Vietnam の Vung Tau 近郊での河口砂州伸長と rhythmic pattern の海浜形成

宇多 高明¹・小林 昭男²・芹沢 真澄³・伊達 文美⁴・
野志 保仁⁵・宮原 志帆⁶

¹ 正会員 一般財団法人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 (〒110-0016 東京都台東区台東 1-6-4 タカラビル)

E-mail: uda@pwrc.or.jp

² 日本大学教授理工学部海洋建築工学科 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1)

³ 正会員 海岸研究室 (有) (〒160-0011 東京都新宿区若葉 1-22 ロイヤル若葉 301)

⁴ 一般財団法人土木研究センター河川・海岸部 (〒110-0016 東京都台東区台東 1-6-4 タカラビル)

⁵ 正会員 日本大学助教理工学部海洋建築工学科 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1)

⁶ 海岸研究室 (有) (〒160-0011 東京都新宿区若葉 1-22 ロイヤル若葉 301)

Vietnam 南部 Vung Tau の東北東 29 km に位置する Song Ray River の河口砂州と、Vung Tau 近郊の海岸を衛星画像に基づく解析と現地踏査により調べた。この付近の海岸では、地形的に見て南西方向の沿岸漂砂が卓越しているために、Song Ray River では左岸河口砂州の伸長が著しく、また Vung Tau 近郊の海岸では南西方向へ大きく歪んだ rhythmic pattern の海浜形成が観察された。これらの特徴的な地形形成機構について考察した。

Key Words : Vung Tau, river mouth bar, satellite images, welded bars, rhythmic pattern

1. はじめに

筆者らは、近年急速な経済発展を遂げつつある国々の海岸保全に関心を持ち、いくつかの発展途上国において海岸調査を行ってきた。2013年からはVietnamのHo Chi Minh City Universityとの協力の下、南部の大都市Ho Chi Minh Cityの東約270 kmに位置するPhan Rang City周辺の海岸を調査し、しばしば発展途上国で見られるように、解析に必要とされるデータが十分取得されない条件下でも現地踏査と衛星写真の判読を組み合わせる方式により海浜変形機構の解明が可能なことを明らかにした¹⁾。本研究では、上記研究協力の2年目として、2014年10月25、26日、Ho Chi Minh Cityの南東67 kmに位置するVung Tauの東北東約29 kmにおいてSouth China Seaに注ぐSong Ray Riverの河口砂州とVung Tau近郊の海岸調査を行った。図-1にはSong Ray RiverとVung Tau沿岸の調査区域(矩形区域)の衛星画像を示す。図-1に示すように、Song Ray Riverの河口の東12 kmと西8.9 kmには海岸線の突出部A、Bがあり、これらの海岸線の突出部の南西側の海岸線がフック状となっていることから、当沿岸では地形的に見て南西方向の沿岸漂砂が卓越する条件にある。このような漂砂条件のためにSong Ray Riverでは左岸河口砂州の伸長が

著しく、またVung Tau近郊の海岸では南西方向へ大きく歪んだrhythmic patternの海浜形成が観察された。本論文では、これらの点について衛星画像に基づく解析と現地踏査により調べた。なお、Vung Tauでの気象波浪観測によると、当地はTropical monsoon地帯に位置するため、風向はNEとSWの間で交互に変わる。NE monsoon時(2,3月)には平均風速が5.2-5.7 m/sと大きいがSW monsoon時は風が弱く、最少は8月の3 m/sである。しかしこの時期には熱帯低気圧が襲来すると30 m/sの強風となることもある。入射波の平均波高はNE monsoon時が0.8 m, SW monsoon

図-1 Song Ray RiverとVung Tau近傍の調査区域

時が0.7 m程度である。また、潮位としてVung Tau観測所での2012年のデータ(D.L.表示)を参照すると、月平均潮位は-20 cm, HWLが+116 cm, LWLが-256 cmにあった。

