

# 港湾技術資料

TECHNICAL NOTE OF  
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE  
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 626 June 1988

リモートセンシング手法の水質調査への適用

村	上	和	男
菅	沼	史	典
佐	藤	英	治
宮	原	祐	二

運輸省港湾技術研究所



# 目 次

要 旨 .....	3
1. ま え が き .....	3
2. リモートセンシングとその水質調査への応用 .....	4
2.1 リモートセンシングの最近の動向と海洋観測 .....	4
2.2 可視赤外域の海洋リモートセンシングの原理と応用 .....	6
3. 東京湾におけるリモートセンシング調査とシートルース .....	11
3.1 シートルース調査と水質項目の特性 .....	11
3.2 航空機搭載 MSS によるリモートセンシング .....	19
3.3 人工衛星 LANDSAT によるリモートセンシング .....	23
4. リモートセンシングによる水質把握手法の検討 .....	26
4.1 航空機 MSS データと水質との関係 .....	26
4.2 LANDSAT TM データと水質・航空機データとの関係 .....	32
4.3 水質分布の推定と東京湾の水質環境について .....	38
5. あとがき .....	45
参 考 文 献 .....	46

# Application of Remote Sensing Technique to Water Quality Measurement

Kazuo MURAKAMI\*  
Fuminori SUGANUMA\*\*  
Eiji SATO\*\*\*  
Yuji MIYAHARA\*\*

## Synopsis

This note describes the applications of visible- and infrared-remote sensing technique to water quality measurements in inner bays or ports.

The remote sensing by LANDSAT satellite and aircraft with MSS (multi-spectral scanner), together with sea truth observation, were carried out simultaneously at the mouth of Tokyo Bay.

The authors applied the statistical analyses to the data obtained from remote sensings and sea truth observation. It has been found that turbidity and temperature in upper layer are highly correlated with remote sensing data. From these results, the estimated features of temperature and turbidity distributions were obtained.

An attempt was made to estimate the concentration of chlorophyll-a, which led to a conclusion that it is very difficult to measure chlorophyll-a from the remote sensing data. It was found, however, that the characteristic of spectral radiance obtained from visible-remote sensing image has a high correlation with the ocean color.

The satellite image showed the characteristics similar to the airborne images, and it was found to be possible to apply the satellite remote sensing to water quality observation in coastal sea.

**Key Words:** Remote Sensing, LANDSAT, Water Quality, Chlorophyll, Tokyo Bay

---

\* Chief of Marine Diffusion Laboratory, Marine Hydrodynamics Division

\*\* Member of Marine Diffusion Laboratory, Marine Hydrodynamics Division

\*\*\* Ex-member of Marine Diffusion Laboratory, Marine Hydrodynamics Division

# リモートセンシング手法の水質調査への適用

村 上 和 男 \*

菅 沼 史 典 \*\*

佐 藤 英 治 \*\*\*

宮 原 祐 二 \*\*

## 要 旨

内湾・港湾域など、空間的に複雑な水質構造を持つ水域を対象とし、面的な水質情報を敏速に取得できる水質観測手法として可視赤外帯域のリモートセンシングの適用性を検討した。

東京湾湾口周辺海域を対象とし、船舶による水質調査と、地球観測衛星 LANDSAT, ならびにリモートセンサを搭載した航空機による同期観測を実施した。航空機による低空観測では、大気中のバスマディアンスによる攪乱の効果を軽減することができるとともに、比較的限られた区域の詳細な調査が可能である。

リモートセンシングで取得したデータとシートルース水質項目とに相関分析・主成分分析を適用し、相互の関連性を検討した。その結果、表層の濁度、水温についてはリモートセンシングデータとの高い相関が見出され、人工衛星・航空機それぞれについて相関分析結果をもとに水質分布の推定をおこなった。

さらに、赤潮の原因となる植物プランクトン量の把握を目的として、クロロフィル a の検出を試みた。クロロフィル a は濃度による分光反射特性の変化が顕著で、リモートセンシングで検出可能と考えられるが、本検討の範囲では分光輝度特性からクロロフィル a の存在をとらえることができなかった。しかし、可視帯域データから得られた分光輝度特性は現場の海色(色名)と比較的良い対応を示すことがわかった。

統計解析の結果から水質項目に対して、人工衛星と航空機のデータはほぼ同様の傾向を示し、人工衛星高度からの内湾・港湾域水質調査が十分可能であることがわかった。人工衛星の定期的な利用をはかることで、広域的な水質調査を継続的に実施することが可能となる。

キーワード：リモートセンシング, LANDSAT, 水質, クロロフィル, 東京湾

## 1. ま え が き

海域、特に、内湾・港湾域などの閉鎖性水域の水質汚濁は、人間の社会的、経済的活動の拡大に伴ない質的にも量的にも深刻な問題を投げかけていると言えよう。

高度成長期から、東京湾・大阪湾・瀬戸内海などの閉鎖性の強い内湾・内海域でしばしば大規模に発生し、水産資源に多大な被害を与えてきた赤潮現象は、近年規模頻度は減少したとはいえ、以前根強いものがある。赤潮

現象は植物プランクトンの異常増殖であるが、これを水域の食物連鎖の観点からみれば基礎生産の異常ととらえることができ、生態系全体に係わる水質問題として、その実態の全容を把握することは極めて重要である。

一方、港湾建設や埋立等、海上工事に伴って発生する濁りは、長期的にみると水中照度の低下に伴う光合成の阻害など生態系への影響が懸念されている。とりわけ近年さかんな空港の沖合展開事業、沖合人工島構想といった大規模工事に伴う広範かつ長期にわたる濁りに

\* 海洋水理部 海水汚染水理研究室長

\*\* 海洋水理部 海水汚染水理研究室

\*\*\* 前海洋水理部 海水汚染水理研究室

については、十分な監視体制をもつてのぞむ必要がある。

このように、海域の水質問題は、空間的に規模の大きな現象をとらえる必要があり、一方内湾・港湾域では、地形や潮流の場が複雑なことから水質も時間的、空間的に大きく変化し、通常の定点観測や船舶による観測手法のみでは自ら限界が生じる。

こうした中で、対象物から発せられる電磁波を上空でとらえて対象を識別するリモートセンシング手法を海洋観測に応用する試みが各方面でなされている。本手法によれば、従来ほとんど不可能であった水質の空間同時分布を極めて容易かつ迅速に観測することができ、水質観測の新しい手法としての期待が高まっている。

一方、リモートセンシングはあくまで物体からの光学的情報に頼る観測手段であり、水質測定を可能とするためには、対象とする水質項目と光学的情報との因果関係を明らかにする必要がある。しかし、水質と海中からの光の放射エネルギー、さらにセンサー到達エネルギーとの物理的關係には、海洋物理気象学関係の立場から研究が進められているものの、特に、内湾・港湾域のような複雑な水質構造をもつ海域を対象とする場合、未解明の点が多く、現段階ではリモートセンシングで取得したデータと照合すべき水質データ（シートルース）が不可欠となっている。実用的側面からは、取得したデータとリモートセンシングデータとに相関分析を適用し、経験的に水質分布の推定を行なう手法が一般的である。シートルースでは空間的に離散的な水質データしか得ることができないが、これらとリモートセンシングデータとの相関づけをおこなうことにより、面的な水質分布を得ることができる。

通常、リモートセンシングとしては、LANDSATのような人工衛星を用いるものが良く知られているが、内湾や沿岸・湖沼などの比較的狭い水域を対象とした航空機によるリモートセンシングもしばしば実施される。航空機によるリモートセンシングは、低高度のため分解能が良く、詳細な水質分布が得られる反面、観測は比較的高価で、東京湾・大阪湾のような大きな湾全体の観測には経費と時間がかかる難点がある。これに対し、人工衛星によるリモートセンシングは、高度が高いため航空機に較べて若干精度は落ちるものの、データ入手の容易なLANDSATなどを用いれば、比較的安価にリモートセンシング調査を実施することができ、広い海域を対象とし、季節毎程度の定期的水質観測を実施するような目的のためには最適である。したがって、こうした人工衛星による水質観測をルーチンワーク的に実施できるよう整備するのは有益であると考えられる。

以上のような背景を得て、本論文では以下の点について検討をおこなった。

- (1) 東京湾を対象としてリモートセンシング調査を実施し、同時に海上照合データの取得をおこなう。得られたデータに統計解析手法を適用し、リモートセンシングによる水質把握の可能性を検討する。主な対象は、水中の植物プランクトン量の目安となるクロロフィル a、濁りの指標として濁度、SS、水温などである。
- (2) リモートセンシングは人工衛星と航空機による同時観測とする。航空機観測を実施したのは、第1に人工衛星の高高度ではパストラディアンスが非常に大きく、可視光域の観測に弱点があると判断したことによる。航空機による低高度観測結果と比較し、人工衛星高度での検出の可能性を検討する。第2にここで用いた人工衛星（LANDSAT）は主として陸域観測を目的に開発されたものであるため、リモートセンサの特性が必ずしも海域観測に最適のものにはなっていないことによる。

本文は、1. まえがきにつづき、2. でリモートセンシングの歴史と海洋リモートセンシングの原理に簡単に触れた後、3. でシートルースならびに人工衛星・航空機による東京湾現地観測の概要を示す。得られたデータに対して相関分析・主成分分析を適用した結果について、4. で検討を加え、水質分布の推定例を示す。最後に、5. であとがきとして、まとめと今後の検討課題等に触れる。

## 2. リモートセンシングとその水質調査への応用

### 2.1 リモートセンシングの最近の動向と海洋観測

人工衛星を用いたリモートセンシングの歴史は、既に文献<sup>1)</sup>に詳しく述べられている。本節では、1980年代から今日に至る最近のリモートセンシングの動向を紹介し、海洋観測分野への応用について述べる。

リモートセンシングという言葉を一般に普及せしめたのは、1972年に打ち上げられた LANDSAT-1号にはじまる一連の LANDSAT シリーズの成功であろう。LANDSATには、可視赤外線放射計の一種である MSS (Multi-Spectral Scanner) が搭載され、陸域においては、石油・鉱物の探査、植生の把握、土地利用分類等、海域では水質汚染、水塊区分など幅広い分野で人工衛星によるリモートセンシングの有効性が実証された。1972年の1号に引き継ぎ、2号(1975年)、3号(1978年)、4号(1982年)が打ち上げられ、現在は1984年3月打ち上げの5号が稼動中である。(1~4号は機能停止) LANDSAT 衛星の機能については改めて3章で詳述する。表-1にこれまで打ち上げられた主な衛星ならびに、打ち上げ予定の衛星を示す。

表-1 地球観測衛星年表

	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990
JAPAN			● GMS-1				● ETS-III					● MOS-1			○ ERS-1
UNITED STATES	● LANDSAT-1		● LANDSAT-3				● LANDSAT-4								
	● LANDSAT-2		● NIMBUS-7						● LANDSAT-5						
			● SEASAT-1												
				● NOAA-6		● NOAA-7	● NOAA-8		● NOAA-9						
										● NOAA-10					
CANADA															○ RADARSAT
EUROPE ESA													○ ERS-1	○ ERS-2	
FRANCE			● TIROS-N							● SPOT-1	● SPOT-2				

○ Schedule

LANDSAT は、もともと陸域の資源探査技術開発を旨として打ち上げられたものであるが、陸域に比較して通常の観測手段では面的・広域的な情報が得にくく、分光放射特性の複雑な海域の探査を主目的とした海洋観測衛星もいくつか実現している。

例えば、1978年打ち上げの NIMBUS-7号には CZCS (Coastal Zone Color Scanner) が搭載され、7年間にわたり、沿岸域を中心とした海色・海水温度の探査が実施された。CZCS のスペクトルバンドは海水中の黄色物質、クロロフィル等の反射吸収特性を考慮して設定されており、航空機搭載型 MSS のスペクトルバンドもこの CZCS を基本にしたものが少なくない。また、1982年打ち上げの気象海洋観測衛星 NOAA-8号では、AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) を搭載し、気象観測とともに熱赤外センサによる陸海域の温度分布の把握、ならびに、可視光による陸水探査が可能で、地球規模での大気と海洋の熱流動過程を追跡することができる。

以上に述べた MSS、CZCS、AVHRR などのセンサは、可視・赤外域放射計に分類され、地表海表面からの放射を検出してその分光放射エネルギー分布から、対象の状態を把握するものである。可視赤外域の放射に含まれる情報は極めて多く、多方面で応用が可能である反面、大気中でエネルギーの吸収散乱による減衰も大きく、

またとりわけ短波長側では大気中からのパースラディアンスの効果が重畳するため、センサで検出されるエネルギーのうち実際に地表面の情報を含む部分はごくわずかとなる。海域の放射強度は陸域に較べて1オーダー低いため、海洋リモートセンシングにおいては、海中の光学的伝達特性の把握に加えて、こうした大気効果の補正方法の検討もその実用化の根幹に係わる重要な基礎研究分野となっている。

リモートセンシングで利用できる電磁波の波長帯としては、大気の透過率が大きいことが条件となる。こうした波長帯域は通常「大気の窓」と呼ばれ、そのひとつが上述した可視赤外域である。一方、波長が cm のオーダーを持つマイクロ波帯を用いた海洋観測衛星としては、1978年打ち上げの SEASAT-1号がある。この衛星には、波高、海面上昇量の測定、風向・風速測定、海面水温、水蒸気量等の計測のための各種高度計、散乱計、放射計が搭載されている。マイクロ波帯は雲や大気の状態に左右されず、また昼夜の別なく計測が可能であり、今後、各方面で応用がすすめられよう。

最後にわが国における海洋観測衛星について述べておく。わが国では、1978年3月宇宙開発委員会策定の『宇宙開発政策大綱』ならびにリモートセンシング推進会議の報告書『リモートセンシングの研究・開発及び利用の推進に関する方策について』等を基軸として、現

在 3 系統の衛星（海洋観測，陸域観測，磁力・重力観測）の開発をすすめている。このうち，宇宙開発事業団が中心となってすすめてきた海洋観測衛星 MOS-1（Marine Observation Satellite）は，当初計画から 4 年遅れで，1987 年 2 月 19 日打ち上げられ，現在試験運用中である。この衛星は国産初の地球観測衛星として，主としてつぎのような目的を有している。

- (1) 地球観測衛星の基本技術の確立
- (2) 可視近赤外放射計（MESSR），可視熱赤外放射計（VTIR）およびマイクロ波放射計（MSR）の開発および機能性能の確認，ならびにこれらによる海洋を中心とした地球全般の実験的観測
- (3) データ収集システム（DCS）の基礎実験
- (4) 太陽同期軌道投入技術の修得
- (5) 太陽同期軌道の追跡管制技術の修得
- (6) 地球観測衛星運用技術の修得

この衛星は，可視赤外域からマイクロ波帯まで幅広く各種センサを搭載しており，国内各機関が参加し，機器性能に関してハードウェア・応用利用等各方面から検討がすすめられている。筆者らのグループも可視近赤外放射計の検証実験に参画しており，港湾工事に伴う濁り予測の観点から，衛星データの利用方法について今後検討をすすめる予定である。表-2 に搭載センサ諸元を示す。

以上は人工衛星を用いたリモートセンシングについて述べてきたが，人工衛星にはあまり多波長のセンサは搭載できず，また比較的限られた区域の詳細な観測を目的とする場合，より低高度の航空機に十数バンドの波長帯域を持つリモートセンサを搭載して観測を実施する方法

が有効とされ，沿岸海域・湖沼・土地利用探査等，近年各種応用調査に利用されつつある。

## 2.2 可視赤外域の海洋リモートセンシングの原理と応用

リモートセンシングにより水質把握をおこなうためには，水質とセンサに到達する光エネルギーとの関係を明らかにする必要がある。

水中に透過した太陽光線に対して，水中の懸濁物・溶存物質は光エネルギーの吸収・散乱作用を持つが，いくつかの物質では波長毎の散乱・吸収特性に違いがあるため，海中から上空に照出してくる光エネルギーの分光スペクトルを解析することにより，それらの物質の識別・定量が原理的には可能となる。もちろんすべての物質のレスポンスを分離するのは不可能であるが，通常，われわれが用いる水質項目の中には，植物プランクトンの定量に用いるクロロフィル a，溶存有機炭素量（DOC）と関連する黄色物質など比較的分光特性の顕著な物質があり，また，消散係数，濁度，透明度などそれ自体が光学的情報として把握される項目も含まれる。こうした水質項目を上空でとらえた分光スペクトルから検出しようとするのが可視光域のリモートセンシングによる水質検出の基本理念である。

しかしながら，リモートセンサで検出される分光スペクトルから水質情報を取り出すにはいくつかの課題があり，これらを取りまとめたのが図-1<sup>2)</sup>である。全体は大きく分けて次の 2 点に要約される。

### (1) 海水中の放射伝達過程と水質の関係の把握

海中から照出してくる光の分光スペクトルと水質との関係の把握には，海中の放射伝達機構ならびに海面効果

表-2 MOS-1 搭載センサ諸元

	MESSR	VTIR		MSR	
観測目的	海色・土地利用等	海面温度等		水蒸気・氷・雪等	
観測波長 ( $\mu\text{m}$ )	0.51 ~ 0.59 0.61 ~ 0.69 0.72 ~ 0.80 0.80 ~ 1.1	0.5 ~ 0.7	6.0 ~ 7.0 10.5 ~ 11.5 11.5 ~ 12.5	—	
観測周波数	—	—	—	約 23.8GHz	約 31.4GHz
分解能(m)	50	900	2700	32000	23000
観測幅(km)	100	1500		317	
走査方式	電子走査方式	機械走査方式		機械走査方式	

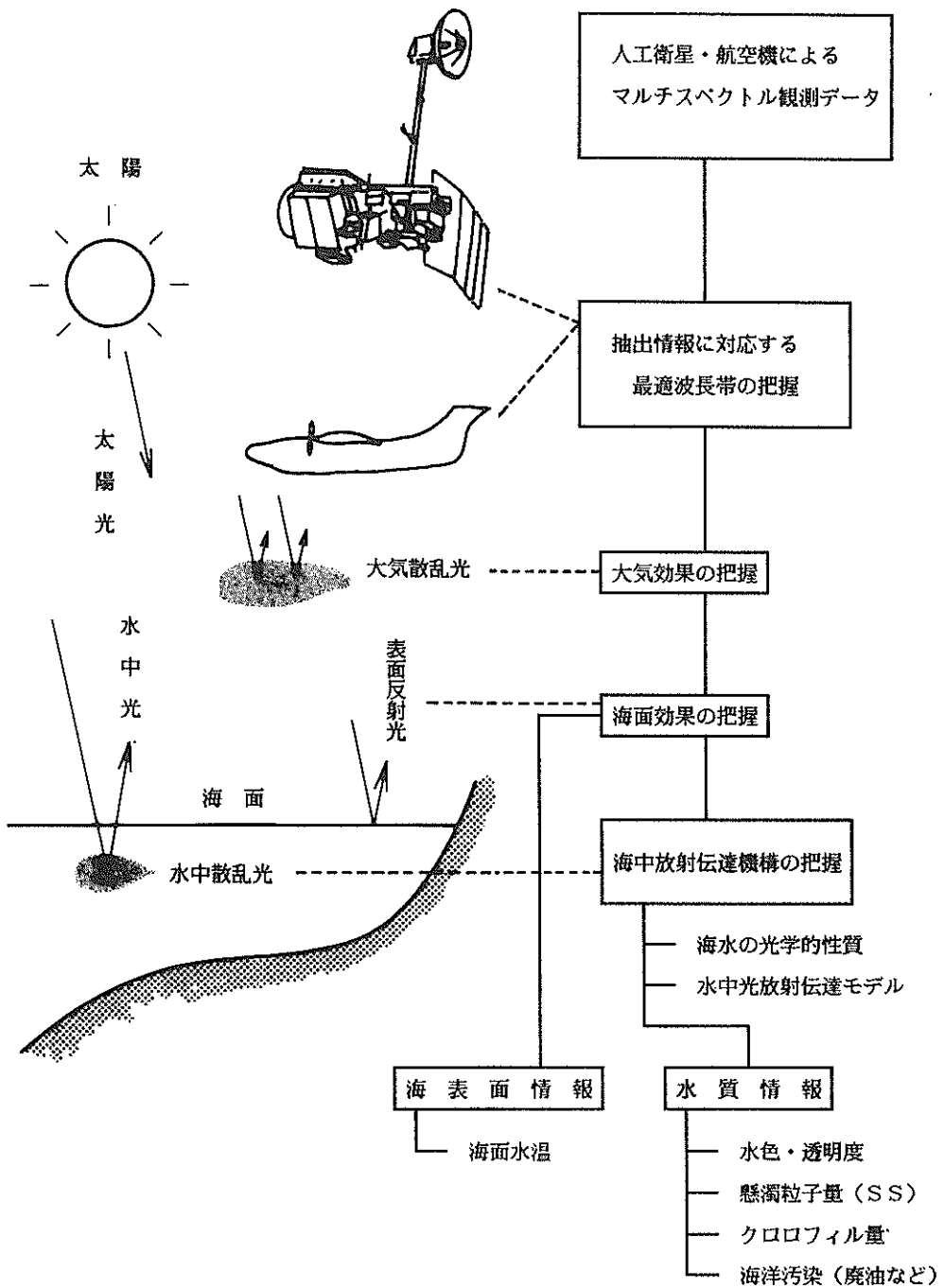


図-1 可視域リモートセンシングによる水質観測の原理<sup>2)</sup>



(反射屈折など)の解明が不可欠である。

(2) 海面からの上向放射の大気中における伝達過程とセンサ到達光との関連の把握

海中から照出した光がセンサ到達までに上空の大気による影響(吸収・散乱)を受けるだけでなく、センサには海中以外からの放射エネルギーが到達するため、これらの効果を評価しなければならない。

