

## ランドサットによる沿岸流況調査

宇多高明\*・村井禎美\*\*・竹 洸\*\*\*

### 1. ま え が き

近年、広域の情報を瞬時に得られる利点を持った衛星を、沿岸海域の流況調査へ利用することが期待されている。現在、ランドサット4、5号により同一地域の撮影間隔は8日となっているが、さらに61年度冬期には国産の海洋観測衛星MOS-1が打ち上げられる予定であり、衛星の利用機会は以前よりもずっと増えている。こうした理由より、衛星を利用したリモートセンシング技術の海岸調査への期待は益々高くなっている。

筆者らは、駿河湾において衛星と同期させて航空機によるMSS撮影と海上観測を行い、海面輝度と水質指標の関係を定量的に検討した。これにより、濁度と衛星の可視域データが良い相関関係を示すことを明らかにした。また海上観測と衛星との間の時間遅れの影響についても検討した<sup>2)</sup>。しかしながら衛星データから大気の影響を取り除く手法は十分確立していないのが現状である。本研究では、駿河湾での現地観測を通じて、駿河湾内の大規模環流調査や、大井川河口前面海域などの局所海域での流況調査に衛星データが活用しうること、および近赤外域データを用いることで大気の影響を補正できることを明らかにする。

### 2. 観 測 方 法

観測は、静岡県の大井川、安倍川河口の前面海域を対象として、昭和60年10月21日と11月14日に行った。10月21日はランドサット4号と船の同時観測、また11月14日はランドサット5号、航空機、船の同時観測である。海上観測は両海域とも河口付近の堤防または海浜上に誘導点を設置し、その誘導点を中心として放射状に測線を設けて行った。測定は、測線に沿う表面測定、定点観測および分光反射率測定から成る。ただし定点観測、分光反射率測定は大井川河口前面海域のみで行った。測定項目とその方法は以下のようである。表面測定では船を測線に沿って航走させ、0.5m以浅の海面

近の濁度、水温のデータを連続的に測定した。定点観測では、濁度、水温、流向流速を3地点において1時間毎に10分間ずつ合計6時間測定した。計測器はいずれも0.5m以浅にセットした。分光反射率測定は定点観測地点(3地点)のほかに3地点を加え、合計6地点でランドサットの撮影前後に各1回行った。用いたランドサットデータは、4号がMSSデータの精密補正モードのハイゲインCCTである。また5号ではTMデータのバルク補正モードを用いた。航空機によるMSS撮影は、大井川、安倍川河口海域において各1コースずつ行った。撮影高度は両コースとも3000mである。また撮影波長帯は可視域(0.55~0.6 $\mu$ m)、近赤外域(0.8~0.9 $\mu$ m)、熱赤外域(8~14 $\mu$ m)の3波長帯である。

### 3. 駿河湾内における環流調査

初めにランドサットにより得られた11月14日の駿河湾域における映像より、濁水の拡がり状況を調べ、さらに駿河湾全体の流況を推定した(図-1)。なお、図には10月21日のデータから推定される流況も示した。11月14日のランドサットデータによれば、田子ノ浦港から西

