

新しい等深線変化モデル(3D-LINE)の開発とその適用性について

田島 芳満* 清水 琢三**
 関本 恒浩* 水流 正人*

要 旨

平面的な海浜変形予測手法は、海岸線変化モデルと3次元海浜変形モデルに大別される。海岸線変化モデルは計算時間が短く、長期間の予測解析においても計算が安定であるのが特徴であるが、実現象を単純化したモデルであるため複雑な地形・波浪条件下における地形変化解析には適さない。一方、3次元海浜変形モデルは平面的な海浜流計算を行うため、任意の海岸構造物条件、波浪条件における外力場を地形変化計算に反映することができるが、海浜流計算に多大な時間を要するので広域的・長期的な地形変化解析を行うには実用上の限界がある。そこで、広域的・長期的な地形変化解析に有利な等深線変化モデルに着目し、この利点を有したまま3次元海浜変形モデルとの高い整合性を持つ等深線変化モデルを新たに構築し、汀線変化を考慮できる3次元海浜変形モデル(3D-SHORE)との相互比較からその適用性を検討した。さらに、当モデルの今後の課題・発展性について考察を行った。

1. はじめに

3次元海浜変形モデルは、平面波浪場の計算結果に基づく radiation stress の空間勾配を起因力とする平面海浜流場の計算を行うため、微小振幅波理論の範囲内では任意の海岸構造物条件、波浪条件に対して地形変化と外力場の変化の相互作用を反映することが可能である。しかし、海浜流場の計算には、現在のところ多大な計算時間を要するため、地形変化の履歴を逐次考慮しながら長期間の地形変化を計算するには実用上の限界がある。

一方、海岸線変化モデルは沿岸漂砂による地形変化機構を単純化したモデルであり、全沿岸漂砂量は砕波点における波高と波向の影響を陽に含むモデルを用いて評価される。このとき、地形変化に伴う沿岸漂砂量の変化は等深線角度に対する砕波波向だけに依存する。したがって、海岸線変化モデルでは、短い計算時間間隔で地形変化の履歴を考慮しながら沿岸漂砂量を補正することが可能であり、この補正効果によって地形変化が初期の外力場に対して定常的に安定となる等深線形状に漸近する。このため、長期間の予測解析においても計算が安定で、沿岸漂砂の遮断や供給土砂の減少による広域的かつ長期的な土砂収支を議論する際に有用な予測手法である。しかしながら、複雑な海底地形や海浜循環流が発達する場合など、任意の計算条件に対しては課題が残されている。

田島ら¹⁾は、広域的・長期的な平面地形変化予測に利点を有する等深線変化モデルに着目し、この利点を損なわずに3次元海浜変形モデルと同様な手法で沿岸漂砂量を評価する等深線変化モデル(3D-LINE)を新たに構築し、既往の海浜変形モデルとの相互比較からその適用性を示した。本報ではこれらの研究成果をとりまとめ、今後の課題ならびに発展性についての考察を加える。

2. 等深線変化モデルの概要

2.1 既往のモデル

等深線変化モデルは、砕波波高および砕波波向から、沿岸方向の全漂砂量を簡易的に評価し、その岸沖方向分布を考慮して、漂砂の連続式から各等深線毎に前進・後退量を算定するモデルである。

宇多・河野²⁾は、沿岸漂砂量の算定に Savage 公式を用い、沿岸漂砂量の岸沖分布は実験結果から経験的に得られる汀線にピークを有する分布形を用いている(以後、宇多モデルと呼ぶ)。このモデルは、自然海岸での突出地形、突堤、護岸、防波堤周辺の高浜変形や海底谷周辺の海浜変形など数多くのケースに対して適用されている。モデルの妥当性は、主として平面移動床実験結果に基づき検討されるとともに、現地適用例も数多く報告されている。しかしながら、宇多モデルの沿岸漂砂量の岸沖分布は、パー・トラフの形成が顕著でない比較的急勾配の海岸に限定されると述べられている(宇多・河野²⁾)。したがって、沿岸漂砂量の岸沖分布を物理的なメカニズムに基づき汎用化することが等深線変化モデルの汎用化を図る上では重要な課題となる。

そのような観点から、高木³⁾は合田・渡辺⁴⁾の不規則波による沿岸流速公式を若干補正して沿岸流速の岸沖分布を評価し、局所漂砂量フラックスが渡辺ら⁵⁾のモデルと同様に沿岸流速と底面剪断応力の積に比例すると考え、沿岸漂砂量の岸沖分布を直接評価することを試みている(以後、高木モデル)。ただし、全沿岸漂砂量は、沿岸漂砂量式として最も一般的な CERC 公式(宇多モデルの Savage 公式と基本的には同型)に、沿岸方向の波高分布によって生じる radiation stress 勾配に起因する流れの効果を考慮した小笹・Brampton⁶⁾の沿岸漂砂量式を用いてい