以上は主に可視光域のリモートセンシングについて述べたものである。

一方、長波長帯の赤外域のうち、可視光の  $0.9 \mu\text{m}$  付近から数  $\mu\text{m}$  の近赤外から中間赤外と呼ばれる範囲では水層における吸収が大きいため、水域の情報はほとんど含まれないが、波長が10数  $\mu\text{m}$  になると物体の温度に応じた強さで放射されるようになり、通常熱赤外と呼ばれている。この帯域は熱分布・水温分布の把握に用いられる。

本節では、以下、はじめに可視光リモートセンシングに関し、上記の問題点(1)(2)について概論した後、熱赤外域も含めて各種水質検出の特徴と問題点に触れ、内湾域沿岸域を対象とした研究事例に言及する。

(1) 大気中の放射伝達特性と海色スペクトル

センサに到達する光のエネルギー中には、海中から照出してきた光だけでなく、海面での反射光や太陽光の大気中における散乱光などが含まれている。これらを模式的に示すと図-2のようになる。ここで、センサ到達輝度  $L_z(\lambda)$  は次式のように表わせる<sup>2)</sup>。

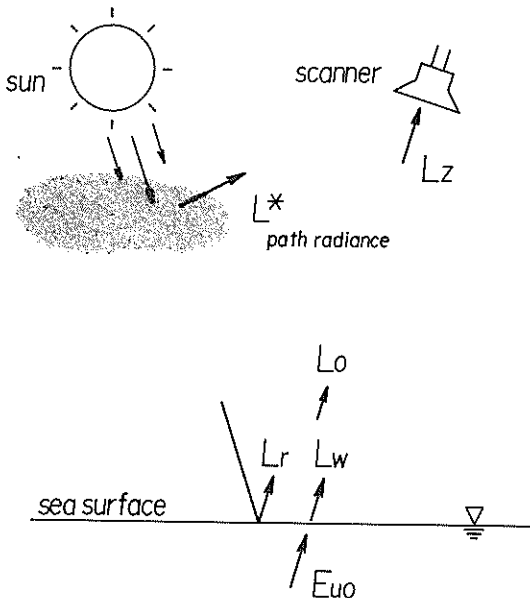


図-2 大気中の放射伝達機構

$$L_z(\lambda) = L_o(\lambda) \cdot T_a(\lambda) + L^*(\lambda) \quad (1)$$

$$L_o(\lambda) = L_w(\lambda) + L_r(\lambda) \quad (2)$$

ここで、 $L_o(\lambda)$ : 海面直上における上方向放射照度

$L_w(\lambda)$ : 海中から大気中に出てくる海中情報を含んだ上方向照度

$L_r(\lambda)$ : 海面により反射される空光の上方向照度

$L^*(\lambda)$ : 大気中を太陽直達光が透過する際に空気分子、エアロゾル等による後方散乱により生じる上方向放射照度

$T_a(\lambda)$ : 大気分光透過率

$\lambda$ : 波長

本プロセスでは、目的とする  $L_w(\lambda)$  に対して  $L_r(\lambda)$ 、 $L^*(\lambda)$  は妨害光となる。特に  $L^*(\lambda)$  はパスラディアンズと呼ばれ、前節でも触れたように  $L_z(\lambda)$  のエネルギー中に占める割合は80~90%にも達するため  $L_w(\lambda)$  検出の大きな障害となる。また、 $L_r(\lambda)$  が太陽高度の関係で異常に大きくなる(ハレーション)と、海中の情報がほとんど失われる場合が生じる。

$L_w(\lambda)$  は海中の放射伝達過程を直接反映するものと考えられ、いわゆる海の色のスペクトル  $R_w(\lambda)$  が次式で定義できる。

$$R_w(\lambda) = \frac{L_w(\lambda)}{H(\lambda)} \quad (3)$$

ここに、 $H(\lambda)$ : 海面直下の下方向放射照度

ここで、 $L_w(\lambda)$  は近似的には次式で表わせる。

$$L_w(\lambda) = 0.173 E_{u0}(\lambda) \quad (4)$$

また  $H(\lambda)$  も

$$H(\lambda) = \frac{E_{d0}(\lambda)}{1 - R(\theta_a)} \quad (5)$$

ここに、 $E_{u0}$ : 海面直下の上方向放射照度

$E_{d0}$ : 海面直下の下方向放射照度

$R(\theta_a)$ : 海面に入射する太陽直達光と空光に対する海面反射率

$\theta_a$ : 太陽仰角

(4)、(5)式を用いると、(3)式は、次のようになる。

$$R_w(\lambda) = 0.173 \frac{E_{u0}(\lambda)}{E_{d0}(\lambda)} (1 - R(\theta_a)) \quad (6)$$

したがって、 $E_{u0}(\lambda)$ 、 $E_{d0}(\lambda)$  と水質の関係が把握できれば、 $R_w(\lambda)$  がわかり、これから式(1)、(2)の各項を

検討することにより  $L_z(\lambda)$  と水質の関連を明確にすることができる。

(2) 水質と海色スペクトル

前項で示した  $E_{u0}(\lambda)$ ,  $E_{d0}(\lambda)$  と水の物性との関係は、次のように解釈できよう。はじめ海面を通して入射した太陽直達光ならびに空光は、海水中の水分子、溶存物質懸濁粒子等により吸収・散乱を受けながら下方向に向う放射光束を形成する。一方消散過程における後方散乱成分が上方向の放射光束を形成し、これらが各々、 $E_d(\lambda)$   $E_u(\lambda)$  として検出される。したがって、 $E_{u0}(\lambda)$ ,  $E_{d0}(\lambda)$  の見積りは、海水の吸収、散乱特性と水質との関係把握すれば良いことになる。

海水の消散係数を  $C(\lambda)$  とするとき、 $C(\lambda)$  は例えば、次式で見積ることができる<sup>2)</sup>。

$$C(\lambda) = a_w(\lambda) + b_w(\lambda) + a_{phy}(\lambda) + a_{det}(\lambda) + b_p(\lambda) + a_y(\lambda) \quad (7)$$

ここに、

- $a_w(\lambda)$  : 純海水の吸収係数
- $b_w(\lambda)$  : 純海水の散乱係数
- $a_{phy}(\lambda)$  : 植物プランクトンの吸収係数
- $a_{det}(\lambda)$  : 動物プランクトン、鉱物性懸濁粒子、デトリタスの吸収係数
- $b_p(\lambda)$  : 全懸濁粒子の散乱係数
- $a_y(\lambda)$  : 黄色物質(溶存有機物質)による吸収係数

ここで上式をもとに、実際に観測で用いられるいくつかの水質項目と消散係数の評価との関連について考えてみることにする。あわせて水質検出の問題点にも言及する。

(a) 濁度

濁度の測定方法にはいくつかあるが、本研究では波長 400nm の単波長光の透過率をカオリン標準検定液で SS に変換して用いている。濁度という項目そのものが光学的手法により得られる濁りの尺度のひとつであり、海水の消散係数全体と密接に関連するが、特定の物質の影響を表示するものではない。

(b) クロロフィル-*a* 量

クロロフィル-*a* は植物プランクトンの葉緑体中に含まれ、植物プランクトンの活性とも関連するため、しばしば赤潮発生の目安を提供する物質である。図-3 に、クロロフィル-*a* の分光反射率ならびに吸光スペクトルを示す。吸光スペクトルからわかるようにクロロフィル-*a* は短波長の 400~450nm 付近、および長波長側の 650~700nm に強い吸収帯を持つ。一方濃度の増加に

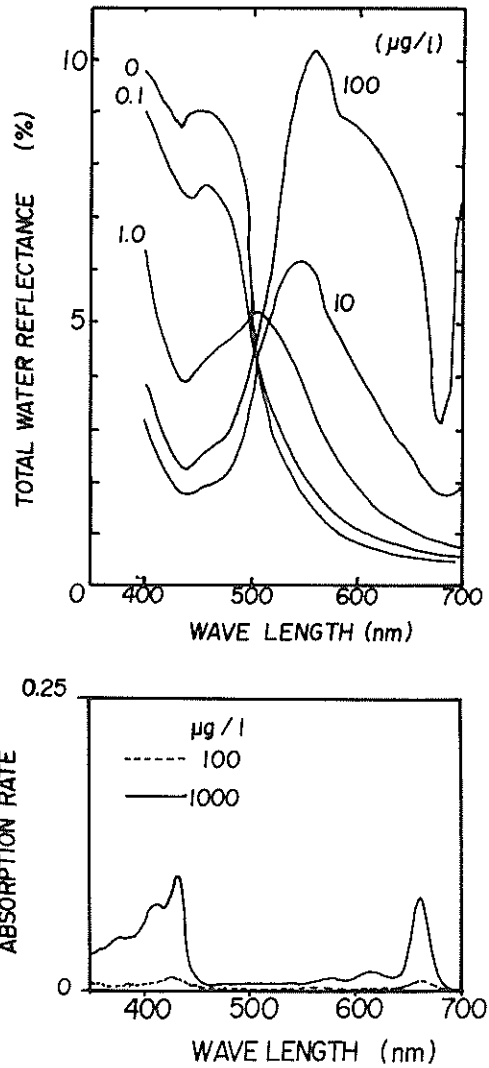


図-3 クロロフィル-*a* の分光反射率(上)と吸光スペクトル(下)

伴ない反射率そのものは増大するが、400~450nm、および 650~700nm での吸収の結果、分光反射率は、500~600nm 付近の反射率のみが増大し、図に示す山型の反射スペクトルを持つようになる。クロロフィル-*a* 量による吸収係数は式(7)中では  $a_{phy}(\lambda)$  で評価されるが、以上のように、 $a_{phy}(\lambda)$  は波長依存性が高いことがわかる。

クロロフィル-*a* 量検出の阻害要因としては、プランクトンの外殻による散乱光の増大、特に内湾・沿岸海域のように陸域からの流入懸濁物、有機溶存物質などによる散乱、吸収の増大などが考えられる。Morel<sup>4)</sup> は海水のタイプを光学的に2つに大別して各々 Case 1, Case 2 と呼んでいる。Case 1 では、懸濁物の主成分はクロロ

フィルー a を有する植物プランクトンであり、比較的クロロフィルー a の検出が容易な沖合～外洋水である。一方、Case 2 は、河川からの流入懸濁物、工場排水・都市排水などが主成分で、植物プランクトンが存在しても、検出が比較的困難な沿岸～内湾水であるとしている。また、杉森ら<sup>2)</sup>は、(7)式に基づきシミュレーションをおこなった結果、黄色物質が増大すると黄色側の吸収が増加するため、分光反射率の極大を赤色側へ移動させること、デトリタスの吸収増大に伴ない分光反射率の極値の現れ方が小さくなるなど、いずれもクロロフィルー a の検出に阻害要因として作用することを報告している。

#### (c) SS

SS は懸濁物質のうち、比較的粒径の大きな（通常、 $1\mu\text{m}$  以上）粒子の重量濃度で表わされ、消散係数の評価の観点からみれば  $b_p(\lambda)$ 、 $a_{det}(\lambda)$  に対応する。一般に SS が増大すると分光反射率は赤色側でやや高くなる傾向があるとされている<sup>6)</sup>。

#### (3) 熱赤外帯域による水温検出

物体がある温度を持つとき温度に対応した分子レベルでの振動が生じている。この振動により発生する電磁波は、常温付近ではおよそ  $10\mu\text{m}$  前後の波長を持ち、通常、熱赤外（遠赤外）帯域と呼ばれる。この帯域の強度を測定することにより物体の温度を知ることができる。熱赤外帯は可視域に比較して大気中における空気分子やエアロゾルによる散乱の影響が小さく、パスラディアンズによる妨害光が減少するため、人工衛星のような高高度観測でも比較的容易に検出できる。また、太陽光とは無関係に放射され、夜間でも観測が可能である。しかし水層における吸収が大きいため、上空で検知される温度は水面の極めて薄い上層に限られ、通常表皮水温などと呼ばれている。したがって夏期などの表面加熱期で鉛直成層が強い場合にはデータの取り扱いに注意を要する。

#### (4) 沿岸・内湾域でのリモートセンシングの実際

まえがきでも触れたように、沿岸域・内湾域の水質環境は複雑なパターンを示すことから、リモートセンシングは極めて有効な観測手段のひとつである。しかしながら可視光域についてみると、前項までに示したように水層、大気の間で、種々の妨害要因を有するため、リモートセンサに到達する放射光から対象とする水質のみによるレスポンスを取り出し定量的に評価するのは現時点では不可能である。本項では、沿岸内湾域の水質汚濁に深く関連する水質項目のうち、クロロフィルー a と濁度ならびに水温に関して研究事例を紹介する。

前項でも述べたように、クロロフィルー a はかなり明確な吸光、反射特性を持つが、反面他の溶存懸濁物の影

響も強く、特に内湾沿岸域のクロロフィルー a 量分布把握手法の確立には多くの課題がある。従来の赤潮調査に関連したクロロフィルー a 量のリモートセンシング関係の研究方針は大きく 2 つの方向に分かれている<sup>2)</sup>。

a) 経験的手法：シートルースで取得したクロロフィルー a の測定値とリモートセンシングのデータに相関分析を適用して最も相関の高いバンドまたはバンド間演算との回帰式を求め分布量を推定する。本手法では実用的側面から最適波長帯の選択に努力がはらわれている。

b) 解析的・半解析的手法：クロロフィルー a 量と前項で示したような海水の光学的パラメータの因果関係のもとに、光学パラメータ（散乱係数・吸収係数など）と海面の分光反射率を現場で測定することにより海色スペクトルとクロロフィルー a 量との関係を明らかにする。光学的パラメータと海色スペクトルの間に一定の物理モデルが適用される場合もある。本手法は広範囲の定量的分布推定より、リモートセンシングの前段階として海色スペクトルとクロロフィルー a など溶存懸濁物との関係を明らかにすることを主目的としている。

a) による研究事例は実用的色彩が濃く、適用例も数多い<sup>5)</sup>。最適波長帯の選択は概ねクロロフィルー a の吸光・反射帯に対応した波長帯となっているが、他の濁りや溶存物質の影響で微妙に変化することが多いようである<sup>6)</sup>。

一方 b) に関連する調査では、基礎研究の分野から主として水産関係、海洋物理関係に事例が多い。杉森ら<sup>2)</sup>は、経験的手法によるクロロフィルー a の検出に加えて、海色スペクトルと水質との関係について解析をおこない、海水の光学的パラメータと水質の定量的関係の重要性に言及している。また、宇野ら<sup>7)</sup>は植物プランクトンの量・種類の相違、さらに濁りとして海域底質、陸域土壌成分が添加された場合の分光反射特性の変化を検討し、さらにパスラディアンズについても定量的な考察をおこなっている。

濁度は水質の濁りの指標としてよく用いられる。測定波長の選択に一定の基準があるわけではなく、測定波長の測定値に及ぼす影響については必ずしも明確ではない。また、分光反射特性と分光透過率の関係は懸濁溶存物質の吸収散乱特性により変化するから、濁度とリモートセンシングデータの特定波長とを関連づけるのは困難である。しかしながら一般に単波長側で相関が高いようである。濁度のリモートセンシング事例としては、内湾沿岸域を対象としたもの<sup>8)</sup>、河口周辺における河川濁水拡散の観測<sup>9)</sup>などがある。濁度とならんで濁りの指標としてよく使用されるものとして SS (Suspended Solid)

がある。SSは通常 $1.0\mu\text{m}$ 程度以上の懸濁粒子の重量として表わされる。経験的なシートルースの相関分析結果からは赤色付近の比較的長波長の帯域と相関が高いことが報告されている。SSのこうした性質はクロロフィルの検出にあたりその吸収帯域の放射を増加させるために妨害要因となり、クロロフィル-a検出を困難にする一因ともなっている。

最後に熱赤外帯を用いた観測に触れる。海洋観測における熱赤外帯の利用は極めて重要な位置を占めている。単に海表面の温度分布を知るだけでなく、温度分布パターンから海水の流動状況を推測することが可能で、NOAA衛星を用いた黒潮の観測<sup>10)</sup>のような比較的規模の大きなものから、航空機を用いた湖流観測の例<sup>11)</sup>まで幅広く応用されている。内湾・港湾域のような流動パターンの複雑な海域の調査には特に有効で、海水交換状況の把握等に用いられている<sup>8)</sup>。また、単なるパターンの推定にとどまらず、沿岸波向の観測や碎波帯内の熱拡散係数の推定<sup>12)</sup>、数枚の連続経時画像からの表面流向流速の算定<sup>13)</sup>などにも利用されている。

### 3. 東京湾におけるリモートセンシング調査と

#### シートルース

#### 3.1 シートルース調査と水質項目の特性

##### (1) 観測概要

筆者らのグループは、従来より東京湾湾口（観音崎—富津岬）周辺で定期的な水質調査を実施してきた<sup>14)</sup>。本調査では図-4に示す9地点で水質・気象観測を昭和61年8月6日に実施した。夏期に実施した理由は、植物プランクトンが増殖し易く、汚濁観測を目的とする場合、最適であると考えたからである。観測は運輸省第二港湾建設局京浜港工事事務所の協力を得て横須賀工場所属の調査船「はまゆう」を使用して測点を巡回実施した。な

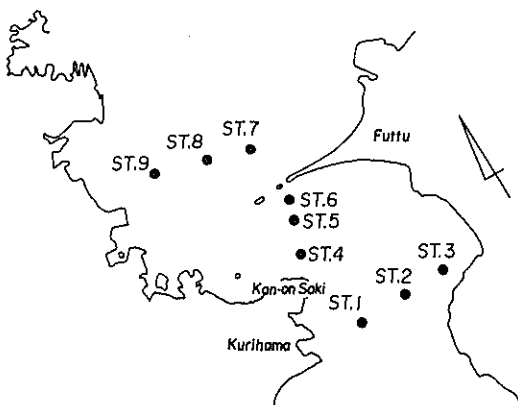


図-4 シートルースの測点分布

お、測点7~6間では曳航体を用いた連続水質測定を実施している。

リモートセンシングの海上照合データの取得を目的とする場合、リモートセンシングと海上観測の時間差をできるだけ小さくする必要がある。本調査の場合各測点の通過時刻を表-3に掲げる。一方、人工衛星LANDSAT-5号の東京湾上空通過時刻はおよそ9時40分ごろと推定され、航空機観測は後掲の図-10に示すとおりである。測点が平面的に比較的分散しており、観測点の移動に要する時間が大きく一隻の調査船で巡回する場合、これ以上時間差を小さくするのは不可能であった。観測時の湾口部の予報潮流<sup>19)</sup>は図-5に示す。ここで、一が湾外へ向

表-3 各測点の観測時刻

測点	測点通過時刻
1	13:12 ~ 13:21
2	12:50 ~ 13:02
3	12:37 ~ 12:45
4	9:05 ~ 9:20
5	9:30 ~ 9:40
6	9:50 ~ 10:00
7	10:43 ~ 10:55
8	11:05 ~ 11:16
9	11:28 ~ 11:38

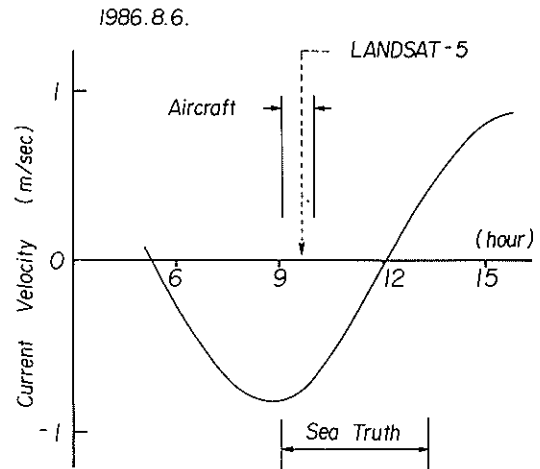


図-5 観測時湾口部の潮流（湾口部の流速予報値<sup>19)</sup>による）

う流向を表わす。観測前半で比較的湾内から湾外に向う流れが強い時間帯であることから、上記の時間差の影響が懸念されるが、本報告の範囲ではこれ以上の検討は不可能である。

表-4 測定項目一覧

測定項目	測定・分析方法
気 温	棒状水銀温度計
水 温	サーミスタ温度計 (EIL Type MC 5/2)
塩 分	電気電導度 (EIL Type MC 5/2)
溶存酸素	隔膜電極法 (YSI model 57) および、北原氏採水器により採水後、ウィンクラージ化ナトリウム変法 (JIS K 0102) により分析・補正
透 明 度	透明度板 (白板)
照 度	水中放射照度計 (離合社 2501-A)
S S	バンドン採水器による採水試料ろ過 (JIS)
濁 度	透過式濁度計 (協和商工 TBM-II)
C O D	バンドン採水器による採水試料より 100°C による過マンガン酸カリウムによる酸素消費量 (JIS K 0102) 測定
水 色	フォーレル・ユース水色標準器
色 名	日本色研・色名帳
風向風速	ピラム風速計
蛍光強度	現場型 蛍光光度計 (ターナー社)
曳 航 体	現場型 塩分水温計 (PARTECH社)

## (2) 調査項目

実施した調査項目、ならびに測定分析方法の一覧を表-4に掲げる。項目の大部分は定期観測の既報<sup>14) 20)</sup>に解説が掲載されているので、ここでは新たに追加されたクロロフィル-a量の測定、ならびに曳航体を用いた連続水質測定について解説しておく。

