

大村湾の表層水クロロフィル *a* 分布と人工衛星 データの解析*

ウオウトウゼン サム, 飯塚 昭二

Analysis of Surface Chlorophyll *a* Distribution and Satellite Data in Omura Bay

Sam WOUTHUYZEN and Shoji IZUKA

ABSTRACT

Nearly simultaneous acquisitions of surface chlorophyll *a* concentration for 48 sampling sites from a boat and Landsat-5 TM, MSS and MOS-1 MESSR digital count (DC) extraction in the visible and near infrared wave lengths were carried out in Omura Bay. Twenty two sets of sea truth data were collected for 14 months from October 1987 until December 1988, among which Landsat-5 data were available with four sets and MOS-1 data with one set.

The concentration of chlorophyll *a* was higher in the southeast part of the bay, including Tsumizu Bay and low in some areas of the middle bay. Linear regressions between chlorophyll *a* and DC of TM, MSS and MESRR were developed for all stations, stations in the middle bay and stations in the southeast part, respectively. The correlation coefficients were higher for stations in the southeast part, but lower both for all stations and stations in the middle bay.

All four dates TM data which represent two seasons (autumn and spring) were grouped. By applying a simple atmospheric correction procedure, a high relationship for each season was obtained between chlorophyll *a* and DC ratio (TM 2)/(TM 1).

Key Words: 大村湾 Omura Bay ; クロロフィル *a* 分布 Chlorophyll *a* distribution ;
リモートセンシング Remote Sensing ; ランドサット-5 Landsat-5 ;
モス-1 MOS-1

はじめに

大村湾の物理学, 化学, 生物学的及び地質学的研究については日本全国沿岸海洋誌の第22章大村湾に飯塚 (1985), 田北 (1985) によってまとめられ, また同湾の長期モニタリング調査は長崎県水産試験場及び長崎県衛生公害研究所によって行われているが, 同湾の植物プランクトンの時空間分布についてはあまり知られていない。

大村湾のようなエスチュアリの水域は時間単位の

短期変動, あるいは季節的及び年単位の長期変動によって, その水塊はダイナミックに変動する水質によって特徴づけられている。短時間変動は潮流及び河川水流入量の変動, また, 長期変動は気象学的要因あるいは河川水の長期的流入量の変化等によって影響されている。エスチュアリはまた水深の変化, 循環と混合, 溶存態あるいは粒子態物質の存在と沈降に由来する水質, 例えば塩分, 栄養塩類, 懸濁粒子及び植物プランクトンの水平的あるいは鉛直変化傾度を持った, 時間的変動の場であり, 決して均一

*本論文は長崎大学大学院水産学研究科の修士論文を和訳したものである。

水質の場ではない (Catts, 1985)。

このようなエスチュアリの水質変動を知るためには現場の調査手法は複雑となり時間と経費が必要である。サンプリングが広い地域を対象としなければならない時, また繰り返し行わなければならない時特に問題になる。さらに, 現場調査から内挿によりクロロフィル *a* 量をマッピングする時, 作業は一層困難となるし, ごく沿岸の近くには調査船が入れないという制約もある (Muralikhrisna, 1983; Catts, 1985)。

現場データを集め, そして解析する時の困難さを考えて, 多くの研究者は航空機あるいは人工衛星のような遠隔操作物体を使う間接法を植物プランクトン量の測定, マッピング, ダイナミックモデリングのため, あるいは水質のモニタリングとアセスメントのため使ってきた (Clarke et al., 1970; Clark et al., 1980; Smith and Baker, 1982; Kirk, 1983)。リモートセンシングによって可能となる広域スケールの面積の繰り返し観測は, 直接サンプリング手法とか, 船舶による追跡が不可能である大スケールの植物プランクトンの分布の場についても正確な情報を与えてくれる (Holligan, 1987; Lathrop and Lillesand, 1987)。

1972年ランドサット (Landsat) - 1号が打ち上げられて以来, マルチスペクトルスキャナー (MSS) によるデータ収集が水質のアセスメント分野でこれまで行われてきた (Lathrop and Lillesand, 1987)。そのうちいくつかの研究は, クロロフィル *a* とか全懸濁粒子などの量を決定するのに MSS データを使うことは, MSS の空間的分解能を上まわるような不均一分布, あるいは MSS の相対的に広すぎるバンド幅によって制約されることを示した (Cheshire and Khorram, 1987)。航空機によるナローバンドマルチスペクトルスキャナー (Narrow band multi-spectral scanner), あるいはニンバス (Nimbus) 7号による沿岸カラスキャナー (Coastal zone color scanner - CZCS) を使ったこれまでの研究は, 例えばクロロフィル *a* の定量化に有効であることを示した (Uno et al., 1980; Gordon and Clark, 1980; Sathyendranath and Morel, 1983; Catss, 1985; Uno and Yokota, 1989)。1982年と1984年にランドサット - 4号及び5号がそれぞれ打ち上げられて以来, 水質研究者は MSS データに加えて, TM データを水質のアセスメントに使うようになった。TM データは MSS データよりも波長幅が短くて空間的にも,

放射量 (Radiometry) 的にも性能が改良されていることによって, 全懸濁粒子群及びクロロフィル *a* の濃度を定量化するのにより良いと考えられている (Kirk, 1983; USGS, 1984; Markham and Barker, 1985; Cheshire and Khorram, 1987; Lathrop and Lillesand, 1987; Price, 1987)。

本研究の目的はまず, 1) 大村湾における表面海中の植物プランクトン量 (クロロフィル *a*) の空間分布を現場的に決定すること, 2) 大村湾におけるクロロフィル *a* の表面分布のマッピングに, ランドサット - 5号の TM センサーと MSS センサー, またモス (MOS) - 1号の MESSR センサーがどの程度使えるかを検討することである。

文献のまとめ

クロロフィル *a* の測定は植物プランクトンのパイオマスと基礎生産量を推定するために使われる。植物プランクトンは無機物質に比べて狭い波長幅の吸収と反射を行なうというスペクトル特性を持っている。これらの性質は植物プランクトンの年令, 活性あるいは濃度及び種組成によって変化する (Platt, 1970; Wilson and Kiefer, 1979; Uno et al., 1980; Yentsch, 1983; Barale, 1987)。すべての植物プランクトンは430nm にピークを持つ青色光のエネルギーを吸収しやすい。クロロフィル *a* の存在による2番目の吸収は665nm の赤色部にある。これらの吸収以外の残りの色は反射される。このことは陸上植物の葉の色がなぜ緑色をしているかを説明していると同時に, 生産性の高い水域の水色がなぜ緑色をしているかの説明でもある。クロロフィル *a* の濃度が増えるにつれて500nm 以下の波長域及び665nm に近い波長域の吸収は増大し, 一方, 550-600nm と750nm 以上の波長域の反射が大きくなる (Uno et al., 1980; Aranavachapun and Pery, 1981; Kirk, 1983; Maul, 1985; Lathrop and Lillesand, 1988)。

1978年に打ち上げられたニンバス - 7号の CZCS は海洋の表面水における植物プランクトンと懸濁粒子群をリモートセンシングするために考案された初めてのセンサーである。CZCS の(バンド1/バンド3)の青緑色光の比は植物プランクトンの変動に対してもっとも正確にして, かつ, 感度の高いものである (Sathyendranath and Morel, 1983)。多くの研究者はこの比を使って, 表面水のクロロフィル *a* の濃度を推定するのに成功した (Clark et al., 1980;

Gordon and Clark, 1980; Smith and Wilson, 1980; Clark, 1981; Smith and Barker, 1982)。一方、研究例は少ないが、Lathrop and Lillesand (1986) はクロロフィル a 量を評価するためにランドサットの TM センサーの利用はクロロフィル a 量の自然対数 (\ln) と TM バンド 2 の反射輝度 (デジタルカウント) の \ln はよく相関することを示し、Green 湾で $r=0.99$ 、また Michigan 湖で $r=0.98$ という結果が報告されている。重回帰分析 (multi linear regression technique) を使った Cheshire and Khorram (1987) はクロロフィル a 量とランドサット-5号の TM バンド 1, 3, 及び 4 の反射輝度との間には相関関係があり、Fall 湖で $r=0.78$ が得られている。1986年の有明海ノリ漁場における珪藻赤潮の研究では、クロロフィル a 量と全色素量 (クロロフィル + フェオ色素) は (TM バンド 2 / TM バンド 3) の反射輝度比とそれぞれ直線的関係があり、それらの相関関係は 0.75 及び 0.76 であった (アジア航測, 1987)。また、1987年にはクロロフィル a 量と (TM バンド 1 - TM バンド 4) の反射輝度との相関関係は $r=0.71$ であった (アジア航測, 1988)。オーストラリアのある湖の調査日を異にする 6 回の MSS センサーを使った水質パラメータのデータの研究は、すべての場合濁度に関しては正確であったが、植物プランクトンについてはあまりよく確認されなかった (Carpenter and Carpenter, 1983)。小笹 (1984) は東シナ海で現場のクロロフィル a 濃度とランドサット-3号の MSS バンド 7 の放射輝度との関係で相関関係は $r=0.83$ という値を得た。Ritchie and Cooper (1987) はミシシッピ州の Moon 湖における水質の研究でランドサット-4 及び 5 号の MSS バンド 5 と 6 の反射輝度は懸濁粒子群 (TSS) の濃度と相関関係があり、バンド 4 と 5 はクロロフィル a 量と相関関係があることを示した。しかし、Pelkey and Khorram (1987) はサンフランシスコ湾においてはランドサット-4号の MSS バンド 3 の反射輝度では相関関係は $r=0.48$ という低い関係を見出したが、濁度及び全懸濁粒子量については高い相関を、すなわち $r=0.89$ と $r=0.88$ をそれぞれ得た。

Uno et al. (1980), Uno and Yokota (1989) は屋島湾で航空機に積みこんだ Deadalus 1250 MSS センサーで得られたデータを解析し、色素量 (クロロフィル a) 分布のマッピングについて最も信頼のおける手段は (チャンネル 3 / チャンネル (2 + 3 + 4 + 5 + 6 + 7 + 8 + 9)) の比であると決定した。

しかし、これらの手段は無機の懸濁粒子が高い濃度で存在する時期については使用できない。Deadalus 1260 MSS を使って Catts (1985) はサンフランシスコ湾北部水域で満ち潮、引き潮時におけるクロロフィル a 量分布を調べた。彼らの重回帰モデルは約 15 分間の飛行中にサンプリングされたクロロフィル a 量と Deadalus (チャンネル 3 - チャンネル 10) 及び (チャンネル 7 / チャンネル 8) の反射輝度比との関係は潮時に無関係であった。有明海におけるノリ漁場では Deadalus 1250 の (チャンネル 3 / チャンネル 5) の比とクロロフィル a 量との間には直線関係があり、その時の $r=0.84$ であった。また 1987 年の島原湾においてはチャンネル 3 との関係は指数関数的であり $r=0.93$ であった (アジア航測, 1987)。しかしながら、1988 年では (チャンネル 3 / チャンネル 8) の比については相関係数が低く、 $r=-0.55$ であった (アジア航測, 1988)。同じ研究は Green 湾においても Lathrop and Lillesand (1987) によって行われたが、スポット (SPOT) HRV (High resolution visible) センサーを使って透明度、クロロフィル a 、濁度、懸濁粒子群および黄色物質 (yellow substance) の濃度のそれぞれの対数值 (\ln) は HRV (バンド 2 / バンド 1) の比と高い相関があり、それぞれ $r=0.91, 0.90, 0.84, 0.90$ 及び 0.93 であった。

人工衛星を使った水色リモートセンシングは、上向き放射量 (upward radiance) の 20% - 30% しか捕そくせず、残りの 70% - 80% は大気中の空気分子とか、エアロゾルによって散乱される。このことはパスラジアン (path radiance) として知られているが、全放射量の 30% 以下が海洋の表面から来る情報である。従って大気の影響が差し引かれなければならない (Aranuvachapun and LeBonde, 1981)。

