干潟面上で発達した孤立砂州の接岸に伴う 大規模海浜変形

宇多 高明¹・大木 康弘²・大谷 靖郎³

¹ 正会員 (一財) 土木研究センターなぎさ総合研究所兼日本大学客員教授理工学部海洋建築工学科
(〒110-0016 東京都台東区台東 1-6-4)

E-mail: uda@pwrc.or.jp

² (一財) 土木研究センター河川・海岸研究部 (〒110-0016 東京都台東区台東 1-6-4)

³ 正会員 (一財) 土木研究センター河川・海岸研究部 (〒110-0016 東京都台東区台東 1-6-4)

周防灘に面した荻田市沖の干潟には孤立砂州が発達している。この砂州は、波の作用下で干潟面上に孤立した砂の塊をなし、ほぼ半円形を保ちつつ変形が進んできている。2014年10月17日、この孤立砂州北端が陸岸に接近したため、陸岸との間に残された狭い開口部には入退潮流による flood/ebb tidal delta が形成された。その後、2016年9月17日における第二回目現地踏査によれば、孤立砂州の接岸直前に陸岸での著しい侵食が起きた後、最終的に砂州が陸岸と融合して大規模な海浜地形変化が起きた。

Key Words : tidal flat, isolated sand bar, longitudinal sand bar, shoreline changes, field observation

1. はじめに

荻田市沖の周防灘に面した干潟には孤立砂州が発達している。この砂州は、波の作用下で干潟面上に孤立した砂の塊をなし、ほぼ半円形を保ちつつ変形が進んでいる¹⁾²⁾。孤立砂州は、元々洪水流により干潟沖に運ばれた砂が縦砂州の形成を経ながら集積した砂州で、それ自体も変形しつつ岸向きに移動し、最終的に海岸線に到達し砂浜を形成する。よって干潟縁辺における海浜の規模を支配する一要因となる。また、孤立砂州は端部を有するがゆえに、砂州の発達・移動とともに砂州対岸では著しい沿岸漂砂が誘起され、離岸堤と同様に著しい侵食と堆積を引き起こす。同様な現象は干潟で覆砂を行った場合にも見られる³⁾。よってその変形と移動機構を調べる

ことは工学的に意味があると考えられる。この砂州の最近の変形状況として、2014年10月17日取得の衛星画像を図-1に示す。このとき孤立砂州の北端は陸岸にほぼ接続していたが、陸岸との間に残された狭い開口部には入退潮流による flood/ebb tidal delta が形成されていた。また、孤立砂州の南端でも開口幅が 16 m まで狭まって砂州が着岸寸前であり、その後も急速な変化が起これと想定された。そこで2015年2月15日には現地踏査を行い、孤立砂州の北・南端での flood/ebb tidal delta の形成状況を確認した。孤立砂州は入射波に対し不安定であり、また、前報²⁾で述べたように、孤立砂州が接岸した場合陸への急速な漂砂も起こると考えられる。しかしながら、このような条件下での孤立砂州と周辺海浜の変形実態は明らかでなかった。そこで2016年9月17日には、第2回目の現地調査として GPS を用いて孤立砂州の汀線形状を測定するとともに、孤立砂州沖において岸向きに伸びつつある縦砂州⁴⁾についてもその実態を調べた。なお、本研究の調査地の南 2.6 km に位置する沓尾海岸での HWL は TP.2.07 m に、MWL は TP.+0.10 m に、そして LWL は TP.-2.12 m にあり、潮差が大きく、さらに干潟面と砂浜との境をなす海底勾配の遷急点の標高はほぼ TP.0.7 m にある¹⁾²⁾。また、NOWPHAS 荻田港によれば通常時の波高は 1 m 以下がほとんどで周期は 2-4 s で変動しており、エネルギー平均波高は 0.38 m である¹⁾。

図-1 孤立砂州の衛星画像 (2014年10月17日)

