

ランドサット画像を用いた内湾のクロロフィル分布の予測について

-- 三河湾における実測結果との比較 --

Distribution of chlorophyll concentration in Mikawa Bay and its prediction from Landsat TM data

青木伸一*・東 信行*・大林栄正**・戸田敏行***・中塚和嘉****

Shin-ichi Aoki, Nobuyuki Azuma, Terumasa Obayashi, Toshiyuki Toda and Kazuyoshi Nakatsuka

Field measurements of chlorophyll-a concentration are carried out in Mikawa Bay. Characteristics of horizontal, vertical and seasonal variations of the concentration are first investigated. The distributions of chlorophyll-a concentration are compared with Landsat TM data and the possibility of qualitative and quantitative monitoring from space is discussed. Higher correlation is found with the difference of CCT counts between band1 and band3 although further study is required for the quantitative prediction.

Keywords : chlorophyll-a, remote sensing, Landsat, water quality monitoring

1. まえがき

東京湾や伊勢湾などの内湾海域は慢性的な富栄養状態にあり、赤潮や青潮の被害が頻繁に発生している。これに対して、窒素やリンの流入負荷の削減、海底に堆積した有機汚泥の除去や覆砂など種々の水質改善策が講じられているが、それらの対策の効果を把握し次の適切な対策を立てるためには、富栄養化した水質の動態を明らかにするための継続的なモニタリングが不可欠である。伊勢湾に隣接する三河湾は、海水容量が小さくかつ海水交換の少ない閉鎖性の強い内湾であり、赤潮とそれに起因する苦潮（青潮）という深刻な水質問題が発生している。愛知県では湾内に20の観測点を設けて毎月水質観測を行っているが、湾全体の水質の動態を把握するためには、さらに観測網を細かくして観測頻度を上げる必要がある。また将来的には、水質の変化をリアルタイムにモニタリングすることなども要求されよう。

人工衛星画像を利用した環境解析は既に陸上部では盛んに行われているが（土屋，1990），近年海域においても、水温分布、クロロフィル濃度分布、濁度分布等が人工衛星データから推定できることなどがわかってきており（杉森，1982），今後内湾域においても人工衛星による水質のモニタリングが期待される。人工衛星画像は同時に広範囲の情報が得られ、費用もあまりかからないことから、海域のような広範囲を対象とするモニタリングには適しているが、人工衛星で捉えられる海域の光学的情報は微弱である上に、情報が表層水のみに限られる点や、多くの水質項目を定量的に分析することが難しいなどの問題点を有している。

本研究は、富栄養化した内湾の重要な水質指標であるクロロフィル濃度に着目し、三河湾における現地観測データをもとに湾内での分布特性および季節変動特性を明らかにするとともに、ランドサットTM画像を用いたモニタリングの可能性や問題点について検討するものである。

2. 三河湾におけるクロロフィル濃度の分布特性および季節変動特性

まず、1995年から1996年にかけて行った三河湾東部海域（渥美湾）における4回の水質観測結果および愛知県の定期観測データをもとに、クロロフィル濃度およびその他水質項目の空間分布特性および季節変動特性を明らかにする。

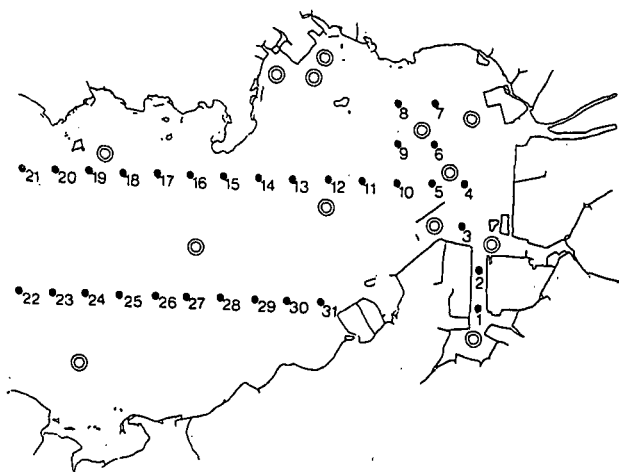


図-1 三河湾内の水質観測点

* 正会員 豊橋技術科学大学建設工学系

** 豊橋技術科学大学大学院建設工学課程

*** 正会員 東三河地域研究センター

**** 正会員 運輸省第5港湾建設局三河港工事事務所

(〒441愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)

