

LANDSAT データを用いた高波浪時の沿岸水理解析の試み

灘岡 和夫*・渋谷 慎一**・広瀬 文人***

1. はじめに

LANDSAT 等の衛星データを海岸工学に応用する試みは、例えば大西^らのいくつかの先駆的な研究や、西村^ら²⁾、宇多^ら³⁾、沢本^ら⁴⁾の研究に見られるが、他の分野に比べるとその有効利用が十分になされているとはいえない。特に、今年打ち上げに成功した国産海洋探査衛星「もも1号」(MOS-1)の登場などを考え合わせると、今後、この種の衛星データの利用をより積極的に計っていく必要があるように思われる。

本研究は、人工衛星によるリモート・センシング技術の応用の一つの方向として、それを砕波帯内を含む沿岸域の、特に高波浪時の水理現象の解析に適用することを試みたものである。

通常の砕波帯程度のスケールの現象には、LANDSAT の MSS の空間分解能が 80 m (TM では 30 m)であることを考えると適用しづらいが、ここで対象とするような高波浪時のしかも緩勾配の海岸であれば砕波帯幅はかなり広がるので十分適用可能である。逆に、高波浪時の砕波帯近辺のデータの取得は、その必要性の認識が最近とみに増してきているにもかかわらず、通常の方法ではかなりの困難が伴うことから、今後、この方面での衛星データの利用が大いに期待される。

ここでは、具体的には、砕波帯内の気泡に対応する高輝度パターンから多段沿岸砂州を検出した解析例と、沿岸方向に周期的な濁水の流出パターンを見出し、その原因について室内実験をまじえて検討した結果について述べる。

なお、本研究で行った LANDSAT データの処理の一部には、沢本^ら⁴⁾が開発したデータ処理用プログラムを利用している。

2. 対象海岸ならびに海象・気象条件

(1) 解析対象海岸

本研究で対象とした海岸は、茨城県の鹿島港から波崎

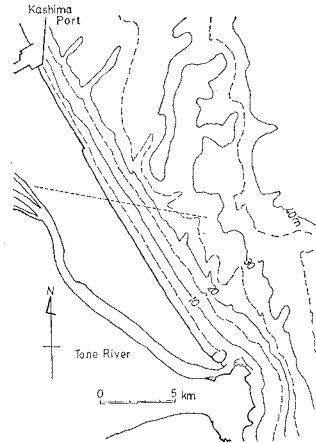


図-1 解析対象海岸

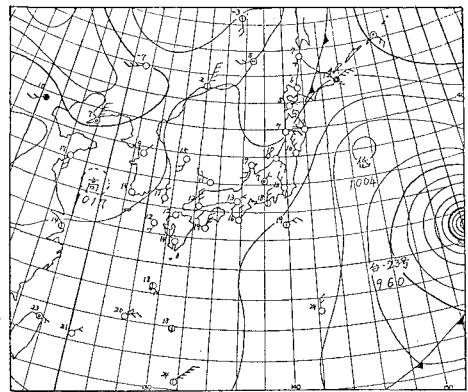


図-2 撮影当日 (1982 年 10 月 22 日 3 時) の天気図

港に至る全長約 23 km の直線的な海岸である。図-1 に見られるように、この海岸では、水深 20 m までは等深線が海岸線にはほぼ平行に走っており、平均 1/150 というかなりの緩勾配になっている。この海岸の南端には利根川河口が位置するが、対象海岸内には数箇所に生活排水口がある程度である。海底地質は、岸から約 3 km 沖までは厚い沖積層で覆われており、細砂からなっている。また水深 0~15 m の範囲では、バー及びトラフが見られ、この付近の地形変化に主に波浪の影響が大きいこと

