

衛星データを利用した発展途上国の海岸低地の地形判読

三波 俊郎*・宇多 高明**・芹沢 真澄***・古池 銅*

発展途上国における高潮・侵食の問題について考える場合、わが国と異なり、解析に必要な基礎データの不足がしばしば問題となる。正確な予測・評価には広域データが必要である一方、その取得には莫大な経費と時間を要するからである。このような問題の解決にあたっては、衛星データを利用するとともに、地形図と現地踏査を組み合わせた手法が広域情報を容易に入手できる点で優れている。本研究では、メコンデルタの低地を対象に、JERS-1 衛星データから作成したフォールスカラー画像と、標高データから作成した地形縦断面図を利用して地形特性の判読を行い、さらに現地踏査を加えて広域地形特性を明らかにする手法を構築した。

1. ま え が き

メコンデルタは、メコン川から供給された膨大な土砂が数千年間にわたって堆積することで南東方向へ発達してきた。洪水流によって河口部へ運ばれ堆積した土砂は、波の作用によってデルタ前縁線に沿って小高い砂州を形成し、さらに沿岸漂砂によって沿岸方向に運ばれていく。そして砂州の陸側には低地が取り残される。このような作用がダイナミックに繰り返されることでデルタ全体が前進してきたと考えられる。この作用は今後も繰り返され避けることができない。一方、このデルタでも種々の開発が行われ、洪水（高潮）への安全度向上が求められている。しかしデルタの規模は極めて大きいので、容易には測量できず、計画論の検討において困難に直面している。こうしたことから、本研究では、このような発展途上国における問題について、わが国の JERS-1 衛星データから作成したフォールスカラー画像と、標高データから作成した地形縦断面図を利用して地形特性の判読を行い、さらに現地踏査を加えて広域地形特性を明らかにする手法を構築した。

2. 衛星画像によるメコンデルタの地形特性の把握

メコンデルタは、写真-1 左上に示すようにベトナムにおいて南シナ海に流入するメコン川河口に発達している。下流部には多くの支流が形成されている。本研究では、メコンデルタ南部のチャビン省およびベンチェ省の海岸低地に着目して研究を進める。

(1) チャビン省沿岸

写真-1 は、JERS-1 衛星データより作成したチャビン省のフォールスカラー画像である。写真には 2 本の河川が流下している。これらを右上から支川 1、支川 2 と呼んで区別し、これらに挟まれた低地の発達状況について詳

しく分析する。支川 1、2 間の低地幅は約 30 km である。画像を観察すると、マングローブの生育する湿地や砂州などが判読される。また河口デルタの発達に伴って波の作用で truncate された旧海岸線も判読される。

a) 支川 1 の河口右岸に発達した旧砂嘴 A

支川 1 の河口右岸には、南北に延び背後に低地を抱いた直線状の海岸線 (A 1-A 2) の北端に幾筋もの浜堤が延びている。A 2 の北側に延びる砂堤はその発達特性を考えれば、A 1-A 2 の東側にあった土地が波の作用で削り取られ、北向きの沿岸漂砂の作用で砂嘴として発達したと推定できる。すなわち A 2 の北側に延びた砂州は分枝砂嘴として発達したものであり、その砂嘴の内側に細粒土砂が堆積して現在の地形になったと推定できる。

b) 支川 1 の河口右岸、旧砂嘴 A の上流にできたフック状海岸線と旧砂嘴 B

砂嘴 A の直上流にはフック状の海岸線 B 1-B 2 と、その上流に旧砂嘴 B が形成されている。河道に対して砂嘴 A はかなり突出している。また沿岸漂砂は砂嘴の汀線に沿って連続的に移動するが、A 2 から北側での浜堤列がいずれも途中で終わっていることから、この砂嘴の上流には沿岸漂砂が供給されない。このため砂嘴の先端部の直上流では汀線が後退し凹状の海岸線が形成されている。この付近から削り取られた土砂は、河岸に沿って上流方向へ向かう沿岸漂砂によって運ばれ、再び旧砂嘴 B を造って堆積している。白く見えるのは浜堤である。

c) 波の入射方向とほぼ平行な河岸の不安定性

砂嘴 A、B は、その平均海岸線が外海からの波の入射方向とほぼ平行に延び、したがって波が著しく大きな角度で斜め入射する河岸に形成されていることが特徴である。すなわち、平均河岸線が波の入射方向とほぼ平行に延びるので、河岸線が不安定現象によりいく列もの砂嘴を発達させるのである (Ashuton et al., 2001)。この場合注意が必要なのは、砂嘴 A、B の上手側の海岸線 A 1-A 2、B 1-B 2 は、砂嘴上手側の海岸線の一般的特徴から見て、今後も後退傾向となるとともに、砂堤の発達地点 A 2、B 2 でも次第に侵食傾向となることである。