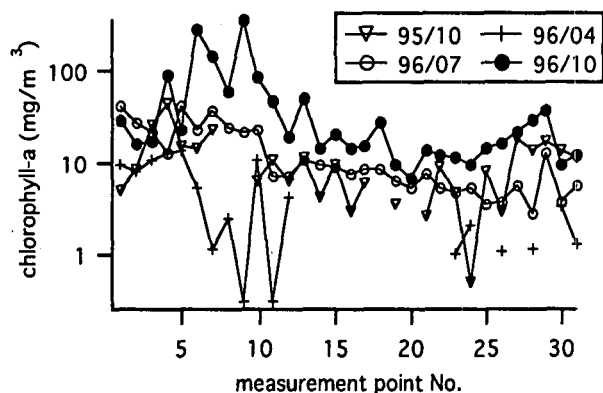


図-2 表層水のクロロフィル濃度の分布

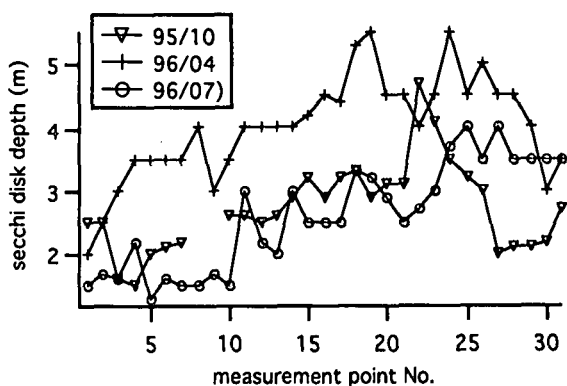


図-3 透明度の分布

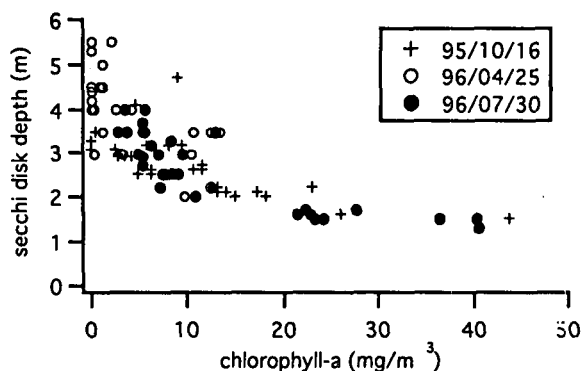
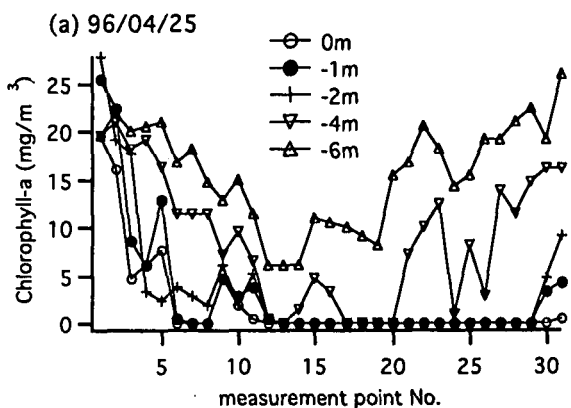


