

# 閉じた漂砂系の中で離岸堤を設置する場合の 施工順序による地形変化の違い

宇多高明・芹沢真澄・宮原志帆

## 1. はじめに

筆者らは、全方向から等しい確率で風が吹く条件の下で、円形湖の一部を埋め立てると埋立地の対岸側の湖浜で侵食が起り、汀線が後退することを本誌（第58巻、第3号）<sup>1)</sup>で明らかにした。この場合の地形変化をもたらす外力は風が引き起こす波である。同様に、閉じた漂砂の系を持つ円形の湖内において離岸堤を設置した場合には、湖浜は完全に閉じた漂砂系を有するがゆえに、離岸堤の施工順序が地形変化に大きな影響を及ぼすと考えられる。同種の問題は、ポケットビーチ内の一端から離岸堤を設置した場合にも起こる。ここでは、前報<sup>1)</sup>と同様に円形湖を取り上げ、湖内に6基の離岸堤を施工順序を変えて配置した場合の地形変化の相違を前報<sup>1)</sup>と同じBGモデル(Bagnold概念に基づく3次元海浜変形予測モデル)を用いて計算し、施工順序による地形変化の違いについて検討した。

## 2. 計算の方法

計算には、円い湖の一部を埋め立てた場合に起こる湖浜の変形予測と同じ方式<sup>1)</sup>を用いた。表-1には計算式をまとめて示す。重複を避けるため簡単に記述すると、湖浜の任意地点における対岸までの風の吹き渡る距離（吹送距離）を  $F$ 、湖面上の風速を  $U$  とすると、風波の有義波高  $H_{1/3}$  は Wilson の与えた式(1)より計算できる。この式は、風の吹き渡る距離が大きいほど、また風速に比例して風波の波高が高まることを示している。このように発達した風波が汀線近くで砕けると、そのエネルギーにより砂移動が起こる。筆者らのBGモデルでは、このような漂砂の基本式として波の砕ける地点（砕波点）での波のエネルギーを用いた式(2)を用いている。数値計算では、フェッチ  $F$  と風速  $U$  を与えて  $H_{1/3}$  を求め、式(3)、(6)より  $P$  を計算し、式(2)より漂砂フラックスを求める。さ

らに式(8)の砂の連続式を解けば湖浜変形が求められる。 $\epsilon(Z)$ は漂砂量の水深方向分布であるが、ここでは式(5)のように一様分布で与えた。式(3)の  $P$  値は、砂移動が起こる範囲 ( $-h_c \sim h_R$  間)での単位面積・単位時間当たりの波のエネルギーの減衰率である。さらに有義波高  $H_{1/3}$  がほぼ砕波波高  $H_b$  に等しいとするならば、 $\gamma$  を砕波波高水深比として、砕波点でのエネルギーフラックス  $(EC_g)_b$  は式(6)、(7)のように表される。本研究では風速は一定とするが、風向は出現確率分布を与え、各計算ステップでの風向はその確率分布を満足するように乱数でひとつだけ定めた。地形変化計算を1ステップ行うごとに風向を乱数により再設定し、 $P$  値の分布を計算し直した。

表-1 計算式

$H_{1/3} = f(F, U) = 0.30 \left\{ 1 - \left[ 1 + 0.004 (gF/U^2)^{1/2} \right]^2 \right\} (U^2/g)$ (1)
$\bar{q} = C_0 \frac{K_s P}{\tan \beta_c} \left\{ \tan \beta_c \bar{e}_w -  \cos \alpha  \sqrt{\nabla Z} \right\} \quad (-h_c \leq Z \leq h_R)$ (2)
$P = \epsilon(Z) (EC_g)_b \tan \beta_w$ (3) $\tan \beta_w = dZ/dx_w \quad (\tan \beta_w \geq 0)$ (4)
$\epsilon(Z) = 1/(h_c + h_R) \quad (-h_c \leq Z \leq h_R)$ (5) $(EC_g)_b = C_1 (H_b)^5 = C_1 (H_{1/3})^5$ (6)
$C_1 = \frac{\rho g}{k_1} \sqrt{g/\gamma} \quad (k_1 = (4.004)^2, \gamma = 0.8)$ (7) $\partial Z/\partial t + \nabla \cdot \bar{q} = 0$ (8)