2. 既往研究による孤立砂州の変形予測

宮原ら²⁾は、本研究で対象とする孤立砂州の変形機構をBGモデルを用いて調べた。この計算においては、波浪場はエネルギー平衡方程式法により算定し、 $H_i=0.4\text{ m}$ 、 $T=3\text{ s}$ の波を海岸線直角方向から入射させた。潟土からなる干潟の平坦面（固定床）上に初期形状として、長さ102 m、幅35 mの矩形状の孤立砂州を置き、岸端には中砂粗砂からなる前浜勾配1/10の海浜斜面を設定した（図-2）。バーム高は0.5 m、 h_c は任意点の波高を H として $h_c=2.5H$ で与えた。砂の平衡勾配は1/10、安息勾配は1/2とし、計算領域を $\Delta x=\Delta y=5\text{ m}$ で分割し、 $\Delta t=0.02\text{ hr}$ で計算を行った。図-2は、孤立砂州接岸時の計算結果を再掲したものである。孤立砂州は時間経過とともに沿岸方向に伸び、越流とともに砂州高が次第に低下し、3000 stepでは砂州両端部の接岸が始まった。さらに4000 stepには孤立砂州の両端が陸と完全に繋がったため、孤立砂州から陸へと急激な砂移動が起こり、砂州幅が大きく狭まった。越流に伴う砂州高の低減は、図-3に示す $y=0\text{ m}$ 断面の経時変化からも見て取れる。砂州の変形は5000 step後も続き、孤立砂州は侵食されて水面下に没した。この計算では、孤立砂州は波の作用のみによるため砂州は滑らかに陸岸の砂浜と融合した。

3. 観測方法

2015年2月15日の第1回現地踏査では、図-1の測点配置に示すように、孤立砂州の北端のSt.1から踏査を開始し、砂州本体の状況をまず観察した。その後、孤立砂州へ向かって伸びた縦砂州に沿って陸岸へ移動し、再び縦砂州の南岸に沿って孤立砂州に達し、南側半分の踏査を行った。2016年9月17日の第2回現地踏査では、図-4に示すように、GPSによる孤立砂州周辺の汀線測定とともに砂州状況の写真撮影を行った。現地踏査は、孤立砂州の北端のSt.16から開始し、まずlagoonの陸側汀線に沿って海浜状況を調べた後、半円形状の砂州に沿って南向きに移動しつつ海浜状況を調べた。さらに沖合の干潟面上において汀線直角方向に伸びる砂州（縦砂州）の踏査も行った。

4. 第1回現地踏査の結果

(1) 円弧状の孤立砂州の北端部と中央部

従来、陸岸から見ると孤立砂州は干潟上に浮かんでいるように見えた²⁾が、2015年2月15日には孤立砂州が

陸岸と接続する直前まで伸びたため、孤立砂州と陸岸の間の狭い開口部を通過する入退潮流が強まり、砂が開口部両側の干潟上へと運ばれ堆積していた（St.1、図-5[1]）。図-1に示したように、この時期には孤立砂州と陸岸の間に湾曲水路が形成され、孤立砂州の両側に扇状の砂の堆積域が形成されていた。また、孤立砂州の伸長とともに湾曲水路が陸岸に押し付けられたため、湾曲水路の陸岸

図-2 孤立砂州接岸時の計算結果²⁾

図-3 孤立砂州の $y=0\text{ m}$ 断面の経時変化

図-4 2016年9月17日の孤立砂州形状と写真撮影地点

図-5 孤立砂州周辺の状況 (その1)

では著しい侵食が起きていた。この湾曲水路と陸岸の侵食状況を図-5[2] (St.2) に示す。湾曲水路の外岸側が掘られ、また前方には flood tidal delta が形成されていた。図-5 [3] (St.3) は湾曲水路の湾曲部から望んだ水路と沖合の孤立砂州の状況を示す。潮位変動とともに孤立砂州の北西端に形成された湾曲水路に沿って海水流動が起き、これにより深い溝が掘られた。図-5[3]の撮影地点と同じ場所から北側にある ebb tidal delta を望んだのが図-5[4] (St.4) であり、水路が干潟面へと細長く伸びていた。図-5[5] (St.5) には孤立砂州本体の北西側に形成された安息勾配斜面と、その陸側に残された水路を示す。孤立砂州の北西端には安息勾配の急斜面²⁾が残されており、沿岸漂砂により運ばれてきた砂が急勾配を保ちつつ干潟面上に堆積してきたことが分かる。孤立砂州は波の作用により次第に岸へと接近するので、岸側に見える水路もまた陸向きに押しやられたことになる。

