ベトナム北部ハイハウ海岸の大規模侵食の経過とその分析

Analysis of a Large-scale Erosion in Hai Hau Coast, Northern Vietnam

Mai Thi Thu Thuy¹・長塚信二²・西畑 剛³・武若 聡⁴
三村信男⁵・安原一哉⁶・Do Minh Duc⁷

MAI Thi Thu Thuy, Shinji NAGATSUKA, Takeshi NISHIHATA, Satoshi TAKEWAKA
Nobuo MIMURA, Kazuya YASUHARA and DO Minh Duc

The coastal area of Hai Hau district, located in the northeast Vietnam, has a 30 km-long shoreline, which is facing serious erosion. The area is part of the Red River Delta and is a depositional land. From the beginning of 20th century, erosion became prominent in the area and huge efforts have been put in the last 50 years. The damages on local activities were characterized through interviews with local government officers and residents. Remote sensing data analyses and 1-line numerical modeling have been applied to trace and reproduce the processes of shoreline recession. Incident waves were calculated based on 20 years wave data (1989-2008) at an offshore grid point given by the European Center Medium-Range Weather Forecast. The calculated shoreline change agreed fairly well with the result of remote sensing data analyses.

1. はじめに

紅河は中国雲南省から発し、ベトナム北部を流れ、11の河口からトンキン湾に流れ込む大河川である。紅河デルタはベトナム北部に位置し、全体面積がおおよそ15,000 km²、約9千年前の完新世初期から発達してきた。紅河デルタの南西側に位置しているハイハウ地区は、記録によると1430～1440年当時に先人が海の中に堤防を建設したことにより形成された。そのため、「ハイハウ」(海の後)という地名が付けられた。1010年にハノイがベトナムの首都になってから現在までの1000年間、ハイハウ地区を含む紅河デルタは文化、国土防衛、農業文明における大事な役割を果たしてきた(例えば、春山・Vu, 2001)。しかし、15世紀に形成され始めてから19世紀まで常に堆積し、海に向かって広がってきたこの地域(図-1(a))が、1900年頃から侵食傾向に転じた。

今まで、この地域の侵食問題をめぐる研究は多くなされてきたが、基礎となる実測データがほとんど無いことが最大の隘路となり、過去から現在に続く汀線後退を再現し原因解明するのに困難であった。本研究では、衛星データより判読した1989年から2008年にかけての汀線変化を1Lineモデルによって再現した。当該期間中の沖波波浪をECMWF(European Centre For Medium-Range

Weather Forecast)データから抽出し、汀線変化解析を行った。それとともに、現地踏査によって、侵食の経過と現状、その地域への影響を住民、行政職員などからヒアリングした。

2. 現地踏査

(1) 侵食の現状

2011年9月と2012年2月の2回、ハイハウ海岸における現地調査を実施した。Ducら(2011)は1990年代後半まではハイハウ海岸中部の汀線後退が一番顕著であったことを報告しているが(図-1)、現在では南端にあるLach河口付近のThinh Long海岸が堆積から侵食に変化したことが特徴的である。その具体的な状況は、2011年9月の現地調査時ではまだ居住可能な状態であったのに対し(図-2(a))、2012年2月の調査時には波の影響で家の基礎が壊れ、居住不可能な状態であった(図-2(b))。

この地域では20世紀に2度堤防が崩壊し、現在あるものは3代目の堤防である(図-3(a))。前代の堤防がある場所でも、危険な状態になると次の堤防の築堤が始められた。基本的な堤体構造は、まず現地発生土で土提をつくり、その上にジオテキスタイルを被せ、礫の層を敷いて、最後にコンクリートの被覆ブロック(サイズ約0.6 m×0.6 m)を載せたものである(図-3(b))。現在の堤防は建設されてから2、3年であるにもかかわらず、局所的な陥没が調査で見られた。一番陥没が進んでいるのはハイハウ南部のThinh Long海岸である。2011年の調査で見えられた陥没(図-4(a))は、その後鉄網で包まれた石ブロックで応急補修されたにもかかわらず、2012年の調査では陥没が収まらない上、更に周辺に新しくできた陥没が

