

河口デルタの汀線・粒径変化の予測モデル

——沿岸漂砂による分級作用の再現——

熊田 貴之* ・小林 昭男** ・宇多 高明***
芹沢 真澄**** ・三波 俊郎***** ・増田 光一*****

河川工学の分野で藤田ら (1995) が提案した有効粒径集団の概念, すなわち河床勾配に応じてその河道を構成する河床材料の主な成分が異なるという概念を, 海岸での現象に拡張した。具体的には, 河口デルタの海岸線変形を対象とし, 沿岸方向での粒径の分級作用と, それに応じた汀線変化を予測可能とするモデルを構築した。その結果, 河口デルタでは沿岸方向の汀線勾配に応じて堆積粒径が異なることが明らかとなり, 河川と海岸での土砂移動について高いアナロジーが成立することが分かった。本研究により, 河口・海岸域を含む水系内での合理的な総合土砂管理を行う手法が開発された。

1. ま え が き

近年, 土砂の動きを土砂生産域・山地部河道・平野部河道・河口・海岸など個別的に捉えるのではなく, 海岸域も含む流砂の系内で一貫して捉え, 大きなスケールから見て合理的な土砂管理を実施する必要性が高まっている。藤田ら (1995) は, 河道内のある特定の河川地形変化を支配する粒径集団を「有効粒径集団」と定義し, 河川の上・中・下流で現象を大きく支配する粒径集団が異なることを明らかにした。これは土砂の量だけではなく, 質 (粒度) にも着目した土砂収支把握が流域総合土砂管理に必要なことを示す。土砂管理の最終的な目的の一つは, 河川や河口・海岸の地形変化を制御することにあるが, 河口・海岸においてはこうした概念がまだ取り込まれていない。

本研究では, この有効粒径集団の概念を海岸での現象に拡張するため, 底質粒径の分級作用が顕著に表れる河口デルタを対象に, 河口デルタでの粒径の分級作用と, それに応じた汀線変化を予測可能なモデルを構築した。

2. 数値モデル

2.1 モデルの基本

a) 粒径毎の沿岸漂砂量式

海岸では波や沿岸流の作用によって汀線方向の底質分級作用が起こる。すなわち, 沿岸漂砂の作用によれば粒径の小さい砂ほど運ばれやすいため, 河口から遠ざかるにつれて全体として底質粒径が小さくなることを考慮しなくてはならない。この粒径の分級作用を考慮するため, 均一砂を仮定している従来の汀線変化モデルを混合粒径が考慮できるように拡張した。混合粒径砂の分級過程を考慮するためには, 混合粒径砂中の, 粒径毎の沿岸漂砂量 $Q^{(K)}$ の算定が必要である。そこで, CERC 型漂砂量式

に Kamphuis の漂砂量係数 K_1 と底質粒径 D の関係 ($K_1 \propto D^{-1/2}$) と, 新たに交換層内の粒径毎 (N 粒径) の含有率 $\mu^{(K)}$, $K=1, 2, \dots, N$ を考慮して次式を考案した。ここでの交換層内の粒径毎 (N 粒径) の含有率とは, 波の作用により砂は混合され, 粒度の変化はある厚さ内で生じするという, 平野 (1971) の「交換層」の概念を用いた。モデルの詳細は熊田ら (2002) に示してある。

$$Q^{(K)} = \mu^{(K)} K_1^{(K)} F_x, \quad K=1, 2, \dots, N \dots\dots\dots (1)$$

$$F_x = (EC_g)_B \sin a_{Bs} \cos a_{Bs} \dots\dots\dots (2)$$

$$K_1^{(K)} = A(D^{(K)})^{-1/2} \dots\dots\dots (3)$$

式 (3) では, 対象海岸の変形過程に応じて A を設定できるようにした。 F_x は, 海岸線単位幅当たりの波エネルギーフラックスの沿岸方向成分であり, a_{Bs} は波峰線が海岸線となす角である。