孤立砂州の中央部より北西方向を望んだのが図-5[6] (St.6) である。砂州中央部はほぼ平坦であり、東側には貝殻片の堆積により形成された5条の満潮時汀線がきれいに伸びていた。また孤立砂州上には越流痕跡が残されていることから、越流により砂州高の低下が起きていると推察され、これは図-2, 3の計算結果と対応を示す。一方、孤立砂州の北西(左)側では波浪作用が弱いため

lagoon が残されていた。図-5[7] (St.7) は、孤立砂州の陸側汀線上より lagoon を望んだ写真である。孤立砂州の陸側では満潮時で、かつ波浪が高い時期に起こる越流に伴う岸向きの砂移動があるため、lagoon と孤立砂州の間には幅約5mの帯状の砂浜が形成され、その先に lagoon が広がっていた。

(2) 縦砂州

図-1に示したように、孤立砂州のほぼ中央部には縦砂州が伸びる。この縦砂州では、2箇所²⁾で breaching が起きていた。これらのうち沖側に位置する開口部を St.8 から南向きに望んだのが図-5[8]である。縦砂州の中央部に深い溝が形成されると同時に、矢印の方向(南向き)に砂が運ばれ、縦砂州南面の干潟に砂が堆積していた。孤立砂州の内側の lagoon と海との水位差に起因して入退潮流が発生し、孤立砂州の北西端だけでなく縦砂州を横断した水路も形成されたことが分かった。一方、図-1によれば縦砂州は南向きに凹状であるが、これは沖合の円弧状の孤立砂州が伸びる以前に南側から入射した回折波の作用を受けたことによる²⁾。

この縦砂州は、陸岸への接続時その内側に内湖を残したが、図-5[9] (St.9) は内湖の状況を示す。写真左端にある狭い水路からの潮流により内湖には flood tidal delta が

形成されていた。図-5[10] (St.10) には海岸線に沿って設置された消波工へと接続しつつある孤立砂州を示す。孤立砂州の前面には lagoon が広がり、さらに沖合では孤立砂州（南部）が lagoon を囲むように伸び、陸岸に接続する直前であった。

(3) 孤立砂州（南部）と沖合での縦砂州の発達

南部の孤立砂州も細長く伸び、内側に lagoon を囲い込んでいた (St.11, 図-5[11])。その先端部は、図-5[12]のように内側へ曲がり、急勾配の砂州が干潟面へと伸び、干潟面と砂州とは遷急線できれいに分かれていた。これは干潟面が固定床とみなすことが可能であって、その上で砂の塊が移動していることを意味する。一方、南部孤立砂州の外側汀線では汀線の不安定的発達により砂嘴の形成が進んでいた (St.13, 図-5[13])。

研究対象の干潟では、従来から細長い縦砂州の発達が観察されてきた²⁾。図-1の2014年10月17日の画像にも孤立砂州の沖に縦砂州の発達が見える。図-5[14]は、St.14の北側にある砂の塊の陸側端を望んだものである。3列の縦砂州 a, b, c の発達が見られるが、砂州 a は沖側から緩やかな勾配で砂州の高さが増した後、干潟との境界で急勾配で落ち込んだ形状を有していた。図-5[15] (St.15) は縦砂州 c の先端部を望んだもので、鋭く尖った縦砂州が干潟面上を岸向きに伸びていた。

5. 第2回現地踏査の結果

(1) 孤立砂州の変形

孤立砂州は、図-4のように2014年10月17日には沖向きに突出した半円形の姿を有していたが、孤立砂州の北端が接岸したため、孤立砂州を構成していた砂が一挙に岸向きに移動した。このため孤立砂州北端近傍の一度は侵食された場所でも堆砂が起きた。また、孤立砂州の曲率が減少し、全体に扁平な形状に近づいた。さらに沖向きに突出していた孤立砂州の中央部が、岸向きに約60mも移動する一方、砂州幅が31mから16mへと半減した。このような孤立砂州の変形状況は前述の計算結果(図-2, 3)とかなりよく対応している。一方、南部では孤立砂州が切れて、新たに tidal inlet が形成され、その両側には ebb/flood tidal currents による突出地形が形成された。また図-4で沖合のAで囲む区域には5列の縦砂州が観察されたが、第2回踏査ではB, Cにおいて同種の縦砂州が見出された。

