

等深線変化モデルによる河口砂州の変形の再現と予測

宇多高明*・清田雄司**・前川隆海***・古池 銅****
芹沢真澄*****・三波俊郎*****

相模川河口を対象として、洪水流によってフラッシュされた河口砂州の、波による復元過程を継続観察によって調べた。2004年9月15日～11月21日の観察では、河口両岸、および中央部でまず岸向き漂砂によって砂が打ち上げられ、それが上流方向へ運ばれて砂州が復元された。土砂の吸い込み・湧き出しを考慮した等深線変化モデルをこの現象の再現に適用し、安定な河口テラスを再現した上で、沖合へ流出した砂が波の作用で陸向きに運ばれ、河口砂州が復元される過程を再現した。

1. ま え が き

一般に、河口砂州の変動は河口部の航路埋没の原因となる一方、洪水流によって河口砂州がフラッシュされると、河道内への波の侵入により河口内の静穏度の低下原因となる。このような河口砂州の変動は河川流と波の作用が関係するダイナミックな現象である。河口砂州が洪水流の作用によってフラッシュされた場合、その構成土砂は沖合に一時的に堆積した後、波の作用のもとで再び河口へと戻り河口砂州が復元される。このような河口部への砂の回帰に関し、宇多ら (2004a) は、急勾配海岸において沖へ流出した砂が洪水後の波の作用により岸向きに運ばれて河口砂州が復元される状況を等深線変化モデルにより予測した。この場合、洪水流の作用時間が数時間であるのに対し、波の作用は数週間と長いのが一般である。一方、宇多ら (2004b) は、ポテンシャル流とのアナロジーに基づいて吸い込み・湧き出しを与えることにより、動的平衡状態にある河口部周辺の海底地形を求める手法を明らかにし、その上で河口に平行導流堤が延ばされた場合、導流堤が河口への砂の回帰を阻害するものであることを明らかにした。この場合における外力の作用は、河川流と波の同時作用である。

本研究では後者の問題を取り上げ、まず相模川河口砂州を対象として継続観察を実施した。この継続観察中、洪水流によってフラッシュされた土砂の回帰現象が観察された。そこでその実態を明らかにした上でモデル化を図った。

2. 相模川河口における流出土砂の回帰現象

相模川の河口テラス・砂州の平面図を図-1に、断面図を図-2に示す (宇多ら, 1997)。図-1によれば沖合では等深線が凸状となり、-4 m以浅には平坦な河口テラスが存在している。過去の調査によれば、この河口テ

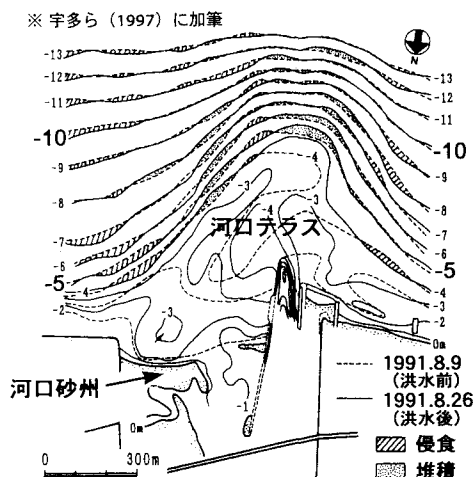


図-1 相模川河口沖の海底地形の比較 (1991年8月9日 vs. 1991年8月26日)

