

# 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

宇多高明・芹沢真澄・宮原志帆

## 1. はじめに

筆者らの一人(宇多)は、ここ何回か誌上を借りて諸外国の海岸状況を明らかにしてきた<sup>1),2)</sup>。この種の研究は現在も続けており、2015年10月12~15日には台湾の高雄海岸と台南海岸の調査を行い、また10月23~28日にはベトナム南部 Van Phong Bay内のBip島の現地踏査を行うとともに、台湾やベトナムでは行政や大学研究者と今後の海岸保全について広範な議論を行った。本誌ではそのような試みのいくつかを紹介してきたが、それらによれば筆者らの研究手法が現地踏査に偏っているかのように見える。しかし実際には、筆者らが開発した等深線変化モデルや、それを発展させたBGモデル(Bagnold概念に基づく3次元海浜変形予測モデル)を数多くの現場の問題に適用し、それらの適用を通じて漂砂現象の理解を進めてきた。今回は、仮想的な設定ではあるが円い湖の一部で埋め立てが行われた場合の湖浜変形予測へのBGモデルの応用例<sup>3)</sup>について述べる。本研究での仮定の下で進められた計算の結果が、実際の湖で観察されうるかどうかについての確認は残されているが、風波が湖浜に作用した場合の地形変化についての基本的現象を理解する上では役立つと考えられることから、以下に計算例を示す。

## 2. 湖浜変形の計算モデル

湖は自由表面を持った閉じた水域であり、この水域で風が吹けば風波が発生する。風波は、対岸まで風の吹き渡る距離が長ければ長いほど、また風速が大きいほど波高が高まる。風は湖に対してあらゆる方向から吹くことが可能であるが、風波が湖浜汀線に対して直角方向から作用する条件では砂は単に岸沖方向の移動を繰り返すのみであり、湖浜のある場所が削られ、別の場所に砂が堆積するという地形変化は起こらない。しかし波が斜め入射すると、それによって沿岸方向に砂が運ばれ、

これによって湖浜変形が起こる。ここでその形が円形で与えられる湖に風が作用する場合を考えると、風が湖周辺のあらゆる方向から等しい確率で吹く条件では、湖岸の任意地点での沿岸漂砂は互いに打ち消され、ネットの漂砂は0となって湖は円形の姿を保つ。しかし人為改変により湖の一部が埋め立てられ、風の吹き渡る距離が短くなると今まで安定していた湖浜に変化が起こり得る。ここではこのような仮想的条件を設定して湖浜変形の予測を行った。表-1には本報で用いた計算式をまとめて示す。

まず、湖浜の任意地点における対岸まで風の吹き渡る距離(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。式(1)はいくらか複雑な形状を有しているが、要するに風波の波高は風の吹き渡る距離が大きいほど、また風速に比例して高まる。このように発達した風波が湖浜の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 $U$ を与えて式(1)より $H_{1/3}$ 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

表-1 計算式一覧

$H_{1/3} = f(F, U) = 0.30 \left\{ 1 - \left[ 1 + 0.004 (gF/U^2)^{1/2} \right]^2 \right\} (U^2/g)$	(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)
$P = \varepsilon(Z) (EC)_b \tan \beta_w$	(3) $\tan \beta_w = dZ/dx_w \quad (\tan \beta_w \geq 0)$ (4)
$\varepsilon(Z) = 1/(h_c + h_R) \quad (-h_c \leq Z \leq h_R)$	(5) $(EC)_b = C_1 (H_b)^5 \approx C_1 (H_{1/3})^5$ (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,  $h_R$ : パーム高,  $\varepsilon(Z)$ : 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 $(-h_c \sim h_R)$ 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。

連続式を解けば湖浜変形が求められる。なお、式(1)の $\vec{q} = (q_x, q_y)$ は平面直交座標 $(x, y)$ 方向の漂砂量で、 $Z(x, y, t)$ は静水面を基準とした湖底面の高さであって、これが計算で求めるべき変数である。 $\vec{\nabla}Z = (\partial Z/\partial x, \partial Z/\partial y)$ は海底勾配をベクトル表示したもの、 $\vec{e}_w$ は波向の単位ベクトル、 $\alpha$ は波向と等深線直角方向とのなす角、 $x_w$ は波の進行方向に沿った座標、 $\tan\beta_w$ は波の進行方向に測った海底勾配、 $\tan\beta_c$ は砂の粒径に比例して定まる平衡勾配で、砂の粒径が大きいほど大きな値をとる（一般には礫浜では1/3、細砂からなる浜では1/30程度と緩くなる）。 $K_s$ は沿岸・岸沖漂砂量の係数。 $C_0$ は漂砂量を重量表示から堆積表示にする際の係数、 $h_c$ は波による地形変化の限界水深、 $h_R$ はバーム高である。さらに $\varepsilon(Z)$ 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る。式(3)の $P$ 値は、砂移動が起こる範囲 $(-h_c \sim h_R)$ 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 $H_{1/3}$ がほぼ碎波波高 $H_b$ に等しいとするならば、 $\gamma$ を碎波波高水深比として碎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。