(2) 旧海岸線に沿った区域の海浜状況

第2回踏査までに孤立砂州は南端を除いて接岸し陸続きとなった(図-4)。孤立砂州先端が岸に接近するに従い、その対岸の汀線付近では砂州自体により波が遮蔽され、その遮蔽域へと南向きに砂が運び去られたため、北端に

図-5 孤立砂州周辺の状況（その2）

図-5 孤立砂州周辺の状況 (その3)

ある突堤Dの直近では汀線が大きく後退し浜崖が形成されていた。図-5[16] (図-4, St.16) は浜崖形成後再度砂に埋まった突堤D付近の状況を示す。比高1mの浜崖の前面に砂が堆積して前浜が広がっていたことから、侵食後堆積が起きたことが分かる。St.16から旧海岸線に沿って約80m南向きに進みSt.17に至ると、孤立砂州の伸長および移動とともに背後地の保安林が深く切り込まれていた (図-5[17])。この付近では高い浜崖が形成されていたが、その前面には平坦な lagoon が残されていた。侵食以前にはほぼ幅20mの一樣海浜が広がっていたが、激しい侵食により高い崖が形成された。さらに、著しい侵食箇所背後の St.18 から孤立砂州背後の lagoon を望んだのが図-5[18]である。上げ潮時に孤立砂州背後の lagoon 内へと flood tidal currents が生じ、これにより lagoon 内に低い砂州が形成された。flood tidal delta は4列の帯状の小高い砂州として残されていた。一方、図-5[19]は図-5[17]に示す樹林帯にできた浜崖の状況を示すが、浜崖の比高は1.6mにも及び、大量の土砂が流出していた (St.19)。しかしながら孤立砂州の端部近くに形成された侵食域を超えて南向きに移動すると、図-5[20]のように過去に形成された縦砂州へと続く直線状の砂浜が伸びていた (St.20)。この付近は満潮時に水位は高まるものの波の作用をほとんど受けない安定した海浜であったため、満潮時の遡上線の上に漂着物が直線状に並んでいた。図-4にはこの遡上痕跡線を示した。図-4に示したように、St.20より南側では汀線が次第に前進し、三角形の砂州が形成されている。これは既往研究²⁾で明らかにされたように、孤立砂州背後に形成された舌状砂州に対応している。この付近は波の直接的作用を受けないので、図-4に示した2014年10月17日の汀線と今回測定の日線は完全に一致していた。

(3) 孤立砂州周辺の海浜状況

第2回踏査時までに孤立砂州の北端は陸と完全に接続し、砂州沖側では汀線が後退する一方、岸側へと運ばれた砂は従来侵食されていた汀線部分を埋めて大きく前進した。これを St.21 から北向きに望んだのが図-5[21]である。写真右側に直線状に見える突堤が図-4に示す突堤Dである。2014年10月17日にはこの付近は干潟であり、そこに大量の砂が堆積して砂浜が形成された。また、図-5[21]に示す砂浜背後の矢印Eには浜崖が遠望されるが、この浜崖は図-5[16, 17]に示すものと同一であり、そこまで浜崖侵食が進んだ後、侵食域に大量の砂が堆積したことが分かる。次に、孤立砂州により囲まれた lagoon に沿って孤立砂州の状況を調べた。St.22では、図-5[22]に示すように、第1回踏査時と比較して砂州幅が減少したため孤立砂州上に満潮時の越流痕跡が残されており、孤立砂州全体を覆うように越流痕跡が広がっていた。同じ状況は St.23 でも同様に観察され、孤立砂州の上面全体で越流が起きていた (図-5[23])。砂州高の低下に伴う砂州越流は、BGモデルによる計算で予測された通りであり、越流により孤立砂州の海側から lagoon 側への砂移動が起きている。ところで、図-5[23]の点Fでは図-4に示す tidal inlet が見える。その拡大写真を図-5[24, 25]に示す。lagoon 側、海側を St.24, 25 からそれぞれ望んだ写真である。開口部を取り巻いて両側に delta が形成されていた。