* 海岸研究室(有)
** 正会員 工博 (財)土木研究センター審議役 なぎさ総合研究室長
*** 正会員 海岸研究室(有)

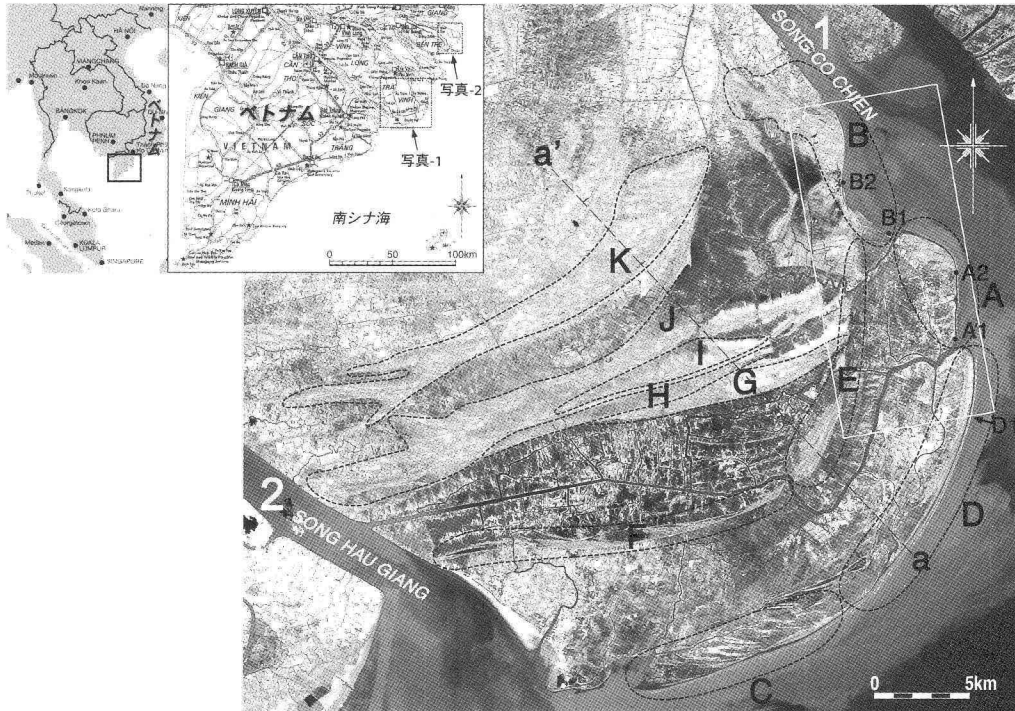


写真-1 メコンデルタ南部チャビン省沿岸の JERS-1 衛星画像 (1994 年 12 月)

d) 写真中央部の浜堤列

支川 1, 2 に挟まれた中央部で南シナ海に面した場所 C では、現海岸線と斜行してほぼ東西に延びる約 20 本の浜堤群が観察される。この浜堤群の南端は現海岸線に続いている。これは、南側の浜堤ほど新しく、北側は形成時期が古いことを示す。浜堤は北側から順に発達している。その形成に預かる土砂は浜堤の北東側になければならない。この区域は顕著に浜堤の発達している区域 C の北東側の区域 D 以外存在しない。区域 D では汀線に沿って碎波による白濁域が見え、白濁の程度は D1 で示した付近で最も強く、南側では次第に消失している。また飛砂が堆積したと見られる砂丘地の幅が D1 付近で最も広い。このことより砂の供給源は D1 付近にあり、そこから供給された土砂が沿岸漂砂や飛砂によって運ばれ堆積して現在の海岸地形が形成されたと推定できる。

e) 土砂の供給源

支川 1 の右岸に発達した砂嘴 A, B の形成は河岸に沿って上流方向へと土砂が運ばれていることを示す。また区域 D から区域 C へと沿岸漂砂が存在する。一連の土砂の供給源は D1 付近にあるように見える。D1 付近が漂砂の供給源であるとするれば、D1 付近は急速に削られなければならない。結果として汀線は急速に後退するはずである。D1 に付けた矢印の方向は砂嘴 A の上手側の海岸線 A1-A2 とほぼ直交するように見える。A1-A2 は