$F$ : フェッチ,  $U$ : 風速,  $g$ : 重力加速度,  $H_{1/3}$ : 有義波高,  $\bar{q} = (q_x, q_y)$ : 漂砂フラックス,  $Z(x, y, t)$ : 静水面基準での湖底面の高さ,  $\nabla Z = (\partial Z/\partial x, \partial Z/\partial y)$ : 海底勾配ベクトル,  $\bar{e}_w$ : 波向の単位ベクトル,  $\alpha$ : 波向と等深線直角方向とのなす角,  $x_w$ : 波の進行方向に沿った座標,  $\tan \beta_w$ : 波の進行方向に測った海底勾配,  $\tan \beta_c$ : 砂の平衡勾配,  $K_s$ : 沿岸・岸沖漂砂量係数,  $C_0$ : 漂砂量を重量表示から堆積表示にする際の係数,  $h_c$ : 波による地形変化の限界水深,  $h_R$ : バーム高,  $\epsilon(Z)$ : 漂砂量の水深方向分布 (式(5)), 式(3)の  $P$  値は、砂移動が起こる範囲 ( $-h_c \sim h_R$  間)での単位面積・単位時間当たりの波のエネルギーの減衰率, 式(8)は砂の連続式。

## 3. 計算条件

直径2km、水深3mの浅い円形湖を考え、その湖岸にバーム高1m、初期勾配1/20の湖浜が広がる条件を想定した。なお、この場合の波による地形変化の限界水深  $h_c$  も3mとする。この円形の湖内に堤長・離岸距離400mの離岸堤を6基配置する。風速は20m/s、風は0~360°方向から同一確率・同一強度で吹くとした。計算領域は  $\Delta x = \Delta y = 20m$  で分割し、 $\Delta t$ は10hrとし、砂の平衡勾配は1/20とした。なお、本研究で使用した風速値

Difference in Topographic Changes in Construction of Detached Breakwaters in a Closed System of Littoral Drift

20m/sは、円形湖の直径2kmをフェッチとしたとき0.66≒0.7mの有義波高が生じる風速値である。また漂砂量係数 $K_s$ は0.2とした。

計算は2ケース行った。ケース1では離岸堤を段階的に設置し、設置順序が最終地形に及ぼす影響を調べた。まず離岸堤1基を設置して $3 \times 10^4$  stepまで計算を行った。この計算によれば、最初に設置された離岸堤の両側で侵食が進むことから、初期に設置した離岸堤の両側に新たに2基の離岸堤を設置して同様に計算した。この場合もまた3基の離岸堤背後での著しい堆積の結果として、残水域の汀線付近では侵食が進む。よって残水域にも3基の離岸堤を設置し、全体で離岸堤を6基として最終的にトンボロが十分安定となる $10^5$  stepまでの計算を行った。ケース2は、離岸堤6基の同時設置条件であって、離岸堤を順番に設置したケース1との比較により離岸堤の設置順序の違いが湖浜変形に及ぼす影響を調べた。

