

海底谷への細粒土砂の選択的損失の予測モデル

MODEL FOR PREDICTING SELECTIVE LOSS OF FINE SAND INTO SUBMARINE CANYON

芹沢真澄¹・宇多高明²・三波俊郎³・古池 鋼³

Masumi SERIZAWA, Takaaki UDA, Toshiro SAN-NAMI and Kou FURUIKE

¹ 正会員 海岸研究室(有)(〒160-0011 東京都新宿区若葉1-22 ローヤル若葉301)

² 正会員 工博 (財)土木研究センター理事なごさ総合研究室長兼日本大学客員教授理工学部
海洋建築工学科(〒110-0016 台東区台東1-6-4 タカラビル)

³ 海岸研究室(有)(〒160-0011 東京都新宿区若葉1-22 ローヤル若葉301)

Selective movement of sand into a submarine canyon depending on the grain size was investigated using the contour-line-change model. Seabed topography and grain size distribution were measured around the submarine canyon off the Morito River on the Seisho coast. The seabed slope of this submarine canyon is as steep as 1/6 in the depth shallower than 10 m and 1/3 in the depth deeper than 10 m. Assuming that the coarse (fine) material has a large (small) equilibrium slope, and that if seabed slope is greater than the equilibrium slope, offshore sand movement is occurred, a model for predicting offshore discharge of sand was developed.

Key Words : Submarine canyon, equilibrium slope, contour-line-change model, offshore sand loss

1. まえがき

わが国では海岸線近傍にまで急深な海底谷が発達し、そこを経由した深海への土砂流失が海岸保全上非常に重要な影響を持つ海岸が数多くある。例えば、駿河湾に面した駿河・清水・富士海岸、富山湾の下新川海岸、相模湾の西湘海岸などがある。過去、これらの海底谷周辺では様々な現地観測が行われた。宇多ら¹⁾は、駿河海岸と下新川海岸を対象に詳細な深淺測量を行うとともに、海底面の写真撮影により海底谷周辺部の底質分布を明らかにした。この中で、土砂流出が起きていると推定した駿河海岸の和田鼻沖にある南谷の縦断勾配は1/9.5、また下新川海岸の黒部川河口沖と生地鼻沖の洋谷の縦断勾配は1/7と急であることを明らかにした。また宇多ら²⁾は、駿河海岸の和田鼻沖の海底谷への砂の流出を底質調査とトレーサー調査により調べ、海底谷南側の緩勾配の陸棚海底面から斜めに海底谷へと向かう砂移動があることを明らかにした。さらに宇多ら³⁾は、西湘海岸の森戸川河口沖の海底谷に着目して海底形状を明らかにするとともに底質調査を行った。これによれば、海底谷に入る前には細粒分の含有率が高いが、海底谷内では細粒分の含有率が大きく低下していた。これより酒匂川からの流出土砂が東向きに沿岸漂砂によって運ばれ海底谷を通過する際、細粒分が海底谷経由沖へと失われると推定した。最近もこの種の実態論的

研究は進められており、例えば金澤ら⁴⁾は継続的な深淺測量データをもとに下新川海岸の黒部川河口左岸の荒俣地先沖において崖崩れのように発生する土砂の流出現象を明らかにした。しかし、既往研究はいずれも実態論を述べるにとどまり、海底谷を経た土砂損失の物理機構を明らかにし、その上でそれに立脚した予測モデルの構築は行われていない。本研究では、海底谷での細粒土砂の選択的損失機構を熊田ら⁵⁾の粒径変化を考慮した等深線変化モデルを用いて解明することを目的とし、西湘海岸の森戸川河口沖の海底谷を対象として検討する。

2. 森戸川河口沖の海底谷周辺の底質特性と沿岸漂砂量

宇多ら³⁾は、西湘海岸の森戸川河口沖の海底谷に着目して海底形状を明らかにし、底質調査を行った。これによれば海底谷の地形は図-1に示すようであった。海底谷の両側には陸棚があり相対的に海底勾配が緩やかであるが、海底谷の陸側端では深海部から水深10m付近まで急勾配の海底面があり、ほぼ10m以浅になって初めて勾配が緩くなる。図-1において、海底谷の西側に配置された測線Fと、海底谷の入口と中央に設定された測線E、Dに沿った縦断形を図-2に示すが、測線Fでは20mまで陸棚があつて勾配が緩い。しかし

