砂でできた円形島の変形予測

Prediction of Topographic Changes of a Sandy Island

芹沢真澄¹・宇多高明²・宮原志帆³

Masumi SERIZAWA, Takaaki UDA and Shiho MIYAHARA

The BG model (a three dimensional model for predicting beach changes based on Bagnold's concept) was applied to the prediction of the three dimensional topographic changes of a sandy island due to waves, which was obtained by a movable bed experiment by Uda and Yamamoto. In Okhotsk Sea, Taketomi Island was formed as an island composed of sand by a volcanic eruption and then, the island was markedly deformed by wave action, resulting in forming a double tombolo behind the island (Zenkovich, 1967). The model was also applied to these topographic changes of the island. The predicted and measured topographic changes in two examples were in good agreement.

1. まえがき

波の作用下での未固結材料（例えば、砂）でできた島の変形について考える。このような島は波の作用により侵食されるので過渡状態としてのみ存在できる。したがってその形成は、人為的改変の一環としての盛土か、あるいは火山活動により火山灰や軽石が堆積した場合による。現象を単純化するために島の形状が円形で与えられるとする。この島に波が作用する場合、波の作用を受ける側（表側）と裏側では海岸線への法線方向が180°異なるため、円形島のある地点での海岸線直角方向と波の入射方向とが45°をなすという条件が必ず起こる。この場合、通常の沿岸漂砂式を用いた計算では汀線の不安定現象が起こり安定な解を得ることができない。これと同種の問題として砂嘴の発達に関して Ashtonら（2001）は、海岸線に対する沖波の入射角が45°を越える場合、海岸線は不安定となり小さな擾乱から砂嘴が発達しうること示した。Ashtonらの方法は、海岸線をx, y軸方向の微小なメッシュに分割し、汀線変化モデルの沿岸漂砂量式をベースに一方方向的に漂砂が流れる状況を再現して砂嘴の汀線の発達を予測するものである。砂嘴の変形計算においては、砂嘴の発達とともに周辺波浪場が大きく変化するため、地形変化に応じた波浪場の変化計算が必要となる。実際、Ashtonらは砂嘴自体による波の遮蔽効果を考慮しているが、沿岸・岸沖漂砂を厳密に考慮して漂砂フラックスを定式化した漂砂式に基づいた計算ではない。本研究では、この種の現象の3次元的变化を予測可能とするために、芹沢・宇多（2010b）のBGモデル（Bagnold

概念に基づく3次元海浜変形モデル）を宇多・山本（1986）の実験結果に適用し、実験と同様な条件のもとで砂でできた円形島の変形予測を行うことによりモデルの妥当性を検証した。その上で、オホーツク海で火山活動に伴い新しく形成された島の侵食とdouble tomboloの発達の事例（Zenkovich, 1967）に対する再現計算を行った。

2. 未固結材料でできた島周辺での海浜変形の例

Zenkovich（1967）は、オホーツク海で火山活動に伴い新しく形成された島の侵食とdouble tomboloの発達の事例として図-1を示した。1933年、オホーツク海のAlaid島沖600mに火山島Taketomi Islandが形成された。この島は未固結の火山灰とスコリア（軽石）でできていたため直ちに侵食され、島の背後には一対の砂州が急速に発達し始めた。この砂州はAlaid Island島へと伸び、1936年には砂州は陸岸近傍まで達した。測量によれば水深25mの海域において砂州は300m/yrの速度で伸張した。2つの砂州は1947年には現Alaid islandまで伸び、背後にはラグーンが形成された。

3. 砂でできた円形島の変形実験

宇多・山本（1986）は、2.で事例を示した未固結材料

図-1 オホーツク海のAlaid島沖600mに形成された火山島Taketomi Islandの変形（Zenkovich, 1967）

1 正会員 海岸研究室(有)
2 正会員 工博 (財)土木研究センター常務理事なごさ
総合研究室長兼日本大学客員教授理工学
部海洋建築工学科
3 海岸研究室(有)