b) 粒径毎の土砂量保存則

粒径毎の汀線変化量 $y_s^{(K)}$ は, 粒径毎の土砂量保存則 (連続式) により次式で算定する。

$$\frac{\partial y_s^{(K)}}{\partial t} = -\frac{1}{D_s} \left(\frac{\partial Q^{(K)}}{\partial x} - q^{(K)} \right), \quad K=1, 2, \dots, N \dots\dots\dots (4)$$

x は沿岸方向座標, $q^{(K)}$ は単位幅あたりの粒径毎の系外からの土砂流入量 (ここでは河川流出土砂量), D_s は漂砂の移動高を示す。混合粒径砂 (粒径全体) の汀線変化量 Y_s はこれらを合計して次式となる。

$$\frac{\partial Y_s}{\partial t} = \sum_{K=1}^N \frac{\partial y_s^{(K)}}{\partial t} \dots\dots\dots (5)$$

c) 粒径毎の含有率変化の計算式

波による混合が生じる交換層は, 漂砂の移動高 D_s , 海浜勾配 $\tan \beta$ の一様勾配斜面の海浜断面を考え, 岸沖方向の幅 B , 深さ方向 D_s の範囲を交換層と定義する。交換層の幅 B は, 混合深さ ΔD_s と幾何学的に次式で関連付けられる。

$$B = \Delta D_s \frac{1}{\tan \beta} = \Delta D_s \cot \beta \dots\dots\dots (6)$$

ここでは B は Kraus (1985) を参考に ΔD_s を与え, これより B を定めた。

交換層内での粒径毎の含有率の算定には, 各時刻の汀

* 学生会員 工修 日本大学大学院理工学研究科海洋建築工学専攻
** 正 会 員 工博 日本大学専任講師 理工学部海洋建築工学科
*** 正 会 員 工博 国土交通省国土技術政策総合研究所研究総務官
**** 正 会 員 海岸研究室 (有)
***** 海岸研究室 (有)
***** 工博 日本大学教授 理工学部海洋建築工学科

表-1 計算諸元

	初期地形 (海底勾配)	波浪諸元			交換層の 幅 B (m)	深砂の移動 高 D_s (m)	粒径数 N	河川粒径別流出土砂量 ($\times 10^3 \text{ m}^3/\text{年}$)						混砂係 数の A
		H_b (m)	—	a_b (°)				0.074mm	0.106mm	0.250mm	0.425mm	0.850mm	2.000mm	
仮想海岸	1/100	2.0	—	0	5.5	7.0	3	100	—	—	100	—	100	0.10
寺泊・野根海岸	1/100	H_b (m)	T_{10} (sec)	α (°)	3.4	7.6	6	6.4	5.5	56.4	312.2	37.3	1.1	0.01
		1.0	6.0	NNW										
仮想海岸 (ダム建設想定)	1/100	H_b (m)	—	a_b (°)	5.5	7.0	3	150 (カット分)	—	—	90	—	60	0.10
		2.0	—	0										

線変化による土砂流入・流出による層内での粒径毎の土砂収支を定式化した。汀線変化後交換層 B 内の土砂が直ちに混合するが、混合状態は堆積域と侵食域とで異なる。堆積域での新たな粒径毎の含有率の計算式は次式となる。

$$\frac{\partial \mu^{(K)}}{\partial t} = \frac{1}{B} \left\{ \frac{\partial y_s^{(K)}}{\partial t} - \frac{\partial Y_s}{\partial t} \cdot \mu^{(K)} \right\}, \quad K=1, 2, \dots, N \quad (7)$$

侵食域での新たな粒径毎の含有率は次式で与えられる。

$$\frac{\partial \mu^{(K)}}{\partial t} = \frac{1}{B} \left\{ \frac{\partial y_s^{(K)}}{\partial t} - \frac{\partial Y_s}{\partial t} \cdot \mu_B^{(K)} \right\} \quad (8)$$

ここに、 μ_B は汀線変化前の交換層より岸側の含有率を示す。計算は以上の式を連立して解いた。なお式 (1) の粒径毎の漂砂量算定には、漂砂上手側の含有率を使用する風上差分を用いた。

2.2 境界条件 (河川流出土砂と河口付近の粒度構成の関係)