2. Song Ray River 河口砂州の伸長

(1) 衛星画像による河口砂州の伸長調査

Song Ray River では左岸河口砂州が西向きに約4 kmにわたって伸び、細長いbarrierが形成されている。図-2にはこの砂州の先端部を囲む同一区域について2012年6月、2014年1月、および同年2月の衛星画像を示す。また図-2の各時期の衛星画像には、各画像撮影時前の衛星画像から読み取った汀線形状も示す。これらによれば、2012年6月から2014年1月までに砂州の先端が南西向きに186 m伸び、また、2014年1月から2014年2月には砂州先端に伸びた幅40 mの細長い砂州が西向きにさらに86 m伸びた。このことからSong Ray Riverの河口では南西向きの沿岸漂砂が卓越していることが明らかである。同様に、河口沖では2012年6月には西向きに傾いたebb tidal deltaが発達していたが、2014年までに水面下の砂州が西向きに大きく伸び、ebb tidal deltaが南西側に370 m移動した。このこともまた南西方向への沿岸漂砂の卓越と整合している。さらに、図-2(c)に示すように、Song Ray Riverの河岸には多くの漁船が係留され、そこが漁港として使われているが、これらの漁船は河口砂州がebb

図-2 Song Ray Riverの左岸河口砂州とebb tidal deltaの発達

tidal deltaとともに西向きに長く伸びるため、漁港から海へ出るまで3.1 kmもSon Ray Riverを下らなければならない条件となっていた。

(2) 現地状況

河口砂州の汀線に沿って西向きに移動しつつ図-2(c)に1~6で示す地点において海浜状況を調べた。図-3には現地状況写真を一括して示す。まず、河口の東1885 mの地点1付近にはモクマオウ林の前に広い砂浜があり、風化花崗岩砂(マサ土)の細砂が堆積し、沖合も含めて緩勾配の砂浜が広がっていた(図-3①)。汀線沖の水深の小さい場所には沿岸砂州が伸びるとともに、沖合に深みがある場所では汀線が凹状になっているのが観察された(図-3①のa)。一方、その西側の地点2では汀線が凸状を呈しており、そこでは満潮時に前浜へと打ち上げられた海水がバーム背後に湛水して池をつくり、その池に海水とともに砂が運び込まれたため陸側端で急勾配をなして砂が堆積していた(図-3②)。また、この池へと打ち込まれた海水は矢印の方向(西向き)に流れ、この流れ時の側方侵食により海浜に小規模な崖を形成しつつ汀線凹部から海へと戻っていた(地点3:図-3③)。バーム背後での西向き流れの発生は、当海岸における西向きの沿岸漂砂の卓越と整合的であり、また、この付近では波の遡上に伴って陸へと運び込まれた海水が遡上点付近で戻り流れにより直接海へ戻るのではなく、バーム背後を下手方向へと流れた後沖へと流れ出る機構があることが確認された。このように斜め入射波が卓越する海浜での前浜上でのバーム形成と、それを越えた下手方向への流れの発生は、汀線付近のwelded barsなどの形成の一因になると推察される。さらに、砂州の西端近傍の地点4では河口部汀線が漏斗状に曲がるため波の入射角が大きく、汀線に沿って碎波が起き、砂州の先端方向へと向かう強い沿岸漂砂が生じているのが観察された(図-3④)。さらに砂州の先端部の地点5では鉛直上方に丸みを帯びた縦断形が形成されていた(図-3⑤)。一方、砂州対岸では滞筋の存在のため東側からの沿岸供給が途絶えた結果侵食が進み、高い浜崖が形成されていた。最後に、地点6では、先端に形成され上流方向へと細長く伸びた砂嘴bの発達が認められた(図-3⑥)。図-2に示したように、2月16日には砂嘴は西向きに伸びていたが、10月26日までに砂嘴先端の伸長方向が河道内へと回り込んだことが分かった。

3. Vung Tau 近郊に見られる rhythmic pattern を有する海浜の形成

図-3 現地状況写真 (①～⑥)

(1) 調査地の概況

図-1 に示した Vung Tau 周辺の矩形区域の拡大画像を図-4 に示す。調査地域は北東端に流入する Co May River から Vung Tau 市街地の南側に突出した岬まで、直線距離で約 10 km の緩く湾曲した海岸線である。この海岸線に区域①②を設定し、これらの区域の衛星画像を拡大して砂州状況を調べるとともに現地調査を行った。ここに、区域①②の中央において汀線への法線を引き、その方向角を読み取ると区域①では $S32^{\circ}E$ 、区域②では $S54^{\circ}E$ で、区域②は区域①より 23° 左回りに傾く条件を有している。図-4 によれば、Co May River の河口隣接部では汀線が滑らかに伸びているが、区域①から区域②へと汀線近傍には rhythmic pattern を有する沿岸砂州が発達している。このことから区域①②を切り出し、これらの区域内での砂州の発達状況を詳しく調べた。また、2014 年 10 月 26, 27 日には区域①②において海浜の現地踏査を行った。