### a) クロロフィル-a量

クロロフィル-aは植物プランクトンの葉緑体に含有される物質で、植物プランクトン量をクロロフィル-a量を測定することにより把握することができる。クロロフィル-aの測定方法としては分光吸光度計を用いて分光透過率から求める方法と、クロロフィル-aの蛍光現象を利用した蛍光法とがある。前者の方法では、十分な精度をうるには、通常現場試水からサンプルを採取し、アセトン溶液中にクロロフィル-aを抽出して測定しなければならない。本観測では後述する連続観測で現場型蛍光光度計による測定を実施しているが、蛍光法は比較的感度が高く、試水から直接クロロフィル量の測定が可能で、各測点で採水したサンプルからのクロロフィル量測定も現場型蛍光光度計にサンプルを挿入しておこなう方法をとった。なお蛍光度からクロロフィル量への換算は既知のクロロフィル-a量を含有するアセトン溶液の蛍光度を用いている。

### b) 水質の連続観測

測点7から測点6の間で、曳航体による水温塩分の測定、ならびにポンプ採水による現場型蛍光光度計を用いた蛍光度の連続測定をおこなっている。曳航体は写真-1右側に示す構造をもち、船体後部から約20mの位置で水深約50cmに曳航して観測を実施した。なお、図-

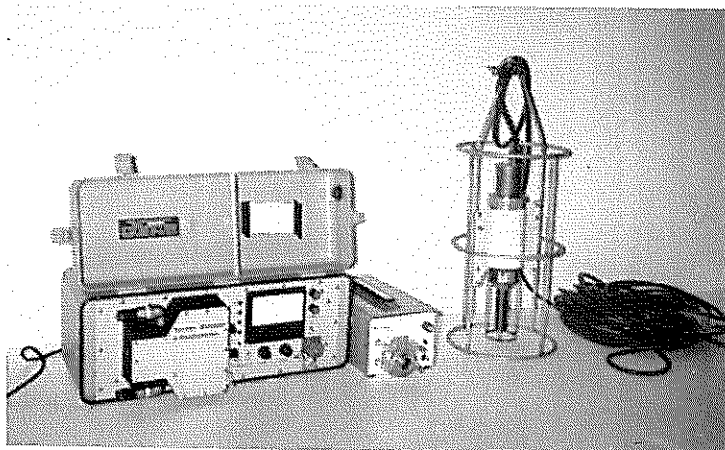


写真-1 観測機器 (写真右: 曳航体・左: 現場型蛍光光度計)

6に曳航体のセンサ部分の構造を示す。また現場型蛍光光度計による観測では、図-7に示すようにポンプで揚水し、計器通過後海上へ排水している。採水は概ね水面から0.5mの範囲から行なっている。なお、連続観測時の船速は約1ノットであった。

しかしながら、今回の観測結果では連続観測中の測定値がほとんど変化していなかったこと、船舶航跡の影響が十分検討されていないため、照合データとしては使用しなかった。

### (3) 測定結果

本調査の水質測定結果を表-5に掲げる。従来の定期

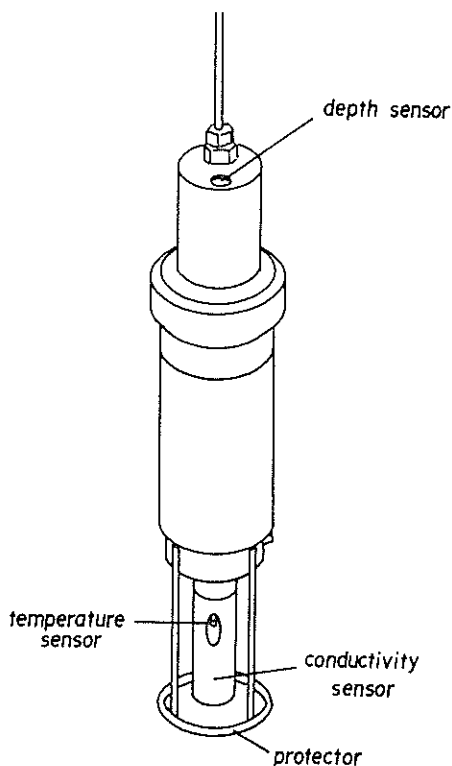


図-6 曳航体センサ部分構造

### Field Measurement System

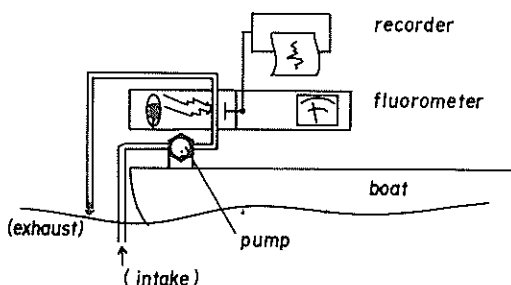


図-7 蛍光強度の現場測定方法

観測では全水深にわたり測定を実施したが、今回は所要時間の短縮とリモートセンシングで検出されるデータは表層の情報に限られることを考慮して、照度以外はすべて表層5mまでの範囲で測定を実施した。表-5には表層5mまでのデータのみ示す。

つぎに本測定結果について従来の定期観測結果と比較検討する。

#### a) 気象(気温、風向風速)<sup>20)</sup>

本観測時期は年間で最も気温の高い時期に相当している。時に観測日に異常高温であるとはいえない。前日に台風が関東地方を通過しているが、風向や風速に特にその影響と思われる結果は現れていない。

#### b) 水温<sup>20)</sup>

夏期は表面の加熱により鉛直成層が顕著である。本観測で、表層5mまでの結果をみると、0.5mと5mとでみると湾内の水温差の顕著なところで2.0°C程度の差がみられるが、湾内と湾外の成層状態の相違は表層に限定された今回の測定では明確でない。

#### c) 塩分<sup>20)</sup>

表層データをみると、概ね湾外に較べて湾内で塩分が低くなっている様子がうかがえる。これは淡水流入の影響によるものと考えられる。本観測時は台風通過直後で、河川からの淡水流入の効果は大きいことが予想される。

#### d) 溶存酸素(DO)<sup>20)</sup>

溶存酸素は表層0.5mのデータからは比較的地点ごとに値がばらつくが、湾外の千葉側、湾内の神奈川側で若干高くなっている。5.0mについては全体に表層より値が小さく、地点ごとの変動も小さい。

#### e) 透明度<sup>20)</sup>

一般に夏期には湾内ほど透明度が小さくなる傾向があるが、今回の観測では湾外でも比較的小さい場所があり、湾内と湾外の透明度差は明確ではない。

#### f) 消散係数<sup>20)</sup>

透明度と同様、地点ごとに値がばらつく傾向があり、湾外の千葉側測点3、湾内の測点9で高くなっている。

#### g) 濁度<sup>14)</sup>

過去の定期観測の夏期データと比較すると、今回の観測では濁度が全測点で極めて高くなっていることがわかる。特に湾外でも全体に濁度が高く、表層0.5mのデータでは湾外千葉側の測点3で最大値を得、また、場所的にも大きく変動しているのは、透明度や消散係数の傾向と共通である。

#### h) SS<sup>20)</sup>

SSは夏期としては特に高い値を示してはいないが、地点毎の値の変化も明確な傾向は示さず、ばらつきも大

表-5 (a) 水質測定結果表 (測点1)

測点	1							
		気温 31.6°C	風向 一	風速 0	水色 16			
透明度		3.5 m	色名 dark yellowish green					
水深	水温	塩分	濁度	S S	COD	D O	消散係数	クロロフィル-a
m	°C	‰	ppm	mg/l	mg/l	mgO/l	—	μg/l
0.5	25.3	33.9	8.2	3.0	1.28	7.7	0.024	3.80
1.0	24.8	33.5	8.7	3.1	—	7.8	0.392	3.80
2.0	24.3	33.4	8.7	3.5	1.65	8.0	0.453	3.69
5.0	24.0	33.1	8.7	—	—	7.9	0.592	

表-5 (b) 水質測定結果表 (測点2)

測点	2							
		気温 31.6°C	風向 N	風速 1.8m/s	水色 18			
透明度		2.0 m	色名 dark brown					
水深	水温	塩分	濁度	S S	COD	D O	消散係数	クロロフィル-a
m	°C	‰	ppm	mg/l	mg/l	mgO/l	—	μg/l
0.5	25.3	33.3	9.7	6.7	2.79	9.9	0.170	7.10
1.0	25.0	33.0	10.3	5.4	—	8.9	0.543	6.44
2.0	24.7	32.9	10.3	4.7	2.53	8.6	0.645	5.64
5.0	23.4	32.9	7.0	—	—	6.1	0.312	—

表-5 (c) 水質測定結果表 (測点3)

測点	3							
		気温 31.2°C	風向 SSE	風速 2.3m/s	水色 20			
透明度		2.0 m	色名 dark brown					
水深	水温	塩分	濁度	S S	COD	D O	消散係数	クロロフィル-a
m	°C	‰	ppm	mg/l	mg/l	mgO/l	—	μg/l
0.5	26.1	33.7	16.5	6.1	3.49	10.7	0.981	4.65
1.0	26.0	33.6	16.5	7.0	—	10.9	0.758	5.20
2.0	25.5	33.3	17.1	6.9	3.39	11.4	0.941	6.17
5.0	24.5	33.1	15.9	—	—	9.2	0.416	—

表-5 (d) 水質測定結果表 (測点 4)

測点	4							
気温 28.5°C			風向 NE	風速 4.65m/s	水色 18			
透明度 3.5 m			色名 yellowish brown					
水深	水温	塩分	濁度	SS	COD	DO	消散係数	クロロフィル-a
m	°C	%	ppm	mg/l	mg/l	mgO/l	-	µg/l
0.5	24.3	33.0	7.4	3.9	2.02	7.0	0.401	2.87
1.0	24.2	32.9	7.6	3.2	-	6.8	0.385	2.72
2.0	24.4	32.9	8.7	3.3	1.97	6.6	0.421	2.72
5.0	24.3	32.8	7.8	-	-	6.4	0.505	-

表-5 (e) 水質測定結果表 (測点 5)

測点	5							
気温 27.8°C			風向 NE	風速 4.3m/s	水色 19			
透明度 3.0 m			色名 brown					
水深	水温	塩分	濁度	SS	COD	DO	消散係数	クロロフィル-a
m	°C	%	ppm	mg/l	mg/l	mgO/l	-	µg/l
0.5	24.7	32.9	9.2	5.6	2.10	7.1	0.657	3.45
1.0	24.2	32.8	9.2	3.4	-	6.7	0.565	2.87
2.0	23.9	32.8	8.7	3.7	1.27	6.1	0.557	2.92
5.0	23.5	32.6	7.8	-	-	5.8	0.719	-

表-5 (f) 水質測定結果表 (測点 6)

測点	6							
気温 27.3°C			風向 -	風速 6.9m/s	水色 17			
透明度 3.0 m			色名 olive					
水深	水温	塩分	濁度	SS	COD	DO	消散係数	クロロフィル-a
m	°C	%	ppm	mg/l	mg/l	mgO/l	-	µg/l
0.5	25.4	33.4	9.4	4.9	2.10	7.3	0.349	3.61
1.0	25.5	33.3	9.2	4.6	-	7.1	0.571	3.45
2.0	25.5	33.3	9.2	4.6	3.21	7.1	0.578	3.90
5.0	25.0	33.1	8.5	-	-	6.6	-	-



表-5 (g) 水質測定結果表 (測点 7)

測点	7								
		気温 27.5°C	風向 ESE	風速 1.9m/s	水色 15				
透明度		3.0 m	色名 dark yellowish green						
水深	水温	塩分	濁度	S S	COD	D O	消散係数	クロロフィル-a	
m	°C	‰	ppm	mg/l	mg/l	mgO/l	—	μg/l	
0.5	25.5	32.6	8.7	4.4	2.65	7.9	1.186	2.92	
1.0	25.0	34.5	8.9	4.2	—	7.8	0.442	2.59	
2.0	24.7	32.6	8.5	4.9	3.26	7.3	0.493	6.12	
5.0	23.5	33.0	6.6	—	—	5.1	0.288	—	

表-5 (h) 水質測定結果表 (測点 8)

測点	8								
		気温 29.2°C	風向 WSW	風速 3.5m/s	水色 19				
透明度		2.5 m	色名 dark yellowish brown						
水深	水温	塩分	濁度	S S	COD	D O	消散係数	クロロフィル-a	
m	°C	‰	ppm	mg/l	mg/l	mgO/l	—	μg/l	
0.5	26.1	32.5	10.9	6.4	2.50	10.6	0.358	6.30	
1.0	25.8	32.5	10.9	7.0	—	10.1	1.076	6.34	
2.0	25.2	32.3	13.8	6.3	3.99	9.2	0.654	6.12	
5.0	24.8	32.8	13.8	—	—	6.6	0.273	—	

表-5 (i) 水質測定結果表 (測点 9)

測点	9								
		気温 30.3°C	風向 WSW	風速 1.8m/s	水色 21				
透明度		2.0 m	色名 dark red						
水深	水温	塩分	濁度	S S	COD	D O	消散係数	クロロフィル-a	
m	°C	‰	ppm	mg/l	mg/l	mgO/l	—	μg/l	
0.5	26.5	33.0	13.4	7.6	3.03	12.3	1.448	9.47	
1.0	26.3	32.9	13.0	7.8	—	11.6	2.331	8.55	
2.0	26.2	32.8	17.8	7.3	3.41	11.4	—	7.97	
5.0	25.8	32.4	17.8	—	—	9.9	—	—	

きいようである。SSには動・植物プランクトン、鉱物性懸濁物などが含まれ、地点ごとの変動傾向は濁度・消散係数などの光学的手法による測定値とは若干異なるようである。

i) クロロフィル-*a*量

植物プランクトン量の目安となるクロロフィル-*a*量の分布は、湾内測点8、9で大きくなる傾向はあるが、湾外の測点2、3でも比較的大きくなっている。

j) 化学的酸素要求量(COD)

従来の夏期のデータと比較して、湾内では特に高い値はしめしていないが、湾外の千葉側で高めとなっている。

k) 水色<sup>20)</sup>・色名<sup>14)</sup>

水色についても、従来データに比較して全体に値が大きくなっており、湾外でも千葉側より強い汚濁が確認

される。色名の変化を表-6に示す。色名からも湾外の千葉側、湾内の神奈川側の測点で濁りと確認される状況を示している。

以上各水質項目の所見をまとめると、

1) 従来の夏期水質データと比較して濁度をはじめとして、消散係数、水色などから湾口周辺全体で濁りが高いこと、とくに湾内の神奈川側、湾外の千葉側で相対的に濁りが強いことがわかる。

2) DO, SSについては全体として特に高い値は示さないが、湾内の神奈川側、湾外の千葉側で相対的に高くなる。クロロフィル-*a*については比較すべきデータがないが、相対的にはDO, SSなどと同じ傾向を示している。

以上水質項目の特性について概要を述べたが、各水質項目の関係を明らかにするため次に相関分析・主成分分析を用いて検討する。なお以下の解析では、測点1,2を除いた7測点のデータのうち、表層0.5mのみのデータを用いている。後述するように、今回のリモートセンシング調査のうち航空機による観測領域には湾外の測点1および測点2が含まれていないため、後の解析結果との比較を容易にするために、ここでも7測点のみのデータを用いている。また、照合データとしては後述するように0.5m深のデータのみを用いたため、ここでも0.5m層のデータを用いて検討する。

表-7に水質項目間の相関係数を示す。ここではやや客観性に欠ける水色、透明度は除外している。定期観測時の相関の強さの分類に従い<sup>14)</sup>相関の強さごとに示すと以下のとおりとなる。

i) 強い正の相関 ( $r \geq 0.7$ )

クロロフィル-*a*に対して、水温、SS、DO、COD、消散係数に対して、COD、

表-6 色名の変化

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

表-7 水質項目間の相関

	クロロフィル- <i>a</i>	消散係数	水温	濁度	SS	DO	COD	塩分
クロロフィル- <i>a</i>	*							
消散係数	0.487	*						
水温	0.784	0.536	*					
濁度	0.567	0.487	0.768	*				
SS	0.873	0.476	0.823	0.826	*			
DO	0.901	0.549	0.907	0.805	0.906	*		
COD	0.721	0.839	0.877	0.746	0.736	0.878	*	
塩分	-0.072	0.027	0.079	0.548	0.168	0.062	0.028	*

水温に対して、濁度、SS、DO、COD、  
 濁度に対して、SS、DO、COD、  
 SSに対して、DO、COD、  
 DOに対して、COD

ii) 正の相関 ( $0.5 \leq r < 0.7$ )

クロロフィル-a に対して、濁度

消散係数に対して、水温、DO

塩分に対して、濁度

iii) 相関の小さいもの ( $|r| < 0.5$ )

塩分とクロロフィル-a、消散係数、水温、SS、DO、  
 COD 消散係数と濁度 (0.487)、SS

データ数がわずか7個と極端に少ないため明確な議論はできないが、消散係数、濁度、CODといった濁りの直接的な指標となる項目間の相関は比較的高い。また、クロロフィル-aに関する水温、SS、DOなどの高相関は植物プランクトンの生産作用の表出と認識できる。一方、塩分に関しては他の項目との相関が小さく明確な傾向は現われていない。この理由として測点間の塩分差が比較的小さかったことが考えられる。また、塩分濃度の低下を河川流出水の影響と考えると、塩分と濁度の正の相関は矛盾した結果を与える。この点に関しては、比較的高い濁度の湾外の測点3における高濁度値が計算結果に大きく影響しているようである。試みに測点3を除いた6測点分のデータから相関を求めてみるとほぼ0となる。このようにデータ数が極端に少なく、本結果から直ちに高塩分-高濁度とは速断できない。この点に関しては、本項の終わりで再度触れる。

つぎに主成分分析結果について述べる。本手法により、得られた水質項目の表わす水質としての総合特性を理解することができる。表-8に水質項目から得られた固有値1以上(分散1以上)の主成分の寄与率を示す。また図-8に第1、第2主成分に対する各水質項目の因子負荷量を示す。なお、本資料では、以後表-9に示す水質項目の略号を用いることとする。この例では、第2主成分まででもとの水質項目全体の変動の80%以上を、第1主成分だけでも70%近くまで説明できることがわかる。因子負荷量の分布からも、消散係数、濁度、CODなど直接濁りを表わす項目だけでなく、他の項目も塩分を除

表-8 主成分の固有値と寄与率(水質項目のみ)

主成分	固有値	寄与率	累積寄与率
1	5.50	68.7	68.7
2	1.27	15.9	84.6

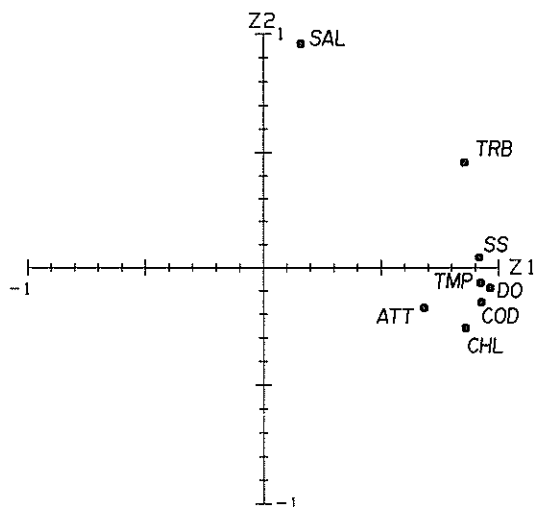


図-8 因子負荷量分布(水質項目のみによる)

表-9 水質項目略号表

記号	水質項目
CHL	クロロフィル-a
ATT	消散係数
TMP	水温
TRB	濁度
SS	浮遊粒子濃度
DO	溶存酸素
COD	化学的酸素要求量
SAL	塩分濃度

くとほとんどが第1主成分と関係が深いことがわかる。濁度については前述の塩分との相関の高さを反映して第2主成分とも相関が高くなっている。以上から、今回の0.5m層の測点3から測点9のデータについては第1主成分に濁りを表わす要素が強く、第2主成分の塩分を表わす要素とで概ね全体が評価されることがわかる。

一方、各測点について因子得点(スコア)を求めたものが図-9である。なお、座標軸は第1、第2主成分各々の標準偏差で正規化して示している。本図より、各測点で主成分の寄与の大きさを知ることができる。湾外の測点3、ならびに湾内の測点8、9では濁りが強く、湾口の測点4、5、6で濁りが小さいことがわかる。一方塩分に関してみると、湾内で低く、湾口から湾外で高くなる

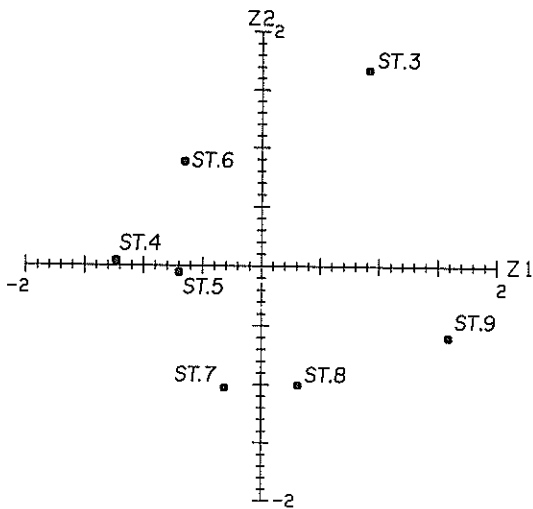


図-9 規格化した因子得点図(水質項目のみによる)

のがわかる。したがって、湾内については低塩分-高濁度の関係にあり、従来の定期観測で得られた傾向に一致するのに対し、湾外の測点3では高塩分-高濁度の傾向を示している。原因について明確な議論はできないが、測点3付近で、降雨出水により、山地が海岸までせまった千葉沿岸から流出する濁水は、河川規模は小さく塩分の希釈効果は弱いものの、山地河川特有の微細な粘土・シルト分を多量に含んだ高濁度のものであることが推測される。