* 技術研究所 ** 企画部

る。モデルの適用例は土木学会編⁷⁾に示されている。高木モデルでは合田・渡辺⁴⁾の沿岸流速公式を用いることで海浜流場の計算時間を短縮することに成功しているが、流速公式が平行等深線海岸の沿岸流場に対して得られたものであり、複雑な海底地形や遮蔽などによって沿岸方向の波高分布が生じる場合には適用できない。

2.2 改良等深線変化モデル(3D-LINE)

本研究で提案する等深線変化モデル(3D-LINE)の基本的な考え方は、高木モデルと同様、沿岸漂砂量の岸沖分布を局所的な波高、波向、流速等の外力から評価される局所漂砂量分布に基づき一般的に設定することである。そのためには、まず沿岸流速分布を任意の海底条件、波高分布に対して精度良く評価する必要がある。そこで radiation stress 勾配は平面波浪場の計算結果をそのまま使い、沿岸方向流速を簡易的に計算する方法を導入した。沿岸漂砂量は、波と流れの外力から清水ら⁸⁾の改良渡辺モデルを用いて局所的に評価するとともに、全沿岸漂砂量も局所漂砂量の等深線平行方向成分を遡上点から移動限界点まで積分することにより評価する。等深線の変化は radiation stress の等深線平行方向成分の変化として沿岸流速の変化に反映させる。例えば、離岸堤などの遮蔽域でのトンボ口状の堆積地形は、従来の等深線変化モデルでは等深線に対する碎波波向の変化を通して平衡状態に漸近するが、3D-LINE では沿岸流の起因力の変化を通じて沿岸流が減少することで平衡状態になることを表現する。このため、3D-LINE は、平行等深線海岸の沿岸流場では、Shimizu ら⁹⁾の汀線変化を考慮した3次元海浜変形モデル(3D-SHORE)と整合したモデルになる。

3. 3D-LINE の計算法

田島ら¹⁾による3D-LINEの計算フローを図-1に示す。3D-SHOREと同様、モデルは波浪場、海浜流場、地形変化の3つのサブモデルによって構成される。以下にそれぞれのサブモデルの計算方法を示す。

3.1 波浪場の計算

平面波浪場の計算は、3D-SHOREと同様、任意の海底地形、構造物条件に対して、不規則波の屈折、回折、浅水・碎波変形を同時に考慮できる計算手法を用いる。本検討では、エネルギー平衡方程式に、磯部¹⁰⁾の碎波減衰項を考慮したモデルを用いた。また、遡上域の波浪場の評価についても3D-SHOREと同様の方法を用いた。

3.2 沿岸流場の計算

沿岸流速は、式(1)の運動方程式を基礎式として、平面波浪場の計算結果から求まる radiation stress 勾配を用いて数値的に評価する。

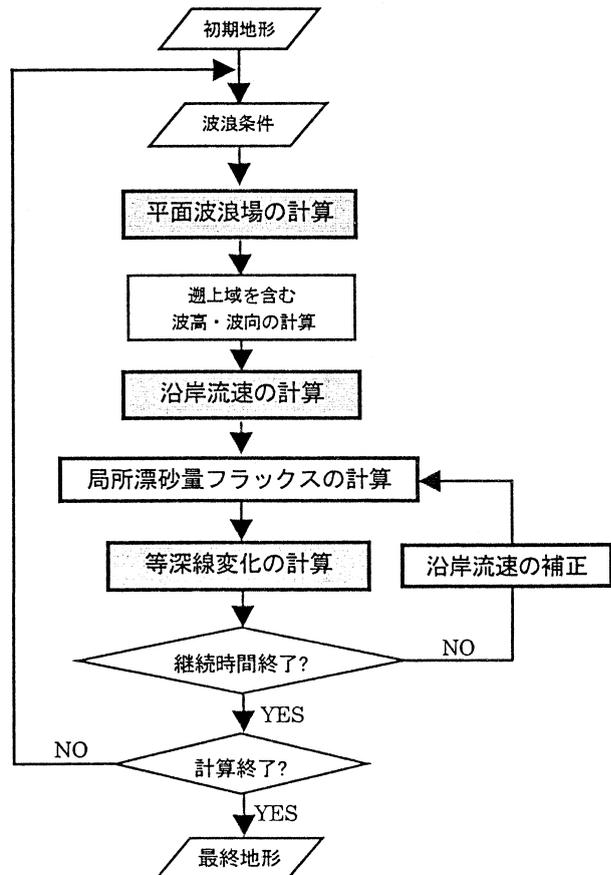


図-1 3D-LINE の計算フロー

$$\frac{\partial V}{\partial t} + F_y - \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon \frac{\partial V}{\partial y} \right) \right] + R_y = 0 \quad \dots (1)$$

$$R_y = \frac{1}{\rho D} \left(\frac{\partial S_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial x} \right) \quad \dots (2)$$

ここで、V: 沿岸方向流速成分、R_y: radiation stress 項、S_{yy}、S_{xy}: radiation stress、F_y: 底面摩擦応力項、ε: 水平拡散係数、D: wave set-upを考慮した水深、ρ: 海水の密度である。式(1)では、岸沖測線方向の流速値は定常的にはほぼ無視できるものと仮定し、かつ沿岸方向の重力項、移流項は無視した。

