

ランドサットによる沿岸水理の観測

宇多高明*・古川博一**・竹 潤 勉***

1. ま え が き

近年、沿岸海域の流況調査の新しい方法としてリモートセンシング技術の応用が期待され、多くの研究が行われるようになった。また現在ではランドサット4、5号の併用により同一地域の撮影間隔が8日となり、更にランドサット5号のTMセンサーにより赤外領域の撮影が可能となったため、以前にも増してリモートセンシング技術の沿岸調査への応用が期待されている。

沿岸水理の分野でランドサットを応用する場合、海域へ流入する河川水を一種のトレーサーとして追跡する方法がある。筆者らは大井川河口海域においてランドサット、航空機、船の同時観測に成功し、これより濁度を指標として3者のデータが定量的意味において良い相関関係を示すことを前報¹⁾で明らかにした。本研究は前報に続いて行われたものであり、ランドサットを応用する場合の海上観測の方法について詳しく検討を加えた。

衛星等による撮影は瞬間的に行われるが、海上観測には相当長時間を要する。また河口海域では海水と河川水の混合が行われており、また海水流動も存在するため濁度等の分布は時間的空間的に変化する。本報ではこうした複雑な条件の下での望ましい海上観測法、及び観測法が適切でない場合に生じうる誤差について大井川、安倍川河口海域での実証データをもとに明らかにする。

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行った。この海域でのランドサットを利用した調査の最適時期は5月と10月であるために²⁾、昭和59年10月より観測を行う予定を立てたが、天候が悪かったため最終的に11月27日に観測を実施した。両海域ともランドサット、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、誘導点を中心に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、鉛直分布測定及び定点観測か

ら成る。鉛直測定は両海域とも7地点で、また定点観測は大井川河口海域の3地点で行った。測定項目は表面・鉛直測定では濁度、塩分濃度、水温とし、定点観測ではこれらの項目に加えて流向流速測定を実施した。表面測定では船を測線に沿って航走させ、水深0.5m以浅のデータを連続的に測定した。鉛直分布は1m間隔で測定した。定点観測では各点とも1時間おきに10分間ずつ、延べ5時間測定した。主要な測定機器としてはSEI-SKIM 1型水中濁度計、SEA-BIRD II型曳航式水温塩分計及びCM-2型電気流速計を使用した。

衛星データは、ランドサット5号の精密補正モードのハイゲンCCTを用いた。また航空機によるMSS撮影は大井川、安倍川の河口海域において各1コースずつ行った。大井川河口海域では駿河海岸全域、延長18kmを対象とした。安倍川河口海域では大崩海岸から三保ノ松原に至る25km区間を対象とした。撮影高度は両コース共3000mである。撮影波長は可視域(0.55~0.6 μ m)、近赤外域(0.8~0.89 μ m)及び赤外域(8.0~14.0 μ m)の波長帯である。

3. 大井川河口海域における濁度分布の観測

3.1 海上観測の結果

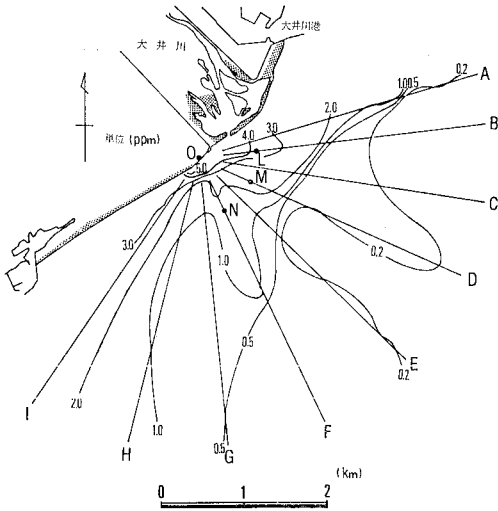
まず最初到大井川河口海域で行った海上観測の結果について明らかにする。図-1は昭和59年11月17日に実施した海上観測の測線配置、濁度と流向流速の経時観測を行った3測点(L, M, N)の位置、及び海上観測より得られた等濁度線を示したものである。測線は誘導点Oを中心にAからIまで放射状に配置されている。1本の測線長は3kmである。また図には大井川河口の砂州形状も示した。これは航空機でのMSS撮影と同時にハッセルブラッドカメラを用いて撮影したものである。

図示されるように得られた濁度は最大値が5ppmと低い値である。これは観測が11月末に行われたため大井川の流出量が小さかったことによる。濁度は河口付近で4ppmの閉じた分布形を有する。これは砂州の切れた箇所から濁った河川水が流入しているためと考えられる。測線OB~ODの岸から約1km付近には濁度が2.0ppmより0.5ppmに急変する濁度フロントが存在する。