#### (4) 照合データの取得

可視光域リモートセンシングで取得されたデータ中ほどの程度の水深までの情報が含まれているかを判断する目安として透明度を用いることができる。Gordonら<sup>4)</sup>は海中から上空に放射される光の90%は海面照度の  $1/e$  となる深さからのものであり、およそ2分の1透明度深であるとした。本観測では2.0から3.5m程度の透明度で、その深さは1.0~1.5m程度と考えられる。そこで本報告ではおよそ水深1.0m程度までの代表値として、0.5m層の値を用いることとした。各測点につき、ただひとつのサンプルデータを用いるのは必ずしも適当ではないが、1.0m、2.0mなどの値と比較し、特に異常なデータは見られないことから、この方法で十分と判断した。

### 3.2 航空機搭載 MSS によるリモートセンシング

まえがきに述べた理由で、本調査では人工衛星の上空通過時に合わせて航空機搭載型のリモートセンサを用いた観測を同時実施した。本節では、航空機観測の概要、ならびにそのデータ処理手順について概論する。

#### (1) 観測範囲

航空機観測は図-10に示すC-1からC-4までの4

コースの範囲について実施した。各コースとも北西から進入し、一定の飛行速度、高度を保ちながら、飛行方向と直角にスキャンしつつ南東へ抜ける方法で、コース間に欠測領域が生じないようにオーバーラップ部分を設けている。3.1で述べたシートルス測点のうち湾外の測点1と2が範囲外となり、照合データとして利用できなかった。またC-1コースの領域には測点は含まれていない。各コースの大きさや飛行機の運行諸元を表-10に、観測時の気象記録とともにまとめて示す。

表-10 飛行機観測諸元と気象

航空機	セスナ C-402			
飛行高度	10500 ft (約3200m)			
飛行速度	140 knot (約270 km/h)			
飛行コース	走査幅	長さ		
	C-1	6 km	34 km	
C-2	6 km	36 km		
C-3	6 km	36 km		
C-4	6 km	35 km		
時刻	気温	雲量	風向	風速
6時	26.1°C	—	北北東	4.1 m/s
9時	29.1°C	0	北北東	5.2 m/s
12時	31.2°C	—	東	4.0 m/s

(横浜地方気象台)

#### (2) 観測方法

観測は中日本航空 K.K. 所属のセスナ 402B型機に、可視赤外リモートセンサ MSS (Multi-Spectral Scanner) (ジャスコ社製 JSCAN-AT-18M) を搭載して実施した。また同時にハッセルブラッドカメラによる海域のカラー撮影も実施した。ここで用いた MSS は表-11に示す検出波長帯を持つ。各帯域幅は従来の LANDSAT, MSS などと比較して狭く、感度が高くなっている。クロロフィル-aなどの特性波長を考慮して設計されている。可視域の基本的な帯域分割は、海洋観測衛星 NIMBUS-7号の CZCS の基本設計段階で用いられた OCS (Ocean Color Scanner) に合わせてあり、海色の観測に適したものとなっている。MSS で検出された電磁波はフォトマルチプライヤー方式、またはフォトダイオード等を用いて電圧信号に変換されアナログテープに収録される。

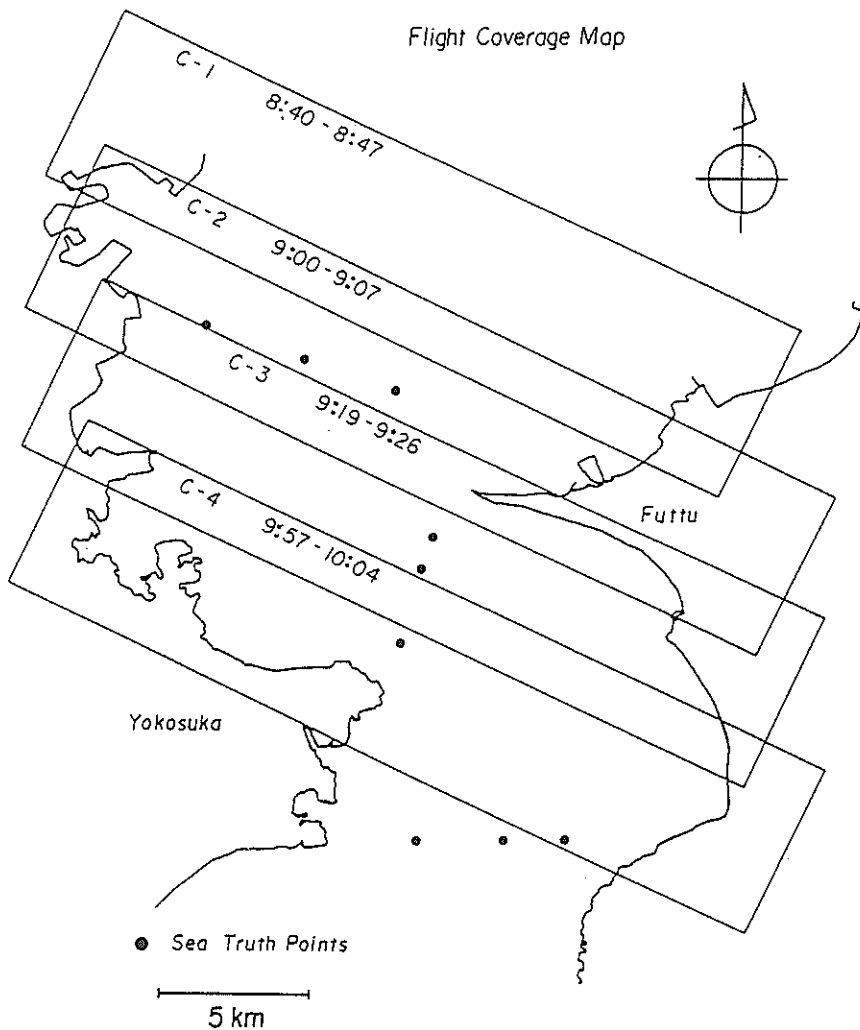


図-10 航空機飛行コースと時刻

(3) CCT (Computer Compatible Tape) の作成  
 アナログテープに収録されたデータは、図-11 に示す手順で処理され、アナログパターン写真およびデジタル値に変換した CCT (Computer Compatible Tape) を得る。これら一連の作業は中日本航空 K. K. が担当した<sup>15)</sup>。

つぎに処理中のデータ補正について概説する<sup>15)</sup>。

a) ローリング補正

航空機の横揺れによる歪みの補正

b) タンジェント補正

画角が大きくなると見かけ上画面が圧縮され、従って航空機の直下と周辺では画像がひずむ。この補正で画角に応じてデータの引き伸ばしをおこなう。

c) オーバースキャン補正

飛行機の速力とスキャン速度の関係で、1 スキャン毎

の像の重なり方を補正する。

d) 散乱吸収補正

飛行機の直下と周辺では光路長が異なるため、大気による吸収・散乱効果の大きさが異なる。そこで、観測領域の一部で、できるだけ放射輝度の均一な箇所に対してクロスフライトを実施し、直下点を基準として周辺の値を相対的に補正する。補正曲線は 2 次式を用いている。

e) 偏流補正

飛行機は横風により流されるため、スキャンの方向と飛行方向が直角にならないことによるひずみを補正する。

以上の補正はアナログ処理でおこなわれる。得られたアナログ画像の一例を写真-2 に示す。補正後のデータは A/D 変換され、0~255 までの 256 段階にデジタル化され、CCT に記録される。以後の処理はこの CCT をもとにデジタル処理をおこなった。

表-11 MSS 波長帯域一覽

MSS 特性波長帯		JSCAN-AT-18M		
バンドNo.	波長(μm)	色調	帯域	特長
2	0.425 ~ 0.439	青紫	可視	クロロフィル-a 吸収帯*
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	だいたい		
8	0.654 ~ 0.669	赤		
9	0.688 ~ 0.708	赤		
10	0.723 ~ 0.740	濃赤		
11	0.762 ~ 0.782	—		
16	2.060 ~ 2.450	—	中間赤外	
17	8.000 ~ 12.000	—	熱赤外	水温分布

\*クロロフィル-a 吸収帯(反射帯)<sup>21)</sup>.....クロロフィル-a の濃度が増加した時  
吸収(反射)が大きくなる波長帯

(4) コース間のレベル補正

観測領域は4つのコースに分かれている。各コース毎に測定の際に設定されたセンサのゲイン・オフセット値が異なるため、(3)で得られた CCT データのままでは測点ごとの相対的比較ができない。そこでコース間のオーバーラップ領域を用いて、レベル値の補正をおこなう。以下に手順の概略を示す。

- a) 2つのコースでオーバーラップする領域のうち、各コース全体の輝度分布を代表する部分を選択する。
- b) 選択した領域の平均値と分散をそれぞれのコースに関して求める。
- c) 求めた平均と分散を用いてコース全体を基準化することにより2つのコースのオフセット、ゲインの設定値の相違を補正することができる。3つ以上のコースがある場合は上記手続きを反復すればよい。

(5) 画像表示

リモートセンシング技術は広い空間の面的な情報を迅速に取得できるところに意義があり、水質調査などの応用的利用の側面からみると、結果をわかり易く、かつ利用価値の高いものとして表示する工夫が望まれる。

リモートセンシングデータの面的表示法としては、プロッタを用いて輝度分布の等値線を描画して示す方法<sup>16)</sup>がある。等値線で表わされているため、図面のコピーは容易でプレゼンテーションの点で有利な面もあるが、等

値線描画のためのデータの平滑化処理に手間がかかり、得られた図面の判読も容易とは言えない。これに対して、データをカラーグラフィックディスプレイに画像表示すれば、判読も容易でデータの前処理も不要である。しかし、多くは専用の画像処理装置を必要とする。

本報告では普及型のパーソナルコンピュータにカラーインクジェットプリンタを組み合わせた簡単なグラフィック表示を試みた。データの入力ハードディスクと磁気テープの2系統を用いている。ハードウェアの制約からカラー8色のみの表示のため、細かい判別は不可能であるが、大域的な傾向を判断するには十分と考えられる。この方法で得られた画像表示例を図-28などに示す。

(6) 測点照合データの取得

(4)で補正されたデータをもとに、近赤外帯域(11バンド)を用いて陸域と海域の分離処理<sup>8)</sup>をおこなった。得られた画像で、地形図をもとに陸上の目標物から測点3~9に対応する画素を求め、各バンドとも求めた画素を中心に15×15画素領域を切り出した。これら225個の平均値をもって測点の照合データとした。航空機データでは1画素がほぼ10m四方領域に対応し、平均領域はおよそ150m四方となる。図-12に測点周辺の輝度分布(ライン方向)の一例を示す。このように輝度分布にはノイズと思われる成分がかなり表われており、特に、短波長側で大きくなるようである。こうしたデータ、お

BAND-4 (0.499~0.519)

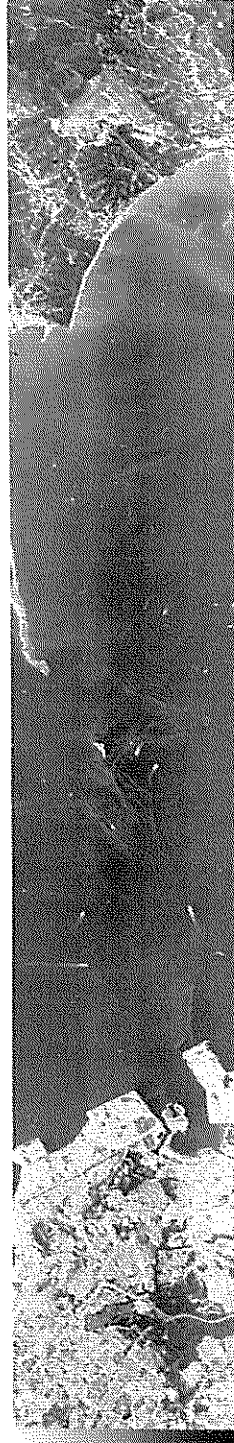
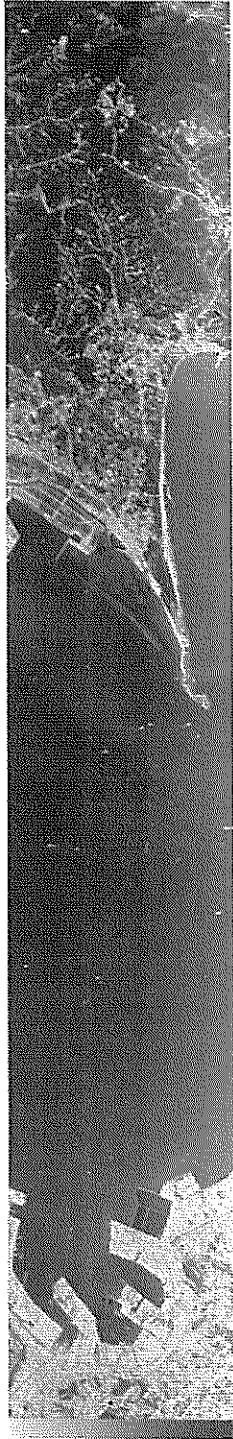
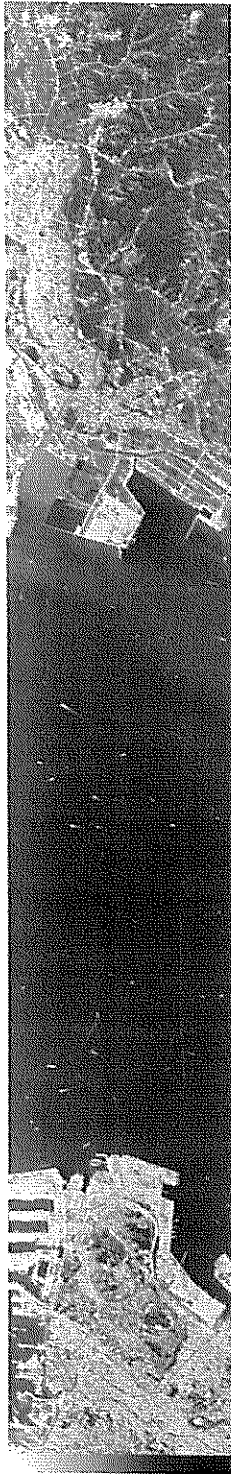


写真-2 航空機 MSS 画像例 (4バンド)

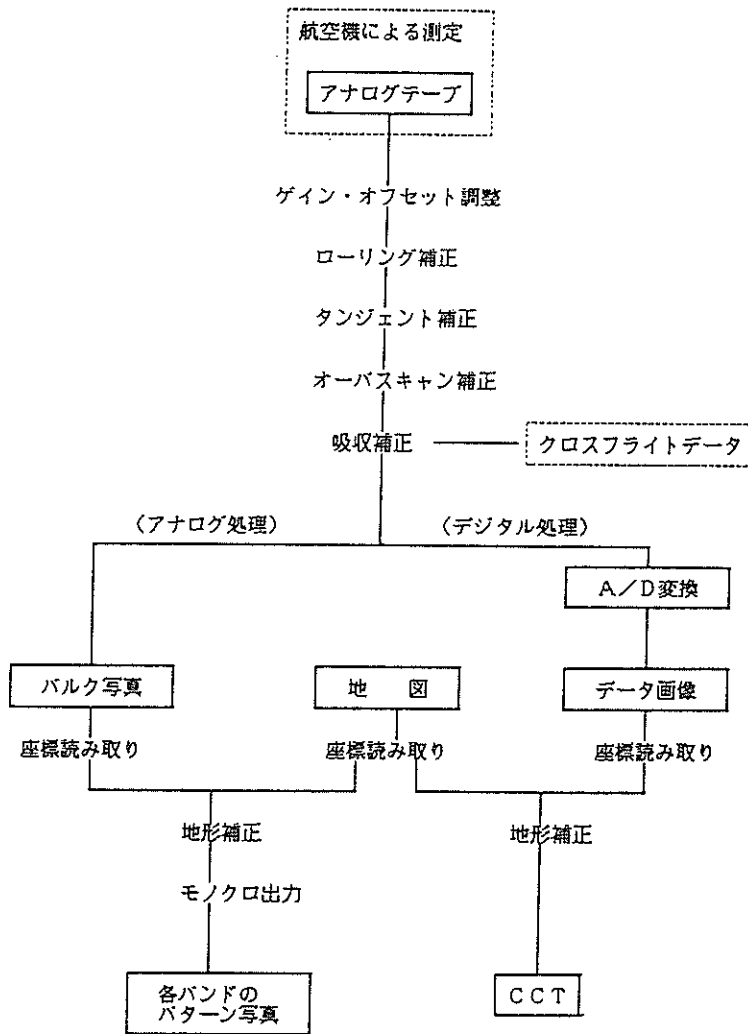


図-11 航空機 MSS アナログテープ処理フロー

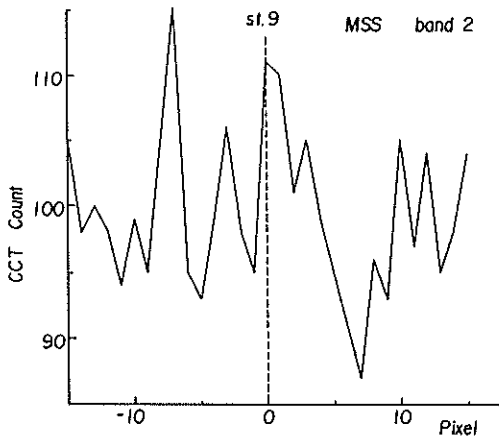


図-12 MSS 輝度分布例 (2バンド, 測点9周辺)

よびシートルースの精度などを勘案しやや大きめに平均領域を設定した。

### 3.3 人工衛星 LANDSAT によるリモートセンシング

地球観測衛星 LANDSAT は元来陸域の資源探査を目的に設計され、目ざましい成果を挙げているのは 2.1 で触れたとおりであるが、諸外国での水質観測への適用例は熱赤外帯域を用いた水温観測の例を除くとあまり見られない。むしろ、NOAA の AVHRR や CZCS を搭載した NIMBUS 衛星がよく利用されてきた<sup>17), 18)</sup>。しかしながらわが国では、データ供与の点で NOAA 等は利用が限られるのに対して、LANDSAT については宇宙開発事業団の地球観測センターにおいて直接定時受信され、リモートセンシング技術センターを通じてデータ提



供されているため、水質調査などへの定期的利用の便を考慮すると最も好ましいと判断される。

本調査では、以上のことから LANDSAT-5号による観測データを用いることとした。本節では、以下、LANDSAT-5号による観測の概要について述べる。

(1) 運行形式と観測範囲

LANDSAT-5号の運行諸元を表-12に示す。

一方、東京湾周辺のLANDSAT撮影範囲を図-13に示す。衛星は北から進入し、南方へ直角（東西方向）にスキャンしつつ移動する。

(2) 観測方法

LANDSAT-5号にはMSSだけでなくTM (Thematic Mapper) と呼ばれる可視赤外センサを搭載している。本センサは地上分解能30m（熱赤外帯は120m）を持ち、表-13に示される検出波長帯を持つ。表からわかるようにこれらの波長帯は主に地上の植生モニタリングを

表-12 LANDSAT-5号 運行諸元

LANDSAT-5号		
主な諸元		
運用開始	1984年4月	
高度	705 km	
走査幅	185 km	
回帰日数	16 日	
周期	99 分	
地上分解能 (TM)	熱赤外	120 m
	その他	30 m

LANDSAT-5 Coverage Map

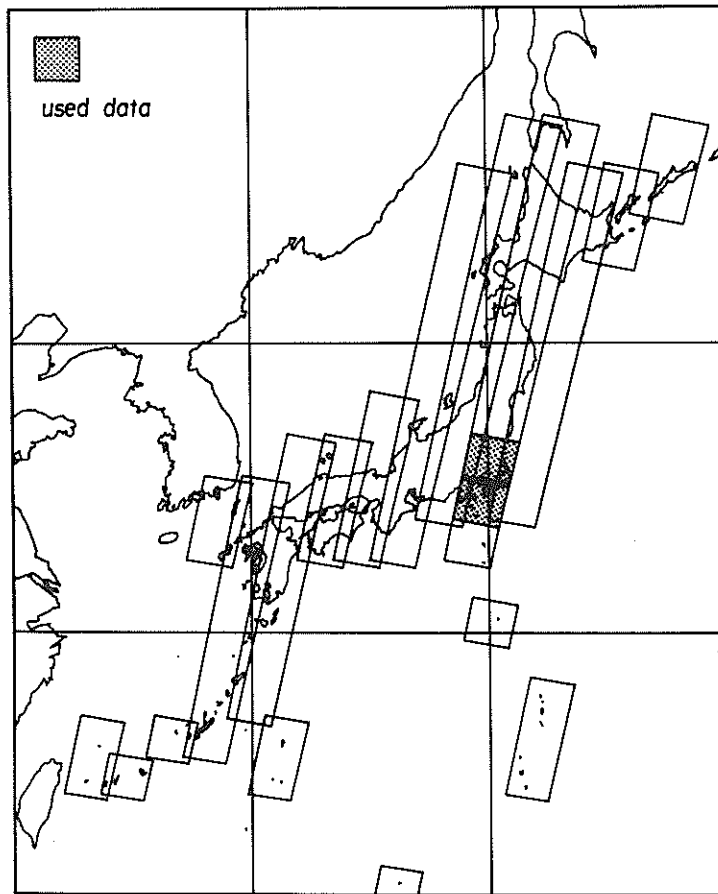


図-13 LANDSAT-5号撮影範囲総覧（日本周辺）

表-13 TM 波長帯域一覽

TM 特性波長帯 (Thematic Mapper)		LANDSAT-5号	
バンド No.	波長 (μm)	帯域	目的・特長
1	0.45 ~ 0.52	可 視	含水量・沿岸水系分布把握.
2	0.52 ~ 0.60		クロロフィル 反射帯
3	0.63 ~ 0.69		クロロフィル 吸収帯
4	0.76 ~ 0.90	近 赤 外	陸域・水域の区分
5	1.55 ~ 1.75		土壌水分・雲・雪の識別
6	10.40 ~ 12.50	熱 赤 外	熱分布の把握
7	2.08 ~ 2.35	中間赤外	岩石タイプの識別の可能性