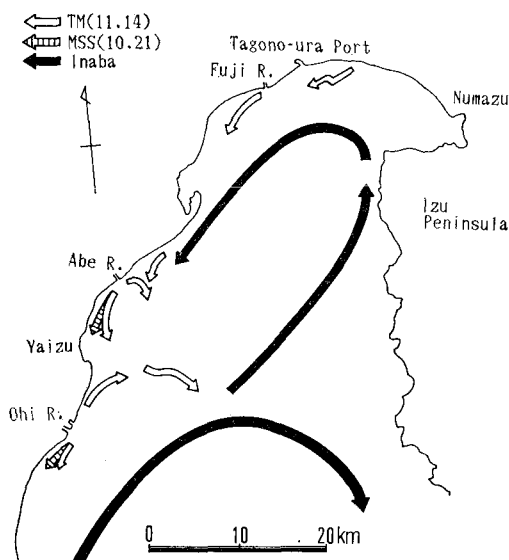


図-1 駿河湾全体の流況

\* 正会員 工博 建設省土木研究所海岸研究室  
 \*\* 正会員 工修 建設省土木研究所海岸研究室  
 \*\*\* 正会員 建設省土木研究所海岸研究室

岸沿いに南下する流れがある。また大井川の北では北向きの流れがあり、焼津沖では冲向きの流れとなっている。10月21日のデータでは流向が判読された地点は2箇所と少ないが、2回の観測で流向はかなり良い対応を示す。駿河湾内の流況に関しては稲葉が研究<sup>8)</sup>を行っており、図-1に示す環流パターンが生ずると述べている。これは沖合の浅瀬である銭州と黒潮の流軸との相対位置関係により定まるもので、流軸が銭州の南にあるときの環流パターンである。ランドサットデータより推定された流向と稲葉の環流パターンは良い一致をみている。

図-1のTMデータに見られる田子ノ浦港東沖の流向は、昭和第2放水路から流入した濁水の拡散より定めたものである。図-2にはこの海域のTM1バンドより得た詳細は等輝度線分布を示す。高輝度の部分は放水路より一旦東へ向かったあと、大きく西へ方向を変えている。これは沖合において湾内の反時計回りの環流の影響を受けて濁水が流動したためと考えられる。

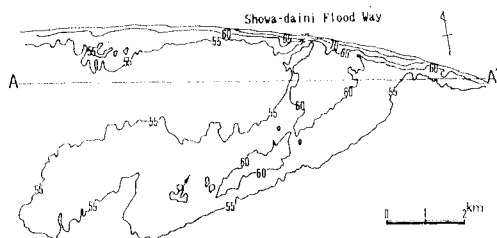


図-2 昭和第2放水路沖の等輝度線分布

#### 4. 大井川河口海域における濁水分布の観測

海上観測を行った大井川河口海域での濁度分布について述べる。図-3に海上観測の測線配置と10月21日、11月14日の定点観測点(a, d)および11月14日の分光反射率の測定(b~g)点を示した。

筆者らは既に水質指標と水面輝度の相関関係を定量的に検討した<sup>1), 2)</sup>。今回のデータについても同様な整理が可能である。10月21日のMSS4バンドおよび11月14日のTM2バンドの相対輝度と濁度の相関を調べたところ、MSSのCCTと濁度 $S$ の間には相関係数 $R=0.92$ で式(1)が、TMと濁度の間では $R=0.85$ で式(2)が成立した。

$$S = 0.28CCT - 12.10 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$S = 0.56CCT - 11.15 \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに $S$ の単位はppmである。ただし相関を調べる際には、ランドサットの撮影時との時間のずれの少ない測線において相対輝度と濁度の相関関係を調べる必要がある<sup>2)</sup>。ランドサットの撮影時刻は、10月21日の4号が9時52分、11月14日の5号が9時50分である。そこでそれぞれ9時38分~9時50分と、9時38分~9時55