* 正会員 工博 建設省土木研究所海岸研究室長

** 正会員 工修 建設省近畿地方建設局琵琶湖工事事務所

*** 正会員 建設省土木研究所海岸研究室



図一1 測線配置と等濁度線図

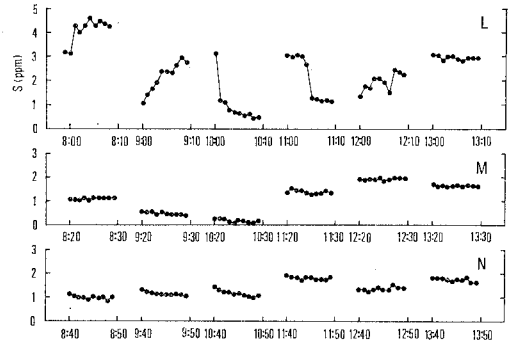
しかし OE より西側の測線ではフロントは明瞭ではなくなる。濁度の測定は船を航走させているために実際には相当長い時間を要している。表一1 は各測線の観測の開始時刻と終了時刻とをまとめたものである。測定は8時5分から11時51分まで、全体で3時間46分を要している。ランドサット5号が飛来したのは9時52分であるから、測線 OE においてはほぼ同時刻のデータがとられたことになる。

表一1 測線別測定時刻一覧表

測線	開始時刻	終了時刻	測線	開始時刻	終了時刻
OA	11:37	11:51	OF	9:27	9:43
OB	11:22	11:37	OG	9:03	9:19
OC	10:46	11:00	OH	8:40	9:00
OD	10:18	10:38	OI	8:09	8:28
OE	9:54	10:08			

当海域の濁度の平面分布は図一1に示したとおりであるが、濁度は空間的に変化するだけでなく、時間的にも変化している。この変化の時間スケールと1測線当りの観測時間との関係を知ることは重要である。何故ならば変動の時間スケールが観測時間より十分長ければ sea truth data を良好に得ることができるが、その逆の場合 sea truth data は相当の変動を含むものとなるからである。

代表3測点で行った濁度の経時測定よりこの点について検討してみる。図一2は測点 L, M, N で測定した濁度の経時変化である。測定は船をアンカーで固定し、海面下 0.5 m の表層データを連続的に取ることによって行った。測定は1時間ごとに10分間ずつ行い、毎分ごとの平均値を図示した。濁度の経時変化は直線距離で約



図一2 濁度の経時変化

400 m ずつ離れた3地点で大きく特徴が異なっている。河口に近接する測点 L では8時台に約 4 ppm と高濁度であったが、10時台には約 1 ppm と濁度が低下した。またその後濁度は上昇し、13時台には約 3 ppm となった。各 10 分間の測定値は時間的に相当大きな変動を有している。とくに 9~11 時の観測においてそれが著しい。測点 M, N では河口に隣接する測点 L と比較すると濁度の変動はずっと小さい。測点 N では午前午後を通じて長時間の変化も少ないが、測点 M では L と似た長時間の変動が存在する。すなわち8時から10時の観測の間濁度が低下し、その後再び上昇している。測点 L, M の長時間の変化傾向が良く似ていることは、測点を含む海域が大規模に変化していたことを表わしている。

以上に述べた濁度の変動原因を明らかにするため濁度と同時に測定した流向流速の経時変化を調べた。図一3が観測結果である。図中、 θ が流向であり 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。3測点とも流速値は良く似た形で変化している。8時台では $V=0.2\sim 0.4$ m/s であったが、時間的に増加し、正午前後には約 0.6 m/s となった。一方、流向は測点により相当変化している。測点 L では最初北東向きに流れていたが、9時には北向きとなり、その後は E 方向に流向が変化した。図一2では濁度の長時間の変動を明らかにしたが、図一3によればその原因を定性的に説明することができる。その場合次の仮定が必要である。すなわち図一1の平面濁度分布が平均的に見たとき準定常的に存在し、その分布形が海水流動によって緩やかに変化すると仮定する。測点 L を例にとる。L 点では8時台ではほぼ北東向きの流れが存在したが、それが次第に北向きとなった。図一1によれば北向き流れは L 点において低濁度の海水をもたらすことになる。また流向はその後東向きに変化した。これは高濁度の海水をもたらす。結局 L 点の濁度変化は、流れの場の変化に多くを依存していたことがわかる。また図一2の濁度変化と図一3の流向変化