+ TM 06/AUG/86 0107-035 F 1 BK

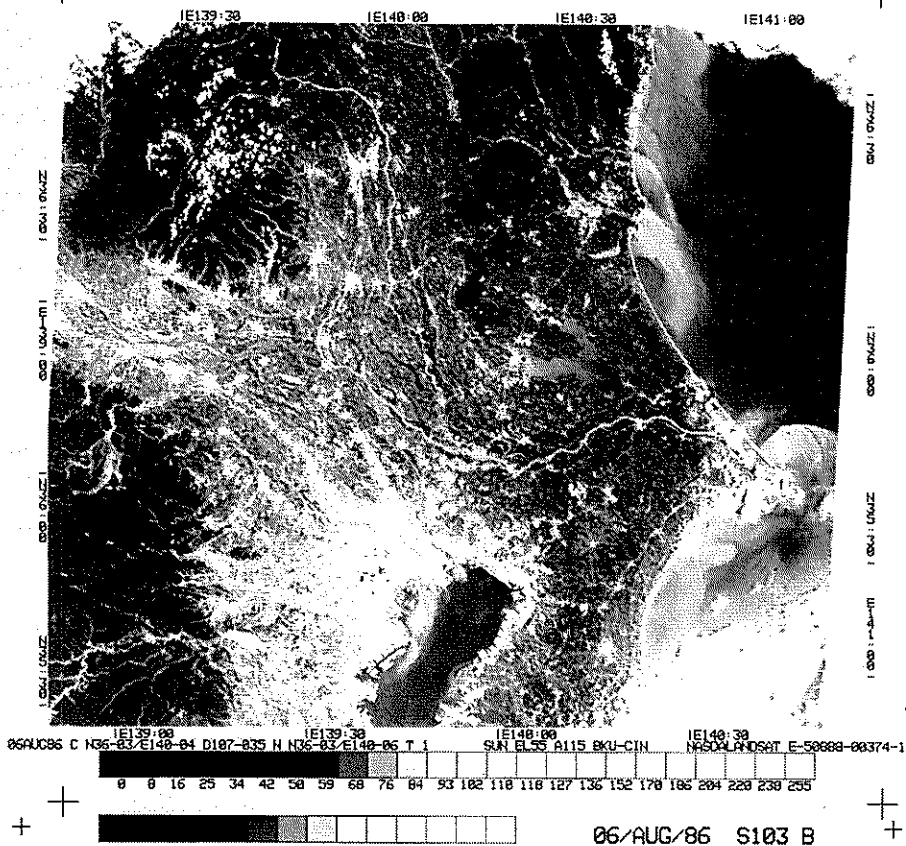


写真-3 LANDSAT-5号 TM 画像例 (1バンド, 1986年8月6日撮影)

目的として設計されている。MSSと比較してTMはスキャンを東西往復でおこなうため走査レートが高く、精度が向上している。また検出部を直接焦点位置に置くため、MSSのように光ファイバー導光による損失を低減することができる。

取得されたデータは増幅して一端デジタル化され、地上へ送信される。

### (3) CCTの作成

送信されたデータは一端HDDT(高密度記録デジタルテープ)に収録された後、ラジオメトリック補正、地形補正等の処理を施した後、CCTとして作成される。また、CCTよりモノクロパターン写真が作成される。写真-3に、今回の観測例を示す。なお以上の処理は、宇宙開発事業団地球観測センターが実施している。

### (4) 測点照合データの取得

航空機データと同様、補正されたCCTをもとに陸域海域の分離処理を近赤外帯域(4バンド)を用いておこなう。得られた画像で、地形図をもとに地上目標物を基準に測点位置の画素を割り出した。データの平均化領域は測点を中心に7×7画素とした。航空機データと比較して測点を中心とした周囲の輝度の変動は顕著でなく、航空機データの平均領域の大きさも考慮し、この程度で十分であると判断した。

## 4. リモートセンシングによる水質把握手法の検討

リモートセンシングで得られたデータの水質情報としての有用性を検討するには、水質と海中および大気中の光の放射伝達過程との因果関係に基づく方法と、一切の物理的関係を導入せず、統計的手法により水質との定量的関係を見出す方法とがあることは、2.で述べた。

今回の観測では、シートルース測定方法について、事前の検討が必ずしも十分でなく、シートルース調査が簡易水質調査方法に基づく項目のみの観測であったことなどを考慮し、主に実用的見地から統計解析手法に基づく検討をおこなった。

本章では、航空機・人工衛星のデータと水質項目との相関分析、主成分分析を適用した結果について述べる。

### 4.1 航空機MSSデータと水質との関係

本節では、航空機搭載MSSの取得データと水質項目の関連を相関分析・主成分分析を用いて検討する。

#### (1) MSSデータと水質との相関・主成分分析

図-14にMSSデータのうち可視帯域(2バンド~10バンド)について、波長帯ごとの輝度レベルの変化を示した。ここでは各波長帯毎に輝度を平均値100、標準偏

差10に規格化して表示している。輝度がピークを示す波長帯で最も反射が大きく、その波長に対応する色彩がその測点で視認できる色に近いと考えられる。最も顕著な変化を示すのが湾外の測点3で、黄緑色にピークを持ち、赤色側でエネルギーが相対的に小さくなっている。これと逆の傾向を示すのが湾内の測点8および9で、緑~黄緑色に比較して赤色側でエネルギーが大きいのがわかる。一方、湾口の測点4,5および6では明確な傾向は示していない。

つぎに赤外帯域も含めて、MSSデータと水質項目について相関行列を表-14に示す。塩分を除いては大半が正の高い相関を示しており、3.1で述べた水質項目の特性を考慮すると、MSSデータは水域の濁りと密接に係わっていることが推察される。この点に関しては次の主成分分析で再度触れる。

一方、個々の水質についてみると、水温が全体に高い相関を示すが、特に熱赤外帯域の17バンドで0.924と最高値を示し、このバンドと水温との物理的因果関係の存在が推察できる。また、濁度については最も高い相関が中間赤外帯の16バンドで得られている。中間赤外帯は通常岩石の識別等に有用であるとされているが、水域情報としては不明な点が多い。短波長側の2バンド、ないし4,5バンドでも若干ではあるが、相関が高めとなっている。短波長の可視光は、水層の透過率が比較的良く、水面下からの水中の懸濁物等による反射の情報が多く含まれることから、この帯域での高い相関は物理的にも理解し易い。一方、クロロフィル-aに関しては、クロロフィル-aの反射帯とされる4,5バンド付近では相関は高くなく、むしろ長波長赤色側の、通常クロロフィル-aの吸収帯とされる8,9バンドで相関が高めとなっている。この点については、(2)で再度触れる。

消散係数、SSについてはあまり明確な傾向は現れていない。またDO、CODについては水質項目そのものが海中からの放射照度と関連することは考えにくく、ここで示した高い相関は他の水質項目との相関が影響しているものと思われる。

つぎに、主成分分析を用いてMSSデータと水質項目との関係を調べてみる。

表-15にMSSの11バンド分と水質項目に対する主成分の分散1以上のものについて、寄与率、ならびにもとの変数との因子負荷量を示す。表-15より第2主成分までの累積寄与率が85%に達し、このことから、もとのMSSデータと水質項目のもつ意味はほぼ2つに要約されることがわかる。第1,第2主成分に対する因子負荷量の分布を図-15に示す。水質項目については3.1

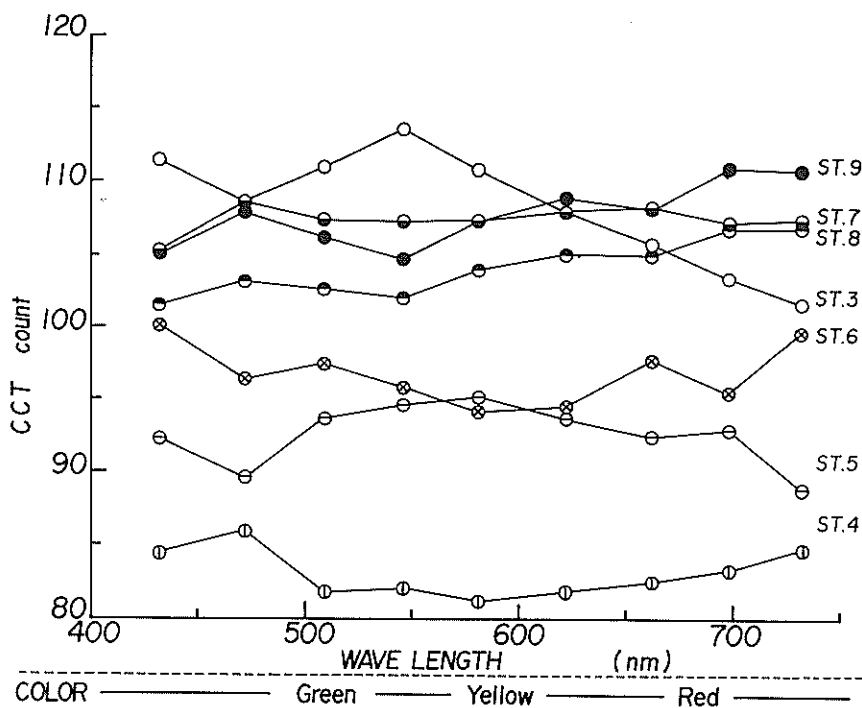


図-14 MSS 可視帯域の輝度レベル分布

表-14 MSS と水質項目の相関

水質 バンド	クロロ フィル-a	消散係数	水温	濁度	SS	DO	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-15 主成分の固有値・寄与率と因子負荷量  
(MSSと水質項目)

主成分		1	2	3	
固有値		14.03	2.06	1.55	
寄与率(%)		73.9	10.8	8.2	
累積寄与率(%)		73.9	84.7	92.8	
因子負荷量	MSSバンド	2	0.940	0.215	-0.245
		3	0.962	-0.021	-0.232
		4	0.956	0.085	-0.259
		5	0.930	0.168	-0.276
		6	0.960	0.005	-0.200
		7	0.972	-0.114	-0.177
		8	0.959	-0.146	-0.227
		9	0.953	-0.286	-0.088
		10	0.911	-0.289	-0.115
		16	0.694	0.658	-0.109
	水質項目	クロロフィル-a	0.677	-0.268	0.669
		消散係数	0.679	-0.052	-0.042
		水温	0.964	-0.046	0.166
		濁度	0.793	0.506	0.286
		SS	0.778	0.039	0.562
		DO	0.858	-0.048	0.478
		COD	0.937	-0.051	0.097
塩分	0.087	0.956	0.145		

の図-8で示した傾向とほぼ同じで、MSSデータのうち16バンドを除くと概ね第1主成分と極めて高い相関を持つことがわかる。16バンドと濁度は、第2主成分とも相関はあるが、第1主成分とも0.7以上の高い相関を持ち、全体の傾向からは第1主成分が濁りの指標で、塩分を除く項目がこの指標に要約されると判断できる。

つぎに各測点について因子得点(スコア)を求めたものが図-16である。ここで座標軸は各主成分の標準偏差で正規化してある。この図より、湾外千葉側および湾

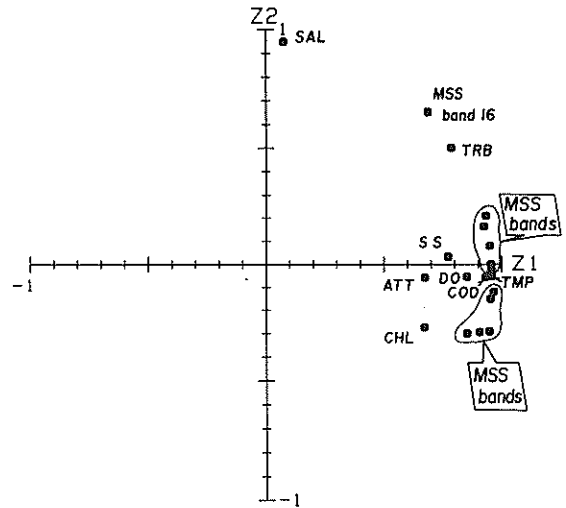


図-15 因子負荷量分布 (MSSと水質項目による)

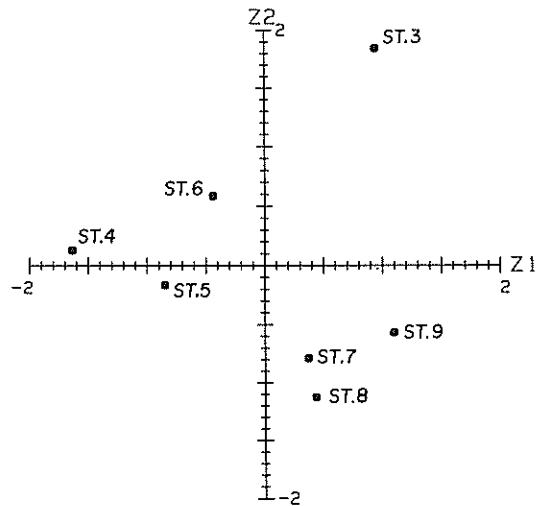


図-16 規格化した因子得点図  
(MSSと水質項目による)

内測点で濁りの要素が大きく、これは3.1の水質データ所見と一致する。一方、第2主成分の塩分指標では、湾外に対して湾内で値が小さくなることわかる。

以上のように、MSSデータと水質項目とに、相関分析・主成分分析を適用した結果から、全体としては濁りを表わす要素が顕著であること、これに塩分指標が加わることが理解される。しかしながら、特定の波長帯域が水質のどんな性質を表わし得るかについては、比較的物理的因果関係の明確な水温などを除くと、本解析結果からは明確にならない。その原因としては、図-14で示された各測点毎の分光輝度分布の中で、測点間の波長平均的な輝度レベルの差が、輝度の波長毎の変化に較べてはるかに大きく、分光輝度特性が分析結果に十分現われな

いものと推察される。このように測点間に顕著な輝度レベル差が生じる原因としては、

- 1) 測点毎の太陽からの入射光量の相違
- 2) 水中溶存・懸濁物による散乱の大きさの相違
- 3) 水中からの放射光への大気効果の相違，ならびにパストラディアンスの相違，航空機の場合，画角方向へパストラディアンスが増大するため，直下に対して走査幅の両端で輝度が上昇する<sup>8)</sup>。この点は，クロスフライトによりある程度補正されているが，十分とは言えない。

などが考えられる。1) については，観測時間の相違による太陽高度の差が考えられる。後に示す人工衛星データでも同様の傾向が確認され（図-20 参照）るが，人工衛星の観測時間は東京湾全体で数十秒程度で，太陽高度の差はまず問題とならない。したがって，本 MSS データでも，影響は顕著でないと考えられる。2), 3) に関しては，今回の観測データのみからは判断が困難であるが，分光輝度特性と水質の関連を明確にするため，次にこうした平均的なレベル差を標準化演算により，取り除いて議論をすすめ，後で平均的な輝度レベルの差と水質との関係を検討することとする。

(2) 標準化したMSSデータと水質の相関・主成分分析

ここで標準化とは，MSS データに次の演算を施すことを意味する。

$$B_{STDi} = \frac{B_i}{\Sigma B_i}$$

ここに， $B_{STDi}$  : 標準化された  $i$  バンドデータ

$B_i$  : もとの  $i$  バンドデータ

$\Sigma B_i$  :  $m$  バンドから  $n$  バンドまでの総和

この演算を各測点毎におこなう。標準化されたデータは、

センサに到達する光の放射エネルギー全体に対する各帯域のエネルギーの割合を示すものと解釈できる。

ここでは可視帯域の3バンドから9バンドまでを対象に標準化をおこなう。ここで選択した帯域は，後で示す人工衛星データとの比較を容易にするため，人工衛星 TM の帯域に合わせている。

はじめに標準化した MSS データの特性を相関行列（表-16）で概観する。表から明らかなように，長波長帯域（8, 9 バンド）と短波長帯域（4, 5 バンド）で強い負の相関があり，色調的には余色の関係にあることを暗示している。

つぎに，標準化した MSS データと水質項目との相関行列を表-17 に示す。まず水温，DO，COD，消散係数では7バンドを除くと相関が非常に低くなっている。これらの水質項目には本来可視帯域の放射とは無関係か，または消散係数のように，色調の変化を反映しにくい項

表-16 標準化 MSS 帯域間の相関

バンド	3	4	5	6	7	8	9
3	*						
4	-0.240	*					
5	-0.251	0.846	*				
6	-0.759	0.344	0.643	*			
7	-0.517	-0.634	-0.444	0.387	*		
8	0.169	-0.378	-0.782	-0.755	0.033	*	
9	0.057	-0.873	-0.956	-0.462	0.568	0.678	*

表-17 標準化 MSS と水質項目の相関

水質 バンド	クロロフィル a	消散係数	水温	濁度	SS	DO	COD	塩分
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

目が含まれている。一方、クロロフィル-aに関しては、クロロフィル-aの吸収帯域（7バンド・赤色）で正の相関が高く、逆に反射帯域（4, 5バンド）で負の相関を示している。SSは赤色波長帯（6, 7バンド）で正の相関があり、これは過去の事例に経験的には一致している。濁度は、あまり明確ではないが、短波長で正の相関が現れている。

標準化した MSS データと水質項目に対して主成分分析を適用し、分散1以上の主成分の寄与率、ならびに因子負荷量を表-18に示す。第1, 第2主成分について、因子負荷量をプロットしたものが図-17である。水質項目については塩分を除いてはほぼ第1主成分に相関が強いのは標準化しないもの図-15と同様であるが、第2

主成分では、緑・黄緑系の色が正に、赤系の色が負に各々相関が高くでており、水質的には塩分指標を表わす成分であるが因子負荷の大きさからは緑ないし黄緑色系統の指標となる主成分と判断される。濁りを表わす第1主成分に対して、黄〜だいたい系統の色がやや高い相関を示している。特に、クロロフィル-aは第2主成分に対しては負の相関、すなわち赤色側に相関があり、だいたい色と関係が深いと判断できる。このように、クロロフィル-aは吸収帯域に近い色調と正の相関を示し、クロロフィル本来の分光特性とは異なる結果となった。

一方、スコアを求めると図-18のようになる。湾外

表-18 主成分の固有値・寄与率と因子負荷量  
(標準化 MSS と水質項目)

主成分	1	2	3	4	
固有値	6.179	4.917	1.926	1.028	
寄与率(%)	41.2	32.8	12.8	6.9	
累積寄与率(%)	41.2	74.0	86.8	93.7	
因子負荷量	3バンド	-0.353	-0.222	0.775	-0.416
	4バンド	-0.201	0.886	0.090	0.288
	5バンド	-0.102	0.979	-0.141	-0.065
	6バンド	0.434	0.599	-0.665	-0.067
	7バンド	0.673	-0.473	-0.557	-0.115
	8バンド	-0.267	-0.763	0.193	0.387
	9バンド	0.135	-0.957	-0.082	0.141
	クロロフィル-a	0.869	-0.348	0.176	0.200
	消散係数	0.692	0.051	0.072	-0.539
	水温	0.886	-0.024	0.262	0.185
	濁度	0.800	0.534	0.224	0.086
	SS	0.940	0.094	-0.026	0.285
	DO	0.950	-0.068	0.226	0.051
	COD	0.911	0.013	0.211	-0.282
	塩分	0.014	0.789	0.499	0.213

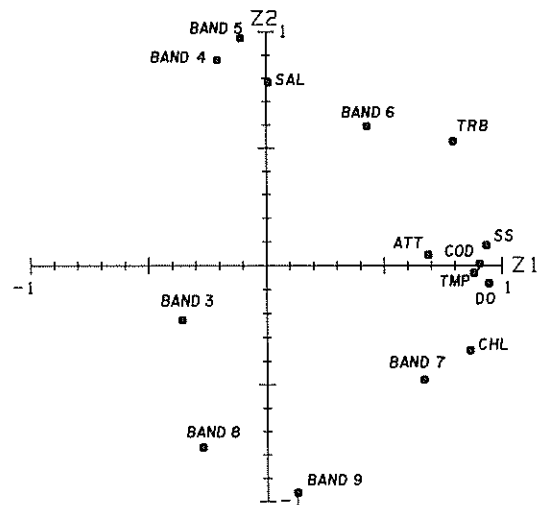


図-17 因子負荷量分布  
(標準化 MSS と水質項目による)

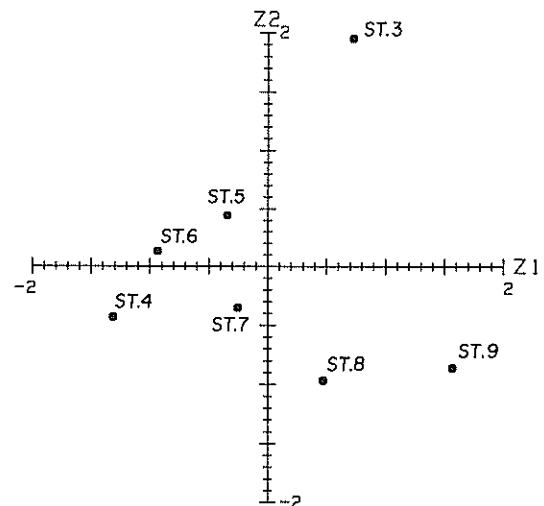


図-18 規格化した因子得点図  
(標準化 MSS と水質項目による)