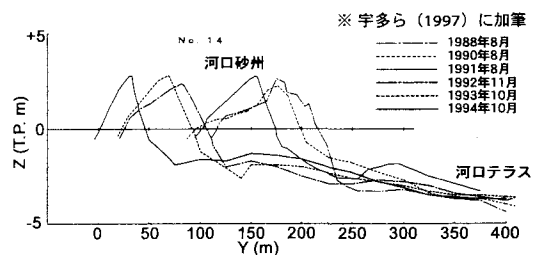


図-2 測線 No. 14における海浜縦断面形の変化

ラスはかなり安定的に存在し続けていることが分かっている。また図-2からは、ほぼ-2 m以浅で河口砂州の移動が繰り返されていることが見て取れる。さらに宇多ら (1997) によれば、河口砂州からフラッシュされた砂は河口テラス外縁付近に堆積した後、波の作用で再び河口へ戻るといった移動サイクルが存在することが定性的に示されているが、その機構成立についての十分な物理的説明はなされていない。そこで今回相模川河口においてまず継続観察を行った。

(1) 河口左岸における砂の回帰現象

相模川河口では、平塚市により2003年4月から現在ま

* 正会員 工博 (財)土木研究センター理事なごき総合研究室長
** 平塚市経済部みなと水産課主管
*** 正会員 工修 (財)土木研究センター研究開発一部
**** 海岸研究室 (有)
***** 正会員 海岸研究室 (有)



写真-1 河口左岸の横堤周辺状況 (2004年10月31日)



写真-4 洪水前の河口右岸の海浜 (2004年9月15日)

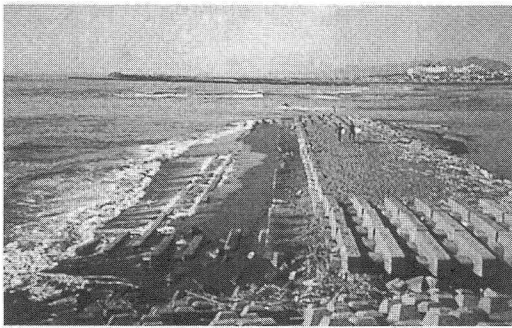


写真-2 河口左岸の横堤周辺状況 (2004年11月21日)

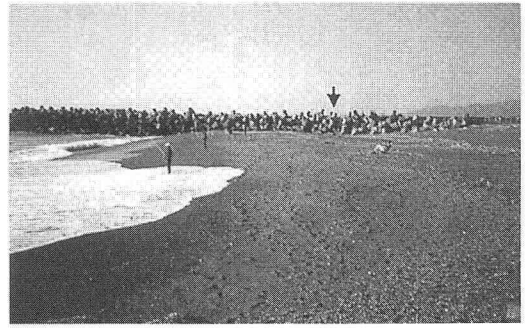


写真-5 河口右岸の状況 (2004年11月21日)



写真-3 横堤背後の砂州状況

で月1回以上の割合で定点写真撮影による河口部地形変化モニタリングが行われている。この中で2003年8月15日の洪水(流量 $810\text{ m}^3/\text{s}$)による河口砂州のフラッシュと、その後の波の作用による砂の回帰現象がとらえられた(海野ら, 2005)。ここではその後の継続観察の結果について述べる。

相模川河口左岸には堤防を守るための横堤(水制)が設置されている。写真-1は、2004年10月31日にこの横堤を撮影したものである。従来、この横堤の沖側には前浜は全く存在していなかったが、洪水後そこに前浜が形成された。しかも異形ブロックの上部まで海側から連続的に砂が堆積していることから、砂は洪水流ではなく波の作用で堆積したものであることが明らかである。すなわち、洪水流によって河口砂州から沖へと運ばれた砂が、

波の作用のもとで岸向きに移動し、それが横堤によって阻止されたために横堤の沖側に堆積したと考えられる。

写真-2は、ほぼ同じ場所から3週間後の11月21日に撮影したものである。横堤の沖側の状況を示すが、異形ブロックでできた横堤の天端上には乾燥した砂が残されているのと対照的に、横堤の沖側に形成されていたならかな勾配の海浜では砂が削り取られ、異形ブロックが再び姿を現した。波の作用の及ばない横堤の天端上に堆積した砂と、横堤沖側の wet beach とが明らかに不連続になっていることから、前面で侵食が進んでいることが分かる。