ニンバス-7号の CZCS は各タイプの大气補正アルゴリズムが開発され、クロロフィル a 量測定の阻害効果を減少させるようになってきているのに対して、ランドサットの MSS と TM センサーについては大気を補正する一般的な有効な方法が考案されていない (Kirk, 1983)。

TM センサーは MSS センサーに比べて空間的、スペクトルの分解能 (resolution) が改善されているけれども、前述のように報告例も少しはあるが、水質に関するアセスメントで TM データの使用はまだ十分行われていない。その理由は TM データの取

集は1982年から始められたばかりであり，海洋調査にはまだあまり使用されていないからである (Lathrop and Lillesand, 1986)。従って，本研究では大村湾の水質アセスメントのために TM, MSS 及び MESSR 各センサーがどの程度使用できるかを，特に TM センサーに重点をおいて解析を試みようとするものである。

方 法

現場データの収集

研究は大村湾で行った。クロロフィル*a*量測定のためのサンプリング日時はランドサット5号とモス1号の飛行日時に合わせ，それらの人工衛星が大村湾上を通過する時刻の前後1.5時間以内に採水を行った。通過時間はランドサット5号で午前10時04分，またモス1号で午前10時30分である。

採水は長崎大学水産学部実習船「朝霧」を使って行った。採水点の位置決定は航走中の船上から陸上

の3物標による三角測量法で行った。採水点は3ライン上に配置した48点である (Fig. 1)。

各採水点では，表面水温の測定と表面水500mlの採水を行った。サンプル海水は研究室に持ち帰った後，全懸濁粒子と植物プランクトン色素量の測定及び植物プランクトンの計数と種組成が調べられた。クロロフィル*a*及び色素量の測定はサンプル海水100mlをグラスファイバーフィルタ (ワットマン社 GF/C, 径2.4cm)で濾過し，90%アセトン10mlで2時間抽出した後，抽出液について日立203型蛍光分光光度計を使い蛍光法 (西条, 1975)で行った。植物プランクトンの計数は UNESCO (1978)のマニュアルによって，植物プランクトンの種組成は可能な限り種レベルで行ったが，属レベルにとどまったものもある。

ランドサット-5号，モス-1号データの収集

雲が全くない日のランドサット5号のデータ (Path 113, Row 037) 及びモス-1号 (Path 026,

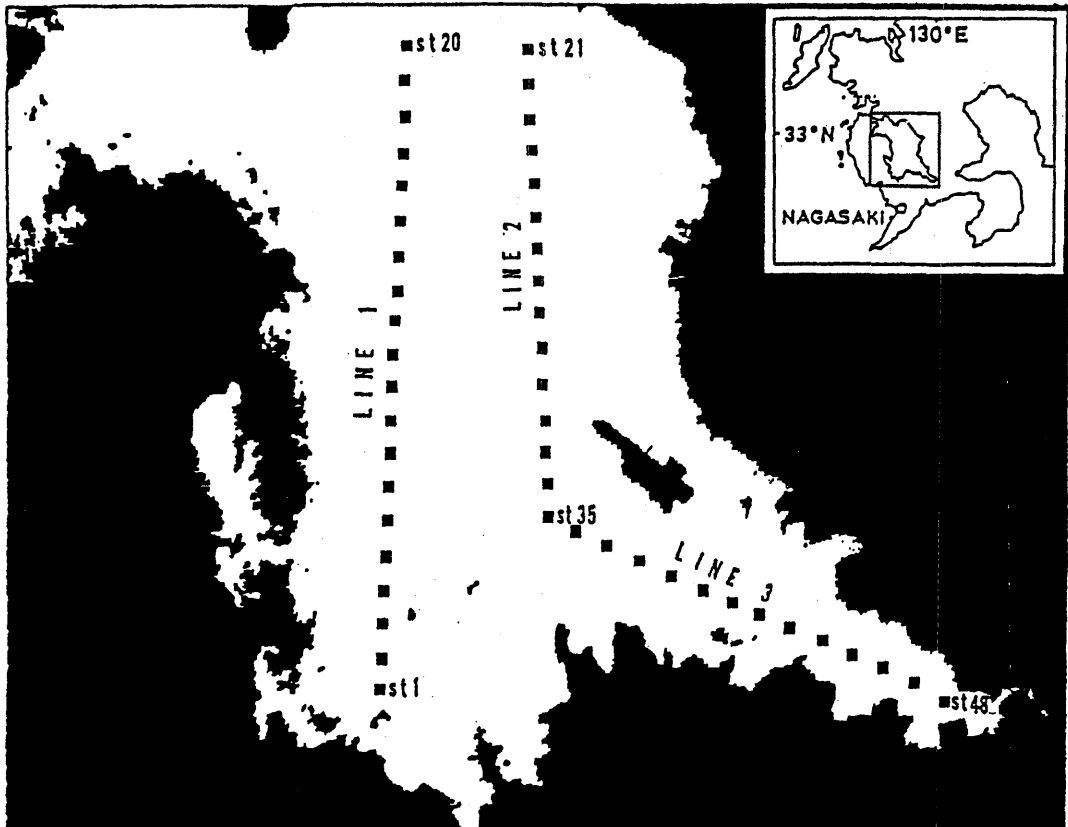


Fig. 1. Map of Omura Bay and the 48 sampling stations. Squares indicated an area used in the analysis of satellite data.

Row 74 W) が日本リモートセンシング技術センター (RESTEC) から5インチフロッピイディスクで購入された。それらのデータは512X400 pixelの面積 (ランドサット5号のMSS及び間引率2のTMセンサーではそれぞれ約29X23km, またモス1号では約26X20kmである) をカバーし, 大体大村湾全域を含んでいる。

ランドサット画像上への現場採水点の位置付けは, Universal transverse mercator 地図にサンプリング点を決める時に使われる三角測量法で行った。採水点を中心とする5 X 5 pixelのデータを用い, すべてのTMバンドについてデジタルカウント, すなわち輝度反射 (このデータは衛星のセンサーが受けた反射エネルギーを256段階(TM)あるいは128段階

(MSS) のデジタル値に変換して得られたものである。以下ではこの値を反射輝度として用いる。)の平均値が求められ, それを各採水点の代表値とした。ランドサット5号とモス1号のデータの解析には NEC Aerospace System Ltd.によって開発された LODIA (Low coast digital image analyzer) Version 4プログラムを使った。

結 果

1987年10月から1988年12月までの14か月間に水質に関する22調査日のデータが大村湾で集められた。しかし, そのうちランドサット5号による有効データは1987年10月6日, 1988年4月15日, 5月17日,

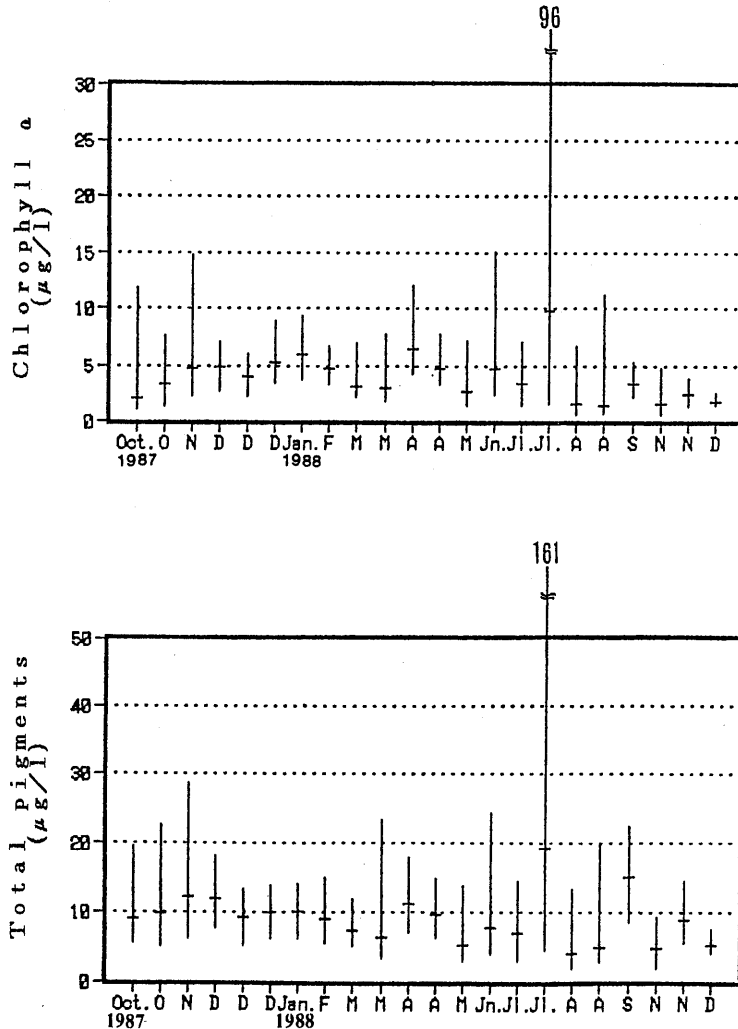


Fig. 2. Monthly fluctuation in surface chlorophyll a (upper) and total pigments (lower) concentration during the study periods.

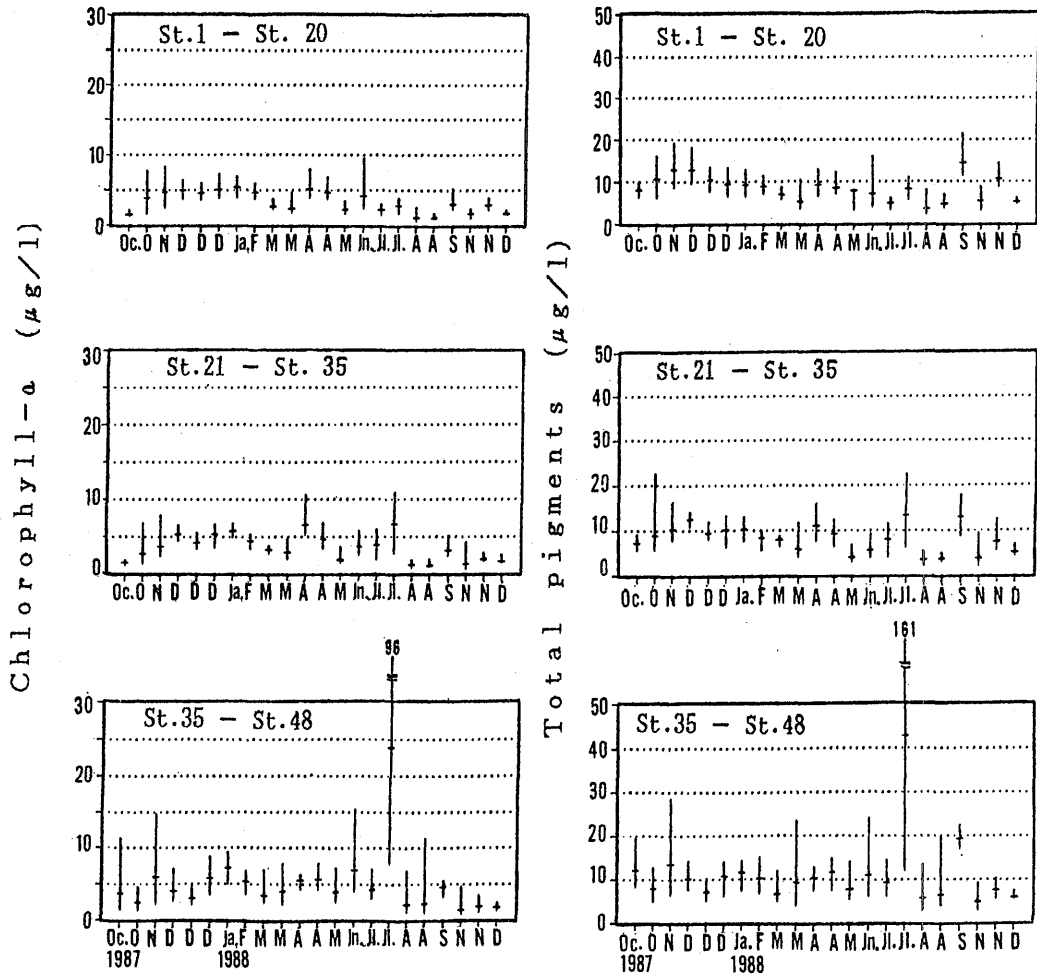


Fig. 3. Surface chlorophyll a (left) and total pigments (right) concentration along three lines during the study periods.