図-4 クロロフィル濃度と透明度の関係

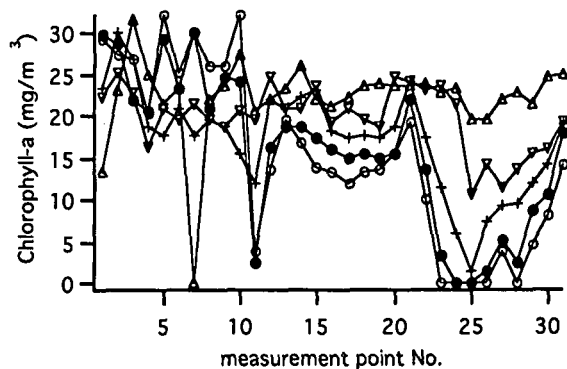
(1) クロロフィル濃度の平面分布および鉛直分布

1995年10月16日、1996年4月25日、7月30日および10月18日の計4回にわたり、三河湾内において水質測定を行った。測定点は、図-1中に黒丸で示す31地点（東西方向の間隔約1.5km）である。表層水のサンプリングを行うとともに、クロロフィル測定用海中蛍光光度計（バリオセンス）を用いて、表層から水面下6mまでのクロロフィル-aの濃度を測定した。また、濁度（現地用濁度計）、水温および透明度についても同時に測定した。サンプリングした表層水は、ろ過、ジメチルホルムアミドによる抽出の後、分光光度計による分析を行ってクロロフィル-a濃度を求めた。またこれを基準値として海中蛍光光度計のキャリブレーションを行った。

図-2は、測定した表層水のクロロフィル濃度の分布を、測点番号を横軸にとって示したものである。1996年4月は全体に濃度が低く（No.12~22では0に近い）、1996年10月は湾奥部で赤潮が発生しており、クロロフィル濃度が極めて高かった。ただし、いずれの観測日においても、クロロフィル濃度は湾奥部で高く、湾口部で低いという傾向がはっきり現われている。図-3は透明度の分布を示したものであるが、クロロフィル濃度とは逆に、湾口部で大きく湾奥部で小さくなる傾向にあることがわかる。図-4は、クロロフィル濃度と透明度の関係を示したものであるが、観測日にかかわらず、透明度はクロロフィル濃度の増大にともなって指数関数的に減少しており、河川からの濁水流出がない場合には三河湾の透明度はクロロフィル濃度によってほぼ決定づけられていることがわかる。図-5(a)-(c)は、1996年の4月、7月および



(a) 96/04/25



(b) 96/7/30

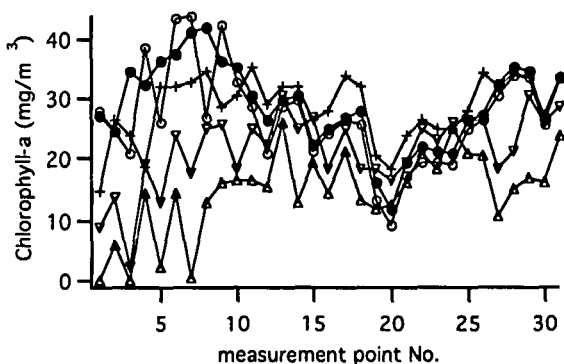


図-5 クロロフィル濃度分布の水深方向変化

10月に測定した水面下6mまでのクロロフィル濃度の分布を示したものである。4月には表層ではクロロフィル濃度は非常に低く、水深4～5m付近で急激に増大しており、植物プランクトンの躍層が存在していることがわかる。7月は水深方向の変化はあまり大きくないが、三河湾南側の測点で表層の濃度が低下している。一方10月の観測では、全体的に表層で濃度が高く水深が大きくなるにつれて濃度が低下している。このように、クロロフィル濃度の鉛直分布は、観測時期や観測地点によって大きく変化しており、表層のクロロフィル濃度は必ずしも湾内のクロロフィル濃度の代表値にはなっていないことがわかる。なお、濁度については、1996年10月の赤潮発生時の測定ができなかったが、その他の観測日においては、湾奥でわずかに検出される場合がある程度であった。水温については、夏の観測では成層が見られたが、春や秋には水温の変動は水平・鉛直方向とも小さかった。

