

人工衛星と航空機の同期観測による内湾の水質把握について

村上和男*・菅沼史典**・宮原祐二***

1. ま え が き

内湾などの閉鎖性水域でしばしば発生する赤潮現象の調査や、近年盛んに進められている海上空港建設などの大規模な海上工事にともなう濁り調査など、水質調査の対象海域が広範囲におよぶ場合、人工衛星や航空機を用いたリモートセンシング（以下、リモセンと略す）調査を実施する例が増えつつある。航空機によるリモセンは、植物プランクトンなどを対象とした海色調査を目的として通常 10 波長帯程度のバンド数を持つ多波長型のセンサを利用することができ、低高度のため空間分解能も高い。しかし、大きな湾全体を対象とする場合には観測に時間を要し、また観測経費も増大するため、こうした目的にはむしろ人工衛星を利用するのが適当と考えられる。わが国では、既に 1987 年 2 月に国産初の海洋観測衛星の打ち上げに成功したが、現状でデータの最も利用しやすい人工衛星はランドサットである。しかし本来陸上観測用であるため、特性波長帯の選択などの点で海洋観測、特に陸域に比較して輝度レベルの低い可視海色の調査への適用には注意が必要である。

以上の背景から、本研究では東京湾湾口周辺を対象として、従来の MSS に比べて波長の狭帯域化と空間分解能の向上が図られた TM を搭載したランドサット 5 号と航空機による同期観測を実施し、ランドサットの水質観測への適用性について検討した。

2. 観測の概要

本研究では、昭和 61 年 8 月 6 日に東京湾上空に飛来したランドサット 5 号に同期させて、現地水質観測、並びに航空機によるリモセン調査を実施した。本章ではこれら観測の概要を述べる。

（1）シートルース調査

筆者らのグループは従来から東京湾湾口周辺で定期的な水質観測を実施してきた。水質調査は、図-1 に示す 9 地点を調査船で巡回し水質データの取得を行なった。

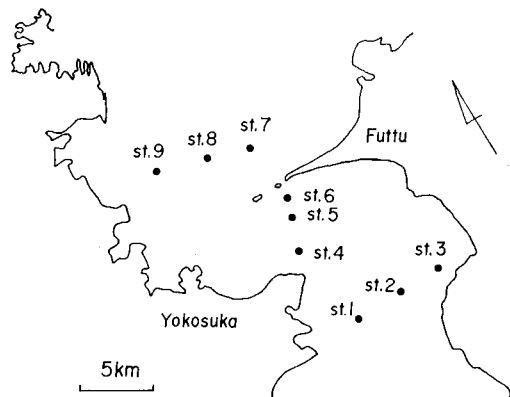


図-1 水質調査位置図

水質の調査項目は、クロロフィル-a・消散係数・水温・濁度・塩分・SS・COD および DO の 8 項目である。なお、測点 1 および測点 2 は、航空機による観測範囲外であったため、後の取扱いの便を考慮して本解析では測点 3 から測点 9 までのデータのみを使用した。

各測点では表層 5 m までの水質データを取得したが、リモセンデータとの照合には、0.5 m 深のデータを使用した。観測時の各測点における透明度は、およそ 2.0～3.5 m の範囲にあり、概ね妥当なものと考えられる。

（2）リモートセンシング調査

航空機によるリモセンは、中日本航空㈱所属のセスナ

表-1 航空機搭載 MSS 波長帯一覧

バンド	波 長 (μ m)	色 調	帯 域
2	0.425～0.439	青紫	可視
3	0.462～0.481	青	
4	0.499～0.519	緑	
5	0.535～0.557	黄緑	
6	0.570～0.592	黄	
7	0.608～0.635	だいだい	
8	0.654～0.669	赤	
9	0.688～0.708	赤	
10	0.723～0.740	濃赤	近赤外
11	0.762～0.782	—	
16	2.060～2.450	—	中間赤外
17	8.000～12.000	—	熱赤外

