

港湾技研資料

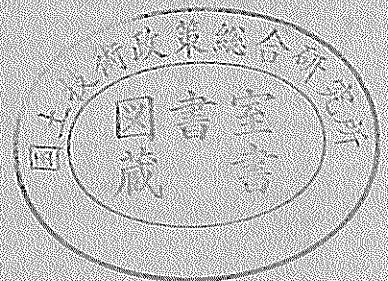
TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 468 Sept. 1983

大阪湾での海洋リモートセンシングの適用について

高	橋	智	晴
橋	本	典	明
佐	々	木	弘
広	瀬	宗	一
菅	原	一	晃

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のシートルース	4
2.1 現地観測の概要	4
2.2 曳航式水質測定機の試作	6
3. 航空機MSSによる大阪湾現地調査	13
3.1 MSS測定に関する基礎調査	13
3.2 MSSおよび現地観測による大阪湾海峽部の海水交換	16
3.3 大阪湾奥部における水質環境	30
3.4 多変量解析法によるMSSデータと水質データの相互関係について	36
4. LANDSAT・MSSによる大阪湾水質環境把握の試行	43
4.1 解析方法	43
4.2 解析結果および考察	46
5. 今後の課題	52
6. あとがき	61
参考文献	62

Remote Sensing Investigation on Sea Phenomena in Osaka Bay

Tomoharu TAKAHASHI*
Noriaki HASHIMOTO**
Hiroshi SASAKI***
Munekazu HIROSE***
Kazuteru SUGAHARA**

Synopsis

For the purpose of the application of the Remote Sensing technique to wide observation of sea phenomena, we tried the experimental observations in Osaka Bay by using MSS (multi-spectral scanner) loaded on the airplane. Observations with MSS in Osaka Bay had been carried out five times for five years (1977–1981), and then some significant findings have been obtained as a result of the above-mentioned investigations.

In this note, these results are presented, and the data processing method and the problems for the application of Remote Sensing to wide observation of sea phenomena are discussed. The main results are summarized as follows;

- (1) In order to be able to carry out sea truth observations more efficiently and rapidly, we have developed the towing type instruments for water observation and applied it to field observations.
- (2) The sea water exchange through Tomogashima Channel are discussed based on the data with sea truth observations, which were obtained simultaneously with MSS measurements. As a result, the image of the water exchange are clarified.
- (3) We applied MSS in the inner part of Osaka Bay. And the methods and the problems for grasping the water environment in this area are discussed.
- (4) We applied the multivariate analysis to the data obtained from the MSS and the sea truth observation, and had a clue of making a quantitative analysis of MSS data.
- (5) In order to examine the applicability of LANDSAT data for grasping the water environment, we analyzed nine cases of LANDSAT data in Osaka Bay. From the results analyzed, it is confirmed that LANDSAT data are useful for investigation of large scale sea phenomena.

* Ex-Chief of the Coastal Observation Laboratory, Hydraulic Engineering Division.

** Member of the Storm Surge and Tsunami Laboratory, Hydraulic Engineering Division.

*** Senior Research Engineer, Hydraulic Engineering Division.

大阪湾での海洋リモートセンシングの適用について

高橋 智 晴*
橋本 典 明**
佐々木 弘***
広瀬 宗 一****
菅原 一 晃**

要 旨

近年、港湾事業が多様化する中で、特に環境問題が重視されつつある。一方では、港湾関連諸施設の大規模化や大水深化に伴うOffshoreへの進出に伴い、環境調査で対象とすべきスケールも拡大の傾向にあり、このため、広域的かつ迅速な水域環境調査手法の開発が望まれている。ここでは港湾域における水質環境調査手法としてのリモートセンシング技術の導入を目的として、大阪湾をモデルケースとして、航空機MSSによる取得データを中心とするリモートセンシング技術の現地調査への適用を主眼として検討を行った結果を報告するものである。

1) 現段階でのリモートセンシングには不可欠なシートルースを簡便かつ迅速に行うための曳航式水質測定機を開発し、その実用性を確認した。

2) 航空機MSSにより、友ヶ島水道における海水交換パターンを冬季と夏季に別けて測定し、かなり明瞭な海水交換パターンを把握することができた。

3) 大阪湾湾奥海域にMSSを適用し、港湾外かく施設を含む複雑な海域の水理状況について調査を行った。この結果、このような沿岸海域にMSSを適用して水質環境を把握する場合の留意事項等が明らかとなった。

4) シートルースデータおよびMSSデータに多変量解析法を適用することにより、各データ間の対応関係を検討し、今後のMSSの定量的な活用に向けての具体的な指針を得た。

5) LANDSAT・MSSデータを解析することにより、港湾域の水質環境把握のための人工衛星データの有効性を確認した。

1. まえがき

近年、海洋開発に対する関心が著しく高まり、それに伴って種々の沿岸利用計画が推進されている。このため、海上空港、沖合人工島に見られるように、港湾および関連海洋開発諸施設計画も大規模化、大水深化の傾向にあり、港湾事業そのものが沖合で展開されつつある。したがって、これらの事業遂行に伴う事前・事後の環境調査で対象とすべきスケールも大きくなり、調査規模も増大の一途にある。

東京湾、大阪湾等においては、船舶により定期的に湾内の敷地点において水質等の調査が行われている。しかしながら、これら特定点の観測データのみでは広域的な

水質環境を十分に把握することはできず、また、観測点数を増すにしても機材、人員、経費等の面で限界があり、詳細な把握が困難な場合が多い。特に内海湾に位置する沿岸域においては、水質環境の実態を把握するためには、潮流や地形等によって複雑に変化する汚濁物質の分布パターンおよびその変動特性や要因を明らかにする必要がある。広域の海域を瞬時的に観測できるリモートセンシング技術にその期待がよせられている。しかしながら、リモートセンシング技術の海洋分野への適用に関しては、現段階では未解決な問題も多く、上述の水域環境調査への即実用化は困難な状況にある。例えばリモートセンシング技術の実用化を図ろうとするならば、現段階においては、シートルースはリモートセンシングによる測定デ

* 前水工部 海象観測研究室長
** 水工部 高潮津波研究室
*** 水工部 主任研究官（海象測定技術担当）
**** 水工部 主任研究官（波浪情報解析担当）

ータに即して一次的に活用し得るものであるべきである。しかし、従来の環境調査手法による単純なデータの収集を主とする長時間にわたるシートルースでは時間的なずれのため、見かけ上の空間分布しか得られないことが多い¹⁾。この意味ではより経済的・効率的なシートルース手法を開発することが急務である。

また、可視・赤外波長帯を用いたリモートセンシング技術を実際の海洋環境調査に適用する場合には、大気による吸収・散乱、海面における反射、海水による消散等の光学的問題や、画像処理手法、および画像とシートルース等実際の現象との対応関係把握のための統計的手法の問題、さらには環境評価のための工学的問題等、なお今後の解決に待つべき問題が多分野にわたり残されていることも否めない^{2)~5)}。これらの全面的な解決には学際的な研究体制を必要とするが、リモートセンシングの現状に鑑み、ここでは友ヶ島水道の海水交換現象および大阪湾湾奥部の水質環境をモデルケースとして、実利用の見地から研究を行った。

本研究の目的を要約すると、以下ようになる。

- ① 経済的かつ効率的なシートルースを実現するための第一段階として、曳航式水質測定機の実用化をはかる。
- ② 沿岸域を対象とした総合水質指標および有効な代表波長帯の選択基準を見出す。
- ③ シートルースデータとMSSデータの対応関係を把握し、総合水質指標の平面パターンを見出すための統計的手法を標準化する。
- ④ 沿岸域を対象としたMSS画像の汎用的電算処理プログラムを開発する。

これらは昭和52年度～56年度の5ケ年にわたり実施した。これらの成果の一部については既に港湾技研資料(No. 331)等に報告しているが^{9)~10)}、本資料はこれら全体をとりまとめたものである。5か年にわたり種々の角度からアプローチを試みており、以下の章ではこれら個々の項目についてその内容を記述する。

2. リモートセンシングのシートルース

2.1. 現地観測の概要

MSS (Multi Spectral Scanner) の測定原理は観測対象物体からの光の反射または放射光が対象物体の種類と状態に固有の光スペクトル形を持っていることに基づくものである。一度に多数の波長帯でデータを取得するため、1回の観測であらゆる情報が入手できると考えがちである。しかしながら、MSSも1つの光学・電子装置であり、おのずと測定限界が存在する。また、対象物の側も季節や時間帯によってその特徴が明瞭に現わ

れる場合とそうでない場合がある。したがって、MSSセンサの性能、対象物の特徴を理解した上で、ある程度の絞って観測に臨むよう計画を立てる必要があると考えられる。

しかしながら、現段階では必ずしもMSSと比較すべき適切な手法や指標が明確でなく、現地観測データとMSSデータを照合しつつ水質環境の把握を行わざるを得ない状況にある。特にMSS測定によっては、通常、表層の情報しか検知することができず、このためこれによって海域の状態を類推するためには、海水の鉛直混合が十分に行われていることが条件となる。大阪湾での冬・夏季の水温分布は、冬季においては鉛直方向の変化が小さく、この条件を満たしている。しかし、夏季においては鉛直方向の変化は非常に大きく、安定成層の状態であるとみられる。このような場合には別に海上観測によって鉛直方向の物理量変化を調べ、MSSデータと対比しながら解析を進める必要がある。

表-1に本研究で使用したMSS、ディエダラス(Deadalus)社製Model DS-1250の性能諸元を、図-1に調査を実施した調査飛行海域を示す。MSS観測はそれぞれの調査海域をいくつかの飛行コースに分割して行っており、飛行を完了するのに要する時間に潮汐に起因する水塊移動によってMSS画像上に幾何学的歪みが生じる問題を避けるため、潮汐が満干時に停止する時刻の前後にMSS走査の時間を設定して行った。また、MSS測定と同時にそれぞれの海域でシートルース(海上観測)を実施した。シートルースの仕様は下記の通りである。なお、調査海域、シートルース項目は実施年度によって若干異なるが、ここでは本文中に引用した代表的なもののみを示す。

a) 友ヶ島水道周辺海況調査

海水の大阪湾内外への流入に伴う水質変化や海峽部海水交換メカニズムの把握を行うため、フェリーボートによる横断観測や、備船、調査船による定点観測、移動観測等を実施した。

① フェリーボートによる横断観測

測点数；深日～洲本ライン、12点×1層×2～8コース
深日～徳島ライン、12点×1層×2～7コース
測定項目；水温、塩分、濁度、SS、COD、分光反射率、赤外放射量

② 定点観測(紀淡海峡内外に指定された観測点)

測点数；1～2地点×3～6層、1時間間隔測定
測定項目；水温、塩分、濁度、透明度、水色、流向・流速、分光反射率、赤外放射量

③ 移動観測；1～3隻の備船により移動しつつ、指

表-1 MSSの性能諸元

本 体	走査本数	80本/秒
	瞬間視野角	2.5 m rad (高度1,000 mで直径2.5 mの分解能)
記 録 部	走査角	7° 20'
	揺れ補正	±5°以内の横揺れ(ローリング)はジャイロにより補正
記 録 部	分光方式	○熱赤外部と可視光部の分離はダイクロミックミラーによる ○可視光部の分光はプリズムによる
	検出器	○熱赤外部—Hg: Cd: Te (液体窒素により冷却して使用) 波長帯 8~14 μm (フィルターにより95~12 μmのみ検出) ○可視光部—シリコンフォトダイオード 波長帯 0.38~1.10 μmを10個に分割
モニター方式		シンクロスコープにより1走査線毎の検出エネルギー(熱量, 光量)の強弱波形をモニター
記録部		FM方式(周波数特性 DC~125 KHz) 巾2.54 cm, リール径35.6 cm, 長さ2,800 m テープ速度 76.2 cm/秒 記録時間 上記条件で60分

チャンネル	波長帯(μm)	チャンネル	波長帯(μm)
1	0.38 ~ 0.42	6	0.60 ~ 0.65
2	0.42 ~ 0.45	7	0.65 ~ 0.69
3	0.45 ~ 0.50	8	0.70 ~ 0.79
4	0.50 ~ 0.55	9	0.80 ~ 0.89
5	0.55 ~ 0.60	10	0.92 ~ 1.10

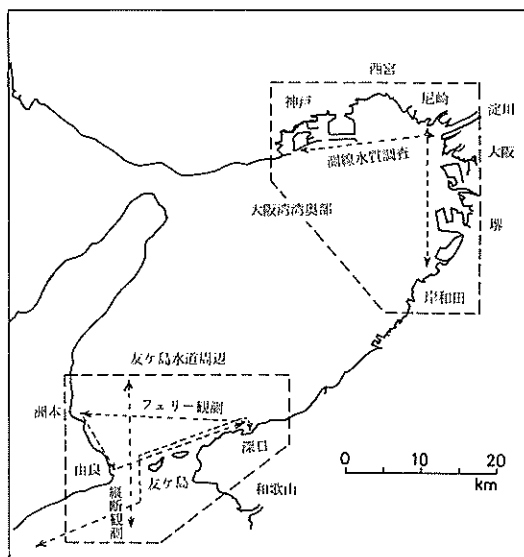


図-1 航空機MSS調査海域

定された14~19点の観測点において水質観測を行った。

測定項目;水温,塩分,濁度,透明度,水色,SS,

流向・流速,分光反射率,赤外放射量,

なお,①~③の観測において,指定された数地点については採水された試料を基に詳細な水質分析を行った。

b) 大阪湾湾奥部海況の調査

沿岸沿いの測線上および主要河川前面域の定点について下記の調査を実施した。

① 測線水質調査

測点数;淀川河口~岸和田ライン,10点×1層×1コース

淀川河口~神戸ライン,10点×1層×1コース

測定項目;水温,塩分,濁度,SS,COD,水色,透明度,分光反射率,赤外放射量

② 定点水質調査

測点数;淀川河口および前面海域6地点について,

4点×1層×3回

1点×3層×3回

1点×1層×5回

測定項目;水温,塩分,濁度,SS,COD,水色,透明度,流向・流速,分光反射率,赤外放射量

③ MSSデータ補正観測

測点数；岸和田沿岸の水温の経時変化が比較的少ないと考えられる埋立て護岸に囲まれた水域に3点を指定し観測を実施した。

測定項目；水温、塩分、濁度、SS、COD、水色、透明度、分光反射率、赤外放射量

なお、①、②の観測において、指定された数地点については採水された試料を基に詳細な水質分析を行った。

以上に示したように多数の測点、多項目にわたる現地海上観測を行い、MSSデータとの照合を行った。しかしながら、筆者らは別途、経済的かつ簡便、適確なシートルス手法として曳航式水質測定機の実用化をはかっており、次節ではこれについて記述する。

2.2 曳航式水質測定機の試作

リモートセンシングによる海洋調査に関連して行われるシートルスにおいて、従来一般に用いられてきた水質の測定方法には、定置あるいは移動する船舶により個々の測点で採水を行い分析する方法、海上構造物あるいはブイを利用した測定方法などがある。しかしながら、これらの方法による場合には一般に多くの機材、人員および経費を必要とし、これらに起因するさまざまな制約から時間的、空間的にみて満足なシートルスが得られないことを常としてきた。そこで定点測定に代る方法として所要の水質測定センサを搭載した曳航体を船舶により曳航しつつ航行測線に沿った海域の水質を連続して測定・記録する方法が提案され、その実用化が図られてきた。

海洋データを連続的に測定する曳航体としては、諸外国において既にいくつかの実用化の例があり、わが国でも二・三試みられた例がある。しかしながら、実用性を評価し得るものは比較的大型の曳航体によるものであり、これらは操作性や運動性からみて地形的障害のない外洋や水深が十分深い海域での測定には適するとしても、水深の浅い沿岸域や場所的に比較的狭い港湾域での使用に

は適しているとは言い難い。

そこで筆者らは、この研究課題の一環として、通常容易に使用し得る小型船舶（例えば小型漁船）により特別な装置を用いることなく曳航しつつ、連続的に水質測定を行うことのできる測器の開発を意図して装置の試作を行った。まず、52年度には1号機として、水質測定と採水の機能を併せもつ曳航式水質測定・採水機を試作し、引き続き53年度には、試作1号機による現地観測の経験を踏まえて水質測定機能のみを備えた改良型2号機を試作し、一応満足すべき結果を得た。

2.2.1 曳航式水質測定・採水機（試作1号機）

(1) 装置の概要

この装置は、所要の水質測定センサを搭載した曳航体を小型船舶により曳航しつつ、航行測線に沿った海面付近の水質を連続測定するためのものである。測定データは曳航索を兼ねたケーブルを通じて曳航船上の記録装置部に伝送して連続記録する。また、観測員が常時、測定記録を監視しつつ、必要に応じて随時スイッチ操作をすることにより自動採水を可能とするものである。この装置の要目を表-2に示す。

(2) センサの選択および採水筒の構造

この装置の測定項目は表-2に示すように水温、塩分、濁度および水深の4項目であり、付加機能として500cc×6筒の採水機能を有する。各センサおよび採水筒の構造は、使用条件を考慮して下記のように選択した。

a) 水温計

水温計としては一般的に用いられている電気抵抗式温度計を採用した。この方式には代表的なものとして白金測温抵抗体センサを使用したものと、負特性サーミスタ（NTC）センサを使用したものがある。長期安定性、互換性、精度などの点では白金式が優れていると言えるが、長尺ケーブル（50m）の使用、電気出力、レスポンス、価格等を勘案して、この装置ではビード形サーミス

表-2 曳航式水質測定・採水機要目

項目	要目			
曳航速度	巡航 6ノット（3～未確認）ノット			
曳航体測定水深	表層付近 ～ 20 m			
測定項目：水温	範囲：5～35℃，精度：0.1℃，分解能：0.1℃，方式：電気抵抗式			
塩分	10～35‰	1%	0.5%	電気伝導度式
濁度	0～30 0～300 ppm	3%	1%	光学式
水深	0～20m	1%	0.01%	水圧式
採水機能	500 cc × 6筒，船上からのスイッチ操作による自動採水			
記録方式	ペン書き連続記録および指示計			
寸法・重量	全長171 cm，最大径30 cm，重量：空中55 kg，水中39 kg			

夕温度センサを採用した。

b) 塩分計

電気伝導度方式の塩分計には直接式と誘導式がある。静止水での短時間測定では精度の点で直接式が優れていると考えられるが、海水中の汚濁物質等による電極の汚れにより測定精度が大きく変化するため、本機のような用途には適当でない。これに対して誘導式は、センサにモールド型の誘導トランスを使用しているため汚れによる精度の変化が少なく、従来から海洋を対象とした計測に多用されており、本機においてもこれを採用した。

c) 濁度計

海洋における濁度の測定には、通常、光学式の濁度計が用いられており、中でもレンズとピンホールによる採光対受方式のものが多い。この他に散乱光を測定するものも実用に供されているが、散乱光方式は測定入力一般に微弱であり、安定な測定性能を確保するためには一般に高価な装置となるため、船上で使用する現場機器としては実用性に乏しいきらいがある。

従ってこの装置においては、透過光が海水の濁度の大きさにより減衰するときの透過光量と入射光量の比から海水の光束消散係数を求め、これから濁度を求める方法を採用した。また、濁度の測定範囲は、通常の沿岸海域においては0～300 ppmは必要であろうと想定した。したがって、一種類のオプティカルパスのセンサでこの領域をカバーしようとする、当然、精度の低下をきたすので、オプティカルパス30 mmおよび300 mmの2台のセンサを使用し、濁度の大きさに応じて切り換えて使用する方法とした。なお、透過光はその波長により減衰特性が異なるため、複数個の波長帯を用いることも提起されているが、この装置では中心波長640 μmの単色光を使用している。

d) 水深計

水深計は曳航体の曳航水深、すなわち各計測センサの測定深度および採水深度を知るために設けられている。この種の装置では水圧を測定して深度を求める方法が一般的であり、この装置でもこれを採用した。圧力型の電気式水深計の圧力-電気変換素子としては、ストレインゲージ、差動トランス、水晶振動子等が用いられている。このうち差動トランス式のもの、高出力であるが温度ドリフトが大きく、形状も大きくなるという欠点がある。水晶式のもの、形状も小さく測定精度が良いという特長があるが電気回路を含めセンサが高価である。そこでこの装置においては、構造および電気回路が比較的単純で小型化が可能なストレインゲージ型を採用した。

e) 採水筒

採水容量500 ccの円筒形のを6本装備している。採水筒は曳航体の外殻円筒に添ってその周囲に等間隔で配置されており、曳航体に容易に着脱可能な構造となっている。各採水筒はその前後が開いており、そこには前後同時に作動する自動閉塞弁が設けられている。この弁は曳航前に開の状態セットされる。したがって曳航時には常に進行方向からの海水が筒内を流通しており、曳航船上でのスイッチ操作により弁が閉じてその場所での採水が行われるようになっている。なお、6本の採水筒は定められた順序で動作し、スイッチの1操作ごとに1本の採水が行われる。

(2) 装置の構成

曳航体の構造および測定回路の構成を図-2および図-3に示す。また曳航体の外観および曳航船上におかれた測定記録装置を写真-1(a)および(b)に示す。

曳航体は1本の金属性円筒を外殻として組立てられており、円筒の前半部にはフレームによって一体的に組立てられた計測センサが収納され円筒にネジ止めされている。この部分はセンサの清掃と保守上の便宜を考えて、全面的に開口された外殻円筒の前頭部より出し入れできるようになっている。また、外殻円筒の前半部は周辺一円にスリットを設け、さらに円筒内における各センサ等の配置は頭部に近い程空隙率が大きくなるようにし、この間における海水の滞留あるいは気泡の巻き込み等による測定障害を防除するよう配慮した。

中央部より後半部にかけては、各センサの電気回路の収納と信号伝送ケーブルの接続分岐箱を兼ねた防水筐体、水深計センサおよび採水筒閉塞弁駆動機構が設けられており、外殻円筒の外周には採水筒が装着されている。また、前半部中央付近と尾部には安定翼が設けられている。

曳航は、曳航索と信号伝送を兼ねた特殊多芯ケーブルを頭部より引き出し、筒体頭部側面および筒体中央付近を支点としてその中間に保持し、ケーブルの先端を曳航船上に引き上げて記録装置部に接続した形で行われる。曳航時には、曳航体は曳航船の舷側より斜め後方約30～35°の位置を進行するが、船速と深度に応じて曳航ケーブルの支持点の位置と安定翼の角度およびケーブル繰出し長さの調節が必要である。曳航時の一例を写真-2に示す。

(3) 現地観測例

試作機を小型プラスチックボート(全長4 m, 5人乗り, 20 HP 船外機付)で曳航し、図-4(a)に示す久里浜港内の設定経路上を走航して得た測定記録の一例を図-

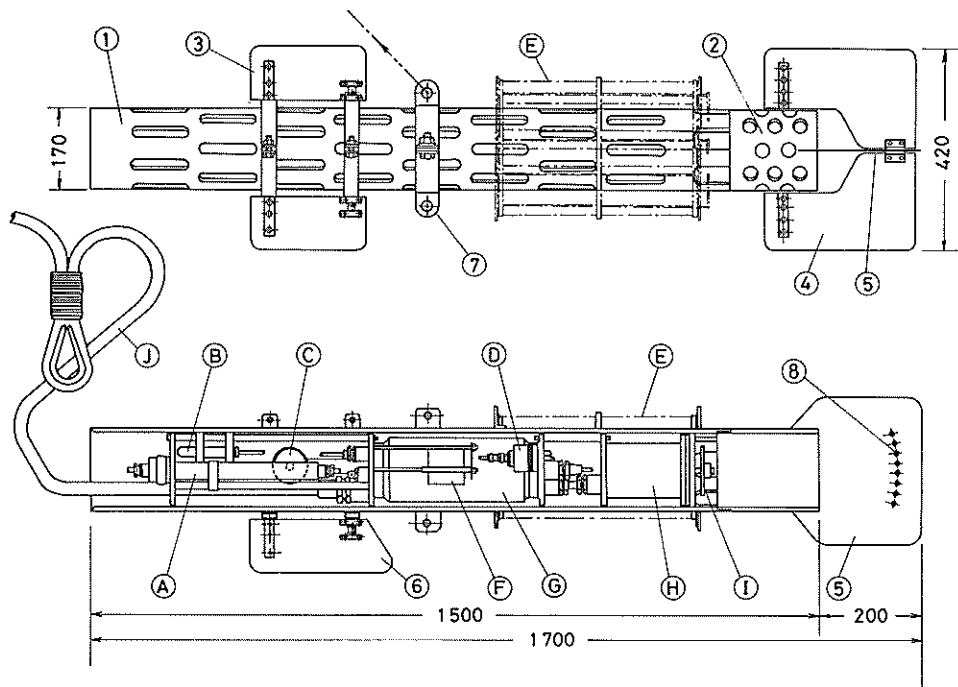


図-2 曳航体構造図

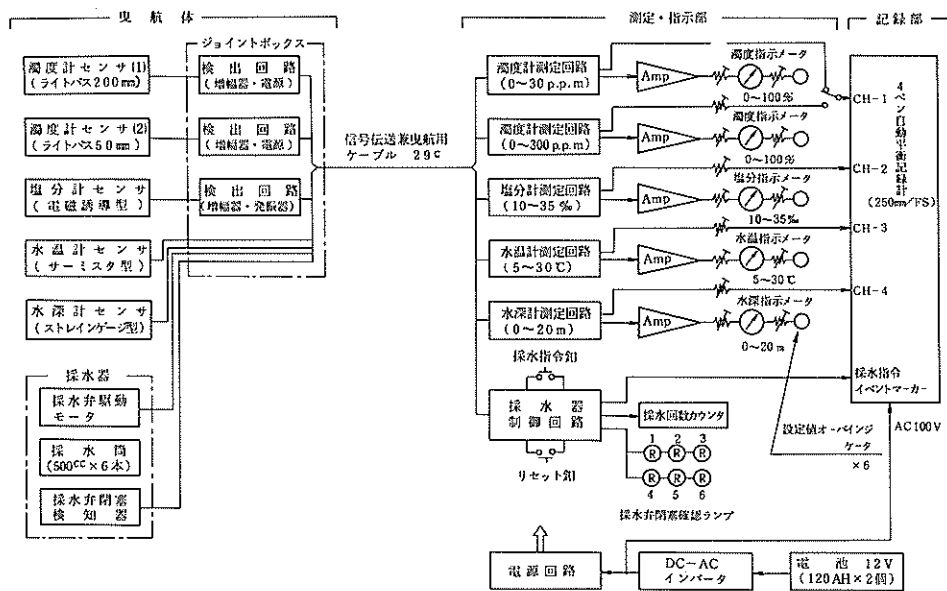


図-3 測定回路ブロックダイアグラム

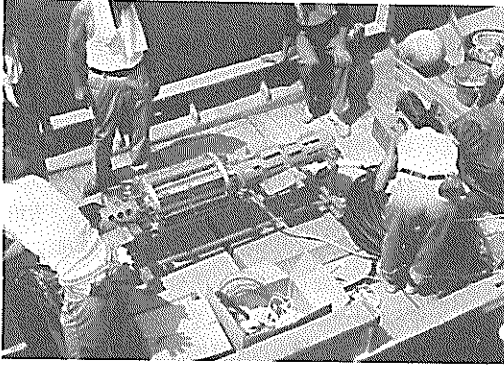


写真-1(a) 曳航体

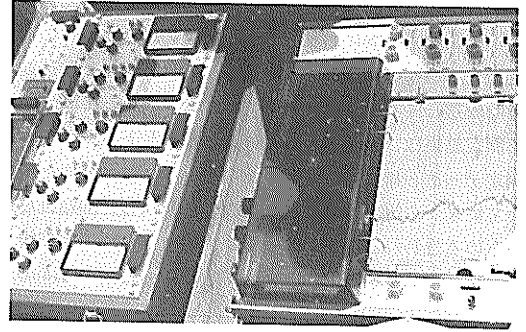


写真-1(b) 記録装置

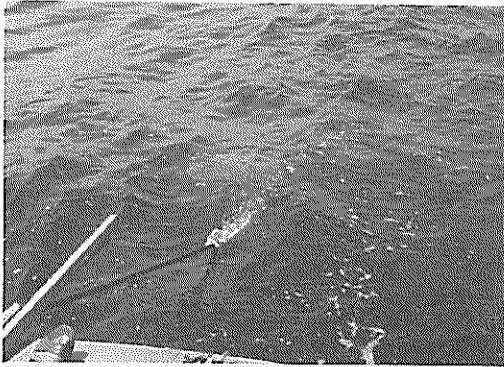


写真-2 曳航状態

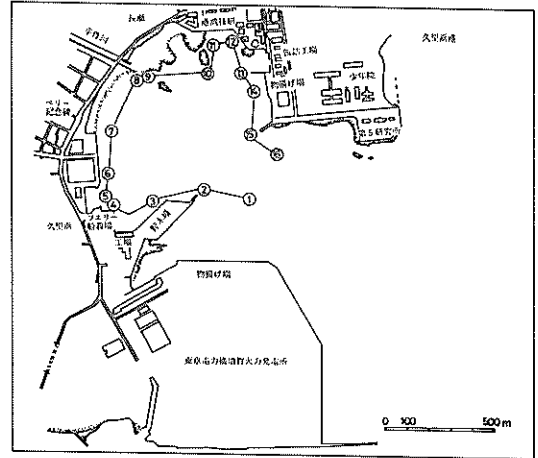


図-4(a) 曳航経路図(久里浜湾)

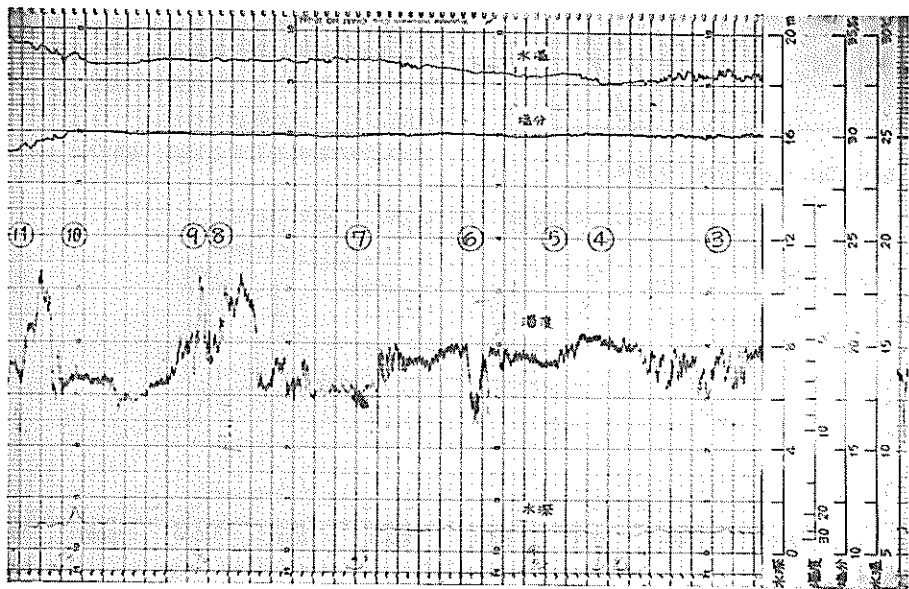


図-4(b) 記録例(久里浜湾)