11月9日の4回，またモスー1号では1988年8月3日の1回，合計5回であった。

大村湾におけるクロロフィル a 量の時空間分布

クロロフィル a 量及び全色素量は $0.7-66.0\mu\text{g}/l$ 及び $2.0-160.7\mu\text{g}/l$ の範囲である。最低，最高及び平均値をFig. 2に示した。クロロフィル a 分布の詳細を見るため，全採水点を3つのラインに分けて検討した。ライン1はSt. 1からSt. 20まで，ライン2はSt. 21からSt. 35まで，ライン3はSt. 36からSt. 48までである。各ライン別のクロロフィル a と全色素量の最高，最低，及び平均値をFig. 3に示した。また，クロロフィル a の季節別水平分布をFig. 4に示した。各ラインを比較すると，ライン1

とライン2の平均値はほとんど変わらないが，ライン3の値はライン1とライン2に比べて高いことがわかる。季節別分布(Fig. 4)からはライン3でクロロフィル a の濃度が高くなる傾向が特に夏季に顕著であることがわかる。最低のクロロフィル a 量は春季のライン1とライン2のある湾中央部と夏季のライン2で見られた。秋季の低い水域はライン1のSt. 2からSt. 8，St. 13からSt. 18，ライン2のSt. 22からSt. 26，及び，ライン2と3のSt. 29からSt. 40で見られた。冬季の値は全湾的に大体均一であったが，ライン3の津水湾奥部でやや高い値が得られた。

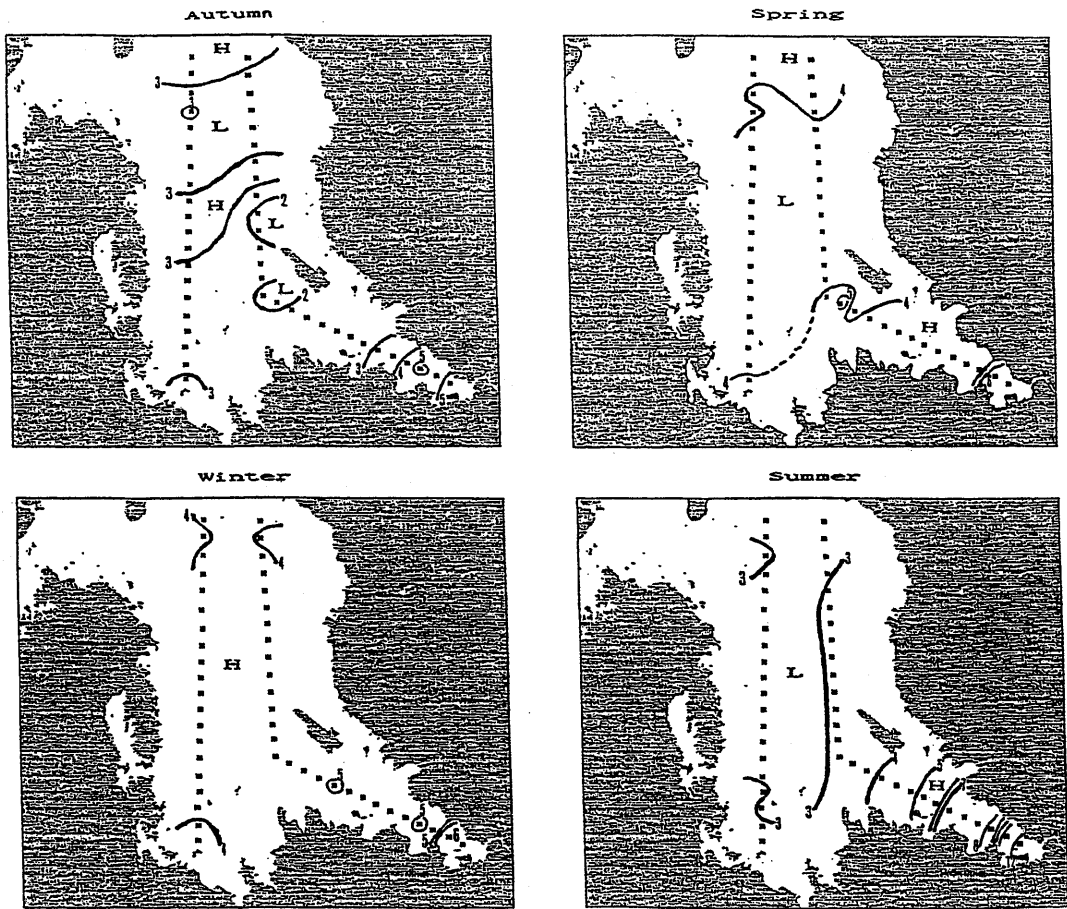


Fig. 4. Seasonal distribution pattern of surface chlorophyll *a* concentration ($\mu\text{g/l}$) in Omura Bay.

ランドサット-5号とモス-1号のデータと画像

ランドサット5号の利用可能な4つのデータのうち、3データのみが雲が全くない快晴日のものであった。1987年10月6日は大村湾の半分(北部)近くが雲におおわれていた。残り半分(南部)については分析が可能であった。ランドサット-5号のMSSセンサー、TMセンサー及びモス-1号MESSRセンサーの各バンドの波長幅と適用分野をAppendix la, b, cに示した。クロロフィル*a*量とTMバンド2、MSSバンド6及びMESSRバンド3の反射輝度のそれぞれの採水点の値をFig. 5a, bに示している。各調査日のマルチレベルスライス分類の画像はFig. 6a, b, cに画かれた。

クロロフィル*a*濃度と衛星データの相関

クロロフィル*a*の現場のデータは大ざっぱに見てTMバンド2の反射輝度と相関関係があるとみら

れ、特にライン3の全域でよく一致するようである(Fig. 5)。1988年4月と1988年5月の画像(Fig. 6b)は春季の現場のデータ(Fig. 4)と同じパターンを示した。

5回のデータのすべてについてクロロフィル*a*とTM, MSS及びMESSRのすべてのバンドの反射輝度との相関解析を行った。クロロフィル*a*の値はライン3で高い傾向があるので、相関解析を行う区域を3つに分けた。海域Iはライン1からライン2(St. 1-St. 32)、海域IIはライン2の終りからライン3(St. 33-St. 48)、そして全域(St. 1-St. 48)であった。全調査日の結果はTable 1に示している。

クロロフィル*a*濃度とTMバンド2、MSSバンド6及びMESSRバンド3の反射輝度との関係を上述の3つの海域別にFig. 7に示した。海域Iでは各調査日のクロロフィル*a*と反射輝度との相関は低く、 r は0.03-0.51であった。一方海域IIでは両者

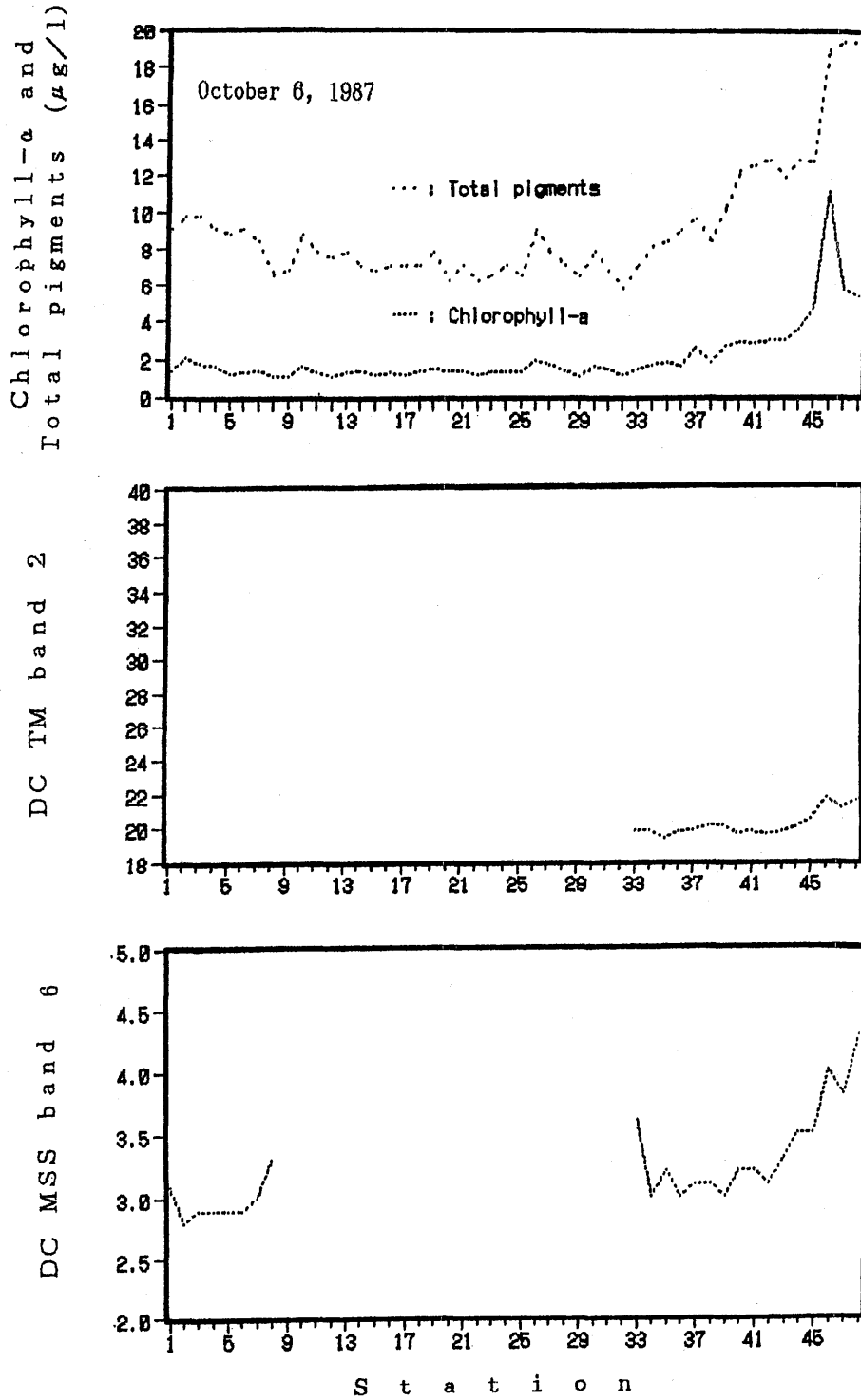


Fig. 5a. Chlorophyll *a* and total pigments concentration (upper) and DC TM band 2 (middle) and DC MSS band 6 (lower) as observed on October 6, 1987.

