

衛星画像データを用いた台風時波浪による汀線変化の解析

浅野 敏之*・幸野 淳一**・佐藤 孝夫***・嶺 泰宏****

1. はじめに

衛星によるリモートセンシング技術の発展は著しく、軍用技術の商用移転によって空間解像度が1mオーダーのデータが入手できるようになった。衛星観測の特徴は広範性と周期性であり、100 km 四方スケールの平面的情報が1ヶ月内外の回帰間隔で測定できる。

ところで、太平洋沿岸南西部の砂浜侵食災害の多くは、台風による異常波浪によって引き起こされる。大きな侵食災害の度に調査研究がなされるが、広範囲にわたる現地測量は労力・費用の点から年1回程度に限られ、外力となる波浪の推算と波浪変形の経時的解析も十分には行われていない。台風による風域場・波浪場は急速に変化し、結果として引き起こされる海浜変形も台風来襲前後の短期間で生起するので、これまでの方法では外力と海岸侵食の力学的関係を十分には解明できない。

本研究は、冒頭で述べた衛星画像の大きな解析能力を活用して、台風前後の汀線変化を解析するとともに、波浪推算・波浪変形計算を並行して行い、台風による広領域海浜変形の経時変化を明らかにしようとするものである。

2. 衛星画像解析

2.1 解析対象の絞り込みと使用した画像データ

入手可能な衛星画像データ・地形測量データと、実際に生起した海浜変形の大きさを勘案して、本研究では対象海岸を鹿児島県志布志湾とし、来襲台風として台風9719号を取りあげた。

表一に本研究で解析した衛星データを示す。No.1の1996年12月11日のデータはSPOTのマルチバンドセンサー(XS)のデータで地表分解能は20mである。No.5の1998年3月30日のデータは同じくSPOTであるが、地表分解能が10mであるパンクロマティックデータである。表には、撮影時間での志布志港での天文潮位も併記している。1996年12月11日の潮位は86cm、

表一 使用した衛星データ

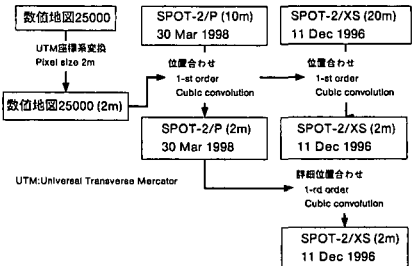
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5
撮影年月日	1996 年 12 月 11 日	1997 年 5 月 4 日	1997 年 6 月 12 日	1997 年 9 月 24 日	1998 年 3 月 30 日
衛星 センサー	SPOT-2 XS	IRS-1C PAN	SPOT-2 PAN	SPOT-2 PAN	SPOT-2 PAN
地上分解能	20 m	5.8 m	10 m	10 m	10 m
入射角	L 21.4 度	1.19 度	R 11.5 度	R 12.9 度	R 05.2 度
雲量	0	3	7	3	0
撮影時刻	11 時 17 分	11 時 00 分	10 時 59 分	10 時 59 分	11 時 02 分
天文潮位	85 cm	40 cm	139 cm	134 cm	89 cm

1998年3月30日は89cmであり、ほとんど同じ潮位となっている。

本研究では画像の鮮明さから主として表一のNo.1とNo.5の画像データを用いた解析を行った。以下2.~3.の章では両データを用いた解析結果を示す。

2.2 画像の前処理

No.1とNo.5の衛星データの分解能は10mと20mであり、位置合わせを正確に実施しても、このままでは志布志沿岸の汀線変化は抽出できない。そこで、両画像から2次元cubic convolutionにより分解能2mのデータを作成し、それを元に2m単位での海岸線抽出を行った。今回採用した画像処理のフローを図一に示す。まず、国土地理院発行の1/25,000の数値地図を、ピクセルサイズ2mの画像に変換した。このとき座標系をUTM(Universal Transverse Mercator)とした。次に、2つのSPOT画像を、2m分解能に変換された数値地図に位置合わせした。このときに用いたGCP(Ground Control Point)は7点である。この操作では、ピクセルレベルの位置合わせは必要なく、画像のUTM座標系変換操作であるから、変換式には1次式を用いた。この段階で、衛星画像は2m分解能に変換される。