4(b)に示す。また観測船により図-5(a)に示す大阪湾(泉大津市~大阪市)の設定経路上を走航して得た記録の一例を図-5(b)に示す。なお、後者の場合、測線の総延長は16,480mであり、記録紙の読取は観測船の定速航行を仮定して100mごとのサンプリングとした。

測定結果は、曳航船上より同時に採水した試料による測定データとほぼ良い一致を示しており、現地調査において従来から行われてきた結果などと比べ特に問題はないものと思われる。また、航行中の船上からの採水試料の分析結果では検知することができなかった図-4(a)の

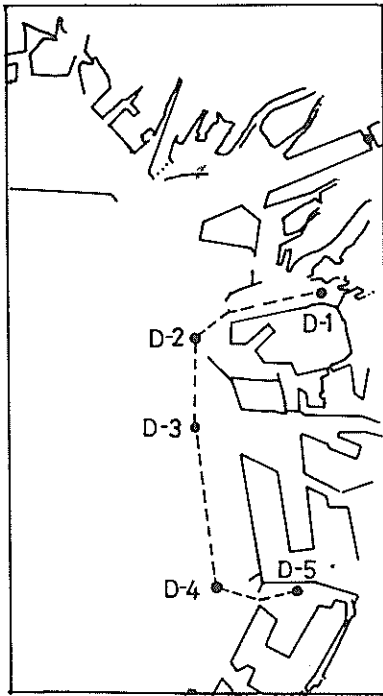


図-5(a) 曳航経路図(大阪湾)

⑥に示す水産加工工場前面での排水や、⑨に示す平作川河口付近および⑩の港湾技術研究所護岸の下水路前面における局所的な水質変化の状況が詳細に測定されている。なお、地点⑨、⑩については通常汚濁源と見られる場合が多いが、後刻再測定を行った結果、測定の当日はこれらの地点では湾内に滞留する海水よりも明らかに濁りが少ないことを確認している。図-5(b)においても、大和川河口沖を通過後、フェリー関門(D-2)の南側で水温、濁度、塩分が急変している様子や、大関門の内側、大阪本港内で塩分が急激に減少している様子等が明確に把握されている。このように測線に沿って水質の微細な変化まで検知できることは、現象の平面パターンを把握するリモートセンシングのシートルース手段としては極めて有効なものであると考えられる。

(4) 試作機の機能および考察

試作した曳航式水質測定・採水機は、大阪湾や久里浜湾での現地観測試験の結果および前述した観測記録からも知れるように、

- ① 予想以上に安定した状態で水深50cm程度の表層付近を6ノット以上の速度で曳航し得ること。
 - ② 曳航測定時において、筒体内センサ部に気泡の混入・空洞の発生を生じることなく安定したデータが得られると推察されること。
 - ③ 船長数mの船外機付プラスチックボートでも十分曳航可能なこと。
 - ④ 測線上のデータが連続的に得られ、その変化を常時監視しながら必要に応じて即時的な採水が可能であり、余分な採水・分析の手間が省けること。
- などの利点を有し、在来観測手法に比べて特にデータの資質・精度を損うことなく簡便かつ極めて効率的な測定を可能とすることが確認された。

このような特長を有する反面、曳航体に4項目5種類

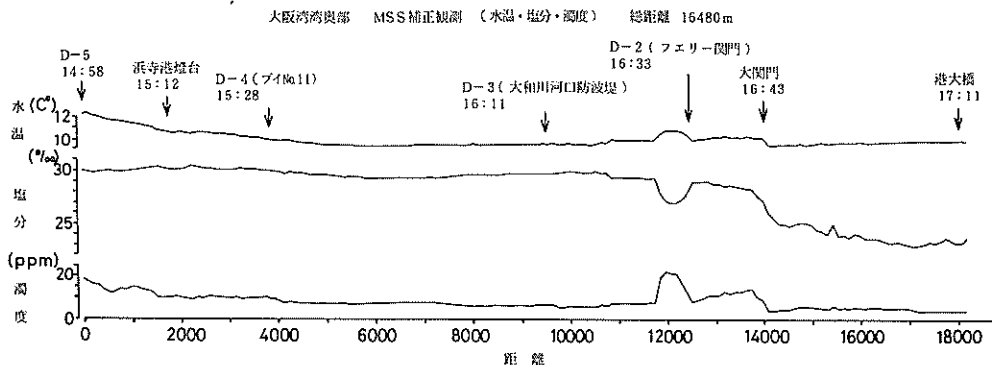


図-5(b) 記録例(大阪湾)

の計測センサと6筒の自動採水器を搭載したこともあって、曳航ケーブルを含めた曳航部全体の寸法・重量が増大し、それによる操作性の低下が実用上の問題として指摘される。このほか、曳航体の姿勢制御に関連した問題として、船舶から吊り下げられた曳航体が海面近くに浮上するまでの曳航開始時に曳航体が回転する場合があるという問題が指摘される。したがって、今後より実用性の向上を図るためには次のような点について改良を行って、取扱いをより簡便にすることが必要であると考えられる。

① 曳航体の形状の改善と寸法・重量の軽減
 ② 曳航体の回転防止を含めた姿勢制御の安定化
 ③ 曳航索兼用信号伝送ケーブルの船上における引留め方法およびケーブルの断面の縮小
 ④ 特定水深（ある深さを有する）における曳航体姿勢の確認と安定な制御方法

⑤ 種目の異なる計測センサの任意交換機能の具備

2.2.2 曳航式水質測定機（改良型2号機）

(1) 装置の概要

改良型2号機は試作1号機での経験を踏まえて、以下の点に改良目標を置いて試作した。

① 曳航体の寸法・重量および曳航ケーブルの断面と重量の軽減
 ② 曳航体の初期姿勢の安定化および運動性、操作性の向上
 ③ 測定深度すなわち曳航深度を連続的に可変できる機能の付加

上記各項目に対する具体的な改良方策は以下の通りである。

①については、1号機で具備した自動採水機能を全面的に取り除くと共に、測定センサおよび回路の小型・単純化を図る。②については、曳航体に翼を設け、①による改良効果と併せてその実現を図る。③については、翼にフラップを設け、これを曳航船上より遠隔制御する方法を採用する。

試作した装置の要目を表-3に、曳航体および操作監視部の外観を写真-3(a)および(b)に示す。

(2) 搭載センサおよび曳航体の構造

各測定項目に対するセンサには、試作1号機での使用実績と今回の改良目標を勘案して下記のものを採用した。

- ① 水温センサ；サーミスタ，測定範囲0～30℃，精度±0.2℃
- ② 伝導度センサ；電磁誘導式，測定範囲0～60mS，精度±1%
- ③ 濁度センサ；透過光式，測定範囲0～150ppm，精度±2%

- ④ 深度センサ；水晶圧力変換器，測定範囲0～3kg/cm²，精度±0.01%
- 水温計には、1号機での使用結果からみて特に支障が

表-3 曳航式水質測定機要目

曳航速度；3～10ノット
測定水深範囲；0～20m
測定項目；水温，電気伝導度，濁度，曳航体深度
信号伝送方式；曳航体～曳航船間 アナログ電圧直送式
測定深度制御；フラップ角可変方式
記録・指示；アナログ記録，4ch+2ch，メータ指示2ch
曳航体諸元；寸法，全長100cm，最大幅60cm
；重量，空中約22kg，水中約12kg
；材質，胴体部アルミ合金，SUS，翼部木合板

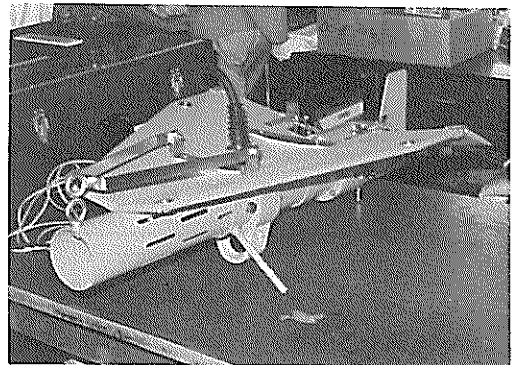


写真-3(a) 曳航体

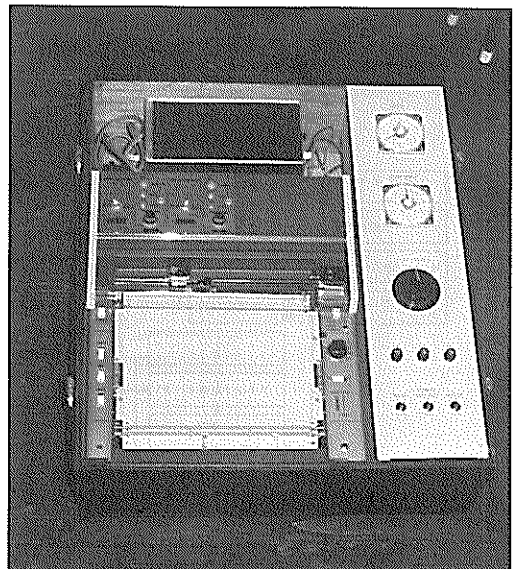


写真-3(b) 操作監視部

なかったのでビード型サーミスタを用いた電気抵抗式を採用した。

電気伝導計は塩分濃度を知るためのもので、1号機では電気伝導度と水温の測定値から電気回路により塩分を求める直読式塩分計を採用したが、本機では搭載回路を簡略・軽減するため、電気伝導度を測定して塩分は測定結果から計算により求める方法とした。センサには1号機と同じ電磁誘導式を採用したが、寸法的には1号機に比べてより小型の誘導トランス（径40mm）を使用した。

濁度計には1号機と同じ光学式の透過光方式を採用した。1号機ではオプティカルパスの異なる2個のセンサを使用した。本機では曳航体の寸法・重量を軽減するためオプティカルパス150mmのセンサ1個とし、光色は中心波長670μmの単色光を用いた。

深度計としては1号機ではストレインゲージ型の圧力センサを使用した。本機では寸法・重量的にみてより小型の水晶振動子を使用した圧力センサを採用した。

曳航体には上記各センサのほか、曳航体の深度を可変するためのフラップを駆動するサーボ機構、フラップの振れ角を測定するためのポテンショメータ機構が設けられている。曳航体の構造および測定・制御回路の構成を図-6および図-7に示す。

曳航体は3個のアルミ合金製円筒を軸方向に連結して胴体とし、その上に三角翼を取り付け、翼の後端部には曳航体上昇・下降力を与えるためのフラップが設けられている。翼は木製の平板で、翼形は両端を切り欠いた三角翼である。また、翼は約12°の上反角をもって固定されている。このほか、翼の両側端には曳航時の姿勢制御のための垂直安定板が、胴体尾部には方向舵が設けら

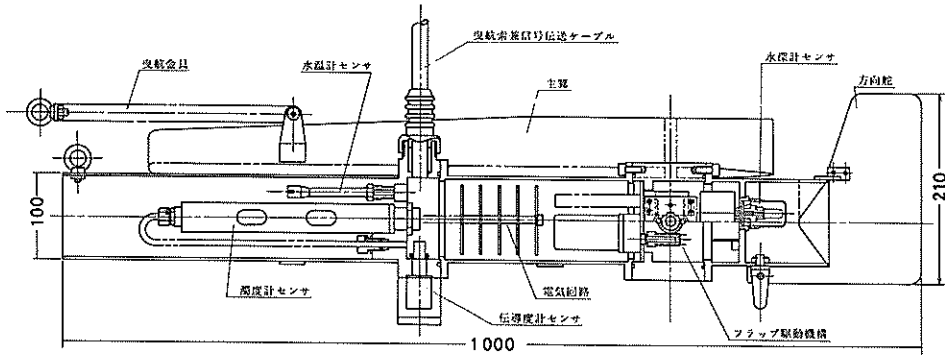


図-6 曳航体構造図

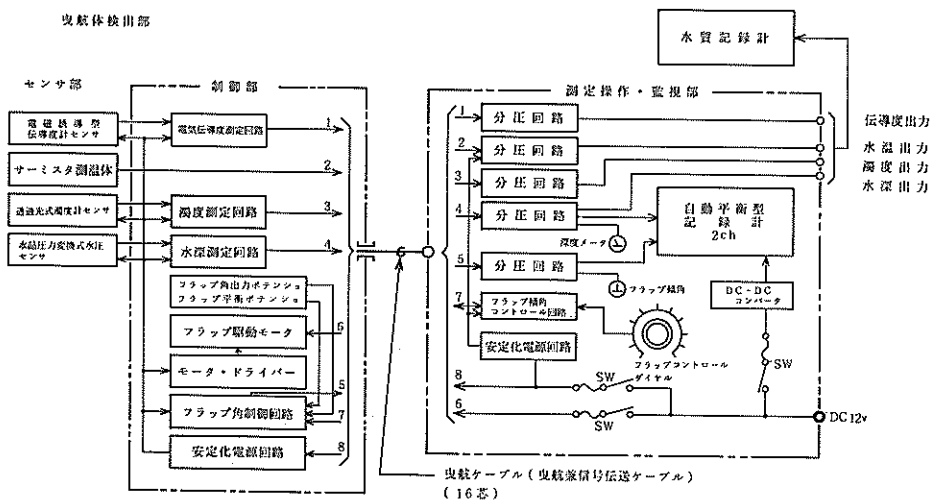


図-7 測定・制御回路ブロックダイアグラム

れている。

胴体を構成する3個の円筒のうち中央部は水密容器になっており、内部には各計測センサの電気回路およびフラップ駆動回路・機構が格納され、容器の外側には各計測センサが取り付けられている。水温および濁度センサは円筒容器の軸方向前面に、電気伝導センサは円筒下部に、深度センサは軸方向後面にそれぞれ受感部分を突出して固定されている。前部と後部の円筒は中央部水密容器と連結して胴体を構成すると同時にセンサの保護外筒の役目を果している。また、胴体前頭部と後尾部は全面的に開口しており、筒体周辺には海水の交換を促すためのスリットが設けられている。

曳航は、信号伝送を兼ねた特殊多芯ケーブル（16芯、外径16.5mm、抗張力500kg、長さ50m）を胴体中央部上方より引き出して曳航金具に保持し、ケーブル先端を曳航船上に引き上げて操作・監視部に接続した形で行われる。

曳航体の深度制御は曳航船上からの遠隔制御により行う。すなわち、操作・監視部に設けられたコントロールダイヤルの手動操作によりフラップの振れ角を変化させて行うもので、フラップの駆動はパルス幅変調による閉ループ制御により直流モータを制御し、モータの回転をリンク機構を介してフラップ回転軸に伝達する方式である。フラップの振れ角範囲は $\pm 60^\circ$ 、駆動トルクは28 kg \cdot cmである。

計測信号の伝送および記録は、各センサおよびフラップ角測定用ポテンショメータのアナログ出力電圧を直接伝送して記録する方式とした。なお曳航体の深度とフラップ振れ角は監視用としてメータ指示を併用している。

(3) 試作機の機能および考察

試作2号機は1号機に比べて大幅に小型・軽量化され、また、曳航中に船上から測定水深を連続的に制御できることを特長としている。水槽実験および現地観測試験の結果、水質等の計測性能については特に問題はなく、1号機とほぼ同様の結果が得られた。一方、具体的な曳航姿勢の安定性および操作性に関しては、1号機に見られた曳航開始時に曳航体が回転するといったような不安定さは皆無であり、さらには小型・軽量化によって操作性が著しく改善、向上されており、特に改良すべき問題点は見当らず十分な実用性を有するものと思われる。

しかしながら、測定深度の制御に関する運動性については、曳航用ケーブルに作用する抗力の影響により、曳航速度3ノット程度以上では目標とした測定深度範囲（0~20m）の全域を連続的に可変することはできず、その可変深度は0~10m以下であった。このことは、今

後のケーブルの断面構造と曳航体の形状についてなお改良すべき余地があることを示唆しており、センサおよび測定信号の伝送方式を含めた検討が必要であると考えられる。たとえば、信号伝送方式をPCM時分割多重化方式にして伝送ケーブルの所要芯線数を削減し、ケーブル断面を縮小するといったことが挙げられる。

3. 航空機MSSによる大阪湾現地調査

3.1. MSS測定に関する基礎調査

近年、海洋分野へのリモートセンシング技術の導入により、海面温度、濁度等の面的な分布が得られるようになって海洋調査の幅が広がり、これに伴って海洋現象への理解が一層深まることが期待されている。しかしながら、MSS測定によって得た分布パターン自体、太陽光の照射条件や大気中のエアロゾルによる散乱、 H_2O 、 O_2 、 O_3 、 CO_2 等による吸収の影響を含んでおり、また波浪条件によっても差異を示すなど、海洋が本来持つ物理量分布とは大きく異なった分布を示すことがある。すなわち、対象物自体が変化していなくとも、測定時の諸条件が違えば異なった分布を呈することになる。観測対象物間に大きな放射特性の差異がある場合には、大気の影響はあまり問題にならない。しかしながら、海洋汚染を対象とする場合や、海面の表皮水温を対象とする場合のように輝度の微小な差や、絶対値を問題とする場合には、大気の影響は重大な問題である。特に、航空機によるMSS測定の場合には、走査角が大きいためスキャン方向の信号強度に対する大気の影響の補正、飛行時間内の太陽天頂角の変化による放射輝度の増減に対する補正など、今後海洋調査への実用化をはかる上で解決しなければならぬ多くの問題が残されている。

そこで、上記問題点を背景として、測定高度によるMSS測定値の変化、およびMSS走査角と放射輝度の関係など、MSSの活用に必要な基本データを得ることを目的として現地調査を実施した。測定結果の一例および考察を以下に示す。

(1) 測定高度によるMSS測定値の変化

一般に放射束の大気中での増減は大気中での放射エネルギーの吸収、および伝播方向が変えられる散乱の2つの原因による。MSSの波長帯のうち、可視光と近赤外領域の波長帯では散乱が卓越し、測定高度を上げるほど入射エネルギーが増加する。一方、赤外領域の波長帯では吸収が卓越し、測定高度の増加と共にエネルギーは減衰する。ここではMSS測定に及ぼす測定高度の影響を航空機搭載MSSとシートルスによる海上観測データ等を用いて検討した。

図-8は赤外放射温度計により友ヶ島水道上の同一地点の水温を測定しながら高度を変化し、測定高度と見かけの海面測定水温との関係を求めたものである。また、これと同時に測定した気温鉛直分布の実測値を図-9に示す。図-8によれば、高度の増大と共に、大気中の赤外光エネルギーの吸収により、赤外放射温度計の見かけの水温はほぼ直線的に減衰している。

Saunders は飛行高度の気温を用いて見かけの水温を補正する実験式

$$T_s = T + C(T - T_a)$$

ここで、 T_s ; 真の温度

T ; 赤外放射計の示度 (見かけの水温)

T_a ; 測定高度の気温

を与え、高度300mにおいて $C = 0.1$ を示している¹¹⁾。しかしながら、今回のような高高度の観測に対して上式を適用すると、補正が過小となる。Saundersの式が高度の増大と共に大きな誤差を与えることは既に指摘されており、図-8と図-9の関係から、あるいはこれとは別に行った高度4000mでのMSS測定値およびシートルース結果からは $C = 0.2 \sim 0.4$ となる。なお、図-8の測定高度と T_{IR} の測定値の変化の関係の中で、高度4000フィート付近に緩やかな変曲点が見出される。この性質は、低高度での大気による吸収作用が大きいことを示すものとして良く知られた特徴であり、その一部はエアロゾルによる赤外光エネルギーの吸収であると考えられている。

図-10および図-11は岸和田沿岸の上空において高度を種々変えて飛行することにより得られたMSSの測定高度とCCT値の関係を示したものである。対象としたデータは岸和田沿岸でも水温の経時変化が比較的小さいと考えられる埋立護岸に囲まれた水域のものである。なお図中のCCT値はチャンネルごとの平均値を示している。これらの図からも明らかであるが、可視光領域においては、一般に測定高度を上げるほど入射エネルギーが増加する。元々海洋からの反射エネルギーが小さいのに対し、途中大気からの上向き散乱光は経路長が長いほど、その総量が増え、かつ海洋からのエネルギーより大きいからである。図-10と図-11では、高度変化によるCCT値の変化のパターンはかなり異なったものとなっている。パスラジアンは、太陽の高度角、大気中の気体-混濁物濃度によって、そのつど様相が変わるためである。しかしながら、両図とも高度約2000m以下では変化が大きく、特にその傾向は短波長側で大きいなどの共通点も見られる。これは2000m以下で散乱媒体が多いことを示唆している。図-12は図-11を基に各チャンネルごとに、

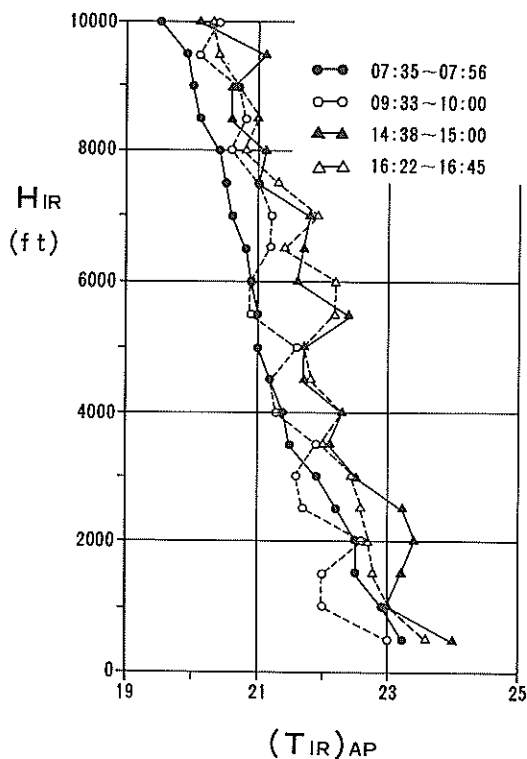


図-8 見かけの測定水温と測定高度

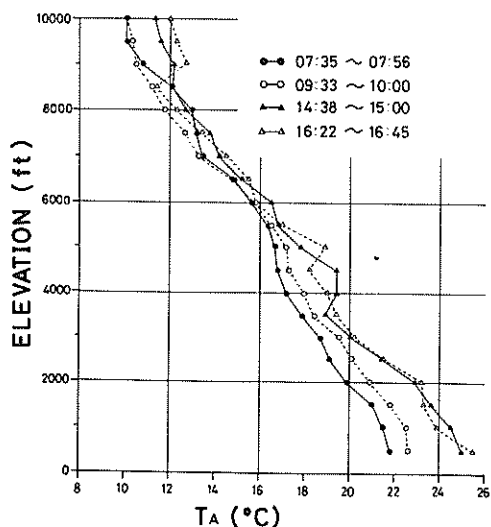


図-9 気温の鉛直分布

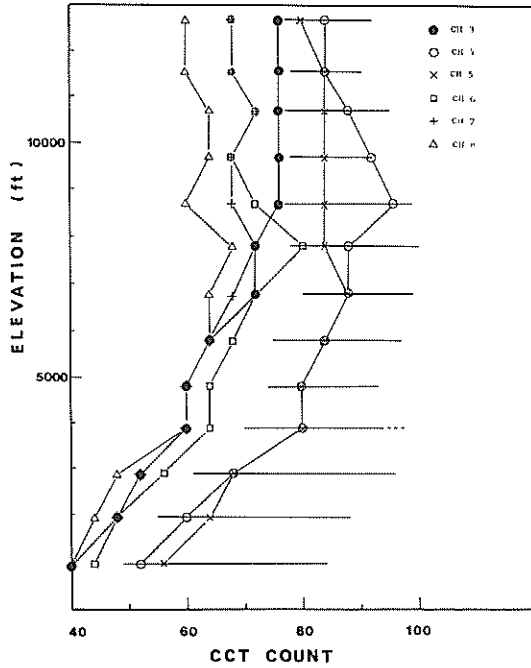


図-10 測定高度とCCT値 (ch. 3, 4, 5, 6, 7, 8)
(1980年, 3月)

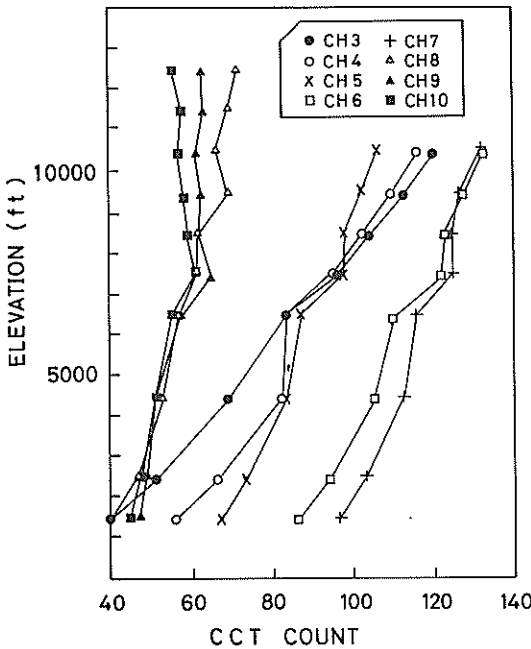


図-11 測定高度とCCT値 (ch. 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10)
(1983年, 3月)

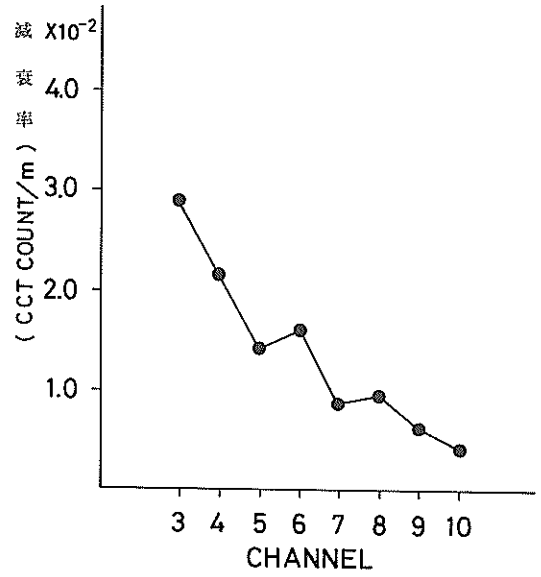


図-12 CCT値の減衰率

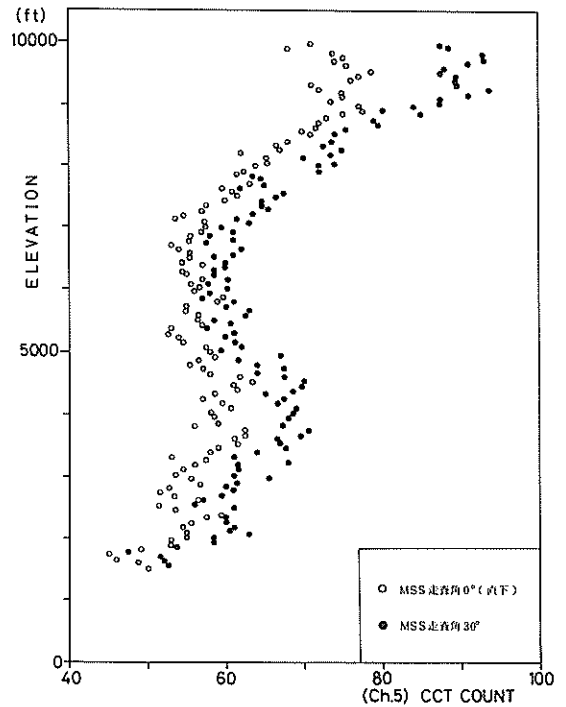


図-13 測定高度とCCT値 (ch. 5, $\theta = 0^\circ$ 及び 30°)

パスラジアンによる海洋からのエネルギーの減衰率をプロットしたものである。長波長ほどパスラジアンの影響が少ないことを示している。

図-13は55年度に相模湾において、高度を10000～

1000フィートに降下させながら、MSS測定を行った結果の一例である。図にはch.5の走査角 0° (MSS直下)および 30° のCCT値をプロットしている。パスラジアンスの影響が高さ方向に一定であるならば、走査角 0° と 30° のCCT値の差は高さ方向に一定割合で変化せずである。しかしながら、この図にも見られるように、CCT値の差の変化割合は一定ではなく、高さ方向にCCT値が増加する領域では 0° と 30° のCCT値の差は増大し、CCT値が減少する領域ではその差は小さく現われるという傾向が見られ、大気組成の高さ方向の複雑さを示している。

(2) MSS走査角と放射輝度の関係

図-14はMSSにより測定された放射輝度の走査角による変化を各チャンネルごとに示したものである。MSS測定によって測定される下方からの放射輝度の中には、海面、海中から反射された光のほかに前述のようにパスラジアンスの影響が含まれている。航空機MSS測定の場合には走査角が $77^{\circ}20'$ と大きいため、MSS直下より走査角の増大に伴って大気散乱光による混入ノイズが増加し、これが海面、海中からの有意な情報を覆うほどのエネルギーオーダーを有することになる。図から解るように、光の波長が短くなるにしたがってパスラジアンスの影響が大きくなるため、海洋調査へのリモートセンシングの適用に当っては特に重要な問題となる。このように、波長帯によってパスラジアンスの影響が異なることは、従来のアナログ解析に用いられたチャンネル間の比演算処理では走査角方向の輝度補正は十分でないことを示している。

以上に示した高度変化や走査角によるパスラジアンスの放射輝度に対する影響の補正の問題については、各所で研究が進められている。しかしながら、現段階ではまだ実用化には程遠い感がある。今後さらに種々の条件下での測定データの蓄積を図り、これら補正手法の汎用化を進め、情報資質と利用効果についての評価を明確にするよう努めなければならない。