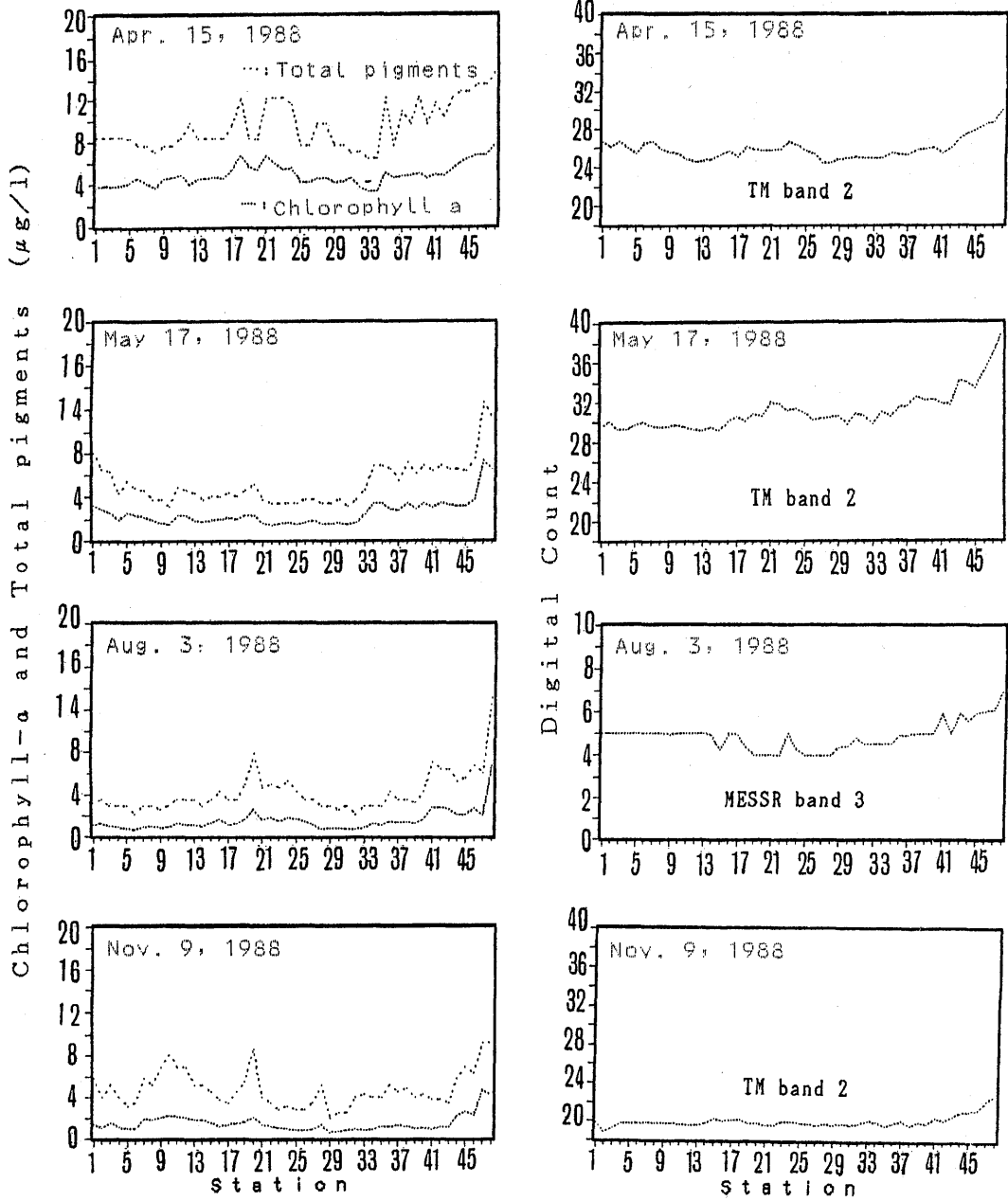


Fig. 5b. Chlorophyll *a* and total pigments concentration (left) and DC TM band 2 and MESSR band 3 (right) as observed on April 15, May 17, August 3, and November 9, in 1988.

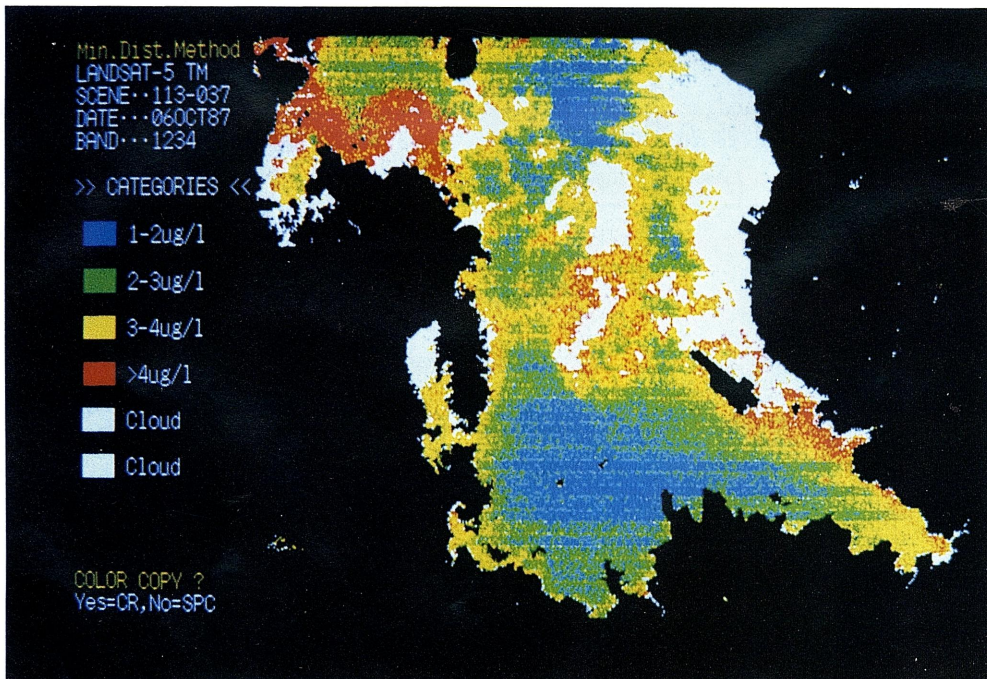
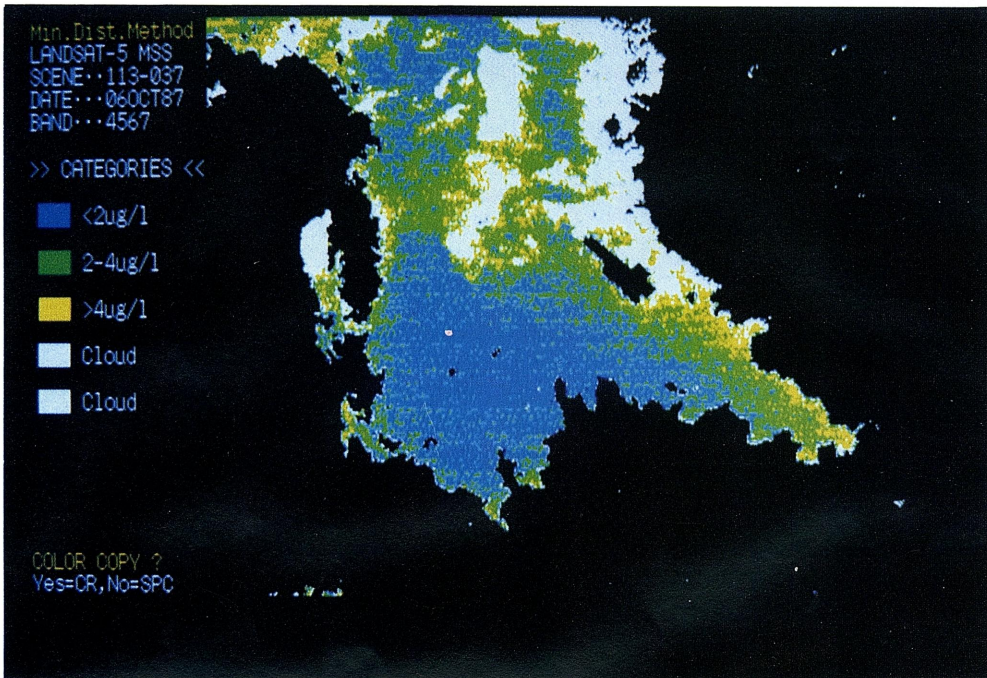


Fig. 6a. Surface distribution of chlorophyll a concentration in Omura Bay derived from Landsat-5 MSS data (upper) and Landsat-5 TM (lower) data for October 6, 1987.

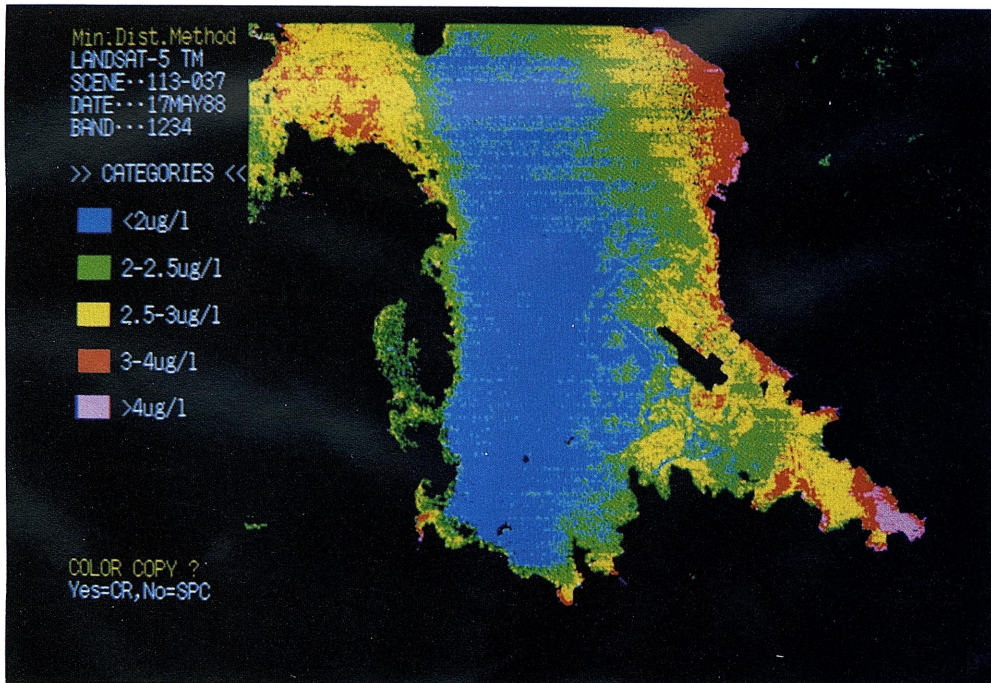
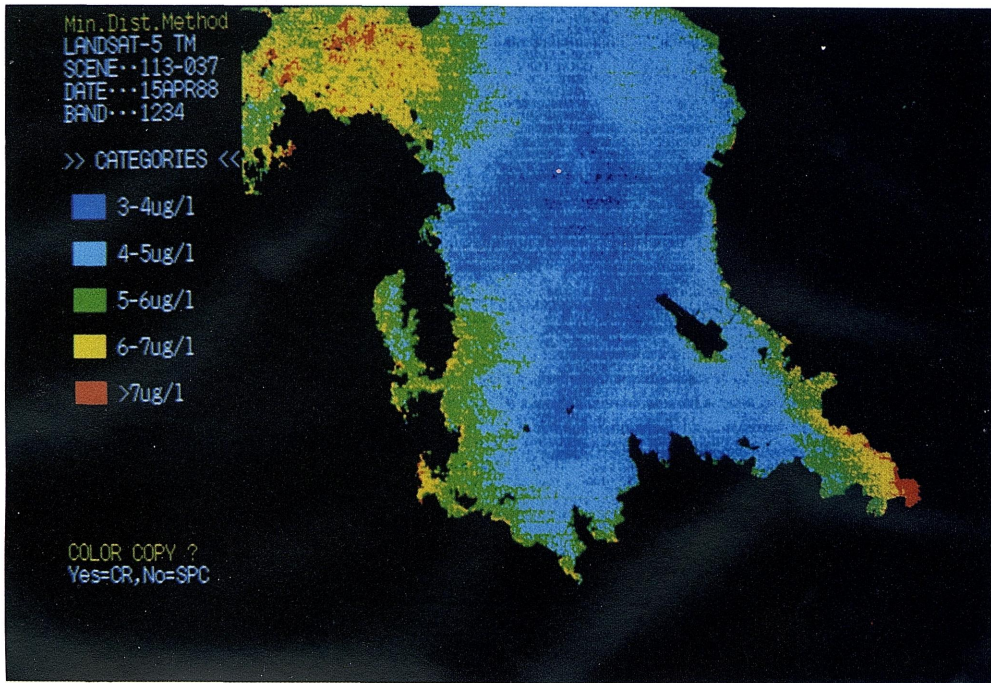


Fig. 6b. Surface distribution of chlorophyll *a* concentration in Omura Bay derived from Landsat-5 TM data for April 15, 1988 (upper) and May 17, 1988 (lower).