図一 画像の位置合わせフロー

* 正会員 工博 鹿児島大学助教授 工学部海洋土木工学科
** 理博 鹿児島県環境技術協会 数値解析室長
*** 正会員 工修 運輸省第4港建 下関調査設計事務所長
**** 運輸省第4港建 志布志港湾工事事務所長

精密な位置合わせには目印となる地表物が必要である。一般的には架橋や交差点などが利用可能であるが、今回は数 m 単位的位置合わせが要求されるため、反射率の高い建物や堤防の先端などを利用した。それには数値地図を用いた位置合わせでは困難であり、2 m 分解能に変換された衛星データのうちの 1 つを基準画像に選び、他の衛星画像を基準画像に位置合わせする方法を取った。

今回基準画像にしたのは元画像の分解能が高い No.5 のデータである。2 m 分解能に変換された No.1 の画像を、基準画像に位置合わせした。GCP の変換精度は 0.3 ピクセル以内であった。

2.3 海岸線の読みとり

2 m/pixel に変換された画像を使って海岸線位置を読みとった。図-2 は、異なる時期に撮影された岸沖測線での衛星受信デジタルデータ (CCT: 反射強度に対応) プロファイルを示したものである。砂浜部は反射が大きく、海域では小さい。CASE-B の水際線付近 ($X=200\sim260$ m) には砕波と思われる反射の増加が見られる。水際線近傍に砕波があると、可視光域の画像では陸域と同程度に明るくなる場合があり、水際線検出の障害となる。水の反射率が小さくなる近赤外データを使用すれば、砕波域であってもあまり明るくならないため水際線の識別が可能である。波の遡上先端の白波も水際線読み取りの障害となるが、これもマルチスペクトルデータを使えば、推察が可能である。CASE-A のように砕波のない場合は可視光でも水際線を十分に認識でき

る。今回は、砕波のある場合でもなるべく広い範囲で海岸線を抽出したいことから、図中の A-B に示すように、砂浜と海域の中間の反射率を持つ場所を海岸線として読みとった。なお、砂浜部の CCT ピーク値が周辺より大きく異なる測線では近傍の CCT を採用し、海岸線読みとり箇所の CCT が局所的な陸域の状態に依存しないよう

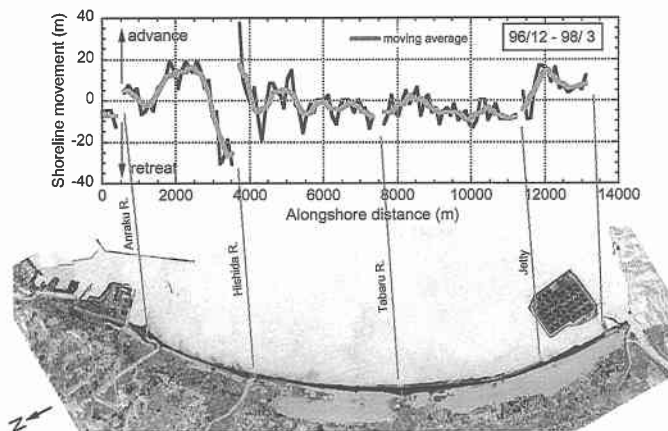


図-3 衛星データから抽出された汀線変化 (1996 年 12 月～1998 年 3 月)

