

衛星データを利用したメコンデルタの 地形特性の判読

TOPOGRAPHIC ANALYSIS OF LOWER MECONG DELTA USING SATELLITE DATA

三波俊郎¹・宇多高明²・遠藤秀文³・芹沢真澄⁴・古池 鋼¹

Toshiro SAN-NAMI, Takaaki UDA, Shubun ENDO, Masumi SERIZAWA and Kou FURUIKE

¹ 海岸研究室 (有) (〒 160-0011 東京都新宿区若葉 1-22 ローヤル若葉 208)

² 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 (〒 110-0016 台東区台東 1-6-4 タカラビル)

³ 正会員 日本工営 (株) コンサルタント海外カンパニー (〒 102-0083 東京都千代田区麹町 4-2)

⁴ 正会員 海岸研究室 (有) (〒 160-0011 東京都新宿区若葉 1-22 ローヤル若葉 208)

Topographic characteristics of ground surface of the lower Mecong Delta were investigated using satellite data. Distribution of sand spits, sand dunes and natural levees were read, and their formative mechanism was studied. Distribution of low land must be taken into account for the development planning of delta land. In the investigation of a large scale topographic analysis in developing countries, usage of satellite data combined with field observation is very effective.

Key Words : *Mecong Delta, satellite data, sand spits, shoreline change*

1. まえがき

ベトナム南部に位置するメコンデルタは、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の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。また陸向きの風が卓越する場所では、飛砂によって砂丘が形成される。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。このような変動は今後も繰り返され、その変化は大規模であり、かつ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)への安全度を高めることが求められている。しかしデルタの規模は極めて大きいので、簡単には測量を行うことができず、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試みた。

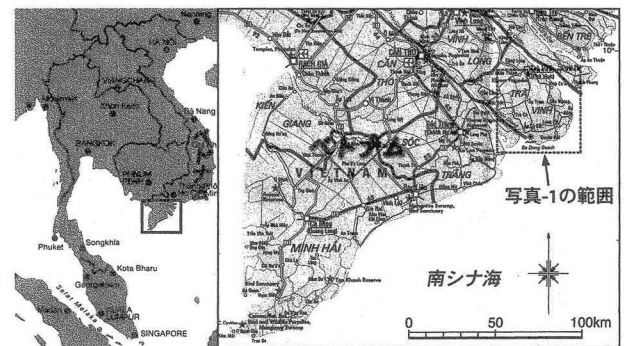


図-1 メコンデルタの位置

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、図-1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。下流部ではいくつも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の海岸低地に着目して研究を進める。写真-1は、JERS-1衛星によるVNIRセンサのマルチバンドデータ(1994年12月)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。写真上には右上に2本(SONG CO CHIEN川)と左下に2本(SONG HAU GIANG川)の合計4本の河川が流下している。これらを右上から順に支流1, 2, 3, 4と呼んで区別する。こ



写真-1 メコンデルタ南部のJERS-1衛星画像（1994年12月）

これらのうち支流2,3間の低地の発達状況について詳しく分析する。支流2,3間の低地の長さは約30kmである。画像を観察すると、マングロープの生育するような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。以下ではそれらの特徴を順に拾ってみる。

①支川2の河口右岸に発達した砂嘴A

支川2の河口右岸には、南北に伸び背後に低地を抱いた直線状の海岸線(A1-A2)の北端に幾筋もの浜堤が伸びている。A2の北側に伸びる砂堤はその発達特性を考えれば、A1-A2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によって砂嘴として発達したと推定できる。すなわちA2の北側に伸びた砂州は分枝砂嘴として発達してきたものであり、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。

②支川2の河口右岸、砂嘴Aの上流にできたフック状海岸線と砂嘴B

砂嘴Aの直上流には、フック状の海岸線B1-B2と、その上流に砂嘴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、A2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、再び砂嘴Bを造って堆積している。白く写されているのは砂堤である。

③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伸び、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伸びるので、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¹⁾。わが国で同様な現象は、駿河湾における駿河海岸から三保松原の砂嘴に至る屈曲した海岸線に見られる。この場合注意が必要なのは、砂嘴A, Bの上手側の海岸線A1-A2, B1-B2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A2, B2でも次第に侵食傾向となることである。

