

LANDSAT と ASTER データを用いた沿岸流速分布の解析

武 若 聡*・佐 藤 洋**

従来のリモートセンシングによる水域解析では 1 枚の画像を用い、流体力学的な知識を援用して流動パターンについて考察してきた。本研究では LANDSAT ETM+ と TERRA ASTER VNIR データを用い、沿岸流動を客観的に解析することを検討した。両データは、同一軌道を約 30 分の時間差を保って飛行する衛星 LANDSAT と TERRA から観測されるもので、撮影時間が異なる同一領域についての 1 組の画像が得られる。画像内に捉えられた濁質の移動状況を解析し、広域の沿岸流速分布の推定を行った。推定された沿岸流速分布には不均一が見られ、これが水深 20~40 m にある溪谷状地形による波の収束・発散によりもたらされた可能性を示した。

1. はじめに

従来のリモートセンシングによる水域解析では 1 枚の画像を用い、例えば、濁質の分布パターンを読み取り、流動パターンについて考察してきた。この手法でも様々な成果をあげてきたが(例えば、灘岡ら, 1989), 流れに関する考察を行う際には、流体力学的な知識を経験的に援用することが必要となり、得られる結果が主観的になることもある。

本研究では LANDSAT ETM+ と TERRA ASTER VNIR のデータセットを用い、広域の沿岸流動を客観的に解析する方法について検討した。両データは、同一軌道を約 30 分の時間差を保って飛行する衛星 LANDSAT と TERRA (Formation Flight, LANDSAT が先行) から観測されたもので、同一領域について、撮影時間が異なる 1 組のデータが得られる。ここでは画像内に捉えられた濁質の移動状況を PIV 的に解析し、鹿島灘の沿岸流速の分布を推定することについて検討した。

2. 解析の対象海域と衛星データ

(1) 解析の対象領域

鹿島灘の大洗港南から鹿島港北のおおよそ 35 km の区間を解析の対象とした。ここには海岸侵食対策(宇多, 1997)としてヘッドランドが約 1 km の間隔で設置されている(総計 26 基、一部区間は未設置、2001 年 3 月時点)。個々のヘッドランドの岸から沖合方向への長さはおおよそ 180 m である。図-1 に解析対象領域、ヘッドランドの建設位置(●の沖側)、以降で用いる座標系などを示す。

(2) 衛星データとその前処理

解析に使用したデータ LANDSAT ETM+ (以降、LANDSAT データと呼ぶ) と TERRA ASTER VNIR (以降 ASTER データと呼ぶ) の諸元を表-1 に示す。

これらは、ASTER GDS (2004) ならびに宇宙航空研

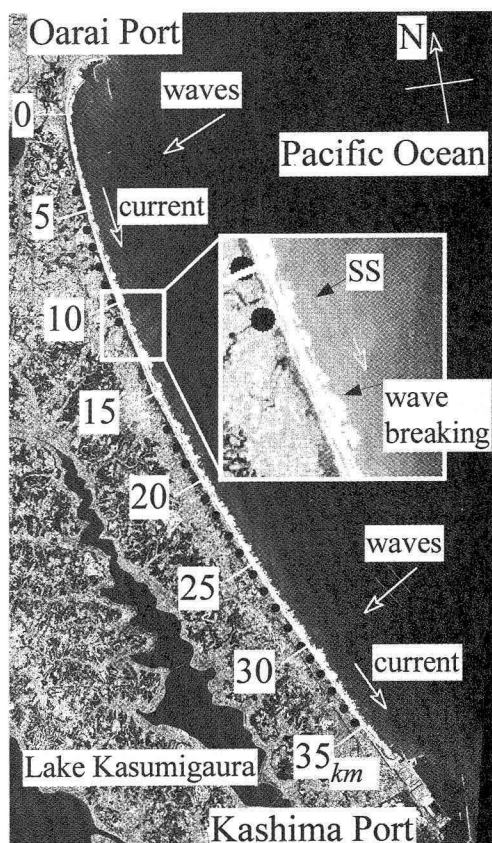


図-1 解析対象領域と沿岸位置の表示

●: ヘッドランド位置 (総計 26 基)

