

河口砂州の変動予測モデル

SIMPLE MODEL FOR PREDICTING TOPOGRAPHY OF SAND BAR OF RIVER MOUTH

古池 鋼¹・宇多高明²・芹沢真澄³・三波俊郎¹・星上幸良⁴・高橋 功⁵
Kou FURUIKE, Takaaki UDA, Masumi SERIZAWA, Toshiro SAN-NAMI,
Yukiyoshi HOSHIGAMI and Isao TAKAHASHI

¹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 (〒110-0016 東京都台東区台東1-6-4)

³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)

⁴正会員 博(工) 国際航業(株) 防災統括部 (〒191-0065 東京都日野市旭が丘3-6-1)

⁵正会員 (財) 土木研究センター研究開発一部 (〒110-0016 東京都台東区台東1-6-4)

A simple model for predicting change in sand bar of a river mouth was developed. Topographic changes of a river mouth bar were investigated first, taking the case of Sagami River and a river mouth facing the Pacific Ocean as the example. The equilibrium state of the profile of a sand bar is assumed and the strength of the recovery of river mouth topography is determined depending upon the shift from this equilibrium state. The offshore sand transport due to flood current and shoreward sand transport due to waves were modeled to predict three-dimensional change of a sand bar. Dynamic changes in a river mouth bar responding flood current and waves can be predicted by this model.

Key Words : River mouth, sand bar, shoreline changes, prediction

1. はじめに

近年わが国では、河川からの豊富な土砂流出を前提として安定的に推移してきた河口砂州が、流出土砂量の急減とともに急速に上流方向へと遡り、河口砂州背後の汽水域が消失し、あるいは河口からの波浪侵入が問題となるケースが数多く生じている¹⁾。これらは河口部の海岸保全や防護上大きな問題となる。このことから、本研究では、河口砂州の変形パターンをモデル化し、砂州の変形を予測する簡単なモデルを構築する。まず河口砂州変動の実例にもとづいてその変形過程を分類し、変形パターンを模式化する。これをもとに予測モデルを構築し、検証を行う。



図-1 相模川の河口砂州 (2005年11月)

2. 砂州変形の事例分類

図-1には相模川の河口砂州を示す。左岸側から右岸側に砂州が伸び、開口部は右岸側近傍にある。この河口砂州や開口部位置は洪水と波浪の作用に応じて時間的に大きく変動している。洪水や波浪による変動は短期変動であるが、河川流出土砂量の変化による長期的変動も起きている。

(1) 河口砂州の短期変動¹⁾

河口砂州の短期変動は、その外力要因から2つに分類できる。洪水による沖への土砂流出に伴う変形と、高波浪による岸への土砂の打ち込みである。これらの変形が起きた後、一定規模の砂州がほぼ同じ位置に復元される。このとき砂州の形成土砂は、淘汰されて粒径が粗くなっている。相模川の河口砂州のほぼ中央を通る測線での縦断変化を示す図-2によれば、汀線付近の砂州を形成する砂礫と沖合の海底地形を形成する細砂では勾配が異なり、水深2m付近で勾配が明瞭に変化する。砂州を形成する

粗粒の土砂は、細粒の土砂で形成された緩斜面上で塊として自在に移動・変形しており、緩斜面を形成する土砂とは別の運動過程にある。また短期的には土砂収支が保たれている。

(2) 河口砂州の長期的変化

図-3は相模川河口砂州の長期的変化の観測結果である。1988～1994年で約200mの汀線後退が起きた。このとき砂州の後退にともない砂州断面積が減少している。断面積と汀線位置の時系列変化を図-3に、両者の相関関係を図-4に示す。同じ方法を太平洋に面したある海岸の河口砂州に適用したところ同様な結果が得られた(図-5, 6, 7)。断面積の減少の原因は、上流のダム建設、砂州の開削や土砂の持ち出しなど人為的な影響が大きい^{(2),(3),(4)}。