#### 4. 計算結果

まず、ケース1の計算結果として、円形の湖の中に1基の離岸堤が設置されたとする(図-1(a))。この条件で0~360°の全方向から均一確率で風が吹くと、離岸堤Aの背後は静穏となるため離岸堤の両側から砂が集められて堆砂が急速に進み、 $3 \times 10^4$  step後にはAの背後にトンボロが形成された(図-1(b))。このときの地形変化量は図-1(c)のようである。離岸堤背後での集中的な堆砂に必要な土砂は、隣接域から多く運び込まれたが、湖浜は完全に閉じた漂砂系を有するために侵食域は全周に及んだ。離岸堤Aの設置により侵食が進んだ隣接域での侵食に対し、新たに隣接域に離岸堤が設置されることは現地海岸でしばしば観察される現象であり、それを模倣してAの両側に離岸堤B、Cを設置する(図-2(a))。この状態で再び風波が作用すると、A背後での堆砂が継続するだけでなくB、Cの背後でも堆砂が進み、 $3 \times 10^4$  step後には図-2(b)の地形に、また、初期からの地形変化量は図-2(c)となる。図-2(c)と図-1(c)を比較すると、離岸堤A背後では堆砂が十分進んだため地形変化量は小さくなったが、B、Cの背後では急速に堆砂が進み、トンボロが成長した。このため上半平面では侵食がいつそう進んだ。この状態を受けて、汀線が後退した上半平面の汀線を防護する