究開発機構地球観測情報システム (2004) のデータ検索サイトのブラウザ機能を用い、対象領域が同一の観測日に両データシーン内に完全に収められている、という条件で探した。

データの前処理として、先ず ASTER データ (15 m) を LANDSAT データ (28.5 m) の空間分解にリサイズし、観測時に生じた撮影領域のずれを補正したデータ (以降、ASTER-R データと呼ぶ) を作成した。LANDSAT と ASTER-R データのオーバレイ表示を目視で確認し

* 正 会 員 工 博 筑波大学助教授 システム情報工学研究科

** 学生会員 筑波大学大学院理工学研究科

表-1 使用データの諸元 (観測日 2001 年 3 月 16 日)

衛星名 センサ名 (プロダクト)	LANDSAT ETM+ (レベル 1 G)	TERRA ASTER VNIR (ASTL1 B)
観測地方時 (JST)	10 時 06 分 06 秒	10 時 43 分 21 秒
空間分解能	28.5 m	15 m
緑バンド観測波長帯	0.53-0.61 μm	0.52-0.60 μm
赤バンド観測波長帯	0.63-0.69 μm	0.63-0.69 μm
近赤外バンド観測波長帯	0.75-0.90 μm	0.76-0.86 μm

表-2 観測放射輝度 R ($W/m^2 \cdot \mu\text{m}/\text{sr}$) と輝度データ DN ($0 \leq DN \leq 255$) の関係

バンド	LANDSAT	ASTER
緑	$R_{L-G} = 0.796 DN_{L-G} - 6.4$	$R_{A-G} = 0.676 (DN_{A-G} - 1)$
赤	$R_{L-R} = 0.619 DN_{L-R} - 5.0$	$R_{A-R} = 0.7.8 (DN_{A-R} - 1)$
近赤外	$R_{L-NIR} = 0.965 DN_{L-NIR} - 5.1$	$R_{A-NIR} = 0.423 (DN_{A-NIR} - 1)$

表-3 鹿島港沖合の波浪観測データ

(2001 年 3 月 16 日 10 時)	
有義波高 $H_{1/3}$	2 m
有義周期 $T_{1/3}$	9 s
平均波向 α	63°

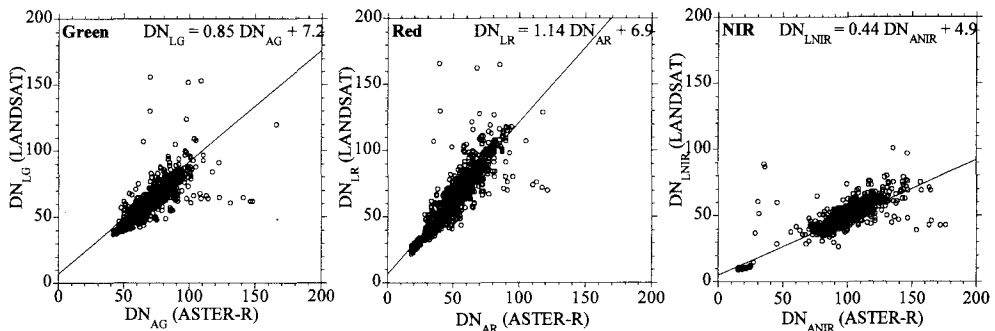


図-2 LANDSAT と ASTER-R の輝度データの関係 (左: 緑バンド, 中: 赤バンド, 右: 近赤外バンド)

たところ, 人工構造物の隅角点, 海岸線の分布などはほぼ一致した。

両データの緑・赤・近赤外領域のセンサの観測感度を調べ, これらがほぼ公称性能を発揮していることを確認した。観測日のセンサゲインの設定から求めた各バンドの観測放射強度 R [$W/m^2 \cdot \mu\text{m}/\text{sr}$] と輝度データ DN ($0 \leq DN \leq 255$) の関係を表-2 に示す。

LANDSAT と ASTER-R のシーン内の陸域と水域にかかる線に沿っての緑・赤・近赤外の各バンドの輝度データ (約 1300 点) を比較した結果を図-2 に示す。

