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

東 峻太¹・田島 芳満²・Kavinda GUNASEKARA¹
Nguyen Thanh HUNG³・Chi Le HANH⁴

¹学生会員 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷七丁目3-1)
E-mail:r-east@coastal.t.u-tokyo.ac.jp

²正会員 東京大学教授 工学系研究科社会基盤学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷七丁目3-1)
E-mail:yoshitaji@coastal.t.u-tokyo.ac.jp

³Key laboratory of River and Coast. eng. Vietnam Academy of Water Resources, Ministry of Research and Education

⁴General Planning Department, Vietnam Academy of Water Resources, Ministry of Research and Education

ベトナム北部に注ぐRed Riverに隣接するMa Riverの河口部沿岸域では、近年侵食問題に直面している。本研究では、まず対象海岸線の表層土砂試料に対し粒径分析、粒子群の組成分析、長石粒子の熱ルミネセンス信号の分析を実施し、両河川の土砂供給の影響範囲の推定を試みた。次にMa River河口域に注目し、衛星画像に基づく汀線および河口部における水位変動の特性を分析し、汀線変化モデルによる再現を通じて土砂動態の解明を試みた。その結果、Ma River河口部沿岸域での侵食に対するRed riverの影響は小さいこと、河口からの土砂供給量および沿岸漂砂量は比較的小さく、特に河口と南部の岩礁に挟まれた領域ではポケットビーチ化して平衡状態に近づきつつあることなどが分かった。

Key Words : *sediment transport, erosion, thermoluminescence, shoreline change, Vietnam, Ma river*

1. はじめに

ベトナム北部沿岸域では、Red Riverの河口域周辺を中心に海岸侵食が深刻な問題となっており、人々の暮らしの安全性や産業の安定性に大きな影響を及ぼしている。当沿岸域には、Red Riverの本流、支流に加え、流域面積が比較的小さい複数の河川の河口が位置しており、複雑な土砂収支特性を呈している。本研究で特に着目するMa River河口域についても海岸侵食が顕在化してきているが、Ma River河口部も大規模河川Red Riverの河口南側約85kmの地点に位置しており、沿岸部での土砂収支においてRed Riverによる影響を強く受けている可能性も無視できない。

大河川Red Riverの土砂供給と河口周辺の流速による地形変化実態の解明の研究¹⁾など、Red River河口部における土砂収支や海岸侵食については多くの研究がなされているが、近接した中小河川への土砂移動による影響を考慮した研究事例は少ない。本研究では、流砂系の底質分析と汀線変化の分析、さらに汀線変化モデルによる再現計算などを通じ、複数の河口部からの土砂供給による影響が推察されるベトナム北部沿岸域、特にMa River河口部周辺における土砂動態を明らかにすることを目的とする。

2. 流砂系の底質分析

(1) 試料採取

2014年7月にベトナム北部地域のRed River河口南部からMa River河口南部における海岸・河川を対象に図-1に示す19 地点で表層堆積物の採取し、以下の分析を行った。図-1には後述する粒度分析、黒色粒子数、TL強度の結果も併せて示している。

(2) 粒度分析

海浜を形成する砂粒子の粒径と、土砂供給源となる河口からの沿岸方向の距離には相関関係がある(たとえば大村・佐藤²⁾)。本研究においても、採取した試料の粒度分布を計測し、得られたD₅₀およびD₉₀の沿岸方向分布を比較した。図-1に示した棒グラフに付した番号は採取地点番号を表している。

Red River河口南側近傍に位置するNo.1～No.4では、D₅₀が100～250 μm、D₉₀も200～400 μmと粒径が比較的小さく、また粒度のばらつきも小さい。一方、Ma River支流河口近傍の海岸で採取したNo.7ではD₅₀およびD₉₀ともに調査対象地点内では最大値をとり、Ma River本流河口No.11及

図-1 試料採取地点位置(左)と砂粒子特性の沿岸分布(i)D50及びD90, (ii)黒色砂粒子数, (iii)TL強度

び近傍の海岸No.12においても特に D_{90} が極大値を示し、そこから沿岸南北方向に D_{90} が小さくなっていることが分かる。特にMa River河口周辺の沿岸域で計測された D_{50} および D_{90} の粒径の粒子は、Red River河口部近傍では認められなかったことから、少なくともこれらの比較的大きな粒径の底質粒子はMa River由来のものであることが推察される。また南部のNo.17以降の粒径もNo.16に比べて大きくなっている地点があり、Ma Riverの本流、支流を含め周辺の小規模河川からは、特に出水時に比較的大きな底質が海岸部に供給されていることが推察される。

