指宿知林ヶ島陸繋砂州の断面形状特性 に関する研究

STUDY ON PROFILE CHANGE CHARACTERISTIC OF TOMBOLO TOPOGRAPHY AT CHIRINGA-SHIMA ISLAND

長山昭夫¹・浅野敏之²
Akio NAGAYAMA and Toshiyuki ASANO

¹正会員 博(工) 鹿児島工業高等専門学校 技術室 (〒899-5193 鹿児島県霧島市隼人町真孝1460-1)

²正会員 工博 鹿児島大学大学院教授 海洋土木工学専攻 (〒890-0065 鹿児島市郡元1-21-40)

This study investigates topographic changes of Chiringa-shima Island tombolo by means of field survey using DGPS and point camera observation. The tombolo exhibits appearing/disappearing processes from the sea level by daily basis and altering its position by seasonally basis. The present study has revealed, unique properties as follows: The sediment forming the tombolo moves only in a narrow area between Chiringa-shima Island and Ibusuki mainland where depth is shallower than 2m. The forming location of the tombolo move northward during the forming period; March-June, and southward during October-December. The location change is accord with the change of the periodic wind direction. The transverse profile change of the tombolo is governed by the periodically changing wind fields.

Key Words : *Tombolo profile change, Field survey by DGPS, Numerical simulation, Image data, Daily and seasonally changes*

1. はじめに

鹿児島県指宿海岸とその沖合にある知林ヶ島の上に形成される陸繋砂州(以下砂州と称す)は日変動と季節変動を有する特異な砂州(図-1)である。この砂州は、3～10月の大潮干潮時に連結し数時間のみ出現する特徴を有しており、環境省選定かおり風景100選『指宿知林ヶ島の潮風』として登録されており全国的に注目を浴びている。通常、砂州は1度出現し連結されると台風等による高波浪が作用しない限り砂州は消失することはない。しかし本研究で対象とした砂州は潮位変動と連動し出現・連結・消滅の日変動を有することがわかっている。またこの砂州の周辺海岸は通常の砂州の形成されやすい海岸環境と異なることもわかっており、詳細な砂州の形成過程についての解明が急がれる。これまでに著者らは現地観測や定点カメラ観測において砂州の季節変動・日変動特性について検討してきた。本論文はこの砂州の断面形状特性についてアメダス気象データ・DGPS観測・定点カメラ観測・数値モデルにより検討したものである。

2. アメダス気象データによる風場の検討

これまでの研究^{1), 2)}において砂州の出現について、消滅期(12月-1月中旬)、遷移期(1月中旬-3月中旬)、

図-1 知林ヶ島陸繋砂州の全体地図(YAHOO!地図を加筆)

安定期(3月中旬-12月)を定義した。その定義に沿ってアメダス気象データの検討を行い砂州周辺の風場を考察した。外力となる風のデータは、砂州形成位置から約2km離れた指宿観測所のものを使用した。前報²⁾により指宿観測所のアメダス気象データと本土側砂州の根元付近に設置した風向風速計のデータを比較検討し、アメダス気象データによって現地の風場を検討可能であることがわかっている。2008年10月から2009年9月の風向データを、全データ、10-12月、12-3月、3-5月、5-6月、6-9月の期間に分割してその特性を検討した。その結果を図-2に示す。こ

の図は各方位の頻度[%]を示す．この図より，対象期間の全データのグラフ(図左上)より，砂州周辺においては年間を通じて北風の頻度が最も高く，次いで南西からの頻度が高いことがわかった．3-5月のデータ(図右上)と5-6月のデータ(図右中央)より，砂州の安定期初期から中期にかけては，年間を通じて頻度の高い北風の頻度が非常に小さく，代わりに南風の頻度が大きくなることがわかる．6-9月のデータ(図右下)と10-12月のデータ(図左中央)と12-3月のデータの(図左下)により，砂州の安定期後半と消滅期にかけて，再び北風の頻度が高くなることがわかる．以上を総合すると，砂州周辺においては年間を通じて北風の頻度が最も高く，砂州形成が行われる安定期初期から中期にかけて，北風の頻度が低く南風の頻度が高くなる傾向にあり，砂州の安定期後半から消滅期にかけては再び北風の頻度が高くなることがわかった．

