ベトナム・クアダイ河口周辺海浜における 広域汀線変化

Dinh Van DUY¹・田中 仁²・Nguyen Trung VIET³

¹ 学生会員 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻
(〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)
E-mail: dvduy19@gmail.com

² フェロー会員 東北大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻
(〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)
E-mail: hitoshi.tanaka.b7@tohoku.ac.jp

³ Thuy Loi 大学准教授, Faculty of Civil Engineering (175 Tay Son, Dong Da, Hanoi, Vietnam.)
E-mail: nguyentrungviet@tlu.edu.vn

クアダイ海岸はベトナム中部クアダイ河口の左岸に位置するビーチリゾートである。しかし、近年クアダイ海岸における河口周辺部の侵食が著しく、現地の観光産業にも影響を与えつつある。これまで、Google Earth 画像や衛星画像を用いた侵食の状況に関する検討がなされている。しかし、現地においては使用出来る現地資料が十分ではないことから、評価の精緻化に困難を伴っていた。そこで、まず、現地においてビデオカメラ撮影を設置して継続的なモニタリングを行い、比較的短期間における侵食の進展状況を明らかにした。さらに、これまで実施されている衛星解析範囲に比べて広域の海浜を対象とし、全域で 75km にわたる砂浜の変化傾向を明らかにし、さらに河川からの供給土砂量を考慮することにより、クアダイ河口から周辺海浜を含む領域での土砂収支評価を実施した。

Key Words : Cua Dai River mouth, shoreline change, beach erosion, longshore sediment transport, satellite image analysis

1. はじめに

近年、ベトナム各地の河口部周辺において海岸侵食が顕在化している箇所が多く見られる。このため、このような河口・海浜を対象として、その実態・土砂収支などについて研究がなされている(例えば、Duc et al.¹⁾、東ら²⁾、Thanhら³⁾)。クアダイ海岸もこのような事例の一つである。クアダイ海岸はベトナム中部ツーボン川河口に位置する同国屈指のビーチリゾートである。クアダイ海岸においては近年の汀線後退の後にサンドバック積みやシートパイルによる応急的な対策が取られている。河口部における浚渫や、ダム建設による海域への土砂供給の減少が侵食の原因と言われているが、侵食された土砂の移動先も含めた広域土砂収支が不明である。

田中ら⁴⁾はクアダイ河口周辺のGoogle Earth画像の解析を行い、侵食域が河口から北側に伝搬していること、河口流出土砂の減少がこの侵食の要因であると推測した。また、田中ら⁵⁾はより長期間にわたる衛星画像の分析より、河口前面に形成される河口テラスの非対称性が増し、テラス縁辺部から砂浜への砂の回帰が非対称となり、供

給砂が不足する北側の海浜において侵食が進んでいると結論付けている。その後、Fila et al.⁶⁾も田中ら⁵⁾と同様に河川流出土砂の減少がクアダイ海岸における侵食の要因であるとしている。ただし、これらの既往研究においては河口部左岸の5km程度の汀線変動のみを議論しており、広域漂砂系における砂移動の挙動、さらには右岸も含めた漂砂系全域の検討がなされていない。そこで、本研究では、広域の衛星画像などにより、クアダイ海岸における広域土砂収支について検討を行った。

2. 研究対象と収集データ

図-1にクアダイ海岸の位置とその概要を示している。また、以下では図に示す x - y 座標を使用する。「クアダイ」とは図-1に示すツーボン川の河口の名称であり、「大河口」を意味している。ツーボン川の幹川流路延長は約204 kmで、河口から約33 kmで連結されているヴーザー川も合わせた流域面積は10,350 km²である。河口から約30 km地点のザオトゥイにおける年平均流量は327 m³/sである。沿

図-1 クアダイ河口の概要と座標の定義

(a) 2014 年 12 月 24 日⁴⁾

(b) 2015 年 12 月 15 日

図-2 クアダイ河口左岸海浜における侵食域の拡大

図-3 クアダイ河口左岸海浜における侵食域の伝搬

岸の潮位差は約0.82 mである⁷⁾。なお、厳密には「クアダイ海岸」とは河口北側約5 kmの砂浜の名称であり、これよりも北側と河口右岸側の海浜は異なる名称を有するが、ここでは河口周辺の砂浜の呼称としてこの名を用いることとする。