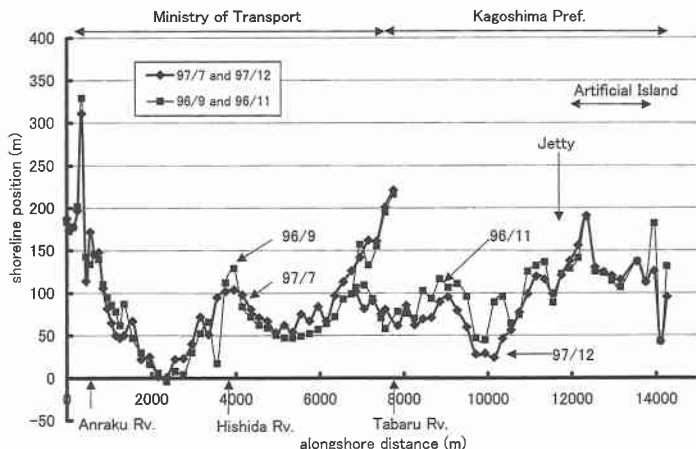


図-4 測量結果から求めた汀線位置の変化

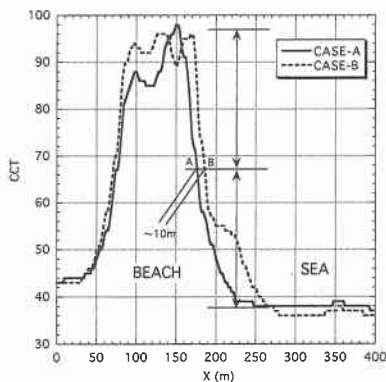


図-2 海岸線の判定

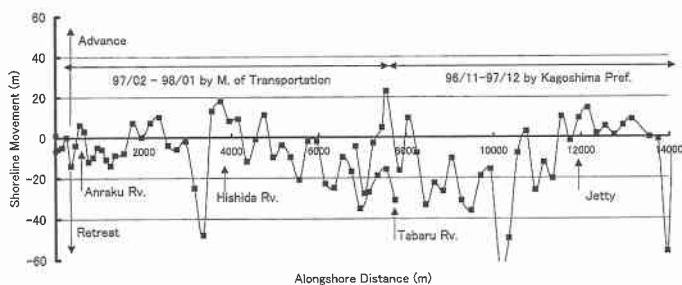


図-5 測量結果から求めた汀線の前進・後退量

考慮した。

画像から読みとった 1996 年 12 月と 1998 年 3 月の間の汀線変化量を図-3 に示す。図中の写真は 98 年 3 月の衛星画像である。汀線変化は 96 年 12 月を規準としたときの 98 年 3 月までの前進・後退量で表されており、図中の薄い線は 500 m 幅で移動平均したものである。

3. 測量データとの比較

志布志沿岸の深淺測量は、田原川以北が運輸省で、以南が鹿児島県によって行われている。図-4 にその結果を示す。同図には、測量年月が図-3 に示した衛星画像の観測日(1996 年 12 月, 1998 年 3 月)に近いものから 4 つを選んだ。運輸省データは D.L.+1 m を基準とした汀線、鹿児島県データは T.P.での汀線である。測量範囲が重なる田原川付近で、基準点位置が異なるために汀線がずれる形となっている。田原川の北沿岸で 1997 年 2 月, 同 7 月に前進が見られ、また T 字突堤の北側の柏原海岸での変化が大きい。

図-3 に示した衛星画像から読みとった汀線の前進・後退量の結果と比較できるものとして、観測年月がほぼ対応する測量結果から、汀線変動量をプロットしたものが図-5 である。両者の汀線位置変動を比較すると、菱田川左岸で 40 m 程度の後退、右岸で 20 m 程度の前進、田原川の北・横軸 6,000~8,000 m, 南 8,000~10,000 m 付近の汀線後退、T 型突堤の北側での 20 m 程度の後退、T 型突堤から人工島背後側への約 20 m 程度の前進などが良く再現されている。

4. 数値モデルによる検討

衛星画像で得られた海浜変形の力学的因果関係を明らかにするために、この台風によって発生した志布志湾沖方で波浪時系列を推算し、これを境界条件として湾内の波浪変形を回折も考慮できるエネルギー平衡方程式で計算した。

4.1 来襲波の推算

今回、考察の対象とした台風 9717 号は、97 年 9 月 4 日 9 時に北緯 13.6°東経 179.7°付近で発生したものである。12 日 3 時には父島南方海上まで西進し、この間、中心気圧 915 hPa, 最大風速 50 m/s を記録した。その後、15 日 0 時に奄美大島の北をかすめ、翌 16 日 8 時に薩摩半島枕崎付近に上陸した。その後九州を斜めに縦断し、17 日 0 時には岡山県に再上陸したが、この時には中心気圧 998 hPa まで減衰していた(根間, 1998)。

図-6 は、この台風によって運輸省志布志港湾事務所の枇瑯島波浪観測点において観測された有義波時系列の観測値と推算結果を比較したものである。波浪推算モデルは、山口・土屋モデルをベースとした駒口(1993)モ