* 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所海洋水理部海域環境研究室長

** 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所海洋水理部海域環境研究室

*** 運輸省港湾技術研究所海洋水理部海域環境研究室

表-2 ランドサット搭載 TM 波長帯一覧

バンド	波 長 (μm)	色 調	帯 域
1	0.45~0.52	青緑	可視
2	0.52~0.60	黄緑	
3	0.63~0.69	赤	
4	0.76~0.90	—	近赤外
5	1.55~1.75	—	熱赤外
6	10.4~12.5	—	
7	2.08~2.35	—	中間赤外

機に MSS を搭載し、高度約 3200 m から観測を実施した。また、ランドサット-5号に搭載された TM (Thematic Mapper) は、従来の MSS に比べて地上分解能および波長分解能が向上している。表-1、表-2に MSS および TM の波長特性を示す。

3. リモートセンシングによる水質把握の検討

本研究では、シートルース調査項目が簡易な水質調査項目に限られていたため、水質分布の推定という実用的見地から、主として相関分析・主成分分析などの統計解析手法による検討を行なった。本章では、これらの検討結果について述べる。

(1) MSS・TM データと水質の関連

図-2 (a) (b) に MSS・TM の可視帯域 バンドの CCT (Computer Compatible Tape) のデジタルカウント値の変化を各測点ごとに示した。ここでは、各波長帯毎に平均 100、標準偏差 10 に規格化して表示した。MSS では湾外の測点 3 で黄緑色にピークを持ち、赤色側でエネルギーが小さくなっているのに対し、湾内の測点 8 あるいは 9 では、逆に赤色側でエネルギーが増大しているのがわかる。

TM の輝度分布はバンド数が少なく、細部では異なる点があるものの、全体の傾向は MSS と一致している。

MSS および TM データと水質項目との相関係数行列を表-3 (a) (b) に示す。塩分をのぞくと大半が正の高い相関を示し、波長ごとの相関特性の違いは明確にならないが、個々の水質についてみると、水温が熱赤外バンドと高い相関を示し、このバンドと水温との物理的因果関係の存在が推察される。濁度に関しては、水域情報としては未知の部分が多い中間赤外域をのぞくと、水層への透過率が大きく水中懸濁物による散乱の

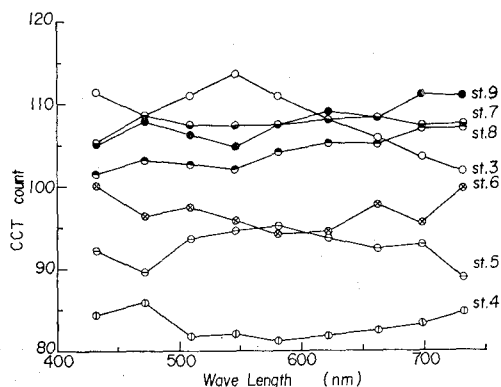


図-2 (a) 各測点の MSS 輝度分布

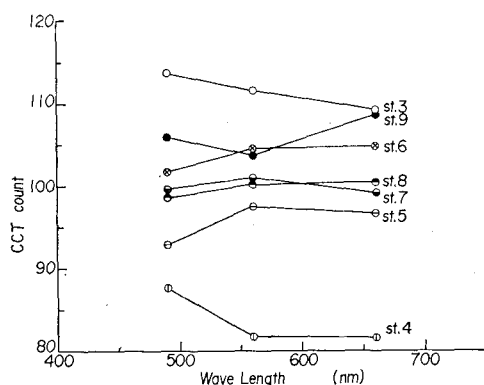


図-2 (b) 各測点の TM 輝度分布

表-3 (a) MSS と水質の相関係数行列

記 号	CHL	ATT	TMP	TRB	SS	DO	COD	SAL
バンド	クロロ フィル-a	消散係数	水 温	濁 度	SS	溶存酸素	COD	塩 分
2	0.419	0.585	0.873	0.775	0.608	0.668	0.814	0.260
3	0.509	0.689	0.893	0.676	0.578	0.733	0.910	0.025
4	0.446	0.643	0.870	0.735	0.631	0.680	0.846	0.119
5	0.380	0.635	0.822	0.772	0.617	0.655	0.827	0.170
6	0.495	0.674	0.867	0.736	0.682	0.721	0.873	0.028
7	0.561	0.687	0.899	0.677	0.677	0.750	0.897	-0.068
8	0.543	0.641	0.905	0.611	0.619	0.708	0.860	-0.078
9	0.667	0.663	0.920	0.581	0.686	0.781	0.889	-0.200
10	0.646	0.574	0.919	0.499	0.587	0.734	0.832	-0.172
16	0.219	0.331	0.658	0.841	0.449	0.546	0.598	0.661
17	0.682	0.299	0.924	0.536	0.681	0.781	0.711	-0.205