### 3. 計算条件と結果

図-1に示すように半径1kmの円形の湖を考え、この湖の一部が $y = -500$  mに沿って埋め立てられたとする。湖は固定床で与えられ、その水深が3mと浅く、そこに $h_R$ が1mで1/20の一様勾配の湖浜があったと仮定する。また、 $h_c$ は3m、 $K_s$ は0.2とおく。湖を吹き渡る風の風速は20m/s、風は湖に対して $0 \sim 360^\circ$ の全方向から同じ強度で吹くと仮定する。実際にはこのような強風が吹き続けることはあり得ないが、長期間の風波の累積的作用を考え、それを短時間での強風的作用に置き換える。各ステップの風向は乱数によりランダムに定める。計算領域は $\Delta x = \Delta y = 20$  mで分割し、 $\Delta t$ は10時間として計算を行い、また砂の平衡勾配は1/20とする。

図-1に示すように、円い湖の一部が埋め立てられ、直線状の護岸が伸ばされたとする。この条件で湖の周辺の $0 \sim 360^\circ$ のあらゆる方向から同一強度の風が吹くとする。この場合円い湖は完全に安定であって、図-2に模式的に示すように、汀線へ

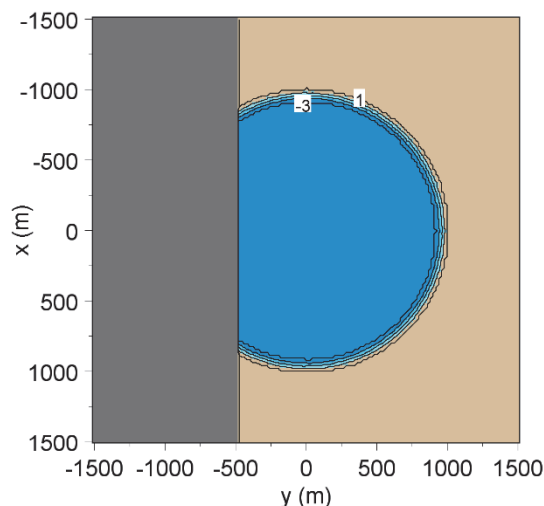


図-1 半径1 kmの円い湖の一部での埋め立て

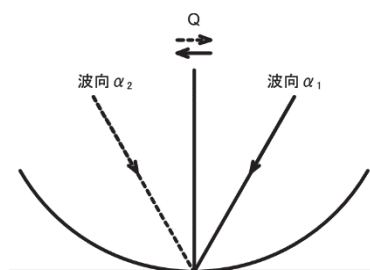


図-2 湖岸線に対して風波が斜め入射する場合の沿岸漂砂の方向

の法線方向に関し、右回りの角度 $\alpha_1$ から波が入射すれば左向き沿岸漂砂が、左回りの角度 $\alpha_2$ から入射すれば右向き沿岸漂砂が発達するが、風波の強さが同じ場合両者の作用は完全に打ち消され、砂は一時的には移動するが、平均的には湖浜は変化が起こらず元の姿を保つ。しかし湖の一部で埋め立てが行われると、湖岸のある場所への風波の強度が変わり、上記の漂砂バランスが崩れ湖浜変形が起こる。

図-1の初期地形で与えられる湖に風波が作用すると、図-3のように丸みを帯びた姿へと変形していく。湖浜と埋め立て地護岸との接点間の長さは、当初(0step) 1760mであったが、 $1 \times 10^4$  step後には護岸の両端部が徐々に砂で埋まり、この距離が1640mまで縮まった。地形変化はその後続き、 $5 \times 10^4$  step後には護岸の両端部間の距離は1400mに、さらに $10^5$  step後には1240mにまで狭まった。湖の一部に埋め立て護岸が造られると、直感的には護岸と湖浜との端部付近が侵食されると一般には想像されることが多いが、結果は逆で、埋め立て地の対岸が削られて護岸の露出長さが