(2) クロロフィル濃度の季節変動

愛知県では、図-1中に二重丸で示す渥美湾内の13点において、毎月初旬に1回種々の水質項目について定期観測を行っている。図-6(a),(b)は、表層水のクロロフィル濃度と透明度および表層水のCODについて、1992, 1993および1995年の3年間の観測値を月ごとに13の全観測点にわたって平均し、それらの平均的な季節変化を示したものである。これより、表層のクロロフィル濃度は、6～7月の夏場と10月に高く、それと反比例するように透明度は夏から秋にかけて低下していることがわかる。一方CODについては、初夏から秋口まで継続して高濃度を示している。

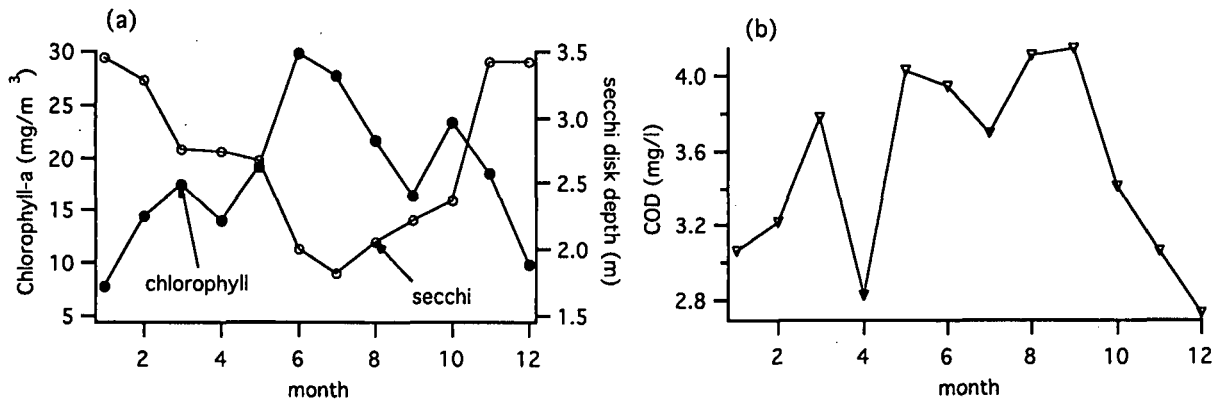


図-6 三河湾におけるクロロフィル濃度、透明度およびCODの平均的な季節変化

3. ランドサット画像との比較

前項で述べた4回の水質観測はランドサットの飛来日にあわせて行ったものである。ここでは測定したクロロフィル濃度とランドサットTMデータとの比較を行い、画像データからクロロフィル濃度の分布を予測するための問題点について考察する。ランドサットTMセンサーの各バンドの特性を表-1に示す。TMセンサーは可視波長域では30mの分解能があるが、今回は三河湾上のデータのみを60mメッシュに間引いてフロッピーディスクに切り出したものを(財)リモートセンシング技術センターより購入した。ただし、1996年7月については雲が多く比較を行うことができなかった。1995年10月についても雲が多かったが、数点を除いて比較が可能であった。

表-1 ランドサットTMセンサーの特性

Band No.	Band Centre (nm)	Band Width (nm)
1	485 (blue)	70
2	560 (green)	80
3	660 (red)	60
4	830 (nearIR)	140
5	1,650 (midIR)	200
6	11,450 (thermal)	2,100
7	2,215 (midIR)	270