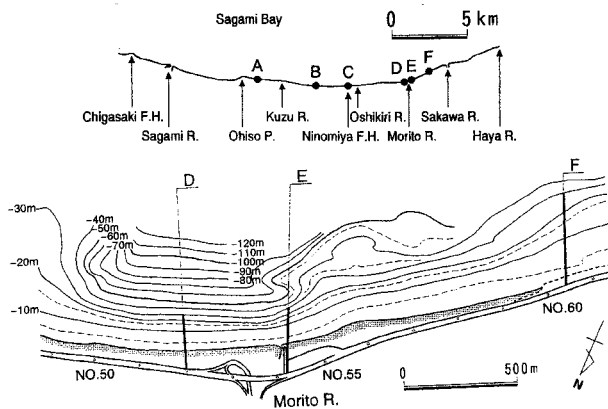


図-1 西湘海岸の森戸川河口沖の海底形状

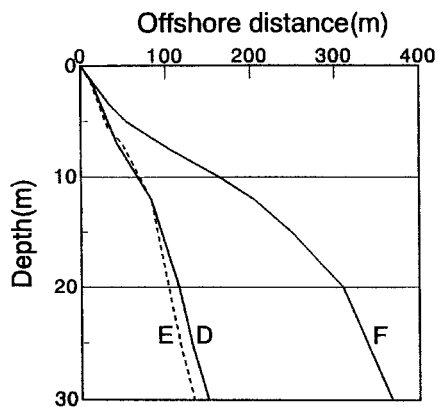


図-2 海底谷周辺の測線D, E, Fに沿う縦断面

測線E, Dでは-10mまでが1/6, -10m以深が1/3と非常に急な海底斜面となっている。このような急勾配は、駿河海岸の和田鼻沖にある南谷で測定された縦断勾配1/9.5や、下新川海岸の黒部川河口沖と生地鼻沖の洋谷の縦断勾配1/7よりも急である。さらにこれらの測線では図-3の粒径加積曲線が得られている。すなわち、海底谷に入る前には細粒分の含有率が高いが、海底谷内では細粒分の含有率が大きく減少している。

宇多・矢野⁶⁾および宇多ら⁷⁾によると、森戸川河口付近での沿岸漂砂の卓越方向は東向きであり、酒匂川の流出土砂が海浜砂の供給源となっている。主要な砂の供給源である酒匂川の流域面積は582km²であり、またこの付近の海岸での波による地形変化の限界水深は $h_c=7\text{m}$ 、バーム高は $h_R=3\text{m}$ と推定されている。さらに図-4は酒匂川河口デルタの汀線変化を示すが、酒匂川河口部では1945年から1981年までに最大200m汀線が後退している。この侵食は、酒匂川からの流出土砂量が砂利採取などによって大きく減少した条件下で、河口から離れる方向に沿岸漂砂によって砂が運び去られたことによると推定される。この場合、河川からの土砂供給量が激減し無視できる量となったと仮定し、河口デルタの東半分($X=5.0\sim 8.2\text{km}$ 区間)の侵食土砂が東へ流出したと考える。前浜の減少面積は43万m²となるので、これに漂砂の移動高⁶⁾⁷⁾8.2m