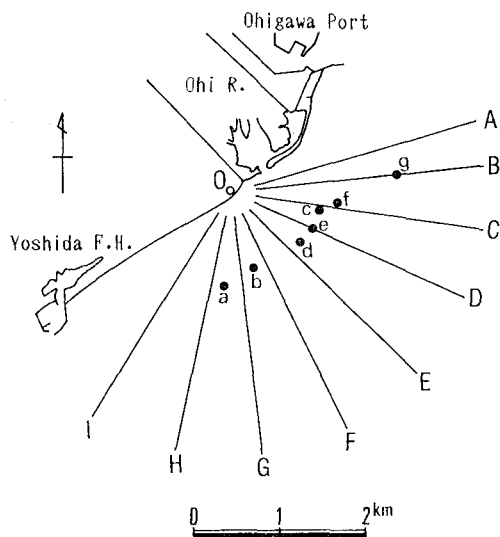


図-3 海上観測の測線、測点配置

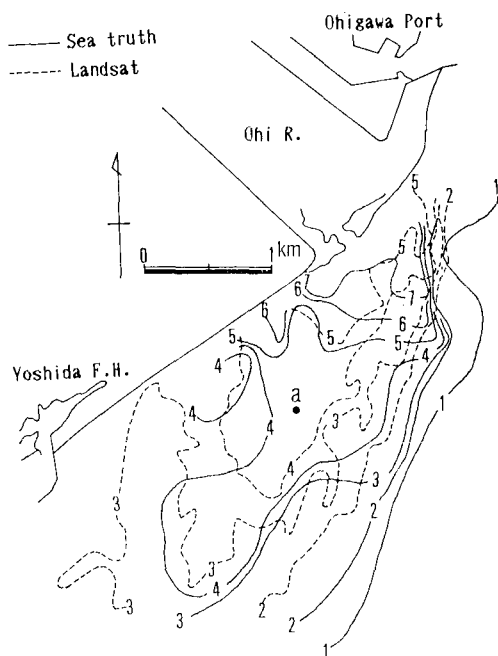


図-4 大井川河口海域における濁度分布(60年10月21日)

分に測定を行った測線E, Cのデータを用いた。

CCTと濁度の相関式が得られたので、これより濁度の平面分布が定められる。10月21日の大井川河口海域における濁度の平面分布を図-4に示す。図中、実線が海上観測により得られた濁度分布、破線がMSSデータより定めた濁度分布である。ただし濁度分布を求める際、大気の影響の補正は行っていない。ランドサットによる撮影は一瞬で行われるのに対し、海上観測には数時間を要する。表-1に10月21日の各測線の観測開始時

刻と終了時刻をまとめて示す。

ランドサットの撮影時刻（9時52分）とは最大で1時間28分のずれ（測線 OI）がある。ランドサット、海上観測によって得られた濁度分布では、共に河口より流入したと思われる濁水が南西方向に広がっており、河口海域の流れが大局的には南西向きであったことが分かる。

次に、a 点での流向流速観測の結果を図-5 に示す。図中、

表-1 測線別測定時刻一覧表

| 測線 | 開始時刻  | 終了時刻  |
|----|-------|-------|
| OA | 8:52  | 8:55  |
| OB | 8:58  | 9:05  |
| OC | 9:07  | 9:21  |
| OD | 9:24  | 9:36  |
| OE | 9:38  | 9:50  |
| OF | 10:00 | 10:22 |
| OG | 10:28 | 10:44 |
| OH | 10:53 | 11:06 |
| OI | 11:07 | 11:20 |

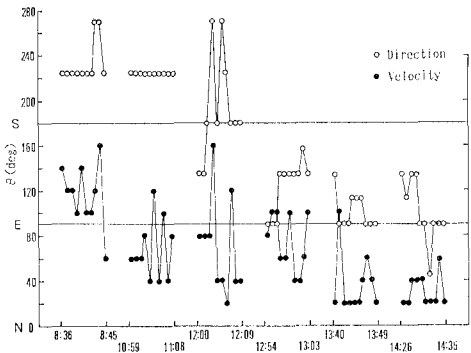


図-5 a 点における流向流速の経時変化

$\theta$  は流向であり、N 方向へ向かう流れを  $\theta=0$  とし、これより時計回りに測った角度で表示した。また  $V$  は流速値である。流向は8時から11時の間、確かに南西向きである。しかし12時から14時の間、流向は南、南東、東と徐々に変化し、14時半にはほぼ東向きとなった。流速は流向が南西であった8時台には0.4~0.15 m/sの間で変化しているが、その後次第に小さくなり、14時以降はほぼ0.1 m/s 以下となった。MSS の撮影時の9時52分までの間、a 点の流向は南西方向であるが、これは MSS による濁度分布から推定された流向と一致する。以上よりランドサットデータより流向が推定しうる事が分かる。さらに濁度の拡散速度が小さいとすれば、等濁度線の位置のずれと、MSS 撮影時と海上観測の時間との差より流速が求められる。表面測定を行っている間の a 点の流向はほぼ南西である。定点 a の南西側に位置する 4 ppm の等濁度線が南西方向に移動したと考え、近傍の測線 OH、OI の測定時刻より海上観測時刻を求めると11時6分となる。これより移動速度は約0.2 m/s となる。これはオーダー的に見て a 点の流速測定値とほぼ一致する。