Wave set-upについては、平面波浪場の計算で遡上高さを算定する際に評価した値を用いた。

水平拡散項についても3D-SHOREと同様の評価手法を用いることが可能であり、本検討ではLonguet-Higgins¹¹⁾およびLarson Kraus¹²⁾の評価式を用いた。各等深線と平行方向の流速成分を直接算定するために、計算座標系は図-2に示すように、沿岸方向に等間隔、岸沖方向に等水深間隔とした。すなわち、y軸は各測線毎の等深線平行方向になり、陸地境界線が座標軸に対して有意な角度を持つ場

合には、計算精度が向上することが期待される。

底面摩擦項は、田中・Thu¹³⁾による、全てのflow regimeに適用可能な波・流れ共存場における底面摩擦則の陽形式近似式を過去の実験データに基づき改良した田中・Sana¹⁴⁾のモデルを用いた。地形変化を計算する際、等深線変化の履歴を考慮して沿岸流速を簡易的に逐次補正するが、この補正方法については後述する。

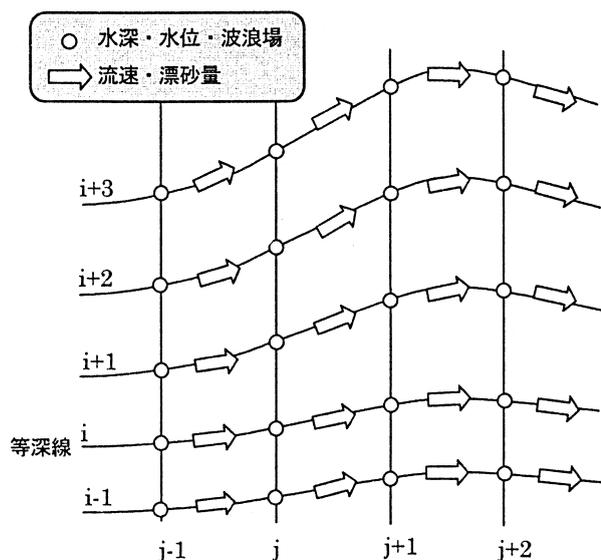


図 - 2 計算格子と解析諸量の定義位置

3.3 地形変化の計算

波浪場と沿岸流の計算結果を用いて、岸沖測線上の各点での等深線に平行方向の局所漂砂量フラックスを算定する。局所漂砂量フラックスは、3D-SHOREと同様、シートフロー状の砂移動にも適用性が拡張され、種々の外力、底質条件に対しても現地適用性が確認されている清水ら⁸⁾の改良渡辺モデルを用いた。その基本式は以下のである。

$$q_c = A_c (u_{*m}^2 - u_{*c}^2) u_c / g \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$q_w = A_w F_D (u_{*m}^2 - u_{*c}^2) u_b / g \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 q_c : 流れによる漂砂量フラックス、 q_w : 波による漂砂量フラックス、 u_m : 波・流れ共存場の最大底面摩擦速度、 u_c : 移動限界摩擦速度、 g : 重力加速度、 u_c : 平均流速、 u_b : 波の底面軌道流速振幅、 A_w, A_c : それぞれ波あるいは流れによる漂砂量係数、 F_D : 漂砂の移動方向を示すパラメタ(岸向きするとき1、沖向きするとき-1)である。波による漂砂量係数 A_w は、底質粒径や沈降速度、摩擦係

数等の関数として表されるが、一方で流れによる漂砂量係数 A_c は A_w の10倍に設定した。また、底面剪断応力の評価には、沿岸流の計算と同様、田中・Sana¹⁴⁾の底面摩擦則を用いた。ゆえに、地形変化の計算は、式(3) (4)で表される岸沖方向測線毎の沿岸漂砂量フラックスを隣り合う等深線間で積分して任意の等深線における沿岸漂砂量 Q_i を求め、漂砂の連続式(5)からそれぞれの等深線の前進・後退量を算定した(図-3)。ただし、沿岸漂砂量 Q_i の計算には流れによる漂砂量フラックス q_c のみ考慮している。

$$\frac{\partial x_i}{\partial t} + \frac{1}{h_i} \frac{\partial Q_i}{\partial y} = 0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

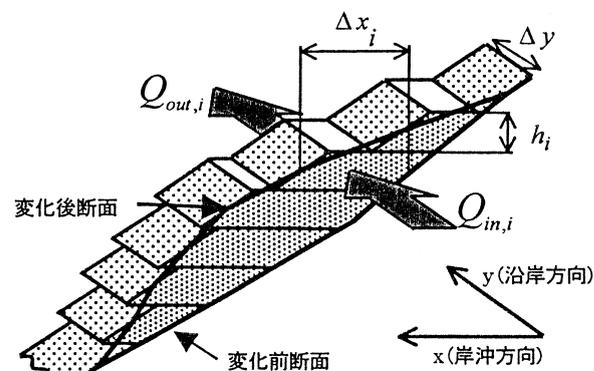


図 - 3 等深線変化量の算定方法

3.4 地形変化の履歴を考慮した外力場の補正方法

図-1の計算フローに示したように、実際の数値解析では検討対象地点の波高の出現頻度に対応するように、それぞれ数日～数十日間の時間間隔でモデル化された入射波の時系列に対して、地形変化の履歴を考慮しながら波浪場と海浜流場、等深線変化量を繰り返し計算する。それと同時に、各繰り返し計算中の等深線変化計算では、さらに細かい時間間隔で等深線変化の履歴を考慮しながら、沿岸漂砂量フラックスの補正を行う。漂砂量フラックスの補正方法を以下に示す。