本モデルでは、河川流出土砂量の粒度構成が既知であればそれを初期入力条件とし、河川流出土砂量の粒度構成が不明な場合においては、河口付近での粒度構成を初期入力条件とした。すなわち、実海岸などへの適用の際には、正確な河川流出土砂の粒度構成の把握が困難な場合が多いことを想定し、河口での粒度構成 (各粒径含有率) $\mu_b^{(K)}$ ($K: 1, 2, \dots, N$ 粒径) から河川流出土砂の粒度構成 $\mu_b^{(K)}$ を予測する手法を示す。図-1 のように河川流出土砂の総量を $2Q_{IN}$ とし、河口の全沿岸漂砂量を $2Q_0$ とし、河口幅の右半分の河口部を考える。河川流出土砂がそのまま沿岸漂砂になると仮定すると、粒径毎に土砂収支が成立し、 K 番目の粒径の河川流出分 $\mu_b^{(K)} Q_{IN}$ は沿岸漂砂量 $Q_0^{(K)}$ に等しい。

$$\mu_b^{(K)} Q_{IN} = Q_0^{(K)} \quad (9)$$

一方、 $Q_0^{(K)}$ は式 (1) より次式となる。

$$Q_0^{(K)} = \mu_b^{(K)} K_1^{(K)} F_x \quad (10)$$

式 (10) を $K=1 \sim N$ として総和をとり、式 (10) との比をとると、次式となる。

$$Q_0^{(K)} = \frac{\mu_b^{(K)} K_1^{(K)}}{\sum_{K=1}^N \mu_b^{(K)} K_1^{(K)}} Q_0 \quad (11)$$

式 (11) を式 (9) に代入し $Q_0 = Q_{IN}$ の関係より、河川

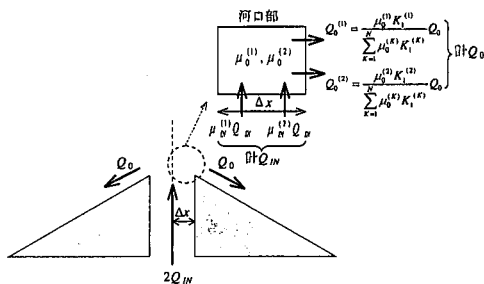


図-1 河川流出土砂量と河口付近の粒度構成の関係

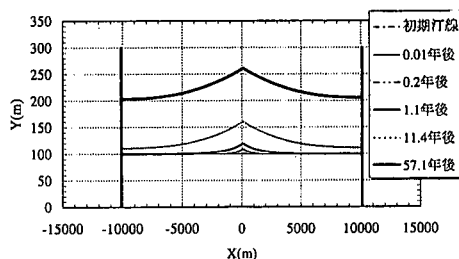


図-2 河口デルタの汀線形状

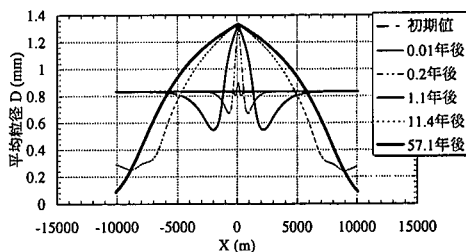


図-3 平均粒径の沿岸方向分布

流出土砂の粒度構成 $\mu_b^{(K)}$ の算定式は式 (12) となる。

$$\mu_b^{(K)} = \frac{\mu_b^{(K)} K_1^{(K)}}{\sum_{K=1}^N \mu_b^{(K)} K_1^{(K)}} \quad (12)$$

3. 仮想的河口デルタを対象としたモデル計算の結果

河口デルタの海岸線における粒径の分級作用を再現するため、まず両端を突堤に囲まれた区域で 0.074, 0.425, 2.0 mm の 3 粒径が均一に養浜された勾配 1/100 の仮想海岸に、河口から同粒径の土砂が同比率で流出した計算を行った。計算諸元を表-1 に示す。波浪諸元は表-1 に

示すように入射角 0° , $H_b=2\text{ m}$ とした, 図-2 に汀線変化を示す。従来モデルと同様, 沖方向へのデルタの発達が可能である。汀線形は, 57.1 年後でほぼ安定しており, その後は相似形を保ったまま沖方向に進んでいく。

