

粒度組成の 3 次元変化を考慮した等深線変化モデル

熊田 貴之* ・ 小林 昭男** ・ 宇多 高明***
芹沢 真澄**** ・ 野志 保仁*****

実海岸の底質は混合粒径であり、水深毎に粒度組成が異なる。このような水深毎の粒度組成に応じた縦断形予測を行うために、粒度組成に応じた平衡勾配の概念を新たに提案し、筆者ら (2003) のモデルにこれを組み込むことで、粒度組成の 3 次元変化を考慮した等深線変化モデルを開発した。モデルを岡山県高島の浜および筆者らの行った移動床模型実験へ適用した結果、それぞれ水深毎の粒度組成に応じた縦断形、および沿岸漂砂による粒径分級がうまく予測できた。さらに突堤状構造物を設置した仮想海岸へモデルを適用した結果、突堤先端部の等深線の蛇行と、それに伴う粒径変化の計算が可能となった。

1. はじめに

生態系を含む海岸環境への各種開発の影響予測では、海浜変形のみならず底質の粒径変化を予測可能なモデルが必要とされる。筆者ら (2003) は、底質の淘汰過程に着目し、3 次元的な粒径変化も予測可能なモデルを開発した。しかし、そのモデルでは、岸沖漂砂による粒径分級において、単一粒径に対する平衡勾配を仮定したために、実海岸のように複数の粒径が混在した混合粒径状態に対する平衡勾配が考慮できず、水深毎の粒度組成に応じた縦断形予測はできなかった。また、前報 (熊田ら, 2003) のモデルは、原理的に沿岸漂砂による粒径分級を再現することは難しいという課題が残されていた。そこで、本研究では、筆者らのモデル (2003) に粒度組成に応じた平衡勾配の概念を新たに組み込むことで、上記の課題を解決する、粒度組成の 3 次元変化を考慮した等深線変化モデルを開発した。

2. モデルの基本構成

(1) 粒度組成に応じた平衡勾配の概念

粒度組成と平衡勾配の関係を明らかにするために、岸沖漂砂による顕著な粒径分級の見られる岡山県高島の海岸を対象に縦断地形測量と底質採取を行った。調査の詳細は、野志ら (2004) に譲る。野志ら (2004) によれば、高島の浜は汀線付近の急勾配部分では礫・粗砂を多く含み、一方沖合の緩勾配部分では細砂とシルト・粘土の含有率が高くなっており、顕著な勾配変化の原因は、図-1 に示すように急勾配と緩勾配を構成している粒径レンジが大きく異なると結論付けている。

現地調査の結果を模式図として要約したのが図-2 である。海浜勾配は粒径とその含有率 $\mu^{(i,k)}$ に大きく依存

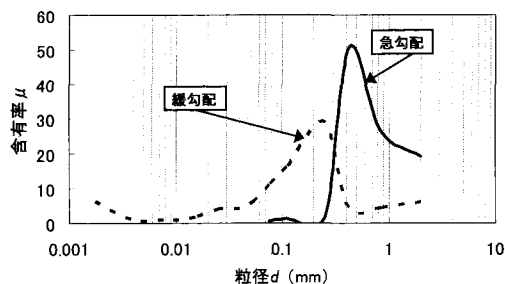


図-1 急・緩勾配付近の粒径含有率スペクトル (高島の浜)

