

ランドサットによる沿岸海域調査における有効データの取得確率

宇多高明*・村井禎美**・竹 渕 勉***

1. ま え が き

広域を瞬時に観測可能という特長を持った衛星データを、沿岸海域の調査へ利用する試みが最近数多く行われている。昭和62年2月には我が国初の海洋観測衛星MOS-1の打ち上げに成功した。MOS-1をランドサット、SPOT等と併用すれば海域のリモートセンシングデータは一層充実するはずである。ところで衛星の可視域または赤外域データを沿岸域の流況調査に利用する場合、トレーサーとして、濁りまたは水温差が必要である。筆者ら^{1),2),3)}は駿河湾の大井川、安倍川の河口周辺海域において衛星の飛来に同期させて sea truth を実施し、ランドサット MSS, TM データと海面濁度との関係についての種々の解析を行った。この結果、ランドサットデータと濁度の関係を定量的に評価するとともに濁度の平面分布を推定することに成功した。しかし、現在のところ偶然に有効な衛星データが取得された場合に解析を行っているにすぎない。衛星データを実用的に利用するためには、有効なデータの取得確率についての検討が不可欠であるにもかかわらず、海上データとの十分な比較に基づいてこの検討を行った例はない。

本研究では、ランドサット搭載センサのラジオメトリック性能を実測データを基に評価し、ランドサットデータを相関法によって解析する場合に必要な有効濁度差および有効水温差を求める。また、この結果を基に、長期間の濁度および水温の経時変化から見て、ランドサット搭載センサで測定可能な濁度差および水温差の発生確率を調べる。さらに天候の面から見たランドサットの利用確率や波浪条件による sea truth 実施上の困難さの程度などについて検討する。

2. 観 測 方 法

観測は静岡県の大井川河口前面海域および河口より4.3 km 上流の河道内で行った。観測は海上観測と河道

内での濁度、水温の経時測定から成る。海上観測は、1986年9月6日、10月24日、12月11日、12月20日の合計4回行った。また河道内における濁度、水温の経時測定は、同年9月6日から12月20日まで合計106日間行った。4回の海上観測のうちランドサットと同時観測に成功したのは9月6日と12月20日の2回である。海上観測の測線配置(A~I)と河道内における濁度、水温の経時測定位置を図-1に示す。海上観測は、河口右岸に設けた基点Oを中心とした放射状の測線で行った。また河道内における濁度、水温の経時測定は測点Pで行った。海上観測は表面測定、定点測定および分光反射率・濁度の測定から成る。表面測定では船舶を測線上に航走させて水深0.5 m以浅での濁度、水温、塩分濃度を連続的に測定した。測線1本の延長は2 kmである。定点測定では濁度、流向流速を3地点において1時間毎に10分間ずつ6時間測定した。測定では船舶をアンカーで固定し、水深0.5 m以浅の濁度、流向流速の1分間の平均値を測定した。測定した3地点は観測日によって異なるが、観測当日の河川水の流入方向に沿って約300 m 間隔に設定した。分光反射率・濁度の測定位置は定点観測と同じ位置である。測定回数は10回である。