クロロフィル濃度を人工衛星画像から予測する試みは外洋では盛んに行われており、特にNIMBUS7に登載されたCZCSセンサーの可視域バンドを用いたアルゴリズムが種々提案され、その有用性が検証されている(杉森・坂本, 1985)。これらの多くは、波長の異なる2バンド間の輝度値の比とクロロフィル濃度を関係づけるものである(Gordon et al., 1983; Sugihara et al., 1985; Tassan, 1993)。ただし、このアルゴリズムは、外洋のように清澄な水域でクロロフィル濃度が数mg/m³以下と小さい場合に対するものであり、富栄養化の進んだ内湾のように、時にクロロフィル濃度が100mg/m³を超えるような赤潮状態が発生するほどクロロフィル濃度が高く、かつ懸濁物質や溶存性有機物の多い海域には適用できないといわれている(沖・安岡, 1996)。さらに、これらのモデルを用いるためには、大気補正が正確に行われ(Gordon, 1980)、人工衛星で取得した各バンドの輝度値から水面直上における分光放射輝度が精度良く推定されなければならない。しかし、一般に水域の影響が現われないとして大気補正に用いられる長波長域バンドのデータにも、クロロフィル濃度や懸濁物質の濃度が高い場合には水域特性の影響が現われる

ことが指摘されており(水尾, 1991; 沖・安岡, 1996), 外洋で用いられているようなアルゴリズムをそのまま適用することは困難である。

1996年4月および10月の観測日は快晴であり, かつ4月は湾奥の数点を除いて表層のクロロフィル濃度が極めて小さく, 10月は全体的にクロロフィル濃度が高く湾奥では赤潮が発生しているという2つの特徴的な濃度分布が観測された。ここでは, これら両日に対する輝度の分布を比較しながら考察を進める。図-7は, 可視波長域に相当するband1~3の測点毎の輝度値(CCT値)の分布を示したものである。ただし, 輝度データにはノイズが含まれるため, 7×7 画素(約420m四方)の平均値として表してある。4月の輝度値の変化は, 各バンドとも全体的には同じ様な変化傾向を示しているが, 10月については, クロロフィル濃度の非常に高い測点No.5~10付近でband1の輝度値が減少しているのに対して, band3の輝度値が増加するという逆の傾向を示していることがわかる。これは高濃度に存在するクロロフィルの影響の現われであると考えられる。そこで, これを強調するために, band1の輝度値からband3の輝度値を差し引いたものをプロットすると図-8を得る。輝度値の差の変化は, 図-2のクロロフィル濃度の分布とちょうど逆の傾向を示しており, 単一のバンドのみで比較するよりも傾向がはっきり現われることがわかる。図-9は, 10月のデータに対して, クロロフィル濃度と輝度値の相関を見たものである。図(a)はクロロフィル濃度とband1のみの輝度値との, 図(b)は (band1の輝度値) - (band3の輝度値) との相関を示しているが, 差演算を行うことにより, 負の相関が明確に現われることがわかる。この様なバンド間の差演算は, 水面からの情報を強調するだけでなく, 輝度値の大部分を占める大気によるパスラジアンスの影響を相対的に小さくする効果があるため, 水質情報の抽出に有効になるものと推測される。図-10は, band1-band3のCCT値の平面分布を図示したものであるが, 湾奥で小さな値を,