一方、写真-2によれば横堤先端の上流側には砂嘴が見られる。この状況を横堤の背後から撮影したのが写真-3である。横堤の先端部背後にはほぼ半円形状の砂の堆積が見られる。この砂の堆積は写真-1では全く見られなかったから、3週間で形成されたことは間違いない。砂の堆積を見ると、横堤沖から進んできた波が先端で回折した後、砂嘴の汀線に沿って斜めに碎波している状況が見て取れる。また砂嘴の付け根では波高が非常に低い。以上の特徴は、横堤の先端を越えて沿岸漂砂によって上流側へと砂が運び込まれたことを表している。

(2) 河口右岸における砂の回帰

河口右岸には導流堤があり、隣接する平塚新港との間に狭い砂浜を有している。写真-4は2004年9月15日撮影の海岸状況である。前方に見えるのが平塚新港の防波

堤と、それに接して設置された消波工である。写真によれば、この消波ブロックと手前側の右岸導流堤の間に砂浜が広がっていた。洪水後、この海浜には洪水流によって沖へと運ばれた砂が岸向きに運ばれた結果、新たに砂浜が大きく広がった。この状況を示すのが写真-5である。写真-4より、9月15日の汀線位置を読み取り写真-5に矢印で示すが、従来から存在した砂浜に砂礫が堆積して小高いバームが形成されたことが分かる。このことから右岸においても岸向漂砂によって沖合から砂が打ち上げられたことが分かった。

3. 土砂の回帰予測モデル

予測モデルは、宇多ら(2004b)の2次元ポテンシャル流とのアナロジーに基づく動的安定海浜形状の予測法によった。このモデルは、芹沢ら(2002)の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をベースとしたモデルである。等深線変化モデルによれば、突堤等の各種施設が存在する場での沿岸漂砂の阻止や、その背後(岸側区域)を一部の沿岸漂砂が通過する現象などの再現が可能である。とくに海浜縦断形の安定化機構が組み込まれていることから、防波堤や導流堤の沖合を沿岸漂砂が回り込んで下手側へと運ばれる現象の再現も可能である。

一方、河口部および河口沖テラスの表現においては、芹沢ら(2002)のモデルに河川流の土砂輸送の効果を取り込んで再現する。これは上記基礎式の連続式に吸い込み・湧き出し項を付加することで動的安定形状を再現するものである。基礎方程式は式(1)~(6)で与えられる。

$$q_x = \varepsilon_x(z) \cdot K_x \cdot (EC_\theta)_b \cdot \cos \alpha_b \left\{ \sin \alpha_b - \frac{1}{\tan \beta_c} \frac{K_2}{K_x} \frac{\partial H_b}{\partial x} \right\} \dots \dots \dots (1)$$

$$q_z = \varepsilon_z(z) \cdot K_z \cdot (EC_\theta)_b \cos^2 \alpha_b \sin \beta_c \cdot \left(\frac{\cot \beta}{\cot \beta_c} - 1 \right) \dots \dots \dots (2)$$

$$\cot \beta = \frac{\partial Y}{\partial z} \dots \dots \dots (3)$$

$$\varepsilon_z(z) = \varepsilon_x(z) = \varepsilon(z) / \int_{-h_c}^{h_R} \varepsilon_z(z) dz \dots \dots \dots (4)$$

$$\varepsilon(z) = \begin{cases} = \frac{1}{h_c + h_R} \dots \dots \dots (-h_c \leq z \leq h_R) \\ = 0 \dots \dots \dots (z < -h_c, h_R < z) \end{cases} \dots \dots \dots (5)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = -\frac{\partial q_x}{\partial x} - \frac{\partial q_z}{\partial z} + S \dots \dots \dots (6)$$