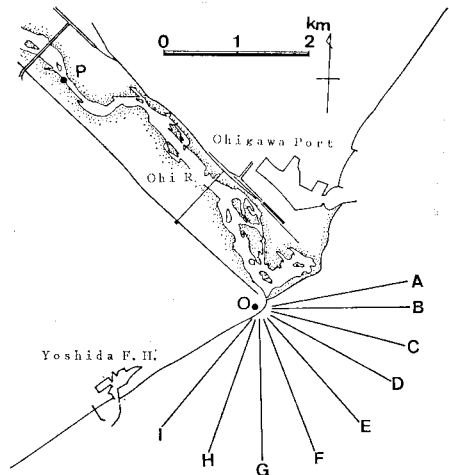


図-1 測線配置図

* 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

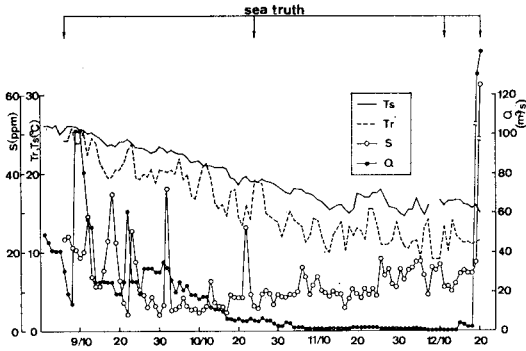


図-2 T_s , T_r , S , Q の経時変化

3. 濁度、水温、流量の経時変化

海水温 (T_s), 河川水温 (T_r), 河川水の濁度 (S) および河川流量 (Q) の経時変化を図-2 に示す。また海上観測の実施日も示す。図中の海水温は気象庁御前崎測候所による御前崎港での測定結果であり、流量は建設省静岡河川工事事務所、神座観測所(河口より 23.5 km 上流, 流域面積 1160 km²) で得られた水位データ (h) を用いて次式より算定した。

$$Q = 69.4(h + 3.14)^2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$Q = 204.1(h + 2.17)^2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに Q および h の単位はそれぞれ m³/sec と m である。式 (1), (2) は 9 月 25 日以前および 26 日以後の換算式である。

海水温と河川水温は観測開始日より終了日まで徐々に低下する傾向にあり、それぞれ 26°C から 15°C, 24°C から 10°C へ変化している。したがって海水と河川水の温度差はばらつきはあるものの 1°C から 5°C と増加した。TM の 6 バンドを用いて流況調査を行う場合、河川水と海水の温度差は大きい方がよい。図中矢印で示した海上観測の実施日における海水と河川水の温度差は、9 月 6 日で 1.3°C, 10 月 24 日で 1°C, 12 月 11 日で 2.8°C, 12 月 20 日で 3.4°C であった。

濁度の経時変化は 9 月 6 日から 9 月 30 日に至るまでの間、9 月 12 日, 18 日, 23 日に 25 ppm を越える高濁度を記録したが、平均的には減少傾向を示す。その後、濁度は 12 月 20 日に至るまで徐々に上昇している。各観測日の濁度は、9 月 6 日で 23 ppm, 9 月 30 日で 4.2 ppm, 12 月 20 日で 17.5 ppm であった。また榛原郡本川根にある大間観測所で得られた降雨データと河川濁度の経時変化を比較すると濁度が急激に上昇する 1 日前に降雨が記録されており、両者は良い相関を示す。例えば 9 月 16 日から 18 日の濁度の上昇は 15 日から 17 日の間の合計 73 mm の降雨、また 10 月 2 日のそれは 1 日の 47 mm 降雨に対応している。

平均的な河川流量は 9 月初めは 50 m³/s の大きさであったが時間の経過とともに減少し、10 月 20 日以降約 5 m³/s 以下となった。衛星データで濁水の拡散を調べる際には濁水の拡散スケールはかなり大きくなければならない。この意味からは有効なデータは 9 月～10 月中旬において取得される確率が高いと考えられる。

4. ランドサットの利用確率

図-2 に示した種々のパラメータのうちランドサットデータで識別可能なパラメータは濁度と水温である。それぞれの識別に用いるセンサは濁度が MSS の 4 バンド, TM の 1 バンド, 2 バンド, また水温が TM の 6 バンドである。海岸域へ河川水が流入し、それをトレーサーとして流況調査を行う場合、ランドサットで観測が可能となる条件は次の通りである。①海水の濁度、水温と流入水のそれらとの差が大きいこと。②流入河川水の拡散規模がセンサの分解能に対して十分大きいこと。①についてはセンサが測定可能な濁度差または水温差について検討する必要がある。②については拡散規模と流量の関係より検討する必要がある。まず①の問題について、ランドサットで測定可能な濁度差および水温差を求める。またこれらの濁度差および水温差と実測値との関係より、海域調査へランドサットを利用する場合に有効なデータの得られる確率を調べる。この場合、センサのラジオメトリック性能が明らかでなければならない。しかし MSS 4 バンド, TM 2 バンドの輝度値と濁度の一般的な関係は十分明らかにされていないのが現状である。また TM 6 バンドデータと放射温度の関係⁹⁾は NASA より公表されているものの、筆者らの経験では実測の水温と公表された式から求めた水温を比較すると、実測の水温の方が高めに現われる。これらのことから今回の検討には 1985 年 11 月 14 日の TM 6 バンドデータと水温、また同年 10 月 21 日の MSS 4 バンドデータと濁度の実測データから得られた関係式を用いるものとする。11 月 14 日の水温、10 月 21 日の濁度は大井川河口前面海域で得られたものである⁸⁾。用いたランドサット MSS はハイゲインモードである。TM 6 バンドデータ (CCT_6) と水温 (T) および MSS 4 バンドデータ (CCT_m) と濁度 (S) の間にはそれぞれ相関係数 $R = 0.89$, $R = 0.92$ において次式が成立した。