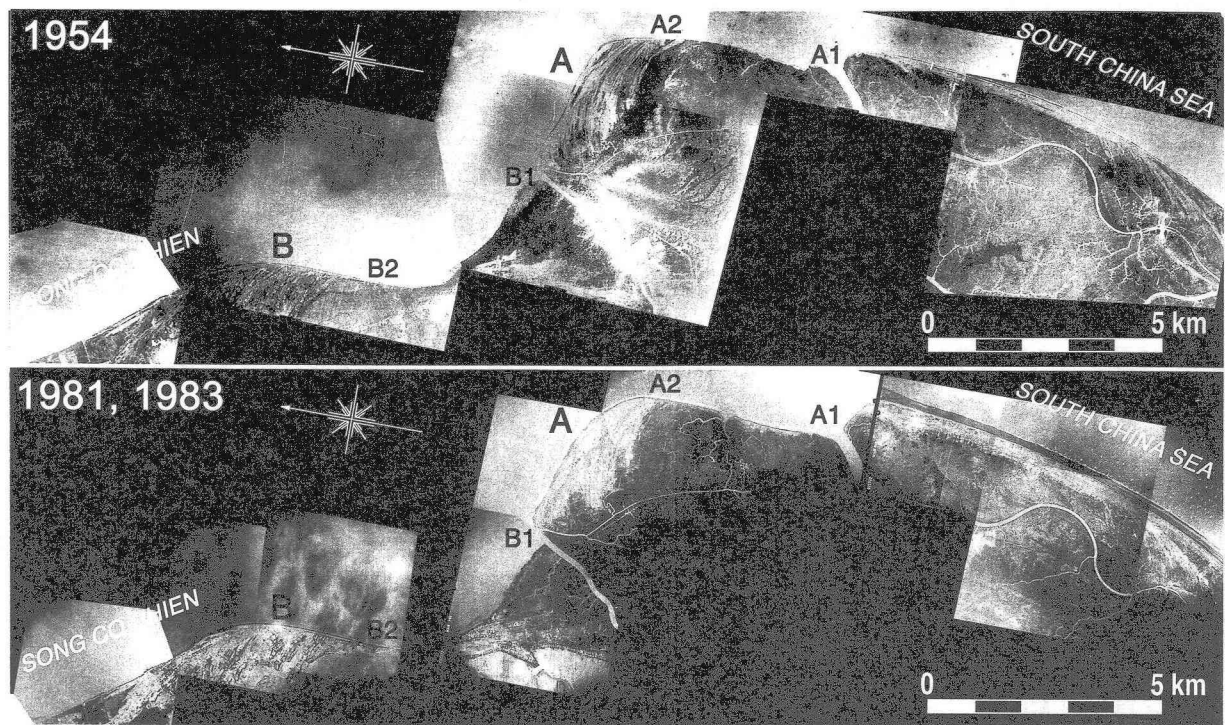


写真-2 砂嘴形成域周辺の空中写真（1954年および1981, 1983年）

④写真中央部の浜堤列

支流2, 3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。このことは、浜堤が南側のもののほど新しく、北側ほど形成時期が古いものであることになる。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。

⑤土砂の供給源

支川2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, 2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。

⑥内陸に残された旧海岸線と旧砂嘴

現海岸線から約7km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していると考えられる。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。

⑦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7km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。現海岸線が時間的に単調に前進してきたとすれば、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。

⑧内陸に残された旧浜堤(区域G、H、I、J)

区域E、Fのさらに内陸には、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。区域Gでは浜堤列は東側から西向きに発達している。さらにそれに重層的に浜堤列の発達が見られる。これらの浜堤列はいずれも現海岸線付近のCに見られる浜堤列と類似し、土砂の供給源は東側にあったことを示している。これらの浜堤列の外側は、再び明瞭に区分され、その海側には低地が広がる。この低地の幅は約5kmである。この幅は区域E、Fと現海岸線との間に残された低地幅とほぼ同じである。この場合もまた区域Gの旧海岸が形成された後、急激に低地が広がり、その後波浪作用を受けて地形形成が進んだことが分かる。

3. 空中写真の比較

写真-1に示すJERS-1衛星データより作成したフォーリスカラー画像に示す矩形領域については、衛星画像のみではなく1954年と1981/1983年に空中写真も撮影されている。写真-2は、これらの空中写真から同一区域を切り出して比較したものである。比較のし易さを考え、写真-1と同様、A,B,A1,A2,B1,B2も合わせて示す。砂嘴Aで特に明らかなように、南側から沿岸漂砂が運ばれて砂嘴A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。

4. 地形図をもとにしたメコンデルタの低地の縦断形把握

次にわずかに入手された地形図をもとに、代表測線を定めて低地の縦断形を整理した。写真-1に示すように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、この測線に沿った地表面の標高を図-2に示した。この図と先に示した衛星写真の判読図とを対比することにより、多くの特徴が明らかになる。