土研センター

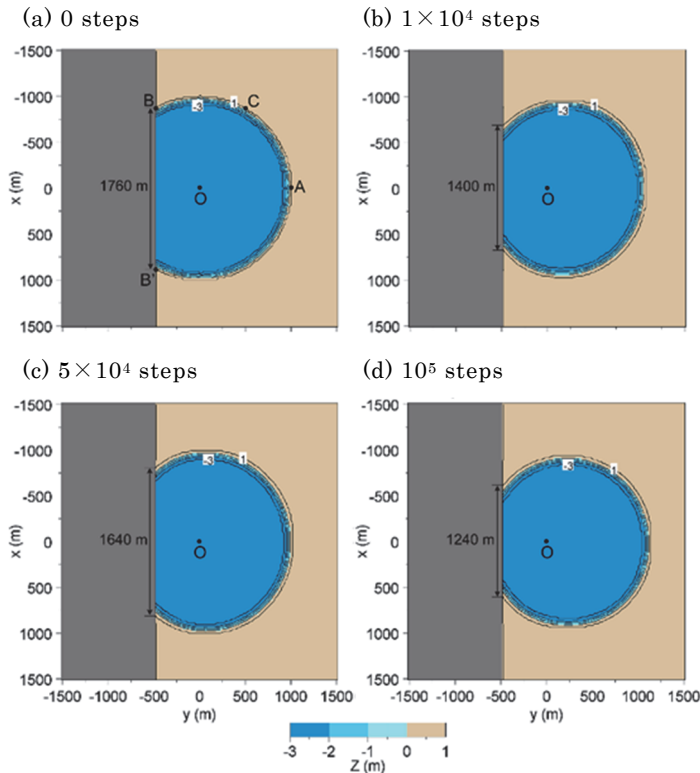


図-3 半径1 kmの円い湖の一部が埋め立てられた場合の湖浜変形

短くなるという結果となった。図-4には初期から $10^5$  step後までの地形変化量の総和を求めた結果を示す。侵食を青で、堆積を赤色で表示している。埋め立て地対岸の湖浜が大きく削り取られ、そこから削り取られた砂が全体として埋め立て地のほうへと引き寄せられるという結果となった。

4. 湖浜変形の機構

上述の湖浜変形の機構について、図-5の模式図を用いて考えてみる。いま、円弧AB上に任意点Cを定め、Cから埋め立て前の湖心Oを通る直線が対岸を切る点をC'とする。ここで、距離CC'をフェッチF1とする。次に、C点で湖浜汀線に接線を引くとともに、方向角を均等間隔で配置した各方向別のフェッチを図のように定める。図-5の番号2~9はC-C'の右半平面上に、番号2'~9'は左半平面上の地点である。いま、Cから放射状に伸びたフェッチF2~F9の方向から風が吹くと、そのとき発生する風波はC点での湖岸線に立てた法線の方に対して左側から入射するため、湖岸線に沿って反時計(左)回りの沿岸漂砂を発生させる。これに対しフェッチF2'~F9'方向から風が吹くと、点Cでは時計回り(右)向きの沿岸

漂砂が発生する。点Cの沿岸漂砂は、右回りと左回りの沿岸漂砂の和で与えられるが、フェッチF1からの波は、点Cの汀線に直角方向から入射するため沿岸漂砂は0である。F2、F2'からの波による漂砂の和は、その対称性により同じく0となる。一方、図-5によれば $F3' < F3$ 、 $F4' < F4$ 、・・・、 $F9' < F9$ が成立することから、フェッチF2'~F9'からの風波による漂砂成分の和はF2~F9による漂砂成分の和より必ず小さくなる。結果として、点Cでの漂砂の総和は反時計回りの漂砂(埋め立て地護岸へ向かう漂砂)が時計回りの漂砂(埋め立て地護岸から遠ざかる方向の漂砂)よりも大きくなり、点C付近では平均的に埋め立て地対岸の湖浜は削り取られ、埋め立て地側へと砂が運ばれるような地形変化が起こる。大局的には、点Cに立ってC'方向(汀線直角方向)を望みつつ、CC'の左側と右側の水域の広さを比べた時に、水域の広い方からの波作用が強く、その作用による漂砂が大きくなる。

ここで上記の地形変化を引き起こす漂砂の理解を促進するために、0から1000 stepまでの各stepの計算結果より、漂砂を引き起こす波のエネルギーフラックス $(H_{1/3})^{5/2}$ 、すなわち風波の波高の $5/2$ 乗を算出し、それが作用している方向とともに求め、0~1000 stepでの全平均値を求めて表示したのが図-6(a)である。計算結果はカラーで示しており、青(赤)系は波浪のエネルギーフラックスが小さい(大きい)ことを示している。湖心ではエネルギーフラックスが小さいが、湖岸付近ではエネルギーフラックスが高まっている。図に示す矢印は風波が平均的に作用している方向を示