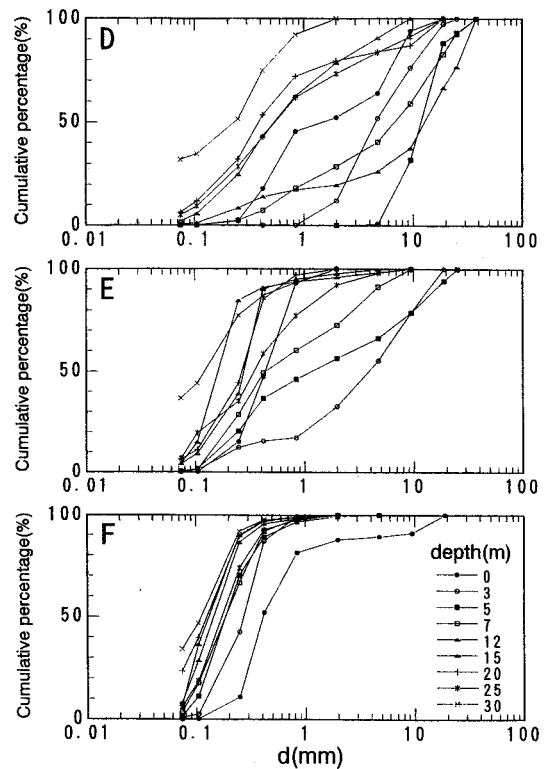


図-3 測線D, E, Fにおける粒径加積曲線

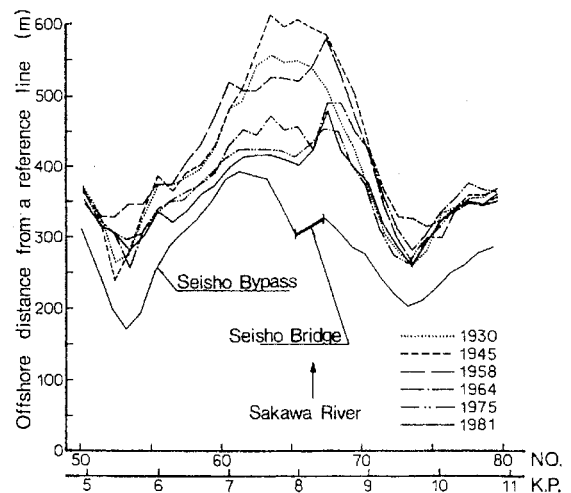


図-4 酒匂川河口デルタの汀線変化

を乗じ、経過年数(36年)で割ると沿岸漂砂量は10万m³/yrと推定される。

3. 予測モデルの基本式

海底谷周辺の地形は、陸棚部では沖合に緩勾配の海底面があるのに対し、海底谷では汀線に近い場所まで1/6～1/3の急勾配斜面が存在する。このような縦断形が急変する場に、上手側から混合粒径砂が運び込まれる場合を考える。一方、土砂は粒径ごとに平衡勾配が大きく異なり、粗な土砂は急な平衡勾配を持

ち、粒径の小さい土砂は平衡勾配が小さいので、縦断形が急変する場上記混合粒径砂が流入すると、粒径に応じて土砂移動形態が変化しなければならず、粗粒分は海底谷の陸端の急勾配斜面を通過して沿岸方向に移動しうが、細粒分は平衡勾配がこの勾配より小さければ沖へと移動することになる。この機構が成立すれば海底谷周辺において土砂が粒径に応じて分級されることになる。このような粒径に応じた土砂移動を検討するために、熊田ら⁵⁾の粒径を考慮した等深線変化モデルを適用した。基礎式は、沿岸・岸沖漂砂量式、等深線変化量の計算式および粒径毎の含有率変化の計算式からなる。

(1) 沿岸・岸沖漂砂量式

粒径毎の沿岸および岸沖漂砂量式は式(1)、(2)で表わされる。

$$q_x^{(k)} = \mu^{(k)} \cdot \varepsilon_x(z) \cdot K_1^{(k)} \cdot (EC_g)_b \cdot \cos \alpha_{bs} \sin \alpha_{bs} \quad (1)$$

; $k=1, 2, \dots, N$

$$q_z^{(k)} = \mu^{(k)} \cdot \varepsilon_z(z) \cdot \gamma \cdot K_1^{(k)} \cdot (EC_g)_b \cos^2 \alpha_{bs} \sin \bar{\beta} \cdot (\cot \beta / \cot \beta_c^{(k)} - 1) \quad (2)$$

$$K_1^{(k)} = \frac{A}{\sqrt{d^{(k)}}} \quad (3)$$

$$\varepsilon_z(z) = \begin{cases} = \frac{2}{h_c^3} \left(\frac{h_c}{2} - z \right) \left(z + h_c \right)^2 \dots (-h_c \leq z \leq h_R) \\ = 0 \dots (z < -h_c, h_R < z) \end{cases} \quad (4)$$