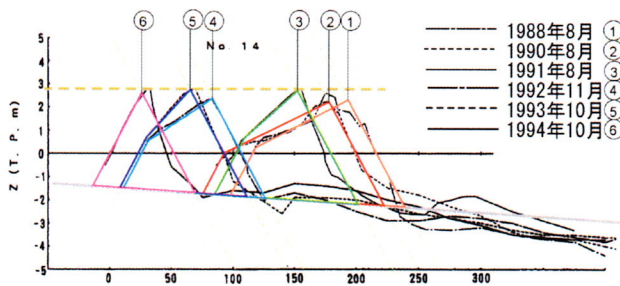


図-2 河口砂州の変形 (相模川)

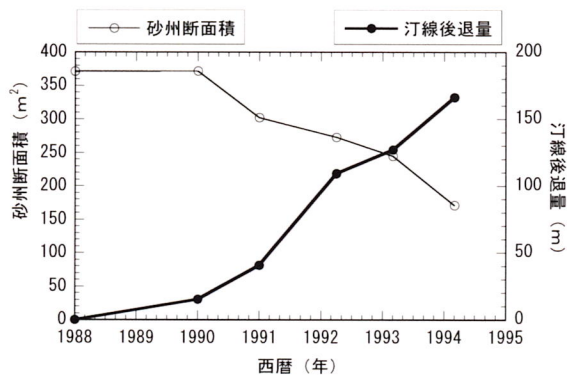


図-3 汀線後退量と砂州断面積の経時変化 (相模川)

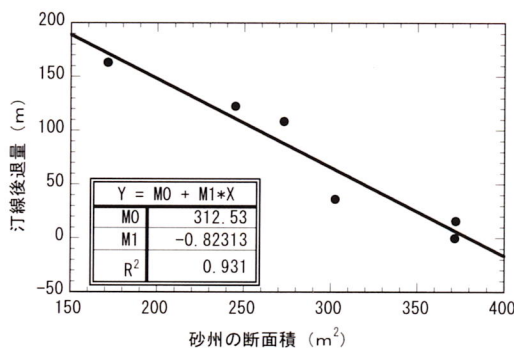


図-4 汀線後退量と断面積の関係 (相模川)