図-4 Vung Tau 近傍における rhythmic pattern を有する海浜の発達

図-5 区域①内の rhythmic pattern の変化

(2) 区域①における沿岸砂州の特徴

図-5 には区域①の衛星画像を示す。2008 年 1 月から 2014 年 3 月まで 6 時期の衛星画像を示す。なお図中の番号は写真撮影地点を示す。また、各画像からは浅海域における波峰線形状の読み取りが可能なことから、海岸線沖約 440 m 付近において波の入射方向を測定し、S から左回りの方向を正として各画像に示した。まず、2008 年 1 月では波長が 311 m で西側に大きく傾いた砂州が発達し、砂州周辺では南西方向に細長い溝が伸びていた。この砂州はいわゆる welded bars²⁾である。波の入射方向は $S60^{\circ} E$ で、図-5 に示した区域①での平均海岸線への法線方向 $S32^{\circ} E$ に対し 28° 左回りからの入射であった。

2010 年 2 月では、2008 年 1 月のように西向きに大きく傾いた砂州ではなく不規則な形状となった。この時、波の入射方向は $S51^{\circ} E$ で、海岸線への法線方向に対し 19° 左回りと、斜め入射であることには変わりがないが入射角がやや減少した。また、この時期には海岸線近傍でリゾートホテルの建設が始まった。2012 年 3 月には再び 2008 年 1 月当時とよく似た形状の沿岸砂州が発達したが、このときの砂州の波長は 329 m であり、溝と浅瀬が交互に並んでいた。また、波の入射方向は $S57^{\circ} E$ で、平均海岸線への法線方向 $S32^{\circ} E$ に対し左回りに 25° と大きく斜め入射していた。また、汀線近傍までホテル用地となったために、ホテル用地東端の点 P では護岸隅角部が波に曝されることになった。このように護岸設置区間での rhythmic pattern の形成は、前浜が狭い条件では護岸が波に直接曝されるなどの問題が起こすことから、施設の前面に十分広い緩衝帯（前浜）を残す必要があると考えられる。

2012 年 12 月では一転して砂州形状は魚の鱗状の複列砂州となった。この時の波の入射方向は $S42^{\circ} E$ であり、海岸線への法線方向 $S32^{\circ} E$ に対して左回りに 10° で、

斜め入射角が明らかに減少した。このため東西に大きく歪んだ沿岸砂州の発達ではなく、沿岸方向に不規則に並んだ砂州が形成されたと推定される。その後、2014 年 3 月には再び 2008 年当時とよく似た砂州形状となった。この時波の入射方向は $S76^{\circ} E$ で、海岸線への法線方向に対して 44° と大きく左回りの方向からの入射であった。このように区域①ではいずれの時期にも左回りの方向からの波の入射が卓越し、入射角がほぼ 20° より大きい時期には welded bars が発達することが明らかになった。

この地区では 5 地点で海浜状況を観察した。図-6 にはこれら 5 地点 (⑦～⑪) の位置を示す。ここに地点番号は Co May River 河口砂州での踏査地点と一連番号で示す。まず、区域①に造られたリゾートホテル前面の地点 7 での海浜状況を図-6⑦に示す。海浜は淘汰の進んだ粒径 0.1 mm 程度の細砂からなり、海浜勾配は 1/50 程度と非常に緩勾配であり、干潮時であったため汀線沖には干出した沿岸砂州が並んでいた。地点 7 の北 322 m の地点 8 は満潮時汀線に近い場所であるが、非常に緩い勾配の前浜が広がっていた (図-6⑧)。この付近の背後地には砂丘が形成されていた。この砂丘前面に達し、地点 9 より満潮時汀線を望んだのが図-6⑨である。砂丘の麓には満潮時汀線が直線状に伸びており、その陸側に狭い砂浜が広がっていた。さらに砂丘上から北東方向を望みつつ沿岸砂州の発達状況を撮影したのが図-6⑩で、ほぼ直線状に伸びた満潮時汀線の沖の wet beach に rhythmic pattern が形成されていた。汀線沖の溝 (図-6⑩の矢印 c) の拡大写真を図-6⑪に示す。砂州の比高は 0.5 m 程度であった。