図-3 には平均粒径の沿岸方向分布を示す。河口では細粒分が先に移動し, 分級作用が沿岸方向に徐々に伝播し, 粗粒砂は若干河口から流れるものの移動量が少ないため結果的に河口付近に留まる。その結果, 河口では粒径が粗く, 河口から離れるにしたがい粒径が細くなるという粒径の分級作用の再現ができた。図-4 は交換層内の砂の含有率変化である。河口付近では粗粒分が多く存在し, 河口の両脇では細粒化が起こり, この含有率が時間を追って徐々に沿岸方向に伝播していく。注目されるのは, 汀線形が安定すると同時に, 粒径毎の含有率も安定に至ることである。すなわち, 砂の含有率変化は汀線変化と連動している。

図-5 は, 河口デルタの端部 ($X=10, 100\text{ m}$) と河口部 ($X=100\text{ m}$) における汀線材料の粒径加積曲線の経時変化である。なお, 曲線を描くために便宜上最小粒径は 0.01 mm としている。計算初期は, 粒径加積曲線は沿岸方向に同一であるが, 時間経過とともに河口部では細粒分は減少し粗粒分が増大する。一方, 河口から離れた端部においては, 細粒分の含有率が大きく増大している。この粒径加積曲線から, 中央粒径 (d_{50}) と篩い分け係数 (S_0) を算定することができる。図-6 には d_{50} と S_0 の沿岸分布の最終形を示す。 d_{50} は平均粒径とほぼ同様な変化を示し, 粒径の分級作用が確認できる。 S_0 は河口付近と端部においては粗粒分・細粒分を含む均一な砂が多くあるため小さくなり, $X=\pm 5000\text{ m}$ 付近では様々な粒径から構成されているため大きな値を示す。

4. 寺泊・野積海岸への適用

実海岸への適用に際し, ①沿岸漂砂に関して閉じた系であること, ②境界条件・初期条件が明確であることを考慮して大河津分水路が完成して海岸への土砂堆積が起きた寺泊・野積海岸を選定した。図-7 に寺泊・野積海岸の位置を示す。大河津分水路は, 越後平野を水害から守るために 1922 年に通水された。洪水時には上流からの洪水を可動堰から全て日本海に流している。流出土砂は河口部周辺に堆積し, 主として冬季に発生する NNW から NW の高波浪により海岸全体に配分され, 典型的な河口デルタを形成している (土屋ら, 1994)。

計算の検証データを得るために 2002 年 4 月 25, 26 日, 図-7 に示す海岸線に沿う 30 点において前浜の砂を採取した。採取した砂で乾燥後篩い分け分析を行った。検証計算の諸元は表-1 に示す。初期汀線は通水前の 1911 年とし, 再現汀線は 1987 年とする。流出土砂の粒度構成