1 学生会員	茨城大学 理工学研究科
2 学生会員	筑波大学 システム情報工学研究科
3 正会員 博(工)	五洋建設(株) 技術研究所
4 正会員 工博	筑波大学 教授 システム情報系
5 正会員 工博	茨城大学 教授 広域水圏環境科学教育研究センター
6 国際会員 工博	茨城大学 名誉教授
7 工博	ハノイ科学大学 准教授 地盤工学科

図-1 (a) 紅河デルタと過去 10 (X) 世紀, 15 (XV) 世紀と 19 (XIX) 世紀の汀線位置. (b) 1905 年から 2001 年までのハイハウ海岸の汀線後退 (Duc ら, 2011) .

図-2 Thinh Long 海岸の侵食.

図-3 ハイハウ海岸堤防. (a) 3代目の堤防 (2011/9/21). 枠内写真: 被覆ブロック. (b) 堤防建設の様子 (2012/2/22).

図-4 Thinh Long 海岸堤防の陥没.

見られた (図-4 (b)).

この海岸の侵食と堤防崩壊の原因の一つは台風である。ベトナムでは Beaufort 風力階級に基づいて台風が 12 段階に分類されており、過去 50 年間に、レベル 10 以上の台風 (SALLY, DAMREY など) が 10 回この地域に襲った。台風が来襲する季節は 6 月～9 月であり、同時に 4～5 m の高潮が発生する。

(2) 地域への影響

侵食による地域への影響を把握するために、2011 年 9

月にハイハウ海岸の 7 箇所で 15 名 (30 代: 6 名, 40 代: 2 名, 50 代: 3 名, 60～80 代: 4 名) の住民と行政職員にインタビューを実施し、現地住民の記憶と実感を調査した。主な回答は以下の通りである。漁民の証言によると、この海岸の勾配は極めて緩やかであったが、最近勾配が急になる傾向があり、碎波と波の打ち上げ方にも変化が見られる。別途測定したこの海岸の中央粒径 (D_{50}) は約 0.17 mm であり、海底勾配は約 1/1000 と極めて緩やかである。汀線変化については、50 年間で 1 km 前後の後退があったという回答が多く、かつて米作で豊かだった村が侵食によって海中に沈んだという箇所もあった。また、汀線が後退したため、何回も移住せざるを得なかったという証言もあった。行政職員によると、この地域の伝統的な産業は、漁業、農業 (水田)、塩田による製塩であり、ほぼ自然と海に依存し、いつも不安を抱きつつ、貧困から脱出できる可能性が見当らずに生活してきたという。しかし、近年新しいコンクリート被覆の堤防が出来て多くの人は前より安心できるようになった結果、塩田からより高収入の海老養殖に投資する傾向が顕著に見られた。

このインタビューによって、継続的な汀線後退が地域住民の生活や経済に大きな障害になったこと、近年の新堤防の建設によって安心感とそれに基づく投資意欲が生まれていることが確認された。

3. 衛星データを用いた侵食の分析

(1) 衛星データと汀線位置の読み取り

対象地域の 1989 年から 2010 年までの間に取得された衛星画像と潮位の観測記録 (Balat) を用い、汀線位置の変動を読み取り、近年の侵食状況を調べた。解析には LANDSAT (NASA), ASTER (資源・環境観測解析センター), ALOS (JAXA) の各衛星が取得した、合計 16 の可視画像を用いた。汀線位置を読み取るために図-5 に示

す沿岸座標系を設定した。原点（北緯 20° 11' 46.05", 東経 106° 23' 16.36"）から南西方向に延びる約 30 km の基準線を設け、基準線に直交する方向にある汀線位置を読み取った。この海域は潮位差が 2.5 m 程あるため、潮位が同じ程度の高さにあった時に撮影された画像データを比較して解析する必要がある。衛星データ取得時期と潮位を図-6 に示す。本研究では、衛星データ取得時の潮位が -0.5 m 付近のデータを低潮位グループ、0 m 付近のデータを中潮位グループ、0.5 m 付近のデータを高潮位グループとグループ分けをして解析を行なった。潮位が 1 m 以上の高さにある時に撮影された画像（高高潮位グループ）は、水際が海岸堤防の位置まで到達しており、汀線位置を確認できないため解析対象外とした。なお、2000 年から 2010 年までの潮位の観測記録から求めたハイハウ海岸の平均海面高は 0.37 m であった。