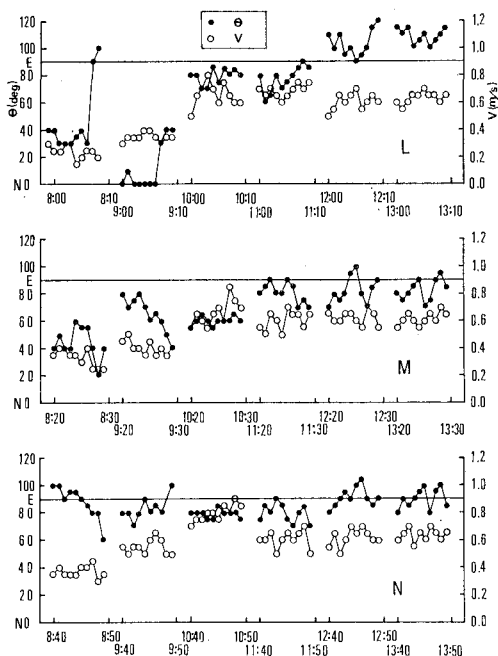


図-3 流向流速の経時変化図

とを比較すると、流向変化に約1時間遅れて濁度変化が生じたことがわかる。

測点 M の変化も測点 L と同様な傾向を有している。一方、N 点では流向はほぼ一定して E 方向であったが、N 点付近では濁度勾配が小さいため濁度の時間的な変化も小さかったことがわかる。

3.2 ランドサットデータと海上観測データの比較

ここではランドサットと海上観測データの相関を調べ、得られた結果をもとに濁度の平面分布を求める。まず最初に図-4は濁度と水面輝度の関係を示したものである。濁度データ(S)は図-1に示した全測線の100m間隔のデータを用いた。また水面輝度(CCT)はランドサット5号の4バンド(0.5~0.6 μ m)のCCTカウント値を用いた。ただし大気のパスラジアンズの補正は行っていない。図-4によると濁度(S)と水面輝度の間には相関係数0.81と良好な相関関係があり、単相関回帰式として

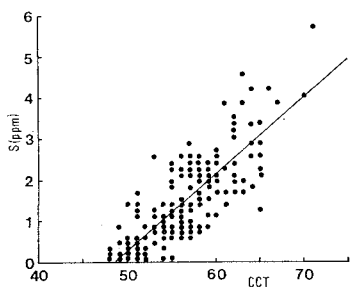


図-4 濁度と水面輝度の相関図

$$S=0.19 \text{ CCT}-9.1 \dots\dots\dots (1)$$

なる式が得られた。ここに S の単位は ppm である。全データを用いたとき、平均的には図示したようにかなり良い相関を示すが、前節で述べたように全データの取得には3時間46分を要しており、この間に濁度に変化するため図-4ではその変動も相当大きい。このような変動を除去するにはランドサットとほぼ同時刻にとられたデータのみを用いて両者の相関を調べる必要がある。よって表-1においてランドサットの撮影時刻9時52分に最も近い時刻に測定されたものとして測線 OE を選び、濁度と水面輝度の関係を調べた。この場合時刻の最大のずれは16分である。この結果、相関係数 $R=0.87$ で次式が成立する。

$$S=0.15 \text{ CCT}-7.2 \dots\dots\dots (2)$$

また測定時刻に相違はあるが、顕著な濁度フロントの存在が明らかな測線 OB を選んで相関を調べると相関係数 $R=0.90$ で次式が成立する。

$$S=0.26 \text{ CCT}-12.5 \dots\dots\dots (3)$$

ここに S の単位は ppm である。測線 OB の測定とランドサットの撮影時刻の間には最大1時間45分のずれがある。ほぼ同時刻にとられた測線 OE の値から得られた回帰直線: 式(2)と比較するとその勾配が急になっている。この原因は後述するが、濁度フロントの移動によるものである。

式(2)、式(3)に示したように、濁度と CCT 値との間の回帰係数は測線によってかなり大きく変化する可能性がある。このため各測線ごとの回帰係数を表-2にとりまとめた。全体の平均は0.19であって、測線 OB のみが著しく大きかったことがわかる。

表-2 各測線別回帰係数

測線名	A	B	C	D	E
回帰係数	0.17	0.26	0.14	0.14	0.15

測線名	F	G	H	I	平均
回帰係数	0.16	0.11	0.16	0.18	0.19

次に、ランドサットデータより式(2)の関係を用いて濁度の平面分布特性を把握する。これはまた測線 OB において濁度と CCT 値との回帰係数が著しく高かった理由を明らかにする上で役に立つ。図-5はランドサットデータと海上観測によって得られた濁度の平面分布を重ねて示したものである。図中、実線がランドサットデータより求めた濁度分布、破線は海上観測より得られた濁度分布である。ランドサットの撮影時刻より最大で46分間しかずれていない測線 OD 付近では両者はかなり良く一致している。しかし測定時刻が最長1時間45分ずれのある測線 OB では海上観測値の方が等濁度線が