波の入射方向とほぼ直角になりつつあるので D1 の方向は卓越波の入射方向にほぼ等しい。すなわち、D1 の方向から波が入射したとき、支川 1 の沖合に河口テラスが発達し、その右岸側から土砂が陸岸に運ばれており、その場所が D1 付近と考えられる。

f) 内陸に残された旧海岸線と旧砂嘴

現海岸線から約 7 km 内陸の区域 E には旧海岸線が残されている。E に見える線はそれより陸側の低地を鋭角状に切り込んでおり、そこで模様が切断されている。このことからもともと西側から細長く低地が発達していたが、それが河川流または波の作用によって切り込まれた後、再度デルタの発達が進んでその前面に堆積が生じたと考えられる。また区域 E の南端部には砂嘴 A と形態的に非常に類似し、その方向のみが逆転した旧砂嘴状の砂の堆積域が見られる。この砂の堆積物は区域 E の北部において顕著に観察される白く見える堆積物と同じように観察される。このことは、区域 E が truncate される時、E 北部の堆積物が南向きの沿岸漂砂により運ばれ、南部に砂嘴を形成して堆積したことを表すと考えられる。E が南シナ海に直接面していれば現在区域 D で起きていたと同じような波浪作用があったと考えられる。

g) 内陸に残された旧浜堤

区域 E の西側の区域 F では、現海岸線に位置する区域 C で見られると同様、旧海岸線と見られる線に対してや

や斜行して浜堤列が見られる。その状況は区域Cの浜堤列と非常に類似を示す。また区域EとD, 区域FとCの旧海岸線と現海岸線の距離はそれぞれ約7 kmでほぼ一定である。区域E, Fを繋ぐ旧海岸線と現海岸線は互いにほぼ平行に延び、その間には低地を挟んでいる。現海岸線付近で見られる浜堤列などが重層した地表面の形状が見られなければならない。しかしE, Fの旧海岸線と現海岸線の間に低地が広がり、波浪作用による著しい地形変化を受けた痕跡が見られない点は、E, F付近の旧海岸線から現海岸線へとデルタの発達が急速に行われたことを意味する。同様に区域E, Fのさらに内陸にも、区域G, H, I, Jで示されるように多くの浜堤列が観察され、しかもそれぞれが断続的な発達を遂げている。

(2) ベンチェ省沿岸

写真-2はJERS-1衛星データより作成したベンチェ沿岸のフォールスカラー画像である。この区域では、小規模河川は別として2支川が流入している。支川を北から順に支川1, 2と呼ぶ。以下では支川1, 2間の低地の発達状況について述べる。低地の幅は約10 kmである。

a) 支川1, 2間の河口デルタの海岸A

海岸線に沿ってバリアー状の低地が広がる。海岸線には碎波帯が白く写されているが、その色彩から碎波の強度はA1, A2間で最も強く、この区間より北側・南側で弱まるように見える。区域Aの海岸線は全体として冲向きに凸であり、両端部では曲率が大きいく。また現海岸線の近傍に浜堤A3, A4が区域Aの両端部から延びている。すなわち区域Aではチャビン省における区域Dと同様に、現在中央部から両端部へと沿岸漂砂移動が起きていると推定される。

b) 支川1の河口右岸に発達した砂嘴(区域B, C)