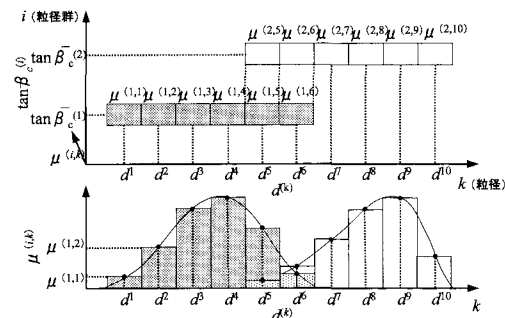


図-2 粒度組成に応じた平衡勾配の概念

し、緩勾配 ($\tan \beta_c^{(1)}$) であれば細粒砂の粒径レンジ ($d^1 \sim d^6$) で、急勾配 ($\tan \beta_c^{(2)}$) であれば粗粒砂の粒径レンジ ($d^5 \sim d^{10}$) で粒径含有率のスペクトルがピーク ($\mu^{(1,4)}(d^4)$ と $\mu^{(2,9)}(d^9)$) を示す。そして、2つのスペクトルは粒径レンジがずれているが必ず同じ粒径 (d^5 と d^6) を多少含む特徴がある。図-2 の例は、岡山県高島のように極端に急・緩勾配のある海岸の例であるが、顕著な岸沖分級では異なる粒径レンジが存在し、レンジ毎の砂は集団をなし、群 (粒径集団) として移動する傾向を持つ。

一方、極端な勾配変化のない海岸においては、粒径含有率は変化するが粒径レンジはほとんど変化しない、すなわち、1つの粒径集団として移動する傾向を持つことが既往の調査より明らかである。

* 正会員 博(工) (株)水圏科学コンサルタント 技術部

** 正会員 工 博 日本大学助教授 理工学部海洋建築工学科

*** 正会員 工 博 (財)土木研究センター審議役 なぎさ総合研究室長

**** 正会員 海岸研究室(有)

***** 学生会員 日本大学大学院理工学研究科海洋建築工学専攻

(2) 基礎式

a) 粒径毎の漂砂量式

図-2の粒度組成に応じた平衡勾配を、筆者らの岸沖漂砂量式(2003)に導入するために、次式を考案した(野志ら, 2004)。

$$\ln[\tan \bar{\beta}_c^{(i)}] = \sum_{k=1}^N \mu^{(i,k)} \ln[\tan \beta_c^{(i,k)}] \\ ; i=1, 2, \dots, NI, k=1, 2, \dots, N \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $\mu^{(i,k)}$ は*i*グループの交換層内の粒径毎(*N*粒径)の含有率を示し、 $\beta_c^{(i,k)}$ は便宜上1つの粒径 $d^{(k)}$ (例えばJIS規格の篩い目:粒径)に1つの平衡勾配 $\tan \beta_c^{(i,k)}$ があると仮定する。粒径 $d^{(k)}$ に対する勾配 $\tan \beta_c^{(i,k)}$ に含有率 $\mu^{(i,k)}$ を乗じ、*N*粒径分全て加算すると、*i*グループの*N*粒径全体を考慮した平均的な平衡勾配 $\tan \bar{\beta}_c^{(i)}$ が得られると考える(図-2参照)。 $\tan \beta_c^{(i,k)}$ は、調査結果より $\mu^{(i,k)}$ と $\tan \bar{\beta}_c^{(i)}$ は分かっているの、最小自乗法で求められる。野志ら(2004)によれば、実際に、調査対象海岸において式(1)を使用し、ある局所縦断勾配を計算すると決定係数 $R^2=0.8$ と高精度で再現できることが確認されている。そこで本モデルでは、式(1)の $\tan \bar{\beta}_c^{(i)}$ (式(2)では逆数 $\cot \bar{\beta}_c^{(i)}$)を筆者らの岸沖漂砂量式(2003)に導入し次式を考案した。

$$q_z^{(i,k)} = \mu^{(i,k)} \cdot \varepsilon_x(z) \cdot \gamma \cdot A / \sqrt{d^{(k)}} \cdot (EC_g)_b \cos^2 \alpha_{bs} \sin \bar{\beta}_c^{(i)} \\ \cdot (\cot \beta / \cot \bar{\beta}_c^{(i)} - 1) \\ ; i=1, 2, \dots, NI, k=1, 2, \dots, N \dots\dots\dots (2)$$