図中の直線は, 両センサの観測放射強度が等しいとして, 輝度データの間に成立する関係を示したものである。例えば, 緑バンドについては $R_{L-G} = R_{A-G}$ とすると $DN_{L-G} = 0.85 DN_{A-G} + 7.2$ の関係が得られる (添字については表-2 を参照)。これらの関係は, 各バンドの輝度データが密に分布するところで概ね保たれているようである。

図-2 に示した輝度データの散布状況には, センサの観測波長帯の相違, 両観測データの撮影が行われた間の太陽高度と大気状態の変化などが反映されていると考えられる。これらの効果を分析することにより, 地表, 水塊などの状態に関する情報を新たに取得する可能性があ

る。

(3) 海象と濁質移動状況の確認

鹿島港沖合で計測された当日の海象は, 有義波高 2 m, 有義周期 9 s, 波向 63° (東北東) であった。波は海岸線に対して斜め入射し, 南方に向かって流れる沿岸流が発達する状況にあったと考えられる。

LANDSAT と ASTER-R データを擬似カラー表示して相互に眺めたところ, 砕波帯の沖側に浮遊する濁質パターンが海岸線に沿って南方に移動していたこと, 全てのヘッドランド (岸沖長さ約 180 m) が砕波帯の中にあったこと, 砕波帯の沖側には濁質雲がパッチ状に広がっており, 一部区間では, これが沿岸方向に数 100 m の間隔で規則的にあったことなどを確認した (図-1 中の拡大表示枠内参照)。また, 緑バンド (0.52~0.60 μm) のデータが濁質の移動を最もよく捉えていた。以降では, この濁質の移動を追跡し, 砕波帯外側の沿岸流速を推定した。

3. 沿岸流速分布の推定

沿岸流動の推定は LANDSAT と ASTER-R データに対して, PIV 的な解析を行って求めた。また, これに先立ち, 沿岸流の分布について考察する際に重要となる砕波波高, 砕波帯幅, 波の入射角などを ASTER と

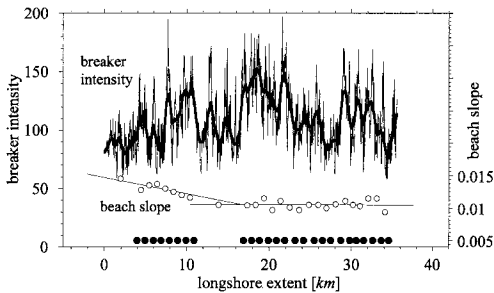


図-3 砕波強度と海底勾配の沿岸分布
—: 砕波強度, ○: 海底勾配, ●: ヘッドランド位置

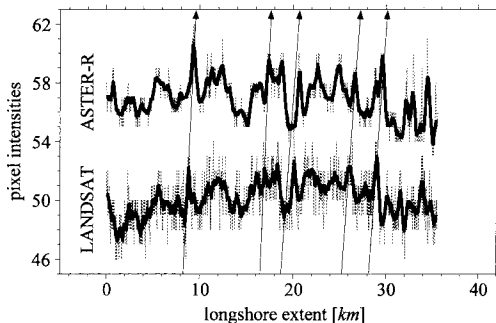


図-4 緑バンド輝度データの沿岸分布 (測線: 570 m)
破線: 原データ, 実線: 移動平均データ
図中矢印は, 輝度分布中の特徴点の移動を例示

ASTER-R データから読み取ることを試みた。

(1) 基準線の設定

沿岸方向の基準線を次の手順で設定し, これに沿ってデータを取り出し解析を行った。ヘッドランドの先端位置を ASTER データから読み取り, これらを結ぶ線を基準線とし, この線上, あるいは, これに平行な線に沿って輝度値データを読み出した。ヘッドランドの沖合先端位置はある時期の海岸地形を参考にして設計されており, 先端位置はその時の等深線に沿っていると考えられる。図-1 の沿岸方向位置は, この手順で作成された基準線を用いて表示した。

