指宿知林ヶ島陸繋砂州の形成・消滅過程に関する基礎的研究

Study on Emerging and Submerging Processes of a Tombolo at Chiringa-shima Island, Ibusuki City

長山昭夫¹、山口裕之²、茶屋彰仁³、田中龍児⁴、中村和夫⁵、浅野敏之⁶ Akio NAGAYAMA, Hiroyuki YAMAGUCHI, Akihito CHAYA, Ryuji TANAKA Kazuo NAKAMURA and Toshiyuki ASANO

Long term topographic evolutions of a tombolo at Chiringa-shima Island, Ibusuki city were investigated by a fixed point camera-observation. The emerging and submerging processes of the tombolo are discussed by referring both wind climate and hindcasted wave climate. Next, numerical simulations on the emerging process of the tombolo were conducted. The wave and near shore current fields were numerically reproduced. Under the obtained external forces on the sediment transport, the transport rates and the resultant bottom changes were calculated. Considering both results from the field observation and the numerical analyses, the reasonable explanation on the evolution process of the tombolo was shown.

1. はじめに

鹿児島県指宿海岸とその北東部に位置する知林ヶ島の 間に形成されている陸繋砂州は、3~10月の大潮の干潮 時のみに出現し冬季には消滅する特異な砂州である.通 常,砂州は島背後の静穏域に砂が堆積することや、陸地 側の沿岸漂砂が島まで連なることで形成される場合が多 いが、知林ヶ島で形成される陸繋砂州は、外力や漂砂源 の状況から上述の形成機構が必ずしも当てはまらず、そ の形成・維持・消滅過程はほとんど解明されていない. また、これまでに海岸構造物背後に形成されるトンボロ に関する研究はいくつか報告されているが、自然海岸に 形成されている陸繋砂州については重村ら(1983)の研 究等があるのみで極めて数少ない.

本研究は、砂州をデジタルカメラで連続観測した画像 データにより砂州の消滅過程を検討し、数値計算により 砂州地形の変形シミュレーションを行うことにより、指 宿知林ヶ島陸繋砂州の形成・消滅過程を検討したもので ある.

2. 指宿知林ヶ島について

指宿知林ヶ島(図-1)は, 鹿児島湾の湾口部西側に位 置している.陸繋砂州の規模は, 全長800m, 幅最大20m 程度であり, 3~10月の大潮の干潮時に合わせて砂州が 数時間出現する.

一方,11~2月においては大潮の干潮時であっても砂

1 学生 2 3	会員 俏	≸(工)	鹿児島大学大学院理工学研究科 日本情報産業 毎
5 4 5 6 正会	対 正 員:	淳(工) 〔博	鹿児島湖量専門学校教頭 鹿児島大学大学院技術職員 技術部 鹿児島大学大学院技術職員 技術部



図-1 知林ヶ島の地図

州は部分的に出現するのみである.また,台風の影響で 砂州が流出することがあり,最近では台風200704号によ る砂州の流出が記録されている.

3. 定点カメラによる砂州の現地観測

(1) 現地観測の概要

砂州形状の経時変化を把握するために長期撮影用観測 塔を知林ヶ島の対岸の標高215mの魚見岳に設置した. 観測塔の概観を写真-1に示す. 観測塔は鋼管・支持ワイ ヤーロープで構成され,上部にはデジタルカメラ用ハウ ジング部が設置されている.太陽電池パネルがハウジン グ部の上部に取り付けられ,バッテリーを介してデジタ ルカメラを駆動させる.デジタルカメラの焦点距離fは 2.4mm,1枚の画像に対して1000万画素で撮影される. カメラには8GBのメモリーが搭載されており,15分間隔 の撮影では36日間砂州の画像が収録できる.