(2) 海岸侵食の経過

中潮位グループの汀線位置の変化を図-7 (a) に、1989 年から 2008 年にかけての汀線位置の後退量の沿岸分布を図-7 (b) に示す。

汀線位置は、1989 年から 2001 年にかけては変動が少ないのに対して、2001 年から 2007 年にかけては大きく後退している領域が多い。汀線位置の後退は北部で局所的に大きく、Ha Lan 河口付近と堤防の決壊があった箇所である。1989 年と 2008 年に取得された画像を図-8 に示す。沿岸位置 2,900 m は Ha Lan 河口付近であり、沿岸位置 8,300 m、10,400 m の付近には 1989 年の時点で汀線位置に海岸

図-5 ハイハウ海岸と沿岸位置座標

図-6 衛星データ取得時の潮位

◆:低潮位, ■:中潮位, ●:高潮位, ○:高高潮位.
ln=LANDSAT. as=ASTER. al=ALOS.

堤防があった。これらは、その後決壊し、一部が海域に取り残されている。堤防が決壊した箇所には新たな堤防が内陸に作られているが、線形は入り組んでおり、この場所は相対的に低地であり、かつては内水を排水する地点になっていたと考えられる。

先に図-7 (a) に示したように、1990 年代に比べて 2000 年代の汀線の後退量が大きかった。図-9 に、潮位グループ毎に、衛星画像取得日が隣接するものから対象域の平均後退量を求めた結果とハイハウ海岸に接近した台風の最低気圧の記録を示した。1996 年から 2002 年の間、2003 年から 2006 年の間に大きな後退があり、この 2 時期には巨大な台風の来襲があった。これらは 1996/08/18 に発生した台風 13 号 (NIKI), 1996/09/06 に発生した台風 16 号 (SALLY), 2005/09/27 に発生した台風 18 号 (DAMREY) (国立情報学研究所, デジタル台風) であり、2005 年の台風 18 号は近年紅河デルタ地帯に襲来した台風で最も勢力が大きかったと言われており、甚大な被害が報告されている。また、2007/09/14 と 2008/12/12 (中潮位グループ) の間に大きな台風の来襲が無いにも関わらず 30 m 程度の平均的な汀線の後退がある。これは図-7 (a) に示したように、河口（沿岸位置 2,900 m）付近の後退が大きく寄与しているため、降雨による河川の出水や台風によらない

図-7 汀線の変化。(a) 汀線位置の変化（中潮位グループ）、(b) 汀線変化量の沿岸分布

図-8 汀線位置の後退が大きかった箇所の変化

図-9 時期別の平均汀線後退量とハイハウ海岸に接近した台風の最低気圧

高波浪などの要因による可能性がある。ハイハウ海岸の汀線位置は、紅河デルタ縮小に伴い徐々に後退していくのに加え、台風や低気圧などの影響で堤防が決壊し、間欠的に大きな後退があると考えられる。

4. 侵食の再現解析

現地で発生している大規模侵食の大局的な構造を把握するため、侵食の再現解析を実施した。解析は衛星データより判明した1989年から2008年にかけての汀線変化をILineモデルによって数値計算した。

(1) 入射波浪の評価

該当期間中の検討地点沖波推算波浪をECMWFデータから抽出し、汀線変化解析の入射位置における波浪に変換した。沖波抽出位置は、北緯19.5度、東経106.5度のハイハウ海岸沖合、抽出期間は1989年以降の約20年間分である。検討海岸では、モンスーンにより、夏場に南西風、冬場に北東風が卓越するため、沖波の波向も季節変動が大きい。そこで広範囲な沖波波向に対し、沖から検討地点近傍20m水深位置 (Iline計算の入射位置) までの波浪場変形解析を実施した。波浪場の評価は、後述するエネルギー平衡方程式を用いた。