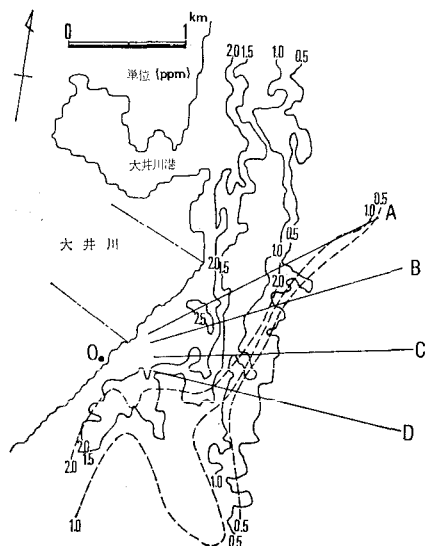


図-5 濁度の平面分布図

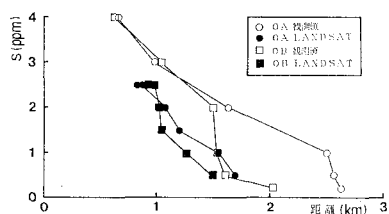


図-6 濁度の岸沖分布比較図

沖側に位置している。例えば 2 ppm の等濁度線を例にとると、約 450 m 沖に存在し、濁度フロントが沖へ移動していることがわかる。

図-6 は測線 OA, OB に沿う濁度の分布形の比較を行ったものである。両測線とも海上観測によって得られた分布形は、ランドサットデータと比較すると濁度フロントが沖側にずれていることが明らかである。濁度フロントの移動は 1 時間 45 分間に濁質が移動したものと考えられる。実際、測線 OB 上の点 L の流向は図-3 に示したように、8 時台に北東向き、9 時台は北向き、更にその後はほぼ北東向きとなっており、このような流れの存在により濁度フロントの移動が生じたものと考えられる。

海上観測の濁度分布が図-6 に示すように変化する場合、ランドサットとの比較を行うべき測点上の各点の濁度は見かけ上大きな値となる。一方、バックグラウンドの濁度は変化しないために、濁度と水面輝度の相関は見かけ上勾配が大きくなる。図-6 に示したように測線 OB 上のデータを用いた相関の場合回帰係数が大きくなったのはこの理由によると考えられる。したがって測線 OB

のデータのように単に水面輝度と濁度の相関が良いという理由で回帰式を定めると物理的に見て分布形を誤って評価してしまうことになる。とくにフロントの移動があるときは注意が必要である。

4. 安倍川河口海域における大規模渦の観測

ここでは安倍川河口海域における種々の観測結果のうちとくに河口周辺で見出された大規模渦について重点的に記述する。

安倍川河口海域においても大井川河口海域と同様にデータが取得されているために、実測濁度分布とランドサットデータより得られた分布形とを比較することは可能であるが、ここでは河口沖で見出された大規模渦について明らかにする。

図-7 は航空機 MSS により 11 月 27 日の 9 時 20 分～9 時 25 分の間に撮影された表面水温の分布である。観測時の水温の温度差があまり大きくないので 0.2°C 間隔で等温線を描いた。水温分布によれば、浜川、大谷川から流入した河川水が拡散しつつ南西方向に流動していることがわかる。また安倍川河口から用宗港の沖合には、プルーム状に岸向きに流動した水塊が海岸線によって進路を阻がれたために大規模な渦が形成されている。この渦は時計回りに回転している。更に用宗港の南西にはこれと逆に反時計回りに回転する渦がある。渦内の海水は、周囲海域のそれと比較すると低温である。

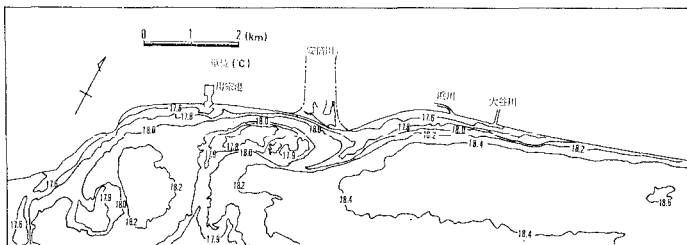


図-7 航空機 MSS によって測定された表面水温の分布図

航空機 MSS では撮影範囲が狭く、このような海水流動の原因を調べるのが難しいために、ランドサットの 4 バンドデータを利用し、濁質を強調して濁りのパターン写真を作成した。写真-1 がこの結果である。安倍川河口右岸の濁りのパターンによると、渦の発生状況が明らかであり、これは図-7 に示した水温分布と良く対応している。濁りの発生源としては浜川周辺と南部の焼津周辺とがある。既に述べたように、安倍川河口左岸沖では南西向きの流動が存在すると考えられるが、写真-1 の濁りのパターンによるとこれを直交する形で沖から岸へ向かう流れが存在したことになる。この種の流れの発生原因は不明である。一つの可能性として吹送流が考えられる。その理由は以下の通りである。まず撮影時刻に