表-3 (b) TM と水質の相関係数行列

バンド	CHL	ATT	TMP	TRB	SS	DO	COD	SAL
1	0.454	0.532	0.830	0.904	0.678	0.693	0.758	0.552
2	0.352	0.426	0.776	0.763	0.636	0.539	0.618	0.414
3	0.554	0.496	0.858	0.773	0.750	0.659	0.692	0.370
5	0.520	0.403	0.814	0.616	0.555	0.577	0.612	0.413
7	0.661	0.471	0.895	0.626	0.654	0.694	0.707	0.264
6	0.731	0.336	0.852	0.352	0.544	0.701	0.654	-0.187

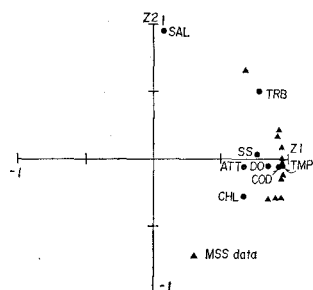


図-3 因子負荷量分布 (MSS データと水質)

効果の顕著な短波長側と相関が高くなっている。とりわけ TM については、バンド1と濁度との相

関は0.9を超える高い値を示している。一方、クロロフィル-aは可視帯域の青紫付近、および長波長の赤色側で光の吸収が最大となり、これらのバンドとクロロフィル濃度とは負の相関を持つことが多い。また、これら吸収帯の中間の黄緑付近では、逆に正の相関を持つといわれている。しかしながら、表-3からはこれらのバンド毎の相違は余り明確ではない。

次に図-3で、水質項目とMSSデータに対して主成分分析を行ない、因子負荷量を第1、第2主成分について示す。なお、図中の記号と水質項目の対応は表-3に示した。この図から、塩分をのぞく他の水質項目が第1主成分と強い相関を持ち、この成分がおもに水域の汚濁指標としての意味を持つと判断される。これに対してMSSデータの大半が同様の傾向を持つことは、各バンドに含まれる光学的情報の大部分が水域の汚濁指標としての意味のみに要約されることを示している。こうした傾向は、TMデータにもほとんど同様に確認される。

以上の検討で、各バンドごとの差があまり明確にならない原因は、図-2からわかるように測点間の平均輝度レベルに顕著な差が存在することによる。こうしたレベル差の原因としては、

- 測点ごとの太陽高度の相違による入射光量の相違
- 水中溶存・懸濁物による吸収・散乱の大きさの相違
- 水中からの放射光への大気効果の相違、並びにパストラジアンスの影響

などが考えられる。こうしたレベル差は、図-2(b)の人工衛星データにも現われているが、人工衛星の観測時間はきわめて短時間であり、また観測高度が高いため、測点ごとに太陽光の入射角の変化にともなうパストラジアンスや大気効果の著しい相違が存在するとは考えにくい。したがって、a)、c)の影響はあまり大きくないものと思われる。今回の観測では、前日関東地方を台風

表-4(a) 標準化した MSS と水質の相関係数行列

バンド	CHL	ATT	TMP	TRB	SS	DO	COD	SAL
3	-0.161	-0.081	-0.205	-0.233	-0.471	-0.122	-0.075	0.108
4	-0.446	-0.126	-0.069	0.323	-0.065	0.267	-0.182	0.792
5	-0.477	-0.029	-0.150	0.413	-0.025	-0.185	-0.089	0.668
6	0.048	0.292	0.170	0.520	0.470	0.230	0.269	0.136
7	0.623	0.462	0.447	0.151	0.568	0.540	0.525	-0.672
8	0.083	-0.276	-0.005	-0.585	-0.271	-0.201	-0.244	-0.460
9	0.510	-0.040	0.080	-0.408	0.113	0.184	0.013	-0.713