図-2によれば、標高が2.5mを越える高さの浜堤状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2.5m、2.6m、2.9m、4.4m、3.4mである。最も高いのは4列目である。これらの浜堤は写真-1に示した判読図とその位置がよい対応を示す。海側から3列目までの浜堤の発達は、いずれも高さが約2.5～3mであり、その間には標高0.2～1.0mの低地を抱える。この低地の標高は期望平均満潮位(H.W.L.+1.21m)や1997年の

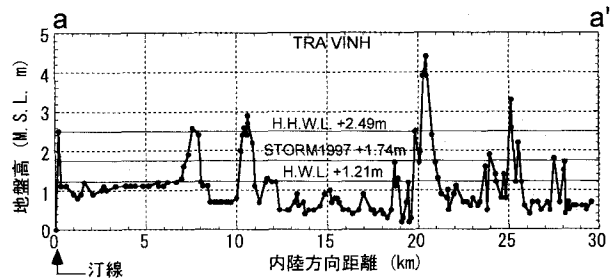


図-2 デルタの地形縦断面図

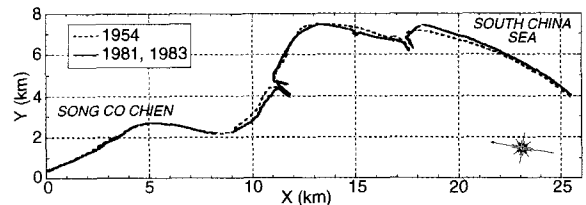


図-3 汀線変化図 (1954年および1981、1983年)

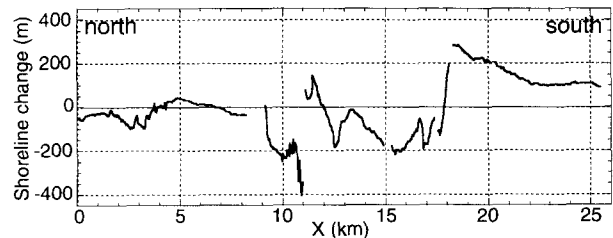


図-4 汀線変化量の分布 (1954年基準)

高潮(STORM1997+1.74m)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.+2.49m)と同程度以上である。したがってこれら浜堤は比較的小規模の高潮の場合、防潮堤として機能することが分かる。ただ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。

5. 空中写真に基づく汀線変化解析

前出の写真-2に示す空中写真からデルタの汀線位置を抽出し、その時間的变化から汀線の侵食・堆積傾向を調べた。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-4に示す。

中央部の砂嘴(X=11～17km)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にかけてが侵食域である。汀線後退量は最大200mに達する。砂嘴先端よりも北側(X=9～11km)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200～400mである。同様に北側の砂嘴でも、砂嘴手前側(X=7～8km)で侵食、砂嘴先端(X=4～6km)で堆積、砂嘴の下手側(X=0～4km)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100m以下である。



写真-3 写真-2の砂嘴Aの上手に形成された浜崖

侵食区域について1954年～1981/1983年の侵食速度を見積もると、中央部砂嘴の侵食域（ $X=12\sim17\text{km}$ ）で最大 8m/yr である。今後も同様の速度で侵食が進むことは間違いないと考えられる。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500m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。この意味から侵食された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。

6. 現地踏査

2001年9月～10月に代表地点において現地踏査を行った。例えば写真-3は写真-2のA2付近のやや南側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している。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、これに伴い現在の家屋は過去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、A2のやや北側へ移動すると写真-4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-3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

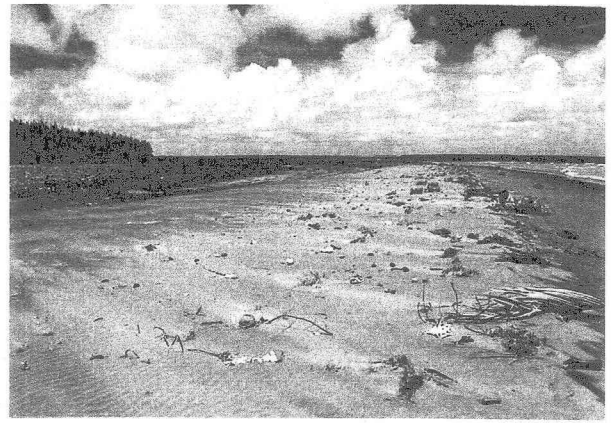


写真-4 写真-2の砂嘴A付近で前浜に形成されつつある砂州

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-4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。

7. あとがき

本研究では、発展途上国のようにデータがあまりない場所において、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が有効ことが示された。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。すなわち、衛星画像を単にきれいな画像として扱うのではなく、それと現地踏査を組み合わせると有効な情報が得られると考えられる。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できる可能性が高い。その意味で今後このような応用法について検討してみたいと考えている。

参考文献

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