ここに $\varepsilon_x(z)$ は漂砂量の水深方向分布関数、 β は等深線毎の勾配角、 γ は漂砂量係数の比率であり沿岸漂砂に対する岸沖漂砂の動き易さを示す。式(2)では、図-2に示したようにグループ(*i*)の同じ粒径は常に同じグループ内で動き、異なるグループとは交わらず混合されないとしている。例えば、図-2の $\mu^{(1,5)}$ と $\mu^{(2,5)}$ は同じ粒径 d^5 であるが、グループ(*i*)は異なる。これは、 $\tan \bar{\beta}_c^{(2)}$ (*i*=2)のグループの粒径スペクトルのピーク $\mu^{(2,9)}$ の粒径 d^9 が多く移動する際に、 d^5 も $\mu^{(2,5)}$ の分だけ巻き添えになったと考え、 $\mu^{(2,5)}$ の分は初めから $\tan \bar{\beta}_c^{(2)}$ (*i*=2)のグループ内に含ませた。

本モデルでは、粒径含有率 $\mu^{(i,k)}$ が時々刻々と変化するので、式(1)より $\cot \bar{\beta}_c^{(i)}$ も常に変化し、毎ステップの粒度組成に応じた平衡勾配 $\cot \bar{\beta}_c^{(i)}$ になろうとする作用が働く。これは、初めに入力した最終平衡勾配になろうとする前報(熊田ら, 2003)のモデルの概念とは大きく異なり、本モデルの大きな特徴である。

*i*グループ内の粒径毎の沿岸漂砂量式は、筆者ら(2003)の粒径毎の沿岸漂砂量式に図-2の粒径群(*i*)の概念を導入し、次式とした。

$$q_x^{(i,k)} = \mu^{(i,k)} \cdot \varepsilon_x(z) \cdot A / \sqrt{d^{(k)}} \cdot (EC_g)_b \cos \alpha_{bs} \sin \alpha_{bs} \\ ; i=1, 2, \dots, NI, k=1, 2, \dots, N \dots\dots\dots (3)$$

α_{bs} は碎波点の波峰線が等深線となす角である。式(2)、(3)の*A*は未知数とし、対象海岸の変形過程に応じて設定できる。

b) 粒径毎の土砂量保存則

*i*グループ内の粒径毎の等深線変化量 $y^{(i,k)}$ は、各等深線につき*i*グループ内の粒径毎の土砂量保存則(連続式)により次式で算定する。

$$\frac{\partial y^{(i,k)}}{\partial t} = - \frac{\partial q_x^{(i,k)}}{\partial x} - \frac{\partial q_z^{(i,k)}}{\partial z} \\ ; i=1, 2, \dots, NI, k=1, 2, \dots, N \dots\dots\dots (4)$$

*i*グループ内の全粒径に応じた等深線変化量 $Y^{(i)}$ は等深線毎に*i*グループ内の粒径毎の等深線変化量 $y^{(i,k)}$ を合計し、さらに、最終的なその場所の等深線変化量 Y は $Y^{(i)}$ を合計して次式となる。

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = \sum_{i=1}^{NI} \sum_{k=1}^N \frac{\partial y^{(i,k)}}{\partial t} \dots\dots\dots (5)$$

c) 粒径毎の含有率変化の計算式

交換層内での*i*グループ内の粒径含有率算定には、筆者ら(2003)の交換層内での粒径毎の土砂収支式に図-2の粒径群(*i*)の概念を導入した。

堆積時での新たな*i*グループ内の粒径含有率の計算式は次式となる。

$$\frac{\partial \mu^{(i,k)}}{\partial t} = \frac{1}{B} \left\{ \frac{\partial y^{(i,k)}}{\partial t} - \frac{\partial Y}{\partial t} \cdot \mu^{(i,k)} \right\} \\ ; i=1, 2, \dots, NI, k=1, 2, \dots, N \dots\dots\dots (6)$$