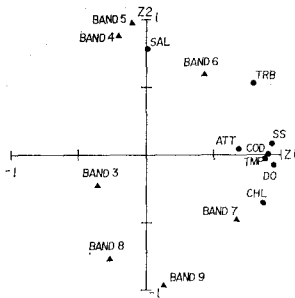
表-4(b) 標準化した TM と水質の相関係数行列

バンド	CHL	ATT	TMP	TRB	SS	DO	COD	SAL
1	-0.136	0.003	-0.228	0.053	-0.262	0.021	0.018	0.245
2	-0.467	-0.217	-0.101	-0.132	-0.154	-0.387	-0.261	-0.113
3	0.622	0.193	0.422	0.044	0.520	0.324	0.212	-0.251

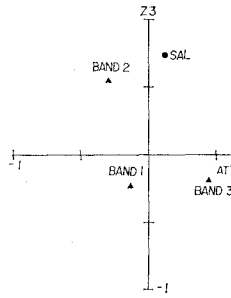
が通過しており、かなりの懸濁物質の湾内への流入が衛星画像からも確認されている。したがって水中の懸濁物による散乱効果がこうした測点ごとのレベル差を生じたものと推定される。

ここで、得られたデータの分光輝度変化を強調するために、MSS については可視帯域の3バンドから9バンドまで、TM では1バンドから3バンドまでを対象として標準化演算¹⁾を行い、前と同じように水質項目との相関行列を求めると表-4(a)(b)のようになる。標準化しない場合の表-3と比較すると、ほとんどの水質項目で相関が小さくなっているのがわかる。これは標準化によって測点間の大きな輝度レベル差が取り除かれた結果、水域の汚濁指標に関連する大きな輝度変動が除去されたためと考えられる。なかでも、TMの1バンドと濁度の相関はほとんどなくなっている。しかしながら、一方でバンドごとの相関係数の相違が明確化され、MSSではクロロフィル-aでみると7バンドで正の相関が、4または5バンドで負の相関が大きくなっているのがわかる。また、SSに関しては6、7バンドで若干相関が大きい。一方、TMでもMSSと対応する波長帯ではほとんど同様の傾向がみられる。

さらに、主成分分析で検討してみると、主成分に対する因子負荷量が図-4(a)(b)のようになる。ここではMSS第1、第2の主成分について、TMは第1、第3主成分について示した。水質項目については図-3と同様の傾向であるが、各バンドのデータはこれら水質項目とはかなり明瞭に区分されている。第1主成分は、基本的に水域の濁りを示す因子であるが、光学的情報として考えるならば、黄～だいたい系統色は第1主成分と相関があり、第2主成分が(TMの場合は第3主成分が)緑～黄緑系統色に対応するものと考えられる。図-4からMSSに対して各測点についてスコアを求めると図-5のようになる。湾外の測点3は明瞭に区分され、こ



(a) MSS と水質



(b) TM と水質

図-4 標準化データと水質による因子負荷量分布

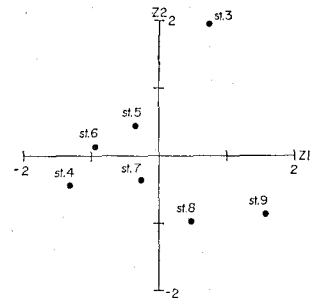


図-5 標準化した MSS データによるスコア

表-5 各測点で観測された色名

測 点	色 名
1	dark yellowish green
2	dark brown
3	dark brown
4	yellowish brown
5	brown
6	olive
7	dark yellowish green
8	dark yellowish brown
9	dark red

では緑～黄緑系のエネルギーが強いことがわかる。一方、濁りの強い湾内の測点 8, 9 では黄～だいたい系統色のエネルギーが大きくなっていると考えられる。これらの点を表-5 に示す現場色名と比較すると、ある程度の対応づけが可能である。

以上のように、標準化したデータから現場海域の水色についての情報が得られるが、クロロフィル-a に対しては反射帯で負の相関、吸収帯で正の相関が現れ、今回の観測結果からは、これらのバンドによるクロロフィルの検出はきわめて困難である。