(3) 区域②における沿岸砂州の特徴

同様にして区域②の拡大衛星画像を基に沿岸砂州の特徴を調べた (図-7)。区域②では、区域①で示した 2008 年 1 月と 2012 年 4 月の画像は取得されていないので 4 時期

図-6 現地状況写真 (⑦～⑪)

のみの比較とした。また、この区域についても浅海域における波峰線形状を各画像から読み取ることができるので、海岸線沖約440m付近において波の入射方向を測定し、S から左回りの方向を正として各画像に示した。まず、2010年2月では、区域①と比べ西向きに大きく歪んだ砂州ではなく、西向きにやや傾いてはいるが沿岸方向に不規則な形状の砂州が多数形成されていた。この時、波の入射角は $S66^{\circ}E$ 方向で、海岸線への法線方向 $S54^{\circ}E$ に対し左回りに 16° の入射であった。図-5(b)に示す区域①の入射角 19° と比べ斜め入射角は 3° 減少していた。2012年3月では、区域①と同様南向きに大きく歪んだ沿岸砂州が発達し、沿岸砂州の波長も区域①の329mに対し区域②では333mと、ほぼ同じ波長の沿岸砂州の発達が見られた。その際波の入射方向は $S73^{\circ}E$ で、海岸線への法線方向 $S54^{\circ}E$ に対して左回りに 19° と入射角が増大していた。

次に、2012年12月では、沿岸砂州は複列砂州のような形状となり、同じ時期の区域①の状況とよく似た砂州となった。波の入射方向は $S62^{\circ}E$ で、海岸線への法線方向 $S54^{\circ}E$ に対して左回りに 8° をなす方向からの入射であり、南側に大きく歪んだrhythmicな沿岸砂州が形成されなかったことと対応を示した。最後に、2014年3月では2012年3月とよく似た歪んだ沿岸砂州が発達したが、この時の波の入射方向は $S77^{\circ}E$ で、海岸線への法線方向 $S54^{\circ}E$ に対して左回りに 23° とかなり大きな角度で斜め入射していた。以上のように区域②でも波の斜め入射角が 19° 、 23° とかなり大きい2012年3月と2014年3月には南向きに大きく歪んだ沿岸砂州が発達していたのに対し、2010年2月と2012年12月のように入射角が左回りに 16° 、 9° と相対的に小さい場合、南向きに大きく歪んだ沿岸砂州は発達しなかった。

区域②の現地踏査は10月25日の満潮時と10月26日干潮時に行い、潮位条件が異なる条件での海浜状況を観察した。図-7には調査地点(⑫~⑭)の位置を示す。まず図-8⑫は10月25日の18時25分の満潮時に地点12において汀線沖を望んだもので、汀線沖には海水浴客にrip channelの存在の注意喚起のためにドクロマークの旗が立っていた。ほぼ同じ場所を地点14から10月26日朝10:05に撮影した状況を図-8⑬に示す。矢印dの旗のわずかに沖には確かにrip channelが発達し、砂州の近くを歩行する人の背丈と比べると砂州の比高は30~50cm程度であった。図-8⑭は溝の発達状況を南西向きに望んだものである。このように当地では、南西側へとその形状が大

図-7 区域②内の rhythmic pattern の変化

きく歪んだ rhythmic pattern を有する沿岸砂州が形成されており、この結果 rip channel が汀線近傍にあることとなるため海水浴客に深みのあることについて注意喚起がなされていた。このことから rhythmic pattern を有する沿岸砂州の発達は海水浴利用の安全性にも係ることが明らかである。

4. 考察

(1) Song Ray River の河口砂州の伸長条件

図-1に示す衛星画像において、Song Ray Riverの河口の東12kmと西8.9kmの地点A、Bには海岸線の突出部があり、その東側側面にはほぼ安定した汀線が見られる。そこで地点A、B付近において汀線への法線の方向角を調べると、地点Aでは $S50^{\circ}E$ 、Bでは $S47^{\circ}E$ となる。よってこの沿岸での卓越波向はほぼこれらの角度に等しいと考えられる。実際には、突出部を回り込む沿岸漂砂があるならば、これらよりわずかに東寄りの方向から波が入射することになるので、これらの角度は卓越波向の下限値を与えると推定できる。いま、Song Ray Riverの河口に地点Bでの波向を有する波が入射するならば、Song Ray Riverの河口砂州の汀線への法線の方向角は $S23^{\circ}E$ と読めるので、当地点では左回りに 24° の方向から波が入射することになる。このためSong Ray Riverの河口では南西方向への沿岸漂砂が卓越し、南西方向への砂州の発達と、同じ方向に歪んだ形のebb tidal deltaの形成が進んだと考えられる。しかしながら河口から地点Bへと汀線への波向角は次第に小さくなり、この沿岸漂砂も南向きに徐々に減じる条件にあることが分かる。