$$T = 0.20CCT_6 + 5.24 \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$S = 0.27CCT_m + 12.1 \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに T および S の単位はそれぞれ °C と ppm である。

センサの測定可能温度差または濁度の評価方法として、TM 6 バンドおよび MSS 4 バンドデータの 1 カウントが示す水温、濁度のばらつきを調べる。この時、実

測水温および濁度は式(3)、(4)で求めた値を平均値として正規分布を示すものと仮定する。すると式(3)、(4)に対するそれぞれのデータのばらつきは、標準偏差 σ_t 、 σ_m を求めることによって推定できる。これよりセンサ受信輝度の1カウントが示す濁度差および水温差の範囲を決定する。この範囲を誤差範囲と呼び、データのばらつきの95.5%を含む範囲とする。この範囲を越える濁度差または水温差が存在しない場合、得られたCCTカウント値は有意なものとはいえない。

すると求める誤差範囲は式(3)で求めた $T \pm 2\sigma_t$ 、式(4)で求めた $S \pm 2\sigma_m$ となる。ここに式(3)、(4)に対する実測水温、濁度の標準偏差 $\sigma_t = 0.39^\circ\text{C}$ 、 $\sigma_m = 0.79 \text{ ppm}$ を得た。

以上の方法を用いて海水および河川水の温度差の変化から有効なランドサットデータの取得確率を試算する。9月6日から12月20日まで106日間の海水と河川水の水温差の頻度分布を図-3に示す。横軸は水温差(ΔT)であり、海水温が河川水温に比べて高い場合を正とする。図示した水温差の平均は 3.2°C 、標準偏差は 2.41°C である。以上の考えに基づいて誤差範囲を求めると、 $T \pm 0.8^\circ\text{C}$ となる。つまり有効温度差は 1.6°C 以上となる。図-3の横軸は 1°C 間隔で表示しているため 2°C 以上を有効温度差とすると図中斜線で示した範囲となり、全体の77%に相当する。結局、センサのラジオメトリック性能を経験的に考慮した場合の有効水温差は 1.6°C 以上であり、水温差の限界値を 2°C とすれば有効なランドサットデータの得られる確率は0.77となる。また表-1には月別に水温差の平均値、標準偏差および有効なデータの取得確率を示した。9月から12月にかけて水温差の平均値は大きくなり有効なデータの取得確率が向上する。水温を指標として流況調査を行う場合には9月と12月を比較した場合、12月の方が適していると言える。

表-1 月別水温差

	9月	10月	11月	12月
平均	2.4	3.1	3.9	4.3
標準偏差	1.24	1.91	1.45	1.51
確率	0.68	0.71	0.90	0.89

次に濁度について同様に整理したのが図-4である。水温差と同様に誤差範囲を求めると $S \pm 1.6 \text{ ppm}$ となる。実際には海域の濁度と流入する濁度との差についてデータを整理すべきであるが、濁度については、流入河川