1ステップの地形変化計算内では、等深線位置が変化しても、同一水深上では波高値が変化しないものと仮定し、各等深線に対する波向の変化だけを考慮して沿岸流の起因力であるradiation stress項の変化を評価する。砕波帯内で各等深線に平行方向のradiation stress項を積分し、計算初期からの変化量に比例させて流速値を補正する。

補正後の流速を用いて、底面剪断応力ならびに局所沿岸漂砂量を再評価する。

図 - 4 は、平行等深線海岸に同一波高で入射波向のみを変化させた場合の、砕波帯内における沿岸流速の平均値と radiation stress 項の総和の関係を示したものである。計算条件は、海底勾配 1/50、有義波高 2m、周期 9s で、波向は汀線に対する法線方向から 5 ~ 45° の範囲を 5° ピッチで変化させた。結果は、縦軸、横軸ともに 45° のケースに対する比として無次元化している。砕波帯内の平均流速と radiation stress 項の総和はほぼ比例関係にあり、上述における流速値補正方法の妥当性が確認できる。

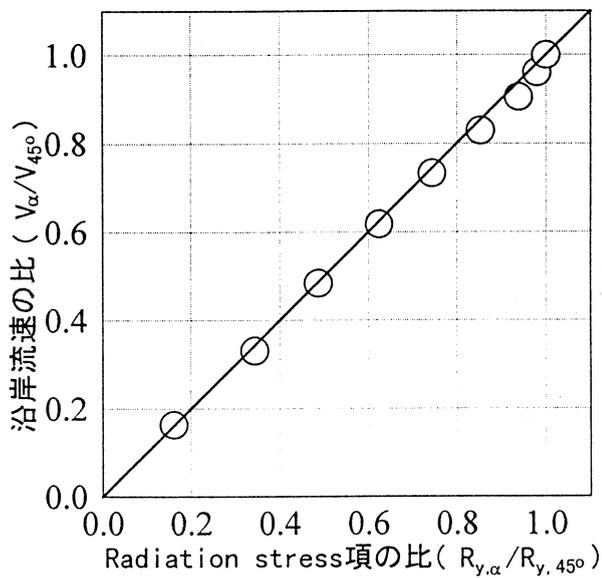


図 - 4 各測線毎における砕波帯内の平均流速(V)と Radiation Stress 項の総和($R_{y,\alpha}$)の関係

3.5 構造物周辺での等深線変化計算のモデル化

護岸や突堤、離岸堤周辺など、海岸構造物壁が存在する場合の等深線変化の算定方法を図 - 5 に示す。構造物壁は全て鉛直壁であるものとし、本研究では構造物内への漂砂の透過は無視した。計算手順は以下の通りである。

沿岸漂砂量の積分範囲内に構造物壁が存在する場合は沿岸漂砂量が存在する範囲内を積分範囲とする
沿岸漂砂量の差分(ΔQ)の正負によって場合分けし、式(6)、(7)を解き前進後退量を算定する

$$\Delta Q \Delta t = \Delta x \Delta y \Delta h + \frac{1}{2} \Delta x^2 \Delta y \tan \beta \quad (\Delta Q \geq 0) \dots (6)$$

$$\Delta Q \Delta t = \Delta x \Delta y \Delta h - \frac{1}{2} \Delta x^2 \Delta y \tan \beta \quad (\Delta Q \leq 0) \dots (7)$$