ここに、 x は沿岸方向座標、 z は等深線の地盤高、 $q_x^{(k)}$ 、 $q_z^{(k)}$ は粒径毎(N 粒径)の沿岸・岸沖漂砂量($k=1, 2, \dots, N$)、 $\mu^{(k)}$ は交換層内の粒径毎の含有率、 $\varepsilon_z(z)$ 、 $\varepsilon_x(z)$ は宇多・河野⁸⁾の漂砂量の水深方向分布関数、 $d^{(k)}$ は底質粒径を示す。 A は未知数とし対象海岸の変形過程に応じて設定する。なお、式(3)の $d^{(k)}$ の単位はmmである。 α_{bs} は砕波点の波峰線が等深線となす角、 $\tan \beta$ は海底勾配である。また $\bar{\beta}$ は、初期縦断形において、バーム高(h_R)から波による地形変化の限界水深(h_c)までの平均勾配角、 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。 $\beta_c^{(k)}$ は粒径毎の平衡勾配角を示す。

(2) 粒径毎の土砂量保存則

粒径毎の等深線変化量 $\Delta y^{(k)}$ は各等深線につき粒径毎の土砂量保存則(連続式)により次式で算定する。

$$\frac{\partial y^{(k)}}{\partial t} = -\frac{\partial q_x^{(k)}}{\partial x} - \frac{\partial q_z^{(k)}}{\partial z} \quad ; k=1, 2, \dots, N \quad (5)$$

混合粒径(全粒径)に応じた等深線変化量 Δy は等深線毎に粒径毎の等深線変化量 $\Delta y^{(k)}$ を合計して次式となる。

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = \sum_{k=1}^N \frac{\partial y^{(k)}}{\partial t} \quad (6)$$

(3) 粒径毎の含有率変化の計算式

等深線毎の交換層内での粒径毎の含有率の算定には、熊田ら⁵⁾の交換層内での粒径毎の土砂収支式を使用した。すなわち堆積時での新たな粒径毎の含有率の計算式は次式となる。

$$\frac{\partial \mu^{(k)}}{\partial t} = \frac{1}{B} \left\{ \frac{\partial y^{(k)}}{\partial t} - \frac{\partial Y}{\partial t} \cdot \mu^{(k)} \right\} \quad ; k=1, 2, \dots, N \quad (7)$$

侵食時での新たな粒径毎の含有率は次式で与えられる。

$$\frac{\partial \mu^{(k)}}{\partial t} = \frac{1}{B} \left\{ \frac{\partial y^{(k)}}{\partial t} - \frac{\partial Y}{\partial t} \cdot \mu_B^{(k)} \right\} \quad (8)$$

ここに、 $\mu_B^{(k)}$ 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Kraus⁹⁾を参考に算出する。本モデルにおいては全等深線で交換層幅 B は一定とし、時間経過によらないとする。計算は、粒径毎の沿岸・岸沖漂砂量 q_z を式(1)～(4)で計算し、これを用いて連続式(5)、(6)を解くことで等深線変化量が計算され、さらに交換層内の含有率の変化が式(7)、(8)より計算される。これを繰り返すことで海浜地形の経時変化が計算される。限界水深以深への重力による土砂の落ち込み、および陸上の浜崖の形成による地