ツーボン川流域には2011年に完成したソンチャン2貯水池がある。また、河口部において土砂採取がなされている⁴⁾がそれらの定量的評価はされていない。

現地における侵食の実態を調査するために、2015年9月、12月に現地調査を実施した。また、2015年11月からは、左岸侵食域のほぼ北側端部である図-1の $x=-4,500$ mの箇所にビデオカメラを設置し、海浜変形の様子を連続的にモニタリングしている。

さらに、Google Earth画像を解析し、2004年から2014年までの汀線変動を得た。これまで河口部付近に限定された検討がなされてきたが、本研究ではより広域での土

砂収支を検討するために、北側25 km、南側40 kmにわたる検討区間を設定している。河口部には図-1に示すように凸状に突出した汀線が見られる。ただし、Google Earth画像の撮影時刻が不明であるため、通常、潮位補正を行わずに使用されることが多い。そこで、研究対象域に映り込んでいる建物などの影から太陽高度・太陽方位を求め、これから撮影時刻を推定した(Hoangら⁸⁾)。この結果、潮位補正を行い、汀線判読の精度向上を図った。また、汀線に中規模のカスプ地形が認められる時期があったため、空間的な移動平均を施すことにより平滑化された汀線位置を得た。

3. 現地調査結果

現地観測の結果、図-2に示すようにクアダイ河口左岸侵食部においては、侵食域の先端部が認められた。現地において、2014年12月には図-2(a)の破線位置に侵食域の先端部が見られた。また、2015年12月には図-2(b)の破線位置に侵食域先端部が位置することが現地において確認された。この約1年間の間に侵食域は約150 m北に進んでいる。これらの実測値に加え、Google Earthから得られる同様な観測値も含め、侵食域先端位置 x_e の経時変化を図-3に示した。前報³⁾においても同様な図を示したが、座標の定義が異なるために x_e の値が幾分異なっている。近年、対策工としてシートパールやサンドバックの設置がなされており、図-3にはその様な人為的な攪

乱も含まれるが、およそ 300 m/年程度の速度で侵食域が北に向かって伝搬していることが分かった．一方で、河口右岸においては汀線の後退は見られない．このように、海浜の変形は河口をはさんで左右岸で非対称である．

4. ビデオ画像から得られる海浜変形

図-4はビデオから得られた映像の静止画であり、代表的な地形の変化の様子を示している．図-4(a)では深刻な侵食は見られず 観光客のパラソルが見られる ただし、写真右上の位置まで侵食域が広がっていることから、重機によりサンドバックの設置が行われている．図-4(b)において汀線に対して斜めに入射する波浪が顕著であり、

北側に向かう漂砂が発生しているものと推測される．浜崖の形成され始めており、その後、図-4(c)においては海水浴客が腰を下ろすほどの段差が形成されている．11月25日（図-4(d)）、26日（図-4(e)）にかけて汀線の後退が進み、パラソルを立てる場所が失われている．このような侵食の進展の途上で、写真奥から手前に向けてサンドバックと竹を用いた護岸が設置されている．図-4(e)においては、この護岸から手前側にかけて湾曲した汀線が形成され、沿岸漂砂の不連続による汀線の後退であると推測される．このような侵食への対策として、現地で入手が容易な竹を用いて、図-4(f)の様な波消のための柵を設けて現在に至っている．図-2(b)に示した浜崖は図-4(f)の時点から6日後にあたり、侵食域が北上していることを物語っている．