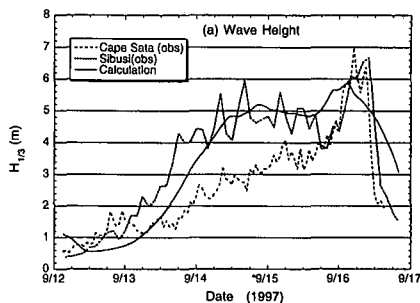


図-6 有義波高に関する実測値と推算値との比較

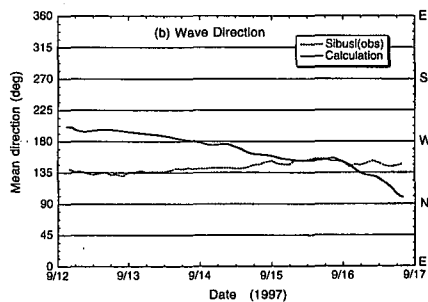


図-7 波向きに関する実測値と推算値との比較

デルであり、1 次格子幅 0.5°, 最小格子幅約 4 km とした。計算領域南端は北緯 10°までとったが、駒口モデルでは境界を通じて計算領域内に流入してくる波浪エネルギーをも取り込むことができる。

計算値は発達期にやや小さめの値を取っているが、14 日午後から 16 日のピーク時付近での一致は良好であることがわかる。なお、併記した佐多岬の観測値は、13 日午前から 15 日 18 時ごろにかけて小さくなっており、この時の台風位置から種子島の遮蔽効果が入っているものと思われる。また、図-7 はエネルギー平均から算出された波向きに関する比較図である。志布志での波向については、台風接近前の 135°(南東からの波)から最接近時の 155°まで、20°ほど変化している。

4.2 波浪伝播計算

浅海域のエネルギー平衡方程式を用いて志布志湾内での波浪伝搬を計算した。このサブシステムは、上記の波浪推算サブシステムで計算された志布志湾口での波浪スペクトルの時系列を入力条件として、湾内での波浪伝搬を計算するものである。しかし、現段階では計算機能力の制約から、台風の進行に伴う波浪の時間的変動性を考慮せず、定常不規則波を入力条件に与えた。図-7、図-8 に示した観測結果・推算結果を踏まえ、入射波浪条件として、平均周期 12 秒、有義波高 5 m、方向集中度 S_{max} が 75 の Bretschneider-光易型の不規則波を採用した。波向は台風接近前と最接近時に対応する 130°と 150°の 2 ケー

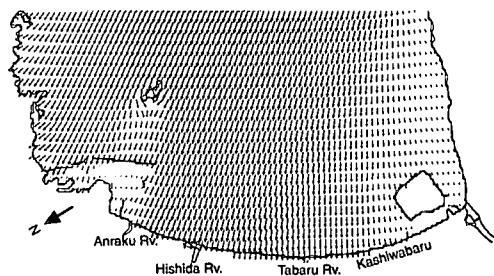
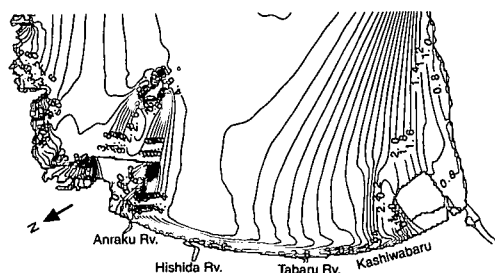


図-8 台風接近前(9月14日)を想定した浅海域の波浪変形の計算結果

(a) 有義波高分布, (b) 波向分布(入射角 130° , 沖波波高 $H_0=5\text{ m}$, 周期 $T=12\text{ s}$, $S_{\max}=75$)

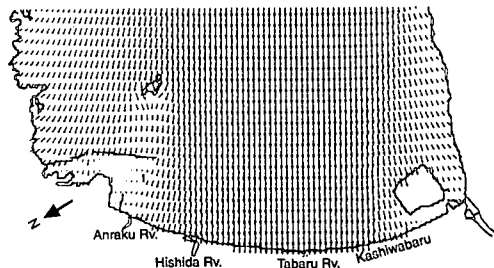
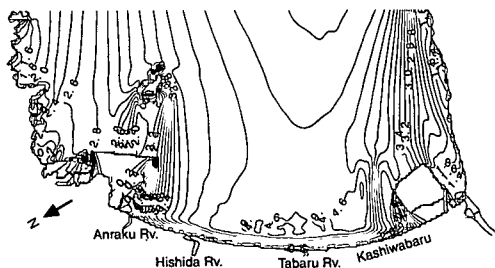