(3) 組成分析

次に各試料に含まれていた堆積岩由来と推定される黒色砂粒子は、その粒度や含有率が採取地点によって顕著に異なっていることが目視により確認できたため、以下の手順を用いて各試料における黒色粒子を抽出し、その沿岸分布を比較した。

まずクリスタルテープに粒子を均質に貼り付け、その表面をスキャナーで撮影した。解像度は600 dpi (画素サイズは $42.3 \mu\text{m}$)とし、このうち図-2(a)に示す1000画素四方に相当する 42.3 mm 四方の画像を分析対象とした。次に抽出した画像から、RGB値に基づき黒色粒子を抽出するための判定条件を定めた。まず地域の偏りを避けた9地点(No.2, 3, 7, 9, 10, 11, 16, 18, 19)を選定し、目視で選別した黒色粒子とそれ以外のサンプルのRGB値を抽出し、それらの比較から、黒色粒子の判定条件をRGB値の関数として定めた。定めた判定条件により抽出した黒色粒子の分布を示した例を図-2(b)に示す。次にこれら黒色粒子

図-2 抽出画像と黒色砂粒子の判定

と判定された画素で、かつ互いに隣り合うものをグループ化し、それぞれのグループの画素数が2個以上8個未満のグループ(粒子)の数のみをカウントした。これにより、黒色粒子でかつ特定の大きさの粒子のみを対象にカウントすることになる。単一画素の一边の長さが $42.3 \mu\text{m}$ であるので、円形で近似した場合の砂粒子の粒径は、それぞれ $67.5 \mu\text{m}$ 、 $135 \mu\text{m}$ に相当する。Red River河口近傍の海岸線では、 D_{90} でも $200 \mu\text{m}$ であったことから、ここで指定した粒径の範囲の黒色砂粒子の沿岸方向分布を比較することにより、Red River由来の比較的大きな砂粒子によるMa River河口部周辺への影響を推察することが可能になる。

以上の操作により得られた粒子数(1000 pixel四方内)の分布(図-1(ii))を見ると、比較的大きな黒色粒子の含有数はRed River河口近傍では1000程度で推移しているのに対し、サンプル地点No.6を境に500程度まで急激に減少している。以上より、粒径の比較結果と同様に、黒色粒子の含有数の比較においてもRed River河口近傍とMa River河口近傍では、その特性が大きく異なることが分かった。

(4) 熱ルミネッセンス分析

採取した試料に対して、砂粒子の露光状態を示す熱ルミネッセンス強度を計測した。

a) ルミネッセンスの原理

地表面下の石英や長石は自然放射線による影響を受けないために、過去に自然放射線による損傷で作り出された不対電子が励起状態で維持されている。熱や光刺激を受けると基底状態に戻り、減少したエネルギー分だけ発光する現象が起きる。この光をルミネッセンスといい、熱刺激によって生じる光を熱ルミネッセンス(TL: Thermo Luminescence)という。砂粒子の場合、不対電子は埋設期間中に増加し、土砂移動中に露光することで減少するが、TL信号は露光による減少速度が遅く信号強度がほぼ0になるには数日以上要する。Rink³⁾の研究では、河口から海岸に沿って土砂が運搬される場合、土砂の供給源である河口から離れるに従ってTL強度が減少することが示されている。同様の傾向が岸本ら⁴⁾、田島ら⁵⁾によっても確認されており、TL値の沿岸分布による漂砂移動方向推定手法の妥当性が検証されている。

b) 測定方法

TL測定には一般に長石、もしくは石英が用いられるが、長石は石英に比べフッ化水素酸での前処理を必要としないために手順が煩雑でない点、TL信号強度が大きく被爆量が安定している点などにおいて、処理・測定に優れる⁴⁾、このため、本研究でもカリ長石を用いてTL測定を実施した。また粒径が小さいほど測定のばらつきが小さい⁶⁾ことから試料は180~500 μm のものを抽出し、過酸化水素水による有機物除去、塩酸による炭酸塩除去、暗所常温乾燥をおこなった上で、ふるい分けによる180~300 μm の試料抽出した。その後カリ長石抽出のための重液分離、暗所常温乾燥という順に前処理をおこなった。測定用ディスクの作成の際にはTL信号に影響のないグリスを用いてmono-layer方式でTL測定用ディスクの中央に砂粒子を固定した。さらにDelay testとPreheat testを用いて熱や光を加えなくても消える不安定な信号を消すための事前加熱温度と時間の決定をおこなった。