図-2 円形島の汀線変化

図-3 円形島の初期形状

図-4 円形島の3時間後の海浜形状

でできた島周辺の海浜変形を移動床平面模型実験により調べている。この実験における砂でできた円形島の模型は、中央粒径0.28mmの細砂を用いて造られた。初期模型海浜の勾配は1/5で、初期汀線は半径1.5mの半円形を与えられた。島は半円形状の平坦面を有し、その高さは10cm、平坦部水深は20cmとされた。実験で設定された入射波高は約3cm、周期は0.8sであり、海浜縦断面形は島を16等分する測線に沿って測定された。

造波開始後3時間までの汀線変化を図-2に示す。測線No.10を境としてそれより漂砂の上手側では汀線が後退し下手側では前進している。汀線の後退速度は初期ほど速く、その変化割合は時間経過とともに減少している。一方、No.10より下手側では測線No.13, No.14付近で汀線が最も突出し、円弧状砂州が次第に曲率を増大させつつ発達している。堆積域においても初期ほど汀線変化は大きく時間が経過すると汀線の前進量は小さくなった。

図-3は初期形状を示す。この初期形状に波が3時間作用したときの海浜形状を図-4に示す。これらの比較によれば、測線No.1～No.10の区域では侵食が、またNo.10～No.16では堆積が生じたことが分かる。侵食域では汀線より-8cm付近にある波による地形変化の限界水深までの等深線の間隔が広がり、侵食緩斜面が形成された。これに対し陸側では浜崖が形成され等高線間隔が狭まった。堆積域では汀線沖へと砂が落ち込むために、侵食域と比べて水深の大きな場所まで地形変化が生じ、舌状砂州の先端部の海底勾配は1/1.5と非常に急となった。一方、陸域では波のうち上がり高さに応じて広い平坦面が形成された。

4. 予測モデル

芹沢ほか(2010b)のBGモデルをもとに地形変化予測

を行った。計算の基本式には、碎波波高の沿岸方向勾配に起因する沿岸漂砂量を考慮するための Ozasa and Brampton (1980) 項を付加した式 (1) を用いた。

$$\vec{q} = C_0 \frac{P}{\tan \beta_c} \left\{ \frac{K_n (\tan \beta_c \vec{e}_w - |\cos \alpha| \vec{\nabla} Z)}{+ \left\{ (K_s - K_n) \sin \alpha - \frac{K_2}{\tan \beta} \frac{\partial H}{\partial s} \right\} \tan \beta \vec{e}_s} \right\} \dots (1)$$

$$P = \rho u_m^3 \dots (2)$$

$$u_m = \frac{H}{2} \sqrt{\frac{g}{h}} \dots (3)$$

ここに、 $\vec{q} = (q_x, q_y)$ はネットの砂輸送フラックス、 $Z(x, y, t)$ は地盤高、 n および s は等深線直角方向 (岸向き) および平行方向に取った局所座標、 $\vec{\nabla} Z = (\partial Z / \partial x, \partial Z / \partial y)$ は地形の勾配ベクトル、 $\vec{e}_w$ は波向の単位ベクトル、 $\vec{e}_s$ は等深線平行方向の単位ベクトル、 α は波向と等深線直角方向のなす角、 $\tan \beta = |\vec{\nabla} Z|$ は海底勾配、 $\tan \beta_c$ は平衡勾配、 $\tan \beta \vec{e}_s = (-\partial Z / \partial y, \partial Z / \partial x)$ 、 K_s, K_n はそれぞれ沿岸・岸沖漂砂量係数、 K_2 は Ozasa and Brampton 項の係数、 $\partial H / \partial s = \vec{e}_s \cdot \vec{\nabla} H$ は等深線平行方向に測った波高 H の勾配、 $\tan \beta$ は碎波帯の代表海底勾配である。また C_0 は水中重量表示から体積表示への換算係数 ($C_0 = 1 / \{(\rho_s - \rho)g(1 - p)\}$) ; ρ は海水の比重、 ρ_s は砂の比重、 p は砂の空隙率、 g は重力加速度、 u_m は波の底面振動流速 ($u_m = H / 2 \sqrt{g/h}$ 、 H は波高、 h は水深)、 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。