* 正会員 工博 東京工業大学助教授 工学部土木工学科

** 建設省 (滋賀県に出向中)

*** 学生会員 東京工業大学大学院

を示している⁵⁾。

(2) 海象・気象条件

ここで使用した LANDSAT データは、1982 年 10 月 22 日 9 時 40 分撮影の MSS データ(精密補正)である。図-2 の天気図から分かるように、撮影当時、ちょうど銚子沖約 2000 km を東進していた台風 23 号と三陸沖約 400 km に停滞していた低気圧の影響で、この近海は大時化であった。図-3 に、撮影当日をはさむ波浪ならびに潮位・風の記録を示す。この内の波浪データは、銚子漁港沖 3 km (水深 25 m) に設置されている波高計によって、また、潮位データは銚子漁港内の検潮儀によって得られたものである。これを見ると、撮影当時には、有義波高 3.46 m、有義周期 10.8 s という高波が来襲していたことが分かる。

このように、撮影当時かなり海は荒れていたが、天候の方は、図-2 に示されているように、東シナ海にあった高気圧が日本付近に張り出していた関係で、北海道の一部を除いて大体晴れており、関東地方も晴天であった。(なお、撮影日前の 10 月 19 日夜から 20 日未明にかけて約 20 mm の降雨があった。)

最後にこの海域における海流の特性について触れておく。もともと、鹿島灘の沿岸域では南流が卓越することが知られているが⁶⁾、当日の海況パターンが親潮水系が張り出す形の冷水舌型⁷⁾を示していたという事実⁸⁾からも、撮影当日の鹿島灘沿岸の流況は南流が支配的であったと考えられる。実際、後で示す LANDSAT 画像(写真-2)を見ても、利根川からの河川水が海流の影響で南に偏流している様子がうかがえる。このことから逆に、対象海岸への利根川からの河川水の影響は無視し得るものと判断できる。

3. 砕波帯および沿岸砂州の検出

(1) 砕波帯の抽出

LANDSAT データから沿岸域の水理現象を解析するには、まず、海域を陸域から分離する必要がある。これには、通常、近赤外センサー(BAND 7)が陸域に比べて水域ではほとんど反応しないことを利用して行われている。しかし、以下に具体的に示すように、この方法は、ここで対象とするように広い砕波帯を持つ海岸については不適當である。

図-4 は、図-1 の破線で示すライン上での各バンドの輝度分布を示したもので、通常ライングラフと呼ばれるものの一例である。図中の A 点は、実際に MSS データの各ピクセルをアフィン変換によって 5 万分の 1 地形図と対応づけ、さらに撮影時点の潮位と wave set-up の概算値を考慮して算定された撮影時の汀線位置を示している。これから明らかなように、BAND 7 (近赤外領域)