以下に本研究でのTL信号の測定条件をまとめる。

- (1) 予熱処理(preheat): 200℃10秒, 温度上昇率10℃/s
- (2) TL測定: 0-500℃, 温度上昇率5℃/s
- (3) 加熱: 450℃30秒
- (4) 人工放射線(test dose)照射: β 線60秒
- (5) 予熱処理(cut heat): 200℃10秒, 温度上昇率10℃/s
- (6) 基準TL測定: 0-500℃, 温度上昇率5℃/s

c) 測定結果

測定結果(図-1(iii))よりRed RiverとMa River河口近傍の海岸(No.1, No.12)で正規化TL信号強度が極大となり、そこ

から南北に小さくなっていくことが分かる。一方でMa River支流河口近傍のNo.7ではTL強度が小さくなっており、支流から沿岸部への土砂供給量が少ないことが推定される。またTL値の沿岸方向の傾きに注目すると、Ma River河口から南方向への傾きが当該地点の中では最も大きく、Red River河口から南向きの傾きは相対的に小さい。これは、Ma RiverよりもRed River河口部において沿岸漂砂の移動速度が相対的に大きいことを示唆している。

以上、採取したサンプルの粒径、黒色粒子の含有率、TL値の沿岸方向分布の比較から、Ma River河口域におけるRed Riverの影響力は小さいこと、Ma River河口域では、Red River河口域よりも沿岸漂砂移動が相対的に活発ではないことなどが推察された。これらの結果を踏まえ、次節以降ではRed Riverの影響を無視してMa River河口域の汀線変化状況を分析することとした。

3. 衛星データに基づく汀線変化の分析

Ma River河口域における汀線変動の実態を把握するため、図-3に示した領域A、B、Cの海岸線を対象に衛星画像から汀線位置を抽出し比較した。

表-1に示したそれぞれの衛星データから、目視により水際線位置を抽出し、図-3に示した白の基準線Yの各点から引いた法線と抽出した汀線との交点までの距離を、それぞれ記録した。基準線は、全期間の平均的な汀線位置とほぼ平行で滑らかな線として設定した。

図-3 汀線変化分析の対象地域

表-1 解析に用いた衛星データ

番号	衛星名	衛星撮影日	セルサイズ(m)
1	Landsat 7	2000年4月19日	15
2	Landsat 5	2003年5月6日	30
3	Landsat 7	2005年7月6日	15
4	Ikonos	2006年9月5日	0.8
5	Landsat 7	2007年9月21日	15
6	WorldView-2	2008年7月3日	0.5
7	Landsat 7	2009年9月19日	15
8	QuickBird	2011年8月29日	0.6
9	WorldView-1	2011年11月19日	0.5
10	WorldView-2	2012年8月31日	0.5
11	GeoEye-1	2012年10月13日	0.5
12	Pleiades-1	2013年12月31日	0.5
13	Pleiades-2	2014年5月24日	0.5

以上により、全ての衛星データから抽出した汀線位置が同一の基準線からの距離のデータとして抽出できた。

ここでは、2000年4月の衛星データに基づく汀線位置と、それぞれの時期の汀線位置との差分を比較することにより、2000年4月から汀線変化量の時空間変化を比較した。図-4は図-3示した領域A、B、Cにおける汀線変化量の比較を表す。横軸は基準線に沿った沿岸方向距離で、縦軸は2000年4月からの汀線変化量を表す。また図-5には、領域Bの4測線($Y=0.5, 1, 5, 5.5$ km)における汀線変化量の時間変化と、衛星データ取得時におけるMa River河口部での潮位を示す。衛星データから抽出した汀線位置に対して潮位差による補正は行っていないが、図-5に見られる様にデータ取得時の潮位のばらつきは最大でも1.5 m弱程度であった。代表的な汀線付近の勾配を1/20程度とすると、潮位による汀線位置の抽出誤差は最大で30 m程度であると推定される。

Aでは2000年から2007年の間に北側で30 m程度、南側で10 m程度の汀線後退が認められるが、2007年以降、汀線の変化が認められない平衡状態となっている。Cでは場所により10 m程度の汀線前進・後退が認められるが、対象の15年間を通して見ると2000年の汀線位置と大きく変わらない。一方、BではMa River河口部近傍で2000年から2007年の間に70 m程度の汀線後退が観測される。一方で、2007年以降は2014年までに20 m程度後退している程度であり、侵食傾向が軽減している。またBの南側では2000年から2005年の間に10 m程度の汀線後退が観測されるが、2007年以降は堆積傾向に転じ、2014年の時点で2000年に比べて10 m程度前進していることが認められる。堆積傾向に転じた理由としては、南側には岩礁地域が存在し、侵食傾向にあった2000年頃には岩礁が突堤の役割を果たして、沿岸漂砂をトラップしたことなどが要因として考えられる。来襲波の季節変動や年変動、河口からの土砂供給等により、沿岸漂砂量も変動することが想定されるが、このような条件のもとで緩やかな侵食および堆