次に、11月14日の観測結果を示す。図-6 は大井川河口海域における濁度の平面分布である。全体的に濁水は南西から南方向へ拡散している。ただし河口部沖を詳

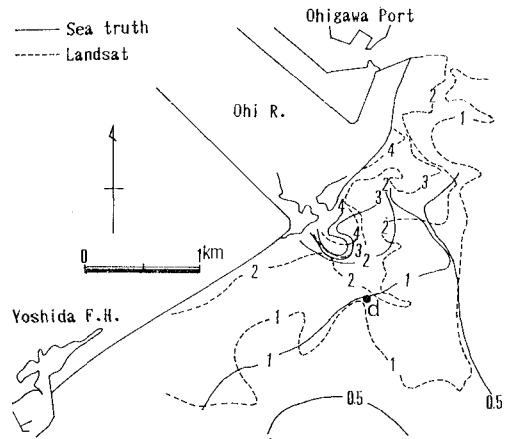


図-6 大井川河口海域における濁度分布 (60年11月14日)

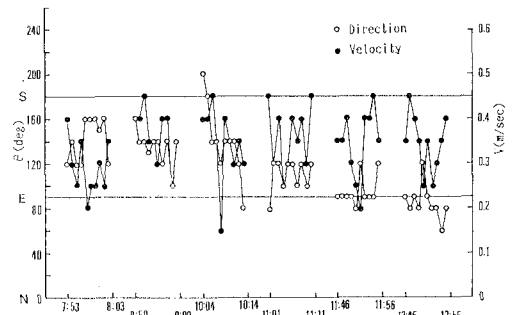


図-7 d 点における流向流速の経時変化

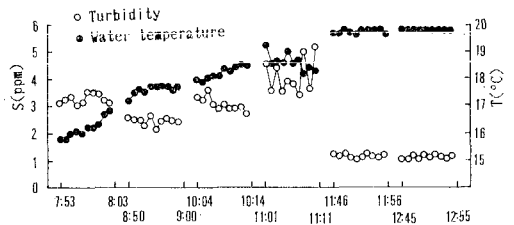


図-8 d 点における水温、濁度の経時変化

しく見ると、そこでは南東方向への海水流動も存在するようである。図中、d 点では流向流速の測定が行われているので、濁度分布との関係調べるために観測結果を図-7 に示す。流向は8時頃南東向きであったが、11時頃から東向きに変わった。流速はばらつきが大きく、長期的なトレンドは持っていない。絶対値としては0.2~0.45 m/s の値を有する。さらに図-8 には d 点の濁度および水温の経時変化も示した。水温は観測期間中一貫して上昇し、16°C から 20°C になっている。d 点の位置は河口前面に位置しているために、測定開始後海水が南東方向に流動している間（図-7 参照）は、河川水の影響を受け低い水温となる。しかし11時46分以降流れが東向きになると、ここでは図は省略したが、河口南側

に楔状に入り込んでいた高温水の影響が表われ、水温が高くなった。さらに、濁度は8時間前には約 3 ppm であったが、その後増加傾向となり、11時には約 4 ppm と高くなった。しかし 11 時 46 分には急激に低下し、1 ppm となった。図-7 によると流向は 11 時頃まではほぼ南東方向に流れていたが、11 時 46 分以後東向きに変わっている。この流向特性と図-6 の濁度分布とを考えると、南東方向へ流動しているときは高濁度となり、東向きに流動すれば低濁度となって、地点 d における濁度の経時変化は、濁度の平面分布と流向データとからかなり良く説明される。

以上、10月21日と11月14日の大井川河口海域での流況について述べた。駿河湾全体での大局的な流況は両日ではほぼ一致していたが、河口部周辺のように局所的により小さなスケールで見ると流向にはかなりの相違が存在している。このようなスケールでの流動を調べるためには、全データを処理するのではなく、部分的に切り出したデータで解析を加える必要がある。