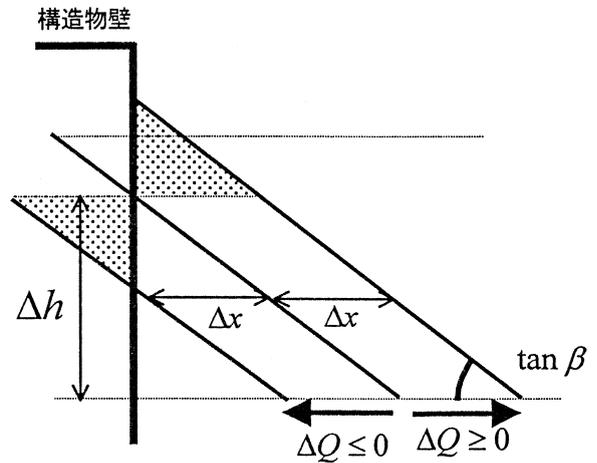


図 - 5 構造物壁前面における等深線前進後退量の算定方法

3.6 限界勾配による岸沖方向漂砂移動のモデル化

等深線変化モデルでは各等深線毎の沿岸漂砂量フラックスの収支からそれぞれ個別に各等深線の前進後退量を算定している。このため、計算をそのまま進めていくと実際には起こり得ない急勾配な地形を形成する場合が生じることがある。しかし、実際には深海部へ土砂が落ち込むことによってこのような現象は起こらるので、本モデルでは限界勾配の考えを取り入れ、図 - 6 のフロー図に従って沖方向への漂砂移動量を考慮する。ここで $\tan \beta_i$ は i 番目、 $i+1$ 番目の等深線間の水底勾配を示し、 $\tan \beta_r$ は限界勾配を示す。 r は沖向き漂砂を考慮しはじめる水底勾配を決定する係数で、本検討では $r=0.5$ とした。すなわち、各等深線間の水底勾配が限界勾配の 1/2 に達した時点から沖向き漂砂を考慮しはじめることになる。また、岸沖方向座標は沖向きを正とし、深海部へ落ち込む土砂量を表現するため岸沖方向の漂砂量は全て沖向きとしてモデル化した。

4. 既往の海浜変形モデルとの相互比較

新たに提案した等深線変化モデルの適用性を検討するために、清水ら¹⁶⁾が汀線変化モデル、等深線変化モデル(宇多モデル)ならびに 3次元海浜変形モデル(3D-SHORE)の相互比較をする際に用いた沿岸漂砂阻止に伴う海浜変形のモデルケースを対象とする数値解析を実施した。

4.1 計算条件

等深線変化モデルと3D-SHOREの計算範囲は沿岸方向3kmの範囲であり、初期地形は海底勾配1/50の平行等深線海岸である。いずれのモデルも、ピーク有義波高4mの2時化で代表させたモデル時系列波浪に対して、1年間の地形変化を計算した。波向は一定で汀線直角方向から11.25°の斜め入射とした。検討対象とする海浜変形モデルは、等深線変化モデルとして宇多モデル、3D-LINEの2種類と3D-SHOREである。宇多モデルでは、小笹・Brampton⁶⁾の沿岸漂砂量式を用いたが、漂砂量係数は $K_1=0.4$ 、 $K_2/K_1=0.65$ とした。清水ら¹⁴⁾によれば、汀線変化モデルに対しては $K_2/K_1=1.62$ で、3D-SHOREの計算結果とほぼ一致する汀線変化が得られているが、本研究では漂砂量の大きい等深線間で計算が不安定になったため、

小さな値を用いている。しかしながら、この $K_2/K_1=1.62$ という値は、小笹・Brampton⁶⁾が沿岸方向の波高変化に起因する砕波帯内のradiation stress勾配を砕波点で代表させて導いた値であり、沿岸流の起動力としては過大であると判断される。また、改良渡辺モデルの漂砂量係数 Bw は、清水ら¹⁵⁾と同様、粒径0.2mmに対する一般的な値として、 $Bw=4.0$ を用いた。

4.2 沿岸流速分布の比較

3D-LINEの沿岸流速分布を、3D-SHOREで用いる平面海浜流場の計算結果と比較した。波浪条件は、入射境界で有義波高2.0m、周期10s、11.25°の斜め入射とした。図-7に海浜流場の計算結果と比較する代表測線の位置を示す。測線Aは防波堤の遮蔽域、測線Bは沿岸流が発達する漂砂の上手端である。各測線における沿岸流速の比較を図-8に示す。等深線変化モデルでは岸沖方向の格子間隔を10m、3D-SHOREでは25mとしているため、汀線付近で違いがみられるものの、斜め入射波による沿岸流が発達する測線Bでは、概ね良好に一致している。また、遮蔽域の測線Aでは、改良等深線変化モデルは沿岸方向の波高分布に起因するradiation stressの勾配が場全体に続くと仮定して計算しているため、実際には海浜循環流が発達して汀線付近と流れの向きが反転する領域においても港湾に向かう一方の流れが計算されている。このように遮蔽域ではやや過大評価しているものの、汀線付近では良好に一致しており、構造物の遮蔽によって沿岸方向に波高分布が存在する場合でも、砕波帯内の沿岸流速分布を概ね評価できることがわかる。

4.3 沿岸漂砂量の比較

沿岸流が卓越する測線Bにおいて、3D-LINEと3D-SHOREの沿岸漂砂量の岸沖方向分布を比較した結果を図-9に示す。計算条件は、図-8と同じで、初期状態での漂砂量分布を示している。波高分布が同じで、流速分布もほぼ一致していることから、漂砂量の岸沖分布、大きさとも概ね一致している。宇多モデルの分布も図中に示されているが、仮定している分布形が汀線にピークを有しており、3D-LINEの分布形とは大きく異なっている。宇多・河野²⁾の沿岸漂砂の岸沖分布は実験値に基づくものであり、これは波による岸沖方向の漂砂や戻り流れによる沖向き漂砂、ならびに浜崖の形成などswash zoneにおける漂砂の影響が含まれているものと考えられる。また、図-10では岸沖測線方向に沿岸漂砂量を積分した全沿岸漂砂量の沿岸方向分布を比較している。沿岸漂砂の上手側(沿岸方向距離2000~3000m)では、港湾の防波堤に遮断されて沖に向かう流れが生じる領域を除けば、小笹・Brampton⁶⁾式も含めよく一致している。一方、海浜循環流が発達する遮蔽域ならびに漂砂の下手側では、3D-