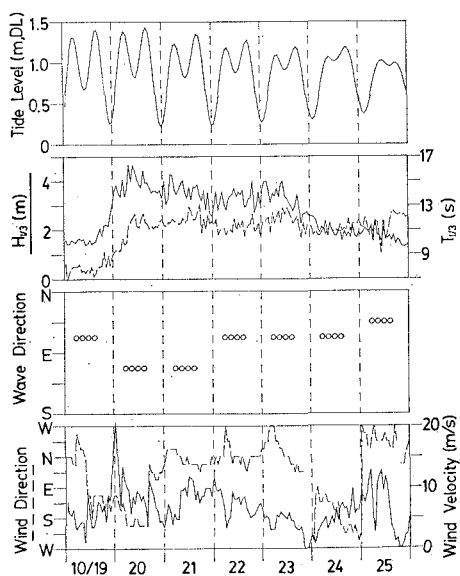


図-3 撮影日前後の波浪・潮位・風のデータ

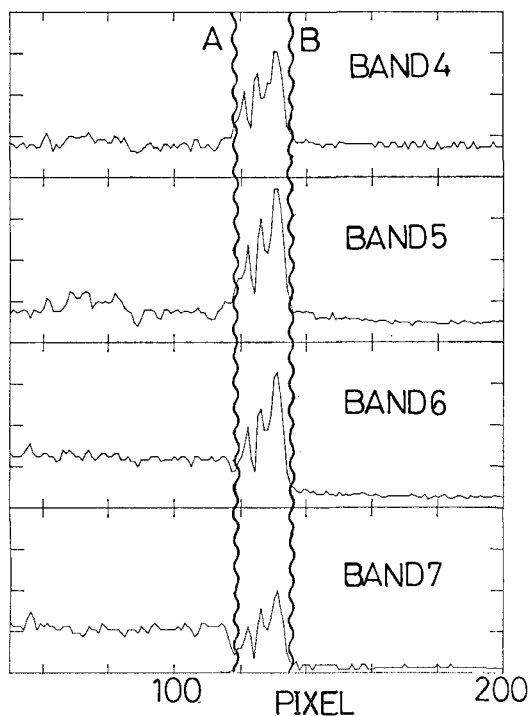


図-4 ライングラフの一例 (1 pixel=57 m)

の輝度の急変点は汀線位置には一致しておらず、かなり沖側にシフトしている。一方、図-3 で示した銚子漁港の波浪記録から撮影当時の砕波点位置を推定したところ、この輝度の急変点(B点)にはほぼ一致することが確認された。このようなことから、輝度の急変点が沖側にシフトするのは、砕波によって生じた気泡の影響と考え

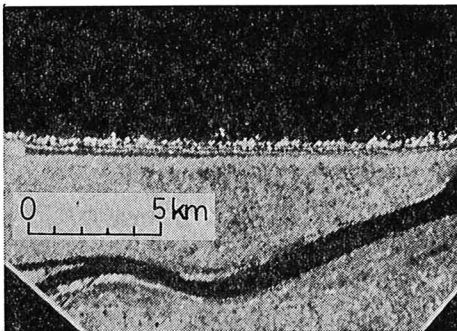
られる。そして、図—4 によるこの気泡の影響は他の全てのバンドにも明瞭に現れており、特に BAND 4 では、砕波帯内で選択的に輝度が高くなることが分かる。したがってこのようなことを逆に利用すれば、砕波帯内の何らかの情報を得ることが期待できる。

(2) 多段沿岸砂州の検出

図—4 から分かるように、砕波帯内の輝度分布は決して一様ではなく、いくつかの明瞭なピークを持つ形になっている。これは、砕波帯内での砕波の状況が一様でないことに起因しており、高輝度の場所ほど砕波が激しく生じているためと考えられる。そこで、このような高輝度部分を抽出しうるように輝度レベルのランクわけを行い、パソコンのモニター上に描き出した画像が写真—1 である。ただし、ここでは水域の水表面付近の情報だけを取り出すために、BAND 7 の輝度データを用いている。この画像を見ると、高輝度部分（白っぽい部分）がほぼ 3 列をなして海岸線に平行に延びていることが分かる。そこで、このような輝度パターンが現れた原因について考えてみる。

Battjes⁹⁾ によれば、砕波帯内に存在する波の数 N は、surf similarity parameter $\xi_0 (= \tan \beta / \sqrt{H_0/L_0})$ を用いて、 $0.8\xi_0^{-1}$ で概略見積れる。そこで、今の場合に対応する $\xi_0 = 0.045$ を代入すると、 $N \approx 18$ を得る。このことから判断すると、上記の 3 列の高輝度部分が各 bore 先端の砕波領域を示しているものとするには無理があり、むしろ、地形性によるものであると考えられる。言うまでもなく、砕波帯内での砕波の発生パターンと水深の分布には強い相関があり、実際、例えば加藤ら¹⁰⁾ による仙台港南海岸での現地観測においても、空中写真から解析された砕波の発生頻度と砕波帯内の浅瀬の分布状況はほぼ対応した形となっている。

このようなことから、上記の高輝度パターンは水深の浅い部分に対応したものである可能性が高く、その 3 列の平行なパターンからみて、この時化の最中にかなり二次元性が高い多段沿岸砂州が存在していたものと考えられる。



写真—1 砕波帯内における高輝度パターン (BAND 7)