次にアメダス気象データを利用し波浪推算を行った．波浪推算にはSMB法を使用した．波高は0.1～0.2mとなり，周期に関しては最大で4s程度の結果となった．静穏な波浪が推算されるのは，砂州が鹿児島湾口より少し内側に位置することに起因すると考えられる．

図-2 アメダス気象データの風向頻度分布

3. 砂州を構成する底質特性

小型GPSを用いて砂州上の底質サンプリングを2009年9月14日と10月14日に行った．図-3にサンプリング位置を示す．底質サンプリングは，砂州の形成方向に沿って17地点とり，各点の直交方向に3点でサンプリングを行った．その後，採取した底質の振り分け試験を行った．9月に採取した底質の粒度分布を砂州の北側汀線と南側汀線とで分けて表示した結果を図-4と図-5に示す．北側汀線の底質の粒度分布である図-4からわかるように中央粒径 D_{50} は0.8～1.8mmの範囲にある．本土側から知林ヶ島に向かって粒度分布の傾斜が小さくなることが特徴的である．また，本土側から知林ヶ島に向かって底質粒径全体が相対に大きくなっている．南側汀線の底質の粒度分布を示した図-5では，中央粒径 D_{50} は1.1～1.9mmの範囲にあることがわかる．本土側から知林ヶ島に向かって単純に粒度分布の傾斜が小さくなるのではなく，砂州中央付近で一旦傾斜が大きくなり，そして再び傾斜が小さくなることがわかる．一方，北側汀線の底質である図-4の方が南側汀線の底質である図-5よりも傾きが大きく均等係数が小さくなることがわかる．

次に，波浪推算で求めた $H_{1/3}=0.2\text{m}$ ， $T_{1/3}=4\text{s}$ と高波浪を想定した $H=1.0\text{m}$ ， $T=5\text{s}$ の波について中央粒径を $D_{50}=1.0\text{mm}$ として移動限界水深を求めた．ここでは佐藤・田中の式を参考にパラメータ $n=1/3$ $a=2.4$ (完全移動)と設定した．

図-3 底質の採取ポイント

図-4 底質粒度分布(北側汀線)

図-5 底質粒度分布(南側汀線)

その結果、限界水深はそれぞれ0.4mと1.5mとなった。音響測深測量とレベル測量により求められた砂州周辺の水深図を図-6に示す。この図は平均水面を基準としている。また砂州周辺の潮位差は大潮において2m程度なので、大潮満潮時に高波浪が作用すると仮定しても底質は砂州形成位置の指宿海岸と知林ヶ島との狭い領域のみを移動する可能性が高い。また作用波浪の影響で底質が砂州形成位置に堆積せずとも、底質は砂州形成位置付近に広く分布している可能性が高い。つまり砂州を形成している底質の移動範囲は広くなく、浅い海域に豊富に存在する底質が風浪によって寄せられて本砂州の形成機構が支配されていると考えられる。この機構は、沿岸漂砂によって地形先端部から底質が供給され砂州が伸張していくような砂州形成機構とは大きく異なることがわかる。

図-6 砂州形成位置の水深図

4. DGPS による現地観測

砂州の汀線の経時変化や標高を測定するためにDGPS観測機器を使用した。DGPS受信機にはHemisphere社のA100を使用した。A100はディファレンシャル補正情報に対応する測位精度0.5m(95%)

を有している。観測ではDGPS観測機器を背負い、砂州の出現部分の水際(これを砂州観測時の汀線と定義する)を歩行し、その経度・緯度・高度・時間を記録した。

今回使用したDGPSによる取得データとレベル測量による標高データを比較検討することによりDGPS取得データの精度の検討を行った。砂州上を約100m間隔で図-7のように7つの断面を決定した。またレベル測量においては、砂州中央付近にレベルを設置し汀線付近と汀線と設置機器の中間付近の高低差を測量した。ここでレベル測量による汀線高はDGPSデータの北側汀線高と一致すると仮定し、両者の結果を比較した結果を図-8に示す。図から各断面のDGPSデータとレベル測量データは比較的良く一致していることがわかる。DGPSデータの標高データの精度保証は数mとされているが今回の観測においては上空付近には障害物が無く、常時捕捉可能な衛星の数が多かったためと考えられる。一方、レベル測量とDGPSデータの北側汀線位置の標高データの一致を仮定しているためか、全断面において南側汀線位置の標高データが一致しない。また、断面01は他の断面と比べてデータの誤差が大きくなった。これは断面01の断面幅が他の断面に比べ2倍ほど大きいことによると考えられる。