(2) 砕波状況

波の砕波状況は時々刻々変化するもので, LANDSAT データと ASTER-R データから沿岸に沿っての白濁状況を読み取り, 両者の平均値を砕波の強度を表わす指標とした。具体的には, 先に説明した基準線と沖合方向に 285 m 離れた位置に平行な線を設定し, これらの線間の輝度値分布の岸沖方向平均を求めた (図-3)。砕波強度は沿岸方向に不均一な分布となっていた。

(3) 波の入射角と海底勾配

ASTER データを擬似カラー表示したところ, 砕波帯の沖側で波峰線を確認することができたが, これらの海

岸線に対する角度を解析対象領域全てについて読み取ることはできなかった。

茨城県庁より提供を受けた深淺図から, 水深 1 m から 6 m にかけての平均傾きを求め, 海底勾配とした。図-3 にヘッドランドの位置と海底勾配の沿岸分布を示す。海底勾配は概ね 0.01 とみなせるが, 大洗海岸近くの北部ではやや大きな値となる。

(4) 沿岸流速分布の推定

基準線の沖合方向の 430 m から 680 m の位置に, 10 本の等間隔な平行線 (以降, 測線と呼ぶ) を設定し, LANDSAT と ASTER-R の緑バンドの輝度値を抜き出した。基準線の付近には, 砕波により発生した気泡が海面上にあった。この気泡は数分で消滅するものであり, その沿岸方向の移動を 30 分にわたって追跡することはできない。砕波帯の直近が興味の対象ではあるが, 砕波の影響がほとんど現れない沖側の領域のデータを解析して流動を推定した。

図-4 に基準線から沖合方向に 570 m 離れた測線に沿っての輝度値分布を例示する。輝度値の変動は, 砕波帯の沖側の濁質雲がパッチ状に不連続的に広がっていることに対応している。一部の領域では, 濁質雲が沿岸方向に数 100 m の間隔で規則的に存在していた。図中の矢印 (↑) は, 輝度分布の特徴点の移動を目視で読み取った結果で, 着目した部分が, 変形しながら沿岸流によって下手に移動している状況が捉えられている。

以上の手順で抽出した輝度データの分布に移動平均を施し, この分布に対して相互相関解析 (可視化情報学会, 2002), すなわち流向を固定した PIV 解析を行った。測線に沿う濁質の移動距離を求めることにより, 沿岸流速の速さを推定した。得られた沿岸流速分布の結果を図-5 に示す。相互相関解析はテンプレートの長さを 2850 m に設定して行い, 相関係数が 0.7 以上となった場合に有効な推定が行われたとした。図-5 には, 最も岸寄りの測線 (基準線からの沖合方向距離 430 m) と沖側の測線 (同 680 m) に沿っての結果とこれらの区間内の平均値が示されている。

図-5 には砕波帯の外側に 0.1~0.3 m/s 程度の沿岸流があったことが捉えられている。ここで推定された流速値は砕波帯外縁近傍のものであり, 砕波帯内ではこれより大きな流れがあったと考えられる。沿岸流は全般に対象領域の沿岸下手に向かって増大し, 鹿島港の防波堤近傍で減速している。

各地点の沿岸流速の岸沖分布は砕波帯に近くなるにつれて大きな値を示すことが推定結果の妥当性を支持している。また推定された沿岸流速の値を, 離岸距離毎に沿岸方向に平均した結果を図-6 に示す。得られた結果は, 砕波帯の外側では流速値が沖に向かって小さくなる, と