ここに、 q_x は沿岸漂砂量、 q_z は岸沖漂砂量、 x は沿岸座標、 z は鉛直座標(地盤高)、 t は時間、 Y は等深線位置、 $(EC_\theta)_b$ は碎波点のエネルギーフラックス、 α_b は碎波波向と等深線のなす角、 $\cot \beta$ は等深線間隔、 $\varepsilon_x(z)$ および $\varepsilon_z(z)$ は沿岸および岸沖漂砂量の水深方向分布であり、式(5)のように一様で与える。さらに K_x は沿岸漂砂量

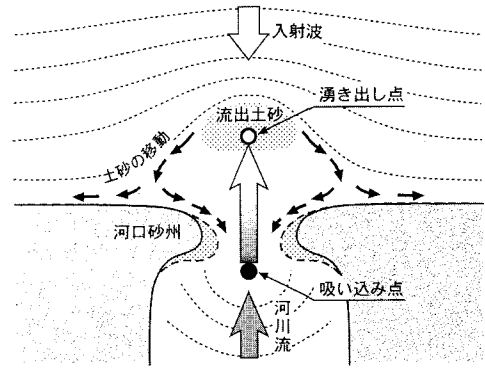


図-3 砂の吸い込み・湧き出しの概念図

係数、 K_z は岸沖漂砂量係数、 h_c は波による地形変化の限界水深、 h_R はバーム高、 $\tan \beta_c$ は平衡勾配である。 S は単位深さ・沿岸方向距離単位幅あたりの吸い込み・湧き出し量である。

等深線変化量は、等深線上の各点での沿岸漂砂量 q_x 、岸沖漂砂量 q_z を式(1)、(2)で与え、これを用いて x - z 空間の2次元の連続式(6)を解くことで計算される。図-3には概念図を示す。砂の吸い込みでは河川流による侵食作用を表し、砂が沖合で堆積する状況が湧き出しによって表現される。また沖合へと流出した土砂は、式(2)で与えられる平衡勾配とのバランスにより岸向きに移動し、汀線付近では河口部汀線が凹状となっていくことから、河口内へと流れ込むと考える。以上の手法により、河口砂州が洪水流的作用によってフラッシュされ、フラッシュされた土砂が波の作用で再び河口へと戻り河口砂州が復元される一連のプロセスをモデル化した。

4. 計算手法

河口砂州と河口テラスでは海底勾配が異なる。相模川では図-2の縦断図に示したように河口砂州は約1/10と急勾配であるが、河口テラスは1/300~1/500の平坦面である。いま図-3の河口部汀線の凹状部に溜まった土砂が洪水でフラッシュする場合を考える。粒径の大小による河川流に対する動きやすさの違いから、細粒の砂は比較的小さな洪水でも水深の大きな領域まで流出する。一方、粗粒の砂はテラスの沖端を越えた大きな水深領域まで流出することは頻度的に少ない。この結果、比較的小粒で構成される平坦なテラス上に洪水後粗粒土砂が一時的に残されると考えられる。相模川では図-2の縦断図にあるように-2.0m付近に河口砂州と河口テラスの境界があり海底勾配が不連続になっている。このような地形が形成されると河口テラス自体はほとんど変形せず、テラス面上の一時的に残された粗砂成分が移動し、河口砂州の復元が進行する。現地観測によると、河口砂州は