## 5. ランドサットデータの処理

衛星データは一般にデータ量が多いため、計算機のメモリまたは計算時間等の制約によりサンプリング処理を必要とする。ここでは図-2 に示した昭和第2放水路からの濁水の拡散を対象として高濁度の海域を横切るライン A-A' でサンプリング処理の精度を確かめた。結果を図-9 に示す。実線が生データであり、破線は4データ毎に1データをサンプリングし、さらに3データの移動平均をとった結果である。生データの CCT 値の有意な変化は約 11 である。これに対し生データからのサンプリング処理を行ったデータを差し引いた変動の標準偏差は 2 である。したがって変動は有意な変化に対して十分小さいと言える。これより、ここで用いたサンプリング法はほぼ妥当なことが分かる。

次に、パスラジアンスの影響の補正法を考える。リモ

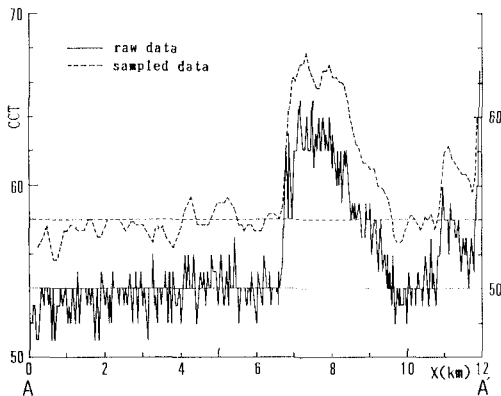


図-9 測線 A-A' に沿う生データとサンプリング後データの比較

ートセンシングデータには海面からの放射輝度のほかに大気の影響が含まれている。このためランドサット MSS, TM データ等から濁度等の水質指標を評価する場合、現状では観測の都度多くの sea truth データが必要となる。さらに大気の状態は空間的に一様ではない。このため大井川河口海域のような一海域での sea truth データと放射輝度の関係は、ランドサット MSS データ1シーンのような広範囲に適用できるとは言えない。ランドサットデータを十分活用するためには、水質指標を定量的に評価できる補正手法が必要である。

一般に、水面での近赤外域の放射輝度は 0 に近似できる。しかしランドサットデータではパスラジアンスの影響で近赤外域においても放射輝度を持つ。よってこの値を用いてパスラジアンス量の評価する。ここではランドサット TM, MSS, 航空機 MSS および分光放射計のデータを用いて、近赤外域データによるパスラジアンスの補正手法について検討する。まず、海上観測における測点 e, g の分光反射率を調べると、両地点のデータとも可視域の 550 nm 付近で反射率が最大値をとり、近赤外域の 750 nm で極小値となった。また水面における近赤外域の波長の反射率は確かに低かった。なお測定時の濁度は 3.3 ppm (e), 1.9 ppm (g) である。

次に、ランドサット TM, MSS および航空機 MSS データのそれぞれについて補正を行う。まず可視域と近赤外域のデータの相関を求める。本来近赤外域で反射率が 0 となるはずにもかかわらず、パスラジアンスのため見かけ上放射輝度を持つ。そこでこれに対応する可視域の放射輝度 ( $C_0$ ) を読みとった。これをもとに、次式により補正輝度  $BR$  を算出した。

$$BR = (C - C_0)(R_{\max} - R_{\min}) / (255 + R_{\min}) \quad \cdots (3)$$

ここに、 $C$ : 可視域の放射輝度,  $R_{\max}$ ,  $R_{\min}$ : 内蔵光源

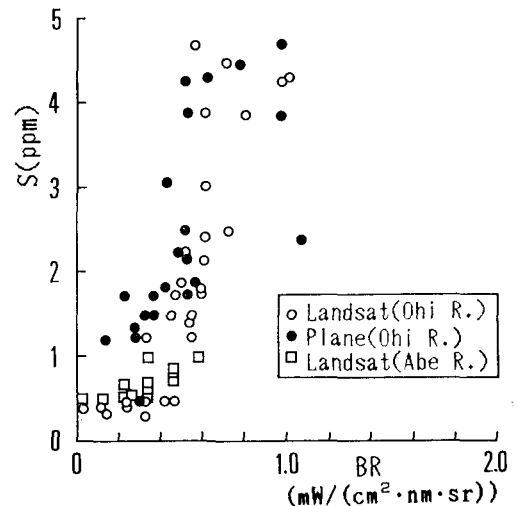


図-10 補正輝度 (BR) と濁度 (S) の関係

の最大値、最小値である。結果を 図-10 に示す。図には大井川河口海域における航空機 MSS とランドサット TM、安倍川河口海域におけるランドサット TM の3者のデータを同時に示した。3者は、高度、場所が違ってもかかわらず濁度との間にほぼ同様な関係が成立し、相関係数  $R=0.77$  で式(4)が成立する。