侵食時での新たな*i*グループ内の粒径含有率は次式で与えられる。

$$\frac{\partial \mu^{(i,k)}}{\partial t} = \frac{1}{B} \left\{ \frac{\partial y^{(i,k)}}{\partial t} - \frac{\partial Y}{\partial t} \cdot \mu^{(i,k)} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 $\mu_b^{(i,k)}$ は等深線変化前の交換層より岸側位置の含有率を示す。交換層幅*B*はKraus(1985)を参考に算出する。計算は以上の式を連立して解いた。護岸・突堤・離岸堤などの構造物境界の処理は、芹沢ら(2002)に従った。

3. モデルの検証

(1) 粒度組成変化を考慮した海浜縦断形予測

水深毎の粒度組成に応じた縦断形予測の検証を行うため、前述した岸沖漂砂による粒径分級の顕著な岡山県高島の浜へモデルを適用した。計算諸元を表-1に示す。粒径群は、急・緩勾配が明瞭に形成され粒径レンジが二極分化しているため、2グループとして設定した。粒径は0.075 mm(シルト・粘土)、0.25 mm(細砂)、0.85 mm(粗砂)、2 mm(礫)を代表4粒径とし、1グループ目は調査より前者の2粒径、2グループ目は0.075 mm以外の3粒径とした。粒径毎の平衡勾配は、野志ら(2004)より、それぞれ1/92、1/26、1/7、1/3とした。グループ

表-1 計算諸元

計算ケース	初期地形 (海底勾配)	波浪諸元			交換層の 幅 B (m)	バーム高 h_R 限界水深 h_C (m)	陸域安息勾配 海域安息勾配	粒径群 N_I	粒径数 N
高島の浜	1/30	H_b (m)	—	a_b (°)	0.5	h_R : 1.25 h_C : 4.5	陸域: 1/2 海域: 1/5	2	2
		0.5	—	0					
水槽実験	1/10	H (cm)	T (sec)	a (°)	0.3 cm	h_R : 2 cm h_C : 6 cm	陸域: 1/2 海域: 1/3	1	2
		4.0	0.8	0					
仮想海岸	1/10	H_b (m)	—	a_b (°)	0.5	h_R : 2 h_C : 7	陸域: 1/2 海域: 1/3	1	2
		2.00	—	10					

計算ケース	初期粒度構成 (%) (交換層内・外とも同じ) 注) 粒径下の括弧は、粒径に対する平衡勾配を示す。					漂砂量係 数内の A	漂砂係数 比率 K_z/K_x
高島の浜	粒径群種別	0.075 mm (1/92) ^①	0.25 mm (1/26)	0.85 mm (1/7) ^②	2 mm (1/3)	0.01	—
	$i=1$	44.7	40.3	3.1	4.9		
	$i=2$	0.2	2.2	1.4	3.2		
水槽実験	粒径群種別	0.2 mm (1/30)	2.00 mm (1/6)	—	—	0.10	0.1
	$i=1$	50	50	—	—		
仮想海岸	粒径群種別	0.1 mm (1/30)	0.55 mm (1/10)	—	—	0.30	0.1
	$i=1$	50	50	—	—		

毎の粒径含有率は実データに従った。初期地形は測量範囲の平均勾配 1/30 とし、 $H_b=0.5$ m を直角入射させた。 h_R と h_C は潮位変動を考慮し、 $H_b=0.5$ m を設定しているが、それぞれ 1.25 m、4.5 m と広い範囲で設定した。

実測と計算の海浜縦断地形の比較を図-3 に示す。計算結果と実測の急・緩勾配の縦断形状はよい対応を示している。図-3 に対応する実測と計算の粒度組成図を図-4(a) (b) に示す。若干粒径毎の含有率に差はあるものの、計算および実測ともに、緩勾配斜面ではシルト・細砂がほとんどを占め、急勾配斜面では緩斜面にはほとんどない礫・粗砂が含まれている。本計算より、粒度組成に応じた縦断形変化が良く再現された。