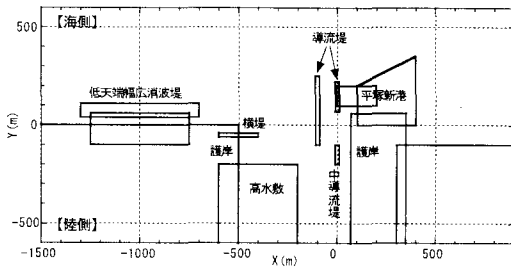


図-4 人工構造物の配置

表-1 計算条件

数値計算手法	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 (芹沢ら: 2002)
計算対象範囲	相模河川1周辺: 海岸線延長2 km
計算ケース	1) 河口テラスの再現 2) フラッシュした土砂の挙動を追跡する計算
初期地形	直線平行等深線地形 (勾配1/50) 構造物: 平塚漁港及び中溝流堤などを単純化
入射波条件	砕波波高 $H_b = 1.0$ m, 砕波方向 $\alpha_b = 0^\circ$
潮位条件	M. S. L.
限界水深・バーム高	1) 地形変化の限界水深 $h_c = 12$ m バーム高 $h_R = 3$ m 2) 地形変化の限界水深 $h_c = 9$ m バーム高 $h_R = 3$ m
漂砂量係数	1) 沿岸漂砂量係数 $K_L = 0.2$ 岸沖漂砂量係数 $K_s = 0.5 K_L$ 2) 沿岸漂砂量係数 $K_L = 0.2$ 岸沖漂砂量係数 $K_s = 0.05 K_L$
沿岸・岸沖漂砂の水深分布	一様分布
平衡勾配	1) $\tan \beta_c = 1/50$, 2) $\tan \beta_c = 1/30$
土砂落ち込みの限界勾配	1) 陸上: $1/2$, 水中: $1/25$ 2) 陸上: $1/2$, 水中: $1/3$
計算等深線範囲	$z = +10$ m ~ 20 m
計算メッシュ	沿岸方向 $\Delta X = 10$ m, 鉛直方向 $\Delta Z = 1$ m
計算時間間隔 Δt	$\Delta t = 3.0$ hr
計算ステップ数	4,000 steps
境界条件	左右端: $q_s = 0$, 岸沖端: $q_s = 0$
河口流入出土砂の循環制御 (宇多ら, 2004)	1) 沿岸方向位置: ($-200 \sim +200$ m へ正規分布で投入) 吸い込み点: $+2$ m ($-1,500,000$ m ³ /yr) 湧き出し点: -6 m ($+1,500,000$ m ³ /yr) 2) 1) で再現した河口テラスに固定床として, -5 m 等深線 ($-4.5 \sim -5.5$ m) に $200,000$ m ³ の養浜を行った.

主に台風期の洪水でフラッシュし冬期に復元し, 約1年のサイクルでフラッシュと復元を繰り返している. 2003~2004年の観測では, 流量約600~800 m³/sでフラッシュし, 約6カ月かけて復元した (海野ら, 2005). 一方その間において河口テラスはほとんど変化していない. したがって河口砂州の変形と予測を行う場合, 河口テラスは変形しないと仮定できる. そこで最初に河口テラスを再現し, 次にこの河口テラスを固定床として, そこに土砂を置いて外力を作用させることにより, 河口砂州よりフラッシュした土砂の回帰現象を再現した.

河口テラスについては, 実態解析に基づき沖合に約500 m 張り出した水深約 $-2 \sim -5$ m の平坦面を再現した. このとき河口付近の $+1.5 \sim +2.5$ m で河道中央を

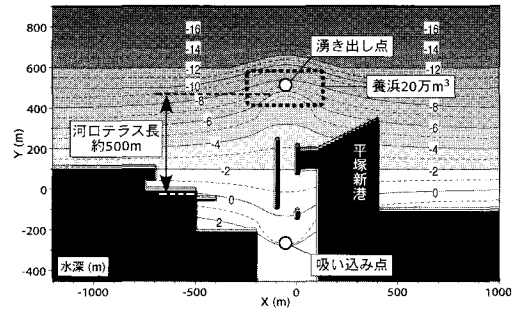


図-5 河口テラスの再現計算結果

中心とする正規分布状に土砂の吸い込み区域を設け, 沖合の $-4.5 \sim -5.5$ m では同様な正規分布状に土砂の湧き出し区域を設けた. 吸い込み量と湧き出し量は同量とし, この土砂量を調整することで動的平衡状態にある河口テラスを再現した. 次に再現したテラス地形を固定床として, その平坦面上に河口砂州からフラッシュされた土砂を覆砂した. この砂に外力を作用させ, その挙動を追跡した. 覆砂量は, 河口砂州とほぼ同量の砂がフラッシュされると考え, 砂州延長500 m × 砂州幅100 m × 移動高4 m = 20×10^4 m³とした.