(2) 射影変換の原理

図-2に示すように、写真測量の原理は投影中心の、像



写真-1 長期撮影用観測塔

点p,地上点Pが一直線上にあることが基本原理であり, これを共線条件という(日本写真測量学会,2004).砂 州地形変化を明確に理解するためには,斜めから撮影さ れた中心投影画像のひずみを補正し,鉛直上方からの正 射影画像(オルソフォト)に変換する必要がある.

通常の写真測量では,撮影位置をずらしてステレオ写 真撮影を行い図化機により正射投影図を作成するが,本 研究においては写真枚数が多いことなどから経費的に困 難である.対象とする砂州地形はほぼ平坦な地形であり, 斜め上方から撮影した写真から2次元射影変換によりオ ルソフォトを作成することにした.この変換手順は,撮 影写真に評定点を3つ以上決め,写真中の評定点座標デ ータ,変換後の画像の評定点に対応する座標データを作 成する.写真画像と画像データを読み込み,写真画像座 標を正射投影画像に変換するためのパラメター(図-2の カメラ位置;Xo,Yo,Zo,カメラ姿勢;ω, φ, κ等) を計算しオルソフォトを作成した.

写真-2に観測塔から撮影された元画像,写真-3は射影 変換後のオルソフォトを示す.写真-3では2008年10月~ 2009年1月の期間で潮位が95cmとなる日時の砂州地形を 重ねて表示した.丸印は岩礁,白線の三角印は砂州付け





写真-2 撮影された画像



写真-3 射影変化後の画像(潮位95cm)

根の植生付近,三角印は知林ヶ島と砂州部の接続部を示 す.砂州の地形変形を検討してみると,10月までに形成 されている砂州全体が11月まで連続的に南下しているこ とが確認できた.11月以降もさらに砂州は南下し,翌年 の1月13日の画像では砂州中央部の砂が流出してしまい 砂州が崩壊し,砂州の消滅過程の一部を画像として得る ことができた.また,砂州の南下は,北からの波浪が影 響していると考えられる.

4. 現地の来襲波浪の推算

(1) 現風向・風速の出現分布

知林ヶ島周辺の風の場を把握するため、アメダス気象 データを解析した.知林ヶ島から南西2km地点にある指 宿気象観測点の1987~1996年の10年間の風データを対 象に、日最多風向(以下、風向)・日最大風速(以下、 風速)を解析した、次にデータを砂州形成期(3~10月) と砂州非形成期(11~2月)に2分し、風速は風力階級 に従い、風向は16方向に分け出現頻度割合を求めた. 図-3に砂州非形成期、図-4に砂州形成期の風向・風速の 出現頻度分布を示す.砂州非形成期での全データは風向 NNWの出現割合が40%となり、N~NNWの範囲で出現 割合がほぼ100%となる。また風速5.5m以上のデータで は風向NNWが70%になる.また、砂州非形成期間では 風速10m以上の風は発生せず砂州形成期間と比べると風 速が小さいことがわかる.一方,砂州形成期での全デー タは風向NNWの出現割合が15%となり、砂州非形成期 間よりも小さな値となる.風速5.5m以上のデータに限れ ば風向SSEは25%となる.風向SSEは出現割合が少ない ものの風速5.5m以上の風に限れば出現頻度が高いことが わかる.



図-3 非形成期の風向・風速の出現頻度分布



図-4 形成期の風向・風速の出現頻度分布

表-1 波浪推算結果

形成期									
方位	Ν	NNW	NW	S	SSE	SE			
${\rm H}_{1/3}~(m)$	0.22	0.24	0.18	0.19	0.34	0.20			
$T_{1/3}$ (s)	4.44	4.76	4.12	4.21	5.47	4.06			
方位	Ν	NNW	NW	S	SSE	SE			
${\rm H}_{1/3}~(m)$	0.21	0.26	0.18	0.36	0.27	0.11			
T _{1/3} (s)	4.43	4.92	4.11	5.71	4.83	3.33			

以上より砂州非形成期間では風向NNWを中心とした 北風が卓越し、砂州形成期においては、風向SSEを中心 とした南風が卓越することが分かった.