3.2. MSSおよび現地観測による

大阪湾海峽部の海水交換

東西両側に突出した地形を持ち、三つの瀬戸からなる友ヶ島水道は、大阪湾と外洋とを結び、外洋との海水交換が介在する重要な海峽部である。したがって、その海水交換メカニズム、水塊の移動経路、海水交換量等を把握することは、大阪湾の水質保全を論ずる場合不可欠な問題である。しかしながら、このような海峽部の海水交換現象は、開口部の大きな海峽で見られる単純かつ緩やかな海水交換と異なり、湾水の流出入による海水の輸送

・拡散は複雑であり、また海峽スケールの大規模な現象である。したがって、従来の観測手法ではそのメカニズムの全容を把握することは困難であり、リモートセンシング技術の導入によって始めてその対応が可能となる問題である。

友ヶ島水道における航空機MSSによる観測は5か年にわたって実施したが、その間の蓄積資料によるとある特徴的なパターンが存在している。

以下では冬季の事例および夏季の事例に分けて検討を行うこととする。

(1) 冬季における海水交換

写真-4および写真-5は、1978年2月に行った観測により得た赤外画像である。写真-4は午前満潮から下げ潮に移る時間帯のものであり、写真-5は同日の午後の下げ潮から干潮にかけてのものである。午前海峽部測定時は積雲が多く、その影響が画像上に黒く現われている。図-15および図-16は、それぞれ写真-4および写真-5の赤外画像をもとに描画した水温の分布図である。参考のために各測点における水温の実測データおよび測定時間を図上に示した。また、図中の点線は実測値をもとに等温線を描いたものである。赤外画像に見られるような急激な温度変化を把握するためには、実測の測点分布が粗く、等温線を描くにあたり、赤外画像を参考にしつつ、実測値に基づいて描いたものである。実測の測定時間のずれもあり、これが正しい等温線であるかどうかは疑問が残るが、温度の絶対値の比較においては、図-15では赤外画像の方が 0.5°C 程度低くなっている所が多く、図-16では赤外画像の方が $0.2\sim 1.0^{\circ}\text{C}$ 程度低くなっている。しかしながら、分布の傾向は大勢において一致しているようである。写真-4および写真-5から以下の事柄が判断できる。

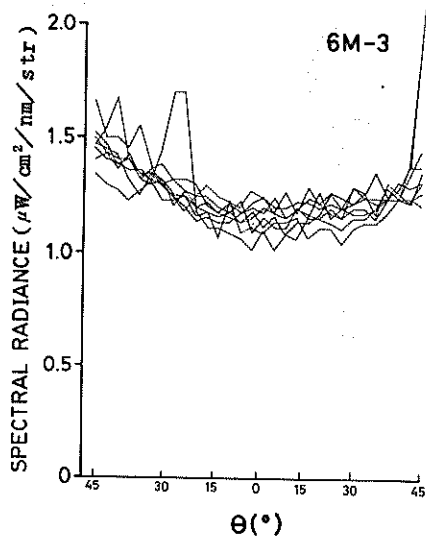
満潮の画像では、

① 全般的に湾奥より海峽部に向って水温が高まる傾向が見られ(温度差 $3\sim 4^{\circ}\text{C}$)、その間にいくつかの不連続線が見られる。

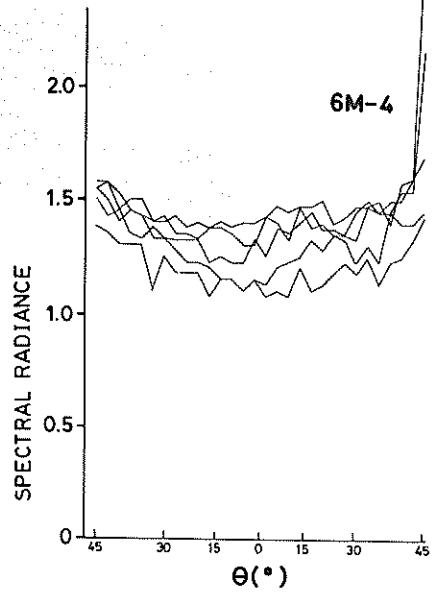
② 由良の瀬戸より約5km湾内側に円弧を描いて温度の不連続線があり、そのうち東側の方が温度差が大きい(2°C 前後)。また、海峽付近にも弱い不連続線があって、全体として楕円状の暖水塊の様相を呈している。

③ この時点ではすでに海峽付近で暖水の供給を受けているようには見えず、上げ潮時に湾内に流入した暖水がとり残されたものと判断できる。

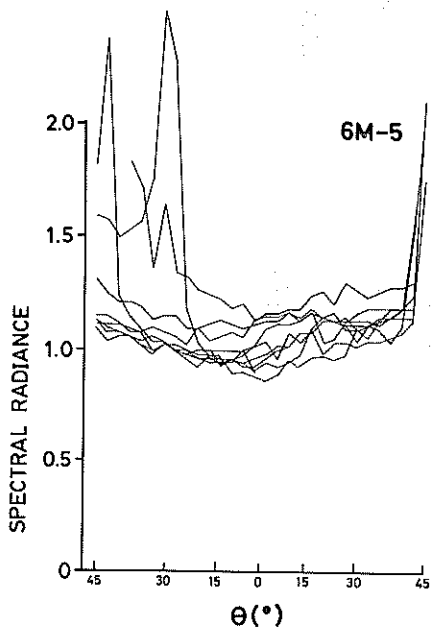
④ 淡路島東岸の沖合3km付近にも不連続線が見られる。これは南側ではとぎれており、また北側の様子は画面の外になるため明らかではないが、明石海峽からの



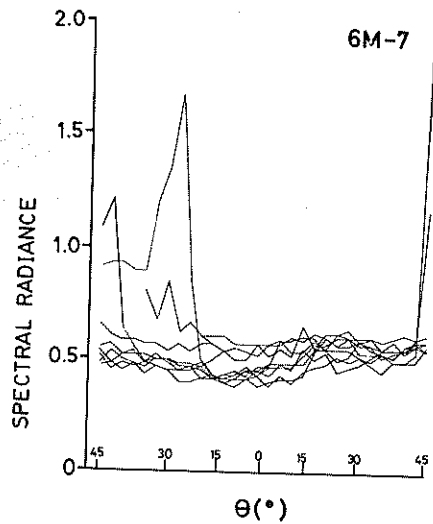
(a) 各チャンネルの分光放射輝度とMSSの走査角 (ch 3)



(b) 各チャンネルの分光放射輝度とMSSの走査角 (ch 4)



(c) 各チャンネルの分光放射輝度とMSSの走査角 (ch 5)



(d) 各チャンネルの分光放射輝度とMSSの走査角 (ch 7)

図-14 各チャンネルの分光放射輝度と走査角

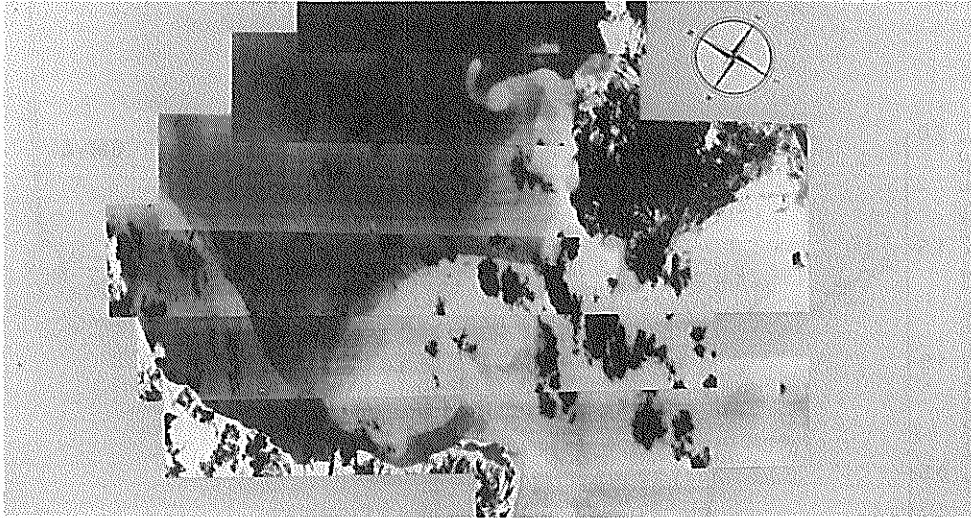


写真-4 湾口部海水流入パターン

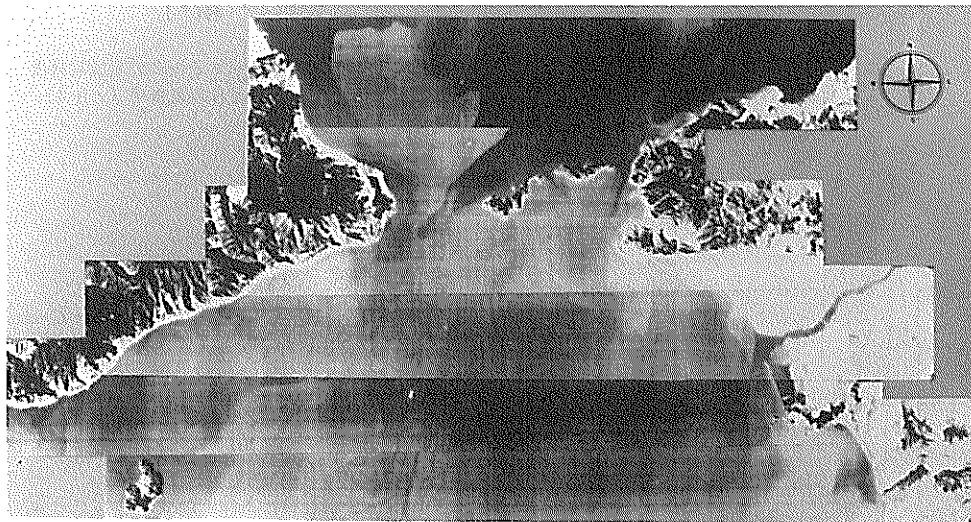


写真-5 湾口部海水流出パターン

流入水あるいは湾内で形成された水塊であろうと推察される。

⑤ 加太の瀬戸から湾内へ暖水が入り込んでいるが、住吉付近でその先端はぼやけている。

⑥ 観音崎から沖合に向かって暖水がいくつかの渦をなして蛇行しながら伸びているが、これはその後の観測でもほぼ一定位置に発生しており、周辺および海底地形の影響によるものと思われる。

一方、干潮時の画像では、

① 満潮時と同様に、全体的には湾内で低温、紀伊水道で高温という傾向に変化はないが、湾内側の水温分布は複雑で、沖の島北岸に沿って湾内の冷水が紀伊水道へ噴出すると共に、満潮時に由良の瀬戸の湾内側に見られた暖水塊は規模および周辺との温度差を減じつつ西方、淡路寄りに移動しており、大勢として、この暖水塊の湾外への流出は認められない。

② 加太の瀬戸からは細い帯状の冷水が流出しており、中の瀬戸にも同様の傾向が見られるが、いずれも大規模

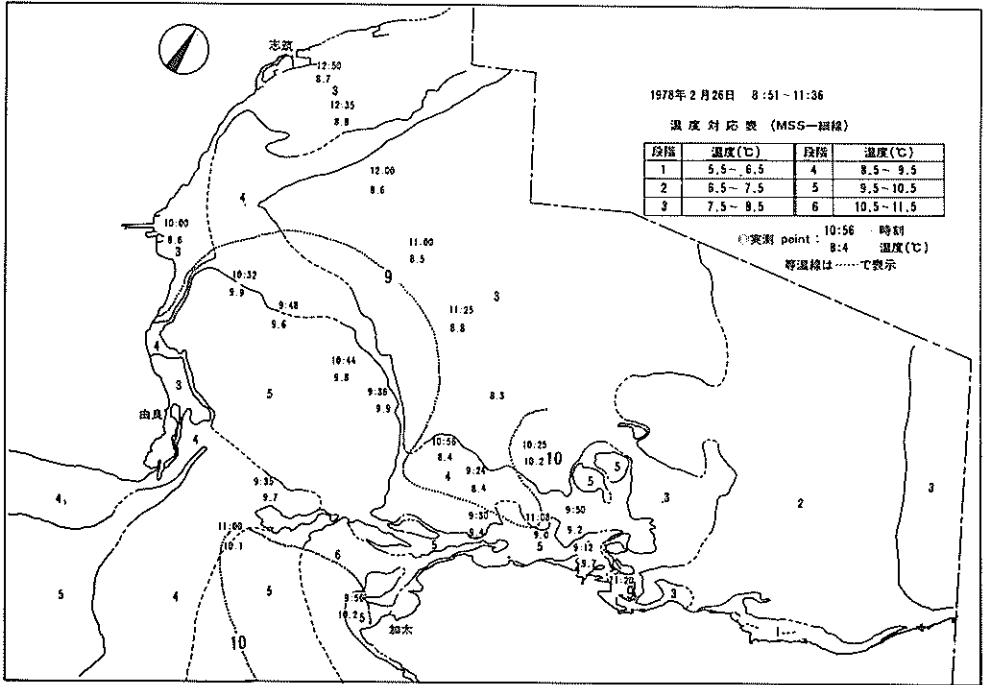


図-15 実測対応水温図(写真-4に対応)

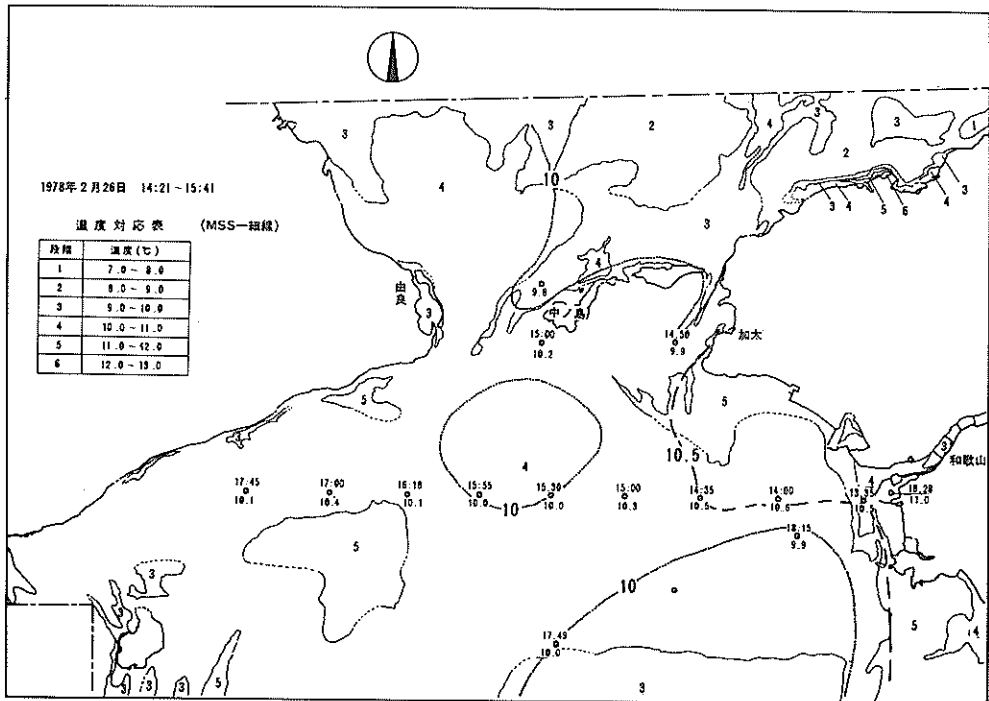


図-16 実測対応水温図(写真-5に対応)

なものではない。

③ 満潮時において観音崎の沖合に見られた顕著な暖水帯は、泉州沿岸沿いに南下してきた冷水と湾央方向から沖の島北岸沿いに由良の瀬戸へ南下する冷水帯に挟まれた形で湾央寄りに取り残されているように思われるが、測定領域と中間の時刻のデータが欠けているため消長の様子は明らかではない。

④ 海峡の外では、田倉崎南部に暖水の渦があり、下げ潮によって加太の瀬戸にあった温度の高い暖水が押しもどされたためにできたように見える。

友ヶ島水道とその周辺海域について、実測SS値とMSS画像との比較を行った。可視演算画像については、雲により画質が低下しているため、この代りに赤外画像から得た水温図を用い、その上に実測によるSSの等値線を重ねたものが図-17である。

SSは水質の違いにより、すなわち潮目を境にして急激に変化しているとみられるので、等SS線はあくまでも仮想的な線となるが、全体的な水塊配置をみるには有効なものであろう。これによると、沖の島の北側にある暖水域に対応して高SS域、加太の暖水の暖水域に対応して高SS域が、一方その北側には低SS域がある。また外洋は低SS域となっている。この傾向は56年3月に

行った観測でも同様の傾向が得られている。

写真-6(a)および(b)は1980年11月14日に観測されたch.5(0.55~0.60 μ m)、ch.11(赤外)の画像である。これは、漲潮時における外洋からの海水がその前面に不連続線を形成する水塊状となって湾内に流入し、ほぼその北上限界に達すると共に、友ヶ島の北岸に沿って湾内の滞留水がフラッシュ状に外海へ流出し始めようとするときのパターンを表している。この観測例では、ch.5とch.11の画像に現われる水塊形状のパターンの間に形状的な差異はほとんど見られない。しかしながら、ch.5の画像では水塊境界部で輝度レベルが高く現われており、水塊境界部に高SS域が存在することを示唆している。海上観測の測点分布の粗さのため、この点については検証できなかったが、これは水塊境界部の海水の鉛直混合によって海中あるいは海底の濁度成分が海表面に現われたためか、あるいは暖水塊の北上と共に周囲の濁度成分がこの領域に吸収・滞留されたためと思われる。一方、上記MSS測定と並行して数日間にわたり、図-18に示す測点に添って流れおよび水質の海上観測を行った。観測によって得られた結果を以下に示す。

図-19は図-18の小図中に示す友ヶ島水道の北側約8kmに設定したST.C(水深-58m)において、水深-

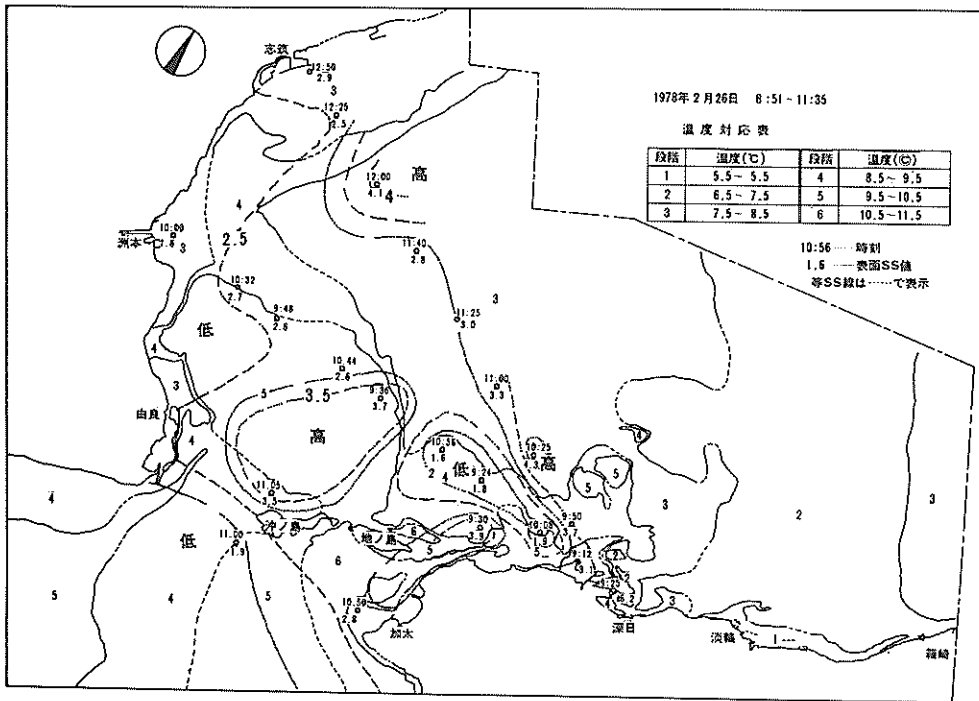


図-17 実測表面SS対応水温図

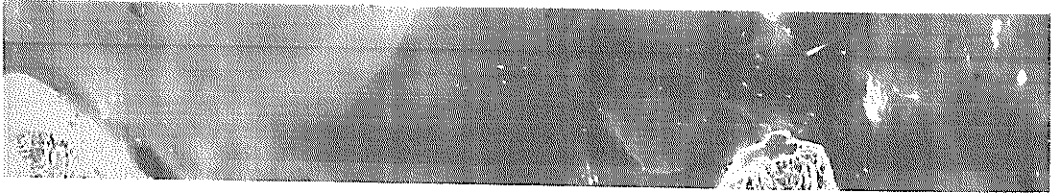


写真-6(a) 湾口部海水流入パターン (ch. 5)

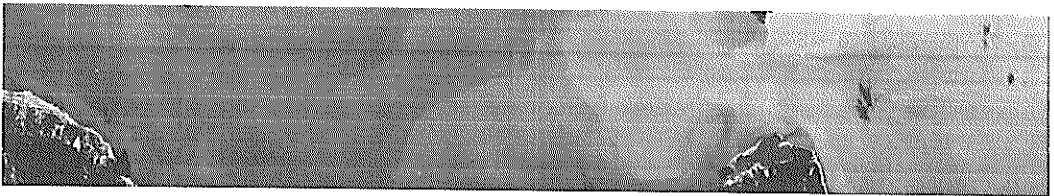


写真-6(b) 湾口部海水流入パターン (ch.11)

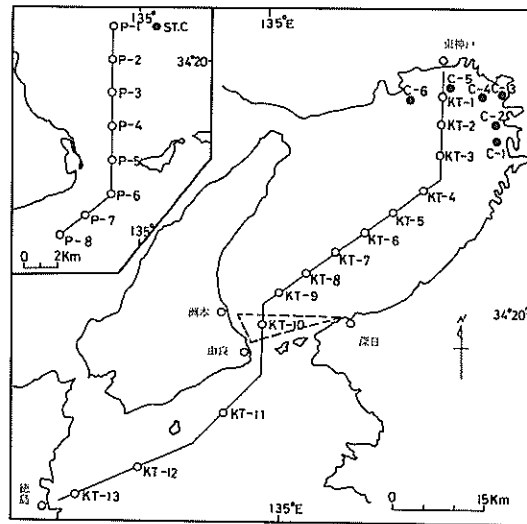


図-18 海上観測測定点の配置

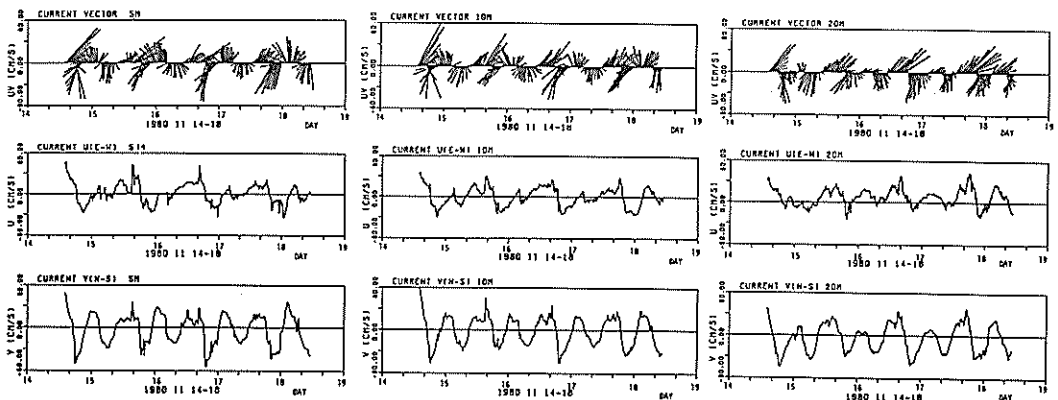


図-19 測点ST.Cにおける流向・流速の経時変化 (左: -5m, 中: -10m, 右: -20m)

5 m, -10m, -20mの3層に設置した自記流速計(N
C型)によって測定した流向・流速の時間変化図である。
流速は3分間の平均流速で、観測の間隔は20分である。
表-4に調和解析結果、図-20に潮流楕円を示す。これ
らの結果によると、流速の時間変動は各層ともほぼ一致
しており、半日周潮流が最も卓越している。流速は-20
m層に比べて-5mおよび-10m層がやや強く、観測期
間の最強流速は-10m層で記録した80 cm/sである。

図-21~図-23は、図-18の小図に示すように友ヶ島
水道を南北に挟んで2 kmの間隔に設定した測点P 1~
P 8の8測点における水温、塩分濃度の測定結果の一部
である。測定は表層から水深-15m, または-30mの間
の6層についてくり返し観測を行った。この内、図-21

表-4 測点ST.Cにおける潮流の調和解析結果

水深	分 潮	振 巾 (cm/s)		遅 角 (°)	
		U	V	U	V
5 m	平均流	1.8	-2.4		
	日周潮流	20.1	6.3	150.6	132.1
	半日周潮流	12.5	33.3	262.6	222.6
	1/4日周潮流	2.0	5.5	216.4	271.6
10m	平均流	0.3	-0.6		
	日周潮流	19.1	9.2	145.1	161.2
	半日周潮流	13.4	31.9	257.2	225.8
	1/4日周潮流	3.5	6.8	234.0	255.2
20m	平均流	9.8	-4.4		
	日周潮流	10.3	15.7	171.9	158.2
	半日周潮流	14.7	30.2	247.9	230.6
	1/4日周潮流	2.9	6.1	381.7	243.8

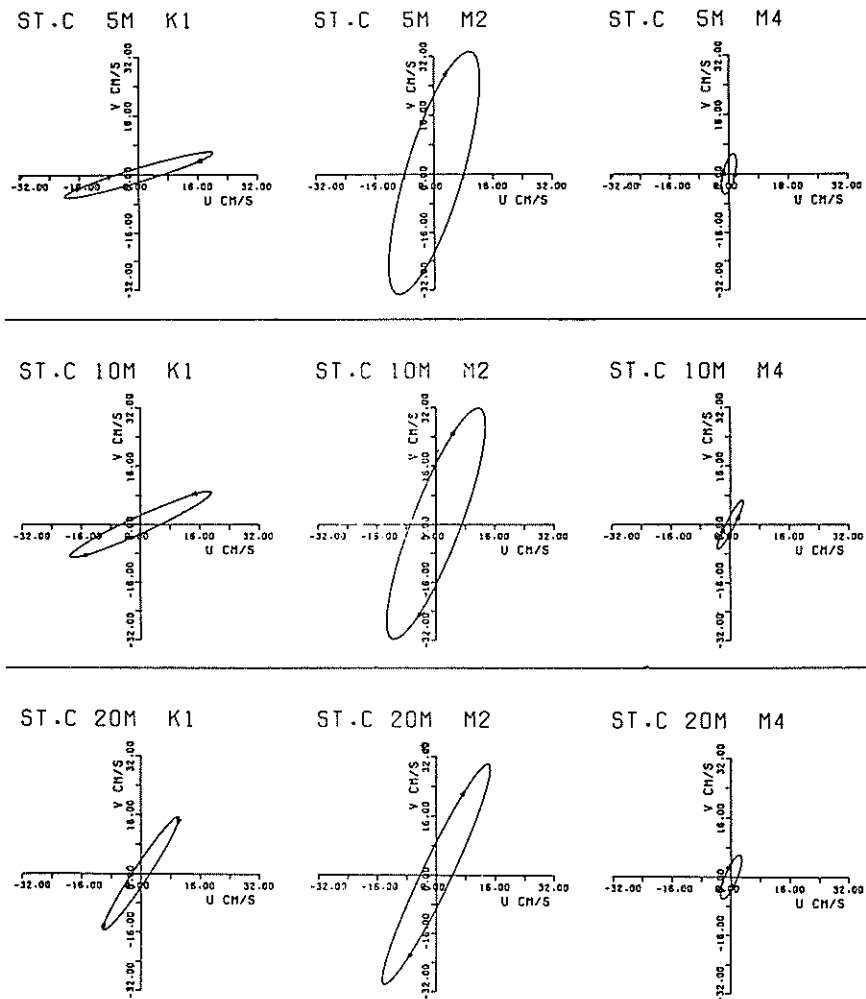


図-20 測点ST.Cにおける潮流楕円
(上:-5m, 中:-10m, 下:-20m)

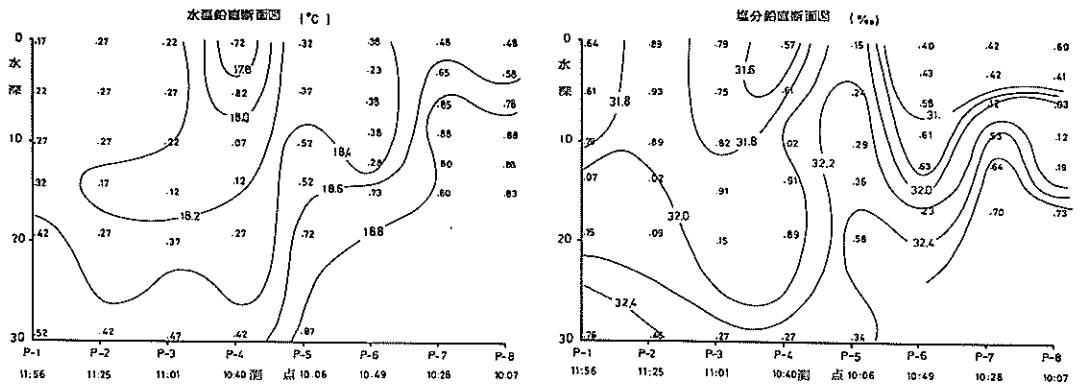


図-21 水温(左)と塩分(右)の鉛直分布(南流時)