の測点3は明瞭に区別されるが、湾口から湾内にかけての区分はあいまいになっている。第2主成分が黄緑系統の色調を表わす指標であるとする、特に測点8、9で赤色系の色調が強くなるのがわかる。標準化によって得られた各帯域の相対的なエネルギーの強さから、直ちに実際に視認される色彩を推定するのは困難であるが、上に述べたことより、色名として得られた海域の色情報とある程度対応づけが可能である。

さて、標準化により明確化された分光輝度の変化をもとに、つぎのような演算を試みる。

$$\frac{\text{バンド}m}{\text{バンド}n} \quad (\text{比演算})$$

この演算は、バンドmとバンドnがある水質項目の変化に対して排反する傾向を持つ場合にそれらの変化を強調する作用がある。例えばクロロフィル-aの反射帯域と吸収帯域を採用すると、単バンドとの回帰では不明確であった相関特性をより明確にする可能性がある。本演算をすべての可視帯域の組み合わせに対しておこない、各水質項目との相関係数を求めた。各水質項目に対して最も相関の高かった組み合わせについて示すと表-19

表-19 標準化MSSの帯域間比演算と水質項目の相関

水質項目	最も相関の高い組み合わせ	
	バンドA/バンドB	相関係数
クロロフィル-a	7 / 5	0.710
消散係数	7 / 9	0.528
水 温	6 / 5	0.438
濁 度	7 / 9	0.642
S S	6 / 5	0.635
D O	6 / 5	0.553
C O D	7 / 8	0.556
塩 分	4 / 7	0.819

のようになる。クロロフィル-aでは表-14の標準化前の単バンド相関のいずれよりも高くなっているが、これは本来のクロロフィル-aの反射・吸収帯とは正反対の傾向を示し、本結果からクロロフィル-aの把握を議論するのは困難である。また、SSについては表-14の結果とはほぼ同程度の値を示している。しかし、水温、COD、DOをはじめとして濁度、消散係数などについては表-14の相関値より値下する傾向がみられる。このことは、これらの水質項目はもともと分光輝度特性の変化には反映しにくい項目であることを意味するものであろう。

以上、標準化したMSSデータにより、水質と分光輝度との関係は明確化された。しかしながら、植物プランクトン量の目安となり、赤潮の発生状況を把握するのに有効とされるクロロフィル-a量を反射・吸収スペクトルとしてとらえることはできなかった。SSについては傾向は従来の知見と一致した。

(3) 帯域平均輝度レベルと水質との相関・主成分分析  
標準化演算を施すと、センサに到達する放射エネルギーの絶対値は失われてしまう。そこで、各測点において、可視域(3バンド~9バンド)の平均値を求め、水質項目との関係を検討しておく。

帯域平均レベルと水質項目との相関行列を表-20に

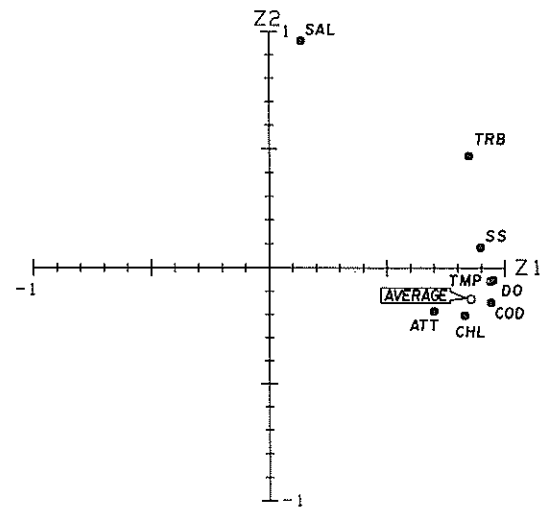


図-19 因子負荷量分布  
(MSS帯域平均値と水質項目による)

表-20 MSSの帯域平均値と水質項目の相関

	クロロフィル-a	消散係数	水 温	濁 度	S S	D O	C O D	塩 分
平均	0.523	0.674	0.898	0.698	0.654	0.731	0.888	0.000



示す。これから、水温、COD との高い正の相関が確認できる。また、濁度とも比較的相関が高いのがわかる。

このように、帯域平均レベルが濁りの強さと相関が高いことは、図-19 に示す水質との因子負荷量の分布からも明白である。したがって、帯域平均レベルの測点毎の相違は、水域の濁りの度合と関係が深いと推察される。

#### 4.2 LANDSAT TM データと水質・航空機

##### データとの関係

本節では、人工衛星 LANDSAT TM による観測データと水質項目との関係を検討する。さらに、4.1 で述べた航空機 MSS データとの関係にも触れる。

#### (1) TM データとの相関・主成分分析

4.1 と同様に、LANDSAT TM データの可視帯域（1 バンド～3 バンド）の波長帯ごとの輝度レベル変化を図-20 に示す。帯域の数が少ないため、この図からは明確な傾向は確認できないが、おおまかな傾向は航空機データ（図-14）と一致している。

つぎに、TM データと水質項目との相関行列を表-21 に示す。MSS データと同様、塩分以外で正の相関が顕著で、やはり濁りとの関連性が浮きぼりにされる。個々の水質については、水温は全体に相関が高く、この例では7バンドの中間赤外帯との相関が最も高い。熱赤外帯

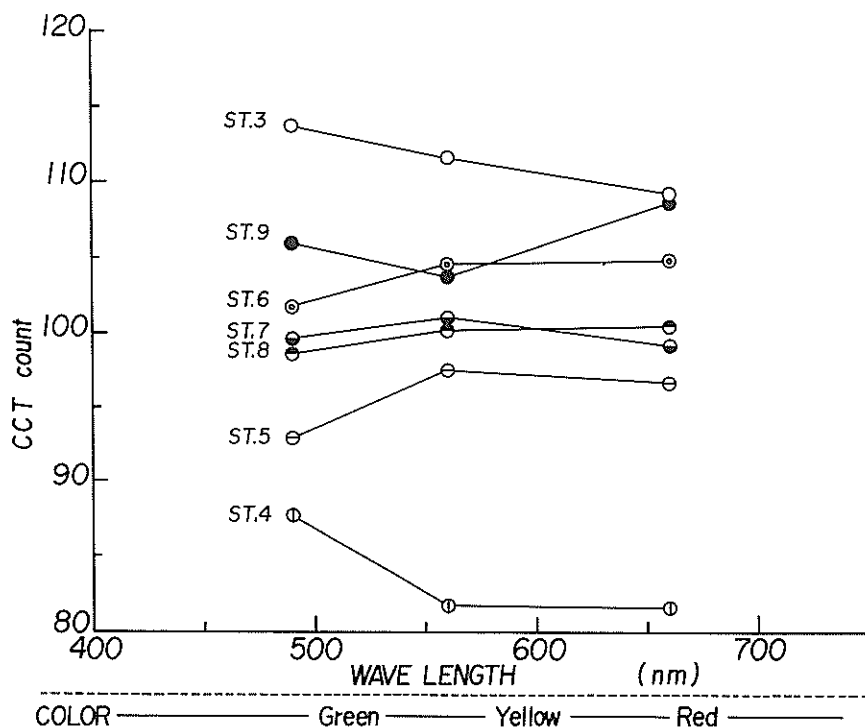


図-20 TM 可視帯域の輝度レベル分布

表-21 TM と水質項目の相関

水質 バンド	クロロフィ ル a	消散係数	水温	濁度	SS	DO	COD	塩分
1	0.454	0.532	0.830	0.904	0.678	0.693	0.758	0.552
2	0.354	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

6バンドとも0.852の高い相関を示している。一方、濁度に関しては短波長側で相関が高く、1バンドとは、0.904に達する。MSSデータでみられた中間赤外帯との相関は明確ではない。クロロフィル-aについて、熱赤外帯と高い相関を持つのはMSSデータと同様で、水温とクロロフィル-a（植物プランクトン）量との相関が現れている。一方可視域との相関ではMSSと同様、クロロフィル-aの吸収帯で逆に相関が高めとなっている。

TMデータと水質項目に主成分分析を適用し、表-22に分散1以上の主成分の寄与率ならびに因子負荷量を示す。また、図-21に第1,第2主成分に対する因子負荷量をプロットした。図-21から、TMデータは全体に第1主成分と正の相関が高く、塩分以外の水質データについても同様である。MSSデータの場合と比較して、濁度と可視域（1バンド～3バンド）とが非常に近

表-22 主成分の固有値・寄与率と因子負荷量 (TMと水質項目)

主成分		1	2	3	
固有値		9.53	1.89	1.14	
寄与率(%)		68.1	13.5	8.2	
累積寄与率(%)		68.1	81.6	89.8	
因子負荷量	TMバンド	1	0.909	0.375	0.055
		2	0.842	0.396	-0.134
		3	0.924	0.247	-0.150
		5	0.865	0.243	-0.400
		7	0.917	0.052	-0.366
		6	0.755	-0.392	-0.502
	水質項目	クロロフィル-a	0.765	-0.501	0.106
		消散係数	0.618	-0.199	0.372
		水温	0.967	-0.168	-0.101
		濁度	0.850	0.266	0.395
		SS	0.854	-0.167	0.281
		DO	0.881	-0.325	0.233
		COD	0.878	-0.262	0.239
塩分	0.279	0.857	0.212		

い性質を持つことがわかる。

以上の結果からスコアを求めると図-22のとおりとなる。MSSの場合図-16と比較して湾外、湾口、湾内の区分は不明確になっているが、傾向は一致している。

さて、MSSデータと同様、測点間に顕著な輝度レベル差が存在することについては4.1の(1)にのべたとおりである。人工衛星では東京湾全域をスキャンする所要時間は数十秒程度であるから太陽高度差による測点への入射光量の相違は問題にならない。また航空機の場合しばしば問題となる画角方向への輝度レベルの変化も、人工衛星の場合は顕著ではなく、これも無視できると考えら

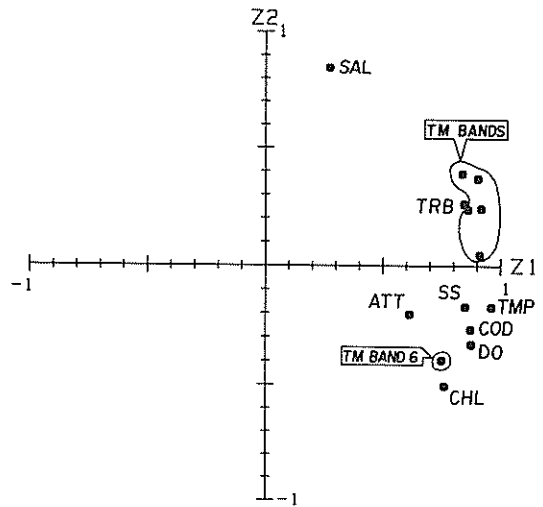


図-21 因子負荷量分布 (TMと水質項目による)

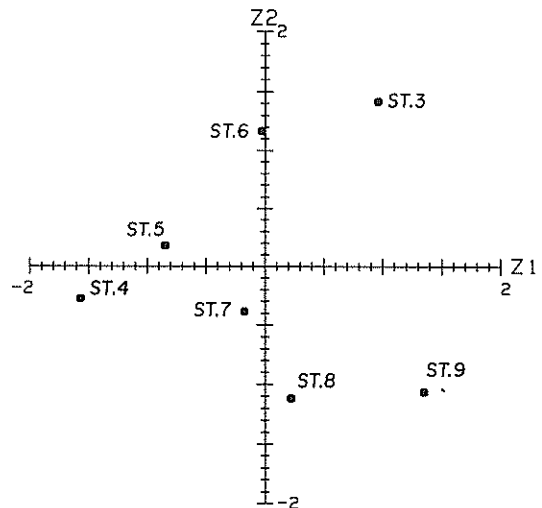


図-22 規格化した因子得点図 (TMと水質項目による)

れる。従って、測点毎のレベルの大幅な差は、水質の影響が、波長全帯域にあらわれたものと考えられる。

つぎに、MSS データの場合と同様、標準化演算を実施し、分光輝度特性と水質との関連を検討してみる。

(2) 標準化した TM データと水質項目の相関・主成分分析

MSS と同様、可視帯域の 1 バンドから 3 バンドまでを対象に標準化をおこなう。

はじめに標準化した TM データの帯域間相関を表-23 に示す。ここでは短波長の 1 バンド（青色領域）と長波長側との負の相関が顕著で、これは MSS の場合と同様

である。

つぎに標準化した TM データと水質項目との相関行列を表-24 に示す。標準化をおこなわない場合と比較して、

表-23 標準化 TM 帯域間の相関

バンド	1	2	3
1	1.000		
2	-0.730	1.000	
3	-0.781	0.142	1.000

表-24 標準化 TM と水質項目の相関

水質バンド	クロロフィル a	消散係数	水温	濁度	SS	DO	COD	塩分
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

帯域毎、水質毎の相関の相違が明確化される。最も顕著な相違は濁度に関してほとんど相関がなくなっていることで、濁度には帯域毎の分光輝度特性が現われにくいことが伺える。SS に関しては、赤色帯の 3 バンドと正の相関が現われ、これは MSS の傾向と一致する。濁度、DO、COD、消散係数などの水質項目とはほとんど相関がみられず、全体の傾向は MSS データの場合と同様である。一方、クロロフィル a では吸収帯域の赤色域（3 バンド）で正の相関、反射帯域（2 バンド）で負の弱い相関が現われ、クロロフィル a 本来の分光特性とはまったく逆の結果となっているのは MSS データの場合と一致する。

つぎに水質項目と標準化した TM データとの主成分分析結果を示す。分散 1 以上の主成分の寄与率と因子負荷量を表-25 に示す。MSS データの場合（図-17）と比較して、第 1 主成分として濁り指標が見出されるのは同様であるが、第 2 主成分に青の色調が、第 3 主成分に緑の色調・塩分に現われている点が異なる。そこで MSS データとの比較を容易にするため、第 1、第 3 主成分についての因子負荷量分布を示したものが図-23 である。図-23 で全体的な傾向は MSS データとの分析結果と差がなく、赤の色調と濁り指標との関連性が若干高いと判断できる。

因子得点の計算結果は図-24 のようになる。第 2 主成

表-25 主成分の固有値・寄与率と因子負荷量（標準化 TM と水質項目）

主成分		1	2	3	
固有値		5.76	2.36	1.32	
寄与率(%)		52.3	21.4	12.0	
累積寄与率(%)		52.3	73.7	85.7	
因子	TM バンド	1	-0.127	0.962	-0.225
		2	-0.291	-0.682	0.555
		3	0.449	-0.770	-0.182
負荷量	クロロフィル a	0.901	-0.095	-0.314	
	消散係数	0.679	0.108	-0.103	
	水温	0.926	-0.107	0.093	
	濁度	0.820	0.266	0.485	
	SS	0.931	-0.130	0.128	
	DO	0.966	0.110	-0.085	
	COD	0.914	0.128	-0.053	
	塩分	0.128	0.473	0.740	

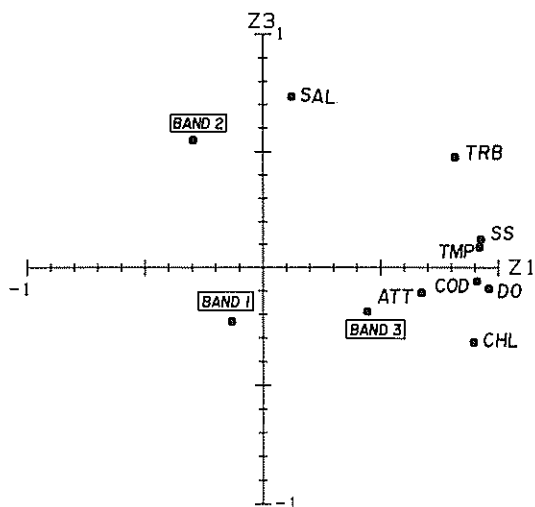


図-23 因子負荷量分布  
(標準化 T M と水質項目による)

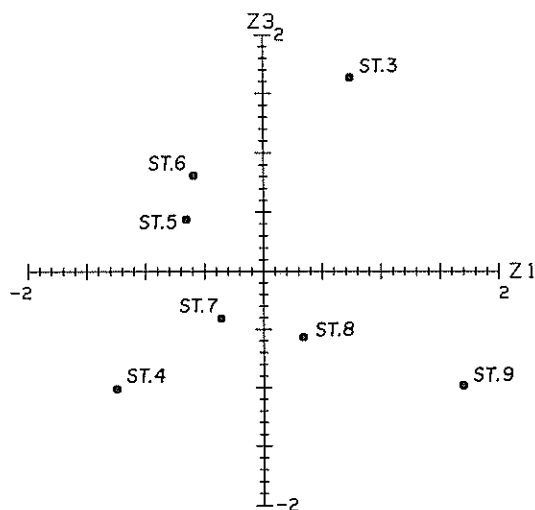


図-24 規格化した因子得点図  
(標準化 T M と水質項目による)

分と第3主成分の寄与の大きさが逆転したが、MSSの場合(図-18)と比較してもほとんど同じ傾向を持つことがわかる。

ここで、MSSの場合と同様に、標準化したTM各帯域間の比演算を試みる。結果を表-19に準じて表-26に示す。クロロフィル-aは0.8を超える正の高い相関が得られているが、MSSの場合と同様、反射帯・吸収帯の関係が逆であることから、ここではこれ以上の議論はおこなわれない。一方、その他の水質項目では表-24の標準化前の単バンド相関係数と比較して、SSとDOではほぼ同程度である他、すべて値が低下する傾向がみら

表-26 標準化 T M の帯域間比演算と水質項目の相関

水質項目	最も相関の高い組み合わせ	
	バンドA / バンドB	相関係数
クロロフィル-a	3 / 2	0.841
消散係数	3 / 2	0.366
水 温	3 / 2	0.415
濁 度	3 / 2	0.154
S S	3 / 2	0.532
D O	3 / 2	0.558
C O D	3 / 2	0.397
塩 分	1 / 3	0.275

れる。特に濁度ではほとんど相関がなくなっているのがわかる。こうした傾向は、今回測定した水質項目が、クロロフィル-a、およびSSなど一部の項目を除いて、分光輝度特性の変化としては検出しにくい項目が多かったことによる。

以上のとおり、標準化したTMデータにより、水質と分光輝度との関係を検討した結果は、総じて航空機観測結果と同様の傾向を持つことがわかった。クロロフィル-aの反射・吸収帯域の逆転、SSが若干であるが、長波長側で正の相関をもつことなどである。一方、濁度に関しては、ここで用いた可視域3波長に対してほとんど相関はなくなっている。

(3) 帯域平均輝度レベルと水質との相関・主成分分析  
バンド1からバンド3までの帯域の各測点毎の平均値について検討する。

はじめに、水質項目との相関を表-27に示す。航空機MSSデータの場合(表-20)と比較して、水温との高い相関は共通の傾向であるが、一方、濁度との相関も増大しているのがわかる。この点は、主成分分析の結果にも現われている。表-28に寄与率、図-25に第1、第2主成分の因子負荷量分布を示す。図-25で、帯域平均値と濁度は極めて関係が強いことが伺える。

このようなMSSデータとTMデータの微妙な相違の原因には断定的なものはなく、今回の唯一回の観測資料のみから判断するのは不可能であるが、測点間に生じる平均輝度レベルの相違の原因構成が、航空機と人工衛

表-27 TMの帯域平均値と水質項目の相関

	クロロフィル ルー a	消散係数	水温	濁度	SS	DO	COD	塩分
平均	0.465	0.495	0.840	0.829	0.705	0.643	0.704	0.452

表-28 主成分の固有値寄与率 (TM 帯域平均値と水質項目)

主成分	1	2
固有値	6.14	1.41
寄与率 (%)	68.2	15.7
累積寄与率 (%)	68.2	83.9

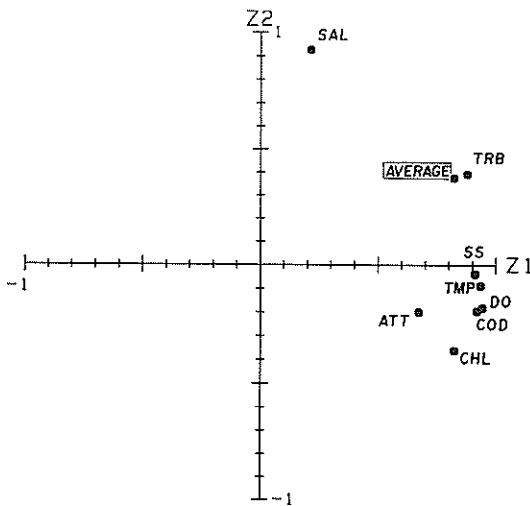


図-25 因子負荷量分布 (TM 帯域平均値と水質項目による)

表-29 MSSとTMの帯域相互の相関

バンド	TM						
	1	2	3	5	6	7	
M S S	2	0.937	0.924	0.897	0.817	0.625	0.823
	3	0.826	0.771	0.778	0.731	0.719	0.785
	4	0.878	0.895	0.873	0.743	0.618	0.775
	5	0.883	0.888	0.841	0.675	0.511	0.698
	6	0.828	0.848	0.834	0.656	0.591	0.714
	7	0.787	0.803	0.816	0.677	0.690	0.753
	8	0.779	0.811	0.830	0.747	0.766	0.814
	9	0.697	0.718	0.776	0.683	0.808	0.786
	10	0.683	0.685	0.757	0.776	0.914	0.863
	16	0.923	0.765	0.701	0.708	0.352	0.642
	17	0.628	0.661	0.724	0.689	0.894	0.789