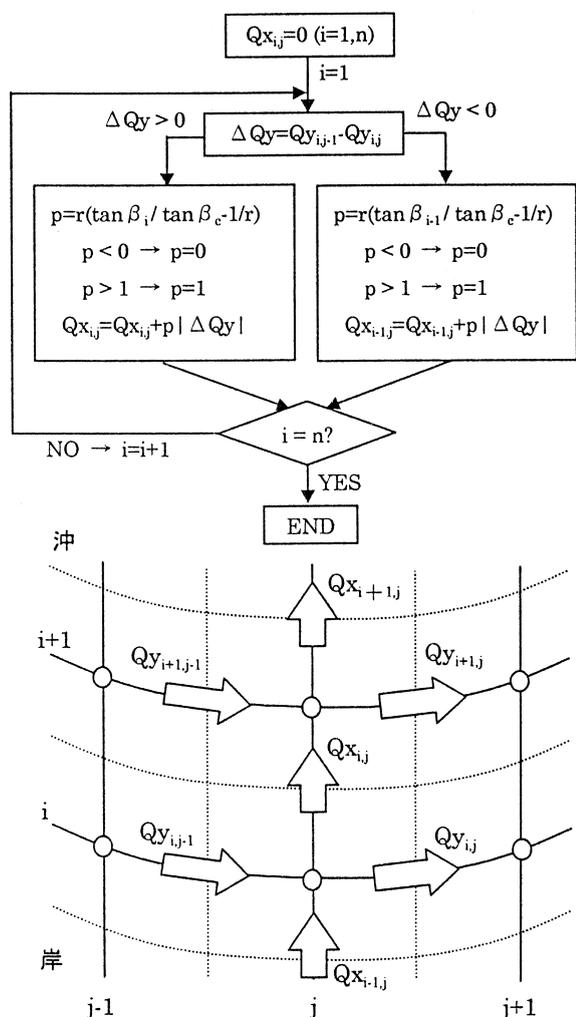


図-6 限界勾配による冲向漂砂量の評価

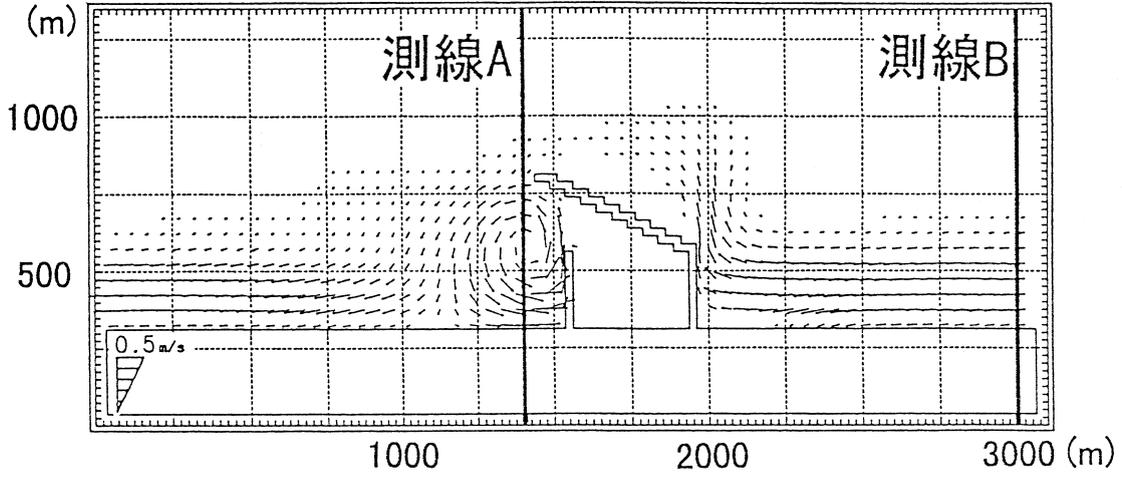


図 - 7 海浜流場の計算結果と代表測線の位置

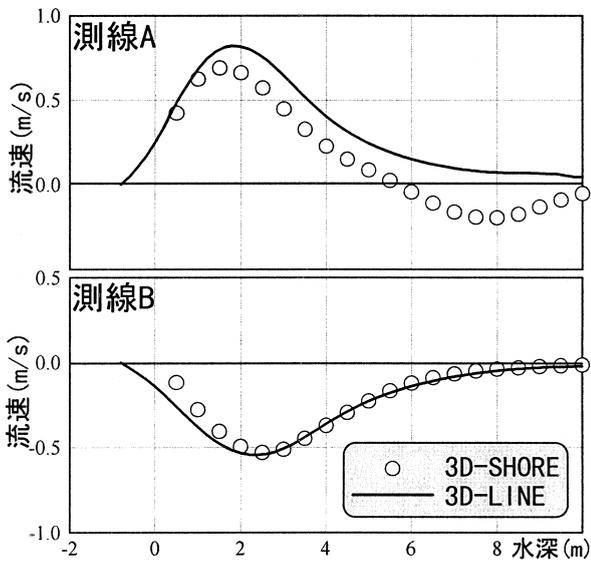


図 - 8 沿岸流速の岸沖方向分布

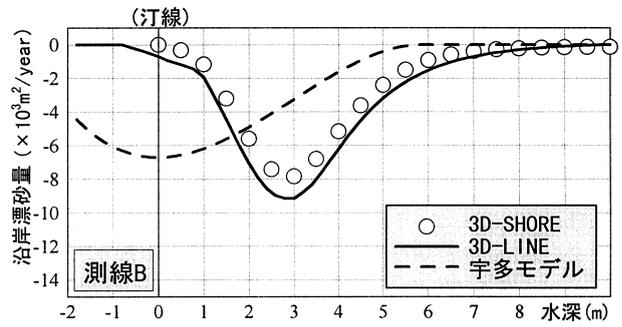


図 - 9 沿岸漂砂量の岸沖分布

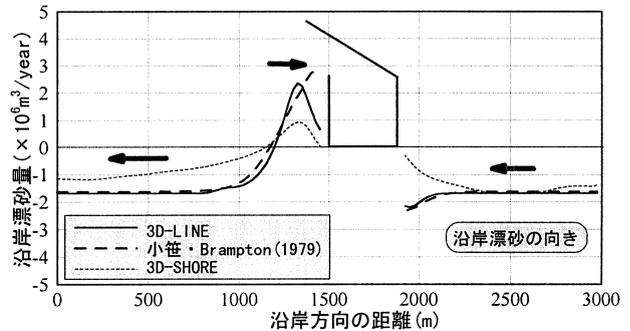


図 - 10 各岸沖測線毎の全沿岸漂砂量分布

SHOREの結果が全体的に小さくなっている。これに対し3D-LINEと小笹・Brampton⁶⁾の分布は概ね一致している。いずれのモデルも、沿岸流のレベルでは原理的に同じ考え方に基いているため、沿岸方向のradiation stress勾配を過大に評価すること、また、海浜循環流を考慮できないことから、3D-SHOREに比べて大きな沿岸流速と漂砂量を与えていると考えられる。

4.4 等深線変化の比較

図-11に、3D-LINEと宇多モデルによる1年間の等深線変化の計算結果と3D-SHOREの結果の比較を示す。図中には、汀線と、水深2m、4mの等深線の変化を示しており、漂砂の上手側の堆積状況、遮蔽域も含めた下手側の侵食状況ともに、いずれのモデルも概ね良好に一致している。このことから、改良された等深線変化モデル(3D-LINE、改良モデル)の妥当性が確認できる。