2010年3月1日と7月27日にDGPSによる砂州の断面形状の測量(図-9)を行った。これまでにこの期間で砂州全体が南北に移動するサイクルを有することがわかっている²⁾。つまり3月と7月では砂州の断面位置は正確には一致しない。本報では、特に砂州の断面形状について考察するために、砂州の北汀線位置を3月と7月で便宜上一致させて考察を行った。この図より砂州安定期初期の3月においては、どの断面においても北側が緩勾配となり、南側においては急勾配になっている。しかし、砂州安定期中盤である7月においては、3月の断面形状と比べ北側の勾配が急になり南側においては勾配が緩やかになる傾向がわかる。さらに長期の現地観測を行うと砂州出現期間中はこの傾向が継続し、最終的には北側が急勾配になり南側が緩勾配となる結果を得た。

図-7 砂州上の断面

図-8 DGPSデータとレベルデータとの断面形状の比較

図-9 砂州の断面形状の比較

5. 定点カメラ観測

定点カメラ観測のための観測塔(図-10)を砂州が一望できる魚見岳に設置した。砂州と魚見岳は直線距離で2kmであり、魚見岳は標高214mで知林ヶ島は最高点の標高が98m、砂州は海拔4m程度となる。

図-10 魚見岳頂上に設置された観測塔

この観測塔に設置しているデジタルカメラから得られる写真データを使用し砂州地形の変動過程を検討した。本研究では、単一写真からオルソフォトを作成する方法として2次元射影変換を採用した。しかし、この射影変換後の画像がどの程度、整合性の取れたデータになっているか検討する必要があった。そこで、このオルソフォトと航空写真を比較した(図-11)。オルソフォトは2009年4月26日14:00に撮影されたものを射影変換したものであり、航空写真は2006年8月9日12:53に撮影されたものである。この図より、オルソフォトと航空写真の整合性は全体的に良好だといえる。砂州の汀線位置が合致しないのは撮影日時が異なるためであるが、砂州形成位置は問題のない範囲に存在している。また砂州の中央右よりにある岩場の位置は正確に一致している。しかし、知林ヶ島付近の砂州の位置は一致していない。これは、知林ヶ島が高低差を含むので2次元射影変換では正確に地形を再現できなかったことによる。以上より射影変換した画像は、実際の砂州の形状に関して多少の誤差を含むが今回の検討を行うには十分な精度を持っていると考える。

図-11 オルソフォトと航空写真の比較

図-12は、砂州の安定期前半(5月25日)のHWL(図上)MSL(図中央)LWL(図下)時の射影変換画像であり岩場の位置を線で囲んでいる。この図から、砂州は

安定期においてもHWL時では砂州全体が水没していることがわかる。また、MSL時においても砂州中央付近が水没していることがわかる。以上より、砂州は安定期であっても潮汐変動に合わせて出現・形成・消滅を繰り返すという日変動を有していることがわかる。

図-12 砂州形成安定期の各潮位での砂州の様子

図-13と図-14に2008年10月から2009年9月までの約1年間の砂州の移動量と断面幅の変化を示す。図-13の砂州の移動量は10月の砂州位置を基準とし北方向を正值、南方向を負値で示した。図-13より遷移期から安定期前半である3月から6月にかけて砂州全体が北上を開始し、安定期後半の10月から消滅期にあたる12月にかけて砂州全体が南下することがわかる。図-14において3月から9月まで各断面における断面幅は増減が繰り返される結果となった。これらの結果を総合すると、砂州の出現期初期において、まず砂州の断面幅がある程度まで増加すると砂州全体が北上を開始する。砂州の北上と同時に断面幅は減少する。さらに安定期後半において砂州全体が南下し始めると断面幅は再度増加することがわかった。