可視帯域について標準化した MSS と TM のデータによる相関行列を表-30 に示す。標準化により色相の情報が増幅されたと考えられる。そのため、帯域間の相関の違いは明確化されている。短波長の TM 1 バンドと MSS 3 バンドは明らかに高い相関を示している。また、TM 2 バンド、3 バンドについては 1 バンド程明確ではないが対応する帯域の相関の高さは現われている。

同様に、標準化した帯域データについて主成分の寄与率ならびに因子負荷量を表-31 に、また、主成分に対する因子負荷量を図-26 に示す。第 1 主成分には緑色帯域の強さ、第 2 主成分に青帯域の強さが示されている。TM 1 バンドと MSS 3 バンドはよく対応している。TM 2 バンドは黄緑～黄帯域であるが若干赤色側へ寄り、逆に TM 3 バンドは黄色側へ寄る傾向が伺える。

最後に因子得点を用いて測点毎の色調の相違を概観してみる。図-27 に第 1、第 2 主成分についてスコアを示す。ここでは可視帯域の色調だけを情報として地点分類をおこなうことになるが、これと直接結びつく水質情報として色名が挙げられる。既に述べたように、標準化演算で得られる分光特性から、実際に現場で視認される色を直ちに予測するのは不可能であり、色名も太陽高度や見る角度に加えて個人差もあるため、比較は困難であ

星で若干異なることに加えて、観測時間が数十分のオーダーではあるが異なることなどが要因として掲げられよう。

(4) 航空機 MSS と人工衛星 TM との関係

以上のように、人工衛星データの水質情報としての特性は、大局的な傾向は航空機による観測データと一致しているが、細部で若干異なる部分がある。そこで、MSS データと TM データ相互の相関関係を検討してみる。

表-29 に標準化する前の原データについて相関行列を示す。点線で囲んだ部分が概ね対応する波長帯域を示している。本表からは対応する帯域で明確に相関が高いと断定できないが、中間赤外帯域の TM 7 バンドと MSS 16 バンドを除くと、概ね相関は高くなる傾向が見られ

表-30 標準化した MSS と TM の帯域相互の相関

バンド	T M			
	1	2	3	
M S S	3	0.827	-0.699	-0.558
	4	-0.160	0.503	-0.227
	5	0.099	0.417	-0.524
	6	-0.296	0.471	-0.001
	7	-0.405	0.039	0.551
	8	-0.377	0.018	0.530
	9	-0.183	-0.360	0.593

表-31 主成分の固有値・寄与率と因子負荷量  
(標準化した MSS と TM による)

主成分		1	2	3	
固有値		4.38	3.52	1.57	
寄与率(%)		43.8	35.2	15.7	
累積寄与率(%)		43.8	79.0	94.7	
因子負荷量	MSS バンド	3	-0.242	0.954	-0.103
		4	0.846	-0.080	-0.468
		5	0.999	-0.001	0.013
		6	0.635	-0.575	0.515
		7	-0.444	-0.616	0.619
		8	-0.769	-0.095	-0.621
		9	-0.905	-0.149	0.121
	TM バンド	1	0.095	0.932	0.348
		2	0.437	-0.688	-0.386
		3	-0.537	-0.721	-0.150

るが、図-27 で測点 8 および 9 は赤色側に相関が高く、これは表-6 で示される色名との対応は良い。また、7 測点のうち最も濁りの少なかった測点 4 では青色帯域との相関が良く、これは水粒子による短波長帯の散乱が卓越していることに対応する。一方、湾外の測点 3 では既に示したように緑色ないし黄が卓越し、濁質粒子による散乱が若干長波長側へ影響したものと推測されるが、色名では dark brown となっている。また、湾口部の測点 4, 5, 6 は複雑に変化しているのがわかる。

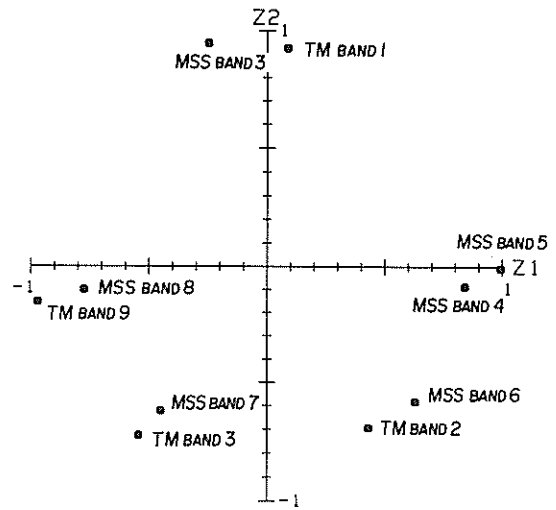


図-26 因子負荷量分布  
(標準化した MSS と TM による)

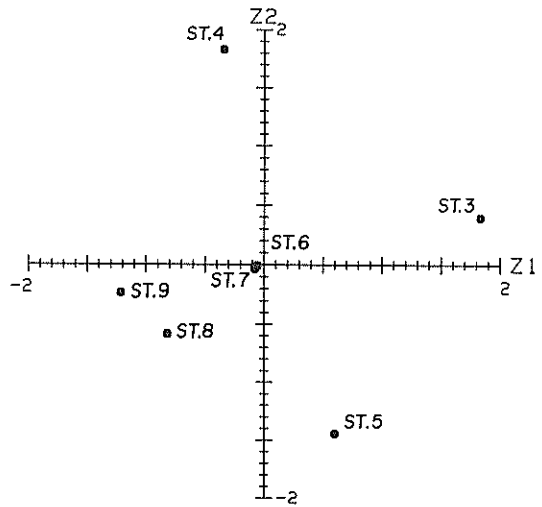


図-27 規格化した因子得点図  
(標準化した MSS と TM による)

以上、人工衛星と航空機の比較では、細部の傾向は諸観測条件の相違で異なるものの、概略の水質項目との関係は一致している。人工衛星の高高度では短波長帯域の観測で大気の影響が大きく、水質情報として適用困難な部分も少なくないが、一方で航空機観測に比べて、画角方向の輝度変化や観測所要時間などの点で有利な面もあることに注意する必要がある。

4.3 水質分布の推定と東京湾の水質環境について  
前節までの検討でリモートセンシングデータと水質項目との関係がかなり明確化され、いくつかの水質項目についてはリモートセンシング観測データとの相関が存在

することがわかった。しかし、クロロフィル-a量については、クロロフィル本来の分光特性とは異なる結果が得られている。

本解析で用いた統計的手法では、一切の物理的因果関係を導入していないが、たとえ得られた結果が高い相関を持つ場合でもそれが物理的に不合理な結果であるなら、それから水質分布の推定をおこなうのは妥当ではない。しかしながら、一方で、シートルースが分布推定の対象とする領域の水質を十分代表していると考えられる場合で、推定値が統計的に有意なものと判断されれば、水質分布の推定をおこなうのは合目的であるとも言える。事実、そうした方法でクロロフィル量を推定した応用例もいくつか挙げられる<sup>6)</sup>。

本調査の結果から水質分布の推定をおこなう場合、シートルース点が対象領域の大きさに対してかなり少なく、加えて湾口部周辺の複雑な物質流動に支配される点を考慮すると、十分な物理的根拠に欠けるものについては、水質分布の推定をおこなうのは適当でないと判断した。

本節では、4.1ならびに4.2での検討結果を踏まえ、特に高い相関が得られ、かつ物理的根拠も明確な水質項目として水温と濁度を選び、水質分布の推定を試みた。さらに、推定結果をもとに人工衛星データを用いて東京湾奥の水質環境の特徴について若干の検討を行なった。

#### (1) 濁度分布の推定と考察

はじめに人工衛星 TM データのうち、特に相関の高い1バンドと濁度の関係を用いて、東京湾全体を対象とした濁度分布の推定を試みた。シートルースが湾口周辺にしかなく、結果的に得られた濁度分布から、湾全体のうち湾口周辺の濁度の値は十数 ppm で、必ずしも高くないため、湾奥の特に濁度の高い場所では、シートルース値から外挿して推定することになる。したがって、結果の運用には注意が必要である。

1バンドとの最小自乗回帰結果から作成した濁度分布を図-28に示す。この分布作成にあたっては、一切の平滑化処理はおこなっていない。

本観測時は台風が関東地方南岸を通過し、関東平野、南部山間部で相当の降雨があったことから、東京湾北部の荒川、江戸川、西岸の多摩川からかなりの放流量が存在する。分布図で、荒川、江戸川、多摩川など大川からの濁水流出が顕著に示されている。観測時には、湾口からの流出が顕著であるが、それに伴って湾西岸に沿って河川汚濁水の流下が観察される。一方、湾外でも富津岬南側の千葉県東岸からの濁水の流出がみられる。流量はあまり大きくないようであるが、画像から読取でき

る濁度は数十 ppm の値で決して低いとは言えない。

一方、航空機 MSS データでは、短波長側の2バンド4、5バンドで相関が0.7以上である。ここでは若干相関係数は小さめとなるが、TM 1バンドと帯域的にも対応のつく4バンドを用いて分布図を作成すると図-29のようになる。航空機では湾全体を対象とする大域的な観測には時間がかかり不向きであるが、沿岸域、河口域など局限された区域の微細構造を把握する目的にかなう。図-29からも、千葉沿岸域からの濁水の流出構造がよく観察される。しかし、TM による分布図との対応づけは、分解能の問題もあり、あまり明確にできない。

#### (2) 水温分布の推定と考察

つぎに熱赤外帯域を用いた水温分布の推定を試みる。2.で述べたとおり、通常リモートセンシングで検出できる水表面の熱分布は、赤外帯の水層への吸収が大きいため、情報は表面のごく上層に限られ表皮水温と呼ばれる。本観測時のように夏期の太陽放射の強い時期には表面加熱が強く、しかも熟成層により鉛直混合が抑制されるため、取得されたデータのもつ意味の解釈にあたり注意が必要である。

人工衛星 TM データによる水温分布図を図-30に示す。ここでは比較的周期の長いノイズを除去するため15×15画素の移動平均平滑化をおこなっている。湾口周辺については、湾内で高、湾外で低の傾向がみられ、湾口で湾内から流出する様子がよく現われている。とくに富津岬、および観音崎の湾外側の陰で低温水がみられ、半島背後に生じる渦の影響が推測される。一方、湾中部から湾奥部では逆に湾奥に向かって水温が低下する傾向があり、とくに船橋沖の江戸川右岸側から荒川河口左岸側にかけて低温水が存在するのがよくわかる。湾奥部でこのような低温水塊が存在することについて、原因としては、低温河川水の影響、河川水の表面流れによる熱拡散による影響、河口周辺であることから河口流出による乱れ(渦塊)の存在による混合促進の影響、湧昇流の影響などが考えられるが、本検討の範囲では詳細は不明である。この点に関しては、(3)で水温分布と濁度分布をもとに若干検討を加える。

一方、航空機 MSS による観測結果からは、図-31のように湾口周辺の熱流動の様子がよくわかる。湾口の高壁による後流渦、富津岬の背後の流れが現われている。とくに、富津岬南側に設置された潜堤状構造物の内外部の水温差が明確になるなど、人工衛星のレベルでは明確にならない詳細構造が明らかとなっている。温度分布のパターンは人工衛星 TM データと細部では異なるが、全体として湾口周辺の流出パターンをよく示していると

LANDSAT TM バンド1 (450~520nm) による濁度分布



図-28 TMによる東京湾濁度分布(1986年8月6日)



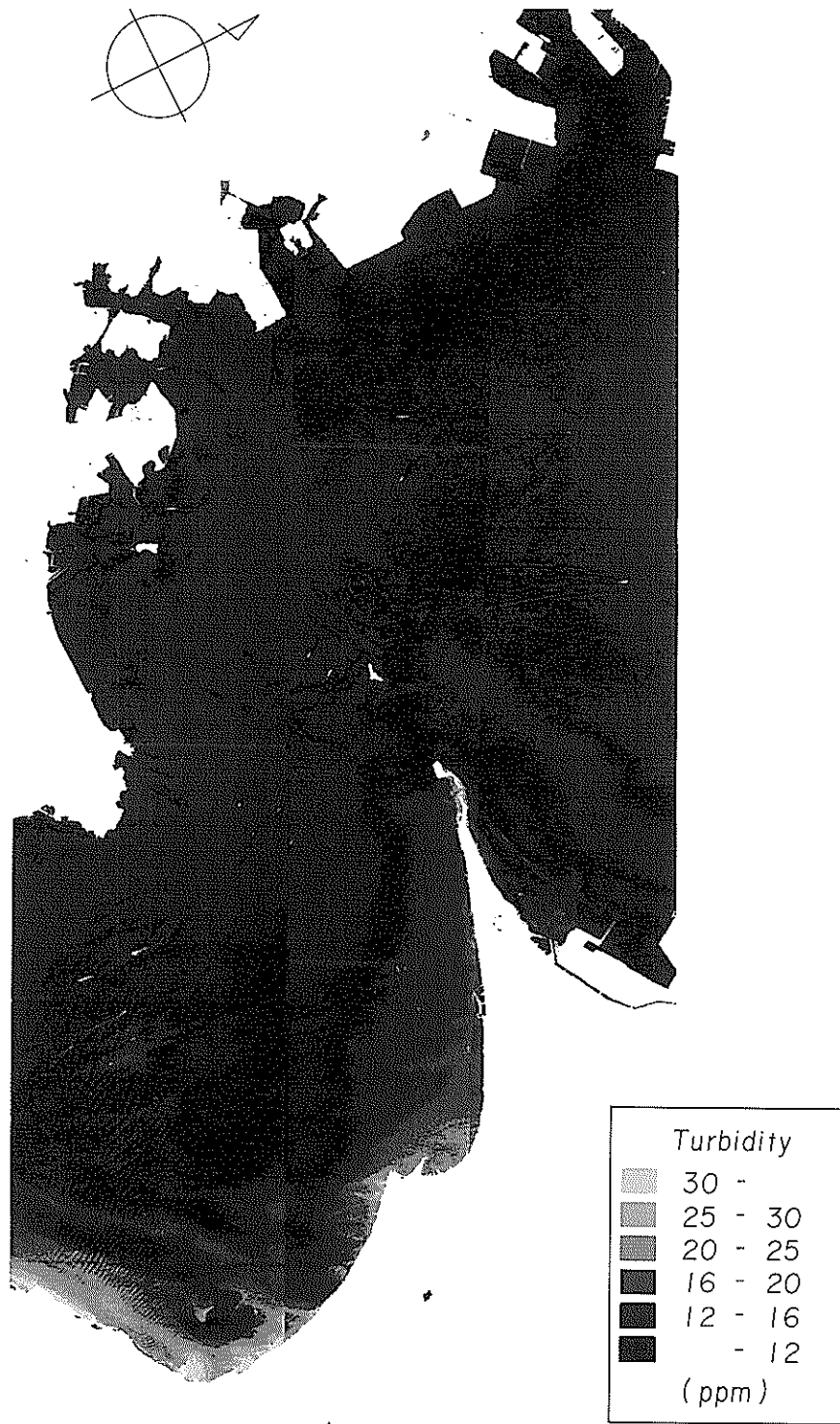


図-29 MSSによる東京湾口周辺濁度分布(1986年8月6日)

LANDSAT TM バンド6 (熱赤外) による水温分布

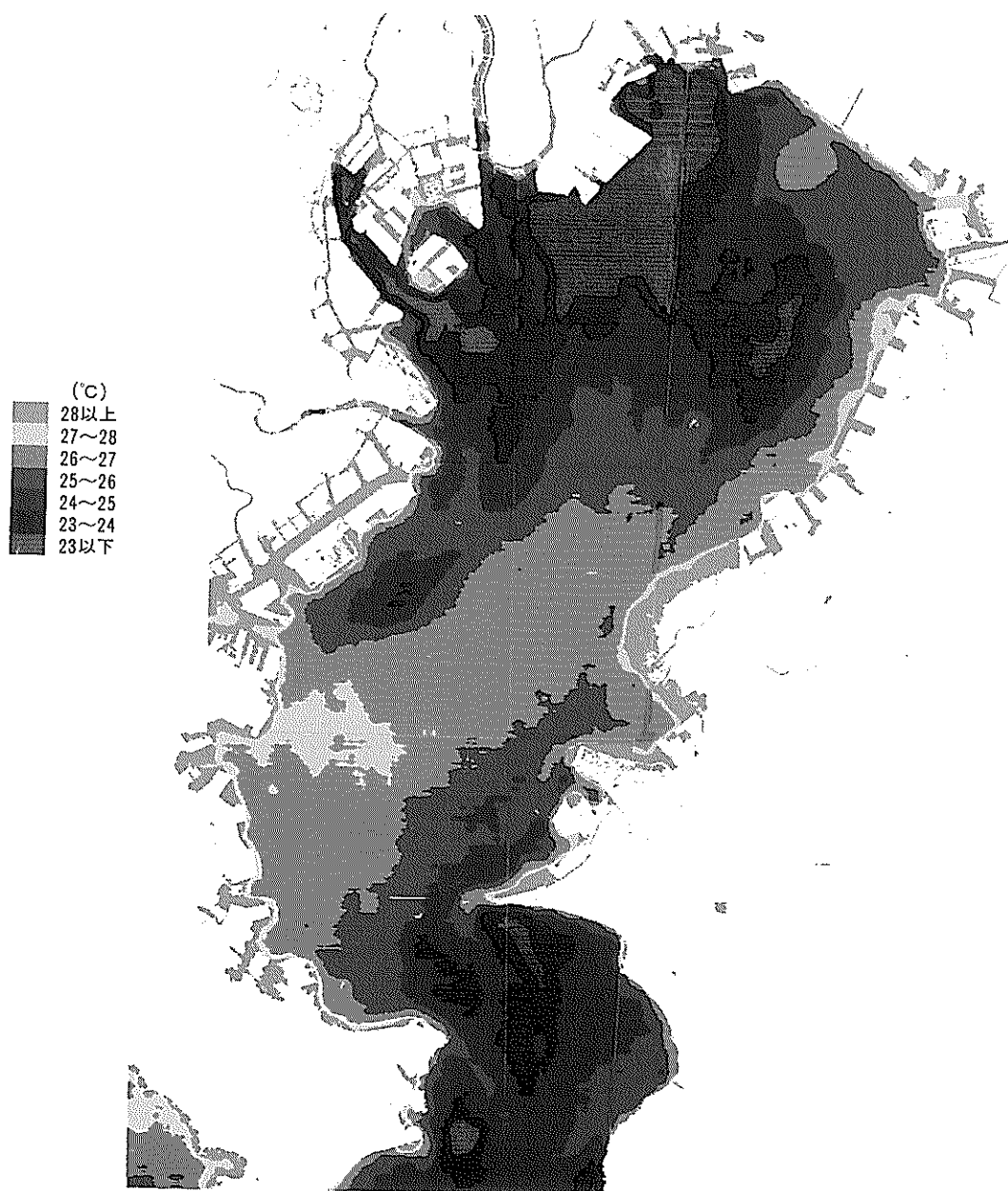


図-30 TMによる東京湾水温分布(1986年8月6日)

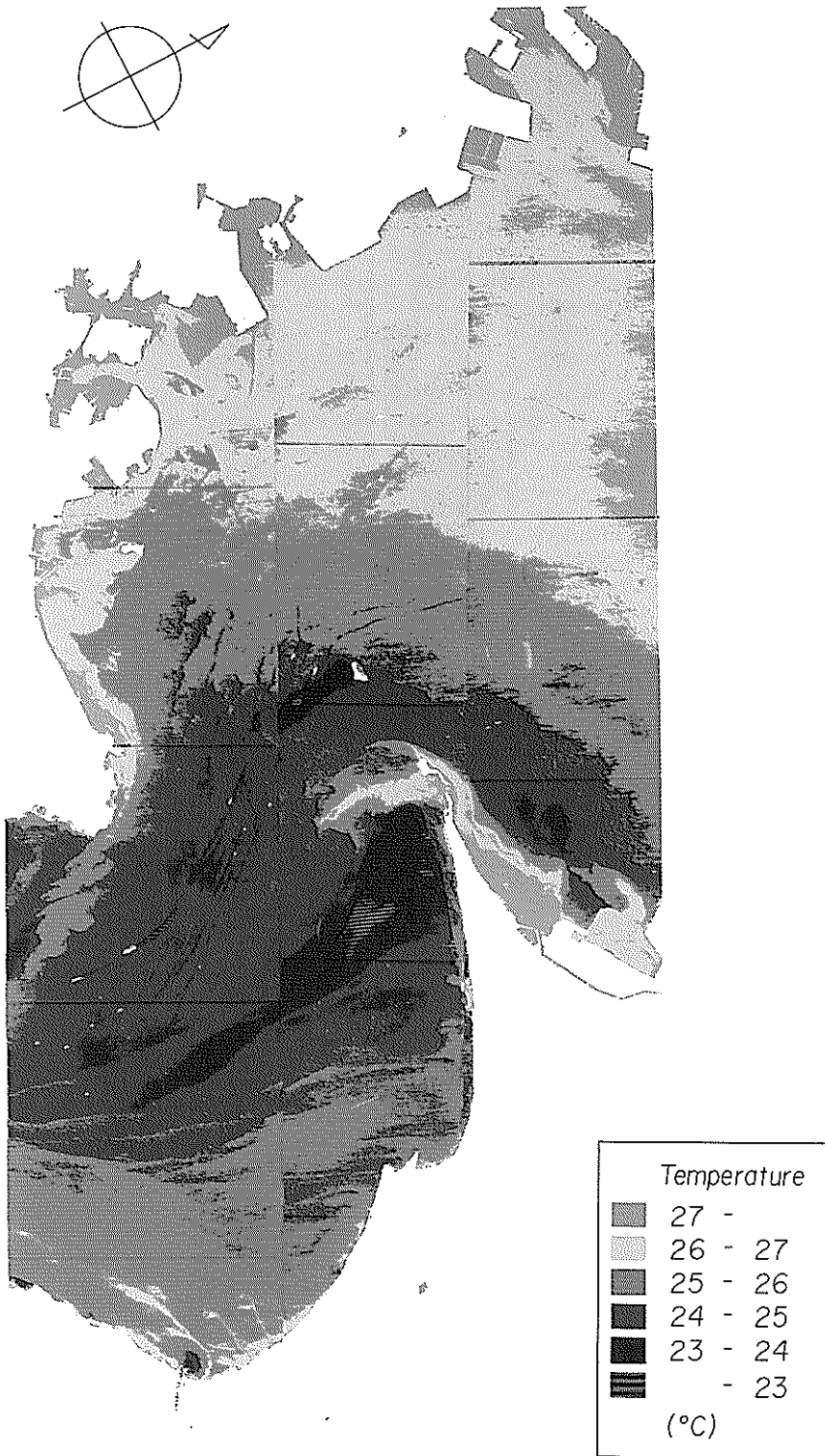


図-31 MSSによる東京湾口周辺水温分布(1986年8月6日)