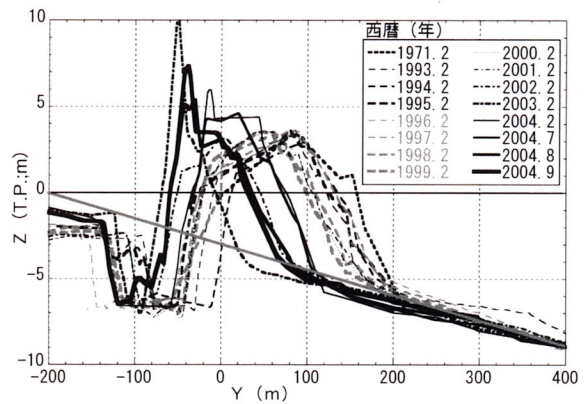


図-5 河口砂州の変形

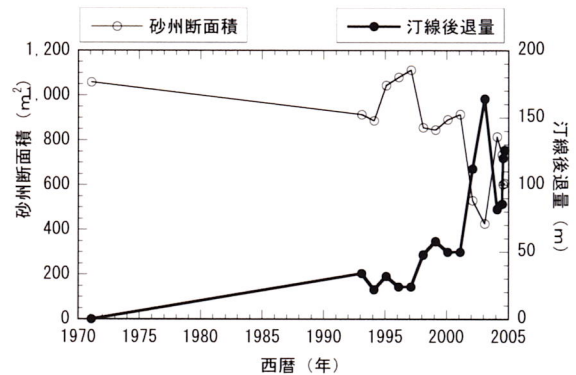


図-6 汀線後退量と砂州断面積の経時変化

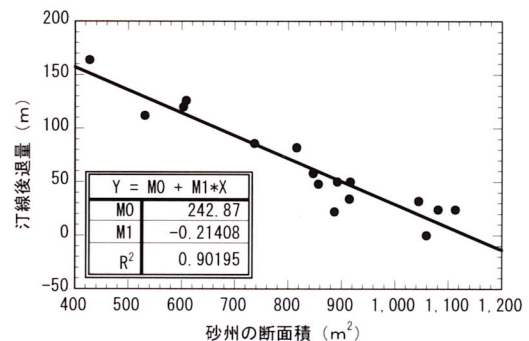


図-7 汀線後退量と断面積の関係

3. 砂州の変形パターンの模式化

(1) 定式化を行う上での課題

砂州の変形パターンを定式化する際にいくつかの検討すべき点が指摘される。

砂州は、周辺の地形に接触して変形しているため、砂州それ自体を河道や周辺の海浜と区別して定義することが困難である。また、砂州は洪水や高波浪時においてたびたび水没するため観測が困難である。

さらに、砂州には河川流と波による作用がそれぞれの強度で断続的に作用し、それに応じて砂州は3次元変形しており漂砂の主移動方向を定めにくい。土砂輸送についてもそのほとんどの作用期間中の土砂輸送量は小さく、洪水や高波浪時に集中的な輸送が起こる⁵⁾。このため平

均状態を定めにくい。

また、河口付近は河川・海岸のそれぞれの出口境界であることから、不安定な土砂が塊として存在する。その位置や形状が変化することで河川流や波浪の作用境界は移動、分離、重複する。このため境界条件を定めにくい。

(2) 砂州の定義

砂州は、基盤を形成している周辺の地形とは、外力に対する応答や構成材料の粒径が異なる。

そこで本研究では、図-8に示すように基盤面上に載る砂質の塊を河口砂州と定義する。

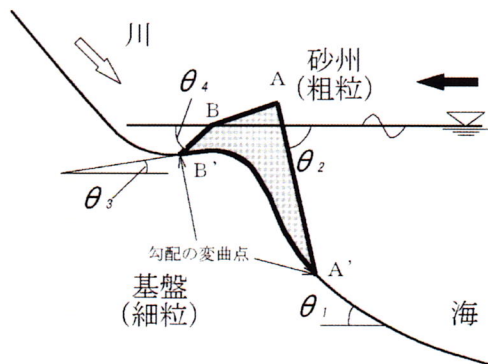


図-8 河口砂州の定義

(3) 営力および物質移動量の単純化

作用強度は初期条件で与え一定値とする。土砂移動量については平衡状態における地形変化量が極小化することを念頭に、平衡縦横断面形状からのずれに正比例するものとした。

(4) 矩形に単純化

平均化、境界条件の問題から、実際の砂州は図-8に示すように歪んだ三角形状であるが、本研究では図-9のように矩形に模式化する。また基盤を形成する河道や海浜断面についても、実際には屈曲しているが直線で近似する。