波浪場の計算には、不規則波の方向スペクトルを変数とする Mase (2001) によるエネルギー平衡方程式の数値計算法を用いた (芹沢・宇多, 2010b)。また波の打ち上げ領域での波浪場の計算には、芹沢ほか (2010b) と同様仮想水深を設定し、仮想水深 h' を式 (4) で与えた。

$$h' = \left(\frac{h_R - Z}{h_R + h_0} \right)^r h_0 \quad (r=1) \quad (-h_0 \leq Z \leq h_R) \quad \dots\dots (4)$$

またバーム高より標高の高い地点では波エネルギーを0とおいた。本研究では、地形変化に応じた波浪場変化のフィードバック計算を多数回繰り返すために、計算負荷が大きくならないよう実験での規則波を不規則波と見なしてエネルギー平衡方程式法を用いて波浪場を算出した。また波浪場は地形変化計算10ステップごとに計算し直した。さらに計算の便宜上、宇多・山本の砂嘴形成に関する実験模型の100倍スケールを対象とし、計算結果を1/100に縮小して図化した。実験での初期地形は円形の島を二分した半円形とされたが、計算では円形島で与えた。入射波は $H_I=3\text{m}$, $T=8\text{s}$ 、波向は直角入射とした。また波による地形変化の限界水深は各地点の波高を H として $h_c=2.5H$ で与えた。バーム高は2m、砂の平衡勾配は実験結果に基づいて1/5、安息勾配は1/2とした。計算は沿岸方向、岸沖方向に20m間隔のメッシュで分割し、 $\Delta t=2 \times 10^{-3}\text{h}$ の時間間隔で1000h (5×10^5 steps) まで計算を行った。詳細な計算条件を表-1に示す。

5. 計算と実験の比較

図-5(a)に示す初期地形(円形島)を与え、x軸方向から波高3cm、周期0.8s(実験スケール)の波を作用させた。円形島周辺では島の背後へ向かう沿岸漂砂が発生し、島の表側が侵食され、侵食された砂が島の背後へと運ばれ堆積した。1時間後には砂の堆積はx軸と時計回りに $\theta=117^\circ \sim 138^\circ$ をなす区域で著しく、そこで汀線が舌状となった(図-5(b))。この堆積域は陸域が平坦で、海底勾配が1/2と非常に急なことが特徴である。2時間後には島の表側汀線が頂角 114° をなして交差するように鋭く削られる一方、砂の堆積域が上手側へと広がり示した。また舌状砂州の突出度が増し平坦面の面積が増大した(図-5(c))。3時間後では島の表側の鋭角状汀線が削られ、沿岸方向にフラットになった(図-5(d))。舌状砂州が最も発達している方向は $\theta=138^\circ$ で与えられ、島の表側にあった砂が島の背後へと運ばれ、島の斜め裏側に一對の舌状砂州を形成した。一方で砂の供給源である島の表側では砂が裏側へと運び去られたため侵食緩斜面が形成された。図-5(d)は図-4に示した実験結果に対応しているが、両者はよい一致を示している。地形変化にตอบสนองし波浪場にも大きな変化が現れる。地形変化と同様初期、1, 2, 3時間後の波浪場の計算結果を波向とともに図-6に示す。島の背後に静穏域が形成され、島の裏側での舌状砂州の形成に伴い静穏域が増し、同時に静穏域も広がり示している。