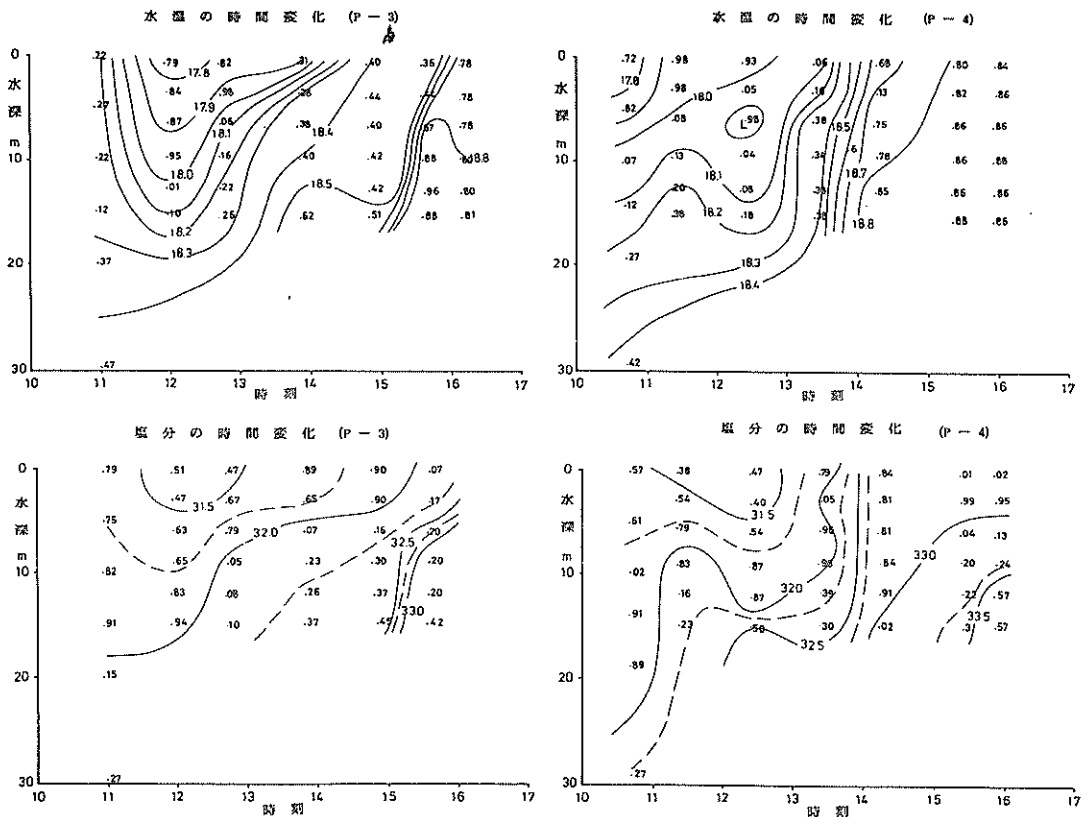


図-22 測点P₃における水温(上)と塩分(下)の経時変化

図-23 測点P₄における水温(上)と塩分(下)の経時変化

は南流時における各測点の水温および塩分濃度の鉛直分布図である。これによると南側の測点(P 8側)ほど高温・高塩分となっているが、全般的にみた分布形状は複雑であり、特徴的にP 4点の表層付近に低温・低塩分濃度の水塊が存在している様子が見られる。図-22、図-

23は、それぞれ測点P 3、P 4における北流時の水温および塩分濃度の経時変化を示すものである。潮汐表によるとこの日の友ヶ島水道での北流開始時刻は11時35分であり、最強流速は14時53分の2.5 kn となっている。図-22によれば、P 3点ではでは12時前後に水温が大きく

変化し、その後、変化は幾分緩和されたかたちとなっているが、低層の方から徐々に高温・高塩分へと移行している。P 4では14時頃、P 3では15時30分頃に鉛直方向にはほぼ均一な状態になっていることから、この頃にフロントが通過しているものと思われる。

MSS画像によって、友ヶ島水道を通過した暖水塊の形状、面的な広がりには明確に把握することができるが、海水の実際の動きはフロート追跡調査結果を加味することにより一層詳細に知ることができる。図-24はこの目的

のために行ったフロート追跡結果である。観測はレーダリフレクタ付漂流桿3本を、図に示す友ヶ島水道由の良瀬戸付近に投入し、調査船に設置したレーダにより流線を追跡すると同時に、各フロートについての監視線から漂流桿の位置を測定する方法により実施した。この際、漂流桿には風の影響を避け、かつ抵抗板の効率と取り扱いを考慮して試作した図-25に示す形状のものを使用し、好結果を得ている。なおレーダリフレクタには、直径約20 cmのルーネベルグレンズ(約250 tの鋼船に相当)を

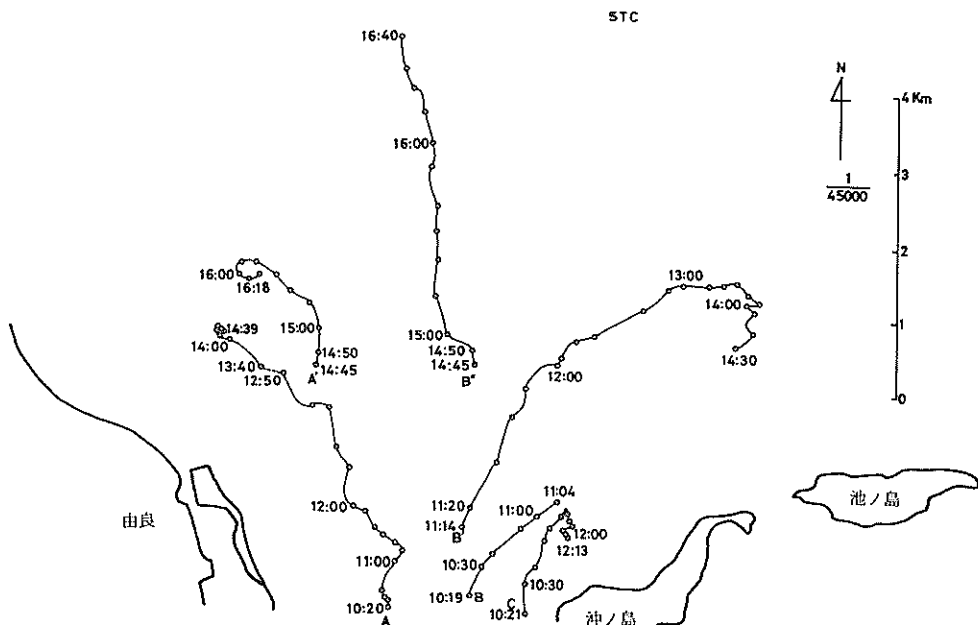


図-24 漂流桿流跡図

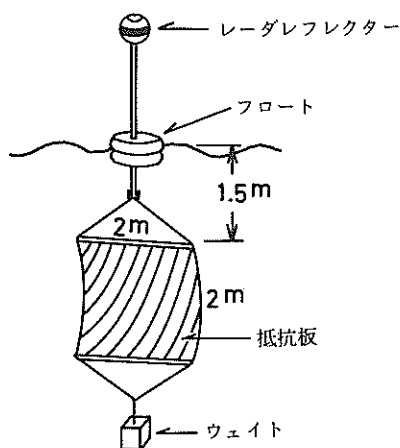


図-25 レーダリフレクタ漂流桿

使用した。友ヶ島水道における当日の潮流条件は9時13分北流開始、13時6分北流最強2.8 km、16時44分北流終了となっている。なお、同図中で、A、B、Cで示す3個のフローターの内、Cは12時13分にフロートと帆布を結ぶロープが切断し、抵抗板が失われたため追跡を中止した。Bについては11時4分、Cに接近したため回収し、B'に示す点に再投入した。14時30分には再度回収し、B''点に再投入した。Aについても14時39分に回収してA'点に再投入した。図-24および先に示した赤外面像例から以下の事が判断できる。

- ① フロートA、B、Cは投入後北流に乗り北東～北北東へ進むが、Aはその後向きを変え、淡路島に添って北西進している。一方、Cは沖の島北岸沖で停留しており、沖の島沖の後流に巻き込まれたものと考えられる。
- ② B'は北流に乗り北北東～北東進した後、13時頃

から向きを変え、逆戻りつつある。この時刻は友ヶ島水道では北流最強時であることから、この周辺に時計回りの流れ（渦）の存在が推察される。

③ AおよびA'はいずれも北西進した後、停留したが、B'はそのまま北進を続けている。外海からの流入水はB'の方向に添って湾内深くにまで入り込むようである。

最後に、友ヶ島水道南流時の水質分布を把握するために図-18に示す洲本～由良～深日～洲本間を定期航走するフェリーボートを利用して採水・分析を行った結果のうち、水温および塩分の分布を図-26に示す。水温分布と塩分分布は比較的類似しており、どちらの分布も友ヶ島の北側に一つの水塊（高温、高塩分）が存在することを示している。また、この水塊を境に、その東側は西側に比べて低塩分となっている。観測時刻が南流時の後半であることを考えると、水塊の東側に存在する低塩分水は大阪湾の湾内水に連なっているものと考えられる。

以上に冬季におけるMSS観測結果、および海上観測結果を示した。海上観測とMSSによる観測との間に数時間～数日にわたる時間的なずれのため、すべてを総合的に評価することはしなかったが、これらの観測例により、冬季における友ヶ島水道の海水交換現象をかなり明確に把握することができた。

これに対応する形で次節では夏季（1978年9月8日）に実施した観測例を示す。

(2) 夏季における海水交換

写真-7および写真-8は、それぞれ満潮時および干潮時における熱赤外面像である。満潮時の写真-7からわかるように、友ヶ島水道北部を巨大な冷水塊が円形に広がりながら北上している。また、この冷水塊の北東方向には前の北流時に流入し、その後とり残されたと思われる同規模の大きな水塊が認められる。一方、淡路側では淡路島に沿って湾内の暖水が流出しつつある様子が認められる。写真-8に示す干潮時すなわち南流時には、この冷水塊は淡路側からの暖水によって分断され、数kmの縞をなして南西に流下している。また友ヶ島の南側では暖水が滞留しており、加太の瀬戸の南側には冷水帯が見られる。

図-28はMSS走査飛行時刻の前後約30分以内に観測された各測点（図-27）の海面水温の鉛直分布である。観測結果によると121、128が示す淡路側の塩尻沖では、干潮時に対応する午前10時の表面水温約25℃から満潮時の15時にかけて約1～2℃程度上昇しており、全般的に湾奥ほど表面水温が高く、水温の鉛直勾配も大きい。しかし海峡部一帯では水深方向の顕著な温度差は認められ

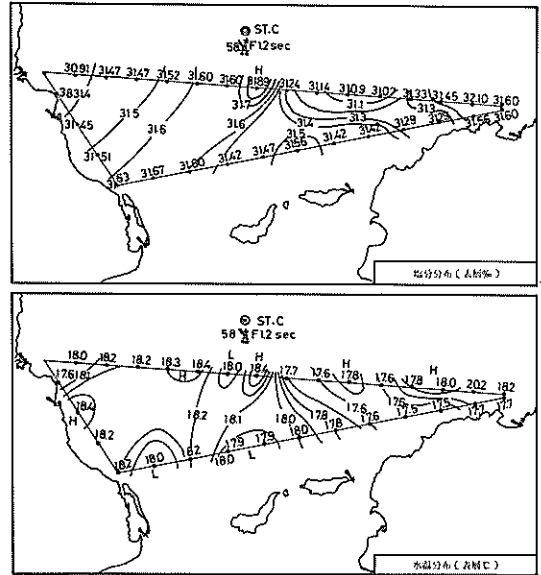


図-26 洲本～深日間の水温および塩分の分布

ず、表面水温と水深-10m層の海水温を比較してもわずか0.5℃程度の差しか現われていない。なお、これら夏季観測データによると、湾内・外をマクロに比較してもその温度差は1℃強であり、1978年2月の冬期観測で測定されたMSSデータをアナログ処理した水温分布図（図-15、16）にあらわれている水温差約5℃に比較して約1/5の温度差である。

図-29、図-30は、MSSのチャンネル11（熱赤外）をCCT化して算出した表面海水温分布である。ただし、この場合のMSS測定水温は見かけの表面水温であり、高度13,000フィートの上空から測定しているため、海面放射エネルギーの水蒸気、CO₂等による吸収減衰により真の海面水温より低く得られている。これと同時に行われた海上観測結果によれば、その差は約2.5℃となっている。図-29で、写真-7に見られた水塊のフロントが消えているのは、CCTを処理して得られた水温値を0.5℃単位で表示しているためである。すなわち、フロント前後の水温差が0.5℃以内の場合には、フロントをCCTによる水温のコンターによって表示できないためである。

CCTから作成した表面水温の等値線図によると、午前9～10時の干潮時（図-30）には泉南側に、午後15～16時の満潮時（図-29）には深日側に冷水塊が見られ、淡路側は相対的に水温が高くなっており、大阪湾東岸水域に沿って外洋の冷水塊が移動する傾向があり、冬季の外洋水の移動経路とは異なった結果となっている。これ

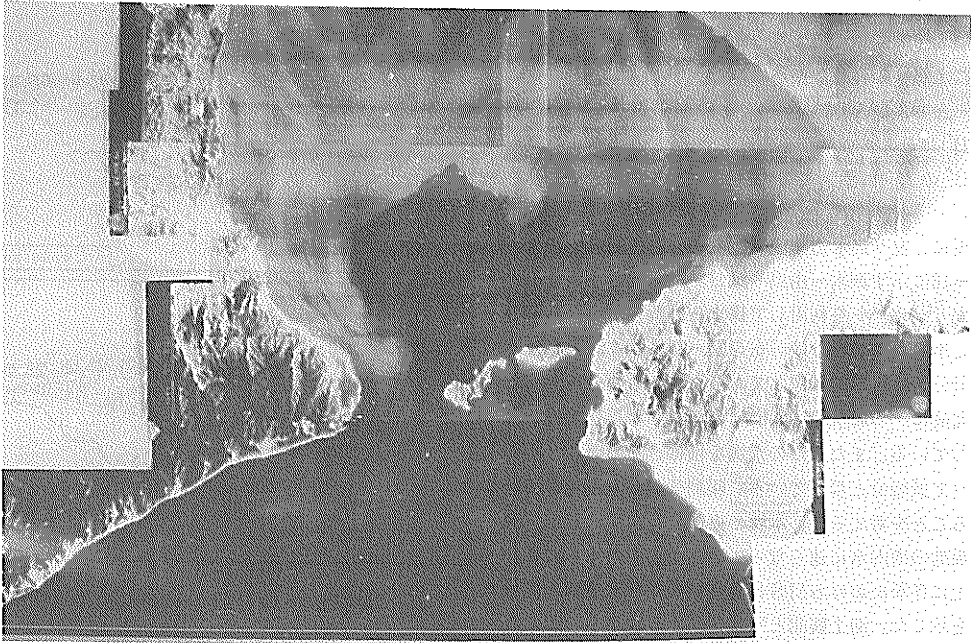
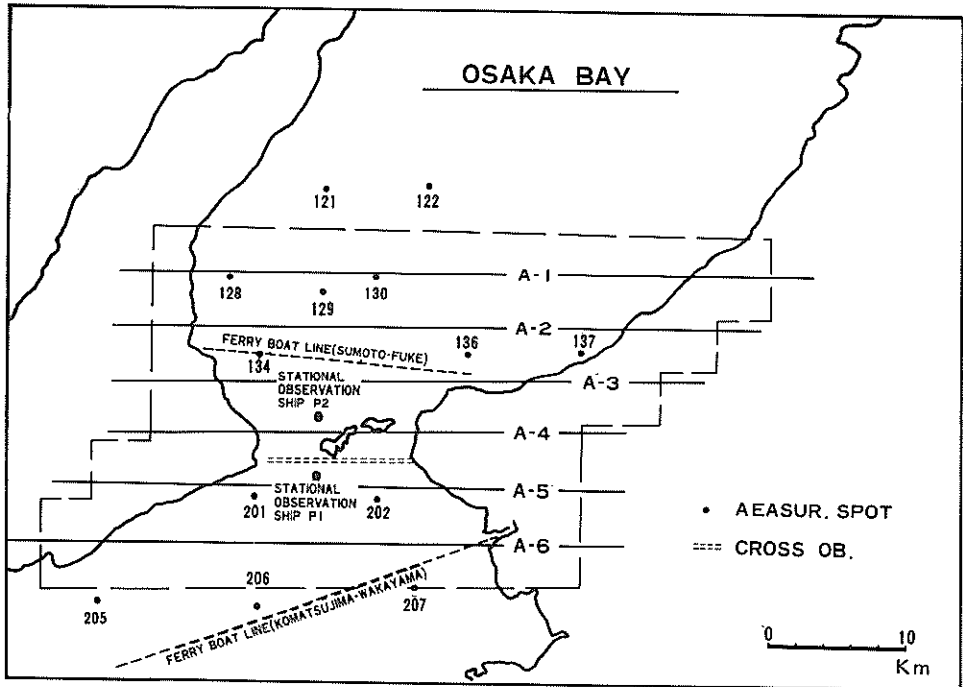


写真-7 湾口部(友ヶ島水道)海水流入パターン



写真-8 湾口部(友ヶ島水道)海水流出パターン



Tw(°C)

図-27 M S S調査海域とシートルースの配置

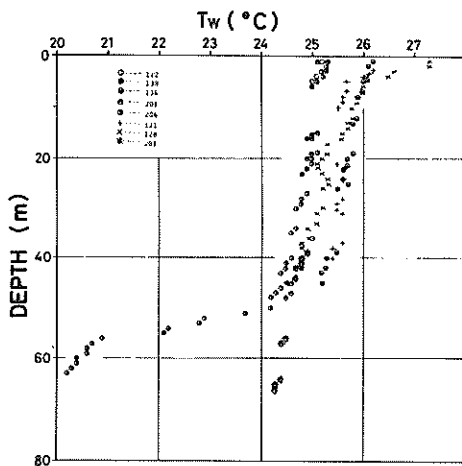


図-28 水温の鉛直分布図

らの水塊移動パターンを海上観測のデータによってさらに考慮する。

図-31は、友ヶ島水道の横断連続観測による表面水温と塩分の時間変化を示したものである。塩分の測定データによると淡路側の塩分値は常に小さく、内湾水は淡路側を通過して海峡を流し入していることが明らかとなる。

この特徴は、干潮時の9~10時における写真-8の画像に見出される淡路寄りの南西方向への流出パターンと一致する。図-31の表面水温に注目すると、流入時は淡路側から冷水が北上し、一方和歌山側の暖水が暖まりながら東側より湾内に流入する傾向が見られる。逆に湾内からの流出時には淡路側湾奥からの暖水が大阪湾の西岸に沿って紀伊水道へ流出し、一方、落潮に反転して約1時間後より、深日側からの顕著な冷水の排出が認められる。

海水交換時の海水温の鉛直分布については定点観測地点P₁、P₂(図-27に示す)における海水温の鉛直分布の経時変化を示す図-32、図-33や、移動観測による各測点の水温鉛直分布を示す図-28からわかるように、友ヶ島南側のP₁点および湾内や湾奥においては、表層下数mの範囲に数mの厚さの顕著な温度勾配が認められるが、湾内流入時のP₂点(友ヶ島北側)の水温鉛直分布や、海峡周辺の測点においては、ほとんど水温の鉛直分布が一緒になっている。このことは、海水が友ヶ島水道北流時に鉛直方向に攪拌・混合されていることを意味するものと思われる。しかし、塩分については図-35のP₂点における鉛直分布経時変化に見られるように、常に濃度勾配が認められ、夏季の友ヶ島水道における海水の混合は、密度差を解消するまでは至っていないようである。

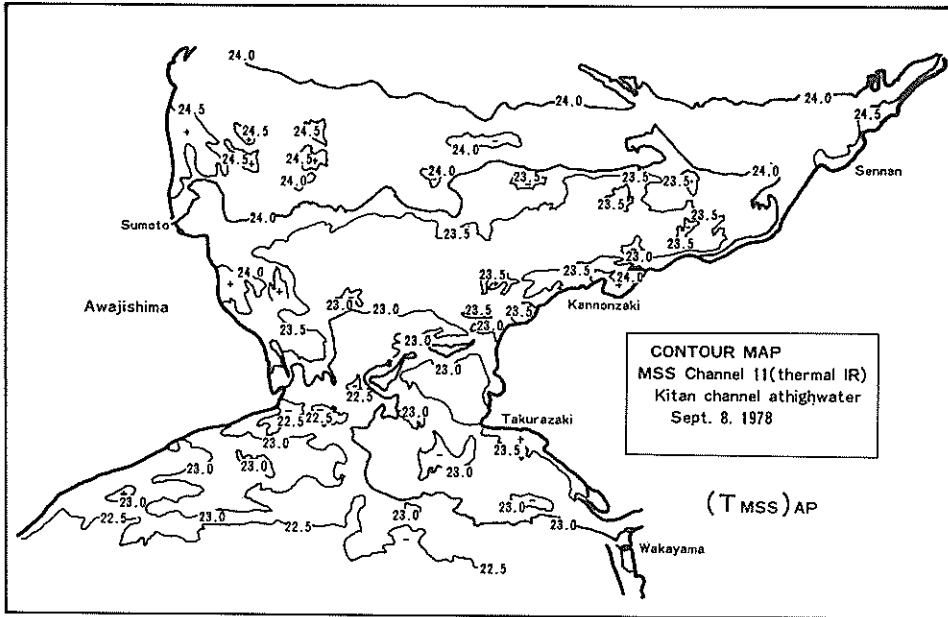


図-29 MSSのCCTによる表面水温(午後, 満潮)

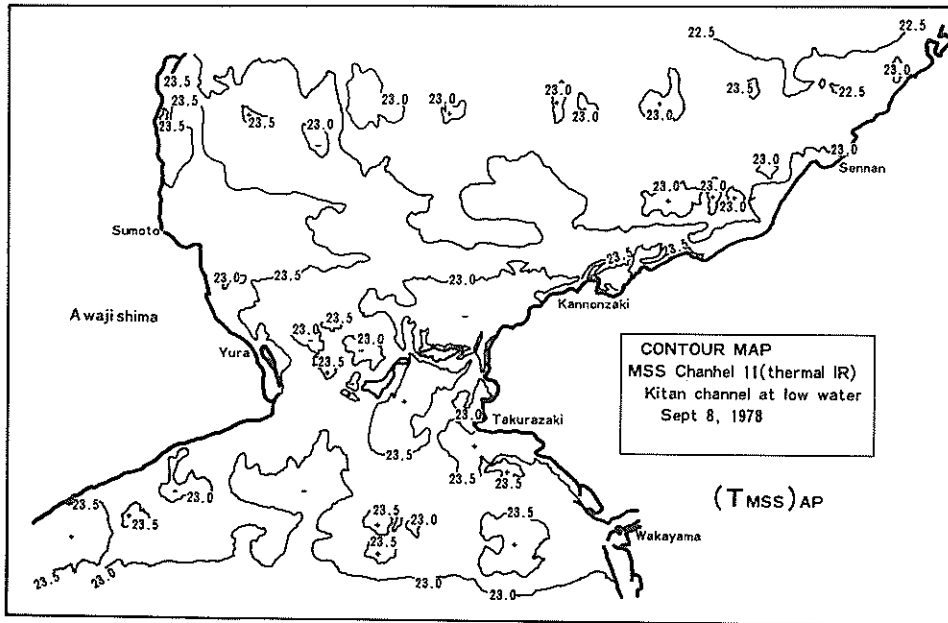


図-30 MSSのCCTによる表面水温(午前, 干潮)

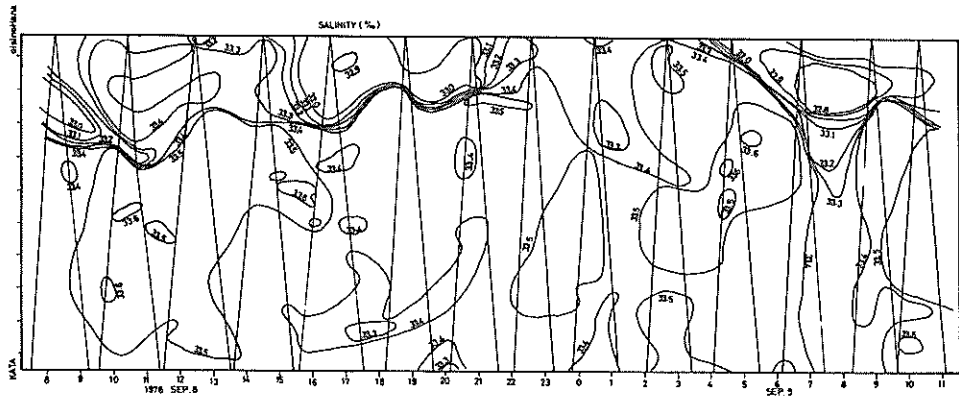
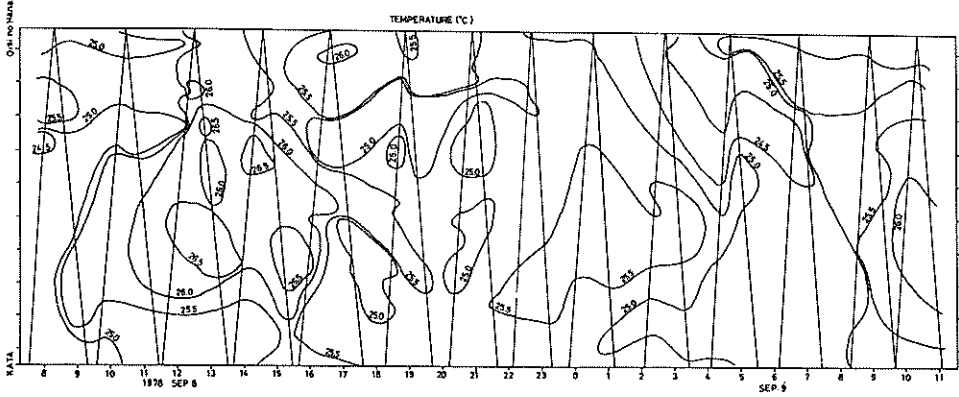


図-31 友ヶ島水道における水温・塩分の経時変化(上:水温, 下:塩分)

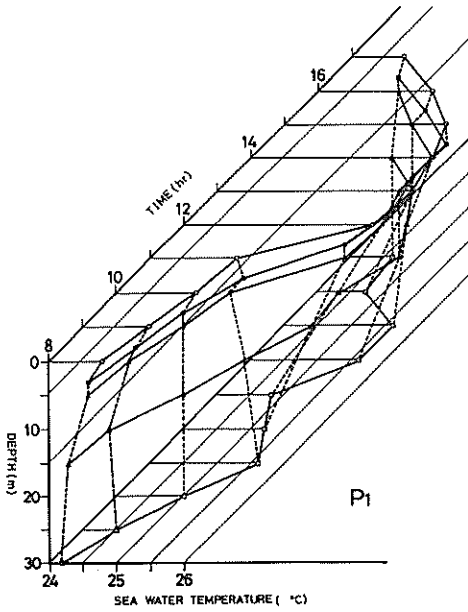


図-32 海水温鉛直経時変化(P₁)

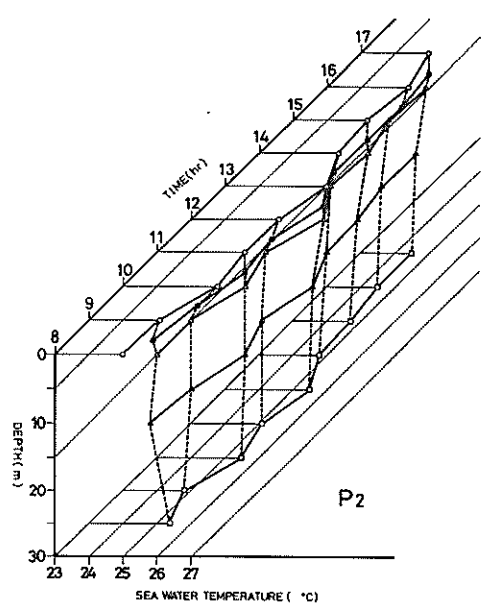


図-33 海水温鉛直経時変化(P₂)

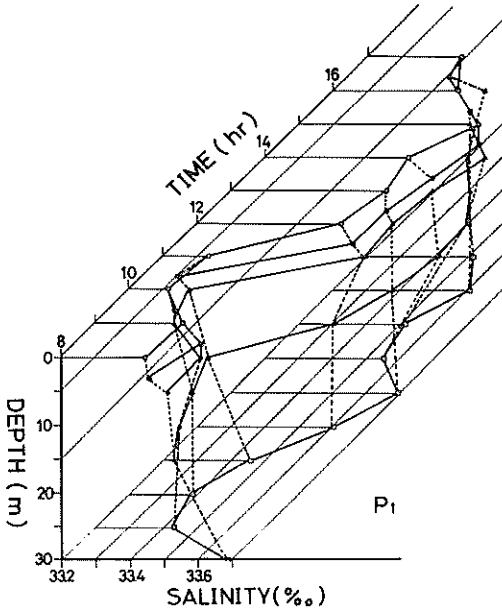


図-34 塩分量鉛直経時変化 (P₁)

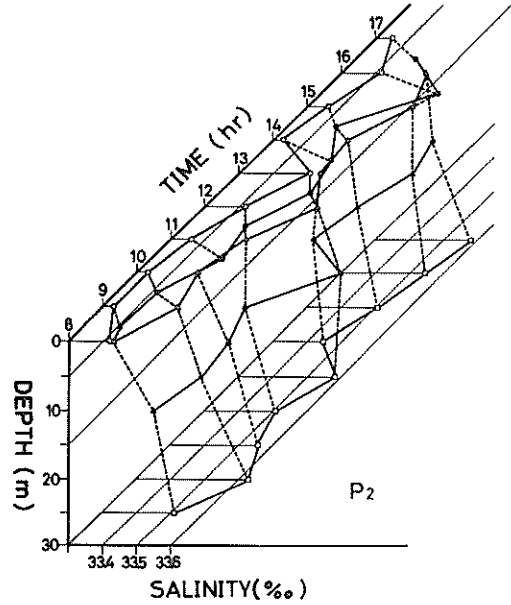


図-35 塩分量鉛直経時変化 (P₂)

以上に示したように、5か年間に行ったMSS測定および種々の現地観測によって、冬季と夏季の友ヶ島水道を通じての海水の流出入パターンをかなり明確に把握することができた。海峡部海水交換現象に関する研究としては水理模型実験による研究、LANDSAT リモートセンシングを利用した研究¹²⁾、数値シミュレーションによる研究¹³⁾等、種々の角度から活発に進められている。これらの研究の一部にも見られるように、海峡部の海水交換パターンは、潮流、潮汐残差流、密度流、吹送流などが複合された複雑な非線型パターンと考えられ、外的条件によっては異なるパターンとなることも考えられる。今後、種々の条件下で調査を繰り返し、パターンの生成過程、移動・拡散過程、および海水交換量等の定量的な把握に関する詳細な検討を行う必要がある。

3.3 大阪湾奥部における水質環境

港湾における主な汚濁源は、沿岸内陸域や海上からもたらされる陸水、排水あるいは投棄物等による直接的・間接的原因によるものであり、調査のあり方もこれら主汚濁源の排出・流入についての規制・処理の実態と密接な関係を有するものである。港内・航路等におけるこれらの沈澱、浮遊、溶出等の現象に関連し、底質もその供給源となるほか、短期的に見れば埋立・浚渫等の港湾工事に伴う浮遊土砂の排出等が汚濁源となる場合もあり、近年各所でこれら種々の調査が行われている。このほか、港湾における水質環境調査としては、ほかの海況調査と