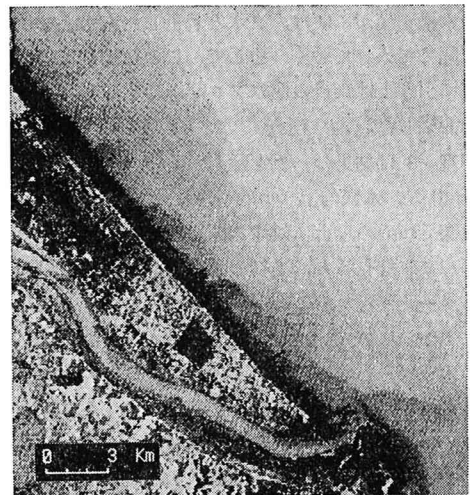
2. 砕波帯内の濁水の周期的流出パターンの検出とその原因の考察

(1) 濁水の周期的流出パターン

図—4 のライングラフの中で、BAND 5 の輝度分布を見ると、他の BAND と異なり、砕波帯の沖側に接する領域の輝度がその沖側に比べてやや高くなっていることが分かる。そこで、この領域の輝度の平面分布パターンを抽出し得るように輝度レベルのランクわけを再度やり直してモニター画面上に出力したものが写真—2 である。これを見ると、砕波帯の沖側にやや輝度の高い領域が沿岸方向にほぼ周期的に現れていることが分かる。これは、BAND 5 が可視赤色領域であることから、砂分を含んだ濁水に対応していると考えられる。

先にも述べたように、対象海岸中には生活排水口が数カ所あるだけなので、この濁水パターンが河川流出によるものであるとは考えられない。また、写真—1 の砕波帯内の輝度パターンから判断して、写真—2 の漏水流出口位置が特に砂州の切れ目等の深掘れ部に当たっていると考えられないため、地形性による可能性も低い。

このような周期的な沿岸水の流出現象の原因として通常まず考えられるのは離岸流である。そこで、以下に離岸流である可能性について検討してみる。図—5 は、写真—2 に見られるパターンをトレースし、その相互の位置関係を示したもので、これより、濁水の流出地点の間隔が 3.7~4.8 km となっていることが分かる。これは砕波帯幅（約 600 m）の 6~8 倍の値であるが、これは離岸流間隔 Y_r と砕波帯幅 X_b の比に関する日野¹¹⁾ による理論値 $Y_r/X_b = 4$ に比べてやや高い値になっている。もっとも、今の場合、surf similarity parameter $\xi_0 (= \tan \beta / \sqrt{H_0/L_0})$ の値は 0.048 で、佐々木¹²⁾ によれば、これは



写真—2 砕波帯からの濁水流出パターン (BAND 5)

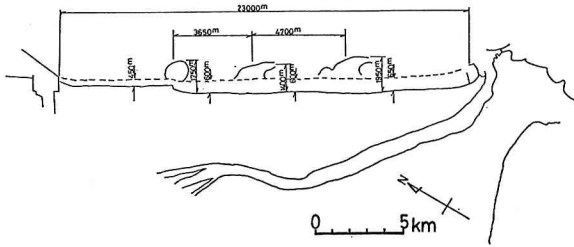


図-5 BAND 5に見られる濁水パターンのトレース

もともと日野の理論の適用範囲である「不安定領域」($0.23 < \xi_0 < 1$)をはずれており、「INFRAGRAVITY 領域」($\xi_0 < 0.23$)に入っている。しかし、この領域に対する佐々木による経験則¹²⁾

$$Y_r/X_b = 157\xi_0^3 \quad (0.08 < \xi_0 < 0.23) \dots\dots\dots (1)$$

を外挿して今の場合に当てはめて計算してみると、 $Y_r/X_b = 0.36$ となって、ここで見いだされた $Y_r/X_b = 6 \sim 8$ という値よりもかなり小さくなる。

このようなことから、ここで見いだされた濁水の周期的流出パターンの発生が、単純に離岸流によるとするには多少問題があるように思われる。そこで、ここでは別の可能性を探ってみた。

(2) 室内実験による「密度効果」の検討

高波浪時には、碎波帯内における浮遊砂濃度は平常時に比べてかなり大きくなるものと考えられる。ここでは、このような多量の浮遊砂を含む碎波帯内の濁水と沖側の海水との間の密度差に着目し、その効果について検討してみた。具体的には、以下に示すような簡単な室内実験を行うことにより、この「密度効果」のみによって果して沿岸方向に周期的パターンが現れるかどうかを調べた。