表 -1 計算条件一覧

数値計算手法	等深線・粒径変化モデル(熊田ら, 2005)
初期地形	海底勾配 1/3 の斜面と -10m の棚を組み合わせた地形
粒径構成	・粒径構成数: $N_1=3$ 粒径 (ただし第 3 の粒径は不動の粒径) ・代表粒径: 細粒 $d^{(1)}=0.3\text{mm}$, 粗粒 $d^{(2)}=2\text{mm}$, 大粒 $d^{(3)}=100\text{mm}$ ・初期粒径含有率: $\mu^{(1)}=0.0$, $\mu^{(2)}=0.0$, $\mu^{(3)}=1.0$
交換層の幅	$B=0.6\text{m}$ ($B=\Delta h/\tan \beta$; 混合層厚 $\Delta h=0.03H_b=0.1\text{m}$, $\tan \beta=1/6$ (平衡勾配))
入射波条件	・砕波波高 $H_b=2.5\text{m}$, 砕波角 $\alpha_b=0^\circ$
限界水深・バーム高	波による地形変化の限界水深 $h_c=7\text{m}$, バーム高 $h_R=30\text{m}$
漂砂量係数	・漂砂量係数内の $A=0.004$ (大粒径は $A=0$) ・岸沖沿岸漂砂量比 $\gamma=0.2$
漂砂の水深分布	宇多・河野 (1996) の 3 次式
平衡勾配	$\tan \beta_c^{(1)}=1/20$ (細粒), $\tan \beta_c^{(2)}=1/6$ (粗粒) $\tan \beta_c^{(3)}=1/3$ (大粒)
土砂落ち込みの限界勾配	陸上: 1/2, 水中: 1/3 (大粒は 1/1)
計算範囲・メッシュ	鉛直方向: $z=+4\text{m} \sim -30\text{m}$, $\Delta Z=2\text{m}$, 沿岸方向: $\Delta x=200\text{m}$
計算時間間隔 Δt	$\Delta t=4.38\text{hr}$.
計算時間	$t=100\text{yr}$. (計算ステップ数=200,000steps)
境界条件	岸端: $q_z=0$ (漂砂の流出入なし) 沖端: $dq_z/dz=0$ 左右端: $q_x=0$ 右端からの土砂供給: 連続式に付加した湧き出し項より供給 $Q_{in}=10 \text{ 万 } \text{m}^3/\text{yr}$. (供給範囲は $z=h_R \sim h_c$ とし、宇多・河野の分布形で配分) (供給土砂含有率 $\mu^{(1)}=0.5$, $\mu^{(2)}=0.5$, $\mu^{(3)}=0$)
数値計算法	陽解法による差分法

形変化の計算には熊田ら¹⁰⁾の方法を用いた。数値計算にはスタッガードメッシュを用いた陽形式の差分法を用いた。表-1には計算条件をまとめて示す。

4. 予測計算の結果

上記森戸川河口沖の海底谷での観測データによれば、海底谷西側の測線Fで高含有率の粒径は約0.3mmであり、一方、海底谷中央の測線Dではほぼ2mmの粒径が高含有率となっていることから、以下の計算では0.3mmと2mmの2粒径系の底質からなる土砂が酒匂川から供給され、それが東向きに運ばれるとした。供給量については2節の検討から10万m³/yrの供給を仮定した。両者の粒径含有率は同じ50%とする。図-1に示す海底谷形状を単純化し、図-5の破線で示すように沖合の深みが中央部で台形状に入り込む地形を想定し、そこに右端から上記土砂が流入する条件とした。波は直角入射とし、波浪条件としては比較的高波浪を考え $H_b=2.5$ mとした。計算領域の左端は十分広く取り境界の影響が及ばないようにした。沖端境界は通過境界($dq/dz=0$)として谷底への落ち込みが可能とした。平衡勾配は1/20 (粒径0.3mm), 1/6 (2mm), 水中の安息勾配は1/3とした。また地形変化の起こる範囲は、実測値をもとに波による地形変化の限界水深

$h_c=-7$ mからバーム高 $h_R=3$ mまでとした。初期縦断形は図-6のように1/6勾配の海浜、-11mの平坦海床面および1/3勾配の海底谷の組み合わせである。また海底谷部での海浜変形計算では、従来のような岩盤境界とせず新しい方法を考えた。まず波の作用で全く移動しない大粒径の砂(粒径 $d^{(3)}$)で計算対象区域全体の初期地形を覆う。その場合の含有率 $\mu^{(3)}$ は100%である。この状態で粒径 $d^{(1)}$, $d^{(2)}$ の砂を流入させ、流入砂のみの追跡を行うものである。

図-7は海底谷周辺での100年間の地形変化の予測結果である。右端から土砂が流入するため陸棚上で等深線が前進していく。海底谷にさしかかるとそこは急勾配のため等深線は前進することができない。陸棚上と海底谷を横切る断面での縦断形変化を図-8に示す。陸棚上では h_c より深い場所に平坦面があるため、漂砂はこの平坦面上を移動する。しかし海底谷中央では海底勾配が急なため砂は安定状態に到達できない。図-9は同じ測線での細粒分の含有率 $\mu^{(1)}$ の水深方向分布を示すが、陸棚上の $X=-400$ m測線では存在した細粒分が、谷中央の $X=-1600$ m断面では全て失われている。これは森戸川河口沖の海底谷周辺で観測結果、すなわち細粒分が海底谷で損失する現象を物理