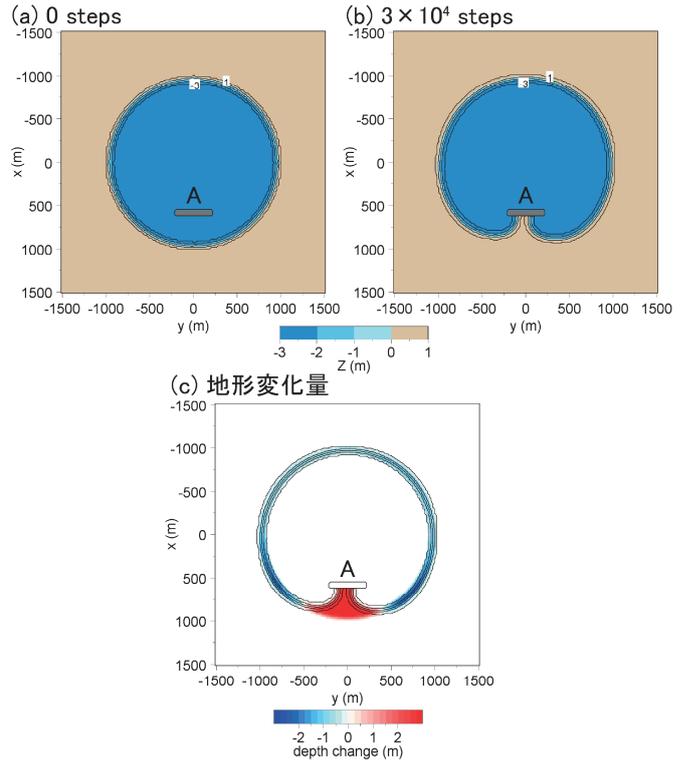


図-1 離岸堤A設置後の湖浜変形

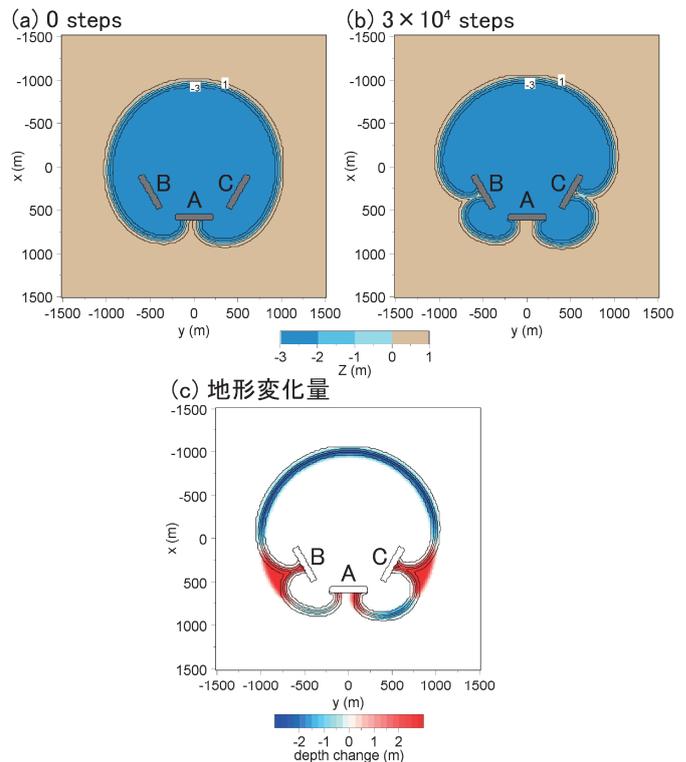


図-2 離岸堤A、B、C設置後の湖浜変形

ために、新たに3基の離岸堤(D,E,F)を設置した(図-3(a))。この状態で風波が作用すると、 $3 \times 10^4$  step後までにEの背後ではトンボロが発達したが、離岸堤D、Fではトンボロの形成に必要な砂の量が足りないため、小規模な舌状砂州が形