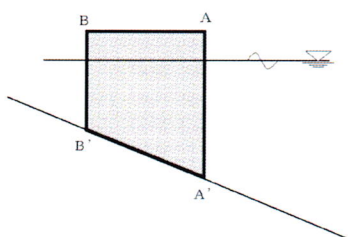


図-9 単純化した矩形砂州

(5) 短期変動の型

実際の短期変動では、例えば台風時に高波が来襲し、同時に降雨による増水で河川流が作用するなど相互作用がある。ここではそれらを区別し、図-10に示すように

短期変動における変形の型を整理した。

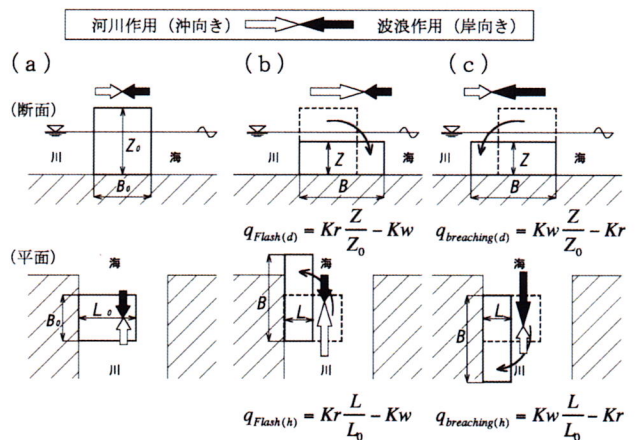


図-10 短期変動の型

図-10(a)は河川流と波浪の作用がバランスしている場合である。図-10(b)は、洪水による沖側への変形である。砂州は洪水流の作用を受けて沖向きに変形する。断面的にみると砂州の頂部が削られて砂州の沖側へ砂が落ち込み堆積する。平面的には砂州の先端部分が削られて河口沖へ流れ出る。一方、洪水後には図-10(c)のように河川流の作用が弱まり河道内に波が侵入する。断面的に見ると、この時海側から土砂が打ち上げられる。そして背後の水域に砂が落ち込んで堆積し、砂州が形成される。平面的に見ると沿岸漂砂により河道へと砂が運ばれて開口部に落ち込み河口幅が狭まる。洪水で変形した河口砂州は、このような過程のもとに一定の規模をもった砂州として復元し、安定化する。

(6) 長期的変化の型

・流量の変化

河川流量が減少すると河川流の作用が相対的に弱まる結果、砂州の安定位置は岸側へ移動する。反対に流量が増加すると砂州位置は沖へ移動する。

・砂州本体の土砂量

砂州を形成する土砂量が減少すると安定砂州の位置は岸側へ移動、増加すると沖へ移動する。

・基盤の変化

砂州の基盤を形成する河道や海浜の地盤高が低下すると相対的に波の作用が強まる結果、安定砂州の位置は岸側へ移動、地盤高が上昇すると沖へ移動する。

4. 予測モデルの構築

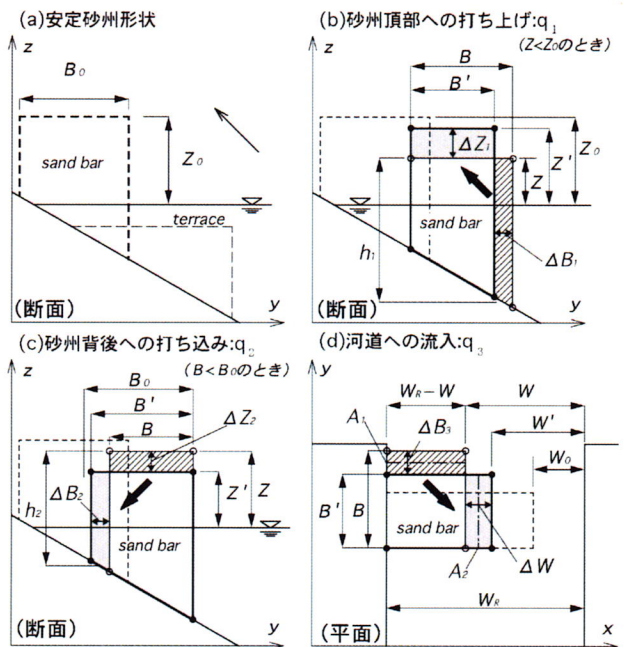
上述の議論より洪水後の砂州の復元について変形モデルを構築する。河口砂州の形状が平衡状態から変位した場合、その変位量に応じて復元力が働くという考え方のもとに、河口砂州が洪水流によってフラッシュされた後の、波の作用による河口砂州の復元モデルを構築する。復元に向うプロセスでは、河川流と波浪の作用は balan

スしているものとし、図-10の模式図における漂砂量係数は、 $K_r=K_w=1$ と考える。このモデルでは、緩勾配斜面上の短期的な復元と同時に、長期的な土量変化を考慮した河口砂州の形成位置の変化を予測可能とする。