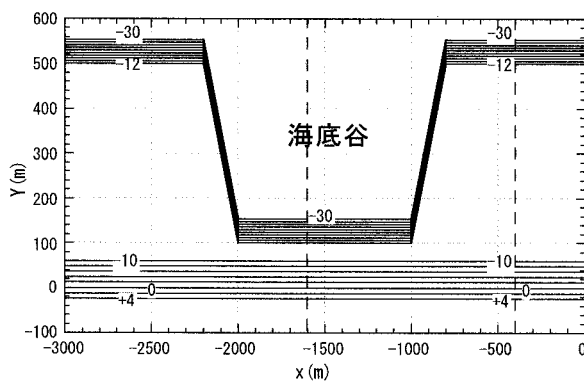


図-5 計算のための初期地形

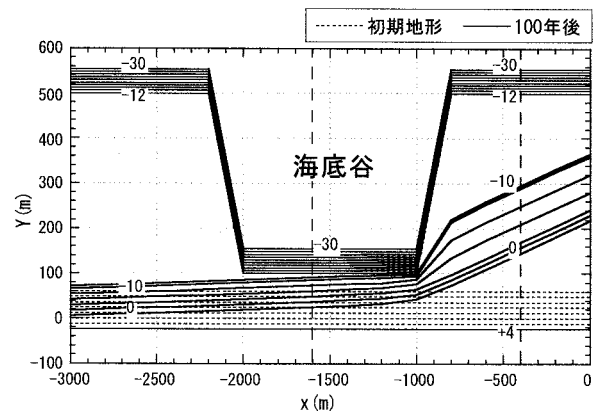


図-7 海底谷周辺での地形変化の予測結果

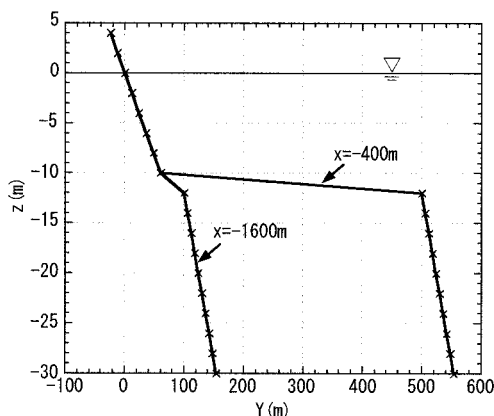


図-6 初期縦断形

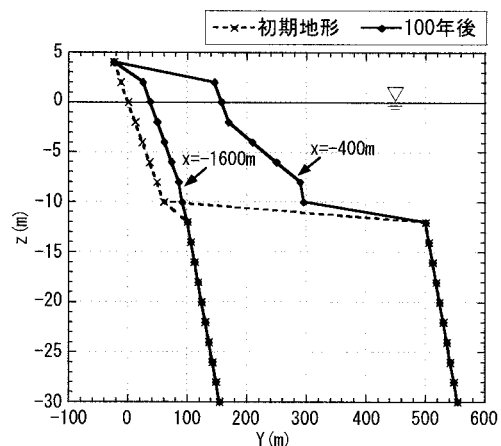


図-8 陸棚上と海底谷を横切る断面での縦断形変化

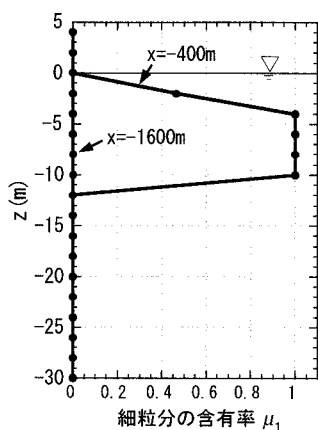


図-9 海底谷中央を切る測線上での細粒分の含有率 μ_1 の水深方向分布

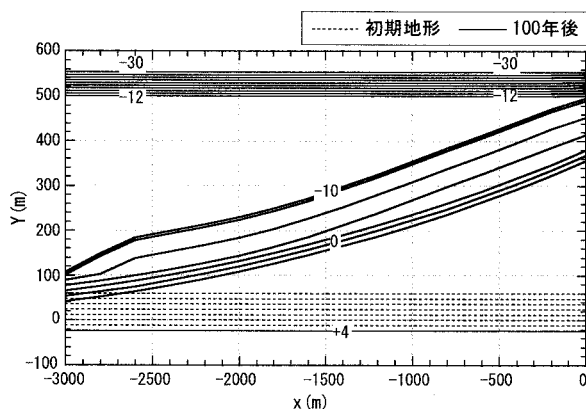


図-10 海底谷周辺での地形変化の予測結果

的によく説明している。図-10は海底谷がない場合の計算であるが、広い陸棚上を全漂砂が流れており細粒分の損失は起こらずに砂は連続的に運ばれるのみである。以上より、粒径を考慮したモデルによれば、海底谷で谷頭部での細粒分の損失現象を十分説明できることが明らかである。

4. 結論

海底勾配が急な海底谷の谷頭を沿岸漂砂が通過する際、粒径に応じた平衡勾配と海底勾配との関係で、海底勾配がある粒径の砂の平衡勾配より急な場合、

斜面上の重力効果によって海底谷へと砂が落ち込むという考え方を等深線変化モデルに取り込み、海底谷を通過する際に細粒分から選択的に失われるという現象の予測モデルを構築した。このように海底谷の谷頭を通過するとその下手側の汀線付近では細粒分が失われて粗粒化するという現象はこの海岸に留まらず、駿河海岸²⁾の和田鼻周辺、清水海岸の三保松原の先端部の海底谷周辺でも観察されることから、本研究の結果は海底谷周辺で起こる一般的現象をかなりうまく説明している。なお、本モデルは金澤ら⁴⁾が明らかにしたように、海底面に徐々に砂が堆積して、砂の安息勾配を超えると砂が間欠的に流出するという現象ではなく、砂の連続的な分級作用を扱っている。このような点については今後の課題である。