(2) 粒度組成の3次元変化を考慮した等深線変化予測

粒度組成の3次元変化を考慮した等深線変化予測の検証を行うため、筆者の行った移動床模型実験 (2003) へモデルを適用した。計算諸元は同様に表-1 に示す。幅 4 m、海浜勾配 1/10 の直線状海岸を斜め 18° に設置し、波を直角入射させた。両端は漂砂を阻止する突堤を設置している。粒径群は、顕著な勾配変化が確認されなかったため 1 グループとした。粒径は実験と同様、0.2 mm (細粒砂)、2 mm (粗粒砂) を代表とし、粒径毎の平衡勾配は、野志ら (2004) より、それぞれ 1/27、1/4 とした。粒径含有率は 50% ずつ、すなわち体積比 1:1 の混合海浜とした。碎波波高・波向は、実験で計測された値の平均値を与えた。式 (3) の γ は、前報のモデル (熊田ら, 2003)

ではモデルによる現象の再現性から見て、設定ができなかった 0.1 を入力した。

実験と計算の波作用後の等深線形状を図-5(a) (b) に示す。初期状態では、等深線は互いに平行であったが、波作用後、いずれも沿岸漂砂による著しい地形変化が生じている。すなわち、侵食域 ($X=0\sim 200$ cm) では地形変化の限界水深である水深 6 cm より深い領域の等深線には有意な地形変化が生ずることがなく、水深 6 cm 以下の領域では侵食されて緩斜面が形成されるという実験結果を計算はうまく予測している。注目されるのは、堆積域 ($X=400$ cm) である。陸上部で土砂が堆積し、バームである標高 2 cm は波が作用しつつも、他の場所より緩い平衡勾配となって安定している実験結果を計算は良く再現している。これは、バーム付近に沿岸漂砂により細粒砂が多く堆積したため、他の場所よりも緩い平衡勾配となって安定した実験の再現に成功していることを意味する。

図-6 は侵食域の代表である $X=50$ cm 断面における、実験と計算による海浜縦断形と細粒砂の含有率の岸沖分布である。計算は、侵食地形を良く再現している。また、沿岸漂砂により侵食部では細粒砂の流出に伴う減少がうまく計算されている。

図-7 の $X=350$ cm 断面は堆積域の断面である。計算は、堆積地形を良く再現している。沿岸分級の結果としてのバーム付近での高い細粒砂分布と、沖合での低い細粒砂分布の傾向も値の差はあるものの実験と計算は比較