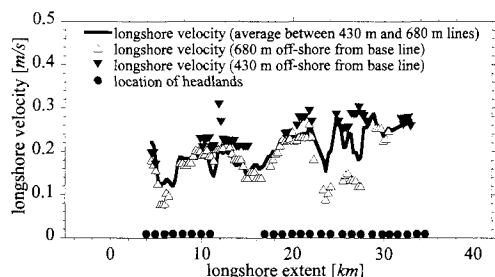


図-5 推定された沿岸流速の分布

▼：基準線より 430 m 沖側の線に沿った流速，△：同 680 m，—：430 m と 680 m の間の平均沿岸流速，●：ヘッドランド位置

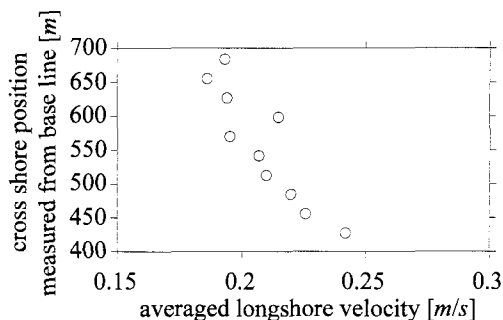


図-6 離岸距離毎に平均した沿岸流速

いう一般的に考えられている沿岸流速の岸沖分布に合致する。

沿岸流速分布には数 km スケールの変動が見られ、これにはほぼ対応した形で碎波帯の白濁度にも変化が見られた(図-3)。沿岸方向の流速値は不均一に分布しており、ヘッドランド設置の有無、海底勾配などとの関連はないようである。次章では屈折計算を行い、流速分布に見られた数 km スケールの変動について考察する。

沿岸域には岸沖方向の速度成分もあったと考えられるが、全般にその大きさは沿岸方向の成分に比較して小さく、この解析で使用しているデータからこれを推定することは難しい。

4. 屈折計算による沿岸流速分布に関する検討

汀線に対して斜め入射する波は沿岸流を駆動する外力である。ここでは屈折計算を行い、波の入射状況を調べて先に示した沿岸流速分布の不均一について考察する。

屈折計算に用いた水深分布のデータは海上保安庁により提供された海の基本図から作成した(図-7)。鹿島灘沖合の海底には、水深 20~40 m にかけて溪谷状の地形があり、波の波長と進行方向により屈折効果が顕著に現れる可能性がある。

屈折計算(土木学会水理委員会, 2002)は次の手順で

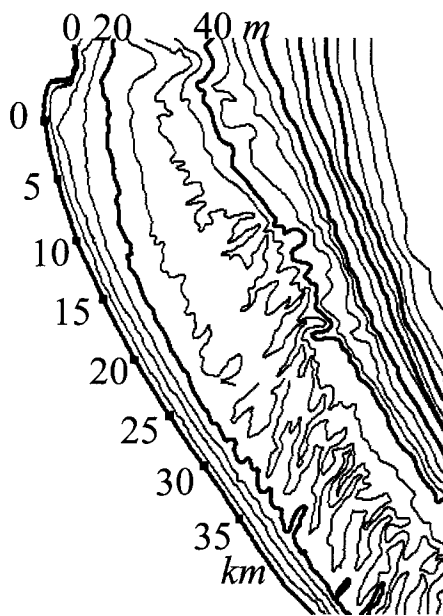


図-7 海底地形. 等水深線間隔, 5 m. 水深 20~40 m の間に溪谷状の地形がある。

行った。まず、鹿島港沖合で観測された波の周期(9 s)と波向を用い、沖に向かって逆向きに屈折計算を進めた。屈折係数、波の進行方向に変化見られなくなる領域を確認し、これより沖側を屈折計算の沖側境界(汀線より 20~30 km 沖合、水深 130 m)とした。次に、沖から岸に向かう屈折計算を進め、屈折線図を求めた(図-8)。沖側境界での波向線間隔は 500 m に設定した。

溪谷状の地形の効果により、波向線の収束・発散が生じ、一部領域では波向線が交差している。これにより、沿岸域には 2~3 km の間隔で波高分布に不均一が生じた可能性がある。沿岸域で波向線の間隔が疎になる領域でと局所的に沿岸流速が小さくなる領域が一部対応している。

計算された各波向線の水深 6 m 地点の間隔、局所的な汀線法線方向から測った入射角(直入射=0°、鹿島港向の斜め入射を正)と先に求めた平均沿岸流速の推定結果を合わせて図-9 に示す。波向線間隔が 500 m 以下の値を示す地点では屈折係数が 1 を超え、波高が増大している。全般に入射波高が大きくなる領域、波の入射角が大きくなる領域にて沿岸流速が大きくなるという関係が見られる。