支川1の河口右岸には、河川の上流方向へと砂嘴が発達したことを表す何本もの浜堤が判読される。これらの浜堤が現海岸線によって急角度でtruncateされていることから、河口右岸の下流側の河岸が侵食されて後退し、砂嘴の先端部に砂が運ばれたことが分かる。このことは砂嘴の上手側に位置する支川1の右岸は河川の上流へと向かう沿岸漂砂によって今後とも侵食傾向となることを意味する。またこれと同様な砂州は区域Bの内側の区域Cにもある。それらの間に低地を挟んでいることは、このような砂嘴の形成を促すような沿岸漂砂移動が間欠的に生じたことを意味する。

c) 支川1, 2間の河口デルタ下流部の区域D

区域Dでは現在の海岸線にある区域Aと非常によく似た模様が見られ、その海側の境界線を境に地表面の特徴が一変している。また区域Dから支川1の流路へとほぼ直線的に河川流によって河岸が侵食されたような模様

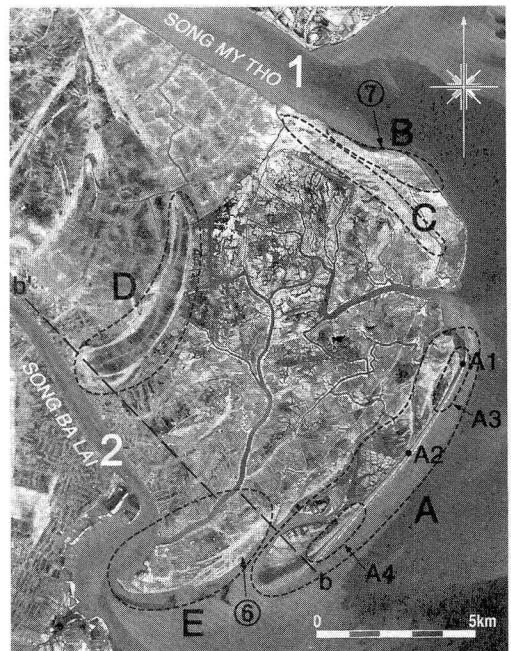


写真-2 メコンデルタ北部ベンチェ省沿岸のJERS-1衛星画像 (1994年12月)

も見える。

d) 支川2の河口部左岸における砂嘴の発達(区域E)

支川2の流路は河口部で大きく時計回りの方向に蛇行している。この原因は、河川流自体の蛇行というよりも河口左岸側から砂嘴が発達しそれに流路が押しやられていることがあげられる。砂嘴を形成する土砂は沿岸漂砂の作用によって東側の海岸から運び込まれている。河口部での大きな蛇行の存在は、河口左岸の凹部への堆積を促進させると同時に、蛇行の始まる河口左岸の曲率の大きな河岸の侵食を引き起こしている。

3. メコンデルタの低地の縦断形

メコンデルタの地表面の判読のみでは定量的な議論ができない。そこで地形図をもとに代表測線を定めて低地の縦断形を整理した。チャビンではほぼ中央部においてデルタを縦断する測線a-a'を定め、またベンチェについては支川SONG BA LAI沿いにデルタを縦断する測線b-b'を定め、これらの測線に沿った地表面の標高をそれぞれ図-1, 2に示す。

チャビンの図-1によれば、標高が2.5 mを越える高さの浜堤の高まりは海側から5列存在している。それらの高さは海側から順にそれぞれ2.5, 2.6, 2.9, 4.4, 3.4 mである。最も高いのは4列目である。これらの浜堤は衛星画像の判読図とその位置がよい対応を示している。海側から3列目までの浜堤は、いずれも高さが2.5~3 mであり、その間には標高0.2~1.0 m程度の低

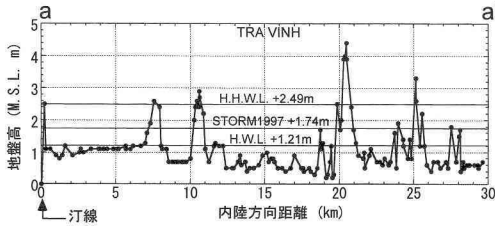


図-1 デルタの地形縦断面図 (チャピン)

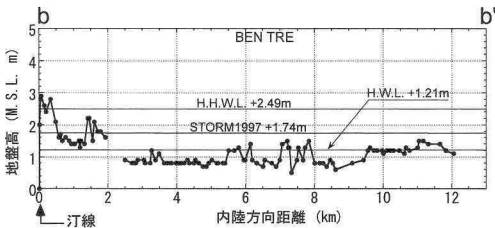


図-2 デルタの地形縦断面図 (ベンチェ)