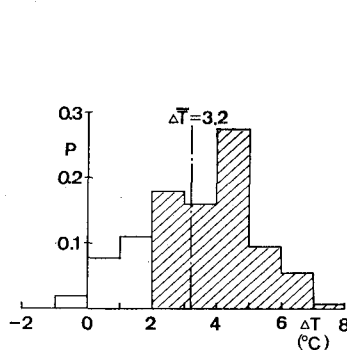


図-3 水温差の頻度分布

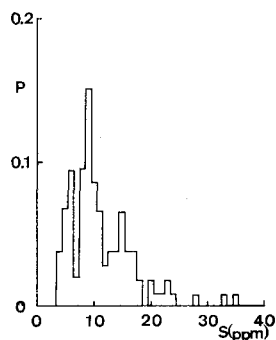


図-4 濁度の頻度分布

水の影響を受けない十分沖合のデータがない。このためここでは過去の sea truth の経験から海域濁度を 2 ppm と仮定する。海域における濁度は 2 ppm で経時的に変化しないと考えると、流入濁度の測定可能最小値は $2 \text{ ppm} + 2\sigma_m$ となり 3.6 ppm を得る。この結果、図-4に示した濁度の変化は全て誤差範囲を越えている。つまり、濁度変化の面から見た有効なランドサットデータの得られる確率は1.0となる。

拡散規模と分解能の関係について、河川流量と濁水の拡散面積について調べる。今ランドサットで測定可能な濁度、4 ppm 以上の範囲を拡散の領域とし、当日の流量と拡散面積の関係を調べる。なお12月20日のデータについては、4 ppm の等濁度線が海上観測実施範囲内で閉じていないため検討から除いた。海上観測の実施範囲における拡散面積と流量の比は、9月6日で $0.054 \text{ km}^2/\text{m}^3/\text{s}$ 、10月24日で 0.074 、12月11日で $0.063 \text{ km}^2/\text{m}^3/\text{s}$ となり、これらの平均値は $0.064 \text{ km}^2/\text{m}^3/\text{s}$ に等しい。衛星データとしてランドサット MSS を用いる際、最小分解能は 80 m である。一方、拡散範囲の濁度分布が滑らかな曲線で結ばれるためには、拡散スケールは少なくとも分解能の10倍程度は必要であると考えられる。そこで必要最小限の拡散面積を例えば $0.8 \text{ km} \times 0.8 \text{ km}$ の領域とすると、これに要する流量は $Q = 10 \text{ m}^3/\text{s}$ となる。流量の経時変化(図-2)によると、平均流量がこの条件を満足するのは10月15日以前である。したがって流量からみれば10月15日以前が観測に適していたことになる。

ランドサットデータは雲等に影響されやすく、また輝度と水質指標の関係が十分明らかにされていない。このため sea truth が不可欠である。sea truth は通常、海上に設置された海上施設や船舶を利用することが多い。特に船舶を用いた sea truth は範囲および位置を自由に選択できる利点を持つことから多く利用されている。しかし、船舶を利用する場合には海象条件の悪化によって sea truth ができない場合もある。以下、天候から見たランドサットデータの取得確率、および波浪条件による

sea truth の限界条件について検討する。まず天候からみたランドサットデータの取得確率について検討する。1985年9月6日から12月20日までの間、晴天となる確率は0.54であった。なお天候は河川水温、濁度測定時のものである。観測期間中の天候が特異なものでなかったことを確かめるために、1961年より1980年の20年間の同時期における天候と比較する。快晴と晴れの日の和の全体に占める比を求めると、0.49となり、観測期間中のデータは特異なデータでないことがわかる。

次に波浪条件から sea truth の可能性について検討する。一般に sea truth の可能な波浪条件は明らかでないため、今回の観測期間中の経験よりその基準を決定する。この期間に合計11回の sea truth を試みた。このうち晴天であったが sea truth を行えなかった日が1回で、その日の $H_{1/3}$ は0.83mであった。しかし $H_{1/3}$ が0.61mの日には sea truth を行っている。このことから $H_{1/3}=0.61$ から0.83mの間に sea truth の可能な限界値があるものと考えられる。今、可能限界波高を0.7mとした場合に sea truth の可能となる確率は0.74となる。なおこの検討に用いた波浪データは、駿河海岸の沖合250mに位置する海洋技術総合研究施設で得られたものである。