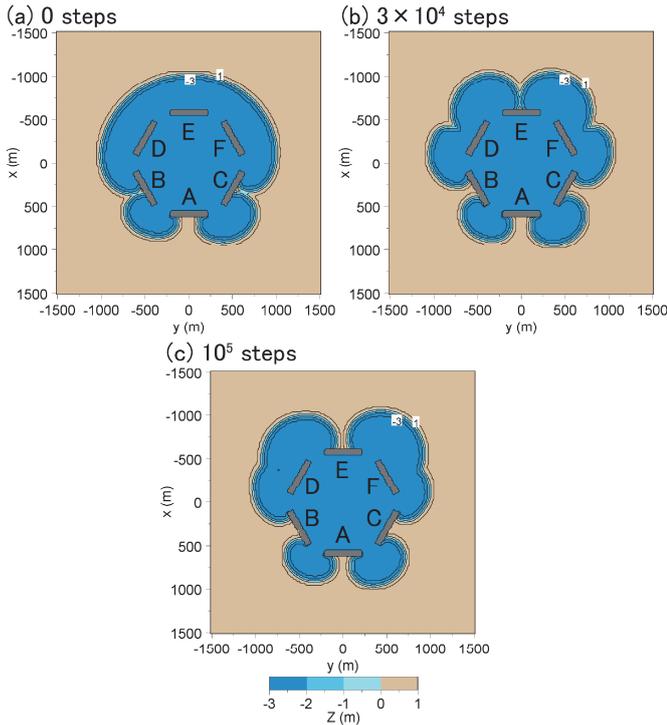


図-3 離岸堤A~F設置後の湖浜変形

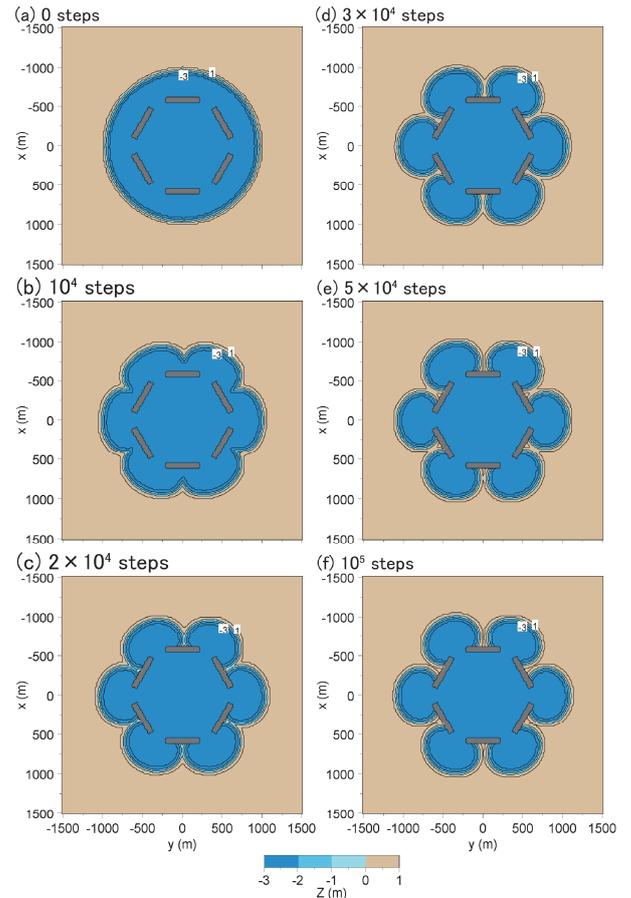


図-5 離岸堤同時設置後の湖浜変形

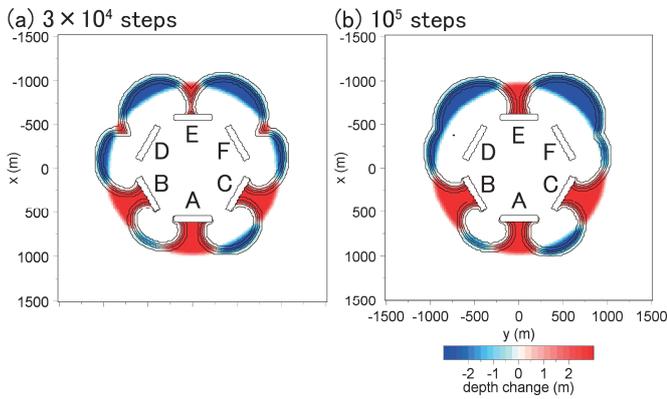


図-4 初期からの地形変化量（段階施工）

成されたのみであった（図-3(b)）。その後  $10^5$  stepでは、離岸堤D、F背後ではいったんは成長した舌状砂州が削られる一方、両者間に設置された離岸堤Eの背後では、トンボロが大きく発達した（図-3(c)）。初期地形からの地形変化量の分布（図-4）によれば、時間経過とともにD、F背後の舌状砂州が縮小し、逆にEではトンボロが大きく発達したことが見てとれる。これに合せてEの両側では顕著な侵食が起きた。また、初期に設置された離岸堤A、B、C背後の堆砂量と比べ、D、Fの背後では堆砂がほとんど起こらず、設置順序の違いが顕著に現れている。

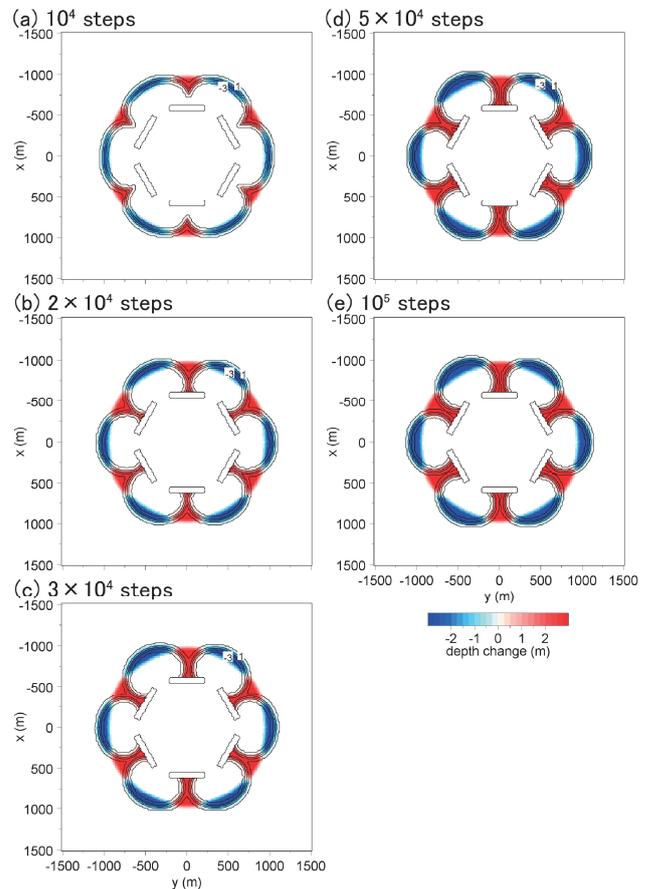


図-6 初期からの地形変化量（同時施工）

同様にして、6基の離岸堤を同時に設置したケース2の10<sup>5</sup> step後までの地形変化予測の結果を図-5に示す。10<sup>5</sup> step後までに離岸堤背後では著しい堆積が進み、いずれの離岸堤の背後でも対称形のトンボロが発達した。これに必要とされる砂は離岸堤の開口部から均等に運び込まれたため、いずれの開口部でも同一形状の湾入汀線が形成された(図-6参照)。