(1) 断面変化モデル

洪水後の砂州復元時の縦断形変化を図-11(a)のとおりに模式化する。砂州は矩形とし、安定砂州の水面から測った天端高を Z_0 、天端幅を B_0 とする。いま任意形状の砂州を考え、同時に土砂量の保存式が成立するとする。そして砂州の形状が図-11(a)で与えられる安定形状とわずかにずれているとする。このとき安定形状を有する河口砂州とのずれを修復しようとする復元力が働くと考え。

まず図-11(b)のように砂州高 Z が低いと砂州の沖側斜面が削られ、そこから削り取られた土砂が砂州の頂部へと打ち上げられる。このとき単位時間当たりの打ち上げ漂砂量 q_1 は、砂州高 Z のずれに比例し式(1)で表される。



$$q_1 = K_1 \left(1 - \frac{Z}{Z_0}\right) \dots (1) \quad q_2 = K_2 \left(1 - \frac{B}{B_0}\right) \dots (2) \quad q_3 = K_3 \left(1 - \frac{W}{W_0}\right) \dots (3)$$

$$Z' = Z + \Delta Z \dots (4) \quad \Delta Z = \Delta Z_1 + \Delta Z_2 = \frac{q_1 \Delta t}{B_1} + \frac{q_2 \Delta t}{B_2} \dots (5)$$

$$B' = B + \Delta B \dots (6) \quad \Delta B = \Delta B_1 + \Delta B_2 + \Delta B_3 = \frac{q_1 \Delta t}{h_1} + \frac{q_2 \Delta t}{h_2} + \frac{q_3 \Delta t}{A_1} \dots (7)$$

$$W' = W + \Delta W \dots (8) \quad \Delta W = \frac{q_3 \Delta t}{A_2} \dots (9)$$

図-11 洪水後の砂州復元の模式図

$$q_1 = K_1 \left(1 - \frac{Z}{Z_0}\right) \quad (1)$$

ここに K_1 は係数である。同様に図-11(c)のように砂州幅 B が狭いと砂州の頂部が削り取られ、削り取られた砂礫は砂州の裏側へと落ち込む。この場合の単位時間当たりの打ち込み漂砂量 q_2 は、砂州幅 B のずれに比例し式(2)で表される。

$$q_2 = K_2 \left(1 - \frac{B}{B_0}\right) \quad (2)$$

ここに K_2 は係数である。図-11(a)～(c)において、砂州高 Z 、砂州幅 B 、砂州前縁位置 Y の Δt 後の値 Z' 、 B' 、 Y' は、土砂収支より次式で与えられる。

$$Z' = Z + \Delta Z \quad (3)$$

$$\Delta Z = 1/B (q_1 - q_2) \Delta t \quad (4)$$

$$B' = B + \Delta B \quad (5)$$

$$\Delta B = \Delta B_1 + \Delta B_2 = -q_1 \Delta t / h_1 + q_2 \Delta t / h_2 \quad (6)$$

$$Y' = Y + \Delta Y \quad (7)$$

$$\Delta Y = \Delta B_1 = -q_1 \Delta t / h_1 \quad (8)$$

最終的に両者のずれがなくなり前面海域からの土砂打ち上げもなく、天端から裏側への土砂の落ち込みもない平衡状態に至って縦断形は安定となる。

(2) 平面変化モデル

図-1の河口砂州の平面形を図-11(d)のように模式化した。砂州の安定的な開口幅 W を安定開口幅 W_0 とする。図-11(a)と同様に考え、図-11(d)で与えられた砂州の開口幅 W が安定的な開口幅 W_0 とわずかにずれているとする。このときそのずれを修復しようとする復元力が働くと考え。図-11(d)のように安定開口幅 W_0 に対して開口幅 W が広いと沿岸漂砂によって運ばれた土砂が砂州先端部に流入する。一方、安定開口幅 W_0 に対して開口幅 W が狭いと河川流によって砂州の先端が削られ、削られた土砂は砂州の前面海域へと流出する。このとき単位時間当たりの砂州先端からの流出漂砂量 q_3 は、開口幅 W のずれに比例し式(9)のように表される。