併せて新たな海上施設等構造物の建設の影響および効果についての予測調査も行われている。

これらの調査において汚濁分布を測定する目的は、種々の汚濁源から流入する汚濁水が港湾域を介して混合、拡散、生化学作用を受けて稀釈されながら、段階的(地域的)な平衡状態に達しつつ自然海水へと浄化・回復する過程を追跡し、海水汚濁防止や海水浄化対策への方途を見出すことにある。

筆者らがMSSによる試行観測を行った大阪湾沿岸域(神戸~大阪~泉南海域)は、無数ともいえる上記汚濁源を有し、かつ港湾外かく施設(防波堤等)を含む極めて複雑な地形を有している。このため、この海域は水質についても地域的な相違を示し、また外洋に比べて輝度差が大きく、MSSによる観測が比較的容易である利点をもつが、現段階ではMSSデータと比較すべき適切な手法や指標が明確でないため、現地観測データにより補いつつ、水質環境の把握を試みざるを得ない。以下に大阪湾奥部における調査結果を概説する。

写真-9、10は1980年11月14日の観測で得たMSSのch.5およびch.11による測定画像である。写真-9は神戸~大阪、写真-10は大阪~泉大津を対象としたものである。観測は上げ潮時に行ったものであり、また前日ないし前々日にもほとんど降雨らしい降雨が記録されていないこともあって、著しい河川水の拡散現象はみられなかった。大川である淀川についても、観測当日の流



写真-9(a) 大阪湾奥部(神戸~大阪)のアナログ画像(ch.5)

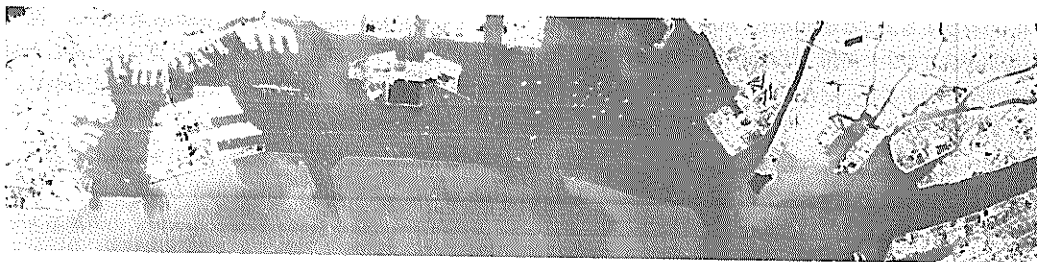


写真-9(b) 大阪湾奥部(神戸~大阪)のアナログ画像(ch.11)

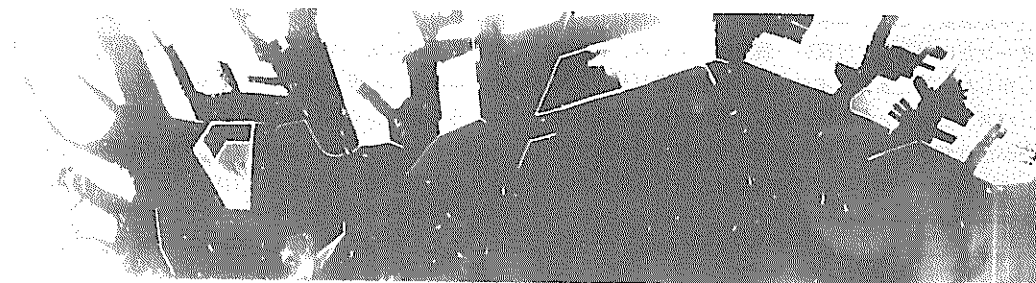


写真-10(a) 大阪湾奥部(大阪~泉大津)のアナログ画像(ch.5)

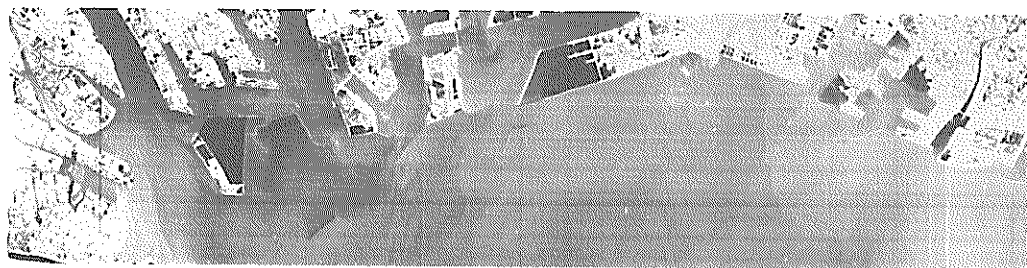


写真-10(b) 大阪湾奥部(大阪~泉大津)のアナログ画像(ch.11)

量が少ないため河口より外洋側への拡散パターンはほとんど認められず、一方、対象となった中小河川のうち、大阪湾への拡散パターンを最も明瞭に示す大和川でも外洋への広がりは予想に反して極く小さい。河川排水・拡散研究の主目的である淡水性汚濁物質負荷量把握へのリ

モートセンシング技術の適用性を検討するためには、降雨出水時のデータの取得が必要であろうと考えられる。

写真-9によると、神戸港沖の人工島では可視光画像に濁水の拡散の様子がみられる。しかしながら、同じ場所でも撮影時期によって異なった現象を呈することがあ

ることから、港湾工事等に伴う人為的要因によるものと思われる。また、防波堤・防潮堤等の海上構造物の存在により、水の流れが淀みやすくなる海域（大阪南港など）がある。こうした海域では周囲との海水交換が行なわれ難いため、冬季には夜間の冷却作用による水温の低下を生じ、周囲の海水との間に温度差が生じていることが赤外画像により確認できる（写真-9, 10, ch. 11）。したがって、周囲との水温差によって淀みの指標を与え得る可能性がある。また、構造物で囲われた海域の内側に河口の存在するような場所では、河川によって運ばれた汚濁物が淀みの中に滞留・沈澱すると考えられるが、特に濁度が急増するといった傾向は見られない（ch. 11とch. 5の比較による）。

図-36～図-37はそれぞれ写真-9と写真-10と同じ領域をCCT化してデジタル処理し、計算機によって自動図化したものである。処理手法は4.1に後述するLANDSA・MSSの処理手法と同一の手法を用いて処理を行った。図の(a), (b)はそれぞれch. 5, ch. 8の画像を示す。図中で等値線が密に詰っている領域は輝度レベルが急変している領域であり、写真に現われているパターンとの対応関係は良い一致を示している。

しかしながら、3.1で述べたように航空機MSSの場合、パスラジアンズの影響による走査角方向の輝度の増大はかなり大きく、この影響が図にも明瞭に現われている。すなわち、画像の中央部では輝度が低く、周辺部で

高くなっている。現段階では走査角方向のパスラジアンズ補正のアルゴリズムが完成していないため、ch.3/ch.4, ch.3/ch.5……ch.7/ch.8の種々の比演算処理を行い、結果を検討した。これらの結果の内、ch.5/ch.8の画像を図-38, 図-39に示す。3.1に示したように波長帯によってパスラジアンズの影響が異なるため完全な補正にはなっていないが、傾向的には沿岸域で輝度が高く、沖合に向かって低くなり、ある程度は補正し得たものと思われる。図-38では埋立地（図のほぼ中央の海に突出している白地の部分）周辺の土砂の拡散状況が、図-39では写真-9, ch.11の赤外画像に見られた高石市前面海域（写真右下隅の部分）の水塊が明瞭に現われている。

3回にわたって実施した観測の結果を総観的に眺めると以下のようにまとめることができる。

- ① 神戸～大阪～泉南の沿岸域を大阪湾の汚濁源とすると、外かく防波堤によって囲われた港湾の前面水域での汚濁は、神戸港、大阪本港付近にみられるように港内に比べ相当希釈されている。
- ② 対照的に、ほぼ直接的な河口を有する大和川、淀川等の前面海域や阪神防波堤内側の西宮前面には、明らかに陸域からの流入水（ch.11の水温差から判断される）による汚濁が強く現われている。
- ③ こうした傾向はこのほかの場所でもほぼ同様であり、また図-40に示す測点を対象として実施した海上観

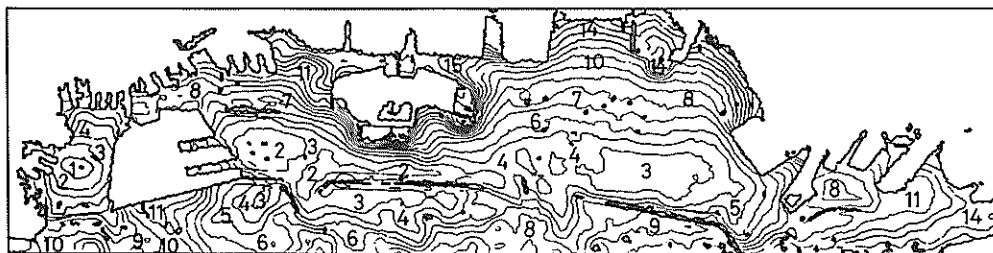


図-36(a) CCTによる等値線図（神戸～大阪, ch. 5）

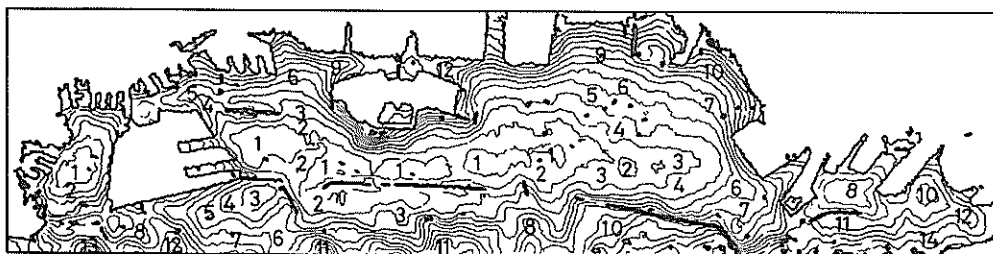


図-36(b) CCTによる等値線図（神戸～大阪, ch. 8）

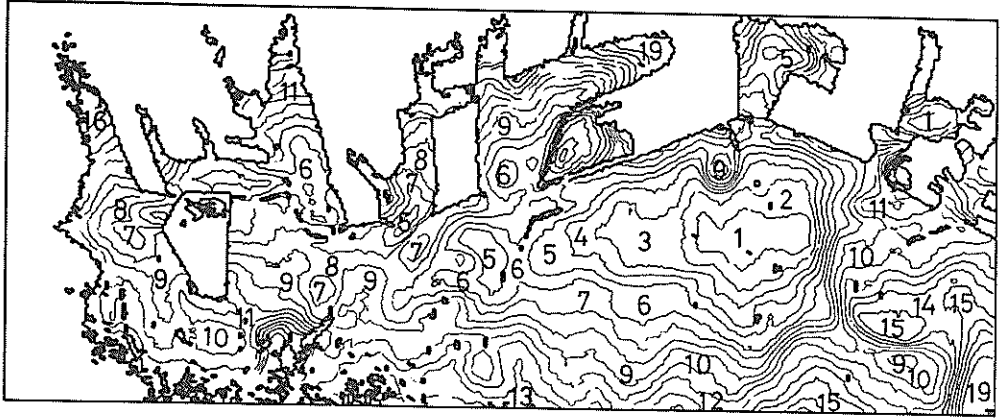


図-37(a) CCTによる等値線図(大阪~泉大津, ch. 5)

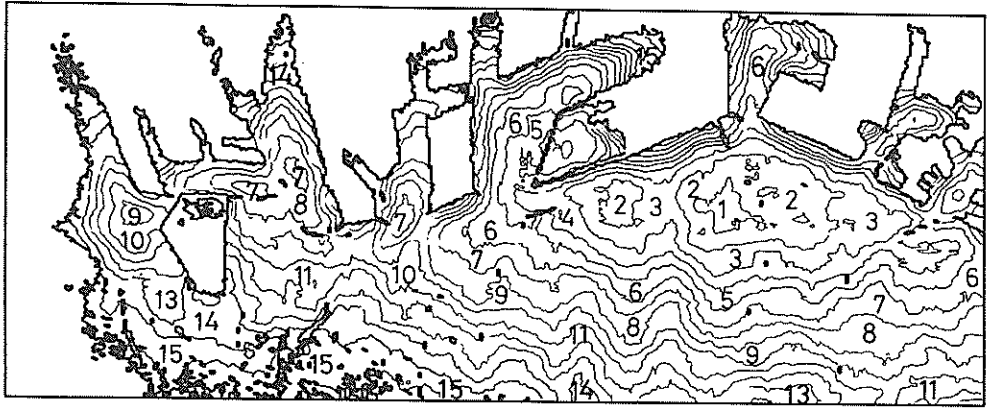


図-37(b) CCTによる等値線図(大阪~泉大津, ch. 8)

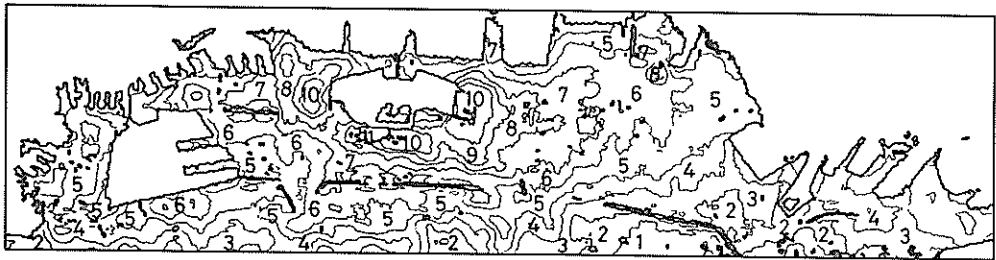


図-38 CCTによる等値線図(神戸~大阪, 比演算 ch. 5/ch. 8)

測結果からも明らかである。観測結果の一例を表-5 および図-41に示す。なお各測点の水質組成は観測時期によって若干異なった結果となっている。

表-6は1982年3月に実施した観測によって得られたMSSデータと海上観測による水質データ間の相関係数を示している。前述したように航空機によるMSS測定の場合、走査角方向の大気によるひずみは無視できない

程度であり、画像周辺部では何を測定しているのか判断できない結果となる。このため、ここではパスラジアンスの影響が小さい走査角 0° 付近のデータのみを使用することとした。このためにデータ数は5と少なく、表に示す結果は統計的な信頼性の面で十分とは言えないが、MSSデータの工学的な活用をはかる上で必要な基本的情報を提供するものとして統計処理を施すこととした。

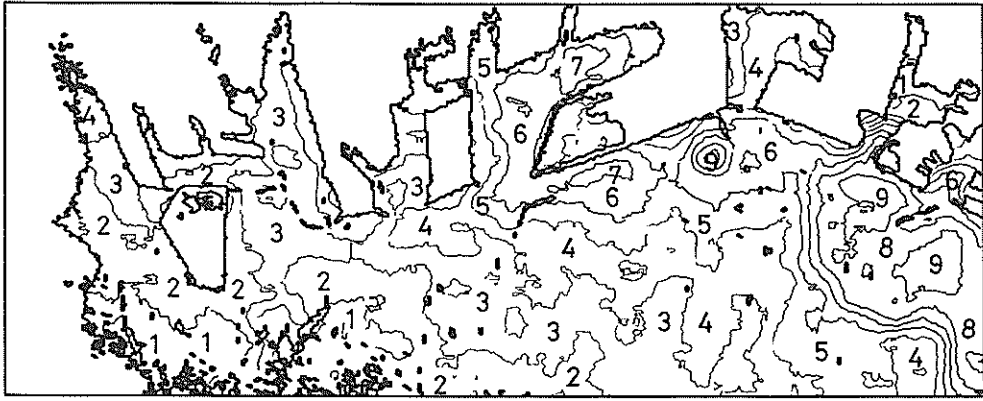


図-39 CCTによる等値線図(大阪~泉大津, 比演算 ch. 5/ch. 8)

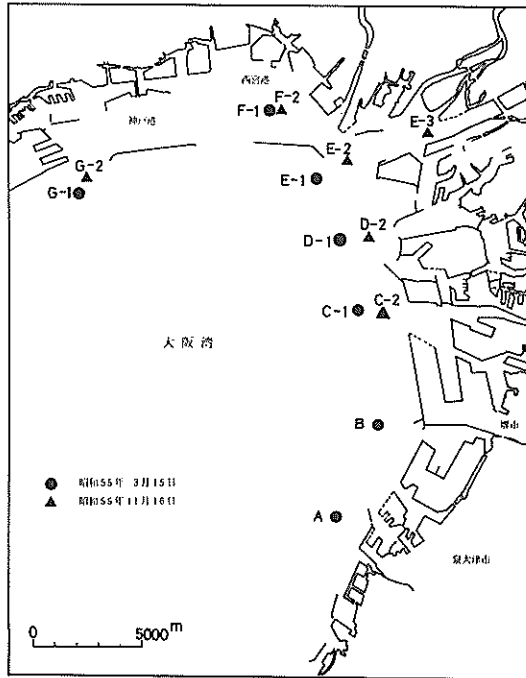


図-40 海上観測測点配置図

これによると、塩分、濁度、SSと可視チャンネルはかなり高い相関を有していることがわかる。ここで塩分に関しては、対象領域が淀川河口前面の水域であり、河川水の流入の影響が大きいことからこのような結果になったものであり、濁度とも負の強い相関となっている。なお、分析に用いた試料は図-42に示す各測点で採水したものである。

図-43は各測点で得られた濁度とMSSのch. 5の信号電圧の関係を図示したものであり、縦軸はppmで表

わした濁度を、横軸は電圧で表したch. 5の出力信号である。図から明らかなように濁度とch. 5の信号電圧の相関は高く、相関係数は0.985となっている。そこでこの関係を用いて濁度分布の抽出を試みた。

図-44は上記図-43に関係にしたがってMSSのch. 5から求めた濁度の分布図である。図中の数字は濁度をppmで表わしており、例えば5のときは4.5~5.5ppmの範囲にあることを意味している。しかし、得られた図はパスラジアンスの影響により走査角方向に輝度レ

表-5 大阪湾奥水質分析表

採水地点	分析項目	水温 (°C)	塩分 (%)	濁度 (ppm)	SS (mg/l)	TOC (mg/l)	PH	DO (mg/l)	COD (mg/l)	大腸菌群数 (MPN/100mg)	NO ₂ -N (mg/l)	NO ₃ -N (mg/l)	NH ₄ -N (mg/l)	有機-N (mg/l)	T-N (mg/l)	PO ₄ -P (mg/l)	T-P (mg/l)	Fe (mg/l)	Zn (mg/l)	SiO ₂ -Si (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	クロロフィル (μg/l)	水色	透明度 (m)
A (55.3.15)		9.0	31.271		4.4	9.4	8.39	10.2	1.1	240	0.01	0.09	0.05	0.45	0.60	0.035	0.04	0.003	0.36	2470				
B (")		9.0	30.964		5.6	8.2	8.28	10.5	1.3	110	0.02	0.14	0.24	0.49	0.89	0.040	0.088	0.10	0.009	0.45	2480			
C-1(")		9.6	23.394		10.5	10.2	8.43	9.9	2.2	540	0.05	0.27	1.41	0.66	2.39	0.150	0.204	0.21	0.017	1.12	2050			
-2(55.11.16)		17.7	28.78		3.3	8.21	6.9	2.1	540	0.06	0.29	0.91	0.39	1.65	1.01	0.07	0.12	0.068	0.029	1.41	2284	4.29	13	4.0
D-1(55.3.15)		9.1	25.671		4.9	7.6	8.23	9.0	1.0	350	0.02	0.15	0.56	0.28	1.01	0.104	0.121	0.07	0.055	0.92	2320			
-2(55.11.16)		17.1	26.70		3.1	8.39	8.0	2.6	540	0.05	0.23	0.52	0.29	1.09	0.06	0.12	0.109	0.026	1.07	2041	7.23	16	2.3	
E-1(55.3.15)		9.8	28.597		5.7	9.4	8.00	8.9	1.5	540	0.04	0.25	1.35	0.31	1.95	0.149	0.177	0.17	0.014	1.65	1970			
-2(55.11.16)		16.5	24.28		3.1	8.33	8.7	3.1	1600	0.09	0.44	1.32	0.38	2.22	0.13	0.22	0.176	0.021	2.03	1914	12.04	17	2.3	
F-1(55.3.15)		9.3	31.090		10.2	8.44	10.3	3.9	920	0.08	0.30	1.13	1.02	2.53	0.09	0.23	0.131	0.023	2.13	1954	6.58	18	1.5	
-2(55.11.16)		16.9	26.52		2.4	8.1	8.30	10.4	1.6	220	0.02	0.16	0.56	0.19	0.93	0.084	0.104	0.06	0.009	0.77	2270			
G-1(55.3.15)		8.8	26.267		4.3	6.0	8.42	11.2	1.0	380	0.01	0.07	0.15	0.26	0.49	0.038	0.057	0.06	0.016	0.39	2440			
-2(55.11.16)		16.7	28.27		2.7	4.5	8.47	9.9	2.8	220	0.04	0.11	0.36	0.38	0.89	0.03	0.11	0.053	0.013	0.52	2218	6.93	15	2.5
H (55.11.17)		18.6	31.99		1.0	2.4		8.0	2.0	33	0.01	0.07	0.08	0.11	0.27		0.03	0.026	0.012	0.72	2482	3.39	7	6.0

注) 採水時刻 55.3.15, 09:30~12:40 (A→Gの順), 55.11.16, 10:43~13:24 (C→Gの順), 55.11.17, 09:51 (H)
 注) ND項目(定額限界以下) : CN, Cd, Pb, F, Cr, AS, T-Hg, Mn, Cu, N, フェノール, Cr⁶⁺(55.3.15採水)

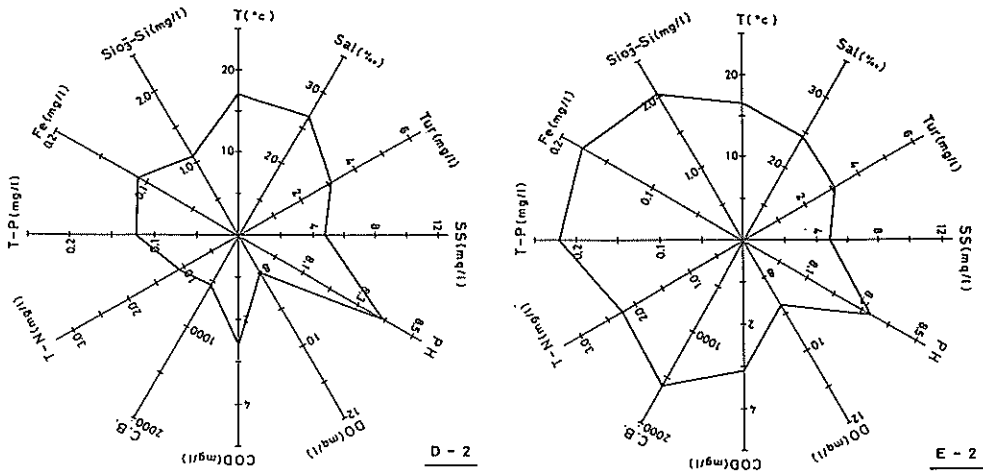


図-41 水質組成分析結果（左：D-2点大阪本港沖，右：E-2点淀川河口沖）

表-6 MSS データおよび水質データの相関係数

	水温	塩分	濁度	COD	SS	透明度	CH. 3	CH. 5	CH. 7	CH. 8	CH.11
水温		0.226	-0.032	0.426	-0.123	0.256	-0.060	-0.075	0.016	-0.247	0.607
塩分	0.226		-0.953	0.433	-0.812	0.755	-0.984	-0.983	-0.967	-0.956	0.846
濁度	-0.032	-0.953		-0.152	0.923	-0.851	0.967	0.985	0.969	0.836	-0.801
COD	0.426	0.433	-0.152		0.155	-0.172	-0.380	-0.312	-0.333	-0.669	0.243
SS	-0.123	-0.812	0.923	0.155		-0.973	0.803	0.852	0.804	0.604	-0.845
透明度	0.256	0.755	-0.851	-0.172	-0.973		-0.711	-0.768	-0.700	-0.541	0.874
CH. 3	-0.060	-0.984	0.967	-0.380	0.803	-0.711		0.996	0.997	0.938	-0.758
CH. 5	-0.075	-0.983	0.985	-0.312	0.852	-0.768	0.996		0.993	0.913	-0.792
CH. 7	0.016	-0.967	0.969	-0.333	0.804	-0.700	0.997	0.993		0.914	-0.719
CH. 8	-0.247	-0.956	0.836	-0.669	0.604	-0.541	0.938	0.913	0.914		-0.729
CH.11	0.607	0.846	-0.801	0.243	-0.845	0.874	-0.758	-0.792	-0.719	-0.729	

ベルが増大しており、濁度分布にひずみを生じている。図-45は走査角方向の輝度レベル変化の平均値を示したものである。まずCCTに収録したデータから2000ラインを抽出し、各ラインごとに陸域部分を取り除いた海域部分のみを抽出して移動平均を施し、最終的に2000ラインを平均して求めたものである。図-45の走査角方向の変化分を補正值としてもとのCCT値から減ずることにより補正した結果を図-46に示す。このような手法によってどの程度補正し得たかは検証できないが、平面分布パターンはかなり異なったものとなっている。しかしながら、分布図右側の護岸等に沿った水域は一般に濁度が大きく、輝度レベルが沖合に比べて相対的に高いはずであるが、図では逆にになっていることからみて、さらに補正方法を検討する必要があるといえる。

ここで行った検討は、個々の水質指標とMSS各チャンネルに基づくものである。実際には種々の水質指標の複合されたものがMSSの各チャンネルの測定データの中に情報として含まれているはずであり、これらの情報を活用することにより適切な評価方法が期待される。そこで次節においては、多変量解析法を用いてこれら相互の関連性について定量的な検討を試みる。

3.4 多変量解析法によるMSSデータと水質データの相互関係について

MSSによって得られたデータは、種々の要素の複合された値として理解できる。この値から目的とする対象のレスポンス分だけを取り出すことはまず不可能に近いが、工学的な目的のためには、もしこの値をいくつかの線型結合によって近似することができるなら、統計的な

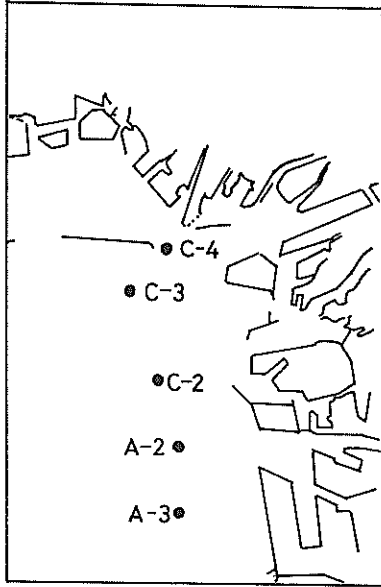


図-42 測定点配置図

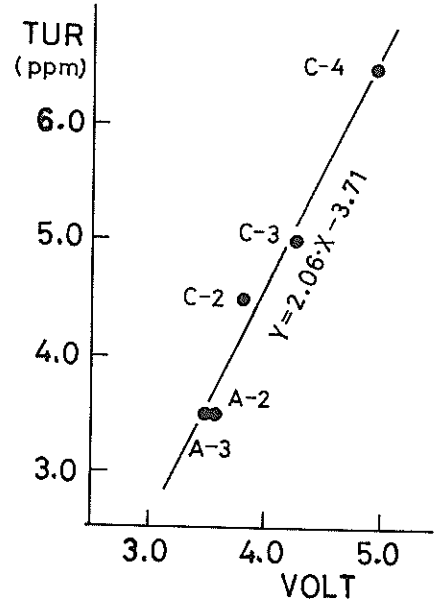


図-43 濁度とMSS ch. 5 信号電圧の関係

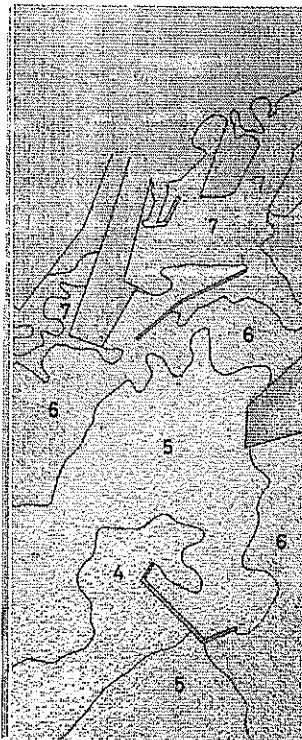


図-44 ch. 5 から求めた濁度分布図
(回帰式による：補正前)

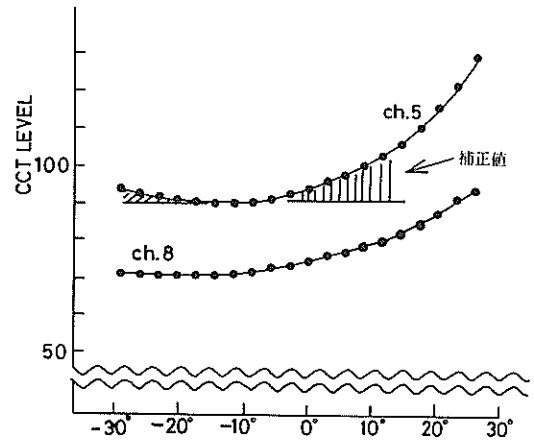


図-45 画角方向の平均輝度レベルの変化

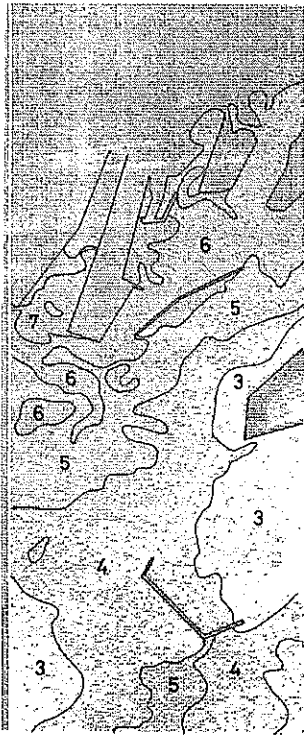


図-46 ch. 5から求めた濁度分布図
(回帰式による：補正後)