事前に実施した沖波波向別および周期別解析結果 (波高比, 波向変化) を用いて、検討期間中の沖波推算波浪時系列を20m水深における波浪時系列へ線形補間した。変換した時系列波浪から田中・灘岡 (1982) と同様の方法でエネルギー平均波浪を求め、汀線変化解析のモデル時系列波浪を図-10の通り設定した (波高0.25 m以下の波を考慮しないため波浪の占有割合は全体で100%未満)。モデル時系列波浪はモンスーン気候に対応する北寄りおよび南寄りの波向系統に大別したが、北寄りの波向頻度が高いことがわかる。

(2) 汀線変化解析

再現計算では、前節で示したモデル時系列波浪に従い、Karlsonn (1969) によるエネルギー平衡方程式を用いた平面波浪場とIlineモデルによる汀線変化を解析した。エネルギー平衡方程式には磯部 (1986) による碎波モデルを組み込み、碎波波高・碎波波向を抽出する。これらを

図-10 モデル時系列波浪 (波向は北が0°)

用いて以下の小笹・Brampton (1979) の沿岸漂砂量式と底質の連続式から汀線変化量を計算する。

$$Q = \frac{(EC_g)_b}{(\rho_s - \rho)g(1 - \lambda)} \times \left(K_1 \sin \alpha_{bs} \cos \alpha_{bs} - K_2 \cot \beta \cos \alpha_{bs} \frac{\partial H_b}{\partial y} \right) \quad \dots (1)$$

$$\frac{\partial x_s}{\partial t} + \frac{1}{D_s} \frac{\partial Q}{\partial y} = 0 \quad \dots (2)$$

ここで、 Q : 沿岸漂砂量, E : 波のエネルギー密度, C_g : 群速度, ρ, ρ_s : 海水と砂の密度, λ : 空隙率 (=0.4), g : 重力加速度 (=9.8 m/s²), K_1, K_2 : 漂砂量パラメータ ($K_1=0.38, K_2=0.62$ とした), α_{bs} : 碎波点における波峰線と汀線のなす角度, $\cot \beta$: 海底勾配の逆数 (現地測量に基づき1000), H_b : 碎波波高, x_s, y : 岸沖及び沿岸座標である。式 (1) は規則波に適用されるので、クラウスら (1981) を用いて有義値に直した。また式 (2) の D_s は漂砂の移動高であるが、Hallermeier (1981) の式より波浪毎に決めた。

観測結果と解析結果を図-11に比較するが、侵食・堆積分布の全体傾向は概ね一致している。また、沿岸漂砂は北から南への輸送が卓越することが分かった (図-12)。これは冬季の北東モンスーンに伴う風波が卓越すること起因しており、Prusak・Szmytkiewicz (2002) 等の指摘とも一致する。Ilineモデル解析範囲内には、Ha Lan河口およびLach河口がある。前者は1955年以降、上流部が本流から切り離されており土砂供給は見込まれず、後

図-11 汀線変化解析結果 (1989年-2008年)

図-12 漂砂量フラックス解析結果 (南向：正)

者は沿岸漂砂卓越方向に対し下手側に位置するため、今回は河川による土砂供給は解析に考慮しなかった。なお沿岸位置8,000 mから10,000 m付近に見られる大規模な汀線後退は、前章で述べた通り、台風来襲に伴う堤防決壊など局所的かつ短期的なイベントに伴うものである。本解析では、こうした事象は再現しないが、エネルギー平均波を用いることで長期にわたる海岸の侵食傾向を把握できたと言える。

5. 結論

本研究では、ベトナム北部紅河デルタの南西方向に位置するハイハウ海岸を対象に、衛星画像判読と1Lineモデルによる再現解析、現地調査を組み合わせ、大規模かつ長期の海岸線変化を検討した。