$$q_3 = K_3 \left(1 - \frac{W}{W_0}\right) \quad (9)$$

ここに K_3 は係数である。いま、図-11(d)において開口幅 W 、砂州幅 B 、砂州先端位置 X の Δt 時間後の W' 、 B' 、 X' を求める式は、土砂収支より次式で与えられる。

$$W' = W + \Delta W \quad (10)$$

$$\Delta W = q_3 \Delta t / B \quad (11)$$

$$B' = B + \Delta B_3 \quad (12)$$

$$\Delta B_3 = q_3 \Delta t / (W_R - W) \quad (13)$$

$$X' = X + \Delta X \quad (14)$$

$$\Delta X = -q_3 \Delta t / B \quad (15)$$

ここに W_R は川幅である。最終的に開口幅が W_0 に一致し、平衡状態に至って平面形は安定となる。

(3) 砂州の3次元変化モデル

前述の砂州の断面変化と平面変化モデルを組み合わせる。使用する漂砂量式は以下のとおりである。

$$q_1 = K_1 (1 - Z/Z_0) \quad (16)$$

$$q_2 = K_2 (1 - B/B_0) \quad (17)$$

$$q_3 = K_3 (1 - W/W_0) \quad (18)$$

ここに K_1 K_2 K_3 は係数である。いま、図-11(c)～(d)において、砂州高 Z 、砂州幅 B 、砂州前縁位置 Y 、開口幅 W 、砂州先端位置 X の Δt 時間後の Z' 、 B' 、 Y' 、 W' 、 X' を求める式は、土砂収支より次式で与えられる。

$$Z' = Z + \Delta Z \quad (19)$$

$$\Delta Z = \Delta Z_1 + \Delta Z_2 = q_1 \Delta t_1 / B_1 + q_2 \Delta t_2 / B_2 \quad (20)$$

$$B' = B + \Delta B \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \Delta B &= \Delta B_1 + \Delta B_2 + \Delta B_3 \\ &= q_1 \Delta t_1 / h_1 + q_2 \Delta t_2 / h_2 + q_3 \Delta t_3 / A_1 \end{aligned} \quad (22)$$

$$Y' = Y + \Delta Y \quad (23)$$

$$\Delta Y = \Delta B_1 = -q_1 \Delta t / h_1 + q_3 \Delta t / (W_R - W) \quad (24)$$

$$W' = W + \Delta W \quad (25)$$

$$\Delta W = q_3 \Delta t_3 / A_2 \quad (26)$$

$$X' = X + \Delta W \quad (27)$$

ここに A_1 ：砂州縦断面積、 A_2 ：砂州横断面積であり、 Δt 時間後の q_1 、 q_2 、 q_3 の処理はそれぞれ Δt_1 、 Δt_2 、 Δt_3 時間後について行う。（ $\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3$ ）

以上のような平衡状態からのずれに応じた復元力が働くという考え方は、等深線変化モデル^{(6),(7),(8)}や、バリア島のBreachingを扱ったKrausらのモデル⁽⁹⁾にも用いられている。本研究で構築したモデルでは、河口砂州の高さ、幅、開口幅の3要素に注目することで河川流・波浪の両作用を考慮して河口砂州の3次元変化の計算が可能となった。

5. 検証計算

上述で構築したモデルで検証計算を行う。

(1) 計算条件

表-1に計算条件を示す。

表-1 計算条件

目 的	洪水後の砂州の復元位置の把握
計算ケース	Case 1 2次元変形（基本） Case 2 2次元変形（養浜） Case 3 2次元変形（浚渫） Case 4 3次元変形
安定バーム高	$Z_0 = 4\text{m}$
安定砂州幅	$B_0 = 200\text{m}$
安定開口幅	$W_0 = 200\text{m}$
漂砂量係数	$K_1 \cdot \Delta t_1 = 250$ 、 $K_2 \cdot \Delta t_2 = 250$ 、 $K_3 \cdot \Delta t_3 = 100000$
タイムステップ	80steps（収束まで）