図-4 各領域における汀線変化量
(i)領域 A, (ii)領域 B, (iii)領域 C

図-5 領域 B の各地点での汀線変化量と (衛星画像取得時の潮位)

積の傾向を示す、岩礁付近では沿岸漂砂移動が比較的小さく、静的平衡状態に近いことが推察される。

4. Ma Riverにおける流出特性の分析

ベトナム北部では、降雨量の季節変化に伴い河川流量

も大きく変動するため、河口部から供給される土砂量についても大きな季節変動を伴うことが想定される。たとえば田口ら⁷⁾は、メグナ川河口部周辺の地形変動を分析し、沿岸部の侵食・堆積特性が、雨季と乾季に伴う流域の降雨量と強い相関があることを示しており、和田ら⁸⁾は天竜川河口部における深浅測量データから、河口テラスの土砂量の推移と出水履歴との関係を分析している。

本節では、Ma River河口域周辺における水位データを分析し、Ma Riverの流出特性を把握するとともに、河口近傍における汀線変化量との関係を分析する。

まず、Ma River河口から約4 km上流に位置する水位の観測データの分析を行った。2000年1月から2014年8月の時々刻々の水位データを平均したものに対して調和解析により算出した潮位成分を除去し、河川流量による水位変動成分の抽出を試みた。河道内の地形変化等に伴う潮汐応答への影響を勘案し、各時間における調和解析には前後の5日間のみの毎時水変動データのみを対象とし、主要10階調の成分を最小二乗法により算定して潮汐成分を推定した⁹⁾。さらに得られた水位変動と、最も汀線変化が激しいであろう河口近傍の地点の変化量を比較して季節変動との相関を見た。図-6は各年の水面変動量 η_r とMa River本流河口から500 m, 600 m, 700 mの位置での汀線位置の変化量とを比較したところ、比較的水位変動の少ない4, 5月の変化量と雨季の影響を受け始める10月近くの変化量に大きな違いはなく、河川の季節変動特性と汀線変化量に顕著な相関は認められなかった。

5. 汀線変化モデルによる土砂収支の分析

前節での比較より、河川流量の季節変動と汀線変化には有意な相関が見られず、出水時における土砂供給量の低減による影響が推察される。本節では顕著な侵食傾向が見られたMa River河口部南側の領域Bに簡便な汀線変化モデルを適用し、土砂収支の分析を試みる。

ここでは長期的な汀線変化に焦点をあて、代表的な汀

線位置として2014年の汀線位置を選定し、その法線方向から角度 α で一様に傾けた波向を汀線変化モデルに用いることとした。また河口部における土砂供給量は境界条件として汀線変化モデルに適用したが、その値は潮汐成分を除去した河口水位に比例定数を乗じた値として与え、雨季乾季による時々刻々の土砂供給量の変化を考慮した。以上の α や比例定数に加え、海底勾配、移動限界水深、漂砂量係数をそれぞれ変化させながら網羅的な再現計算を行い、実際の汀線変化を最適に再現するパラメタの組み合わせを推定した。その結果、 $\alpha=0.56^\circ$ 、海底勾配3/100、移動限界水深6.0 m、漂砂量係数が0.91となり、一般的に用いられる値と妥当に整合した。河口からの土砂供給量については、ほぼゼロとした計算条件において最適な再現精度が得られた。これは前述した出水の履歴と河口近傍での汀線変化に相関がなかったこととも符合する結果であるが、河口からの土砂供給量の推定についてはデータの蓄積と合わせより詳細な検討が必要であると考えられる。

再現計算における初期汀線は2000年の汀線とし、図-7には図-4(ii)と同様の、2000年から2014年までの汀線変化量の沿岸方向分布を示す。図-4(ii)と同様に河口近傍での侵食傾向、右側岩礁地域での堆積傾向を妥当に再現できており、河口からの土砂供給が非常に小さいこと、河口近傍では、過去に張り出した汀線形状が後退することによって深刻な侵食が生じているものの、2014年時点では南側の岩礁による影響もあり、平衡状態に近づきつつあることなどが推察された。