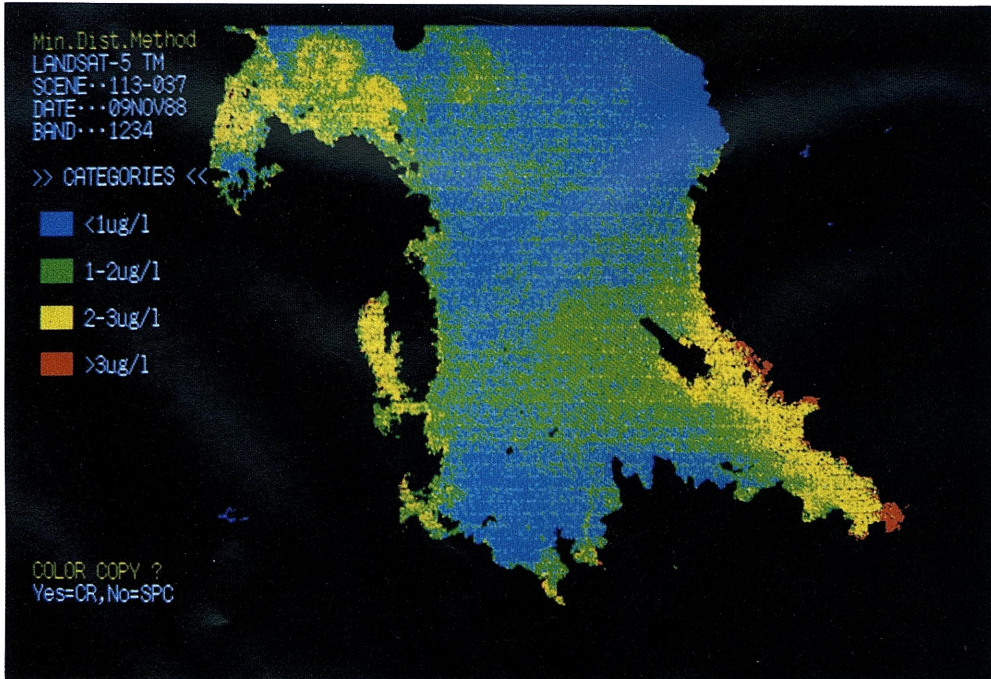
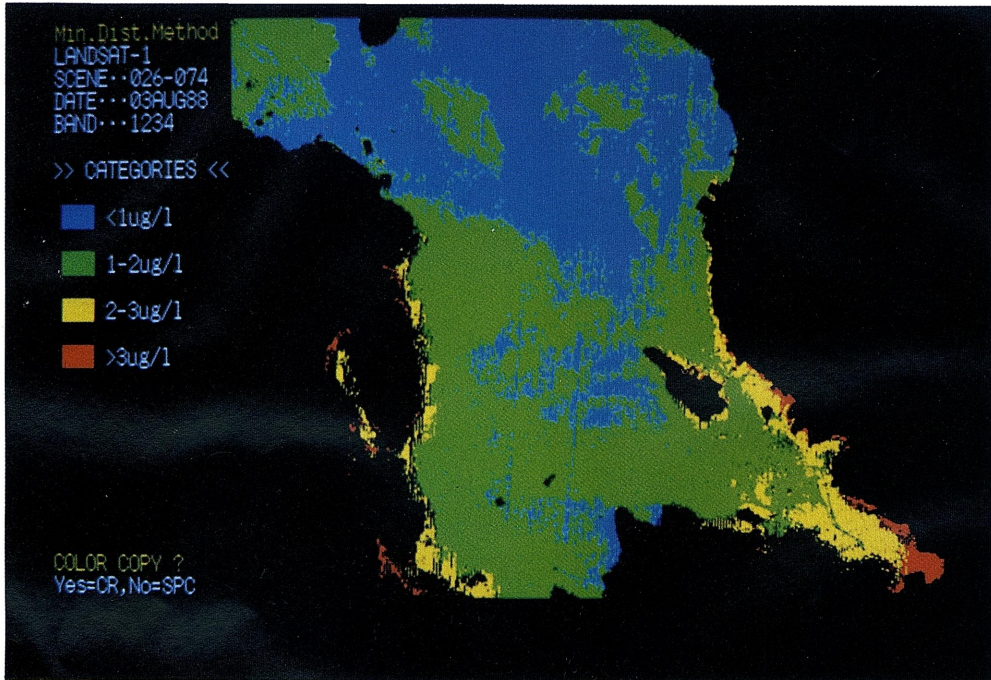


Fig. 6c. Surface distribution of chlorophyll a concentration in Omura Bay derived from MOS-1 MESSR data for August 3, 1988 (upper) and from Landsat-5 TM for November 9, 1988.

Table 1. Results of linear regression analysis between chlorophyll *a* concentration ($\mu\text{g}/\text{l}$; Y-axis) and DC of Landsat-5 MSS, TM and MOS-1 MESSR (X-axis).

Date	N*	Sensor	Band 1			Band 2			Band 3			Band 4		
			a	b	r	a	b	r	a	b	r	a	b	r
Oct. 6, '87	24	MSS**	-54.18	4.30	0.78	-22.76	3.38	0.74	-11.38	4.39	0.75	-10.01	6.06	0.37
Oct. 6, '87	16	MSS**	-54.33	4.31	0.74	-31.94	4.53	0.72	-11.95	4.58	0.78	-6.08	4.44	0.46
Oct. 6, '87	16	TM	-52.70	0.92	0.22	-55.94	2.94	0.85	-39.22	3.01	0.66	-13.46	2.44	0.65
Apr. 15, '88	48	TM	-28.84	0.45	0.56	-9.73	0.56	0.67	-5.47	0.53	0.51	-0.91	0.58	0.46
Apr. 15, '88	32	TM	5.00	-0.06	0.01	0.26	0.17	0.15	4.75	-0.01	-0.01	7.39	-0.28	0.21
Apr. 15, '88	16	TM	-49.52	0.72	0.96	-13.72	0.71	0.95	-12.27	0.88	0.87	-0.61	1.09	0.90
May 17, '88	48	TM	-22.48	0.28	0.64	-11.71	0.45	0.79	-8.80	0.44	0.77	-4.50	0.49	0.08
May 17, '88	32	TM	16.01	-0.16	0.61	9.35	-0.25	0.42	10.29	-0.34	0.61	6.68	-0.35	0.36
May 17, '88	16	TM	-30.57	0.38	0.79	-11.23	0.45	0.83	-8.79	0.46	0.81	-3.09	0.42	0.78
Aug. 3, '88	48	MESRR	-11.25	0.63	0.60	-6.94	0.66	0.53	-2.63	0.85	0.58	-1.63	0.87	0.52
Aug. 3, '88	32	MESRR	7.21	0.31	0.39	5.37	-0.34	0.44	3.42	-0.49	0.51	1.91	-0.22	0.22
Aug. 3, '88	16	MESRR	-20.94	1.10	0.77	-20.20	1.66	0.81	-5.71	1.42	0.82	-3.30	1.39	0.69
Nov. 9, '88	48	TM	-9.60	0.18	0.31	-14.66	0.81	0.63	-10.52	0.79	0.58	-7.79	1.15	0.48
Nov. 9, '88	32	TM	12.83	-0.19	0.25	2.41	-0.05	0.03	4.02	-0.17	0.09	5.18	-0.48	0.18
Nov. 9, '88	16	TM	-45.28	0.77	0.67	-24.09	1.26	0.90	-19.10	1.32	0.86	-16.68	2.23	0.78

*) N=48 : St. 1-St. 48, N=32 : St. 1-St. 32; N=24 : St. 1-St. 8 and St. 33-St. 48; N=16 : St. 33-St. 48

**) MSS band number 1, 2, 3 and 4 was renamed from band 4, 5, 6 and 7

a : Intercept, b : Slope, r : Correlation coefficient

の相関が高く、 r は0.78-0.95であった。全域を対象とした場合は r は0.58-0.79となった。

Ritchie and Cooper (1987), Ritchie et al. (1987)はMoon湖で1983年1月から1985年6月までのあいだ14回のランドサットMSS反射輝度データを解析した。データはランドサット4と5号から得られている。大気中の空気分子の散乱の影響を補正するために彼らはセンサーの各バンドにおける最小の反射輝度は0であるべきだと考えた。もし最小の反射輝度が0より大きいならば、それらは大気の状態とセンサーのノイズによるものだと考えた。この考えはランドサット4号のデータ使用ハンドブックにも書かれている。そこではラジアンズバイアスは画像のヒストグラムの反射輝度の最小値に等しいと書かれている(USGS, 1984)。

ランドサットTMバンド2とクロロフィル a との相関を全データについてプロットしたものをFig. 8aに示す。各調査日によって両者の関係が大きく異なることがわかる。この原因としては、大気の状態の違いや植物プランクトンの種組成の違いなどが考えられる。各調査日における植物プランクトンの種組成をFig. 8bに示しておく。

Ritchieの考え方は本研究の条件設定にも適用することができるので、TMバンド1とTMバンド2から得た生のデータを彼の方法を使って補正した。

Fig. 9は各調査日における512X400 pixel画面におけるTMバンド1及びTMバンド2のヒストグラムを反射輝度の最小値と共に示している。各採水点に対応する5X5 pixelのTMバンド1とTMバンド2のデータのすべての平均値から両バンドの最小の反射輝度を差し引いた。これらの補正された値を用い、CZCSで用いられた方法に従ってTM(バンド2/TMバンド1)の比とクロロフィル a との関係をプロットした。Fig. 10はTM(バンド2/TMバンド1)の比の補正されていない値(A), 補正された値(B)とを示したものである。補正された比を季節別にまとめて処理した結果(Fig. 10C, 10D), クロロフィル a と補正された(TMバンド2/TMバンド1)の値の間に高い相関があることが分かった。相関関係は $r=0.88$ (春), $r=0.82$ (秋)である。

考 察

大村湾の表層海水中のクロロフィル a 量の時空間分布は冬季をのぞいてライン3を含む水域は高い値を示した。この湾の湾奥部津水湾には6本の河川があり(東大川, 西大川など), 周辺の市・町・村(諫早, 大村, 喜々津など)から生活産業廃水を含んだ高い濃度の栄養塩類をライン3がある海域に運び込