地を抱えている。この低地の標高は朔望平均満潮位 (H.W.L.+1.21 m) や 1997 年の高潮 (STORM 1997+1.74 m) より低い。しかし浜堤の標高はほぼ 50 年確率潮位 (H.H.W.L.+2.49 m) と同程度以上である。

一方、ベンチェ (図-2) の海側の浜堤の標高は 2.9 m で、その背後は 0.5~1 m の低地となっている。計測場所が三角州の中央ではなく支流沿いであるため、河川の氾濫の影響を強く受けたため、砂丘列らしい高まりはない。これら浜堤は比較的小規模な高潮の場合、防潮堤として機能する。しかし浜堤間の低地を通して海水が横断的に流入することが問題と考えられる。

4. 空中写真に基づく汀線変化解析

衛星データによるデルタの地形判読結果に基づき、代表箇所を選んで汀線変化を空中写真により精密に解析した。対象としたのは写真-1 に白い矩形領域で示した砂嘴が発達する外洋に面した海岸である。空中写真は 1954 年と 1981/1983 年の 2 時期である。写真-3 は、これらの空中写真を比較したものである。写真-1 と同様、A, B, A1, A2, B1, B2 も合わせて示す。砂嘴 B で特に明らかのように、南側から沿岸漂砂が運ばれて砂嘴 B が伸び、同時に海岸線には浜堤が発達したために、砂嘴背後の低地の水は海側に流れにくく、砂嘴の先端部へと流れた後メコン川へと流下している。このように砂嘴の発達は背後地の排水条件を大きく支配していることが分かる。

これらの空中写真から汀線位置を読み取り重ね合わせた結果が図-3 (a) である。また 1954 年の汀線位置を基準とした 1981, 1983 年の汀線変化を図-3 (b) に示す。

中央部の砂嘴 ($X=11\sim17$ km) では、砂嘴の先端に相当する北側で堆積、南側の直線海岸から湾曲部が侵食域

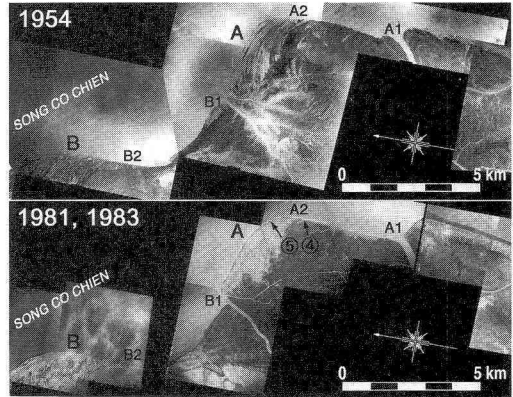


写真-3 砂嘴形成域周辺の空中写真 (1954 年および 1981, 1983 年)

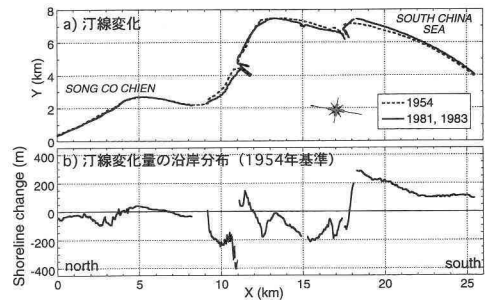


図-3 汀線変化量の分布 (1954 年基準)

である。汀線後退量は最大 200 m に達する。砂嘴先端よりも北側 ($X=9\sim11$ km) では、砂嘴の発達に伴って南側から土砂が供給されないため侵食傾向となっている。汀線後退量は 200~400 m である。同様に北側の砂嘴でも、砂嘴手前側 ($X=7\sim8$ km) で侵食、砂嘴先端 ($X=4\sim6$ km) で堆積、砂嘴の下手側 ($X=0\sim4$ km) で侵食と、上記の砂嘴の場合と全く同じ傾向を示す。変動量は相対的に小さく 100 m 以下である。