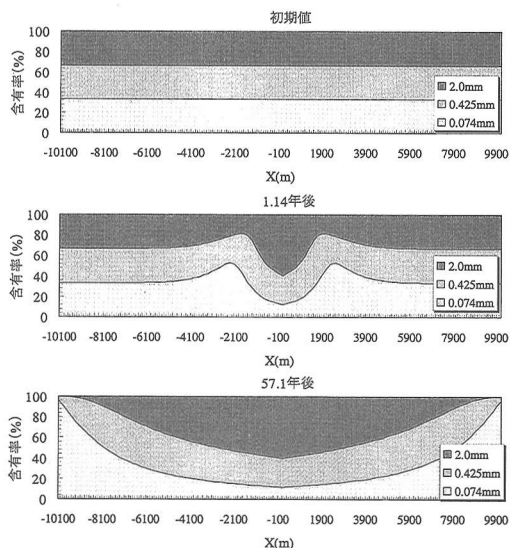


図-4 交換層内の粒径含有率の沿岸方向分布

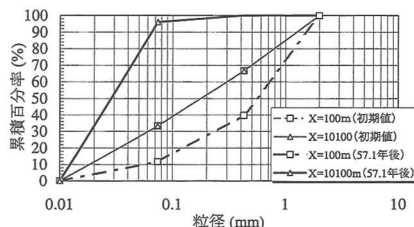


図-5 粒径加積曲線の経時変化

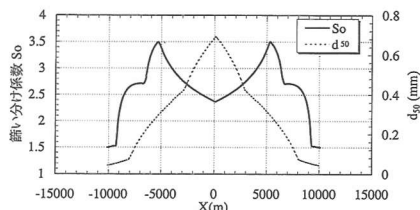


図-6 d_{50} と篩い分け係数の沿岸方向分布

は河口での粒度構成から予測して与え, 全粒径の流出土砂量は土屋ら (1994) を参考に与えた。なお, この河川は土屋らによれば年累計流出土砂量と粒度構成は毎年ほとんど変化がないことから, 汀線は 1987 年であるが, 粒径は 2002 年の実測値を使用している。波浪も同様に土屋ら (1994) を参考に通年の平均的な緒元を与えた。

図-8 に現況 (1987 年) と計算汀線変化量を示す。計算結果は現況とほぼ似た分布を示している。図-9 は現況と計算の d_{50} の沿岸方向分布を示す。計算結果は, 現況の河口デルタでの粒径の分級作用を良く再現している。特に, 河口右岸側の野積海岸では実測値を良く再現していることが分かる。左端部の寺泊港では, 新たな防波堤建設に伴い波の遮蔽域が形成されるため, 実測値では細粒

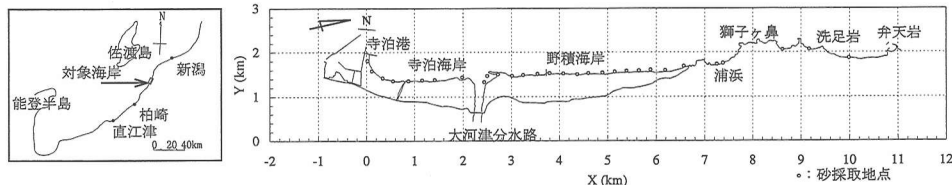


図-7 寺泊・野積海岸の位置

砂が多く分布している。計算では、防波堤を考慮していないため、実測値よりも粗くなった。なお、計算対象ではないが、調査結果に着目すると野積海岸北端部の岬より北側の区域 $X=7,500\sim 10,000$ m の粒度構成は河口デルタ北端部付近の値と似ており、岬よりも北側に砂が流出していることが示唆される。

5. 河川・海岸の流域総合土砂管理への応用

5.1 有効粒径集団の概念の河口デルタへの拡張

藤田ら (1995) は、日本の沖積河川について地形変化パターンと対応する粒径の流速特性の関係を図-10(右図)のように示した。沖積平野に供給される土砂はシルト・粘土、砂、礫という幅広い粒度を持ちこの順に割合が小さくなる。特に、礫の沖積平野への供給量はそれ以外に比べ非常に少ないのが一般的である。このうち、シルト・粘土は河道内にほとんど堆積することなく超低流速な河口まで運ばれることがほとんどである。砂の供給量変化は砂床区間(河床勾配 $I_b \leq 1/2,000$ で河床材料 $d_{50} \leq 1$ mm で構成されたSセグメント)の河床変化に、礫の供給量変化は礫床区間(河床勾配 $I_b \geq 1/1,500$ で河床材料 $d_{50} \geq 15$ mm で構成されたGセグメント)の河道変化に現れる。このように、供給土砂の中でも粒径によって流速特性が異なり河川地形変化に及ぼす影響が異なる。

上述の計算結果より、河口デルタにおいても同様の現象が起こる。図-2, 4より、沿岸方向の汀線勾配と交換層内の粒度構成には相関があり、河口付近では大部分が礫・粗砂で構成され、沿岸方向の汀線勾配は急となり、河口から離れるにつれ細砂で多く占められ汀線勾配は緩くなる。こうした特性は、式(1)の粒径毎の漂砂量式からも導くことができる。

$$\alpha_{Bs} \cong \frac{Q^{(K)}}{K_1^{(K)}(EC_g)_B} \dots\dots\dots (14)$$

したがって、式(3)、(14)より次式の関係が成立し、粒径は汀線勾配に大きく依存する。

$$\alpha_{Bs} \propto \frac{1}{K_1^{(K)}} \propto \sqrt{D^{(K)}} \dots\dots\dots (15)$$