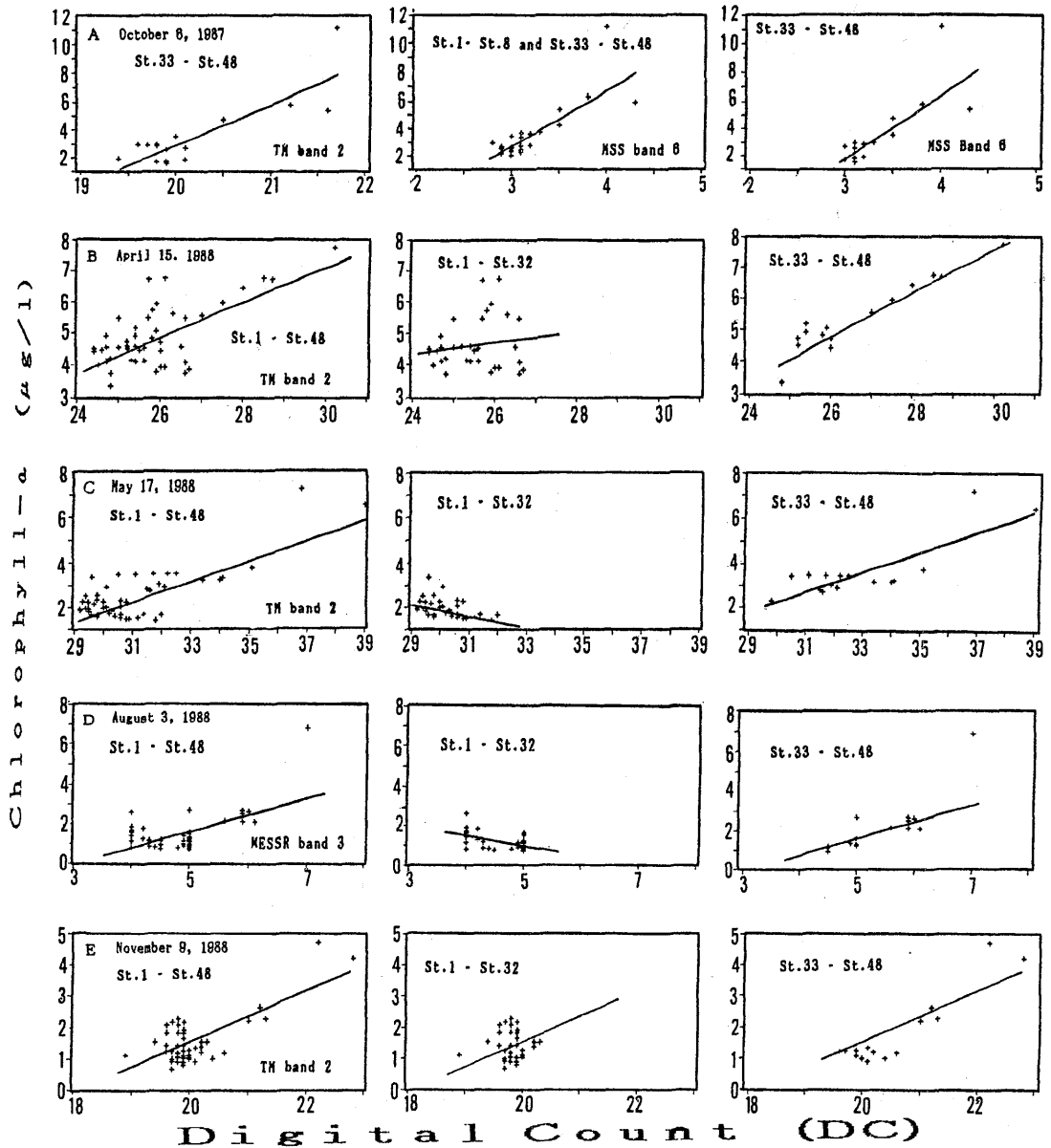


Fig. 7. Plot of surface chlorophyll *a* concentration and DC in each area for October 6, 1987 (A); April 15, 1988 (B); May 17, 1988 (C); August 3, 1988 (D) and November 9, 1988 (E).

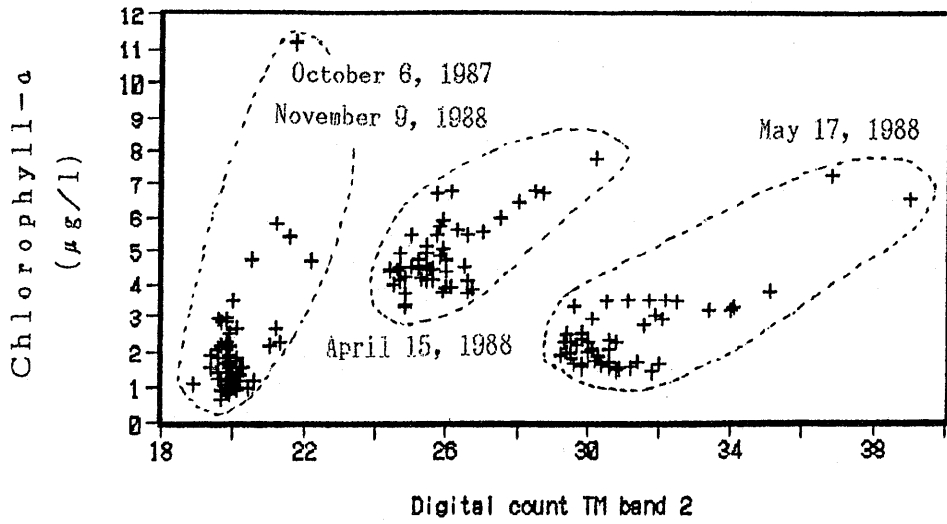


Fig. 8a. Plot of DC TM band 2 and chlorophyll-a concentration which showed the atmospheric effect.

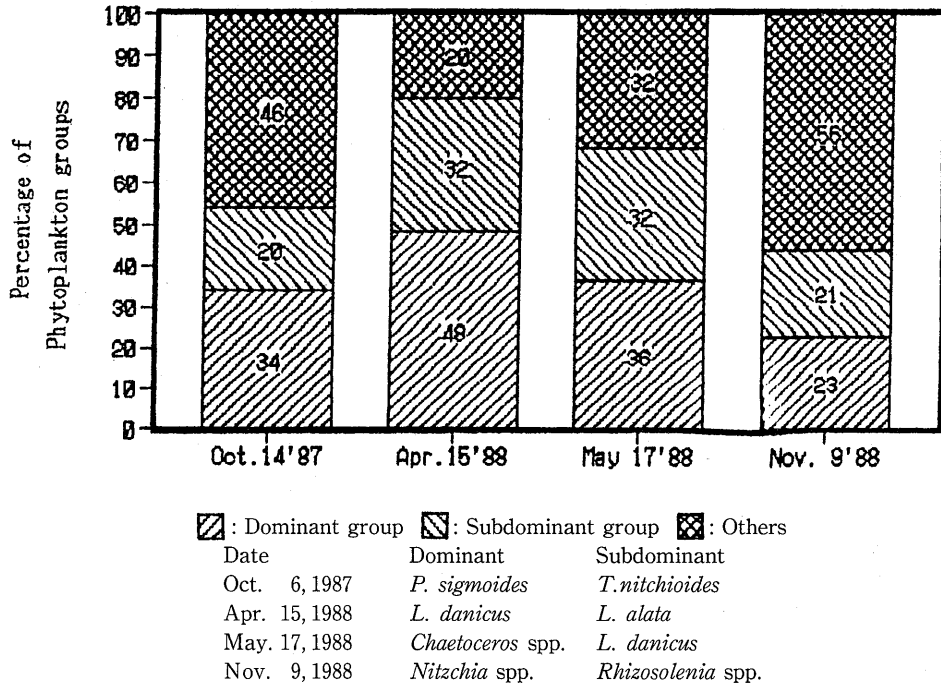


Fig. 8b. Percentage of phytoplankton groups (dominant, subdominant and others).

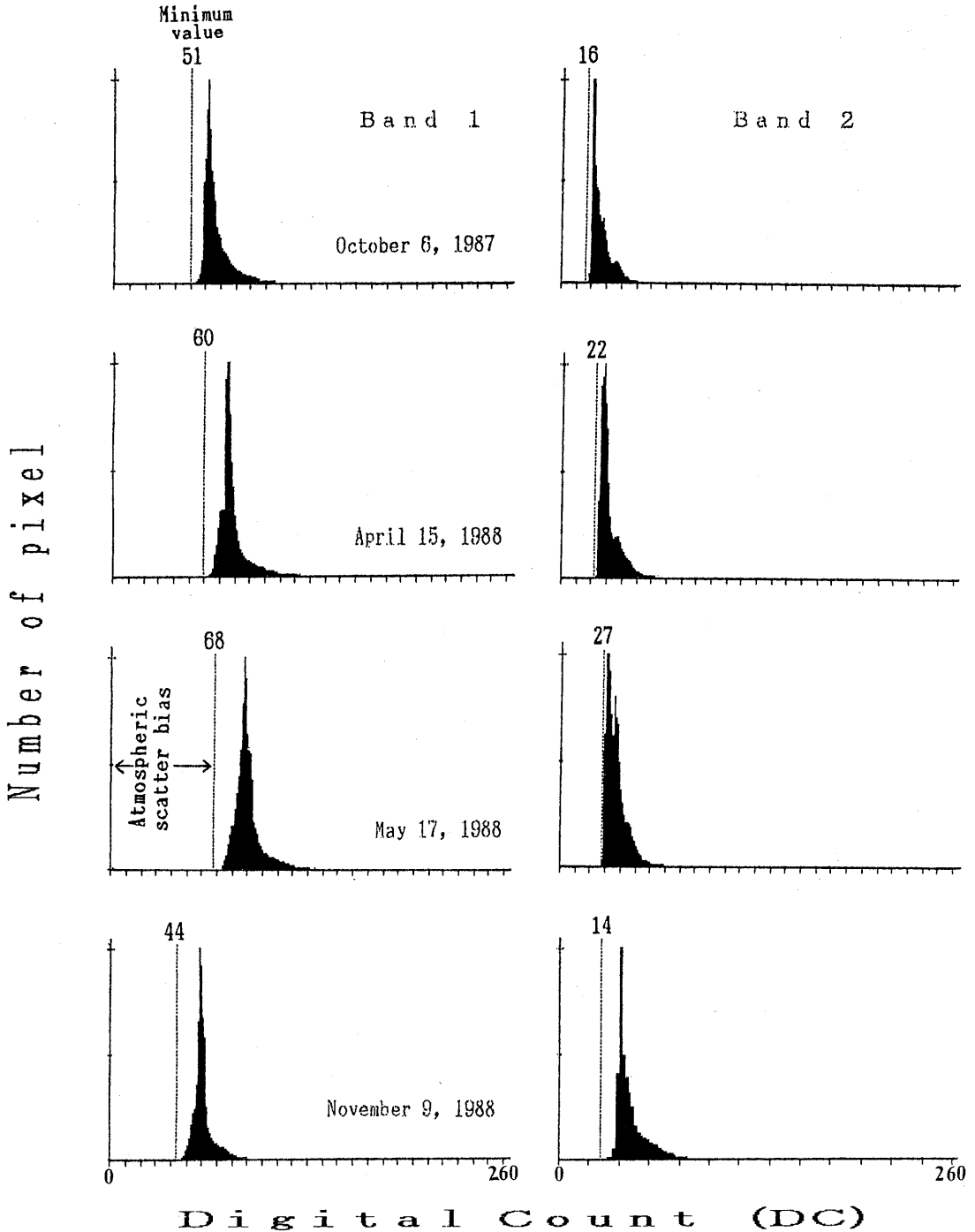


Fig. 9. Histogram of DC TM band 1 (left) and TM Band 2 (right).