言える。

### (3) 東京湾奥の水温・濁度分布の検討

以上、東京湾口付近で実施したシートルースを用いて人工衛星 TM、航空機 MSS との回帰結果をもとに水温および濁度の分布推定を試みた。本項では人工衛星データから推定した東京湾全域の水温・濁度分布をもとに、今回の観測ではシートルースのない湾奥部の水質に関して若干の検討を試みた。シートルースが湾口周辺に局限されているため、湾全域に対する水温や濁度の分布図の信頼性に問題があること、水温・濁度以外に水質を判断する資料が欠除していることなど、議論すべき点が多いが、ここでは水温・濁度分布図が十分信頼できるものと仮定して議論を進める。

ここで対象とする領域は湾奥部千葉港沖の図-32に示す、幅約600m、長さ約10kmにわたる南北の帯状区域である。この領域を南北方向に18分割し、各分割区域(21×21画素に対応する)を北から南へ測点1～測点18と呼ぶこととする。

これら18測点を TM データより切り出し、各測点領域の平均値について議論する。はじめに奇数番号の測点について輝度の波長毎の変化を1バンドから3バンドの可視域について示したのが図-33である。この帯状領域は、南北両端で比較的輝度レベルが小さく、中央付近で高くなるのがわかる。また、両端では右上市り、すなわち長波長側でエネルギーが高いのに対し、中央部では右下がりで短波長側へエネルギーが片寄る傾向がみられる。

1バンドは濁度を表わすから、中央部で濁度が高く、両端で低いと判断される。

つぎに、湾奥部を対象に標準化した可視帯域(1～3バンド)ともとの各帯域間の相関行列を表-32の下半分に示す。ここでは、水温(6バンド)と濁度(1バンド)の高い負の相関が顕著で、可視帯域の2,3バンドとも負の相関を持つことから、濁度(濁り)の高いところで水温が低くなる傾向が明らかである。標準化した可視域と熱赤外帯域との相関を表-32より検討すると、水温との対応では、水温が高いと2,3バンドの長波長側でエネルギーの割合が大きくなるのがわかる。

一方、湾口部についても同様に、1バンドから7バンドまでの相関行列を表-32の上半分に示す。ここでは逆に水温と濁度は正の相関を示し、湾口部と湾奥部の水質構造の相違が伺われる。標準化した可視帯域と熱バンドとの相関では、明確な傾向の相違は見られないが、湾奥部に較べて赤色側の正の相関が相対的に強いようである。

以上の結果を主成分分析で検討してみると図-34、図-35となる。標準化した可視帯域ともとの全帯域について第1,第2主成分に対する因子負荷量の分布を示したものである。また、表-33,34に分散1以上の主成分の寄与率を示す。この中で、湾奥部(図-34)、湾口部(図-35)とも、第1主成分としては濁度(1バンド)をはじめとして濁りを示す成分が現われているが、第2主成分は異なるようである。そこで比較を容易にす

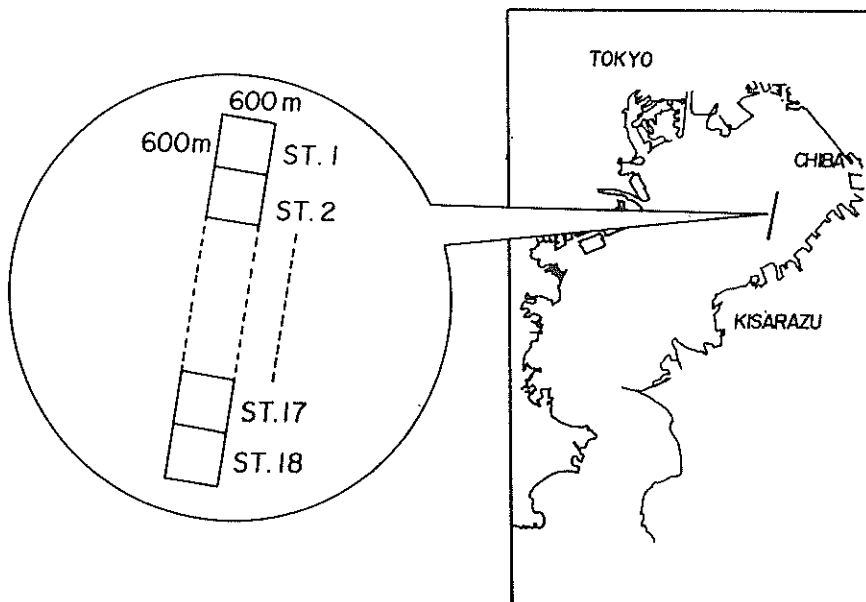


図-32 東京湾奥における TM データサンプリング範囲

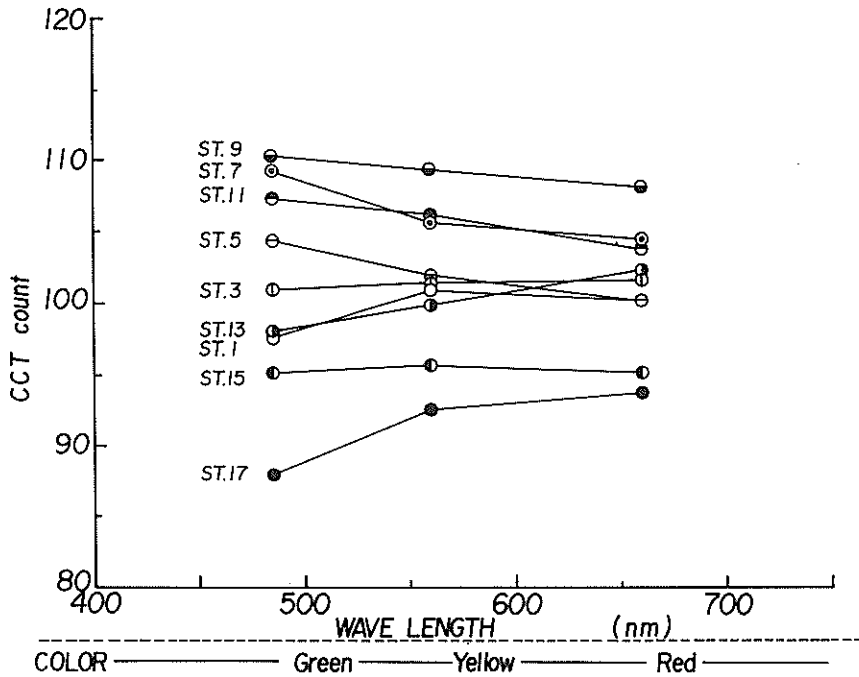


図-33 東京湾奥における TM 可視帯域の輝度レベル分布

表-32 TM 各帯域間の相関 (上三角: 湾口部 下三角: 湾奥部)

		標準化 TM バンド			TM バンド					
		1	2	3	1	2	3	5	7	6
T M 標準 バンド	1	*	-0.730	-0.781	-0.100	-0.465	-0.480	-0.305	-0.330	-0.272
	2	-0.420	*	0.142	0.034	0.385	0.223	0.003	-0.057	-0.186
	3	-0.880	-0.061	*	0.113	0.321	0.491	0.438	0.529	0.564
T M バンド	1	0.760	-0.581	-0.531	*	0.919	0.910	0.847	0.822	0.520
	2	0.588	-0.461	-0.405	0.965	*	0.968	0.836	0.808	0.502
	3	0.369	-0.640	-0.071	0.877	0.931	*	0.901	0.903	0.637
	5	-0.064	-0.452	0.307	0.231	0.252	0.419	*	0.979	0.770
	7	-0.289	-0.386	0.520	-0.061	-0.046	0.181	0.882	*	0.863
	6	-0.730	0.482	0.550	-0.841	-0.786	-0.683	0.072	0.352	*

上三角: 湾口部 下三角: 湾奥部

るため、ここでは第1主成分に対する因子負荷量に限って検討してみると、湾奥部では濁度(1バンド)と水温(6バンド)が逆相関を持ち、湾口部ではその逆になることは相関分析結果を裏付けている。一方、標準化した可視帯域1バンドから3バンドについては、湾奥部では短波長の1バンドが濁り成分との関係が深いのに対して、

湾口部ではむしろ長波長の赤色側に正の相関がある。

以上のことから、湾奥では河川から流出濁水の影響とおもわれる濁りならびに水温変化が観測されているのに対し、湾口部のデータは、湾内から湾外への水温低下、濁り低下を反映した結果であると解釈できる。しかしながら、可視帯域の分光特性と濁り、水温などとの関係の

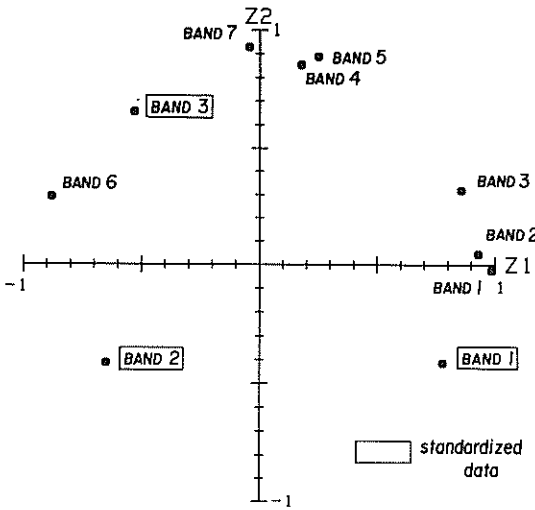


図-34 因子負荷量分布 (標準化 TM と標準化前 TM 各帯域による・湾奥部)

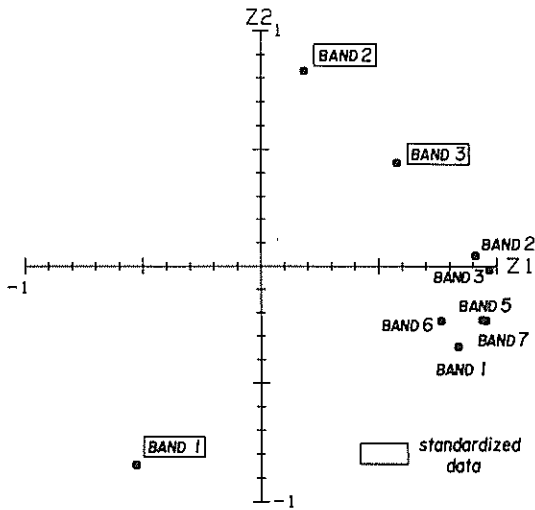


図-35 因子負荷量分布 (標準化 TM と標準化前 TM 各帯域による・湾口部)

表-33 主成分の固有値と寄与率 (標準化 TM と標準化前 TM 各帯域による・湾奥部)

主成分	1	2
固有値	4.77	3.37
寄与率(%)	47.7	33.7
累積寄与率(%)	47.7	81.4

表-34 主成分の固有値・寄与率と因子負荷量 (標準化 TM と標準化前 TM による・湾口部)

主成分		1	2	3	
固有値		5.56	1.88	1.21	
寄与率(%)		61.8	20.9	13.4	
累積寄与率(%)		61.8	82.7	96.1	
因子負荷量	標準化 TM	1	-0.524	-0.839	-0.148
		2	0.191	0.836	-0.462
		3	0.584	0.450	0.636
	TMバンド	1	0.843	-0.340	-0.395
		2	0.916	0.051	-0.391
		3	0.975	-0.009	0.166
		5	0.945	-0.227	-0.005
		7	0.960	-0.229	0.134
		6	0.770	-0.231	0.465

変化は、溶存物質や懸濁物の粒径、組成などと複雑に関連するため、本データのみからは解釈が困難である。

## 5. あとがき

以上、東京湾を対象としたリモートセンシングの水質観測への適用結果について述べた。人工衛星 LANDSAT-5号搭載の TM, および航空機搭載 MSS を用いて湾口周辺におけるシートルースとの同期観測を実施し、相関分析・主成分分析などの統計的手法による検討を加えた。主要な結果を要約すると次のとおりである。

(1) 濁度については、総じて単バンドの短波長側で若干相関が高くなるが、測点毎の帯域平均輝度レベルの変化とも相関が高く現れた。一方、各波長毎の分光輝度特性を強調する標準化演算結果とは相関が高くない。このことは濁度という項目自体が特定の帯域の分光輝度の変化としてはとらえにくい項目であることを伺わせる。この点を考慮し、ここでは、人工衛星データ、航空機データとの単バンド回帰式を用いて濁度分布の推定をおこなった。また、水温も熱赤外帯域と良い相関を示した。水温分布・濁度分布から東京湾口の流動パターン、ならびに湾全域の熱分布状況、流動状況、河川汚濁水の拡散状況を把握することができた。

(2) SS については分布推定には至らないものの、標準化演算結果などから定性的な分光特性は長波長側で正の

相関を持つなど、従来の知見と一致した傾向を示した。しかし、植物プランクトン量の目安となり、赤潮発生の指標となると言われるクロロフィル-a量に関しては、クロロフィル-aのもつ分光特性に相反する相関特性が得られ、クロロフィル-aを検出することはできなかった。原因としては、河川汚濁水が大量に湾内へ流出していたことなどが考えられるが、今回の観測項目のみからはこの点の検討は不可能である。このように、微妙な分光特性の変化から物質を定量することを目的とする場合、クロロフィル-a以外の溶存、懸濁物質も含めた吸収・散乱の影響を十分把握する必要がある。そのための光学的性質の測定・観測を現場試水ならびに室内実験で実施することが現段階では望まれるところである。

(3) 人工衛星によるリモートセンシングでは、大気の影響による攪乱が大きい、画角方向のパラディアンズの差異による影響が小さいことや、走査所要時間が短いこと、データも容易かつ安価に入手できることなど、航空機による低空観測より有利な点も少なくない。本観測でも航空機観測結果との良い対応が得られ、人工衛星による水質観測が十分可能であることがわかった。今後、国産の海洋観測衛星の開発とともに、その応用分野はますます拡大することと思われる。

今後、可視帯域のリモートセンシングを各種調査に利用していくとする場合、極めて天候に左右され易いという基本的弱点について検討しておく必要がある。とりわけ数日間隔でしか同一地点の観測が行えない人工衛星では、観測の取得率が重要な問題である。表-35にLANDSAT-5号によるTMのデータ取得状況を示した。東京湾を含む観測領域は、湾口を境界に南北に分かれており、表では1984年4月26日から1988年1月16日までの全71回の観測のうち、東京湾の海域部分にほとんど雲がなく、ほぼ見通せると判断されたものを示した。全体で31~35%の取得率で、季節毎では夏期が良く秋はあまり良くないのがわかる。LANDSATの場合、回帰日数が16日であるから、平均的に3カ月に2度は利用可能なデータが取得できることになる。したがって、季節的な水質変動を把握する目的には十分応用できると言える。

今回は唯一回の観測データをもとに検討したが、今後赤潮調査や濁り調査に関しては、植物プランクトンが増殖し易いと言われる春から夏にかけて人工衛星飛来に同期したシートルースを取得し、データの蓄積をはかる必要がある。また航空機による観測も、範囲が比較的小さい場合、工事に伴う濁り拡散の把握などの分野で有効に利用されていくであろう。

表-35 LANDSAT-5号 データ取得状況統計

	月 日	取得回数	観測回数	取得率
湾内	12月~2月	4	14	29%
	3月~5月	5	16	31%
	6月~8月	8	21	38%
	9月~11月	5	20	25%
計		22	71	31%
湾外	12月~2月	5	14	36%
	3月~5月	6	16	38%
	6月~8月	8	21	38%
	9月~11月	6	20	30%
計		25	71	35%

湾内：図-13の北側領域

湾外：図-13の南側領域

リモートセンシングは天候に左右されやすく、苦労して観測計画を立てても当日天候不順で中止の止むなきに至ることしばしばで、シートルース取得のため待機して頂いた京浜港工事事務所横須賀工場の皆さん、とりわけ調査船「はまゆう」の乗組員の方々に心からおおびと御礼を申し上げる次第です。また直管シートルースに御協力頂いた当所海洋水理部海水浄化研究室の職員の方々、ならびに、細川恭史高潮津波研究室長に御礼申し上げます。

なお、本資料で使用したLANDSAT-5号のデータは宇宙開発事業団地球観測センター提供のものである。

(1988年3月31日 受付)

#### 参考文献

- 金子大二郎・高橋智晴：リモートセンシング（MSS調査法）とその大阪湾海水交換調査への応用，港湾技研資料，No.331，1980.，43p.
- 杉森康広・夏目巨夫・木暮 睦・松村皁月：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，1985年，p.p.39~77.
- Ramsey：Study of Remote Sensing of Ocean Colour，Final Report of Contract NASA 1658，1968.
- Gordon H.R.，A.Y. Morel：Remote Sensing Assessment of Ocean Color for Interpretation of Satellite Visible Imagery，Springer-Verlag，Tokyo，pp. 114，1983.

- 5) たとえば, 福島 甫・山口好信: 宮城・福島沖における海色リモートセンシング実験, 航水研ノート, 空と海, 第8号, 1986年, p.p.65~79.
- 6) 中日本航空資料(私信)
- 7) 安樂正照・宇野史郎: 赤潮の予察技術の研究, 昭和56年度海洋遠隔探査(海洋リモートセンシング)技術の研究, 研究成果集, 科学技術庁研究調整局宇宙開発課, 昭和57年10月, p.p.81~123.
- 8) 高橋智晴・橋本典明・佐々木 弘・広瀬宗一・菅原一晃: 大阪湾での海洋リモートセンシングの適用について, 港湾技研資料, No. 468, 1983., 63p.
- 9) 宇多高明・村井禎美・竹淵 勉: 沿岸海域調査への衛星リモセン利用の現状と課題, 土木技術資料, 30巻, 1号, 1988, p.p.2~7.
- 10) 西村 司・畠山祐二・杉村俊郎・田中總太郎: 黒潮研究への渦運動論的アプローチ—衛星リモートセンシングの効用—, 日本リモートセンシング学会誌, Vol. 6, No.3, 1986.
- 11) 大林成行・高橋康夫・小沢 洋・宮本直樹: 熱赤外データを用いた琵琶湖湖流の抽出に関する研究, 日本リモートセンシング学会, 第6回学術講演会論文集, 1986年12月.
- 12) 橋本 宏・宇多高明・新行内利隆: 沿岸水理・地形に関する研究(その2)—自然海岸域における研究—, 昭和56年度海洋遠隔探査(海洋リモートセンシング)技術の研究, 研究成果集, 科学技術庁研究調整局宇宙開発課, 昭和57年9月, p.p.161~182.
- 13) Emery, W.J., A.C. Thomas and M.J. Collins: An Objective Method for Computing Advective Surface Velocities From Sequential Infrared Satellite Images, *J. G. R.*, Vol.91, 1986.
- 14) 村上和男・堀江 毅・森川雅行・三好英一・白井正生・加藤道康・佐藤英治: 東京湾口における水質汚染実態調査—その2—, 港湾技研資料, No.507, 1984., 96p.
- 15) 中日本航空 K. K.: 航空機 MSS によるリモートセンシング調査報告書, 昭和61年8月.
- 16) 橋本典明・高橋智晴: 多量データを対象とする等値線自動描画アルゴリズムの開発, 港湾技術研究所報告, 第22巻, 第2号, 1983年6月, pp.89~125.
- 17) Carder, K.L., R.G. Steward, J.H. Paul, and G.A. Vargo: Relationships between chlorophyll and ocean color constituents as they affect remote-sensing reflectance models, *Limnol. Oceanogr.*, Vol.31, No.2, 1986, pp.403~413.
- 18) Peláez, Jasé and J.A. McGowan: Phytoplankton pigment patterns in the California Current as determined by satellite, *Limnol. Oceanogr.*, Vol.31, No.5, 1986, pp.927~950.
- 19) 海上保安庁水路部編: 潮汐表, 昭和61年.
- 20) 村上和男・森川雅行・和泉田芳和・佐藤英治・堀江 毅・細川恭史・三好英一・加藤道康: 東京湾口における水質汚染実態調査—その1—, 港湾技研資料, No. 455, 1983, 73p.
- 21) 松村卓月: 水色リモートセンシングによる水型解析, 航水研ノート, 空と海, 第7号, 1985, p.p.23~38.



港湾技研資料 No. 626

1988・6

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所  
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 株式会社 つばさ印刷技研

Published by the Port and Harbour Research Institute  
Nagase, Yokosuka, Japan.