図-8 現地状況写真 (⑫～⑭)

(2) Vung Tau 近郊における rhythmic pattern を有する沿岸砂州の形成

Vung Tau 近郊の区域①②では、ともに rhythmic pattern を有する沿岸砂州が形成されており、Song Ray River 河口と同様、波が左回りに約 20° 以上の角度で斜め入射する場合この種の沿岸砂州の発達が進められ、入射角が減少すると河川での複列砂州に近い形状の砂州となることが分かった。観察された welded bars の発達機構については、従来、波・海浜流・海底地形の interaction による instability 起源のものや、同じ周期を持つがモードの異なる 2 つの edge waves 重合効果によるものなど、様々な議論が行われてきている²⁾。また、近年では数値モデルによって波、海浜流、地形変化の interaction により、rhythmic pattern を有する bar と rip channel の発達が再現されている³⁾⁴⁾。ここで観察した沿岸砂州は前浜付近に形成されるものであり、その場合 Song Ray River の左岸河口砂州での観察結果のように、平均水面下での海浜流ではなく、波の遡上に伴って陸へと運び込まれた海水が遡上点付近で戻り流れにより直接海へ戻らずに、バーム背後を下手方向へと流れた後、沖へと流れ出ることで rhythmic pattern を有する沿岸砂州の発達が起こる可能性が見出された。当地では海底勾配が 1/50 程度と緩く、汀線沖に上面が平坦な砂州が形成されると平坦面上では水塊の実質部分が岸向きに運び込まれ、それが上記のように一か所に集中して流れるため上記地形変化の要因と考えられるが、その詳細な機構解明は今後の課題として残されている。

5. まとめ

現地調査によれば、Vung Tau の東北東約 29 km において South China Sea に注ぐ Song Ray River の河口砂州は現在でも西向きに発達を続けており、河口から外海への航路もそれに応じて伸びている。したがって舟運確保上今後もモニタリングが必要である。また Vung Tau 近郊では rhythmic pattern の海浜形成が進む特性があるので、海岸線付近でのホテルなどの土地利用にあつてはこれに伴う汀線変動を余裕分として確保しておくことが肝要である。最後に、現地踏査と Vung Tau の気象・潮位データの入手には Ho Chi Minh City University の Bai 教授らに便宜を図っていただいたことに對し謝意を表します。

参考文献

- 1) 宇多高明, 野志保仁, 小林昭男, 宮原志帆, 芹沢真澄: Vietnam 南東部 Phan Rang City 近郊で観察された海浜変形, 地形, Vol.36, 2015. (印刷中)
- 2) Komar, P. D. 1998. Beach Processes and Sedimentation, Second Edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, p. 544.
- 3) Garnier, R., Calvete, D., Falqués, A., Dodd, N. 2008. Modelling the formation and the long-term behavior of rip channel systems from the deformation of a longshore bar, J. of Geophys. Res., Vol. 113, C07053, doi:10.1029/2007JC004632.
- 4) 内山 雄介, 宮崎 大, 甲斐田 秀樹: 流れから波へのフィードバック機構がリップチャンネル形成に及ぼす影響, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.69, No.2, p.L521-L525, 2013.

ELONGATION OF RIVER MOUTH BAR AND FORMATION OF RHYTHMIC PATTERN NEAR VUNG TAU IN VIETNAM

Takaaki UDA, Akio KOBAYASHI, Masumi SERIZAWA, Ayami DATE, Yasuhito NOSHI and Shiho MIYAHARA

The shape of the river mouth bar of the Song Ray River located 29 km ENE of Vung Tau and the shoreline morphology were studied using satellite images and site observation. It is found from the shoreline configuration that southwestward longshore sand transport prevails in this area, resulting in the elongation of river mouth bar of the left bank, and the formation of welded bars of rhythmic pattern, which obliquely develop in the southwest direction. The mechanism of these topographic features were investigated.