(2) 計算結果

図-12に計算結果を示す。洪水時に-1m以下にあった土砂は岸向きに移動し、水面上に現れて最終的な安定形状に至る図-12(a)。土砂量が十分な場合、砂州高は同一であるが復元された砂州幅が大きく広がる図-12(b)。一方、浚渫などにより当該区域から土砂が搬出された場合、復元に利用可能な土砂量が減少するので、砂州はその形成位置が陸側にずれる図-12(c)。この結果は相模川河口で起きた砂州の河道内への侵入プロセス（図-2）を再現している。一連の計算によれば、砂州は洪水時にフラッシュされるが、河口砂州の土砂を取り除くなどの行為を行わない限り砂州は同じ場所に復元することが分かる。

図-13は河口砂州が越流によって流出した場合の3次元計算の結果である。流出した砂が3次元河口砂州として復元され、川幅を狭めていく過程が計算できる。

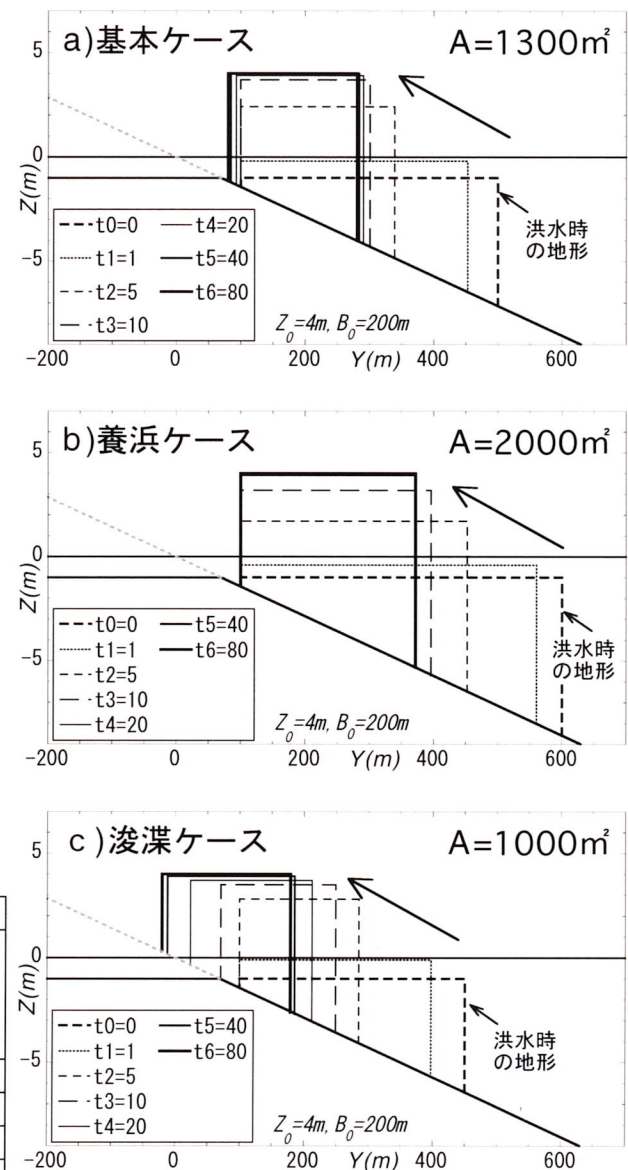


図-12 計算例（2次元）

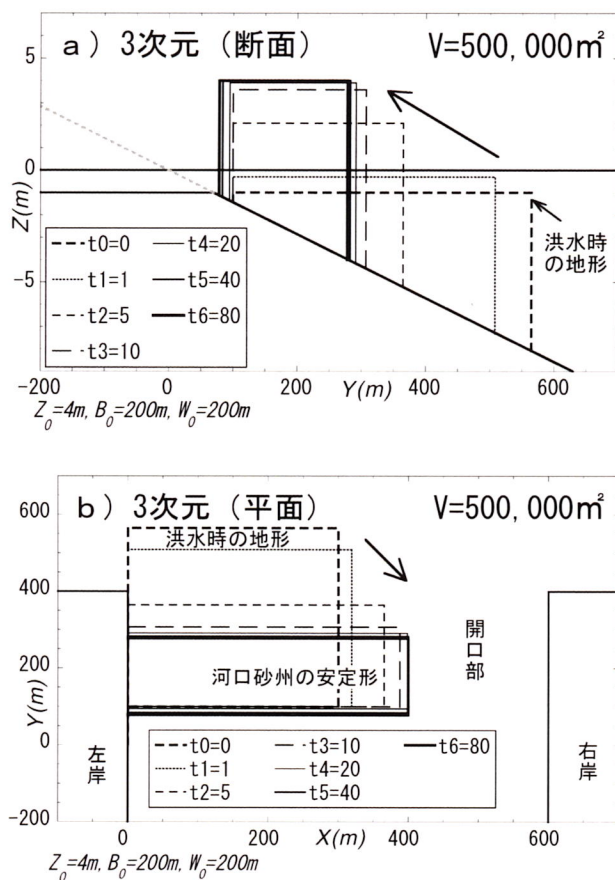


図-13 計算例 (3次元)

6. 結論

河床や海浜断面は断続的に生じる様々な強度の外力作用の蓄積で形成される。この非定常問題は、長期間の平均状態を考えて定常問題に置き換え求めることが多い。ところが砂州は、実態そのものが河川流や波浪の作用境界の現在状態を示すものであるがゆえに、周辺地形と同時に取り扱おうと現象の本質を損なう。砂州は、基盤を形成している周辺の地形と比較してその性状や変動周期が異なる。粒径は粗く、また変形の頻度が高く、同じ時間尺度では安定を保っていない。したがって本研究では、砂州と基底面を分離して考えることで、砂州の変形特性を再構築した。また基盤面上の砂州土量とその岸沖位置の決定に関係していることを裏づけるデータを明らかにした。これにより河川流・波浪の作用力がバランスすれ