## 5. まとめ

閉じた漂砂系の中での地形変化についての理解を促すために、全方向から均等確率で風が吹く条件の下、円形で安定している湖において複数の離岸堤が造られた場合の地形変化をBGモデルを用いて予測し、設置順序の違いが最終湖浜形状に及ぼす影響を調べた。離岸堤が設置されると隣接湖浜が侵食され、その侵食域を防護するために離岸堤がさらに設置されると再び同様な現象が繰り返され、究極的には円形湖の全周を離岸堤で防護しなければならない状態に至る。その際、最初に離岸堤が設置された場所ではトンボロ(舌状砂州)の形成に十分な量の砂が集積できるのに対し、時間遅れを持って設置された離岸堤では、トンボロ形成に使える砂の量が少なくなるため、離岸堤の建設当初ほど舌状砂州の発達が著しく、6基設置後には非対称な汀線が形成された。円形の湖に離岸堤が設置された場合、湖内で発達する風波により湖浜変形が起こるのに対し、外海に面したポケットビーチなどでは外海からの入射波が海浜変形の外力となる点に違いがあるものの、完全に閉じた漂砂系において離岸堤を段階施工する場合、同時施工する場合で最終湖浜形状に大きな相違が残されることが明らかである。

わが国では、ポケットビーチの一端から離岸堤

が設置されたために離岸堤未設置区域が侵食された例は数多い。例えば、島根県の江の川河口に隣接する長さ約4kmのポケットビーチである江津海岸では、河口西側区域において離岸堤が北～南へと順に設置されたが、設置時期の早い北部の離岸堤背後で舌状砂州の規模が大きく、南西側に離れると舌状砂州の規模が減少した上、離岸堤未設置区間では著しい侵食が生じた<sup>2)</sup>。また、茨城県北部にあって高戸岬と鷲の岬に挟まれた長さ約6kmのポケットビーチである有明・高浜海岸では、北端部から9基の離岸堤が設置された結果、南部海浜では砂が運び去られ著しい侵食が生じた<sup>2)</sup>。離岸堤背後での舌状砂州、またはトンボロの形成に要する砂が周辺から十分供給されうる当初段階ほどトンボロの発達は進むので、施工順序が早い離岸堤ほどトンボロの発達がよく、同時に中間段階で既設離岸堤の隣となる離岸堤では、先行的に施工された離岸堤の堆砂効果の反動として侵食が強く現れるので、離岸堤を造っても著しい堆砂効果は認められない。これらと対照的に、多数の離岸堤が同時施工された場合には、いずれの離岸堤の背後でも均一に堆砂が進む。このように閉じた漂砂系にあっては離岸堤などの消波構造物の施工順序が最終形状に大きな影響を及ぼす。なお、消波構造物の設置と湖浜全体の砂量の増加とは無関係であることから、湖浜の自然環境を損ねることなしに湖浜を広げるには養浜を行うことが必要である。

## 参考文献

- 1) 宇多高明、芹沢真澄、宮原志帆：円い湖の一部を埋め立てた場合に起こる湖浜の変形予測、土木技術資料、第58巻、第3号、pp.48～51、2016
- 2) 宇多高明：「海岸侵食の実態と解決策」、山海堂、p.304、2004

宇多高明



(一財) 土木研究センター  
なぎさ総合研究所長、工博  
Dr. Takaaki UDA

芹沢真澄



海岸研究室(有)、博(工)  
Dr. Masumi SERIZAWA

宮原志帆



海岸研究室(有)  
Shiho MIYAHARA