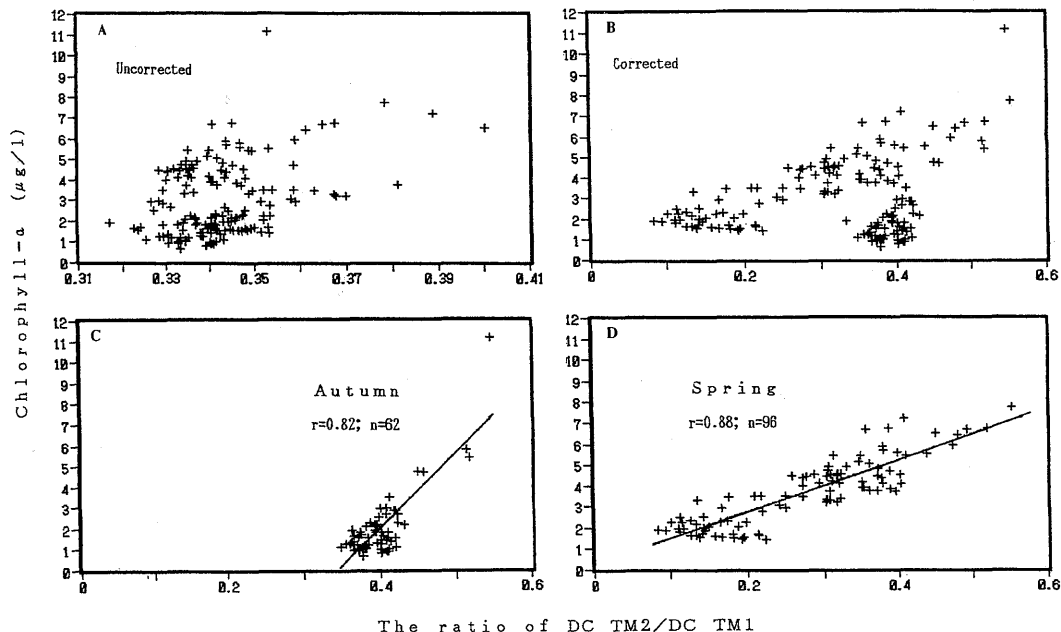


Fig. 10. Plot of chlorophyll *a* concentration and the ratio of DC TM band 2 over TM band 1. A:Uncorrected DC, B:Corrected DC, C:Corrected DC for autumn and D:Corrected DC for spring.

Table 2. Annually mean of total nutrients concentration in the middle and in southeast part of Omura Bay.

Year	Nitrogen (mg/l)		Phosphate (mg/l)	
	Middle of bay	Southeast part of bay	Middle of bay	Southeast part of bay
1984	0.19	0.22	0.013	0.018
1985	0.13	0.18	0.012	0.016
1986	0.15	0.28	0.013	0.019
1987	0.16	0.21	0.011	0.015
1988	0.14	0.22	0.012	0.015

んでいる。これらの河川水流入海域は栄養塩類濃度を高めることによって植物プランクトンの成長に良い条件を作り出している。

過去5年間の全リンと全チッソの年間平均値はいつも湾中央部で低く、ライン3を含む海域で高いことを示している (Table 2, 資料は長崎県衛生公害研究所による)。濁りの多いエстуアリにおける植物プランクトンのリモートセンシングは外洋域や透明度の高い湖などに比べて大変困難である。これは水文学的要因と共に生きている、或いは、死んでいる

懸濁粒子群の高い濃度と組成によるものであると言われている (Munday and Zubkoff, 1981; Lathrop and Lillesand, 1986)。本研究でも全懸濁粒子との関係で解析を進めたが、TM, MSS及びMESSRセンサーのすべてのバンドについての反射輝度と全懸濁粒子濃度との相関はきわめて低かった。ライン1, 2及び3の懸濁粒子の平均濃度と分散を計算した (Fig. 11)。それによると懸濁粒子の平均値は各ラインともほとんど同じ値をとるけれども、分散は大きく異なることが明らかになった。すなわちライン

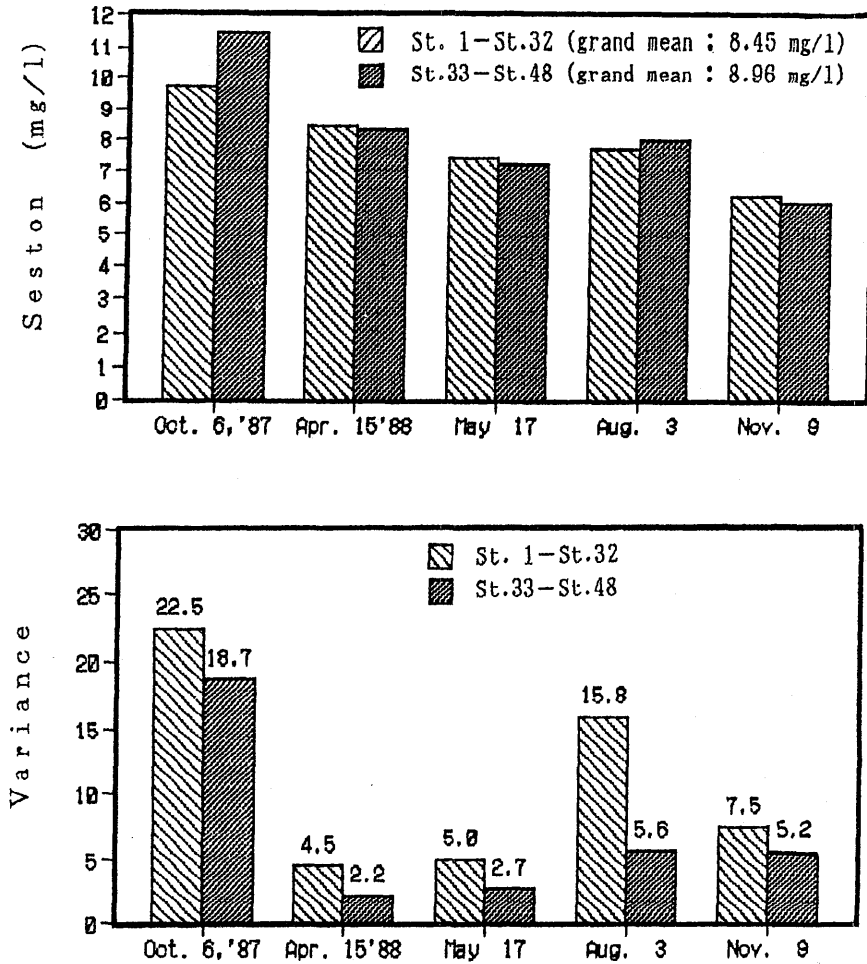


Fig. 11. Mean seston weight (upper) and its variance (lower) for each area.

1と2はライン3に比べて不均一分布していることを示している。ライン3では懸濁粒子群の分布が比較的均一であるのに対して、クロロフィル *a* 濃度は高いので、懸濁粒子群に比べてクロロフィル *a* のスペクトル特徴が顕著になったと思われる。一方、ライン1と2ではクロロフィル *a* 濃度が低いことに加えて、懸濁粒子の不均一分布のためスペクトル特徴が顕著にあらわれなかったと思われる。従って高い相関はライン3で見られ、全ライン(全域)を対象とした場合には見られなかった。ライン3のような条件の場合は、リモートセンシングは植物プランクトンのマッピングや濃度推定、あるいは分布の同時性が必要となる研究では有効である。

TMデータを使っての水質アセスメントの研究は少ないが、Lathrop and Lillesand (1986) はミシ

ガン州のGreen湾とかCentral湖で本研究と同じ結果を得ている。彼らによると懸濁粒子群はどのTMバンドにおいても相関が低かったが、クロロフィル *a* とTMバンド2との間にはきわめて高い相関があったとしている。様々なセンサー(MSS, Deadalus DS-1250 MSSなど)を使った水質アセスメントの研究があるが、これらの研究はクロロフィル *a* が懸濁粒子群よりも優先的に影響する時にはクロロフィル *a* の相関の方が懸濁粒子群のそれにより高いということを一般的に示している。逆に、懸濁粒子群の濃度が、例えば激しい降雨の後のように高い場合には、クロロフィル *a* の相関は低くなる(Munday and Zubkoff, 1981; Carpenter and Carpenter, 1983; Pelkey and Khorram, 1987; Cheshire and Khorram, 1987; Uno and Yokota, 1989)。

植物プランクトン色素であるクロロフィル a を測定するために CZCS のデータの解析は青色/緑色あるいは緑色/青色の比が一般に使われる。TM 1 (青色) と TM 2 (緑色) の中心波長はそれぞれ485 nm と565nm であるが, CZCS のそれらは青色で443 nm, 緑色で550nm のようになる。にもかかわらず, 波長に若干の相違はあるけれども, 大気補正した (TM 2 / TM 1) の比の多時期のデータはクロロフィル a と強い相関を示した。

ま と め

本研究の結果は次のようにまとめられる:

1. 大村湾の表層水クロロフィル a の時空間分布は冬季を除いて湾南東部津水湾の水域で多く, 湾中央部で少ない傾向が見られた。冬の分布は全湾均一で, その値は比較的高い。湾南東部におけるクロロフィル a の高い値はこの水域の栄養塩類の量と関係がある。
2. ランドサット5号の TM 2, MSS 6, 及びモス1号の MESSR 3 の5回のデータの直線回帰分析は湾南東部においてはつねにクロロフィル a の値と高い相関関係があることを示した。
3. クロロフィル a 濃度の低い湾中央部の水域は懸濁粒子の不均一分布によりすべてのデータで相関係数は低い値を示した。
4. TM の4回のデータに簡単な大気補正をしたあと季節別に解析すると, (TM 2 / TM 1) の比はクロロフィル a の値と良い相関を示すことが分かった。ランドサットでは大気補正についてまだ有効な手法はないのでこの処理は効果的である。
5. ランドサット TM を使って植物プランクトンのバイオマスの決定とかマッピングは湾南東部のような水域では効果的であった。

しかしながら, 本研究で得られた成果をさらに有効化するためには条件を異にする他水域についても検討することが必要である。

謝 辞

本論文は Sam Wouthuyzen が長崎大学大学院水産学研究科においてインドネシア科学協会 (Indonesian Science Institute-LIPI) 海外研究奨励金授与財団事業 (The Overseas Fellowship Program

-OFP)の一環として, 同研究科教授飯塚昭二の指導によって行った修士論文である。

Sam Wouthuyzen は OFP-IU ディレクター Dr. Ing. Wardiman Djojonegoro, OFP-LIPI コーディネーター Mrs. Moertini Atmowidjojo には奨学金のご援助をいただいたことにたいして, また, LIPI ディレクター Dr. Dodi Tisna Amidjaja 教授, 海洋開発調査中央研究所ディレクター Dr. Kasijan Romimohtarto, 及びアンボン海洋研究場ディレクター Mr. Soejatno Birowo には本事業に参加の機会を与えられ, 終始励ましていただいたご厚意に対して, ならびに日本-インドネシア科学技術フォーラム (Japan-Indonesia Science and Technology Forum) 事務局長所沢仁氏ならびに同事務局島山茂登男氏には, 日本滞在 OFP 学生としていろいろお世話になったことに対して, それぞれ深い感謝の気持ちを表します。

長崎大学水産学部海洋学研究室松山道郎教授ならびに松野健助教授には研究のご指導と原稿のご校閲を, 同学部千田哲資教授には貴重なコメントと英文校閲をいただき, 同大学工学部後藤恵之輔教授にはリモートセンシングに関する文献と情報のご紹介を受け, また国立西海区水産研究所漁場保全研究室長宇野史朗博士にはリモートセンシングデータと解析用プログラムの使用でご便宜をいただいたことに対し, それぞれ感謝の気持ちを表します。

海上作業では長崎大学水産学部実習船「朝霧」の吉田吾一船長および海洋学研究室の友人たちのご協力を受け有難うございました。

引用文献

- アジア航測株式会社(1987): リモートセンシング技術を用いたノリ被害防止技術の開発 (有明海). 昭和61年度赤潮対策技術開発試験報告書, 72 p.
- アジア航測株式会社(1988): リモートセンシング技術を用いたノリ被害防止技術の開発 (有明海). 昭和62年度赤潮対策技術開発試験報告書, 76 p.
- Aranuvachapun, S. and P. H. leBond (1981): Turbidity of coastal water determine from Landsat. Remote Sensing of Environ., 84: 113-132.
- Aranuvachapun, S. and R. I. Perry (1981): Spectral variation of coastal water irradiance as a measure of phytoplankton pigments. Int. J.