以上のことを模式的に示したのが図-10(左図)である。河口デルタにおいても粒径毎に流速特性が異なり、汀線勾配に応じて堆積する粒径が異なるというセグメント

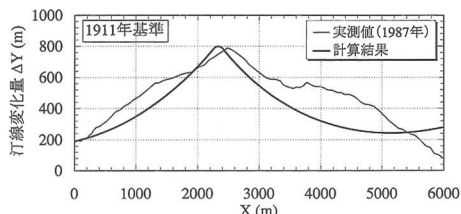


図-8 寺泊・野積海岸の現況と計算の汀線変化量

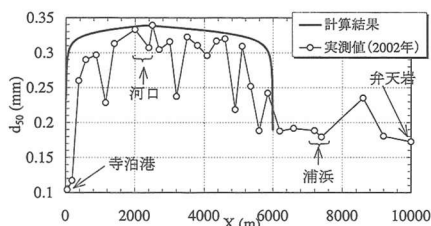
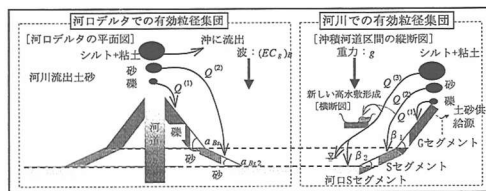
図-9 寺泊・野積海岸の現況と計算の d_{50} の沿岸方向分布

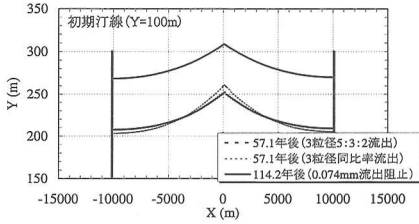
図-10 河川・海岸での有効粒径集団の概念

分類が可能である。したがって、河口デルタの地形変化を制御するためには、地形変化を支配する粒径集団に着目して収支や動態を合理的に捉えることが重要である。

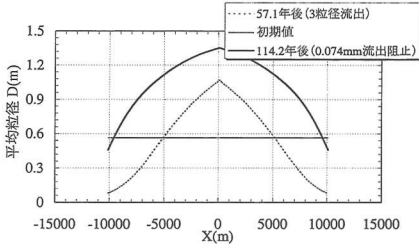
本モデルでは、質(粒度)にも着目した土砂収支把握が河口デルタにおいても可能になることから、有効粒径集団の概念の河口デルタへの拡張が可能となった。そこでこの概念の実用化に際し、水系内に造られたダムによる土砂流下の阻止が粒径集団に対していかなる影響を与えるか仮想海岸で検討した。

5.2 ダム建設に伴う河口デルタの汀線変化と粒径変化

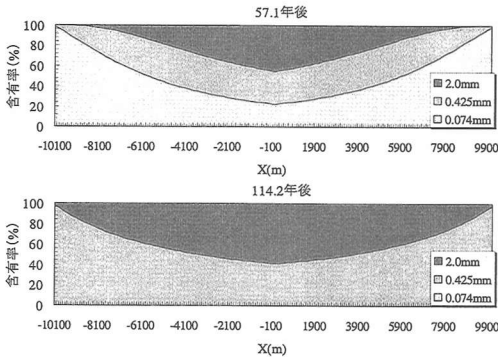
大規模なダムが建設されると、貯水池内の堆砂、ダム下流の河床低下と浮遊砂量の減少が起こることが多い。そこで、ダム建設に伴い細粒砂分の土砂流出が減少する