$$S=0.44BR-0.41 \quad \dots\dots\dots (4)$$

結局、近赤外域データを用いた補正により、撮影高度および海域の変化に対するパスラジアンスの影響をほぼ補正しうることがわかる。すなわち少なくとも1海域で sea truth を行えば補正輝度と濁度の定量的関係を見出すことができる。

以上の解析は近赤外域の海面での反射輝度を0と仮定して行ったものであるが、実際に分光反射計を用いて海面の反射輝度を求めると0とはならず、わずかに値を有している。そこでこの点を実測データより調べる。図-11 に測点 b~g において測定した分光反射輝度(BS)と濁度(S)の関係を示す。図には近赤外域の TM 2 バンドを代表する 550 nm の波長に対する値を示す。近赤外域のデータは濁度と独立であるが、破線で示すように平均で  $BS=0.25$  なる値を有する。これより近赤外域の反射輝度は小さな値ではあるが0ではないことが分かる。

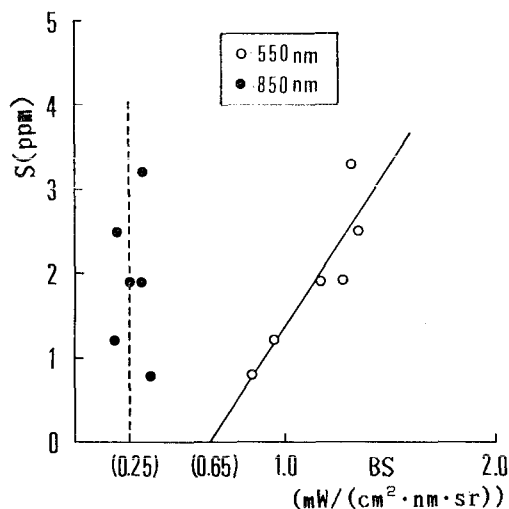


図-11 分光反射輝度(BS)と濁度(S)の関係

したがって近赤外域データを用いた補正において、海面での反射輝度を  $BS=0$  ではなく、 $BS=0.25$  にすれば精度が向上する。

また、図-11 には可視域の TM 4 バンドを代表する 850 nm の BS と S の関係も示す。可視域データは相関係数  $R=0.88$  で次の関係が成立する。

$$S=3.84BS-2.5 \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに BS は  $mW/(cm^2 \cdot nm \cdot sr)$ 、S は ppm 単位である。海面直上で分光反射計のデータと濁度との関係を図-11 のようにあらかじめ定めておけば、補正によってパスラジアンスの影響をとり除いたデータが求められたとき、その都度 sea truth データをとることなく、定量的に濁度が計算されることになる。

## 6. 結 論

本研究によって得られた主要な結論をまとめると以下の通り。①ランドサット5号の TM データより駿河湾内の反時計回りの大規模な環流の存在が確認され、広域の場合における海水流動調査に TM データが有効なことが分かった。②衛星データによる濁度分布から流向が推定された。また海上観測と衛星データの濁度分布における等濁度線の変化より代表地点の流速が推定されたが、その流速は定点観測による値とオーダー的に見てほぼ一致した。③近赤外域データの海面での反射が小さいことを利用してパスラジアンスの評価を行った。補正を行うことにより、撮影高度および海域の違いに対するパスラジアンスの影響を除くことができる。なお、本研究は科学技術庁の海洋遠隔探査技術の開発研究の一貫として進められたものであることを付記し、科学技術庁の宇宙開発課の担当者に深甚な謝意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 宇多高明・古川博一・竹舘 勉: ランドサット・航空機・船の同時観測による沿岸海域特性の把握, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 690~694, 1984.
- 2) 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.
- 3) 稲葉栄生: 日本全国沿岸海洋誌, 第11章駿河湾, pp. 453~454, 東海大学出版会, 1985.