- Remote Sensing, 2 (4): 299-312.
- Barale, V. (1987): Remote observations of the marine environment: Spatial heterogeneity of mesoscale ocean color field in CZCS imagery of California near-coastal waters. *Remote Sensing of Environ.*, 22: 173-186.
- Carpenter, D. J. and S. M. Carpenter (1983): Modeling inland water quality using Landsat data. *Remote Sensing of Environ.*, 13: 345-352.
- Catts, G. P. (1985): Predicting estuarine chlorophyll *a* spatial distribution at ebb tide and flood tide from airborne multispectral scanner data. MS. Thesis, North California State University, 55p.
- Cheshire, H. M. and S. Khorram (1987): Monitoring North Carolina's nutrient-sensitive reservoirs using Landsat TM digital data. Technical papers. 1987 ASPRS-ACSM Annual Convention, Baltimore. Vol. 1: Remote Sensing, pp. 47-56.
- Clark, D. K. (1981): Phytoplankton pigment algorithms for the Nimbus-7 CZCS. In Gower J. F. R. (Ed.), *Oceanography from Space*, pp. 227-237. Plenum Press. N. Y.
- Clark, D. K., E. T. Baker and A. E. Strong (1980): Upwell spectral radiance distribution in relation to particulate matter in sea water. *Boundary-Layer Meteorology*, 18: 287-298.
- Clark, D. K., J. L. Mueller and W. A. Hovis (1980): Phytoplankton pigments from nimbus-7 Coastal Zone Color Scanner: Comparison with surface measurement. *Science* 120: 36-66.
- Clarke, G. L., G. C. Ewing, and C. J. Lorenzen (1970): Spectra of backscattered light from the sea obtained from air craft as a measure of chlorophyll concentration. *Science* 67: 1119-1121.
- Gordon, H. R. and D. K. Clark (1980): Atmospheric effects in remote sensing of phytoplankton pigments. *Boundary-Layer Meteorology* 18: 299-313.
- Gordon, H. R. and D. K. Clark (1981): Clear water radiances for atmospheric corrections of coastal zone color scanner imagery. *Appl. Opt.*, 20 (24): 4175-4180.
- Gordon, H. R., D. K. Clark, W. B. Brown, R. H. Evans, and W. E. Broenkow (1983): Phytoplankton pigment concentrations in the middle Atlantic Bight: comparison of ship determinations and CZCS estimates. *Appl. Opt.*, 22 (1): 20-36.
- 後藤 恵之輔・森 正寿 (1985): ランドサット TM データの特性分析と土地被覆判読への適用. 九州大学大型計算機センター計算機科学研究報告, 第2号: 31-44.
- 後藤 恵之輔・七條 哲彰・藤田 徹・森 正寿 (1988): 海洋観測衛星もも1号のデータによる融雪水の海洋流出調査. *海洋開発論文集*, vol. 4.
- Guan, F., J. Palaez and R. H. Stewart (1985): The atmospheric correction and measurement of chlorophyll concentration using the coastal zone color scanner. *Limnol. Oceanogr.*, 30(2): 273-285.
- Holligan, P. M. (1987): The physical environment of exceptional blooms in the Northeast Atlantic. In Parker, M. and P. Tett (Eds.), *Exceptional Plankton Blooms. Rapp. Reun. Cons. Explor. Mer.*, 187: 9-19.
- 飯塚 昭二 (1985): 大村湾, pp. 879-900. 日本海洋学会・沿岸海洋研究部会 (編): 日本全国沿岸海洋誌, 東海大学出版会 (東京).
- Kirk, J. T. O. (1983): *Light Photosynthesis in Aquatic Ecosystem*. Cambridge University Press, 401 p.
- 小笹 悦二 (1984): 東シナ海におけるクロロフィル分布-II. LANDSAT 3 で観測した1982年5月の分布特性. *西水研研報*, 61: 223-233.
- Lathrop, R. G. Jr. and T. M. Lillesand (1986): Utility of Thematic Mapper data to assess water quality in southern Green Bay and Lake Michigan. *Photogram. Eng. and Remote Sensing*, 52(5) 671-680
- Lathrop, R. G. Jr. and T. M. Lillesand (1987): Calibration of Thematic Mapper thermal data for water surface temperature mapping: case study on the Great Lakes. *Remote Sensing of Environ.*, 22: 297-307.
- Lathrop, R. G. Jr. and T. M. Lillesand (1988):

- Utility of SPOT-1 data to assess water quality in Southern Green Bay, Lake Michigan. 1988 ACSM-ASPRS Annual Convention, St. Lois. Vol. 4: Image Processing/Remote Sensing, pp. 102-111.
- Markham, B. L. and J. L. Barker (1985): Spectral characterization of the Landsat thematic mapper sensors. *Int. J. Remote Sensing*, 6 (5): 697-716.
- Maul, G. A. (1985): Introduction to Satellite Oceanography. Martinus Nijhoff Publishers, 606p.
- Muralikrishna, I. V. (1983): Landsat application to suspended sediments evaluation. In Cracknell A. P. (Ed.), *Remote Sensing Application in Marine Science Technology*, pp. 317-322. D. Reidel Publishing Company.
- 西条 八束(1975): クロロフィル *a* 測定法. 陸水学雑誌, 36(3): 103-109.
- Pelkey, P. D. (1986): Multidate analysis of remotely-sensed water quality parameters using Landsat MSS. MS. Thesis, North California State University, 88 p.
- Pelkey, P. D. and S. Khorram (1987): Development of multidate estuarine water quality models using Landsat-2 and 4 MSS data. Technical papers, 1987 ASPRS-ACSM Annual Convention, Baltimore. Volume 1: Remote Sensing, pp. 1-17.
- Platt, T., L. M. Dickey and R. W. Trites (1970): Spatial heterogeneity of phytoplankton in a near-shore environment. *J. Fish. Res. Bd. Canada*, 27 (8): 1453-1473.
- Prakash, A. (1987): Coastal organic pollution as a contributing factor to red-tide development. *Rapp. P. v. Reun. Cons. Explor. Mer.*, 187: 61-65.
- Price, J. C. (1987): Calibration of satellite radiometer and the comparison of vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 21: 15-27.
- Ritchie, J. C. and C. M. Cooper (1987): Comparison of Landsat MSS pixel array sizes for estimating water quality. *Photogram. Eng. and Remote Sensing*, 53 (11): 1549-1553.
- Ritchie, J. C., C. M. Cooper and J. Y. Qing (1987): Using Landsat multispectral data to estimate suspended sediments in Moon Lake, Mississippi. *Remote Sensing of Environ.*, 23: 65-81.
- Sathyendranath, S. and A. Morel (1983): Light emerging from the sea: Interpretation and uses in remote sensing. In Cracknell A. P. (Ed.), *Remote Sensing Application in Marine Science Technology*, pp. 323-357. D. Reidel Publishing Company.
- Smith, R. C. and W. H. Wilson (1981): Ship and satellite biooptical research in the California Bight. In Gower J. F. R. (Ed.), *Oceanography from Space*, pp. 227-237. Plenum Press. N. Y.
- Smith, R. C. and K. S. Baker (1982): Oceanic chlorophyll concentrations as determined by satellite (Nimbus-7 Coastal Zone Color Scanner). *Mar Biol.*, 66: 269-279.
- 田北 徹(1985) 大村湾, pp. 879-900. 日本海洋学海・沿岸海洋研究部会(編): 日本全国沿岸海洋誌, 東海大学出版会(東京).
- UNESCO (1978): *Phytoplankton Manual* (Ed. Sourina, A.), 337p.
- Uno, S., U. Sugahara, and S. Hayakawa (1980): Remote Sensing of Chlorophyll Found in Bodies of Water. *Proc., 14th Int. Symposium on Remote Sensing of Environment*, 2. ERIM, Ann Arbor, MI. pp. 1147-1157.
- Uno, S. and M. Yokota. (1989): Application of remote sensing techniques of red tide distribution in coastal areas. In Okaichi, T., D. M. Anderson and T. Nemoto (Eds.), *Red Tides: Biology, Environmental Science and Toxicology*, pp. 189-192. Elsevier Science Publishing Co., N. Y.
- U. S. Geological Survey (1984): *Landsat 4 Data Users Handbook*. USGS and NOAA.
- Walters, N. M. (1985): Algorithms for the determination of near-surface chlorophyll and semi-quantitative total suspended solids in South African Coastal Waters from Nimbus-7 CZCS data. In Shannon, L. V. (Ed.). *South African Ocean Colour and Upwelling Experiment*, pp. 175-182. Sea Fisheries Research Institute, Cape Town.

Wilson, K. H. and D. H. Kiefer (1979): Reflectance Spectroscopy of Marine Phytoplankton. Part 2, A Simple Model of Ocean Color. *Limnol. Oceanogr.* 24 (4): 673-682.

cal substances. In Cracknell A. P. (Ed.). *Remote Sensing Application in Marine Science Technology*, pp. 263-297. D. Reidel Publishing Company.

Yentch, C. S. (1983): Remote sensing of biologi-

Appendix-1a. ランドサット-TM 各バンドの観測波長域と利用分野.

バンド	観測波長域	一般的特質
1	0.45~0.52 μm (青色)	青色バンドと呼ばれる波長域で, 海岸水の区分, 土と植生の区別, 落葉樹と針葉樹の区別が可能である.
2	0.52~0.60 μm (緑色)	健康な植物からの緑の波長域の反射特性が観測される. 水についてはバンド1と2の比をとることにより, 溶解有植物やプランクトンの存在を知ることができる.
3	0.63~0.69 μm (赤色)	葉緑素の吸収度を評価する波長で, 植物の種類の違いを判読できる. またこのバンドは土質境界や地質境界の決定に最も適した可視光域である.
4	0.76~0.90 μm (近赤外)	植物はこの波長域で最も高い反射率を示すため, 植物の存在を知ることやその評価に有効である. また, 生命物質の調査や水際線の決定に適用できる. バンド2と4の比をとれば, 植物中の含水量を知ることができる.
5	1.55~1.75 μm (近赤外)	この波長域では, 葉の反射率と葉の含水量の関係が非常に大きいため, 植物の活性や植物のかんばつの状態を調べるのに役立つ. 岩石の分類や, 雪, 陸氷, 雲の相互区別にも有用である. また, 水はこの波長域においてよく吸収されるので, 降水量後の土中含水量の測定や水際線の決定が容易である.
6	10.4~12.5 μm (熱赤外)	地表面温度分布データを得るためのものである. 植生の区分, 植物被害の調査, 地熱地帯の探査などに適している.
7	2.08~2.35 μm (中間赤外)	主として地質区分, 特に熱水変質の生じた岩石とそうでない岩石の識別に役立つ. 健康な植物と虫害を受けたそれを区別するのにも有効である.

(後藤・森, 1985による)

Appendix-1b. ランドサット-MSS 各バンドの観測波長域と利用分野.

バンド	観測波長域	一般的特質
4	0.50~0.60 μm (緑色)	植生, 土地利用, 水深及び沿岸水域海底地形 (透明度大きい時).
5	0.60~0.70 μm (赤色)	植生, 土地利用, 水深及び沿岸水域海底地形 (透明度大きい時), 植物の違いを判読できる.
6	0.70~0.80 μm (近赤外)	水質の決定, 植物の違いを判読できる.
7	0.80~1.10 μm (近赤外)	沿岸線の決定, 植物の存在を知ることができる.

Appendix-1c. モス-1 MESSR 各バンドの観測波長域と利用分野.

バンド	観測波長域	一般的特質
1	0.51~0.59 μ m (緑色)	海域：沿岸海域及び湖水の汚染, 赤潮, 沿岸水域海底地形 (透明度大きい時). 陸域：植生, 積雪分布, 火山噴火降灰分布, 土地利用.
2	0.61~0.69 μ m (赤色)	海域：沿岸海域及び湖水の汚染, 赤潮, 渦. 陸域：土地利用, 地質構造, 植生, 積雪分布.
3	0.72~0.80 μ m (近赤外)	陸域：地表水, 湿原, 地質構造, 植生.
4	0.80~1.10 μ m (近赤外)	海域：氷分布, 水涯線, 水路. 陸域：地表水, 表層物質の地図作成.

(後藤ほか, 1988による)