図-9 台風最接近時(9月16日)を想定した浅海域の波浪変形の計算結果

(a) 有義波高分布, (b) 波向分布(入射角 150° , 沖波波高 $H_0=5\text{ m}$, 周期 $T=12\text{ s}$, $S_{\max}=75$)

スをとった。周波数は 0.01 Hz 間隔に 0.04 から 0.25 Hz までの22分割, 方向は 10° 間隔, 格子幅は 100 m とし, 座標系は経緯度に対して 30° 傾けてある。

エネルギー平衡方程式モデルは広域での2次元波浪伝播を計算するモデルとしてよく用いられるが, 位相情報を持たないために回折や反射は正確に扱えない。この性質は, 計算領域が1次元的な構造を持つ場合は問題とならないが, 志布志湾のように両側を陸地に挟まれた海岸, あるいは人工島や沖防波堤が存在するなどして2次元性が大きい海岸では問題となり得る。今回は, 間瀬ら(1999)の提案に従って回折項を導入した。

4.3 計算結果

入射波向 130° の場合の波高分布と波向分布を図-8(a), (b)に示す。沿岸波高は菱田川河口付近が最も大きく, 沖波波高とあまり変わらない大きさである。菱田川から南は, 湾南側の陸地により波浪が遮蔽されるために, 沿岸波高は単調に減少している。一方, 波向き 150° の場合は, 図-9(a), (b)に示すように, 沿岸波高の最大域は柏原海岸付近となっている。特に, 備蓄基地の北沖に波高 4.8 m の極大部がある。これは, 基地前面の掘削部による屈折が原因である。また, 20° 程度の沖波波向の違いで, 沿岸波高分布は, 大きさだけでなく最大となる場所も異なることが確認できた。柏原海岸近傍の波高は, 波向 150° の時は 130° の時よりも 1.5 m 以上も大きい。仮に, 波高を 3 m と 4.5 m とすると, エネルギーにして2

倍以上の変化である。柏原海岸の波向きについては入射波向が 130° , 150° のどちらの場合でもほぼ直角に入射している。台風接近時には志布志湾内に入射する矢印が認められるが, 最接近時には見られなくなっている。台風による海岸侵食には, 高波浪の波向きがどの向きで始まりどの向きで終わるかが, その継続時間も含め重要と思われるが, 今後の課題としたい。

5. 台風来襲直前後の衛星画像データを用いた汀線変化の解析

以上の考察では, 96年12月と98年3月の画像データを用いて約1年4ヶ月間の汀線変化を抽出し, それにほぼ対応する期間の測量データと比較することで, 両者が定性的には良好な一致を見ることを明らかにしたわけであるが, 衛星データ解析の大きな魅力の一つである短期間での画像データの比較を行えば, 当該台風のもたらした海浜変形量をより純粋に抽出できるのではないかと考えた。そこで表-1のNo.2とNo.4の画像を用いて同様の解析を行うことにした。No.2の画像は分解能 5.8 m のIRS衛星であり, またNo.4は分解能 10 m のSPOT衛星である。後者の画像は, 台風9719号の枕崎上陸から約1週間しか経過していない時に撮影されている。

図-10に台風来襲前後(97年5月~97年9月)の汀線変化量の読みとり結果を示した。図には台風来襲後の海岸の回復過程を示すため, 97年9月~98年3月の汀線変

化量も併せて示した。図に示した結果は、汀線読み取り値を潮位補正を行って No. 1 の画像撮影時の潮位に揃えており、さらに沿岸方向に 500 m 間隔で移動平均したものである。潮位補正に用いる海底勾配は、平均水面付近での汀線測量結果から 1/10 とした。1997 年 5 月 4 日の IRS 画像は田原川以北では雲がかかっており海岸線位置を読みとれない部分があった。