等深線変化モデルと3D-SHOREの主な違いは卓越漂砂移動方向の下手側となる港湾近傍左側において、3D-SHOREでは水深2、4mの等深線が沖に張り出していること、上手側となる港湾近傍右側においても3D-SHOREの水深2mの等深線が等深線変化モデルより後退し、4mの等深線が全般的に前進していることがあげられる。これらはいずれも沖向きの海浜流が発達しているところであり、構造物近傍での精度を向上するためには海浜循環流による沖向き漂砂を何らかの形で取り込む必要があると

考えられる。

5. おわりに

従来の等深線変化モデルの利点を損なうことなく、より複雑な波浪条件や地形条件下にも適用が可能となるモデルとして、3D-LINEを開発し、既往の海浜変形モデルとの相互比較を通じてその妥当性を確認した。海浜循環流など、沖向きの速い流れが卓越するような場における精度の向上、遡上域における漂砂量の評価精度の向上などが、今後の課題として残されている。今回提案した3D-LINEは、3D-SHOREと同様に、局所的な外力場から漂砂量を評価するモデルであるため、海浜循環流の簡便な評価法や遡上域における漂砂量の精度の向上が外力と関連づけて適切にモデル化できれば、モデルに組み込むことは容易である。また、波による岸沖漂砂や戻り流れによる沖向き漂砂による縦断地形変化モデル(例えば、Dibajniaら¹⁶⁾)とのカブリングによって、本モデルは、より一般的かつ実用的な海浜変形モデルへと発展する可能性を秘めていると考えられる。また、3D-LINEと3D-SHOREは、沿岸漂砂が卓越する場では高い整合性を持つことが確認された。これにより、たとえば港口における舌状堆積地形の発達など、等深線変化モデルでは再現することが困難な地形変化を3D-SHOREで、沿岸漂砂の卓越する広範囲の地形変化を3D-LINEでそれぞれ計算し、