図-7は、実験結果が示されている3時間後のNo.2, 10,

表-1 計算条件

Wave conditions	Incident waves: $H_I=3\text{m}$ (0.3cm), $T=8\text{s}$ (0.8s), wave direction $\theta_I=0^\circ$ relative to normal to initial shoreline
Berm height	$h_R=2\text{m}$ (2cm)
Depth of closure	$h_c=2.5H$ (H : wave height)
Equilibrium slope	$\tan\beta_e=1/5$
Angle of repose slope	$\tan\beta_g=1/2$
Coefficients of sand transport	Coefficient of longshore sand transport $K_L=0.040$ Coefficient of Ozasa and Brampton (1980) term $K_2=1.62K_L$ Coefficient of cross-shore sand transport $K_x=0.1K_L$
Mesh size	$\Delta x = \Delta y = 20\text{ m}$
Time intervals	$\Delta t = 0.002\text{ h}$ (0.0002h)
Duration of calculation	1000hrs (5×10^5 steps)
Boundary conditions	Shoreward and landward ends: $q_x=0$, right and left boundaries: $q_y=0$
Calculation of wave field	Energy balance equation (Mase, 2001) ・ Term of wave dissipation due to wave breaking: Dally et al. (1984) model ・ Wave spectrum of incident waves: directional wave spectrum density obtained by Goda (1985) ・ Total number of frequency components $N_f=1$ and number of directional subdivisions $N_\theta=8$ ・ Directional spreading parameter $S_{max}=75$ ・ Coefficient of wave breaking $K=0.17$ and $\Gamma=0.3$ ・ Imaginary depth between minimum depth h_0 and berm height h_R : $h_0=1\text{m}$ (1cm) ・ Wave energy $=0$ where $Z \geq h_R$ ・ Lower limit of h in terms of wave decay due to breaking Φ : 1 m (1cm)
Remarks	Numbers in parentheses show experimental values. Space and time scales in the calculation are 100- and 10-fold those in the experiment, respectively.

13断面の縦断形について実験と計算の比較結果を示す。侵食域で侵食緩斜面が形成される一方、陸域は急な勾配で削り取られる状況、および堆積域にあっては堆積平坦面を形成しつつ汀線が大きく前進すると同時に、安息勾配1/2を保って砂が深い部分へと落ち込む状況がうまく再現できた。侵食・堆積域の境界付近に位置するNo.10では、実験では水面下でのみ砂の堆積が見られるのに対し、計算では堆積量が多く水面上にまで発達した砂州が計算されており、堆積量がやや過大となった。図-2に示した2.5時間後の汀線形状に対する計算結果(図-8)によると、島の裏側に形成された舌状砂州の規模はほぼ同様であるが、計算では砂州がより上手側まで発達しているのに対し、実験では砂州の発達が悪い。このように一部には相違点があるものの、円形島の変形の定量的予測がほぼ可能となった。

6. Taketomi Island島の変形シミュレーション

Zenkovichの示した火山島Taketomi Islandの変形については周辺の海底地形が与えられていないので海浜変形予

図-5 実験に対応させた砂でできた円形島の変形予測

図-6 波浪場の変化

図-7 縦断形変化の比較 (実験 vs 計算)

図-8 汀線変化の比較

測はできない。そこで3.で述べた円形島の場合に Taketomi Islandと同様な条件を設定して変形予測を行った。図-1によれば、Taketomi Island対岸のAlaid Island島の海岸線は海食崖であり砂浜はない。そこで図-9 (a)に示すように、円形島に近接して海食崖を模した直立壁を設置し、この壁を横切る漂砂がなく、また壁からの反射もないという条件を設定した。これ以外の計算条件は5.の場合と同様とし、1/100の縮尺を行わず現地スケールのまま計算を行った。

計算結果を図-9 (b)～(f)に示す。円形島の背後の一对の舌状砂州は波の進行方向に発達を続け、150hでは砂州

の先端が島背後の海食崖と接続し内側にラグーンが取り残された。250hでは陸側へと伸びた砂州の先端部でx軸方向の砂移動が抑制されたため壁に沿った沿岸方向にも砂移動が起きた。500hでは陸岸に接続した砂州の幅が増し、さらに1000h後には全体として釣鐘状となった。砂州が陸岸に到達して以降は砂州に囲まれたラグーンでは地形変化が起こらず形成時の姿が保たれた。一方、島の大部分は侵食されてそこに侵食緩斜面が形成された。