(a) 2015年11月14日

(b) 2015年11月19日

(c) 2015年11月23日

(d) 2015年11月25日

(e) 2015年11月26日

(f) 2015年12月9日

図4 クアダイ海岸の地形変化

5. Google Earth の解析結果

(1) 汀線変化の傾向

以上の様にクアダイ河口左岸砂浜における侵食傾向は明らかになったが、漂砂系全体での土砂の収支は明かではない。また、前述の様に河口をはさんで左右岸で非対称な変化を示しており、右岸には侵食が見られないことも特異な現象である。そこで、以下では左右岸をカバーする広域にわたる汀線の変動傾向について、Google Earth画像を用いて検討を行った。

図-5は研究対象区間において使用可能なGoogle Earth画像を示している。そこで、左岸については2004年11月10日からの変化、右岸については2011年2月8日からの変化量 Δy を求め、図-6にプロットしている。潮位補正された汀線距離は最大で7 m程度であった。

図-5 クアダイ海岸におけるGoogle Earth画像の撮影時期・撮影エリア

図-6 汀線の変化量 Δy

図-6によれば、侵食域は左岸の-5,000 m $\times$ 0 kmの区間に限定されていることが分かる。河口近くでの約10年間で汀線後退量は170 mにも及ぶ。河口近くの侵食域にはseawallが建設されており、それ以上の汀線後退は生じていない。

一方、河口左岸の x 5,000 mの箇所では20 m程度の一様な汀線前進が見られる。これより、左岸において漂砂の卓越方向は北向きであると言える。一方、右岸においては、0 m $\times$ 5,000 kmの区間において顕著な堆積が見られるが、それより先には汀線の変化がほとんど見られない。これより、河川より流出した砂は右岸側により多く供給されているものと推測される。田中ら⁵⁾は河口前面のテラス地形の非対称性から同様な結論を得ている。また、波向きによってもこのような非対称性が生じる可能性がある。

図-7 クアダイ海岸における汀線変化速度

(2) 汀線の変化率

図-7は図-6に示された汀線データに対して最小二乗法を当てはめ、これから求めた年間の汀線変化速度を表す。なお、右岸においては使用可能な映像が2つのみの区間があり、その算定結果を破線で示している。右岸右端部実線との連続性が見られず、精度は不十分であると考えられるので、代わりに線形補間を黒線で図示した。

左岸の侵食域では15 m/年にも及ぶ汀線後退が見られるが、それ以外の左岸汀線は前進している。一方、右岸においては河口の周辺で汀線前進が見られるが、それ以外では大きな汀線変動は見られない。このように、河川流出土砂の左右岸への供給は非対称性を示している。

ワンラインモデルにおいて河口部のモデル化を行う際には、河口左右岸への均等な土砂供給を境界条件として与えることが多い(例えば、Larson et al.⁹⁾)。しかし、図-7によれば現在のクアダイ川河口においては、このような左右対象な河口デルタの発達とはなっていないことを示している。田中ら⁵⁾は河口テラス地形の非対称性により、左右非対称な砂の回帰過程がもたらされると推測している。また、ベトナム沿岸においては冬季に北東モンスーンが卓越しており、このことも非対称なデルタの形成に寄与しているものと考えられる。今後、波浪データの蓄積により、より定量的な検討が求められる。

(3) 土砂収支の評価

図-7の汀線変化速度に漂砂移動高さ(=バーム高さ D_B + 移動限界深さ D_C)を乗ずることにより、年間あたりの土砂変化量を得る。ここでは、Fila et al.⁶⁾を参考に $D_B=2$ m、 $D_C=8$ mとした。これにより、左岸では堆積が390,000 m³/年、侵食が320,000 m³/年となり、差し引きで70,000 m³/年の堆積となる。右岸については不明確な点もあるが、図-7の黒破線の線形補間値を用いて520,000 m³/年の堆積となる。これより、沿岸域での堆積総量は590,000 m³/年

となる。一方、河川供給土砂としてはFila et al.⁶⁾により、異なる3つの手法から600,000 m³/年、440,000 m³/年、390,000 m³/年の推定値が得られており、特に第一の推定値は上記海浜堆積量と比較的良好な対応を示している。