侵食域について 1954~1981 年, 1983 年の侵食速度を見積もると、中央部砂嘴の侵食域 ($X=12\sim17$ km) で最大 8 m/yr である。一般的な砂嘴の発達過程を考慮すると、今後も同様の速度で侵食が進むことは間違いない。この区間については例えば海岸堤防を建設して高潮災害を防ぐには、堤防の設置位置を 50 年間の汀線後退量を考慮し、汀線から 500 m 以上陸側に設置することが必要である。現況海岸線近傍まで土地利用を許した場合、将来的にはそこは必ず侵食されるので、防護のための経費が非常に多くなる。この意味から侵食後にセットバックを行うのではなく、当初から侵食量を見込んだ計画を立てることが有効である。

5. 現地踏査

2001 年 9, 10 月にチャピン省およびベンチェ省の代表

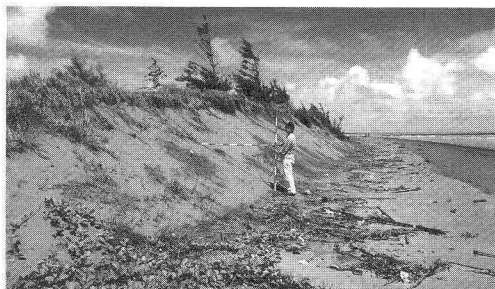


写真-4 写真-3の砂嘴A上手に形成された浜崖 (2001年9月30日撮影)



写真-6 写真-2の支川2の河口付近の海浜状況 (2001年9月28日撮影)



写真-5 写真-3の砂嘴A付近で前浜に形成されつつある砂州 (2001年9月30日撮影)



写真-7 写真-2の支川1の河口付近の海浜状況 (2001年9月28日撮影)

地点において現地踏査を行い、海岸状況を調査した。

〔チャビン省〕写真-4は写真-3の④付近で撮影したものである。海岸線背後には砂丘が発達し飛砂が強いことを示す。砂丘前面には比高最大約4mの浜崖が形成されており、侵食が顕著に進んでいた。ヒアリング調査によれば、侵食により1975年以降現在までに約200~300m汀線が後退し、これに伴い海浜背後の家屋は過去3回陸側に撤退を繰り返してきたという。また当地点の北側では逆に堆積傾向にあるとのことであった。実際、写真-3の⑤へ移動すると写真-5に示すように浜崖侵食は見られなくなり、防風林の前面に海浜植生と広い前浜が広がっていた。また汀線沿いには北向きに延びる新しい砂州が形成されており、当地点が写真-4とは逆に堆積域であることを示していた。以上の現地踏査の結果は衛星画像の判読結果、および汀線変化解析の結果をよく補強するものであり、これらを総合すれば、砂嘴の長期的変化によって、写真-5のように現在は堆積域であっても将来は侵食域に転じることが十分考えられる。

〔ベンチェ省〕写真-2の⑥付近の海岸において、干潮時に西方向を望んで撮影したのが写真-6である。dry beachの勾配はやや急であるが、その沖には干潟状の非常に緩い勾配の海底面が広がる。またバームの近傍までマングローブの幼木が迫っている。これらの特徴は、この海岸への作用波浪がそれほど大きなものではないことを意味する。さらに写真-7は写真-2の⑦で干潮時に北

西方向を望んで撮影したものである。海岸は非常に緩勾配である。汀線付近には新たなバームの形成が進みつつある。これら2地点の現地状況によれば、いずれの地点にあっても海浜は非常に緩勾配で、南シナ海の波浪が減衰しやすい状態にあることが分かる。

6. ま と め

発展途上国のように基礎データが不足する地域において、河口部を含む広域の海岸線付近の地形変遷を調べ、それを海岸防御に使う上で衛星データ等の利用と現地踏査の組み合わせによる手法が有効なことを示した。調査区域が広域であるために、単に大縮尺の地形図のみを頼りに現地踏査を行うことは、踏査地点の全体の中での位置付けが不明瞭となる。これに対して本研究で述べた手法を用いて、あらかじめ現地踏査区域の低地の地形特性を判読し、画像上で同じ種類の地表面として判読される区域の代表として何箇所かの地点で現地踏査を行えば、そこで得られた特性を面的に広げることが可能となる。衛星画像は世界中のいずれの場所についても入手可能であることから、この手法は世界各地での海岸の問題に適用することが可能である。

参 考 文 献

- Ashuton, A., A. B. Murray and O. Arnault (2001): Formation of coastline features by large-scale instabilities induced by high angle waves, *Nature*, 414, pp. 296-300.