実験に使用した水槽は、120 cm × 100 cm × 5 cm のアクリル製の平面水槽である。まず、図-6に示すように、この水槽を僅かに傾け、真水と着色した塩水とを仕切り板を隔てて入れておく。そして、この仕切り板を一気に上方に引き上げた後の塩水フロントの平面形状の時間発展を観察した。

写真-3は結果の一例を示したもので、相対密度差 $\Delta\rho/\rho = 0.01$ 、水底勾配 $\tan\theta = 1/35$ 、仕切り板位置での塩水水深 5 mm の場合に対する開始直後と 6 分後の写真である。これを見ると、当初の予想どおり明瞭な周期的流出パターンが現れることが分かる。この場合の凹凸の波長は 10~20 cm で、フロントの厚さ (1~2 mm) の約 100 倍のオーダーとなっているが、この波長の大きさは、密度差ならびに水底勾配の減少と共に増大することが確認されている。現地での当時の濁水と沖の海水との密度差の値や濁水フロントの厚さの情報がないため、現地との対比についてはこれ以上の検討は出来ないが、緩斜面上

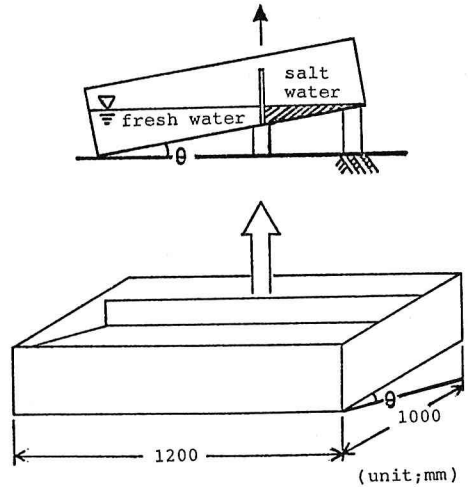
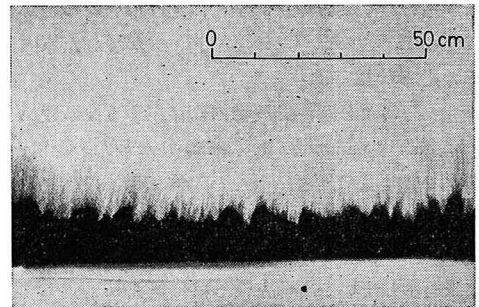


図-6 実験装置・方法の略図



(a) 開始直後

(b) $t=6$ min

写真-3 実験結果の一例

での密度フロント形状に明確な不安定性が現れることを示した今回の実験結果は、現地での同様な密度効果の存在の可能性を示唆するものと考えられる。

(なお、このような密度流フロントの凹凸の形成は、例えば Simpson¹⁸⁾ による重力密度流フロントに関する実験にも見られるが、その場合に対象とされているのはフロントが十分な運動量を持つ場合であって、今のように非常に緩慢な動きで、ほとんど運動量を持たないような

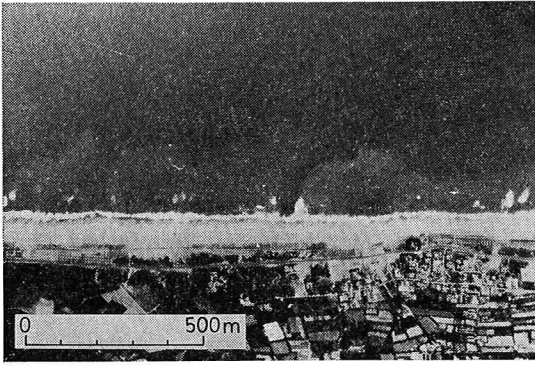


写真-4 平常時航空写真にみられる濁水パターンの例

場合とは異なっている。実際、Simpson の実験結果では、凹凸の波長がフロント厚さとはほぼ comparable となっている。また、写真-3 の $t=6$ min 以後の水深パターンには、きわめて特徴的なパターンが現れてくるが、それについては文献 14) に報告してある。）