河口テラスの再現計算に用いる初期地形は, 宇多ら (1998) の展開座標を用い直線平行等深線で与えた. 砕波点のエネルギーフラックスの計算に用いる砕波波高 H_b と砕波角 θ_b には通常時波浪を用い, $H_b = 1.0$ m, $T = 7$ s とした. h_c , h_R は沿岸方向に一律とした. 陸上の浜崖の形成や限界水深に深への重力による土砂の落ち込みの処理法, および構造物周辺の境界の処理法は芹沢ら (2002) の方法を用いた.

河口テラスの再現計算における平衡勾配は周辺海岸と同じ $1/50$ とした. 河口砂州の再現計算における平衡勾配は河口テラスよりも急な $1/30$ とした. その場合重要な点は, 投入砂の粒径は河口砂州を形成していた砂であるために, 平衡勾配が $1/30$ と急なことである. この条件では現況の河口部地形に対して海底勾配が平衡勾配より緩いために強い復元力が働く. これが岸向きの土砂移動を促す.

初期地形と構造物は, 数値計算上の誤差を除くためにできる限りその形状を単純化した. また, 構造物についても海岸線を遮る構造物は, 海岸線直角方向の構造物として表現することでモデル化した. 図-4 には周辺構造物を示す. 計算においてはこれらの構造物を考慮した. またそのほかの計算条件を表-1 に示す.

5. 再現計算の結果

動的平衡状態にある河口テラスの再現計算結果を図-5 に示す. 約 $-2 \sim -5$ m の平坦面が沖へ約500 m 張り出した河口テラスが求められた. このテラスの規模は, 実

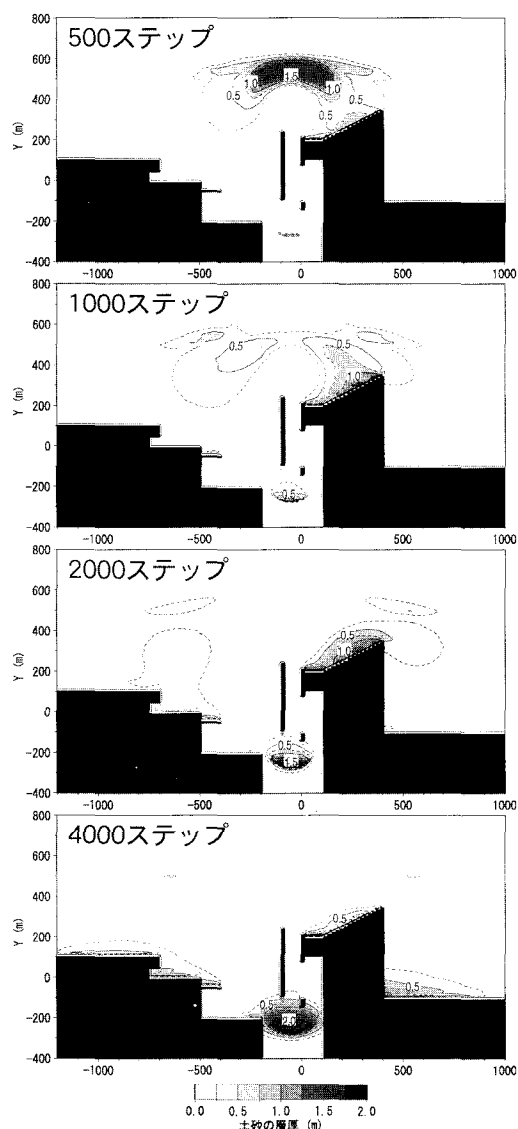


図-6 フラッシュ後の河口砂州の復元過程

態解析とよい一致を示す。これと逆に、河口砂州部では円状の等高線形状となっている。これらの組み合わせによって沖へ流出した土砂が沿岸方向両側に移動し、その後河口に到達後河道中心部へと移動することが可能となる。