(2) 現地波浪の推算

上記の風向・風速データをもとに現地の風浪をSMB法 によって推算した.波浪推算結果を北風と南風に分けた ものを表-1に挙げる.

表-1より,砂州形成期・非形成期に関係なく,有義波 高H1/3は0.2~0.4mの範囲,有義周期T1/3は3~6sの範囲 にあることが分かった.風速は日最大風速を使用してい るので、突発的な強風や台風の影響が反映されにくい.

5. 陸繋砂州の地形変形に関する数値シミュレー ション

(1) 波浪場の計算

図-5に知林ヶ島周辺の5m間隔の水深図を示す。知林 ヶ島と薩摩半島の間の水深は5m程度であるが、知林ヶ 島を境にし、知林ヶ島東部から急激に深くなり、図の右 側端では水深50mを越える.これは鹿児島湾全体が火山 噴火によるカルデラ地形に海水が侵入してできた特異な 地形の湾であることによる.計算領域は図-5に示すよう に陸繋砂州を含む周辺2km×2kmで格子間隔8mとした. 陸繋砂州は前述のように3~10月の大潮干潮時に水面上 に出現するが、今回は砂州の形成過程の再現に焦点をあ





て,砂州が存在する領域の水深を0.2mと均一にし(図-6), 砂州形成期の推算風浪下での地形変化を解析することに した. SMB法で推算された波の有義波高・有義波周期を 沖波に用い,砕波による波高減衰項を導入したエネルギ ー平衡方程式(高山ら,1991)によって波浪場を計算 した.

有義波周期からJONSWAP型スペクトルを有する不規 則波に変換し,波向き方向には方向集中度パラメター S_{max}=25の光易型方向分布関数で与えた.以上より計算領 域内の多方向不規則波の浅水変形,屈折,擬似的な回折, 砕波変形を計算した.

図-7に波高分布を示す.SSEから入射した波は浅水変 形を受け砂州形成位置よりも沖側で砕波し,砂州形成位 置直前の海底勾配の大きい場所での波高減衰が大きくな る.その結果,砂州形成位置では波高が0.3m程度となる. また岩礁の影響で,知林ヶ島付近の砂州形成位置での波 高は,本土側の砂州形成位置の波高よりも小さく,岩礁 の背後では0.1m程度になった.

(2) 海浜流場の計算

海浜流の基礎方程式は圧力勾配項,水平拡散項,底面 摩擦項, radiation stress項を右辺に含む鉛直積分された平





面2次元浅水方程式で(西村,1985),差分スキームには ADI法を用いた.図-8に海浜流ベクトルを示す.海浜流 は、本土側砂州つけ根で発生する砂州形成方向に沿う流 れ(図中A)と,砂州全般にわたって砂州にほぼ直行し て砂州を横切る流れ(図中B)の2つが特徴的であるこ とがわかる.また,砂州付け根付近と砂州中間部付近に おいて流れが収束する箇所がいくつか存在する.この流 れの収束により砂が堆積する結果となる.砂州を横切る 流れBは,砂州に沿う流れAよりも常に大きいことがわ かる.

(3) 局所票砂量の計算

上記で得られた波と流れの場から,底面における合成 水粒子速度を求め,局所漂砂量を算出した.漂砂量則と しては,スケール効果の無い現地観測結果に対する検証 実績の豊富なBailard (1981)の公式を用いることにした. ただし,エネルギー平衡方程式では位相情報が無く,水 粒子速度が正弦波変動するとすればnetの漂砂量が形成 されない.そこで局所的な波の波高・波長比に対応して 正弦波をStokes波に置き換え,上下非対称性な水粒子速 度波形に直してBailard公式を使用することによりnetの 漂砂量が得られるようにした.