(2) 東京湾の水質分布について

ここでは、東京湾全体を対象とし、水質分布とランド

サットデータとの関連を検討する。

a) 濁度

ランドサット・TM 1 バンドとの回帰式から求めた濁度分布の概観を図-6 に示す。観測の前々日から関東地方を台風が通過し相当量の降水があった。湾西岸、湾奥の大小河川から濁水の流出が確認できる。流出した多量の懸濁物による光の散乱作用が大きく、このこともクロロフィル検出の阻害要因のひとつであると推測される。

b) 水温

同様に TM 6 バンドとの回帰式から水温分布を求める。図-7 のようになる。図-6 の濁度分布と比較すると、湾奥では、濁度と水温が逆相関の関係にあるのに対し、湾中部から湾口周辺では、むしろ高濁度—高水温、低濁度—低水温の関係が現れている。このことから、湾奥では河川流出流の混合・拡散などの影響が直接波及しているのに対し、湾中部から湾口にいたる領域では、こうした閉鎖性内湾の夏期によく現れる水質構造（湾内—高濁度・高水温）が基本的に維持されていると考えられる。

c) 赤潮の観測

表-4 に示したように、湾口部データによる観析では、クロロフィル-a そのものを検出することはできな

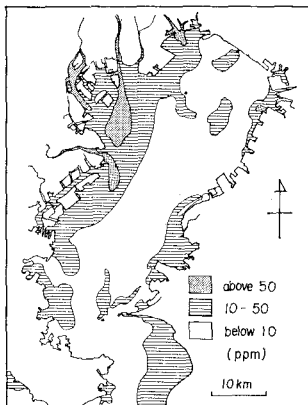


図-6 濁度分布図

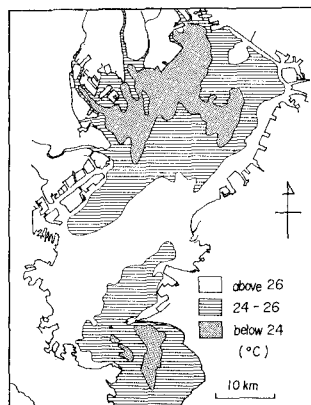


図-7 水温分布図

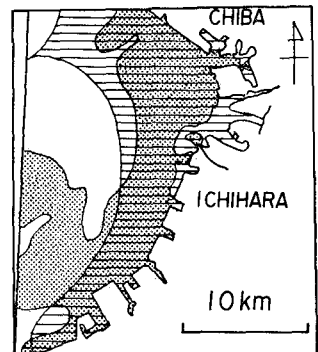


図-8 比演算値分布

かった。そこで赤潮がより顕著に現われやすい湾奥データの検討を試みた。図-8中で、横縞の部分が赤潮が確認された海域²⁾である。一方、黒く塗りつぶした領域がTM3バンドと2バンドの比演算(3バンド/2バンド)の値が相対的に大きな領域である。この演算ではクロロフィル-aの反射帯2バンドと吸収帯3バンドにより、クロロフィル-a濃度と負の相関を示すべきところであるが、図-8からは、明らかに赤潮が発生している区域でむしろ比演算値が大きくなる傾向があり、ここでもクロロフィル-aの検出は困難であると思われる。

4. あとがき

本研究で得られた主要な結果を要約する。

①今回のリモセンで得られたデータの水質情報としての意味は、水域の濁りを示す因子にほぼ集約される。

②上記に関連して、特に相関の高かった人工衛星データを用いて、東京湾全域の水温並びに濁度の推定分布が得られた。

③一方、標準化演算により、肉眼で確認される現場海色にある程度対応する輝度特性が得られた。これは航空機・人工衛星の双方で確認され、ランドサット衛星による海色リモセンの実用性が示された。しかし、植物プランクトン量の把握を目的とするクロロフィル-aの検出には今後さらに観測データの蓄積・検討が必要である。

最後に、本研究を実施するに当たりご協力頂いた関係者の方々に深謝致します。また、本研究で用いたランドサットのデータは、宇宙開発事業団地球観測センターから提供されたものです。

参 考 文 献

- 1) 杉森康広・夏目巨夫・木暮 陸・松村皐月：可視域リモートセンシング技術によるクロロフィル量の定量的解析手法に関する研究-I，航水研ノート，空と海，第7号，pp. 58, 1985.
- 2) 千葉県水産試験場のり養殖分場：東京湾の海況に関する情報，61-10報，1986.