図-5 に示す河口テラスの再現計算結果を固定床として与え、河口テラス前縁部に $20 \times 10^4 \text{ m}^3$ の養浜を実施した。これを洪水によるフラッシュ後の初期地形とし、土砂移動を計算した。図-6 には土砂投入後500～4000ステップの土砂移動状況（固定床上の土砂の厚み）を示す。河口テラス上に投入された砂は、河口テラスの外縁に沿いつつ沿岸方向・岸向きに移動し、西側へ運ばれた砂は平塚新港の防波堤によって移動が一旦阻止されて防波堤前面に堆積した後、右岸河口導流堤と防波堤の間に堆積

した。この砂浜では経時的に土砂量が増加してきたことは2004年9月～2005年1月の現地調査で既に明らかにしたが、計算は観察結果とよい一致を示す。一方、東側に移動した土砂は、河口左岸の横堤付近で一部がトラップされるとともに、河口左岸近傍を経由して河道内上流方向へ運ばれ、河口奥に砂州を形成した。この点もまた河口左岸の横堤周辺における写真撮影によって確認された。十分定量的な検証は行われていないものの、従来予測が困難であった河口テラス上への土砂のフラッシュと波による砂州の復元がかなりよく説明できるようになった。

6. 結 論

本研究では相模川河口を対象とし、細砂からなる河口砂州の、洪水流と波浪による変動について調べた。洪水流によってフラッシュした河口砂州の回復過程を定点における継続観察によって調べた結果、2004年9月15日～11月21日の間で、まず岸向き漂砂によって運ばれた砂が、さらに河口の両岸に沿って沿岸漂砂によって運ばれ、最終的に砂が打ち上げられ、砂州が再現されることが分かった。次にこのような現象に関して、土砂の吸い込み・湧き出しを考慮した等深線変化モデルを適用して安定な河口テラスを再現した上で、沖合へ流出した砂が波の作用で陸向きに運ばれ、河口砂州が復元される物理機構を説明する数値モデルを作成することができた。今後は、精度の高い定量的な検証を行いたいと考えている。具体的には、洪水や高波浪の発生頻度やそのパターンと河口砂州のフラッシュ規模、復元時間など現地実態データの解析を進め、それに基づいた計算を実施すること、洪水前後の土砂の分布について平塚新港の西側隣接海岸や、柳島消波堤の東側海岸を含めた広域的な土砂分布のモニタリングを実施して、構造物により阻止された土砂量などの検証を行うことで、再現性を定量的に把握することである。

参 考 文 献

- 宇多高明・木村一雄・寺田好孝・小倉和範・見附敬三(1997)：相模川河口で観測された土砂移動サイクル，海岸工学論文集，第44巻，pp. 581-585.
- 宇多高明・佐谷勉夫・矢澤 肇・大谷靖郎・厚坂祐次(1998)：展開座標を用いた汀線変化モデルによる親沢鼻砂嘴の地形変化予測，海岸工学論文集，第45巻，pp. 541-545.
- 宇多高明・芹沢真澄・高橋 功(2004a)：等深線変化モデルによるフラッシュ後の河口砂州の復元予測，海岸工学論文集，第51巻，pp. 541-545.
- 宇多高明・芹沢真澄・古池 鋼・三波俊郎(2004b)：2次元ポテンシャル流とのアナロジーに基づく動的安定海岸形状の予測法，海岸工学論文集，第51巻，pp. 491-495.
- 海野修司・宇多高明・佐藤 勝・清田雄司・三波俊郎・前川隆海(2005)：相模川河口砂州の変動に関する現地調査，海洋開発論文集，第21巻，pp. 481-486.
- 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.