手法によりこの値のもつ意味・内容を理解することができる。また逆に、各要素及びMSS各チャンネルの測定値は互いに独立とは考えられないから、この値のままでは各地点間の比較をしたり、あるいは分布パターンを容易に理解することができない。したがって、MSSデータの持つ意味・内容を理解するためには、これらの値をユークリッド空間で表現可能なように変換することが必要となる。多変量解析法は、このような目的のために非常に有効な手段を提供する。

多変量解析法のうち、上述の目的に適したものとしては因子分析法と主成分分析法が代表的なものである。これらは共に、多変量からなるデータをより有意な直交する数少ない新変量に変換する手法である。しかしながら、因子分析法は新変量の数に対して数学的な基準がなく、この意味で解の一意性が保障されない。そこで、ここではシートルースデータおよびMSSの4チャンネルのデータ(ch. 3, 5, 7, 8)に主成分分析法を適用することとする。以下に主成分分析法の概要を示す。

いま、 M 個の変数からなる N 個のデータがあり、これから

得られる相関行列を R とする。ここで新しい変量を Z とし、 $Z = \phi_1 x_1 + \phi_2 x_2 + \dots + \phi_M x_M$ のように変数 x_i の線型結合により表現されるものとする。主成分分析法では変数 x_i の変動に対応して Z の変動が最大となるように係数 ϕ_i を推定する。ところが Z の変動は ϕ_i の値を適当にとりさえすればいくらかでも大きくなるため、 $\sum_{i=1}^M \phi_i^2 = 1$ という条件を付加する。このようにして ϕ_i を求めることは、行列方程式 $R\Phi = \lambda\Phi$ を解くことと等価である。ここに Φ は ϕ のベクトル表示、 λ はスカラー量である。もし $|R - \lambda I| \neq 0$ (I は単位ベクトル)であれば、この行列方程式には M 個の解が存在する。この解は $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_M$ であり、これらはそれぞれ固有値 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ に対応している。この結果、 $Z_i = \sum_{j=1}^M \phi_{ij} x_j$ で表現されることになり、 Z_i を第 i 主成分と呼ぶ。 $\frac{\sum_{j=1}^M \lambda_j}{\sum_{j=1}^M \lambda_j}$ は第 i 成分の累積寄与率と呼ばれ、第1～第 i 主成分により説明される分散の全変量の分散に対する割合を意味する。この結果得られた Z_i は互に無関係であるが Z_i の x_i への寄与の程度はわからない。そこで、 Z_i を x_i の共通の因子として $x = \mu + \sum_j a_j \cdot Z_j + e$ のようなモデルを想定して a_j を求めることにより各変数の各主成分への寄与を算定することにする。ここに a_j は因子負荷量と呼ばれ、 μ, e はそれぞれ x の期待値、確率誤差項である。 a_j は主成分 Z_j の持つ意味を解釈するのに用いられる量でもあり、その解釈をより容易にするために a_j の各行列の分散が最大になるように因子軸の回転を行う。ここではバリマックス法を用いることとした。なお、固有値・固有ベクトルの計算はヤコビ法により、また逆行列の計算はガウス・ジョルダン法により行っている。

以下に主成分分析の適用目的を示す。

- ① 水質に関するシートルースデータ(水温、濁度、塩分、COD、SS、透明度)とMSSの4チャンネル(ch. 3, 5, 7, 8)データ間の共通性を調べ、MSSデータに含まれる情報量及び意味を把握する。
- ② MSSの4チャンネルのデータ間の共通性を調べて波長帯の選択基準を知る。
- ③ 水質に関するシートルースデータ間の共通性を調べ、総合水質指標についての指針を得る。
- ④ シートルースデータ、あるいはMSSの4チャンネルのデータから沿岸各地点の特性を把握し、地点分類のための指標を得る。

なお、ここで解析の対象としたのは図-42に示す大阪港沖の5地点における1982年3月の観測データである。すなわち、限られた時間帯および限られた水域で得られたものであるため、必然的にここに示す結果の適用範囲

も限定されることになる。また、ここでは光学的な指標と塩分、CODのように異なった指標を一体的に用いて検討を行っているが、上記の目的から明らかなように、ここではMSSの工学的な活用を重視していること、事前の調査により塩分、CODとMSSデータにかなりの共通性がみられたことなどからこのようなデータの取扱いを可とした。以下に上記各項目についての解析例を示す。

(1) 水質に関するシートルースデータとMSSの4チャンネルデータの共通性

まず、図-42に示す5地点におけるシートルースデータとMSSの4チャンネルのデータに主成分分析法を適用してみた。適用の結果得られた固有値および累積寄与率を表-7に示す。なお $Z_6 \sim Z_{10}$ については固有値がほぼ0に近いので省略した。表-7から、第1および第2主成分により全データの分散のほぼ90%を説明することがわかる。このことは上述の10変数に対する5地点のデータは、ほぼ Z_1 および Z_2 なる2つの変量により表現されることを意味する。換言すれば、これらのデータ(10変数からなるデータ)は、ほぼ2つの意味しかもないことになる。

表-8には、バリマックス回転後得られた因子負荷行列

表-7 固有値および累積寄与率

	固有値 λ	累積寄与率
Z_1	7.2475	0.7248
Z_2	1.6915	0.8939
Z_3	1.0330	0.9972
Z_4	0.0280	1.0000
Z_5	0.0000	1.0000

表-8 因子負荷行列

	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5
水温	0.0250	0.1572	-0.8623	0.0044	-0.0000
塩分	0.7839	0.2716	-0.1073	0.0237	0.0000
濁度	-0.8404	-0.0405	-0.0124	-0.0213	-0.0000
COD	0.0624	0.8594	-0.1670	-0.0138	0.0000
SS	-0.8023	0.2777	0.1507	-0.0278	-0.0000
透明度	0.7436	-0.3221	-0.2841	0.1611	-0.0000
CH.3	-0.7978	-0.2558	-0.0365	-0.0327	-0.0000
CH.5	-0.8176	-0.1857	-0.0119	0.0265	0.0001
CH.7	-0.7989	-0.2369	-0.1014	0.0503	-0.0000
CH.8	-0.6657	-0.5096	0.0704	-0.0307	0.0000

列を示す。これらの結果によると、どの変数も主成分に対する共通性(後述)が0.7を越えていることから、主成分分析に用いる変数として有意なものであると判断できる。

表-8の第1主成分に対する負荷のみを対象とすると、分析に用いた変数は大きく3つのグループに分類される。すなわち、

第1グループ;濁度, SS, ch.3, 5, 7, 8のMSSデータ

第2グループ;塩分, 透明度

第3グループ;水温, COD

である。

一方、第2主成分に対する負荷によると、第1主成分に対する場合ほど判然とは分類できないが、おおむね次のようになる。

第1グループ;透明度, ch.3, 5, 7, 8のMSSデータ

第2グループ;濁度

第3グループ;水温, 塩分, SS

第4グループ;COD

このように、MSSの各チャンネルのデータは第1、第2のいずれのグループも同じグループに属する結果となる。このことは、ここで用いたMSS各チャンネル間のデータの変動は、MSSデータとシートルースデータ間の変動に比べて非常に小さいこと、すなわちMSSデータは、各シートルースデータの複合された結果であると考えられることもできる。参考のため図-47に Z_1 および Z_2 に対する各変数の因子負荷量による散布図を示す。

以上より判断すると、水温は図-42に示す5地点の水質の変動を示すパラメータとしては不適当であり、CO

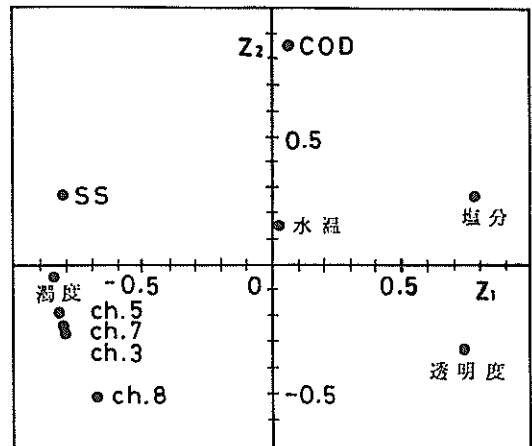


図-47 因子負荷量による各変数の散布図

Dは他のパラメータとかなり異質の情報を提供していることがわかる。またMSSデータと特に共通な性質を有するのは濁度とSSであり、これらはMSSによるリモートセンシング項目として妥当であると判断し得る。表-8から第1および第2主成分を意味づけると、

第1主成分 — 汚濁指標

第2主成分 — 化学物質の混入指標

となる。すなわち5地点での変動からは、汚濁指標と化学物質の混入程度を表わす指標により説明されることが推論される。しかし、その程度は表-7からわかるように、汚濁指標で圧倒的に大きい。

(2) MSSの4チャンネルデータ間の共通性

表-9には、MSSの4チャンネルデータをもとにして得られた固有値および累積寄与率を示す。表からわかるように Z_1 だけで全分散のほぼすべてを説明している。表-10にはMSSの4チャンネルデータの Z_1 および Z_2 の因子負荷量を、図-48には同じく Z_1 と Z_2 に対する因子負荷量を直交座標上に示す。

これらから判断すると、ch.3、5、7のデータは図-42の5地点に対してはほとんど同じ意味を持ち、ch.8のみがわずかに異なった特性を表わすことがわかる。したがって、これら4チャンネルに限定すれば、図-42の5地点に対してはch.3、5、7のいずれか1チャンネルと、ch.8の2つの波長帯で十分であると言える。これら4チャンネルのデータから得られる Z_1 および Z_2 の値（因子得点）により地点の分類を試みた例を図-49に示す。図-49によると、MSSデータによって各地点の水質特性を一応は分類できるが、より明瞭に分類するためにはシートルースデータとの対応関係を明らかにするこ

表-9 固有値および累積寄与率

	固有値 λ	累積寄与率
Z_1	3.8752	0.9705
Z_2	0.1180	1.0000
Z_3	0.0068	1.0000
Z_4	0.0000	1.0000

表-10 因子負荷量

	Z_1	Z_2
CH. 3	0.5514	0.4341
CH. 5	0.5738	0.3953
CH. 7	0.5701	0.4012
CH. 8	0.3783	0.6176

とが重要であると考えられる。すなわち、これによって図-49のスケールが拡大されMSSデータの実用的な活用が促進されることが期待される。

(3) シートルースデータ間の共通性

表-8に示すシートルースによって得られた水質に関する変数に対して(1)、(2)と同様に主成分分析法を適用した。表-11には固有値および累積寄与率を、表-12にはバリマックス回転後の Z_1 、 Z_2 、 Z_3 に対する因子負荷量を示す。表-11からわかるように、ここで用いられた水質に関する6変数は、5地点での変動からほぼ3つの主成分にまとめられ、内、 Z_1 および Z_2 で90%を占める。分析結果によると、 Z_1 、 Z_2 および Z_3 は $x_1 \sim x_6$ の線型結

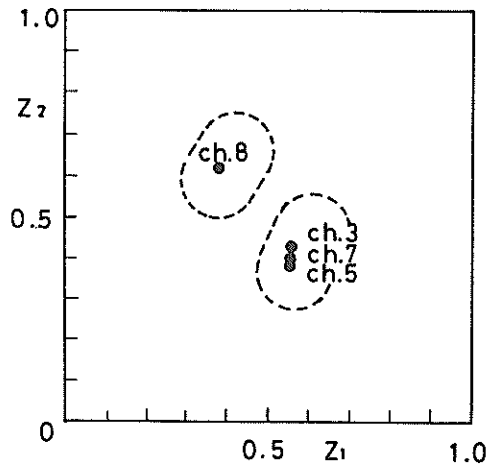


図-48 MSS各チャンネルデータの散布図

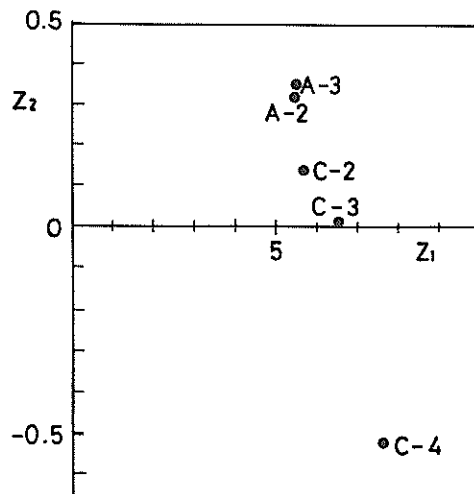


図-49 因子得点による地点分類(MSSデータ)

表-11 固有値および累積寄与率

	固有値 λ	累積寄与率
Z_1	3.6848	0.6157
Z_2	1.5089	0.8679
Z_3	0.7907	1.0000
Z_4	0.0157	1.0000
Z_5	0.0000	1.0000
Z_6	0.0000	1.0000

表-12 因子負荷行列

	Z_1	Z_2	Z_3
x_1 (水温)	0.0375	0.1589	0.7306
x_2 (塩分)	0.5927	0.3193	0.0321
x_3 (濁度)	-0.6514	-0.1278	0.0822
x_4 (COD)	-0.0173	0.7350	0.1672
x_5 (SS)	-0.6543	0.1399	-0.0469
x_6 (透明度)	0.6236	-0.1785	0.1613

合として次式で表される。

$$\left. \begin{aligned} Z_1 &= 0.127 x_1 + 0.489 x_2 - 0.505 x_3 \\ &\quad + 0.068 x_4 - 0.499 x_5 + 0.486 x_6 \\ Z_2 &= 0.570 x_1 + 0.193 x_2 + 0.054 x_3 \\ &\quad + 0.748 x_4 + 0.212 x_5 - 0.174 x_6 \\ Z_3 &= 0.754 x_1 - 0.284 x_2 + 0.267 x_3 \\ &\quad - 0.416 x_4 - 0.177 x_5 + 0.303 x_6 \end{aligned} \right\} (1)$$

ここに、 $x_1 \sim x_6$ は表-11に示す各変数に対応している

(1)式を表-12を参考にして整理すると、

$$\left. \begin{aligned} Z_1 &= 0.489 x_2 - 0.505 x_3 - 0.499 x_5 \\ &\quad + 0.486 x_6 \\ Z_2 &= 0.193 x_2 + 0.748 x_4 \\ Z_3 &= 0.754 x_1 \end{aligned} \right\} (2)$$

(2)式から判断すると、

$Z_1 \rightarrow$ 汚濁度, $Z_2 \rightarrow$ 化学物質の混入度,
 $Z_3 \rightarrow$ 温度指標,

のように各主成分を意味づけすることができる。

このように、6変数から成るシートルースデータはほぼ3つの指標に分れ、一方、(1)に示したようにMSSデータをこれに加えるとほぼ2つに分れる結果となったことは、ここで用いたMSSデータが温度に対する情報を含んでいないことを意味している。

(4) MSSデータおよびシートルースデータによる地点分類

図-50には、 Z_1 および Z_2 の値により前述の5地点を分類した例を示す。横軸および縦軸はそれぞれ(1)式の第1式、第2式に基づいて計算された値すなわち因子得点に対する軸である。図-50によると、各地点が水質の特性により良く分類されると考えられる。この結果は上述の Z_1 および Z_2 が水質の総合指標として優れていることを示唆している。また図-49と図-50を比較すると、地点の分類については同様の結果が得られており、図-49の座標スケールを拡大するうまい方法が見出せれば、MSSデータによってもシートルースデータに基づくのと同様の地点分類、換言すれば水質指標の平面分布パターンを知ることが予想される。すなわち、図-49、図-50から

$$Z_{1S} \leftrightarrow Z_{2M}, \quad Z_{2S} \leftrightarrow Z_{1M}$$

の変換公式が得られればよいことになる。ここに添字の S, M はそれぞれシートルースデータ、MSSデータに対応するものであることを示す。この変換公式の確立については、使用し得るデータが少ないこともあって今後の課題とするが、ここではその前段作業として、各シートルースデータとMSSデータ間の関係を調べ、MSSデータが各シートルースデータを説明するのにどの程度意味のある指標であるかを明らかにすることとした。

まず、シートルースデータのそれぞれとMSSの4つのチャンネル間の共通性を調べてみた。すなわち、各シートルースデータとMSSの4チャンネルの合計5変数を用いて主成分分析を行い、 $h_i = \sum_j a_{ij}^2$ で定義される

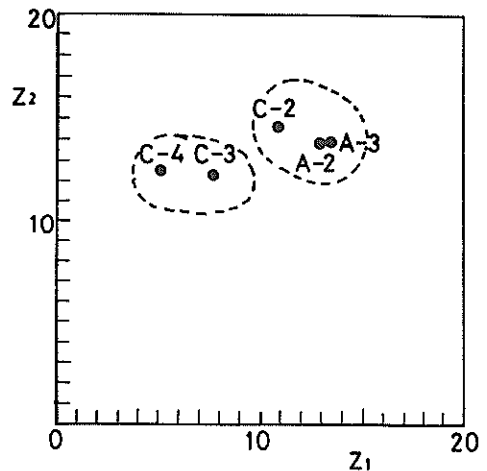


図-50 因子得点による地点分類 (シートルース)

共通度を算出した。この結果を表-13に示す。共通度 h_i は、各変数 i の分散が主成分によって説明される割合を意味しており、この値が小さければ小さい程、その変数はMSSとの対応関係がないことになる。表-13によると、共通度は濁度、SS、水温で特に大きく、COD、透明度についてもMSSデータとかなりの対応関係があることがわかる。

これらの対応関係をより明らかにするために、表-13に示す各変数を目的変数としMSSデータを説明変数として重回帰分析を行った。その結果を表-14に示す。なお、ここでは(2)に示した結果およびデータ数が少ないことを考慮して説明変数はMSSのch. 5とch. 8のみを採用し、また、回帰式としては線型結合式、すなわち $y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2$ (ここに、 $a_0 \sim a_2$ は回帰係数である)を用いた。

表-14から以下のことがわかる。

① 回帰式全体が5%の危険率で有意となるのは、塩分、濁度、CODの三つである。

② 5%の危険率でch. 5およびch. 8の説明変数としての有意性を検討すると表-15のようになる。ここで、表中、○印は有意であることを、×印は説明変数に対する帰無仮説が棄却されることを意味する。たとえば、水温についてはch. 5、ch. 8共パラメータとして意味がないことを、濁度に対してはch. 5のみが有意となることを意味する。

表-13と表-15を対応させると、以下のことが推論で

きる。

- 水温に対してはch. 5およびch. 8共非線型な関係にあること、
- 塩分に対してはch. 8を説明変数とすることは妥当でないが、ch. 5は非常に強い線型の関係および共通性を有すること、
- 濁度に対しては、ch. 8は非線型な関係にあるが、ch. 5は非常に強い線型の関係にあり、ch. 5、ch. 8共濁度と非常に強い共通性があること、
- CODはch. 5、ch. 8との間の共通度は低い、共に強い線型の関係があること、
- SSはch. 5、8との間の共通度は非常に高いが、ch. 5とは弱く、ch. 8とは強い非線型の関係にあること、
- 透明度はch. 5、ch. 8との共通度は比較的強く、共に非線型な関係にあること、

以上の考察により、ch. 5とch. 8のデータのいずれかと線型な関係にあり、かつ高い共通性を有するシートルースデータについては、ほぼ次のような回帰式で表わすことができる。

$$\text{塩分}(\%) = 57.77 - 7.78 C_5, \quad F = 85.8$$

$$(-9.265)$$

$$\text{濁度}(\text{ppm}) = -3.71 + 2.06 C_5, \quad F = 98.9$$

$$(9.943)$$

$$\text{COD}(\text{ppm}) = 6.54 + 1.21 C_5 - 5.90 C_8, \quad F = 39.4$$

$$(6.539)$$

ここに C_5 および C_8 はそれぞれMSSのch. 5およびch. 8のデータを意味し、いずれも出力電圧値(volt)

表-13 共通度

変数名	共通度
水 温	0.7036
塩 分	0.2770
濁 度	0.8325
C O D	0.4658
S S	0.7923
透 明 度	0.5020

表-15 説明変数の有意性

	ch. 5	ch. 8
水 温	×	×
塩 分	○	×
濁 度	○	×
C O D	○	○
S S	○	×
透 明 度	×	×

表-14 重回帰分析結果

y	切 片	回 帰 係 数		T 値		重相関係数	F 値	相対誤差
		ch. 5	ch. 8	ch. 5	ch. 8			
水 温	13.808	0.4770	-2.1352	0.5847	-0.6930	0.4447	0.247	2.507
塩 分	80.714	-5.2825	-10.7566	-3.4697	-1.8707	0.9938	80.445	1.663
濁 度	2.321	2.7427	-2.8281	8.7478	-2.3883	0.9962	129.798	1.886
C O D	16.354	1.2106	-5.8974	6.5387	-8.4341	0.9876	29.417	1.779
S S	9.643	1.3458	-2.9013	3.3382	-1.9055	0.9505	9.362	1.935
透 明 度	-4.525	-2.6744	5.7930	-1.8310	1.0499	0.8583	2.797	16.219

である。また、各式の下の()で示した数字は T 値、 F は F 値を意味する。

以上、シートルースデータとMSSデータに多変量解析法を応用することによって、図-42に示す局所水域におけるMSSデータの活用性について検討を行った。これにより、MSSデータの定量的活用法、MSSデータと水質データとの関連性、および総合水質指標についての具体的な成果を得たが、総合水質指標を構成するのに重要な一部のデータについては、MSSデータと非線型な関係があることが判明し、ここで示したような線型解析手法の全面的な活用には限界のあることが示唆された。今後さらに多くの水域に拡張してシートルースとMSSによる同時観測データの蓄積をはかり、MSSデータと水質指標の関係を明らかにすると共に、ここに示した結果の再現性、妥当性を検討し、また問題点として指摘されたMSSデータと一部水質データの非線型な関係を明らかにすることによって、航空機搭載MSSによる海洋環境調査手法の実用化を図ることとした。

4. LANDSAT・MSSによる大阪湾 水質環境把握の試行

地球観測衛星LANDSATは1972年7月に米国航空宇宙局(NASA)によって打ち上げられた。その後引き続き2号、3号が打ち上げられ、昨年(1982年)7月には4号が打ち上げられて、現在も地球表面の定期的な観測を続けている。我国においても、宇宙開発事業団による1979年のLANDSAT直接受信の開始を契機として、LANDSATデータは広い分野にわたり、応用されつつある¹⁰⁾。

LANDSATは18日(4号は16日)を1周期として同一コースを周回して観測を行っている。したがって同一地域については年間約20回の観測シーンが得られることになる。しかし、データ利用の面から見た場合、その全部が利用できるわけではなく、天候条件によって対象からの情報がマスクされたり、あるいは目的とする対象の所要・最適観測日、すなわち現象の生起日時と衛星による観測日時とのずれ等により、港湾関連分野に関しては実際利用可能であるのは年間数ケース程度と考えられる。したがって、月あるいは季節等にわたる時系列を対象とする詳細な解析は、なお困難な状況である。

しかしながら、LANDSATの観測シーン(画像範囲)は港湾における通常の調査対象領域をカバーして瞬時的に情報が得られるという利点がある。また、観測高度は地上約900 km(4号は700 km)と高いため途中大気の影響を受けることは多いが、航空機の場合に問題

となった走査角による大気歪は微小として無視できるという特徴がある。この点ではLANDSATにより得られる情報は実用化しやすいものと考えられる。

ここではLANDSATの有する上述の長所・短所を踏まえ、LANDSAT・CCT(MSS)を用いた港湾域での水質環境調査手法を検討するために、大阪湾における数種のLANDSAT・CCTの処理・解析を試みた。

4.1 解析方法

電子計算機によるLANDSATのMSS情報に基づく解析法としては、クラスタリングや類似度解析が有効とされ、主として閉鎖水域等を対象として種々の研究が行われている。しかしながら、LANDSATの4バンドの内、水域の情報を含むものは主としてバンド4とバンド5の2バンドであり、それら2バンドの水域情報には互いに強い相関があること、および水域の信号レベルは陸域に比べて著しく変動幅が小さく、通常5から多くても10レベルの幅しかないこと、また、シートルースデータがないことからトレーニングエリアの選定に不確かさが残ることなどから、ここでは別な角度から検討することとした。その一つとして、海域内に見られる水塊の分布を、主としてバンド4およびバンド5の画像情報を対象として信号レベルの等値線図によって描画する方法により解析することを試みた。港湾関連、特に内海湾における海洋調査へのMSSの応用という観点からは、在来の研究成果との接点を得るためにもカラーディスプレイ上に画像を出力するよりも自動製図機を用いて図面上に等値線を描画する方が望ましいと考えたからである。

図-51はLANDSAT 2号の大阪周辺のCCTデータ(1981年9月16日撮影)から海域部分をライン方向に抽出し、各バンドごとにその輝度レベルを図化したものである。これらの図に示すように、通常LANDSATデータは量子化ノイズ、あるいは海面の局所的な反射特性の差異のため、その輝度レベルはかなり乱れており、このままでは等値線を描画することはできない。

図-52はこれらのデータをもとにスペクトル計算を行った結果である。これらの図に見られるようにスペクトルの高周波側にいくつかのピークが見られ、特に $f \approx 0.35, 0.25, 0.11$ 付近に顕著なピークが認められる。この例ではこれはそれぞれ、3ライン、4ライン、9ラインごとにノイズの周期性があることを意味している。したがって、大局的な水塊分布形状を把握するためには、これらの短周期的ノイズを除去する必要がある。

図-53(a)~(d)はMSSの海域データをもとに全データおよび、1個おき、3個おき、5個おき、7個おきに

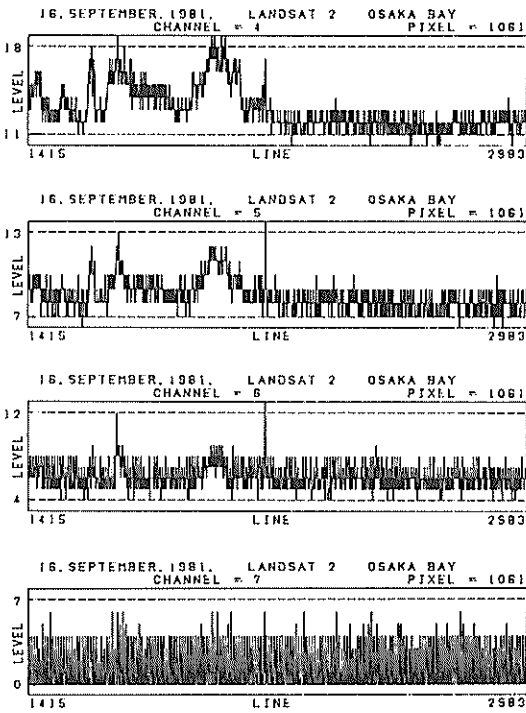


図-51 LANDSAT・MSSデータ(海域)

データをサンプリングして自己相関係数を計算した結果である。サンプリング間隔の違いによる微細な差異は認められるが、大局的には顕著な変化は認められない。したがって、この例では、この範囲内で数個おきにサンプリングしたデータを用いて水塊分布の解析を行っても、大局的にはあまり問題はないと考えられる。

以上にLANDSATの海域データの特性の一例を示したが、これらの特性を考慮して、解析プログラムの作成を行った。解析手順は次の4ステップから成る。

- ① 解析領域抽出処理
- ② 陸域・海域分離処理
- ③ 平滑化处理
- ④ 等値線描画処理

以下にこれらの処理手順の概略を述べる。

1) 解析領域抽出処理

LANDSAT・CCTの1シーン当りの画素数は約100万余りもあり、そのままでは扱いにくい。そこで対象とする海域を含む領域を指定し、その領域の中から解析しようとする現象の大きさに応じて適当なサンプリング間隔でデータを抽出する。抽出されたデータをもとに、4~7の各バンドごとに各輝度レベルの画素数を計算し、輝度ヒストグラムを作成する。

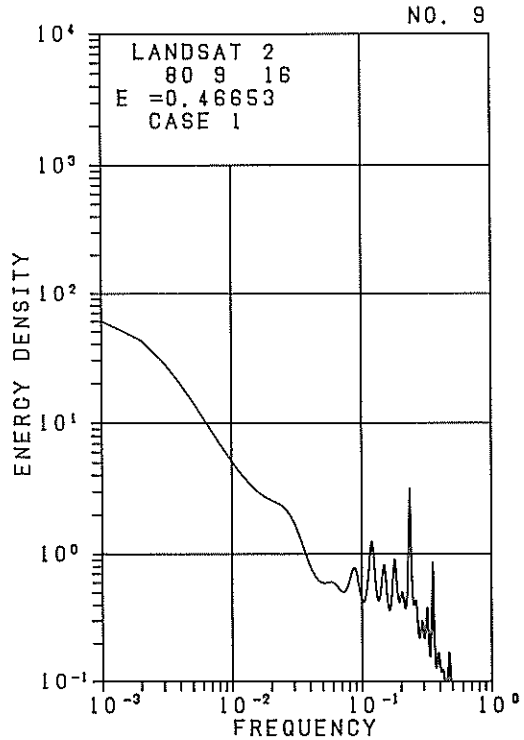
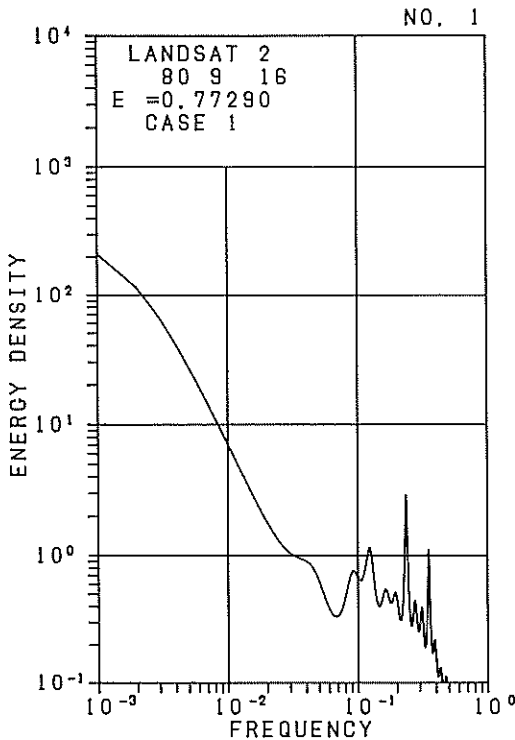


図-52 LANDSAT・MSSデータのスペクトル計算結果(バンド4)