図-13 砂州の1年間の移動量

図-14 砂州の1年間の断面幅

砂州の安定期初期において平均出現潮位時においても必ずしも砂州が出現しないことが数回確認できた(図-15)。この図の左部は3月27日、右部は4月1日の平均出現潮位時の砂州の様子を示す。安定期において砂州は平均出現潮位時において3月27日のように形成され、かなり太くなっているのが一般的であるが、4月1日に限り砂州は形成が遅れている。そこで、砂州の消滅から出現までの1サイクルずつの最大瞬間風速をまとめたものを図-16に示す。図の横軸はデータの累積数でありカウントと表記している。3月27日のデータは3月26日の16:00から3月27日の10:30のデータを示し、4月1日のデータは3月31日の19:00～4月1日の14:30のデータを示している。この結果から最大風速6m/s以下では砂州の出現が遅延しないことが分かり、出現の遅延は最大風速12.1m/sで起こることがわかった。また、砂州の出現する直前(ここではカウントの数が後半部分)に風速が著しく大きくなることがわかった。それぞれ砂州出現の6時間前からの平均風速を求めると、3月27日では2.1m/sとなり一方、4月1日では9.0m/sとなり大きな差が生じた。つまり砂州出現直前の風場が、砂州出現に大きく影響することが予想された。またこの風は、北から作用していることも分かった。以上の結果から、砂州出現直前に北からの強い風が作用すると砂州の出現が遅れることがわかった。

図-15 安定期における砂州出現の遅延

図-16 砂州出現の遅延時と通常時の風速の比較

6. 数値モデルによる検討

図-17 砂州の断面形状特性に関する数値計算結果

次に、砂州の断面勾配がどのように変化するかを検討するために1次元浅水方程式、Baillard漂砂量公式、漂砂の連続式を使用し、砂州断面がどのように地形変化するのかを検討した。

これまでの研究¹²⁾で砂州周辺の波浪場・流れ場・漂砂場を数値実験によって再現することを検討している。

作用波浪は砂州が湾内に位置し、その吹送距離を考慮して推算した値である $H=0.25\text{m}$ 、 $T=4\text{s}$ を設定した。図-17に0.7hour、1.4hour後の計算結果を示す。この図により砂州の断面をモデル化した斜面に波が作用すると、波は浅水変形を起こし波高が増大する。さらに水深が浅くなると波高は徐々に小さくなる。漂砂は、波浪が作用する前面斜面の広い範囲で発生し、背後斜面では断面の頂点付近のみで発生することが認められる。地形変化については、前面斜面全域で侵食が発生し、背後斜面においては断面の頂上付近で堆積が発生している結果となった。今回の計算においては、計算進行に伴う地形変化を波の変形計算にフィードバックしていないことや、地形変化計算に局所的な断面勾配を考慮しておらず、実現現象の一部について正確な再現ができていない。しかし、風波の作用する前面斜面において侵食が発生し、背後斜面に堆積が起こるといった一連の砂州の断面変化の特性は表現できているといえる。

7. まとめ

(1) 底質の振るい分け試験とアメダス気象データによる波浪推算による移動限界水深の算定結果から、砂州を構成している底質は知林ヶ島と本土側の間の狭い領域のみを移動することが推測できた。

(2) 定点カメラ観測より砂州は安定期前半(3月～6月)に全体的な北上を開始し、安定期後半から消滅期にかけて(10月～12月)南下することがわかった。これは現地の卓越風向の変化と一致している。また、砂州の北上・南下の時期と砂州の断面幅の増減は関連することが判明した。

(3) 砂州の断面形状に関する現地観測結果から、砂州の北上と同時に砂州の断面勾配は北側が緩勾配から徐々に急勾配に変化し、南側の断面勾配は逆の挙動を示すことがわかった。

(4) 数値計算により、現地の砂州の断面勾配の変化は、作用する風波によって支配されることが確認された。この特性は定点カメラ観測で得られた砂州全体の北上・南下の移動過程とも深く関わっていることが推測できる。

参考文献

- 1) 長山昭夫, 山口裕之, 茶屋彰仁, 田中龍児, 中村和夫, 浅野敏之: 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, 土木学会論文集B2(海岸工学), VolB2-65, No. 1, pp. 586-590, 2009
- 2) 長山昭夫, 谷山昌弘, 川上弘次, 浅野敏之: 指宿知林ヶ島陸繋砂州の年間を通じた変動過程に関する研究, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol166, No. 1, pp. 156-160, 2010