波向線の収束が強い領域、あるいは、交差があった領域では碎波が生じていた可能性がある。しかしながら、LANDSAT, ASTER 画像のいずれにも沖合領域での碎波は見られなかった。当日の波が、波形勾配の小さいうねり性の波であったことから、沖合で碎波が生じていた

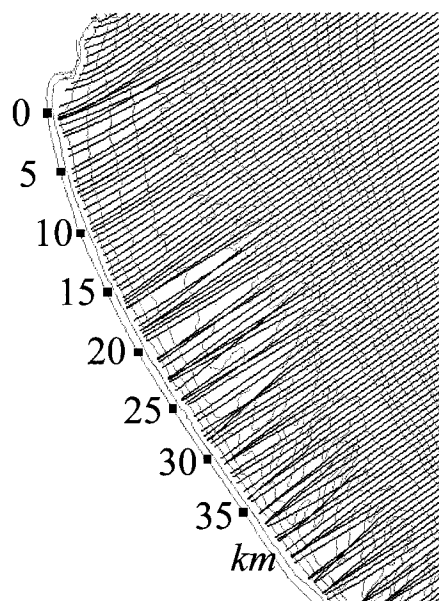
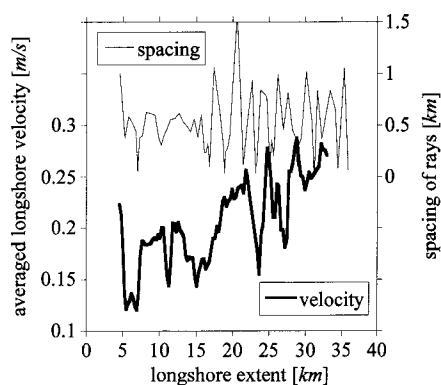


図-8 屈折線図。沖合波向線間隔：500 m

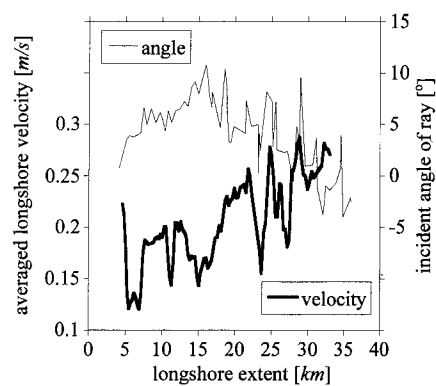
としても、画素スケールより小さいスケールで白濁が生じ、観測されなかった可能性がある。一方では、屈折計算ではエネルギー増大によりもたらされる回折効果を考慮していないこと、波の不規則性によりもたらされる波高増大の抑制効果がないことなどが極端な波高増幅を招いている。

5. 結 言

LANDSAT と ASTER データを用い、広域の沿岸流速分布を推定した。砕波帯の外側に広がる濁質雲の移動を解析して沿岸流速を求めた。データ処理方法、解析手法について検討した。屈折計算を行い、推定された沿岸流速分布について検討した。推定された砕波帯外の沿岸流速の岸沖分布は、沖側で小さい値を示した。沿岸流速の沿岸方向分布には不均一が見られた。これは水深 20～40 m にある溪谷状地形により、入射波の収束・発散が生じたことによりもたらされた可能性を示した。



(a)



(b)

図-9 (a) 平均沿岸流速（太線）と波向線間隔（細線）の関係、(b) 平均沿岸流速（太線）と入射角（細線）の関係

参 考 文 献

- 宇多高明 (1997): 日本の海岸侵食, 山海堂, 442 p.
- 宇宙航空研究開発機構地球観測情報システム (2004): <https://isswww.eoc.jaxa.jp>
- 可視化情報学会編(2002): PIV ハンドブック, 森北出版, 328 p.
- 土木学会水理委員会 (2002): 水理公式集例題プログラム集, 第 5 編, 海岸・港湾編, 土木学会.
- 灘岡和夫・山下俊彦・蒲田浩久・佐藤尚稔・牧野有洋 (1989): 衛星画像ならびに現地データに基づいた石狩川河口周辺の沿岸水理解析, 海岸工学講演会論文集, Vol. 36, pp. 219-223.
- ASTER GDS (2004): <http://www.gds.aster.ersdac.or.jp>