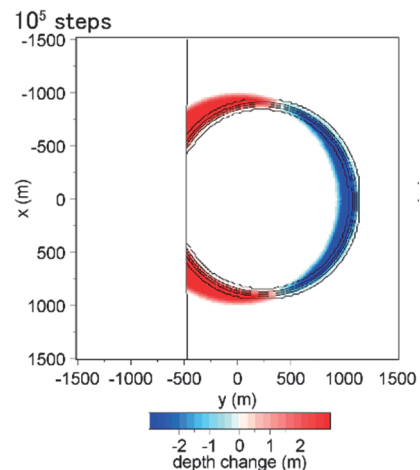


図-4 初期からの総地形変化

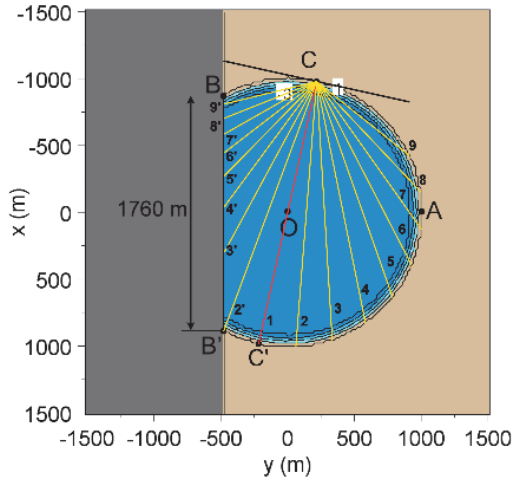


図-5 湖浜変形機構の説明図

砂量が増大するという分布となった。埋め立て地との接点では沿岸漂砂がなくなるという境界条件下で、このような漂砂量分布となったがゆえに図-4に示した地形変化が生じたことが分かる。

### 5. まとめ

本報では、筆者らが最近多く用いているBGモデルを風波の作用を受ける円形の湖の変形予測に適用した結果について述べた。計算結果は現実の湖で検証されていないが、閉じた水域に風波が作用する条件で、湖の一部が埋め立てられて風域が狭まると、直感とは異なる湖浜変形が起こり得ることが明らかになったと思われる。なおここで結果の一例を示したBGモデルは、湖の変形予測にとどまらず、防波堤、離岸堤、突堤などが設置された場合の海浜変形予測はもちろん、砂嘴、陸繋砂州、サンゴ洲島の変形など、複雑な汀線変化が起こる種々の地形変化予測にも適用可能であり、高い実用性を有していることを付記しておく。

### 参考文献

- 1) 宇多高明、伊達文美：フィリピン中部にあるBoracay島のWhite Beachの侵食状況調査、土木技術資料、第57巻、第4号、pp.54～57、2015
- 2) 宇多高明、守安邦弘：発展途上国での海岸管理上の問題～ジャワ島西端のAnyer海岸の例～、土木技術資料、第57巻、第9号、pp.56～59、2015
- 3) Serizawa, M., Uda, T. and Miyahara, S. 2015. Effects of construction of offshore breakwaters on segmentation of a slender water body, 8<sup>th</sup> Int. Conf. on Asian and Pacific Coasts (APAC 2015), Procedia Eng., Vol. 116, pp. 502-509.

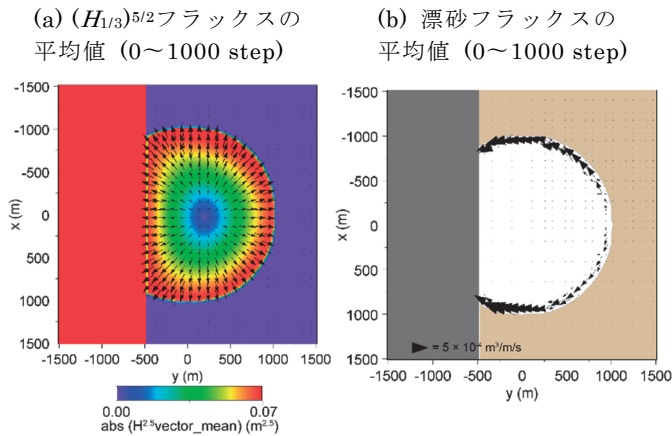


図-6 0～1000stepでの波のエネルギーフラックスと漂砂フラックスの全平均値

しており、矢印が汀線と直角方向の場合には沿岸漂砂は起こらないが、斜めに入射する場所では湖岸線付近で沿岸漂砂が発生する。図-6(b)には1000 stepまでの全平均として求めた漂砂フラックスの分布を示す。円形の湖の埋め立て地と逆側では砂移動はないが、埋め立て地に近づくほど漂

宇多高明



(一財) 土木研究センター  
常務理事、なごさ総合研究  
室長、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