以上の結果から、有効な情報を持つランドサットデータの取得確率を各項目毎に整理したのが表-2である。表中の波浪の欄は、 $H_{1/3} \leq 0.7$ m において sea truth が可能とした場合の確率である。また、流量は $10 \text{ m}^3/\text{s}$ 以上の場合である。表-2から天候および濁度、水温の変化特性から見た有効なランドサットデータの取得確率は0.42となる。これに sea truth 可能確率を加えて考慮すると0.31となる。

表-2 データ取得確率

	天 候	濁 度	水 温	波 浪
取得確率	0.54	1.00	0.77	0.74

5. 海面反射輝度と濁度の関係

sea truth データは、ランドサットデータを相関法で解析する場合に必要となるものである。しかし、センサの受信輝度値と水質指標の一般的な相関関係が確立されれば sea truth は必要でなくなり、データの取得率は向上する。この相関関係の確立は大気によるパスラジアンズ除去が困難であること、また検証データの不足等から十分検討された例は少ない。そこで分光放射計より得た反射率を輝度値に変換して濁度との相関を示したのが図-5である。輝度値は波長550nmのデータを用いた。図には1986年9月6日、12月11日、12月20日のデータを示した。濁度 (S) と輝度 (BR) の間には相関係

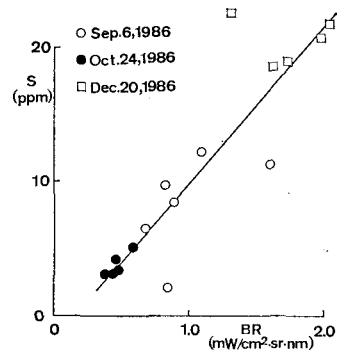


図-5 濁度と輝度との相関

数 $R=0.9$ において次式が成立する。

$$S=11.8BR-1.9 \quad \dots\dots\dots(5)$$

S および BR の単位は、ppm と $\text{mW}/\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm}$ である。この関係は、水面より約1mの高さで測定した分光放射計のデータを用いて得られた。したがって、大気によるパスラジアンズは含まれていないと考えて良い。この結果とランドサットデータのパスラジアンズ補正を行った結果とを比較する。なお、パスラジアンズの補正には近赤外域の波長帯は、水域において無反射であるという考えに基づいた簡易的な方法を用いた。ランドサットの補正済み輝度と濁度の関係は $R=0.84$ で次式が与えられる。

$$S=5.12BR-0.8 \quad \dots\dots\dots(6)$$

式(5)、(6)を比較すると、本来補正法が正しいとすれば係数値は一致するはずであるが、6.7の差がある。これはパスラジアンズの補正方法が簡易的な方法であることや、式(6)には時間的誤差が含まれていること、さらには分光放射計によるデータが不足しているためと考えられる。したがって時間的な誤差の少ない sea truth データおよび分光反射率と濁度のデータを追加していくことにより、精度の高い濁度と輝度の一般的な相関関係を確立することができると思う。

6. ランドサットを用いた濁度分布の推定

4回の海上観測のうち、ランドサットとの同時観測に成功したのは9月6日と12月11日である。次に前者のデータについて相関法を用いてランドサットデータより濁度の平面分布を推定する。ここで得られたランドサットデータはMSS、精密補正モードのCCTである。ランドサットは大井川河口周辺海域を9時50分に観測した。一方当日の海上観測は11時27分から15時15分の間に行われた。両者の観測時間には約1時間半の差があるが、輝度と濁度の相関を調べるに当たっては11時27分から11時48分の間で得た濁度のデータを用いた。その結果、輝度(CCT)と濁度(S)の間には相関係数