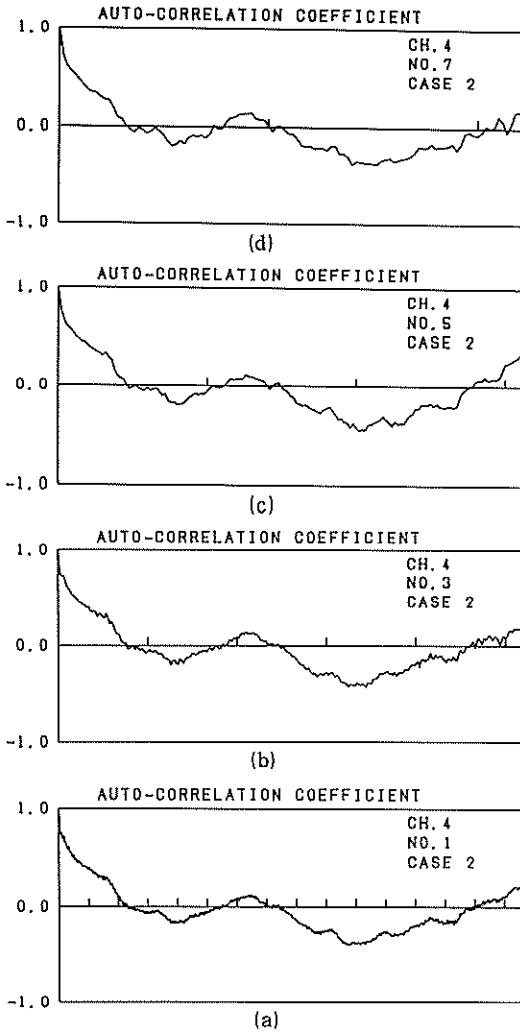


図-53 LANDSAT・MSSデータの自己相関係数

2) 陸域・海域分離処理

①で作成した輝度ヒストグラムのうち、バンド6, 7では陸域と海域はそれぞれ明瞭な異なるピークを持っているため、容易に両者の境界の輝度レベルを求めることができる¹⁵⁾。したがって、バンド7の陸域と海域の境界輝度レベル値を用い、それ以上の輝度レベルのデータは陸域として-1を与える。このようにして陸域・海域分離処理を行ったバンド7のデータを基に、他のバンドの画像データについても陸域に対応する位置のデータを-1に置き換えて陸域・海域分離処理を行う。また、この処理と並行して、①で求めたと同様にして海域部分のみのデータから輝度ヒストグラムを作成する。さらにこの輝度ヒストグラムの各頻度を百分率(%)で表わし、あ

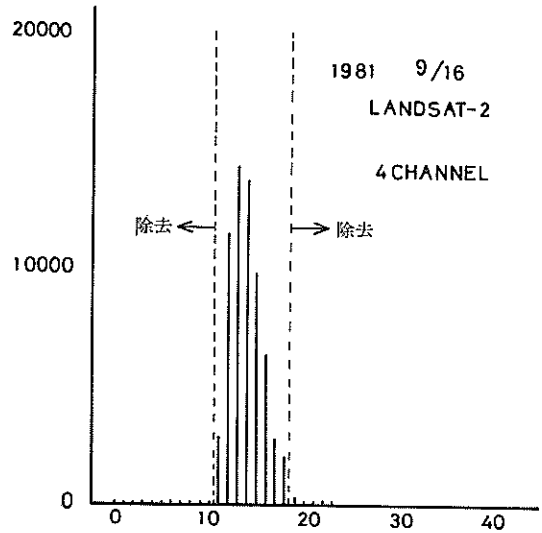


図-54 陸域・海域分離後の輝度ヒストグラム

らかじめ設定しておいた頻度(%)以下のデータを-1に置き換えて海域データから除去する(図-54)。これは前述のバンド7の境界輝度レベルによる陸域・海域分離処理では除去できなかったノイズと思われるデータを除去するための操作である。これによって後続の移動平均による平滑化処理において、ノイズの影響範囲が拡大し、実際の形状と異なる等値線となることを避けることができる。

最後に、以上の処理によって得られた輝度ヒストグラムをもとに海域の輝度レベルの平均値(μ)、および標準偏差(σ)を求め、各輝度レベルを $x' = (x - \mu) / \sigma$ によって正規化する。正規化した輝度レベルは後続の等値線描画処理でのいき(閾)値設定の際の目安とする。

3) 平滑化処理

平滑化の主目的は等値線描画のためのノイズの除去である。海域データは海面の状態によっても局所的に光の反射状態が異なっていると考えられ、通常マクロに平均した画像を眺めた方が、実際の現象パターンを把握しやすく、この目的のためにも平滑化処理を施している。

画像の平滑化には次の二つの方法がある。第一はデジタル画像に適当な数値オペレータを用いて行う方法である¹⁴⁾。第二は画像の周波数領域でフィルタリングを行う方法である¹⁶⁾。ここではプログラム作成の容易さ、計算の簡便さから、移動平均により平滑化を行うこととした。移動平均により平滑化を行う場合、輝度の絶対値そのものが失われるほか、平均領域内に周辺のデータと著しく異なるデータが混入している場合、その影響が周辺

にまで拡大し、実際とは異なる情報を付加する危険性がある。前者については等値線描画の際の閾値設定に工夫をこらすことによって、後者については②の処理で余分なノイズ成分を除去することによってそれらの悪影響は軽減される。

移動平均は 5×5 , 7×7 , …… 11×11 のように縦・横共に奇数の大きさのデータを単位として指定し、海域部分のデータに対してのみ行う。これは前処理により得られた陸域の境界のデータが移動平均処理によって歪みを受けることを防ぐことを目的としたものである。しかしながら、境界近傍の平滑化された海域データは、他の海域データに比べて平均個数が少なくなるため、移動平均後の境界近傍の輝度レベル分布は多少乱れた形状になる可能性があると考えられる。しかし、その乱れは画像全体から見ると無視できる程度である。

平滑化処理によってノイズはある程度除去されるが、一方では、整数データが実数化されるため、等値線描画処理の際の閾値の設定が不明確になる。そこで平滑化したデータについても、その平均値 (μ) および標準偏差 (σ) を求め、全データを $z = (x - \mu) / \sigma$ により正規化し、②で得られた正規化した輝度レベルを階級として用いて輝度ヒストグラムを作成し、②で得られた輝度ヒストグラムと比較を行う。図-55はこの一例であり、バンド4の輝度ヒストグラムである。図の(a)は移動平均前の、(b)は移動平均後のヒストグラムを表している。これらの結果により、元の画像データの輝度レベル値が平滑化後にはどの程度の数値に変換されたかが推定でき、これを基に後続の等値線描画処理の際のいき値設定を行う。

(4) 等値線描画処理

以上の前処理により得られた平滑化されたデータをもとに、筆者らの開発した多量データを対象とする等値線描画プログラム¹⁷⁾により等値線図を描画した。

4.2 解析結果および考察

解析に使用したLANDSAT・MSSデータを表-16に示す。これらのデータは大阪湾域においては、いずれも晴～快晴の気象条件で得られたデータである。

解析結果の例を図-57～図-61に示す。写真-11～写真-13はそれぞれ1981年9月16日、1980年4月3日、1980年9月3日に撮影されたLANDSAT・MSSのバンド4の画像であり、それぞれの図の(a), (d)に対応している。この結果によるいき値の設定はおおむね良好であり、等値線によって水塊の形状は明瞭に表現されている。また、図-57～59の(d)図はこのそれぞれについて、等値線を多数(29種)設定して描画したものである。写真に見られる濃淡の微細な変化はこの図では等値線の間隔で表現されており、等値線が密に詰っている所ほど濃淡変化の著しい領域であることを表す。写真上の微細な濃淡変

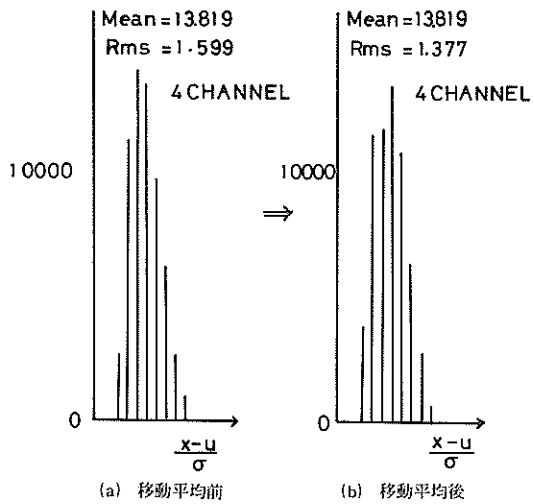


図-55 正規化した輝度ヒストグラム

表-16 解析に使用したLANDSAT・MSSデータ

No	年 月 日	機 種	GAIN	潮 流	
				友ヶ島水道	明石海峡
1	1979 3. 22	LANDSAT 3	HIGH	南 流	東 流
2	4. 18	LANDSAT 2	NORMAL	北 流	西 流
3	10. 15	"	"	南 流	東 流
4	1980 4. 3	LANDSAT 3	"	北 流	西 流
5	9. 3	LANDSAT 2	"	南 流	東 流
6	11. 14	"	HIGH	北 流	西 流
7	1981 4. 7	"	NORMAL	"	"
8	7. 24	"	"	—	東 流
9	9. 16	"	"	北 流	西 流

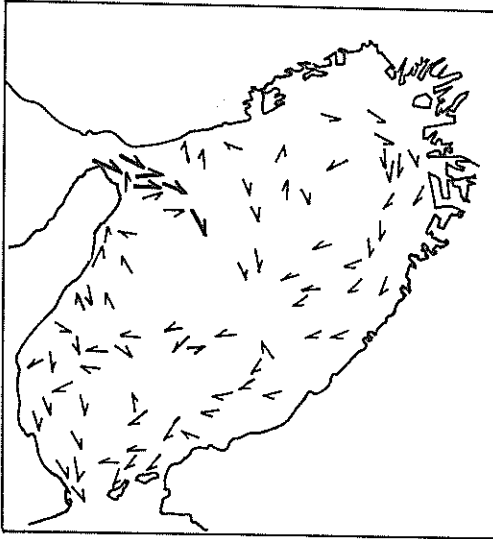


図-56 大阪湾恒流図

化を把握する上で極めて有効である。

また各図の(e), (f)はそれぞれ、友ヶ島水道および明石海峡のLANDSAT映像収集時の潮流状況を海上保安庁発行の潮汐表をもとに描いたものである。図中の黒丸はLANDSATの通過時刻を示している。人工衛星によるリモートセンシングの弱点の一つとして、経時変化のデータを得ることが難しい点が掲げられるが、リモートセンシングが把えた平面分布データに、潮流などの時間微分的な情報を加えることによって、分布の動的変化の推定や、なぜリモートセンシングが把えた分布が、その時形成されたか等を解釈することは、海洋リモートセンシングデータの判読上の必要最小限の条件である。

図-57は1981年9月16日に取得されたもので、友ヶ島水道では北流、明石海峡では西流の時刻のものである。バンド4の画像には、友ヶ島からの外洋水の流入によってもたらされた水塊が明りょうに現れている。また、観音崎から沖合に向かって水塊が蛇行しながら伸びているが、これと類似のパターンは航空機MSSによる観測データにも見られ、その発生位置がどのケースもほぼ一定であ



写真-11 LANDSAT映像(バンド4, 1981 9.16)

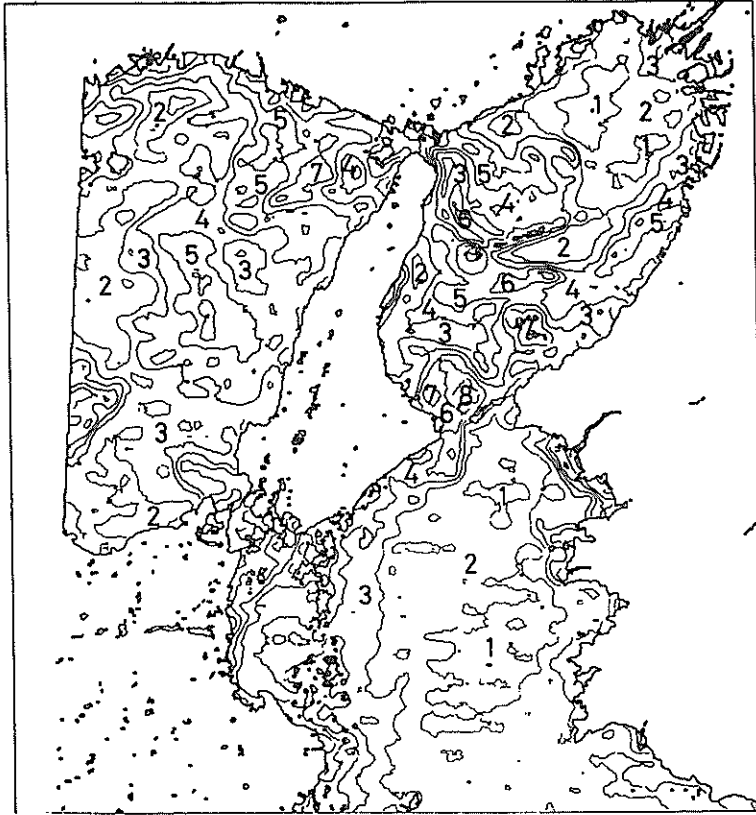


図-57(a) CCTによる等値線図(バンド4, 1981.9.16)

ることから見て、周辺および海底地形の影響によるものと推察される。このほか、明石海峡東側では当該観測時刻より前の東流によってもたらされたと思われる水塊が、かなり広い範囲に広がっている。これは1周期前の西流によって播磨灘水域に形成された反時計まわりの渦が、淡路島北西岸の鏡像効果によって自己誘導速度を得て生成したものと解釈されている¹⁸⁾。また、それを取り囲む帯状の濁水は1周期前に生成した大スケール渦の消滅を示すものとされている¹⁶⁾。藤原¹⁹⁾により明石海峡から東流で大阪湾内に入った播磨灘の水は海流が西流に転じて、行足を止めず、沖の瀬戸東方に播磨灘水塊を形成し、大阪湾水との境界に潮目を形成すること、および明石海峡を西流する水は淡路東岸と神戸沖の水であり、東流とは全く異った流路を通ること等が報告されている。この図はこれらのことを裏づけているようである。

バンド5の画像では、友ヶ島水道からの流入水は明瞭に現れているが、明石海峡からの流入水はぼやけている。また、バンド4では明瞭ではなかった大阪湾奥部の濁水がやや明瞭に現れている。岸和田市から南南西の方向

に輝度レベルの高い領域がのびているのが特徴的である。

図-57(c)はバンド4とバンド5の比をとり、上記と同様の手法により図化したものである。この場合、閾値の設定が不明確であるため、輝度レベルの平均値 μ 、および標準偏差 σ を用い、 $x' = (x - \mu) / \sigma = -2.25, -1.5, -0.75, 0, 0.75, 1.5, 2.25$ をいき値として等値線の描画を行った。ノイズの除去が完全ではなく、ライン方向に周期的な縞が見られるが、この図より水系を大まかに3つに分けることができる。1つは大阪湾湾奥海域で、この領域では、他の海域と比較してバンド4 / バンド5の輝度レベルは低い値をとる。この領域は岸和田市あたりから大阪湾中央部に向けて延びている。大阪湾の恒流図(図-56)によると淀川河口付近から南下する流れは泉佐野沖で友ヶ島水道から北上する流れとぶつかり、合流して北西に向っており¹⁹⁾、その影響によるものと思われる。他の水系は播磨灘および友ヶ島水道北部の海域で、バンド4 / バンド5のレベル値は大きな値となっている。また、紀伊水道では上記2つの水系の中間の値となっている。



図-57(b) CCTによる等値線図(バンド5, 1981 9.16)

図-58(a)~(d)は1980年4月3日に取得されたものであり、前例と同様に、友ヶ島水道では北流、明石海峡では西流の時刻のものである。(a)~(c)はそれぞれバンド4、バンド5、およびバンド4/バンド5の画像を示す。この例では前例ほど明瞭には水塊を把えていない。しかしながら、バンド4によって海峡部付近の水塊分布を、バンド5によって湾奥の濁水を把握することができる。またバンド4の画像中には大阪湾中央部および淡路島南岸沖に輝度レベルの低い領域が見られる。バンド4/バンド5の比演算結果は、前例図-57(c)とほぼ同じパターンとなっている。

図-59(a)~(d)は1980年9月3日に取得されたものであり、友ヶ島水道では南流、明石海峡では東流の時刻のものである。8月29~31日にかけてかなり広い範囲にわたって降雨があり、大阪では29日に82.5mm、31日に59.0mmの降雨が記録されている。この影響を受けて淀川、大津川の河口部付近には河川水の流出している様

子がよく現われている。淀川からの流出水の影響は、途中でいき値の設定幅からはずれる領域があり途切れた形状になっているが、神戸沖にまで達している様子がわかる。また、明石海峡東部では播磨灘から流入してきた水塊が特徴的な形状で広がっている。図-57と図-59に見られる水塊形状の違いは、藤原¹⁹⁾により報告されている西流および東流最強後1時の流況図によってうまく説明されるようである。このほか、友ヶ島水道では湾内の水が外洋へフラッシュ状に流出するパターンが見られる。なお、図-59(c)のバンド4/バンド5の比演算結果によると、湾奥部では前の2例と同様にバンド4/バンド5のレベル値は他の海域より低い値となっているが、紀伊水道側でバンド4/バンド5が高い値となり、播磨灘および友ヶ島北部の海域で前2者の中間の値となって、前の2例とは異なった結果となっている点が注目される。

図-60~図-61は1980年11月14日に取得されたハイゲイン画像である。友ヶ島水道では北流、明石海峡では西

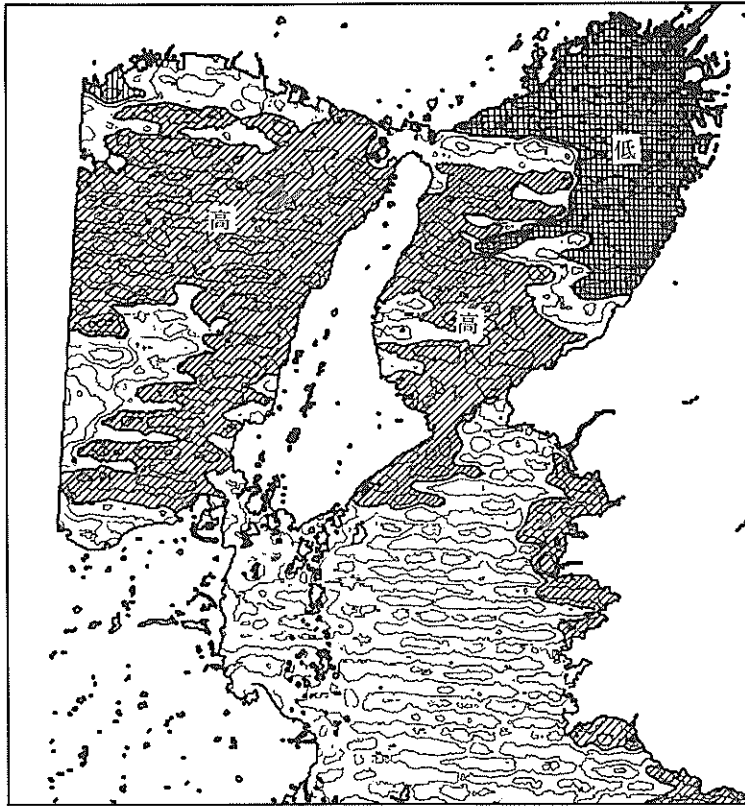


図-57(c) 比演算(バンド4/バンド5, 1981.9.16)

流の上げ潮時の画像であり、バンド4、バンド5とも大阪湾東岸に沿って輝度レベルの高い領域が存在している。また、バンド4画像では神戸沖から大阪湾中央部に向けて輝度の高い領域が連なっている。恒流図(図-56)によれば、ちょうどこの領域を挟んで東西にそれぞれ時計回りの流れがあり、この影響によるものと思われる。図-61は同一のデータを用い湾奥部を対象として描画したものである。バンド4、バンド5とも防波堤や護岸等に沿って輝度の高い水塊が分布している様子がよくわかる。バンド4の画像では淀川前面水域の輝度レベルよりも高石市前面水域の方がレベルが高いが、バンド5の画像では淀川前面水域の方がレベル値が高く現われており、水質の違いを示唆しているものと思われる。これら異種の水質を有する水塊の分布パターンを見るために、2次元ヒストグラム解析²⁾を試みた。図-62にバンド4とバンド5による2次元ヒストグラムを示す。水域の輝度レベルは連続的に変化しているため、単峰性のヒストグラムとなっているが、図よりわかるようにレベルの低い所と高い所でその勾配が異なっている。渡辺はこれを濁水層

の平均深度による違いと関連づけて考察している²⁾。試みに図-62中に示すようにA、B、C、Dの4領域に分けてその領域を抽出した結果を図-63に示す。図より河川およびその前面水域ではバンド4に対してバンド5が相対的に輝度レベルが高く現われていることがわかる。図-62でもバンド5の大きい所でヒストグラムの分布の勾配が大きくなり、バンド4に対してバンド5の変化幅が相対的に大きいことから、濃度の高い濁水についてはバンド5が有効であることを示唆しているように思われる。

なお、図-61は3.3に示した航空機MSSによる観測結果の図-36~39と同一の日時に行われたものである。航空機とLANDSATでは、センサの波長帯域、画角や分解能等に大きな違いがあり、一方では途中大気の影響も異なるので、両者から得られる情報を画一的に比較することはできない。しかしながら、両図に見られる神戸沖の人工島周辺の濁水や、高石市前面海域の水塊の分布パターン等の形状はほぼ一致しており、濃度の高い濁水に対するLANDSAT情報の有効性が確認された。なお、この水域を表すLANDSATのハイゲイン情報



図-57(d) CCTによる等値線図 (バンド4, 1981 9.16)

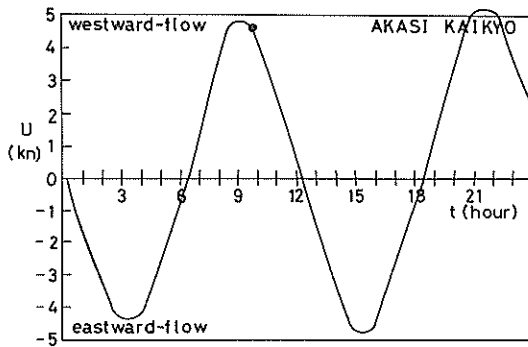


図-57(e) LANDSAT映像収集時の潮流状況
1981 9.16 (明石海峡)

のレベル幅は約10レベルであるのに対し、航空機の場合は約4倍のレベル幅となっており、画像の濃淡を表わす分解能には大きな違いがあることを付記しておく。画像に見られる個々の違いについてはシートルスデータがないため検証できないが、これについては今後のデータの蓄積をまって対応を図ってゆくこととした。

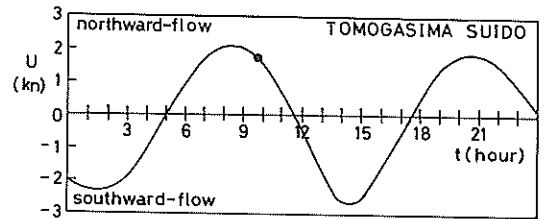


図-57(f) LANDSAT映像収集時の潮流条況
1981 9.16 (友ヶ島水道)

以上、解析したした9ケース内4ケースについて結果を概説した。LANDSAT・MSSによってもかなりの程度まで湾内の流況を把握でき、多角的な現象解明が可能であることがわかった。海峡部の海水交換現象や湾全体のマクロな現象把握にはバンド4の情報があり、沿岸の濃度の高い濁水域を対象とする場合はバンド5が有効である。また、沿岸域ではバンド4とバンド5の輝度レベルの分布パターンに明瞭な相違が見られる場合があり、複数バンドを使用する解析の必要性が示唆された。今後、クラスター分析等の統計的解析手法

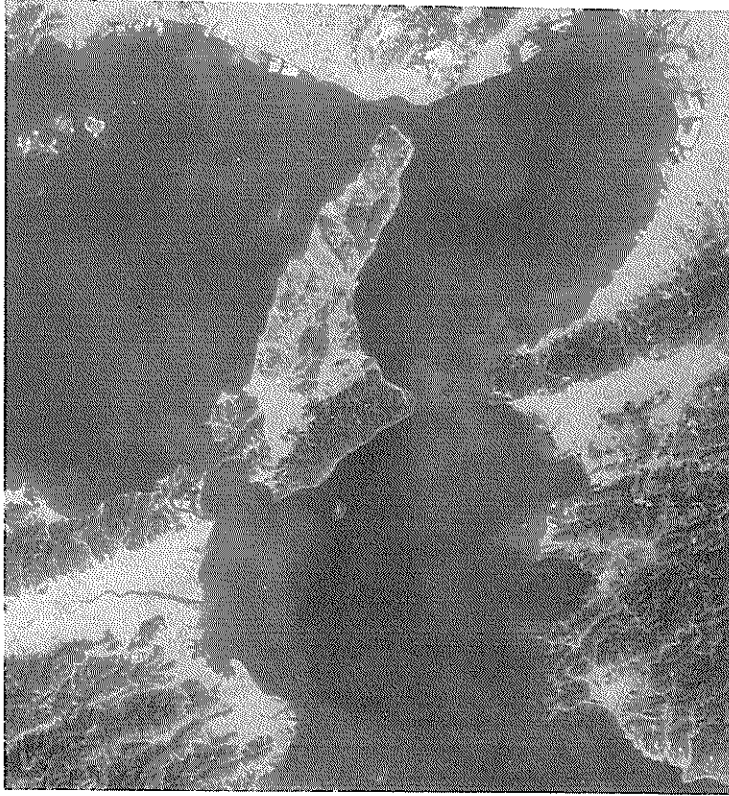


写真-12 LANDSAT映像(バンド4, 1980.4.3)

の導入が必要であろうと考える。

しかしながら、LANDSATデータを活用する場合、前述したように18日の周期と天候条件等が具合良く合致することはまれであり、こうした不確定要素のためにLANDSATデータの活用性を図る上で必要なシートルスデータを同時に取得することは極めて困難である。この意味で現段階ではLANDSATの活用には先立ち、適切なシートルス手法を開発し、その定常化をはかることが必要であるといえる。

5. 今後の課題

航空機あるいは人工衛星の利用によるリモートセンシング技術の海洋分野への応用は当初から多大の期待を持たれた分野であったが、陸域への応用に比べ汎用的な実用面ではなお開発・試行の域を脱し得ない状況にある。これは既に述べたように、測定の対象が常に水を介した複雑な要素から成り、信号およびその変化が微弱であること、さらに大気中の吸収・散乱あるいは雲や天空の輻射等の影響が顕著に現われやすいため、必然的に目標からの放射量の減衰(S/N 比)やコントラストの低下を

きたす度合が大きくなること等に起因する。これら大気の影響は波長帯に応じて、季節やその時々为天候、飛行コース、時刻、海面・気象状況によっても異なり、データの補正、定量的表示手法を確立することは容易ではない。

一方では、基礎的研究により理論的・実験的にデータ補正手法の確立が精力的に進められているが、容易に取得データを補正し得るような理想的測定条件が、望まれる観測条件の場と一致するようなチャンスが得がたい現実にもよるものである。

しかしながら、リモートセンシングによって取得されるデータが多様な情報量を有すること、在来観測手法によってはほとんど不可能であった広域事象の平面分布を直接測定し得ること等の利点を考えるとき、上記の問題点はこれら有益な情報の資質向上に直接的に影響してくる問題であり、今後、実利用的な見地からこの方面の研究に精力的に取り組むことによって、実効的なデータ補正、定量化手法の確立をはかる必要がある。

なお、本資料では特に触れなかったが、MSSにとらえられる画像は空中の光学的プロセスのみならず、水中の

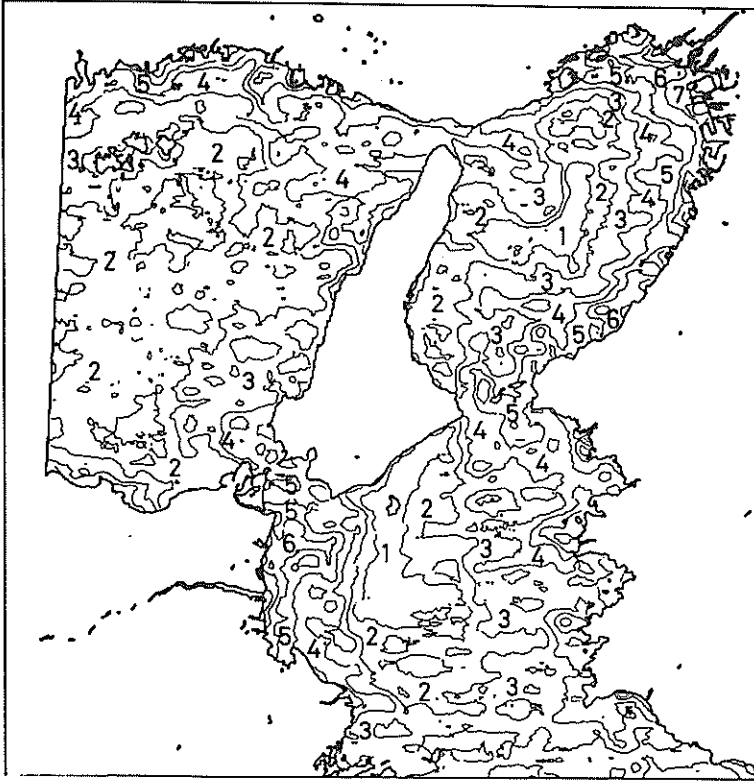


図-58(a) CCTによる等値線図
(バンド4, 1980 4.3)