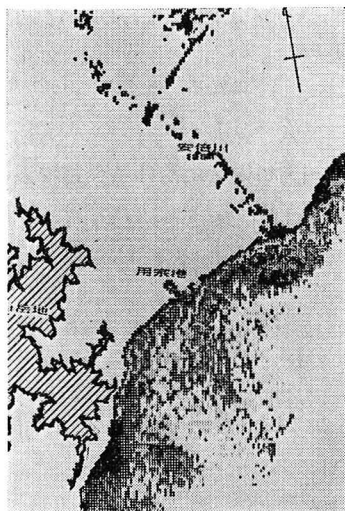


写真-1 ランドサットがとらえた大規模渦

おいては、大谷川河口より東方向に 450 m 離れた地点での気象観測によると西北西の風、風速 9 m であった。一方、写真-1 に示したように当海域の西側には海岸近傍まで高い山岳が屏風のように迫っている。したがってこの山岳地の背後において、西北西の風により岸方向へ向いた後流渦が形成され、これにより岸向きの海水流動が生じたと推定するものである。しかし正確な原因は今後の調査に待たねばならない。

5. 絶対輝度と濁度の関係

第3章ではランドサットデータより濁度の平面分布を求めたが、その方法は海域の代表測線の濁度と相対輝度との相関より求めたものであった。この方法は相対輝度を用いているために各測線ごとに sea truth data を必要とし、そのため一海域のデータから他海域の濁度分布を求める際に問題が生ずる。このためここで絶対輝度と濁度の関係を調べた。絶対輝度は次式で表わされる。

$$BR = (B - BB + BS1)(BS2 - BS1) / (127 + BS1) \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに BR : 絶対輝度, B : ランドサット4バンドの水面輝度, BB : バンドの水面輝度, $BS1, BS2$: MSS 内蔵の基準光源の最小値, 最大値である。

図-8 は安倍川、大井川における観測データより絶対輝度と濁度の関係を調べたものである。既に述べたように、海上観測の時刻はランドサットの撮影時刻とやや異なるものもあるが、両海域とも全測線のデータを用いた。図によると2海域の濁度(S)と絶対輝度(RB)の

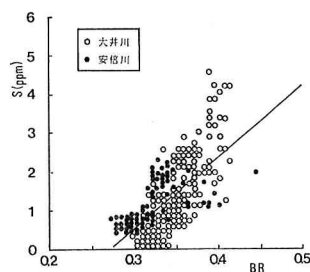


図-8 濁度と絶対輝度の関係

間には相関係数 $R=0.69$ において

$$S = 18.3RB - 4.93 \quad \dots\dots\dots (5)$$

なる関係式が成立する。式(5)の関係は、海域における海上観測値のみから他海域の濁度分布を定量的に評価しうる可能性を示している。ランドサットデータを広域において利用する場合、できるだけ少ない地点でモニタリングを行い、それをもとに広域の水質情報が求められることが最も有効である。この意味において今回の観測で得られた絶対輝度と濁度の関係は、従来の相対輝度と濁度の関係を一般化したものと考えられる。

6. 結 論

本研究で得られた成果は次のとおりである。①衛星と海上観測との同時観測に成功し、濁度の平面分布が求めた。②定点観測による濁度は長時間の変動を有していた。この変動は濁度の平面分布と海域の流動とによって合理的に説明された。③衛星と海上観測による濁度の平面分布を比較すると、海上観測では濁度フロントの沖方向への移動が見られた。これは対象海域の流動より説明できる。④海上観測と衛星との間に時間遅れがある場合のデータでも水面輝度と濁度との相関が良好なことがある。これより回帰式を定めると誤った評価になる。⑤2海域で得られた絶対輝度と濁度の関係が両海域で一致した。

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する。

参 考 文 献

- 1) 宇多高明・古川博一・竹淵 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・竹淵 勉: ランドサットデータを用いた河口流出調査時期の検討, 土木技術資料, Vol. 26, No. 12, pp. 16~21, 1984.