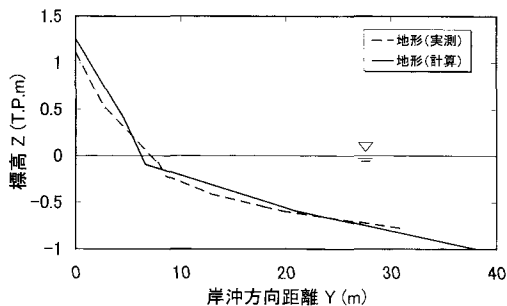


図-3 実測と計算の海浜縦断地形の比較

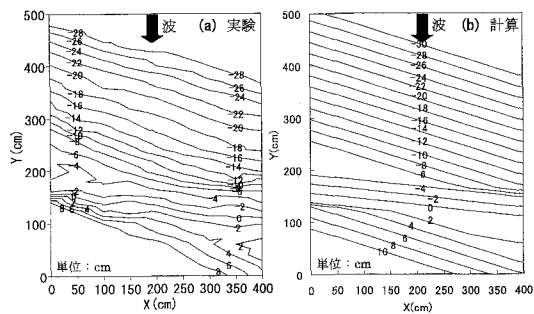


図-5 実験と計算の等深線図

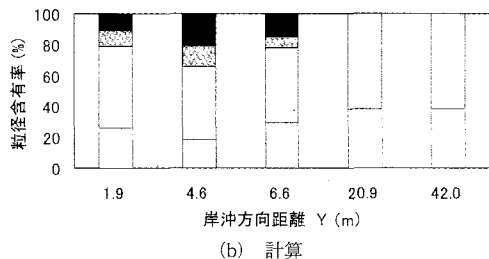
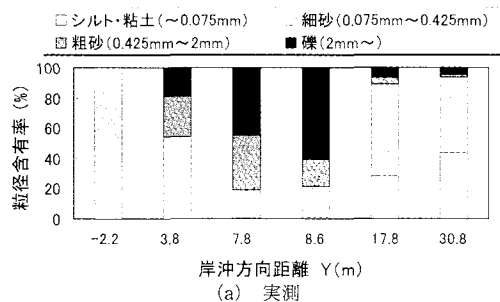


図-4 実測と計算の粒度組成図

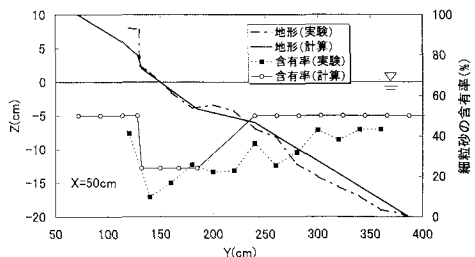


図-6 侵食断面と細粒砂の含有率分布 (実験と計算)

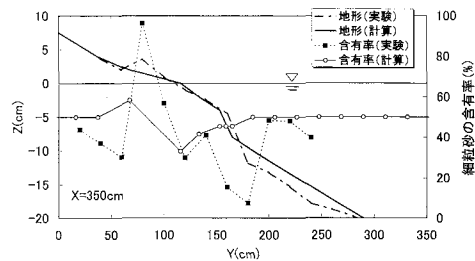


図-7 堆積断面と細粒砂の含有率分布 (実験と計算)

的良好な対応を示した。以上、 γ の値を極端に小さくせず、芹沢ら(2002)が用いた値と同等の $\gamma=0.1$ を設定しても、問題なく沿岸分級の再現ができるようになった。

(3) 突堤状構造物を設置した海岸への適用

本モデルの構造物境界の検証を行うため、突堤状構造物を設置した仮想海岸へ適用した。両端を突堤で区切られた仮想海岸の中央に、先端水深-5 mの突堤を設置した。粒径0.1 mmと0.55 mmの2粒径で均一に養浜された初期勾配1/10の海岸に $H_b=2$ mの波を入射角 10° で作用させた(表-1参照)。0.1 mmの平衡勾配は1/30、0.55 mmは1/10と仮定した。粒径群は、1グループとした。 h_R と h_C は、それぞれ2 m、7 mとした。式(3)の γ は、前ケース同様、0.1を入力した。この計算ケースは、突堤長を短くし、沿岸漂砂が突堤先端を通過する条件とし、深浅図でよく観察される突堤先端部の等深線蛇行(芹沢ら, 2002)とそれに伴う粒径変化の再現を試みた。

等深線変化と平均粒径(合田・佐藤, 1972)の変化を

図-8, 9に示す。突堤先端部を漂砂が通過し、沿岸漂砂と岸沖漂砂のバランスから突堤先端部の等深線が蛇行する現象が計算できている。また、それに伴い、波作用下で動きやすい0.1 mmの砂は、漂砂上手から下手へ徐々に移動し、突堤先端部を回り込んで突堤右側の海岸に移動し、最終的に右端部突堤に多く堆積している。一方、突堤左側の海岸では、細粒分(0.1 mm)が流出した結果、粗粒化するという3次元的な粒径分級が計算できている。また、注目されるのは、図-8, 9に示すように中央の突堤、および右端の上手側の1~2 mの等深線において、細粒分が多く堆積するため、平衡勾配が緩くなっていることである。図-10には、 $X=1000$ mの断面と0.1 mmの含有率の岸沖分布を示す。0.1 mmの含有率が約70%と高い範囲 $Y=70\sim145$ mにおいて、勾配がやや緩くなっており、粒度組成に応じた勾配変化が計算できて