(4) 沖合の縦砂州の発達

図-4では沖合の区域Aにおいてほぼ西向きに細長く伸びた縦砂州が形成されていた。第2回踏査ではその発生場所は異なるが、図のB, Cで同種の縦砂州の発生が確認された。図-5[26]が縦砂州Bの先端部を示す (St.26)。縦砂州はその陸側端で標高差が最も大きく、比高が0.4m

図-5 孤立砂州周辺の状況
(その4)

lagoon が残されたことが分かった。また、潮位変動とともにこの水域からの入退潮流の作用があり、ebb/flood tidal delta の発達が進んだことも見出された。前報²⁾の計算は、入退潮流の効果が含まれていなかったため、tidal delta の予測はできていないが、砂州の伸長接岸に伴う砂浜の一体化については計算と実測結果がかなりよい対応を示した。

であった。B の北側に形成された縦砂州 C の沖側端近くの St. 27 から岸向きに望んだのが図-5[27]で、縦砂州が沖合砂州とほぼ直交方向に伸びていることが分かる。表面には波の作用でできた砂漣が縦砂州の進行方向と直角方向に伸びていた。さらに縦砂州の標高が最も高い陸側端を St.28 から望んだのが図-5[28]である。縦砂州の陸側端には小高く砂が堆積していたが、その端部は粘性土層でできた干潟面へと急激に落ち込み、縦砂州先端部では干潟面との間に比高 0.8 m の落差を残していた。この状況より、縦砂州は沖合から岸向きに運ばれた砂が干潟面に堆積してできることが分かる。

6. まとめ

荻田市沖の周防灘に面した干潟に発達した孤立砂州において2回の現地踏査を行った。この結果、孤立砂州の伸長とともにその先端が陸岸に接近し、やがて接岸して砂浜としての融合が起こる一方、孤立砂州の内側には

参考文献

- 1) 宇多高明, 宮原志帆, 三波俊郎, 芹沢真澄: 周防灘に面した荻田市沖の干潟上に形成された孤立砂州の変形, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 71, No. 2, pp.I_754-I_759, 2015.
- 2) 宮原志帆, 三波俊郎, 宇多高明, 芹沢真澄: 干潟上の砂州の変形・移動および海浜との融合—現地実測と予測, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.71, No.2, pp.I_637-I_642, 2015.
- 3) 足利由紀子, 清野聡子, 宇多高明, 畦津義彦, 菖蒲明久, 三原博起, 小森信二, 渡辺誠治, 酒井和也: 中津干潟沖での覆砂の岸向き移動機構, 海岸工学論文集, 第 57 巻, pp.1181-1185, 2010.
- 4) 芹沢真澄, 宇多高明, 宮原志帆: 浅い干潟面上で岸向きに発達する細長い砂州の形成予測-BG モデルの応用, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 67, No. 2, pp.I_1189-I_1194, 2011.
- 5) 宮原志帆, 宇多高明, 芹沢真澄: 極浅海域に形成された barrier island の観察と数値計算結果との比較, 地形, Vol.35, pp.367-386, 2014.

(2017.2.2 受付)

LARGE-SCALE BEACH CHANGES ASSOCIATED WITH MERGENCE OF ISOLATED SAND BAR ON TIDAL FLAT TO LAND

Takaaki UDA, Yasuhiro OOKI and Yasuro OHTANI

On the tidal flat offshore of Kanda City facing the Suo-nada Sea, an isolated sand bar develops. This sand bar forms a sand body on the tidal flat under waves, and it deforms while maintaining a semicircular shape. On October 17, 2014, the north end of this isolated sand bar approached the land, and a flood/ebb tidal delta was formed owing to the flood/ebb tidal current at the opening between the tip of the sand bar and the land. Then, due to the second field observation on September 17, 2016, severe beach erosion occurred immediately before the attachment of the tip of the sand bar to the land, and finally the mergence of the sand bar to the land occurred, causing large-scale beach changes.