この期間中の衛星画像を比較したところ、1990年代に比べ、2000年代の後退量が相対的に大きいことが判明した。侵食の時期的な差異は来襲した台風の数や強度からおおよそ説明でき、特に2005年の台風18号による影響が大きいと考えられる。1Lineモデルによる再現解析の結果は、衛星画像による汀線変化と概ね一致した。当海岸では、モンスーンに伴って入射波浪が南北に季節変化すること、それによって沿岸漂砂の移動方向も南北に変化すること、さらに、南向きの漂砂の卓越によって近年の侵食傾向が再現しうることがわかった。これらの結果から、ハイハウ海岸では長期的な侵食傾向と台風による堤防破壊などに伴う局所的な汀線後退が重なっていると理解される。従って、こうした短期的なイベントへの対処に加え、海岸全体の長期的な侵食対策を考える必要がある。

一方、現地での住民インタビューを通じて、海岸侵食の社会的影響が把握できた。この地域の経済活動は主に塩田や水田、漁業であり、海と自然条件に強く依存している。そのため、長期間継続する海岸線後退が生活全般に大きな影響を与えていた。台風来襲時の直接的被害の他に、侵食と堤防の崩壊をおそれて海岸域での積極的な投資が控えられる傾向があった。ところが、近年ハイハウ海岸全体にコンクリート被覆の新しい堤防が建設されたことから、住民の多くが安心感と希望を持つようになったと答えている。しかし、この堤防は設計外力をレベル10の台風としており、また、既に局所的な陥没などが発生しており、長期的な侵食への対応は十分ではない。ハイハウ海岸周辺の人々の希望とは裏腹に、紅河デルタ全体の土砂収支などをふまえた長期的な対応策の検討が必要である。

謝辞：本研究は、科研費基盤研究A「気候変動に起因するベトナム沿岸災害適応策のための統合型モニタリングシステム」(研究代表者：安原一哉)による研究成果の一部をまとめたものである。また、現地調査に当たって、ハノイ科学大学の教員と学生の協力を得た。ここに深謝申し上げる。

参考文献

- 磯部雅彦 (1986)：放物型方程式を用いた不規則波の屈折・回折・碎波変形の計算法，海工論文集，第33巻，pp. 134-138, 1986.
- 小笹博昭・A. H. Brampton (1979)：護岸のある海浜のてい線変化計算，港研報告，第18巻，第4号，pp. 77-104.
- クラウス，N.C.・針貝聰一・久保田進 (1981)：大洗海岸における汀線変化シミュレーション-防波堤背後の碎波と汀線変化，海工論文集，第28巻，pp. 295-299.
- 国立情報学研究所：デジタル台風，<http://agora.ex.nii.ac.jp/digital-typhoon>，参照 2012-05-08.
- 田中則男・灘岡和夫 (1982)：汀線変化予測モデルの開発と現地への適用，港湾技術資料，No. 436，pp. 1-40.
- 春山成子・Vu Van Phai (2001)：紅河デルタ南部の沿岸域の変化，地学雑誌，第111巻，pp. 126-132.
- (財)資源・環境観測解析センター：http://www.science.aster.ersdac.or.jp/jp/documnts/pdf/ASTER_RefV1.pdf，参照 2012-05-08.
- Duc, D.M., Nhuan, M.T, Ngoi, C.V (2011)：An analysis of coastal erosion in the tropical rapid accretion delta of the Red River, Vietnam, Journal of Asian Earth Sciences, 43, pp. 98-109.
- Hallermeier, R. J. (1981)：A profile zonation for seasonal sand beaches from wave climate, Coastal. Eng. Vol.4, pp. 253-277.
- JAXA：http://www.jaxa.jp/projects/sat/alos/index_j.html，参照 2012-05-08.
- Karlsonn, T. (1969)：Refraction of continuous ocean wave spectra, J. Waterways and Harbor Division, Vol.95, pp. 437-448.
- NASA：<http://landsat.gsfc.nasa.gov>，参照 2012-05-08.
- Pruzak, Z. and M. Szymkiewicz (2002)：Coastal processes in the Red river delta area, Vietnam, Coastal Eng. Jour., Vol. 44, No. 2, pp. 97-126.