6. 結論

Red River河口南部からMa River河口南部参考において、流砂系の底質分析や汀線変化分析などにより、漂砂源とその影響範囲、土砂移動の卓越方向、汀線変化過程など、広域的な土砂動態を明らかにした。主要な結論は以下の通りである。

図-6 調和解析適用後の水位変動の影響と汀線変化

図-7 汀線変化モデルによる領域Bの再現結果

(1) Ma River 河口近傍ではRed Riverからの供給土砂の影響が比較的小さいことが推察された。(2) 沿岸漂砂はMa River河口から南北に移動しているものの、Red River河口部周辺などに比べると沿岸漂砂移動はそれほど活発ではないことが推察された。(3) 潮汐を除去した河川水位は、流域の降雨量から2~3ヶ月位相が遅れて季節的な変動を示した。(4) Ma River河口南側では顕著な汀線後退が見られたが、季節変動による顕著な影響は見られなかった。(5) Ma River河口からやや離れた海岸線では、沿岸漂砂がそれほど活発ではなく、特にMa River河口南側の海岸線では岩礁の影響によってポケットビーチ化し、緩やかな静的平衡状態に移行しつつあることが推察された。

本研究はAPRISAF(アジア太平洋宇宙機関会議)の国際協力の枠組の下で実施されたものであり、関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) D.S. van Maren: Water and sediment dynamics in the Red River mouth and adjacent coastal zone, *Journal of Asian Earth Sciences*, pp.508-522, 2007.
- 2) 大村森香・佐藤慎司: 海水準変動を踏まえた九頭竜川・加越海岸流砂系における土砂移動実態の解明, 土木学会論文集 B2(海岸工学), vol.69, No.2, pp. I_681-I_685, 2013.
- 3) Rink W.J.: Quartz luminescence as a light-sensitive indicator of sediment transport in coastal processes, *Journal of Coastal Research* 15(1), pp.148-154, 1999.
- 4) 岸本瞬・劉海江・高川智博・白井正明・佐藤慎司: 長石の熱ルミネッセンス特性に基づく流砂系の土砂移動の分析, 海岸工学論文集, 第 55 巻, pp.686-690, 2008.
- 5) 田島芳満・望月翔平・舟竹祥太郎・Wickramaarachchi Bandula・Samalakoon Lal・祖父江真一・佐藤慎司: 衛星データおよび砂粒子の熱ルミネッセンスの分析に基づくスリランカ西海岸における沿岸漂砂環境の解明, 土木学科論文集 B2(海岸工学), vol.67, No.2, pp.I_631-I_635, 2011.
- 6) Geoffrey A. T. Duller: Single-grain optical dating of Quaternary sediments: why aliquot size matters in luminescence dating, *Boreas*, Vol. 37, pp. 589-612, 2008.
- 7) 田口裕介・田島芳満・Mohammad A. Hussain.: 衛星監視に基づくメグナ川河口周辺地形の大規模変形特性の解明, 土木学会論文集 B2(海岸工学), vol.69, No.2, pp.I_636-I_636, 2013.
- 8) 和田麻美・田島芳満・佐藤慎司: 天竜川河口テラス地形と沿岸域への土砂供給過程の長期変化, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 第 66 巻, pp.611-615, 2010.
- 9) 村上和男: 最小二乗法による潮汐・潮流の調和分解とその精度, 港湾技術研究所資料 No.369, 1981.

(2015.3.18 受付)

INVESTIGATION OF SEDIMENT TRANSPORT CHARACTERISTICS ALONG THE COAST OF MA RIVER MOUTH ADJACENT TO THE RED RIVER MOUTH

Ryota HIGASHI, Yoshimitsu TAJIMA, Kavinda GUNASEKARA,
Nguyen Thanh HUNG and Chi Le HANH

Located around 8.5km south from the Red River mouth, the coast around the Ma River now faces to serious coastal erosion problems. While many studies have focused on sediment budgets and resulting coastal erosion around the Red River, little studies focuses on the local coastal erosion around the Ma river where may be affected by the erosion around the Red river mouth. This study aims to investigate mechanisms of coastal erosion around the Ma river mouth through analysis of grain size, color, thermoluminescence, satellite data and shoreline change model. Findings of these analysis are: (i) the Red river has relatively less influence on the coastal erosion around the Ma River mouth; (ii) sediment supply from the Ma river was decreased and the shoreline change around the river mouth shows little impact of seasonal changes of river discharge rates; the beach on the south side of the Ma River mouth is approaching to equilibrium pocket beach between rocky cliff and the river mouth.