ば速やかに復元する砂州3次元モデルを開発できた。また上流から土砂が供給された時や養浜など河口の土砂が増加した場合、海岸侵食や土砂採取で土砂量が減少した場合の、河口砂州の形成位置の変化が予測できた。今後の課題は、洪水時や高波浪時など作用力がバランスしていない場合のモデル構築、バリアーの形成・変形予測への応用や水位上昇が砂州変形に及ぼす影響、砂州前縁や後縁の法勾配を表現することである。

参考文献

- 1) 海野修司・宇多高明・佐藤 勝・清田雄司・三波俊郎・前川隆海：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. 481-486，2005.
- 2) 宇多高明・木村一雄・寺田好孝・小倉和範・見附敬三：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. 581-585，1997.
- 3) 宇多高明・高橋 晃・松田英明：相模川河口沖テラスの地形的特徴とその変形過程：海岸工学論文集，第41巻，pp. 441-445，1994.
- 4) 宇多高明・高橋 晃・松田英明：河口地形特性と河口処理の全国実態，土木研究所資料，第3281号，p. 123，1994.
- 5) 水谷武司：物理地形学概説，大明堂，p. 206，1999.
- 6) 芹沢真澄・宇多高明・三波俊郎・古池 鋼・熊田貴之：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. 496-500，2002.
- 7) 宇多高明・芹沢真澄・高橋 功：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. 541-545，2004.
- 8) 宇多高明・芹沢真澄・古池 鋼・三波俊郎：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，海岸工学論文集，第51巻，pp. 491-495，2004.
- 9) Kraus, N. C. and K. Hayashi: Numerical Morphologic Model of Barrier Island Breaching, Proc. 29th ICCE, pp. 2120-2132, 2004.