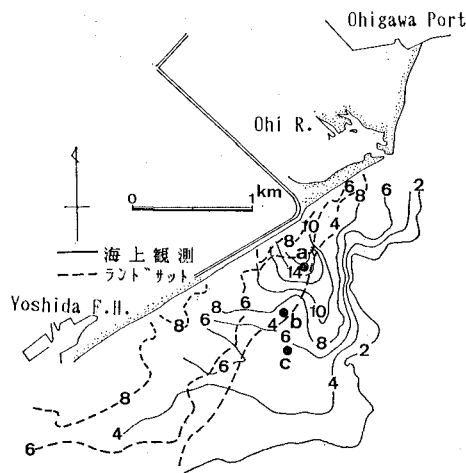


図-6 ランドサット、海上観測の濁度分布

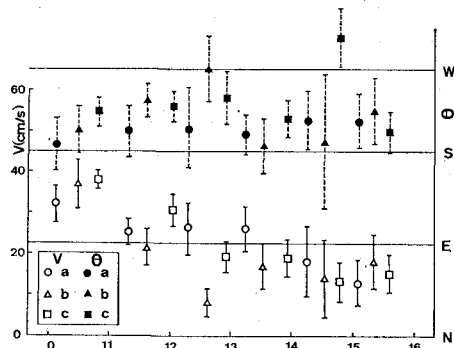


図-7 流向流速の経時変化

$R=0.92$ において次式が成立する.

$$S=1.21CCT-26.4 \quad (7)$$

濁度 (S) の単位は ppm, CCT は 4 バンドの輝度である. 式 (7) を用いてランドサットより濁度の平面分布を推定したのが 図-6 である. 図には同日の海上観測より得られた濁度の平面分布も示した. ランドサットより得られた濁度分布は南西の海岸沿いに広がる形状を示している. これに対して, 海上観測結果によるそれは南側に偏っていることが分かる. この原因を明らかにするため 図-6 中の測点 a, b, c における流向流速を 図-7 に示す. 流向流速の測定開始および終了時刻は 10 時 3 分, 15 時 40 分である. 図には各測点における流向流速の 10 分間の平均値と標準偏差を示した. 実線および破線で示した範囲は平均値 $\pm \sigma$ である. 流速は時間の経過に従って減少する傾向にあり, 10 時台の 3 地点の平均流速は約 35 cm/s であったが 15 時台のそれは約 15 cm/s となった. また流向データの大部分は S から W の間に分布している. しかし, 測点 a の流向は 10 時台から 13 時台にかけてはほぼ S 方向を示す. ランドサット観測時の流向流速データがないためランドサットより得た濁度分布の形成原因については十分議論できない. しかし海上観測で得た分布形状は 10 時台以後 S 方向の流れによって河口部前面の濁度が南に移動して形成されたものと考えられる.

7. 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である.

①大井川河口海域周辺における海水温および河川水温の経時観測の結果, 9 月から 12 月にかけて両者の温度差は大きくなった. したがって温度差のみから考えると観測

は 9 月よりも 12 月の方が適している.

②1985 年 10 月 21 日と 10 月 14 日の MSS, TM データを用いて有効な濁度差および水温差を求めると, それぞれ 3.6 ppm, 1.6°C となった.

③天候, 濁度差, 水温差から見た有効なランドサットデータの取得確率は, それぞれ 0.54, 1.00, 0.77 であり, 連合確率は 0.41 となる. さらに sea truth の可能確率を加えると, それは 0.31 となった.

④衛星の最小分解能と海域の拡散スケールの関係より, 十分な拡散スケールを持つための最小流量は約 $10\text{m}^3/\text{s}$ であることが推定された. この条件を満足するのは観測期間中では 10 月 15 日以前, つまり夏から秋の期間であることが分かった.

⑤分光放射計から求めた水面輝度と濁度の間には, 良好な相関関係が成立する. 今後この種のデータが追加されれば, sea truth データの必要がなくなり, 有効なデータの取得確率は向上すると考えられる.

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環として進められたものであることを付記し, 科学技術庁宇宙開発課の担当者に感謝の意を表します. また気象庁御前崎測候所の本田彰氏, 建設省静岡河川工事事務所の小山茂, 大長良昭両氏には海水温, 河川水位データを提供していただいた. ここに記して感謝の意を表します.

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) 宇多高明・村井禎美・竹淵 勉: ランドサットによる沿岸流況調査, 第 33 回海岸工学講演会論文集, pp. 591~595, 1986.
- 4) 財団法人リモートセンシング技術センター: 地球観測データ利用ハンドブック—ランドサット編・改訂版一, pp. 6-1~6-2, 1986.