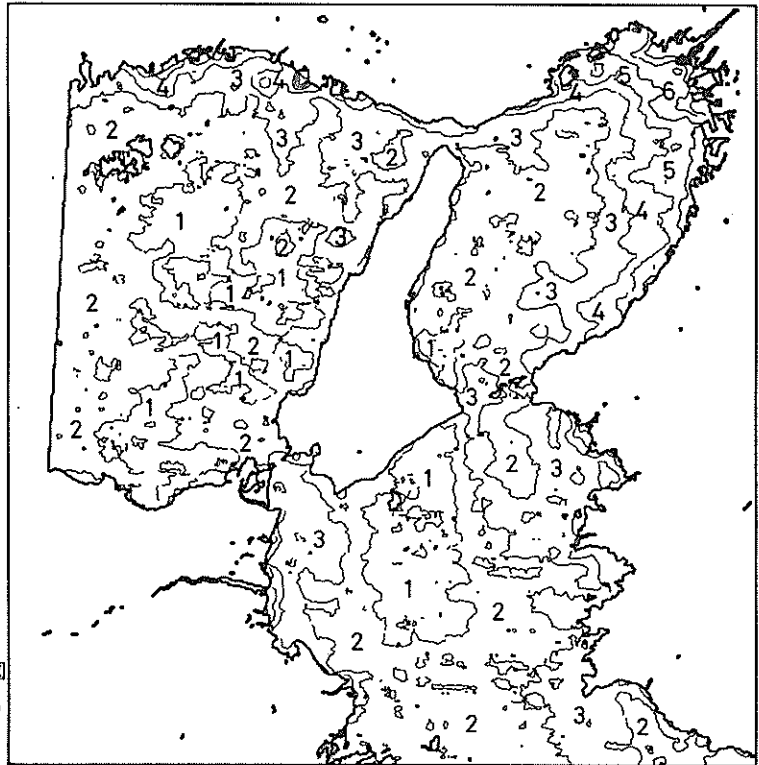


図-58(b) CCTによる等値線図
(バンド5, 1980 4.3)

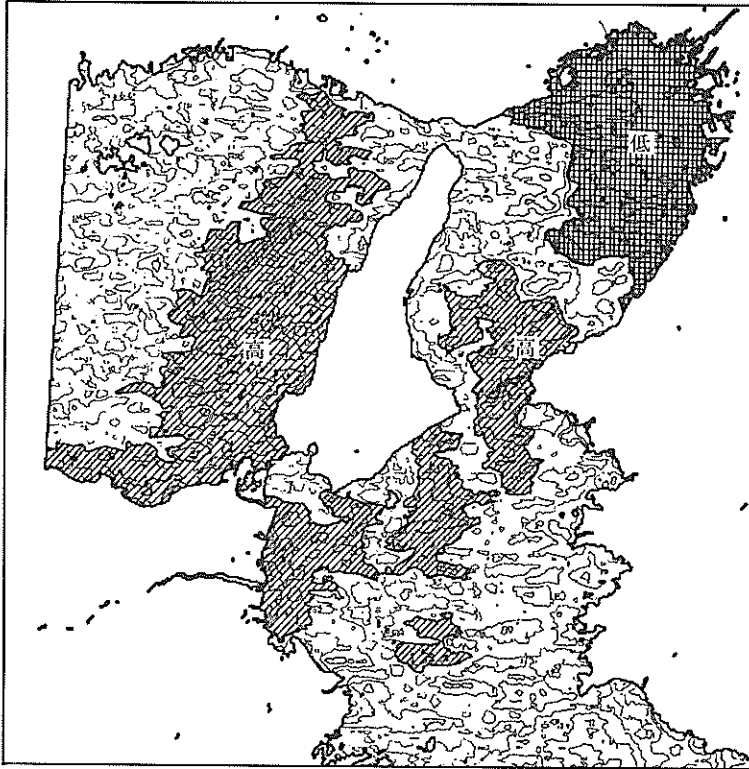


図-58(c) 比演算
 (バンド4 / バンド5
 1980.4.3)

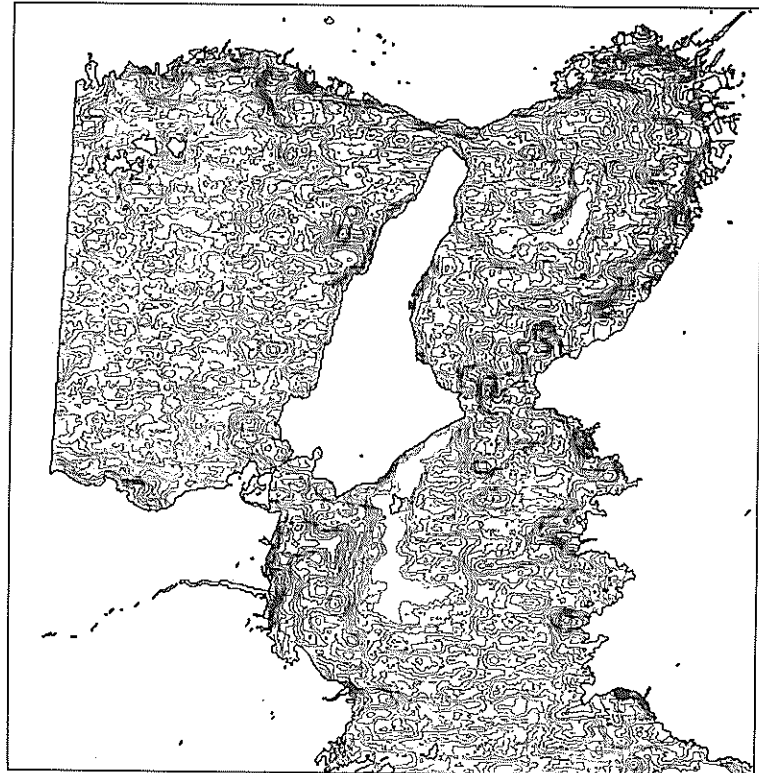


図-58(d) CCTによる等値線図
 (バンド4 1980.4.3)

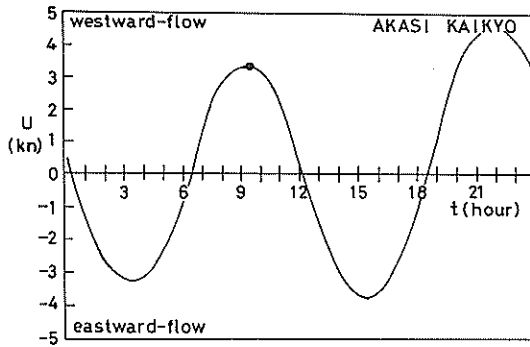


図-58(e) LANDSAT 映像収集時の潮流状況
1980 4.3 (明石海峡)

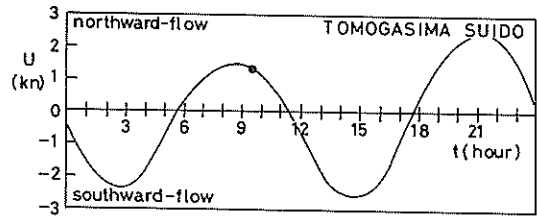


図-58(f) LANDSAT 映像収集時の潮流状況
1980 4.3 (友ヶ島水道)

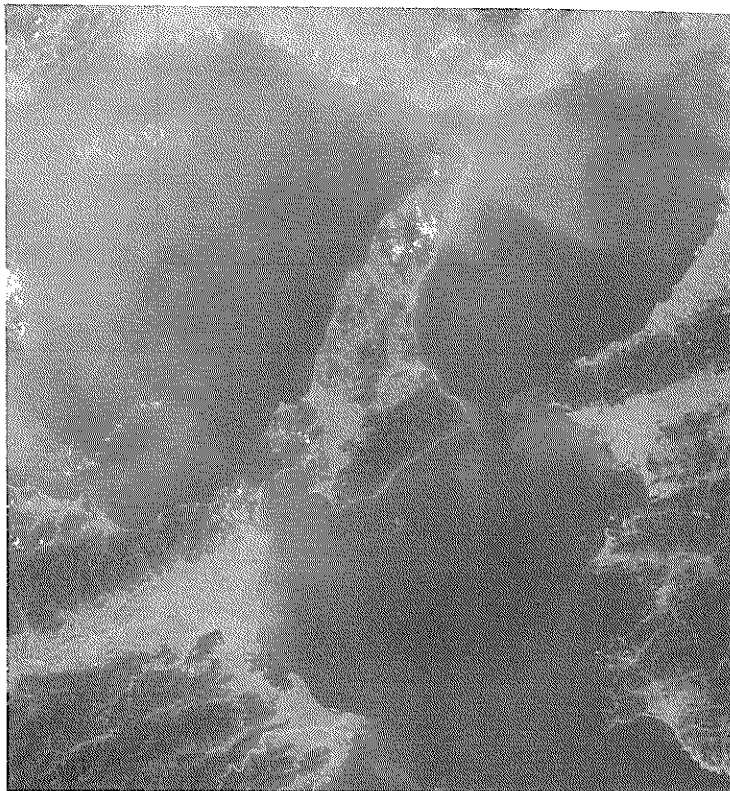


写真-13 LANDSAT 映像 (バンド4, 1980 9.3)

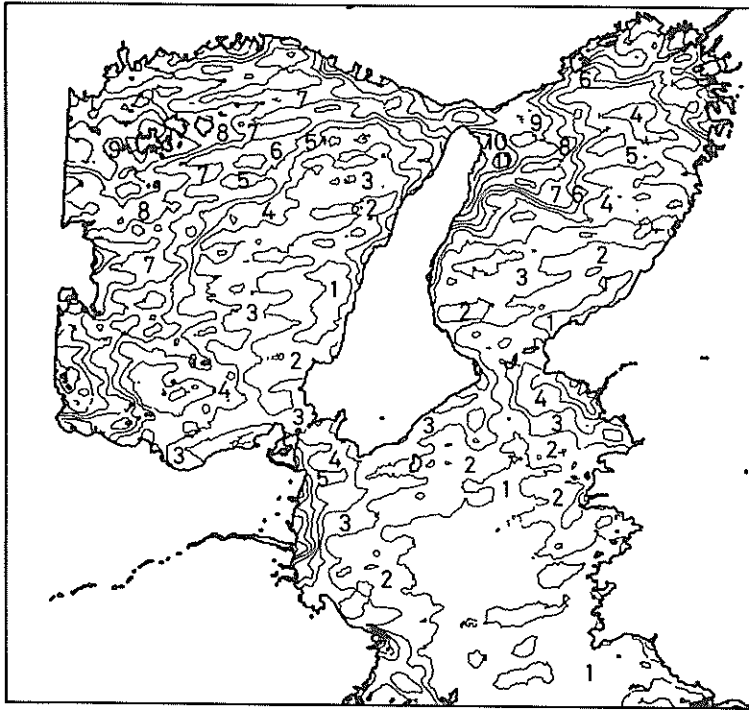


図-59(a) CCTによる等値線図(バンド4, 1980 9.3)

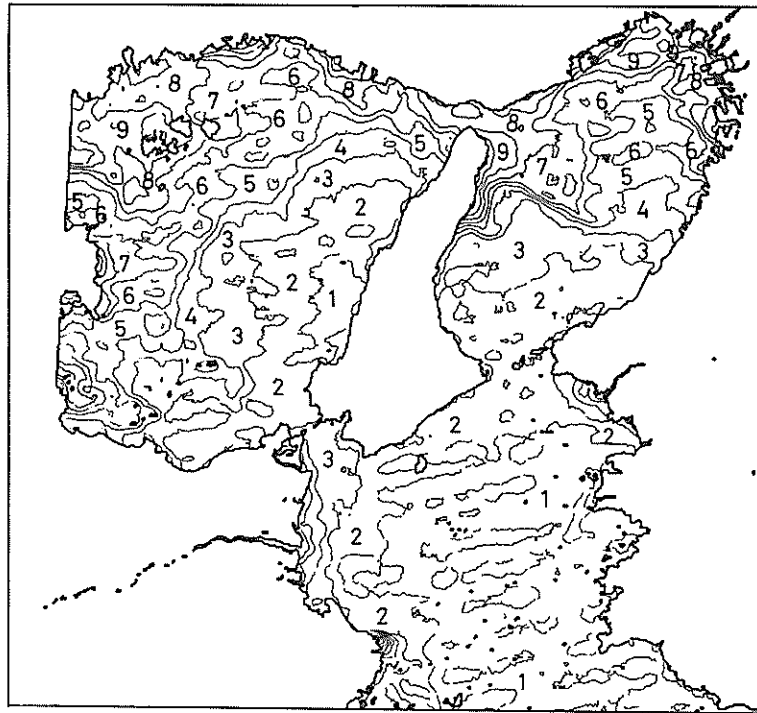


図-59(b) CCTによる等値線図(バンド5, 1980 9.3)

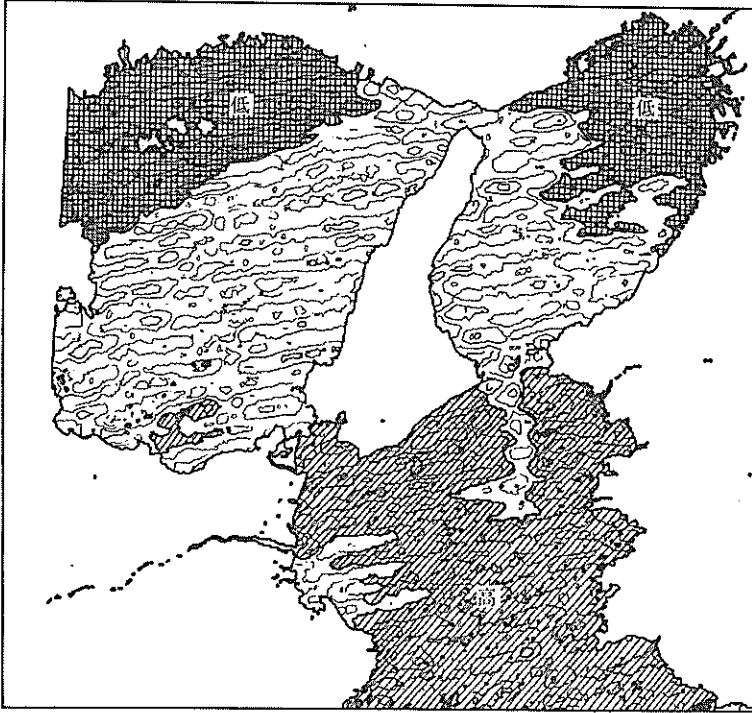


図-59(c) 比演算 (バンド4 / バンド5, 1980 9.3)

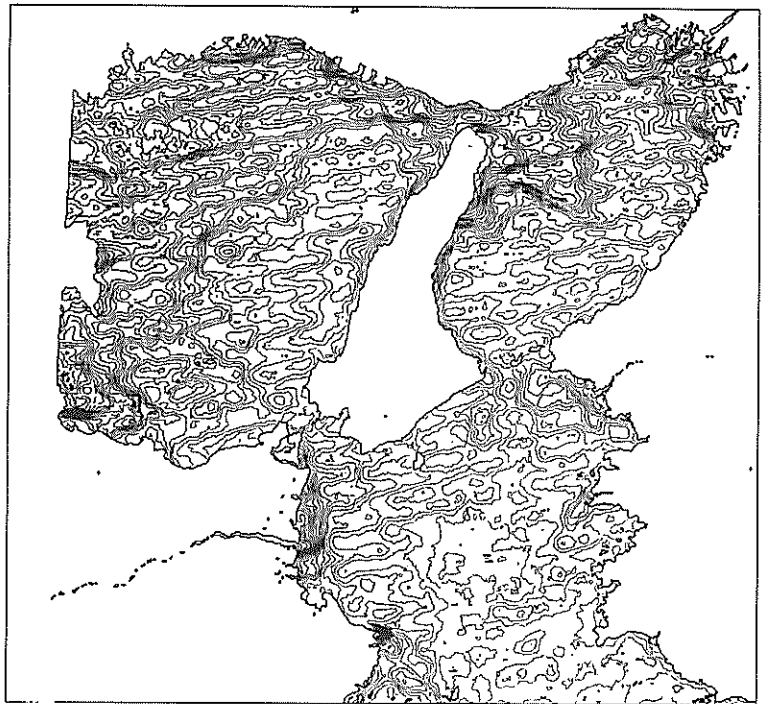


図-59(d) CCTによる等値線図 (バンド4, 1980 9.3)

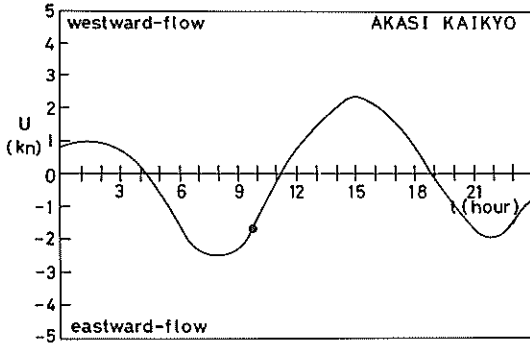


図-59(e) LANDSAT 映像収集時の潮流状況
1980 9.3 (明石海峡)

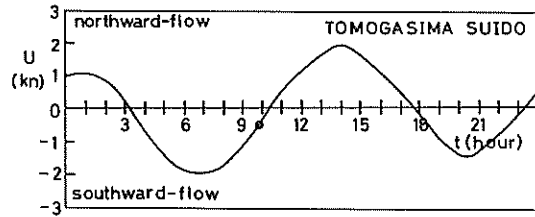


図-59(f) LANDSAT 映像収集時の潮流状況
1980 9.3 (友ヶ島水道)



図-60(a) OCTによる等値線図(バンド4, 1980 11.14)



図 - 60(b) CCTによる等値線図 (バンド5, 1980 11.14)

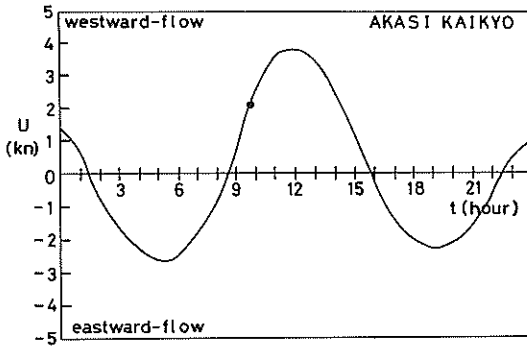


図 - 60(c) LANDSAT 映像収集時の潮流状況
1980 11.14 (明石海峡)

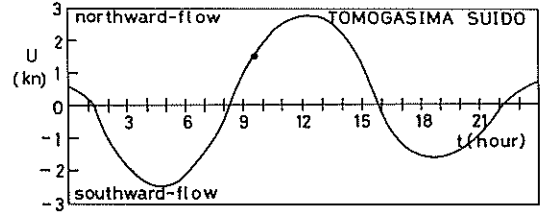


図 - 60(d) LANDSAT 映像収集時の潮流状況
1980 11.14 (友ヶ島水道)



図 - 61 (a) CCTによる等値線図
 (バンド4, 1980 11.14,
 大阪湾奥部)

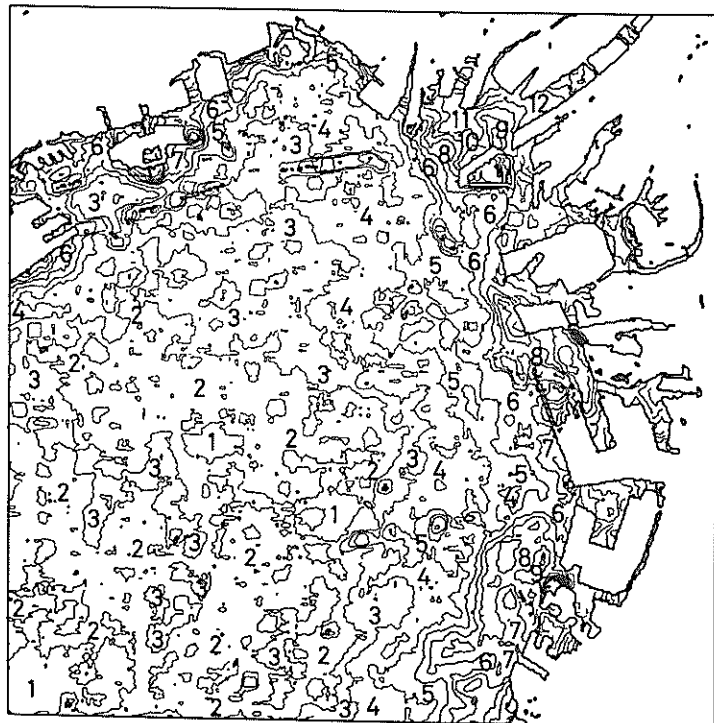


図 - 61 (b) CCTによる等値線図
 (バンド5, 1980 11.14,
 大阪湾奥部)

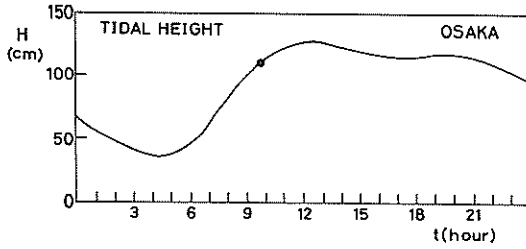


図 - 61 (c) LANDSAT 映像収集時の潮汐状況
1980 11.14 (大阪)

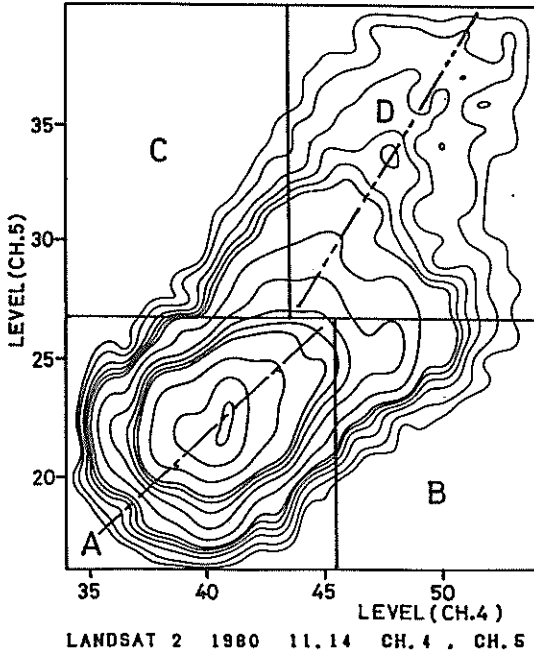


図 - 62 (a) 2次元ヒストグラム

プロセスにも大きく依存する²⁾。一口に水質といっても内容は様々であり、MSSにとらえられるこれらの光スペクトルは水質の内容、濃度、あるいは懸濁物の平均深度や粒子群の粒径、形状等の様々な因子に依存している。例えばMSSで異なる水質と判別されたとしても、それは種類の違いではなく、懸濁物の平均深度の違いに依る場合もある。これは懸濁粒子の反射率は同じであっても、水中光の色は深さとともに短波長の色に変わる性質に依存するものである²⁾。このように懸濁物の主な分布濃度までの水層による光の消散過程を把握することも、MSSの定量化を図る上で重要な問題であり、今後MSSの実用化に向けて、これら個々の研究の積み重ねも重

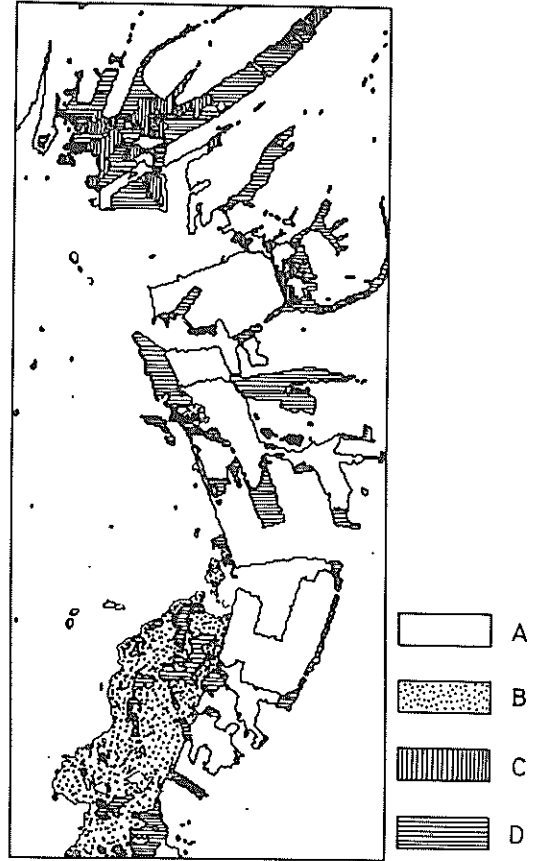


図 - 63 (b) 2次元ヒストグラムによる分類図

要である。

6. あとがき

本資料では沿岸海域、特に港湾域への航空機搭載MSS (可視・赤外波長帯) によるリモートセンシング技術の適用という観点から実施してきた研究の概要、および大阪湾をモデルケースとして得られた成果についてとりまとめた。これらを要約すると以下ようになる。

(1) 実調査において必要有為なシートルースを、効率的かつ経済的に行うことを目的として曳航式水質測定・採水機の試作および改良を行い、測定データの基本的資質について所期の成果を得ることができた。しかしながら、曳航体の姿勢制御については、ケーブル、曳航索、曳航体形状等の関係において、なお改良すべき問題が残されている。

(2) 測定高度とMSS測定値の関係について調査し、一般的な傾向については把握し得たが、定量的な補正手

法を見出すに至らなかった。

(3) 航空機MSSでは、走査角が大きいことに起因してパスラジアンスの影響を受ける。一般的にはアナログ解析手法として多用される比演算処理でこの影響を除くことができるとされているが、現用の測定機における実調査においては、波長帯によってその影響の度合いが異なってくるため、比演算処理だけでは走査角方向の輝度補正は十分でないことが明らかとなった。

(4) 航空機MSSにより、友ヶ島水道における海水交換パターンを、夏季と冬季に分けてそれぞれ大潮期の満潮時および干潮時に測定し、それぞれにかなり明瞭な海水の流入パターンをとらえることができた。

(5) 大阪湾湾奥海域にMSSを適用することにより、シートルスのみでは把握することのできなかった港湾外かく施設を含む複雑な海域の水理状況を把握することができた。しかしながら、水質組成が異なるこれらの海域において水質環境を評価するためには、濁度と高い相関を有するch. 5の画像を中心として、これに熱赤外画像、水質の実測データ、および地形の効果等を加味することにより総合的な水質の評価指標を設定して判断をする必要がある。

(6) シートルスデータおよびMSSデータに多変量解析法を適用することにより、MSSデータとシートルスデータ間の共通性および対応関係、総合水質指標の構成等、MSSデータの定量的な活用に向けて具体的な方途を見出す端緒を得た。このほか、一部のシートルスデータについてMSSデータと非線型な関係を有することが判明し、今回試みた方法および成果の実用的な活用をはかってゆくためには、別途線型化する手法を開発する必要があることが明らかになった。

(7) 大阪湾において特徴的なパターンを有する海峡部における海水交換現象、潮流流、および恒流といったスケールの大きい流れ、湾全体の物質拡散等については、LANDSAT・MSSデータによっても定性的にはかなりの程度まで把握することができ、航空機MSSに比べてより全般的な現象解明が可能であることが明らかとなり、航空機による測定データの併用および長期的調査計画における衛星利用の有用性が示唆された。

以上に示すように昭和52年度～56年度の5か年間の研究結果から数多くの成果が得られたが、実調査への汎用的導入という観点からは、MSSデータの光学的特性に代表されるMSSデータ活用上の基本的な問題について、なお十分な解決策を見出すことができなかった。これらについては今後のデータの蓄積を待って、工学的な見地から逐次リモートセンシング技術の実調査への応用性

向上を図ってゆきたいと考える。

なお、本資料で解析に用いたLANDSATデータは宇宙開発事業団の無償提供を受けたものであり、本研究は科学技術庁の特別研究調整費によるものである。

(1983年6月30日受付)

参 考 文 献

- 1) 井上尚文・青山恒雄・宮地邦明：沿岸域の海況調査方法としての多数船同時観測の有明海における試行と意義，海洋科学，Vol. 11, No. 5, 1979, pp. 448-457.
- 2) 渡辺貫太郎：海洋のリモートセンシング，海洋科学基礎講座「海洋物理IV」，東海大学出版会，1977, pp. 225-318.
- 3) 渡辺貫太郎：海洋のリモートセンシング—実用化に必要な基礎的研究問題—，環境科学としての海洋学，東京大学出版会，1977, pp. 134-149.
- 4) 杉森康宏：海洋のリモートセンシング，共立出版株式会社，1982.
- 5) 和田清夫・土屋清・安田嘉純・江森康文・飯島譲二・長尾真：リモートセンシング，朝倉書店，1976.
- 6) 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, Mar. 1980.
- 7) 高橋智晴・金子大二郎・佐々木弘：沿岸水理・地形に関する研究（その1）—港湾域における研究—，昭和52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53年10月，pp. 51-64.
- 8) 高橋智晴・金子大二郎・佐々木弘：沿岸水理・地形に関する研究（その1）—港湾域における研究—，昭和53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54年10月，pp. 45-59.
- 9) 高橋智晴・金子大二郎・佐々木弘：沿岸水理・地形に関する研究（その1）—港湾域における研究—，昭和54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55年10月，pp. 47-56.
- 10) 高橋智晴・金子大二郎・広瀬宗一・佐々木弘：沿岸水理・地形に関する研究（その1）—港湾域における研究—，昭和55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56年10月，pp. 43-56.
- 11) Saunders, P.M.: The temperature at the ocean-air interface. Jour. Atmos. Science, Vol. 24, 1967, pp. 269-273.
- 12) 大西外明・田中総太郎・西村司：Landsat リモートセンシングを導入した海峡部海水交換現象の研究，土木学会論文報告集，第298号，1980年6月，pp. 63-75.

- 13) 大西行雄：大阪湾の恒流に関する数値実験，第26回海岸工学講演会論文集，1979，pp. 514～518.
- 14) 地球観測データ利用ハンドブック，(財)リモートセンシング技術センター，1982.
- 15) 小田巻実：ランドサットデータを利用した沿岸水の分散過程の把握，水路部研究報告，Vol. 17，1982，pp. 367～377.
- 16) 秋山正寿・杉森康宏：人工衛星赤外熱画像の画像処理手法に関する研究(1)，航水研ノート，空と海，第3号，1980，pp. 1～14.
- 17) 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 pp. 89～125.
- 18) 畠山祐二・西村司・田中総太郎・杉村俊郎：潮汐による海峡部の流動機構，1983年度日本海洋学会春季大会講演要旨集，pp. 150～151.
- 19) 藤原建紀：大阪湾の大規模な潮目と濁りの帯について，日本国土海洋総合学術診断，昭和54年度技術報告集 — 海洋関係 — ，(財)日本造船振興財団，1980年，3月，pp. 103～121.

港 灣 技 研 資 料 No.468

1 9 8 3 · 9

編 集 兼 發 行 人 運 輸 省 港 灣 技 術 研 究 所

發 行 所 運 輸 省 港 灣 技 術 研 究 所
 橫 須 賀 市 長 瀬 3 丁 目 1 番 1 号

印 刷 所 日 青 工 業 株 式 會 社

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