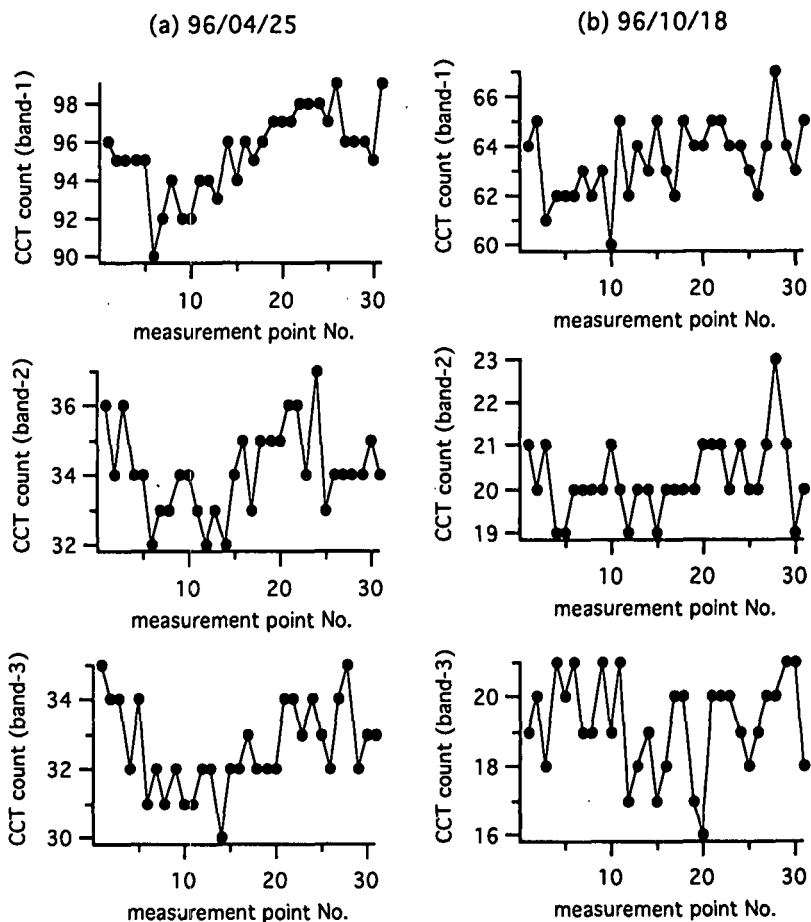


図-7 可視波長域における輝度値の分布

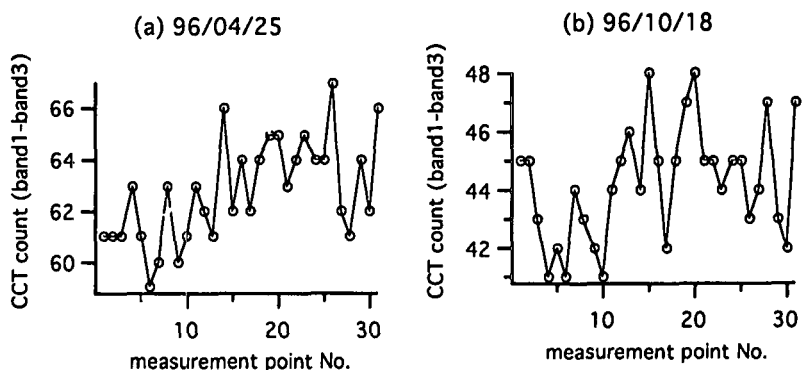


図-8 band1とband3の輝度値の差の分布

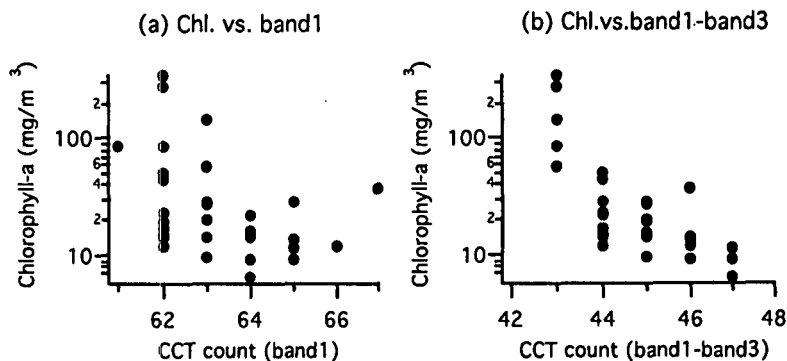


図-9 クロロフィル濃度と輝度値の関係

湾口部および太平洋沿岸で大きな値を示しており、クロロフィル濃度の分布を定性的に説明している。なお、従来外洋で用いられているような、各バンド間の比演算についてもクロロフィル濃度との関係を調べたが、大気補正を行っていないこともあり、上に示したような相関は見られなかった。また、宇多ら（1988）が提案している方法を用いて、band5による大気補正を試みたが、輝度値の分布に大きな変化は見られなかった。図-11は、1995年10月、1996年4月および10月の3回の実測に対するband1-band3の輝度値とクロロフィル濃度の関係をプロットしたものである。いずれの実測日についても負の相関が見られるが、個々の実測毎に異なった回帰曲線が予想され、統一的に説明できるまでには至っていない。今回は水質項目としてクロロフィル濃度のみを対象にしたが、内湾域では水域の光学的特性はその他の水質指標とも密接に関連していると言われている（小林ら、1996）。今後定量的な予測に向けては日射量や大気の状態を考慮したアルゴリズムの開発とともに、他の水質項目との関連を調べる必要がある。