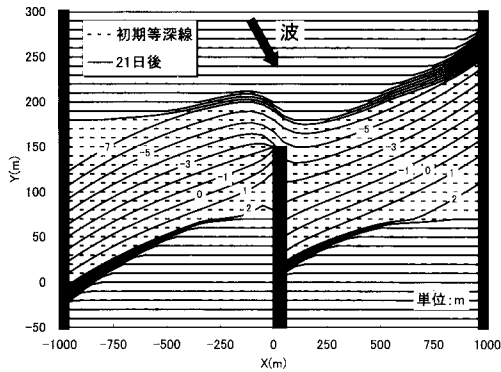


図-8 等深線変化

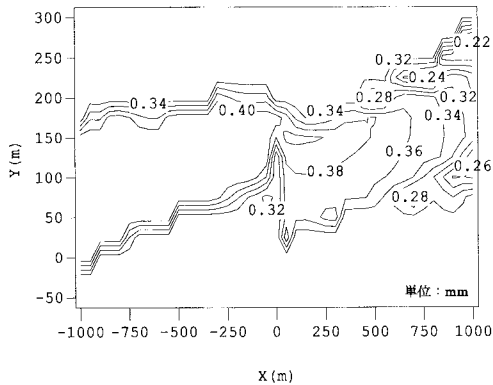


図-9 平均粒径の変化

いる。

以上、前報のモデルでは計算できなかった、突堤先端部の蛇行と同時に起こる沿岸漂砂による顕著な粒径分級が、本モデルでは計算可能となった。

4. おわりに

本研究では粒度組成に応じた平衡勾配の概念を筆者ら

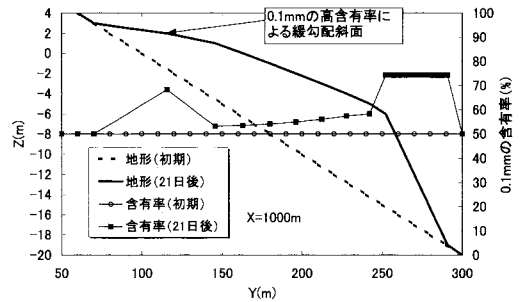


図-10 $X=1000$ mの断面と0.1mmの含有率分布

のモデル (2003) に新たに組み込むことで、粒度組成の3次元変化を考慮した等深線変化モデルを開発した。モデルの検証の結果、水深毎の粒度組成に応じた縦断形および沿岸漂砂による粒径分級の再現に成功し、さらに構造物境界の処理も可能となった。今後、本モデルを実海岸へ適用する際、精度の高い予測を可能とするためにも、野志ら (2004) に示したように対象海岸の海浜縦断地形測量と岸沖方向の各点で底質採取を行うことが必要である。その際、従来のように海浜底質を d_{50} で代表させるのではなく、海浜底質の粒度組成 (粒径とその粒径毎の含有率) を考慮することが大事である。

参考文献

- 熊田貴之・小林昭男・宇多高明・芹沢真澄 (2003): 沿岸・岸沖漂砂による粒径分級を考慮した等深線変化モデル, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 481-485.
- 合田良美・佐藤昭二 (1972): 海岸・港湾, 彰国社, pp. 185-188.
- 芹沢真澄・宇多高明・三波俊郎・古池 鋼・熊田貴之 (2002): 海浜縦断形の安定化機構を組み込んだ等深線変化モデル, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 496-500.
- 野志保仁・小林昭男・熊田貴之・宇多高明・芹沢真澄 (2004): 底質粒度構成に応じた局所縦断勾配の算定法, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 406-410.
- Kraus, N. C. (1985): Field experiments on vertical mixing of sand in the surf zone, J.Sedimentary Petrology, Vol. 55, pp. 3-14.