島の変形について調べるために、島を二分する $y=0$ m測線と、陸岸と砂州が接する $x=250$ m測線に沿う縦断形変化を図-10に示す。 $y=0$ m断面では、時間経過とともに

図-9 火山島Taketomi Islandを模した円形島の変形

縦断面形が後退していき、海底勾配が1/40の侵食緩斜面が形成された。侵食緩斜面上の水深は陸向きに次第に減少し、それに伴って波高が低下し、結果として波による地形変化の限界水深 h_c の低下を招くためこのような侵食緩斜面が形成される。X=250m断面では当初5mの一樣水深であったが、そこに砂が堆積して砂州が発達していくことが分かる。一連の地形変化は、Taketomi Islandの変形に際してはその地形・波浪条件が不明なことから地形変化の定量的予測はできないものの、Taketomi Islandから対岸のAlaid Island島へと伸びた砂州の変形を定性的にはよく説明している。釣鐘状の砂州が形成されるのは、島の遮蔽が効いているためであり、島が消失するにしたい消失する。

7. まとめ

未固結材料でできた島の波による変形について、Zenkovichの示したオホーツク海のTaketomi Islandの変形事例をもとに考察するとともに、宇多・山本(1986)の円形島の変形に関する移動床模型実験結果に対して芹沢ら(2010b)のBGモデルを適用し、実験結果の再現計算を行った。この結果、実験結果はBGモデルにより3次元的地形変化が定量的に再現可能なことが分かった。BGモデルは河口砂州の発達予測(芹沢ほか, 2009)、単純砂

図-10 $y=0$ mと $x=250$ m断面における地形変化

嘴の発達予測(Serizawa et al., 2009)、bay barrierの発達予測(芹沢・宇多, 2010a)、さらには海岸線が急変する場合での砂嘴の発達予測(芹沢・宇多, 2010b)に有効利用できることが明らかにされているが、本研究によりBGモデルの適用範囲がさらに広がった。

参考文献

- 宇多高明・山本幸次(1986): 湖および湾内に発達する砂嘴地形の変形特性, 地形, Vol.7, pp.1-22.
- 芹沢真澄・宇多高明・三波俊郎・古池 鋼・石川仁憲(2009): 河口砂州復元の3次元予測モデル, 海洋開発論文集, 第25巻, pp.1155-1160.
- 芹沢真澄・宇多高明(2010a): 浅海平坦面上に発達するBay barrierの形成予測モデル, 地形, Vol.31, pp.33-54.
- 芹沢真澄・宇多高明・三波俊郎・横澤 綾(2010b): 海岸線が急変する場合での砂嘴の発達予測, 地形, Vol.31, pp.403-422.
- Ashton, A., Murray, A. B. and Arnault, O. (2001): Formation of coastline features by large-scale instabilities induced by high angle waves: Nature, 414, pp.296-300.
- Dally, W. R., Dean, R. G. and Dalrymple, R. A. (1984): A model for breaker decay on beaches: Proc. 19th International Conference on Coastal Engineering, pp.82-97.
- Goda, Y. (1985): Random Seas and Design of Maritime Structures. University of Tokyo Press, Tokyo, 323p.
- Mase, H. (2001): Multidirectional random wave transformation model based on energy balance equation: Coastal Eng. J., JSCE, 43 (4), pp.317-337.
- Ozasa, H. and Brampton, A. H. (1980): Model for predicting the shoreline evolution of beaches backed by seawalls: Coastal Eng., 4, pp.47-64.
- Serizawa, M., Uda, T., San-nami, T., Furuike, K. and Ishikawa, T. (2009): Prediction of topographic changes of sand spit using BG model: J. Coastal Res., SI56, pp.1060-1064.
- Zenkovich, V. P. (1967): Processes of Coastal Development, Interscience Publishers, a Div. of Jone Wiley and Sons, ING, New York, pp.751.