図-9に局所漂砂量ベクトルを示す.漂砂量ベクトルは, 砂州形成位置である水深0.2m全域で砂州を横切って北西 方向に輸送されるものと,砂州の本土側付け根付近(図 の左下)から砂州に沿う形で知林ヶ島方向に移動するも のが認められる.砂州を横切って北西方向に移動するも のが認められる.砂州を横切って北西方向に移動する。 砂量は主に海浜流によって形成され,漂砂量ベクトルの 大きさが減少する領域で砂が堆積する.本土側付け根付 近から北東に向かう砂州に沿う漂砂量ベクトルは,付け 根付近の底質を輸送し砂州底質の供給源になるようにも 考えられるが,本土付け根付近は自然石による本土側海 岸の根固工が設置されており,この領域から陸繋砂州へ 底質が大きく供給されているとは考えにくい.



(4) 地形変化の計算

図-10に2.8時間後の地形変化量の計算結果を示す.砂 州の南東側と岩礁付近で広く浅く砂が侵食されている. 一方,砂州形成位置と想定した水深0.2mの領域付近に砂 が堆積し,本土と知林ヶ島の間に砂州が形成される傾向 がみられる.この結果は,砂州形成期に主に砂州形成位 置を横切る海浜流により,底質が帯状に浅くなった領域 に輸送されて堆積し,砂州が水面上に現れて来る過程を 示唆している.

6. まとめ

定点カメラによる連続画像により,卓越する北風によ る風波が既に形成されている砂州全体を徐々に南に押し 下げ,砂州中央部の砂が流出し砂州が消滅することが確 認できた. 砂州形成期には風向SSEを中心とする南風による風波 によって,主に砂州形成位置を横切る海浜流を発生させ, この波と流れにより砂州形成地点の手前の土砂が水深 0.2mの帯状に浅くなった箇所に堆積し,砂州が形成され ることが数値シミュレーションによって推察された.

陸繋砂州は,島に向かってくる波が回折波によって海 底砂を島背後の静穏域に運び込むことや,沿岸漂砂によ って本土側から伸展した砂嘴が島につながる形成機構が 考えられるが,知林ヶ島陸繋砂州は波向や本土側の底質 粒径等から考えて、こうした形成過程とは異なるものと 推察できる.現時点までの考察を総合して判断すると, 知林ヶ島の砂州は鹿児島湾内の比較的静穏な水域にある ため,風場の季節的変化に影響を受けて,浅い帯状の砂 州部分に周辺の土砂が堆積し,次いで水面上に出現した 砂州が侵食されるというサイクルを繰り返していると考 える.

今後は、定点観測装置によって年間を通じての砂州の 形成・消減過程を撮影し解明するとともに、砂州形成地 点付近の波や海浜流の外力を推算ではなく観測によって 評価していくことが必要であろう。潮流に対する評価も 加えなければならない.また砂州地形の時間発展を考慮 した波・流れ・地形変化システムに対する数値シミュレ ーションを実施し、砂州の形成過程だけではなく、消失 過程も明らかにする必要がある.

謝辞:魚見岳公園における長期撮影用観測塔の設置については,鹿児島県環境生活部ならびに指宿市役所観光保 護課のご尽力を頂いた.ここに記して謝意を表する.

参考文献

- 重村利幸・池内正幸・山田 正・高杉浄治・小森 宏 (1983):硫黄島西海岸におけるトンボロの成因について, 第33回海岸工学講演会論文集, pp.238-242.
- 高山知司・池田直太・平石哲也(1991):砕波および反射を考 慮した波浪数値計算,港湾技術研究所報告,第30巻,第1 号, pp.21-67.
- 西村仁嗣(1985):流れの計算,海岸環境工学,東京大学出版 会,第3編第3章, pp.249-271.
- 日本写真測量学会(2004):デジタル写真測量の理論と実践, 日本測量協会,335p.
- Bailard, J.A. (1981): An energetics total load sediment transport model for a sloping beach, J. Geophys. Res., Vol.86, pp.10939-10954.