで示したように、水深変化と流速変化による底面せん断力補正による地形変化計算で十分な計算結果の平滑化が行えることから、底面勾配による漂砂量フラックスの補正は考慮する必要はないと考えられる。

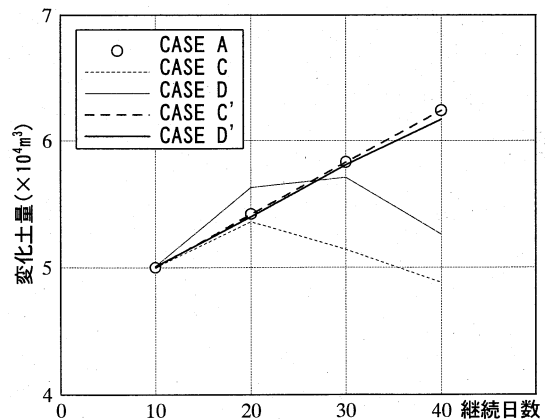


図 - 12 地形変化量の比較

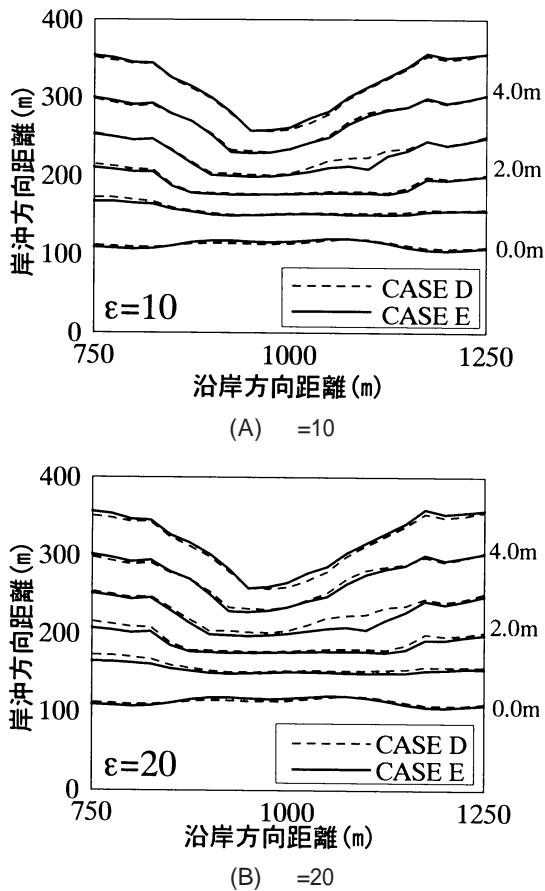


図 - 1 3 等深線比較図(モデル地形 1, 10日後)

6. あとがき

3次元海浜変形モデルにおいて、地形変化の履歴を外力場の変化に簡易的に反映させることを目的とした漂砂量フラックスの補正法を整理し、その解析精度を確認した。本報で整理した補正方法をモデルに組み込むことによって、非定常解析における波浪場・海浜流場の繰り返し計算時間間隔を多少長く設定しても、精度を劣化させずに地形変化を計算できることがわかった。しかしながら、この繰り返し計算時間間隔の延長には限界があり、入射波の順番も含めた時化モデルの設定が、計算結果に大きく影響を及ぼすことにも留意する必要がある。とりわけ、radiation stressが大きく変化するような場合には、本報における外力場の補正法では十分な効果が得られない。

以上の結果から、水深変化に伴う流速補正法の改良、とりわけ、トンボ口状の地形が発達する場合には、顕著な地形変化が生じる場合の流速補正法の確立が今後の課題であると考えられる。

参考文献

- 1) 清水琢三・水流正人・渡辺 晃: 3次元海浜変形モデルによる長期的な地形変化予測、海岸工学論文集、第39巻、pp.416 ~ 420、1992
- 2) 清水琢三・熊谷隆宏・三村信男・渡辺 晃: 汀線変化を考慮した3次元海浜変形モデル、海岸工学論文集、第41巻、pp.406 ~ 410、1994
- 3) Karlsson, T.: Refraction of continuous ocean wave spectra, Proc. ASCE, Vol.95, No.WW4, pp.437-448, 1969
- 4) 磯部雅彦・放物型方程式を用いた不規則波の屈折・回折・砕波変形の計算法、第33回海岸工学講演会論文集、pp.134 ~ 138、1986
- 5) 高山知司・池田直太・小林宣史: 多方向不規則波を用いた波浪変形模型実験、港研報告、第30巻、第1号、pp.67 ~ 121、1991
- 6) 清水琢三・鶴飼亮行・原 基久・磯部雅彦: 多方向不規則波の屈折・回折・砕波変形計算法の現地適用性、海岸工学論文集、第39巻、pp.181 ~ 185、1992
- 7) 丸山康樹・平口博丸・鹿島遼一: 不規則波に対する屈折計算法の適用性、電力中央研究所報告、研究報告: 383034、47p.、1983
- 8) Longuet-Higgins, M.S.: Longshore currents generated by obliquely incident wave, J.Geophys. Res., Vol.75, No.33, pp.6778-6789, 1970
- 9) 田中 仁・Sana, A.: 交差する波と流れの抵抗則の検討、土木学会論文集、第533号/II-34, pp.273 ~ 277、1996 (論文中の式(4)の訂正が同論文集、第565号/II-39に掲載された; 正、 $C1=-0.0101-0.3469 \quad 0.2$)
- 10) 棚橋隆彦著: はじめてのCFD、移流拡散方程式、コロナ社、271p.、1996
- 11) 渡辺 晃・丸山康樹・清水隆夫・榊山 勉: 構造物設置に伴う3次元海浜変形の数値予測モデル、第31回海岸工学講演会論文集、pp.406 ~ 410、1984