図一11 細粒砂流出阻止前後の汀線形状



図一12 細粒砂流出阻止前後の平均粒径の沿岸分布



図一13 細粒砂流出阻止前後の交換層内の粒径含有率

場合、河口デルタにおける汀線・粒径変化を再現し、問題点を明らかにする。両端を突堤に囲まれた区域で 0.074、0.425、2.0 mm の 3 粒径が均一に均された勾配 1/100 の仮想海岸に、河口から同粒径の土砂が 5:3:2 の比率で 300,000 m³/年流出した計算を行い、汀線および粒度構成が安定した後、その状態から 0.074 mm の砂の流出のみを阻止した計算を行った。流出土砂の構成比率は、藤田ら (1995) の沖積層のボーリング調査資料による土砂別体積の算定結果を参考にしている。計算諸元を表一1に示す。波浪緒元は入射角 0°, $H_0=2$ m とした。

図一11に細粒砂をカットする前後の汀線形状の比較を示す。汀線形状には特に顕著な差は見られないものの、若干ではあるが沿岸方向での汀線勾配は緩やかな形状で安定している。これは、河川流出土砂量が半分に減少したことが大きく影響しているが、粒度構成が変化したことの影響も出ている。従来の単粒径のみ考慮した計算では、流出土砂量が半減すれば、沿岸方向での汀線勾配は

倍緩くなると考えられる。しかし、本計算においては細粒砂分阻止により流出土砂量が粗粒化するため、全体としての沿岸漂砂量も小さくなり、汀線勾配は従来より急となった。前述の 3 粒径が同比率で流出した計算結果と比較すると、安定形状が明らかに異なる。これにより、ダム建設に伴い流出土砂の粒度構成が粗粒化すると汀線勾配にも影響があることが分かる。

同様に、図一12には細粒砂分をカットする前後の平均粒径の沿岸方向分布を示す。粒径の分級といった基本的な特性を維持しつつ、細粒砂阻止後は全体的に粒径が粗粒化した。図一13には細粒砂をカットする前後の交換層内の粒径含有率を示す。交換層内の粒度構成は沿岸方向に明らかに異なり粗粒分が多くなった。

6. ま と め

本研究では、河口での粒度構成から河川流出土砂の粒度構成を予測できる手法を示し、熊田ら (2002) のモデルに粒径毎の河川流出土砂量を考慮し、河口デルタでの粒径の分級作用とそれに応じた汀線変化を予測可能なモデルを構築した。本モデルを寺泊・野積海岸へ適用した結果、汀線変化量は現況とほぼ似た分布を示し、実測の粒径の分級作用が再現できた。また、河川において粒径ごとに流送特性が異なり、河床勾配に応じて堆積する粒径が異なるというセグメント分類が、河口デルタの粒径と汀線勾配についても成立することが分かった。さらに、海岸の流域総合土砂管理への応用例として、ダム建設に伴い細粒砂分の土砂流出が減少する場合を想定した計算の結果、粒径は沿岸方向に粗粒化し、沿岸方向の汀線勾配にも影響があることが明らかとなった。

参 考 文 献

- 熊田貴之・小林昭男・宇多高明・芹沢真澄・星上幸良・増田光一 (2002): 混合粒径砂の分級過程を考慮した海浜変形モデルの開発, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp. 476-480.
- 田中 仁・鈴木 正 (1998): 海浜粒度組成変化の予測モデル, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp. 511-515.
- 土屋義人・山下隆男・斉藤正勝 (1994): 河口デルタの拡大・縮小に起因する海浜変形 (1) —寺泊・野積海岸での河口デルタの形成—, 京都大学防災研究所年報, 第 37 号, B-2, pp. 539-568.
- 平野宗夫 (1971): Armoring をともなう河床低下について, 土木学会論文集, 第 195 号, pp. 55-56.
- 藤田光一・宇多高明・服部 敦 (1995): 水系土砂収支分析のための「有効粒径集団」の考え方の提案, 土木技術資料, 37-12, pp. 34-39.
- Kamphuis, J. W., M. H., Davies, R. B., Narim and Sayao, O. J. (1986): Calculation of littoral sand transport rate, Coastal Engineering, Vol. 10, pp. 1-12.
- Kraus, N. C. (1985): Field experiments on vertical mixing of sand in the surf zone, J. Sedimentary Petrology, Vol. 55, pp. 3-14.