上述の様に左岸においてトータルで見ると堆積ではあるが、現在でも侵食域が北側に拡大し続けている。河川供給土砂の減少に対する河口デルタ変形を表現するOne-line modelの解析解¹⁰⁾によれば、河口周辺の侵食された砂が北側に輸送され、図-7の結果と符合している。このことから、左岸の土砂収支がプラスであっても、不可逆的な河口部の侵食が進行していると考えられ、今後、対策の検討が求められる。

6. おわりに

ベトナム・クアダイ海岸におけるGoogle Earth画像をもとに、土砂収支の評価を行った。その結果、海浜における砂の増加量は河川からの供給量の推定値とほぼ一致する値となった。ただし、河口の左右岸において供給土砂量に非対称性が見られた。今後、河口テラスからの砂の回帰過程、入射の波向きなどを考慮したより定量的な検討が必要である。

参考文献

- 1) Duc, D. M., Nhuan, M. T. and Ngoi, C. V.: An analysis of coastal erosion in the tropical rapid accretion delta of the Red River, Vietnam, *Journal of Asian Earth Sciences*, Vol.43-1, pp.98-109, 2012.
- 2) 東 峻太, 田島芳満, Kavinda Gunasekara, Nguyen Thanh Hung, Chi Le Hanh: Red Riverに隣接するMa River 河口部沿岸域における土砂収支の解明, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 71, No. 2, pp.1715-1720, 2015.

- 3) Tran Minh Thanh , 田中 仁 , Nguyen Trung Viet , 三戸部佑太・Vo Cong Hoang: 冬季モンスーン波浪の卓越を考慮したニャチャン海岸における沿岸漂砂量評価, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.71, No.2, I_1681-I_1686, 2015.
- 4) 田中 仁 ,Nguyen Trung Viet ,Vo Cong Hoang ,Duy Dinh Van: 中部ベトナム・クアダイ海岸における近年の大規模侵食, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.71, No.2, pp.I_449-I_454, 2015.
- 5) 田中 仁 ,Vo Cong Hoang ,Nguyen Trung Viet ,Dinh Van Duy: ベトナム中部クアダイ海岸に形成された河口テラスと大規模海岸侵食との関連, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.72, No.4, pp. I_361-I_366, 2016.
- 6) Fila, J., Kampen, M., Knulst, K., Marijnissen, Noort, R.V.: Coastal erosion Hoi An, *Multidisciplinary Project Report, Delft University of Technology*, 168pp, 2016.
- 7) Lam, N. T.: Hydrodynamics and morphodynamics of a seasonally forced tidal inlet system, *Ph.D. Thesis, Delft University of Technology*, 149p, 2009.
- 8) Vo Cong Hoang , 田中 仁 , 三戸部佑太 ,Dinh Van Duy: Google Earth を用いた汀線判読のための潮位補正手法, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.72, 2016.(印刷中)
- 9) Larson, M., Hanson, H. and Kraus, N. C.: Analytical solutions of the one-line model of shoreline change, *Technical Report CERC-87-15, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station*, 72p, 1987.
- 10) Hoang, V. C., Viet, N. T. and Tanaka, H.: Morphological change on Cua Dai Beach: Part II theoretical analysis, 東北地域災害研究 , 第 51 巻 , pp.87-92 , 2015.

(2016.2.4 受付)

SHORELINE CHANGES IN A WIDE AREA ON BOTH SIDES OF THE CUA DAI RIVER MOUTH, VIETNAM

Dinh Van DUY, Hitoshi TANAKA and Nguyen Trung VIET

Shoreline change rate has been used to discuss the distribution of sand input from the Thu Bon River. According to the rate of shoreline change, the asymmetric distribution of sediment input from the river at the Cua Dai River mouth, Vietnam has been revealed. Transporting of sediment to the north by wave-driven longshore currents together with asymmetric distribution of sand supplied from Thu Bon River has been causing severe erosion on the left beach of the Cua Dai River mouth. In the future, more detailed analysis will be carried out by accumulating wave data in order to quantify the mechanism of this asymmetric behavior of sediment and resulting morphology change around the Cua Dai River mouth.