図より、田原川北側の横軸 6,000~8,000 m および 8,000~10,000 m の柏原海岸で 1997 年 5 月から 9 月の間に約 10 m の後退が見られる。また横軸 11,000 m 付近の突堤あたりで 10 m 程度の前進が見られる。これらは図-3 に示した 96 年 12 月~98 年 3 月の結果と量的にもおおむね一致している。一方、台風来襲後の同年 9 月から 1998 年 3 月の汀線変化量を見ると、1997 年 5 月~9 月の後退部分がほぼ同じ量だけ前進しており、逆に突堤付近の前進部分が後退している。このことは、台風で侵食された分が、秋から冬の半年で回復したことを意味している。ただし、河口や突堤近傍では、海底勾配が緩く時間的変動も大きいので、結果に潮位補正を行う際の誤差が含まれることに注意すべきである。

図-10 における測点 A での岸沖方向での反射率プロファイルを図-11 に示す。縦軸は規格化された CCT であり、砂浜最大箇所を 1、海域で 0 とした。台風来襲直後の 1997 年 9 月 24 日は 25 m 程度の後退が見られる(図-11 のライン a-a')。ただし、この図では横軸は絶対的な岸沖位置で表示されており、この時は同年 5 月 4 日と比較すると潮位が 94 cm 高いため、実際の後退量は 15 m 程度である。

6. 結 言

本研究は、海浜変形解析の手段として衛星リモートセンシングの有効性を検討するとともに、数値モデルにより画像データから得られた結果の力学的因果関係を検証しようとしたものである。主な結論は以下の通りである。

1. 10 m と 20 m の空間分解能データを cubic convolution 補間して 2 m の画像に変換することにより、分解能以下の変化量を抽出することができた。
2. 碎波や遡上は海岸線読みとりの障害になるが、マルチバンドデータを併用することによって、その影響を小さくすることができた。
3. 分解能 10 m と 20 m という異なるデータを比較しなければならないという制約にも係わらず、画像解析データは定性的には測量データと一致する結果を

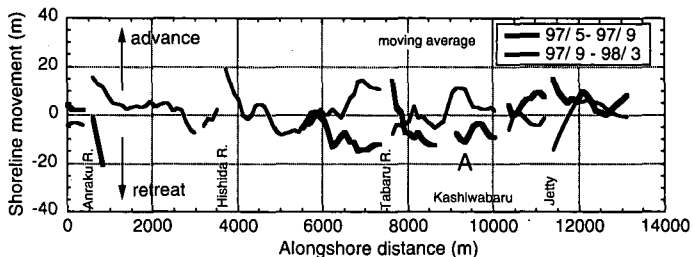


図-10 台風来襲直前・直後の画像データから解析した汀線変化

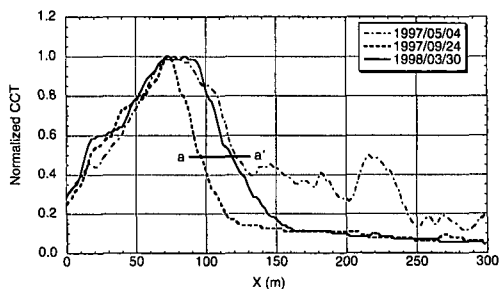


図-11 測線 A における反射率プロファイル

得た。

4. 台風来襲直前直後の画像データを用いて同様の解析を行ったところ、この約 4 ヶ月間の汀線前進・後退の特性は、先に調べた当該台風を含む約 1 年 4 ヶ月間の結果と量的にもほぼ一致する結果となった。さらに、この時侵食された領域は、その後約半年間でほぼ同じ量だけ汀線が前進しており、暴浪時の後の海浜回復過程が確認された。
5. 志布志湾沿岸では、波向の小さな変化が沿岸波高分布に大きく影響することを数値計算で確認した。柏原海岸の地形変化には台風の進行に伴う波向き変化が重要であることが示唆された。

謝辞: 台風 9719 号の波浪推算については、モデルの開発者である(株)テトラの駒口友章氏にご教示いただいた。また、田原川以南の深淺データは鹿児島県河川課から、衛星データは宇宙開発事業団から提供いただいた。謝意を表す。

参 考 文 献

- 駒口友章 (1993): わが国沿岸における異常波浪とその予知に関する研究。京都大学学位論文, 211 p.
- 根間俊明 (1998): 1997 年日本の天候・台風, 気象, Vol. 42, pp. 44-47.
- 間瀬 肇・高山知司・国富将嗣・三島豊秋 (1999): 波の回折を考慮した多方向不規則波の変形計算モデルに関する研究。土木学会論文集, No. 628/II-48, pp. 177-187.