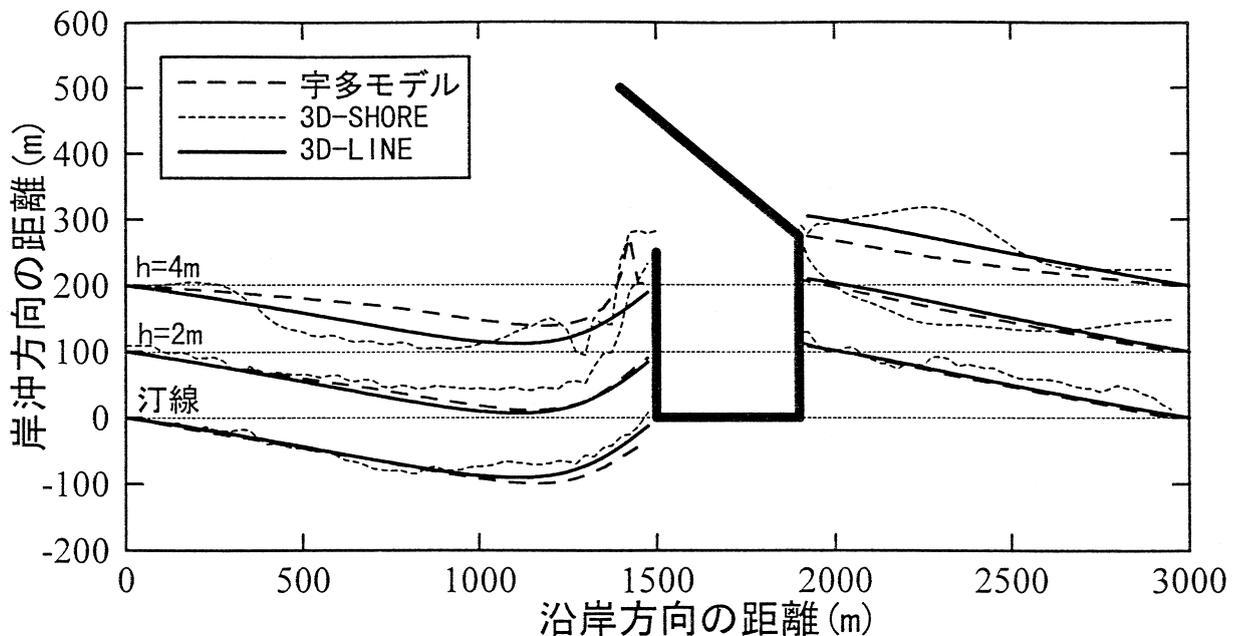


図-11 等深線変化の比較

これらを接続することが可能になると考えられる。

参考文献

- 1) 田島芳満・清水琢三・渡辺 晃：等深線変化モデルの改良とその適用性について、海岸工学論文集、第45巻、pp.546-550、1998
- 2) 宇多高明・河野茂樹：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、No.539/ -35、pp.121-139、1996
- 3) 高木利光：海岸線変化モデル、漂砂環境の創造に向けて、第 編、2.3、土木学会海岸工学委員会研究現況レビュー小委員会、pp.232-245、1998
- 4) 合田良實・渡辺則行：沿岸流速公式への不規則波モデルの導入について、海岸工学論文集、第37巻、pp.210-214、1990
- 5) 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
- 6) 小笹博昭・Brampton,A.H.：護岸のある海浜の汀線変化数値計算、港研報告、第18巻、第4号、pp.77-103、1979
- 7) 土木学会編：周辺海域の波・流れ・海浜変形の評価、人工島式海上立地技術、第3.4節、原子力発電所の立地多様化技術、第4編、原子力土木委員会、pp.173-191、1996
- 8) 清水琢三・山田晶子・渡辺 晃：沿岸漂砂量の岸沖分布と漂砂量係数、海岸工学論文集、第43巻、pp.571-575、1996
- 9) Shimizu,T., T.Kumagai and A.Watanabe : Improved 3-D beach evolution model coupled with the shoreline model(3D-SHORE), Proc.25th Conf. on Coastal Eng., pp.2843-2856, 1996
- 10) 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
- 11) Longuet-Higgins,M.S. : Longshore currents generated by obliquely incident wave, J.Geophys. Res., Vol.75, No.33, pp.6778-6789, 1970
- 12) Larson,M. and N.C.Kraus : Numerical model of longshore current for bar and trough beaches, J.Wtrway.Port, Coast. and Oc. Eng., Vol.117, No.4, pp.326-347, 1991
- 13) 田中 仁・Thu, A. : 全ての flow regime に適用可能な波・流れ共存場抵抗則、土木学会論文集、第467号/ -23、pp.93-102、1993
- 14) 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/ -34、pp.273-277、(論文中の式(4)の修正が論文集No.565/ -29に掲載されている；正、 $C1=-0.0101-0.3469 \quad 0.2$) 1996
- 15) 清水琢三・高木利光・佐藤勝弘・山田晶子：海浜変形モデルの相互比較、海岸工学論文集、第44巻、pp.506-510、1997
- 16) Mohammad Dibajnia, 清水琢三、渡辺 晃：現地海岸における縦断地形変化の再現、海岸工学論文集、第40巻、pp.406-410、1993