参考文献

- 1) 宇多高明, 小俣 篤, 堤 博志, 吉村敏明: 深海への土砂流出実態の現地調査, 第33回海岸工学講演会論文集, pp.277-281, 1986.
- 2) 宇多高明, 堤 博志, 小俣 篤, 酒井佳治: 海底谷への土砂移動の現地観測, 第34回海岸工学講演会論文集, pp.307-311, 1987.
- 3) 宇多高明, 高橋 豊, 青木 豊, 加藤憲一: 西湘海岸の海浜堆積物の分布特性 - 森戸川河口沖の海底谷周辺に着目して -, 地形, Vol.18, pp.37-52, 1997.
- 4) 金澤裕勝, 笹倉伸男, 中山真二, 福濱方哉, 山本幸次, 橋本 新, 辺見 聡: 黒部川河口の周辺海域における大規模な土砂崩落の実態, 海岸工学論文集, 第53巻, pp.611-615, 2006.
- 5) 熊田貴之, 宇多高明, 芹沢真澄, 三浦正寛: 波の遮蔽域形成に伴う3次元地形・粒径変化の予測法, 海洋開発論文集, 第21巻, pp.1029-1034, 2005.
- 6) 宇多高明, 矢野 滋: 相模湾西湘海岸の侵食実態について, 地形, Vol. 8, pp.1-19, 1987.
- 7) 宇多高明, 川崎俊太, 見附敬三: 西湘海岸小八幡地区に建設された突堤の漂砂阻止率の検討, 海岸工学論文集, 第42巻, pp.671-675, 1995.
- 8) 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/II-35, pp. 121-139, 1996.
- 9) Kraus, N. C.: Field experiments on vertical mixing sand in the surf zone, J. Sedimentary Petrology, Vol. 55, pp. 3-14, 1985.
- 10) 熊田貴之, 宇多高明, 芹沢真澄, 小林昭男: 混合砂による養浜時縦断形予測モデル, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 596-600, 2003.