もちろん、今回の実験では塩水が定常供給されており、相似律に対する十分な検討も行われていないので、この実験結果からただちに同種の現象が現地の海岸にも見られると判断することには問題がある。しかし、このような密度効果による周期パターンの形成メカニズムが現地においては存在しないとする積極的な理由も現在のところ見当たらない。写真-4 は、国土地理院による平常時のこの海岸の航空写真の一例で、1983年6月3日に撮影されたものであるが、実際、これにはやはり濁水によると思われるパターンが沿岸方向にある程度周期的な間隔で生じている状況が見られる。この場合の間隔も碎波帯幅に比べて極端に大きく、離岸流によるものとは考えられない。

このようなことから考えると、海浜流系にここで注目している密度効果が関与する可能性は十分あると考えられる。この点については、今後、より定量的に検討していく予定である。

5. あとがき

本研究では、高波浪時の沿岸水理の観測手段の一つとして、LANDSAT データを利用することを提案し、具体的に、時化の最中での多段沿岸砂州や濁水の周期的流出パターンの存在を検討すること等を通じてその有効性

を確認した。そして、室内実験により、従来見過ごされていた密度効果が海浜流系に関与する可能性を示した。ただし、ここで報告した解析結果は鹿島灘海岸のしかも 1 シーンだけのものであるため、今後は、同様の解析を他の海岸のいろいろなシーンについて行っていく予定である。

謝 辞： 本研究を行うにあたって、(財)リモート・センシング技術センターの田中総太郎氏には、貴重なデータを提供して頂いただけでなく、データ解析等の面においても数々の有益な御意見を頂いた。また、千葉県漁港事務所に波浪記録を提供して頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 例えば、大西外明・須山 治：海洋の大規模渦が沿岸水の物理的挙動に及ぼす影響，土木学会論文集，第 351 号/II-2, pp. 183~191, 1984.
- 2) 西村 司・畠山祐二・田中総太郎・丸安隆和：リモートセンシングに立脚した沿岸域自走渦の運動論的研究，土木学会論文集，第 351 号/II-2, pp. 173~182, 1984.
- 3) 例えば、宇多高明・古川博一・竹舘 勉：ランドサットによる沿岸水理の観測，第 32 回海岸工学講演会論文集，pp. 772~776, 1985.
- 4) 沢本正樹・村越 潤：LANDSAT-MSS data を用いた河口流出の解析，東京工業大学土木工学科研究報告，No. 34, pp. 1~29, 1985.
- 5) 海上保安庁水路部：5 万分の 1 地形図，海底地質調査報告書，犬吠崎，1984, 3 月.
- 6) 友定 彰・久保治良：鹿島灘の海況——IV, GEK 測流より——，東海区水産研究所研究報告，第 103 号，pp. 1~15, 1980.
- 7) 久保治良・友定 彰：鹿島灘の海況——VI, 表面水温からみた近年の海況・パターンの変動について——，茨城水試創立 80 周年記念誌，pp. 90~102, 1981.
- 8) 茨城県水産試験場：漁海況速報 57—No. 30, 昭和 57 年 10 月 21 日~10 月 27 日.
- 9) Battjes, J. A.: Surf similarity, Proc. of 14th Int. Conf. on Coastal Eng., ASCE, pp. 466~480, 1974.
- 10) 加藤一正，他 5 名：仙台南海岸における碎波帯内総合観測，港湾技研資料，No. 355, 1980.
- 11) 日野幹雄：海浜流系の発生理論 (3)——単純化された理論——，第 20 回海岸工学講演会論文集，pp. 339~343, 1973.
- 12) 佐々木民雄：海浜流系の構造に関する野外的研究，1974, 12 月.
- 13) Simpson, J. E.: Effects of the lower boundary on the head of a gravity current, Jour. Fluid Mech., pp. 759~768, 1972.
- 14) 第 15 回流れの可視化シンポジウム写真集，1987.