4. あとがきおよび謝辞

富栄養化が問題になっている三河湾においてクロロフィル濃度を測定し、その分布特性を明らかにするとともに、ランドサットTMデータとの比較を行って人工衛星画像を用いたクロロフィル濃度のモニタリングの可能性について検討した。得られた知見は以下のとおりである。（1）クロロフィル濃度は湾奥で大きく湾口部で小さいという傾向がはっきりしているが、水深方向の分布には季節的、場所的な変化が大きく現われる。また、透明度はほぼクロロフィル濃度によって決定される。（2）実測されたクロロフィル濃度の空間的な変動は、ランドサットの各バンドの輝度値のうち、band1とband3の差演算と比較的良好な相関を示す。ただし、観測日の異なる観測結果を統一的に説明するためには、さらに検討が必要である。

本研究は（財）東海産業技術振興財団および（財）立松財団の研究助成を受けて行ったものであり、ここに記して謝意を表します。また、水質観測に当たりご協力いただいた愛知県水産試験場および豊橋技術科学大学衛生工学研究室の方々に感謝いたします。

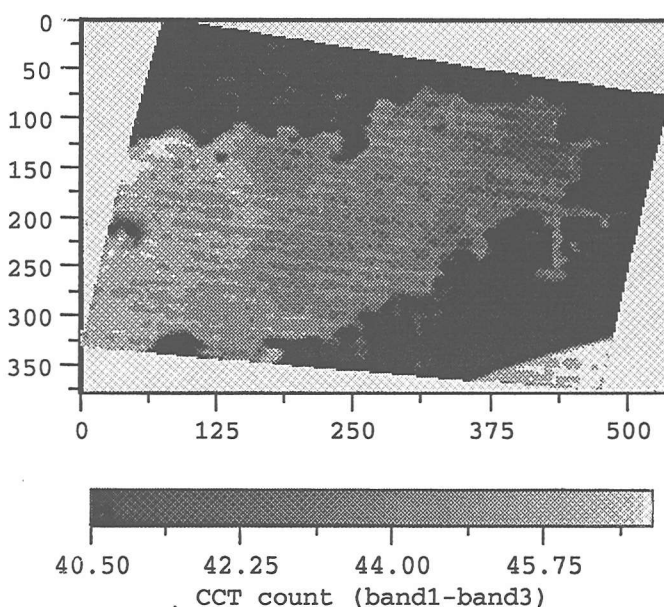


図-10 band1とband3の輝度値の差の平面分布

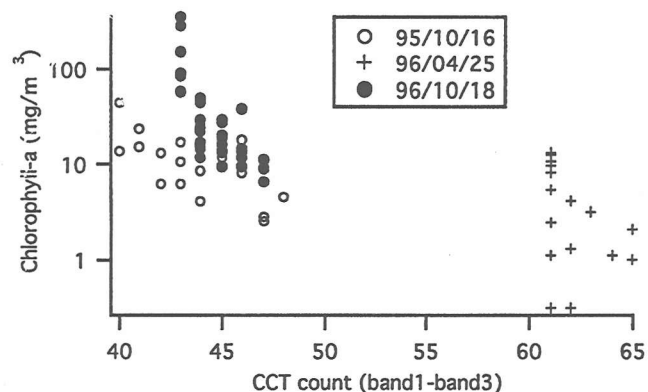


図-11 クロロフィル濃度と輝度値の関係（3回の実測結果）

参考文献

- 宇多高明・村井慎美・竹淵 勉（1988）：海域調査における衛星リモセンデータの実用的補正法，第35回海岸工学講演会論文集，pp.787-791.
- 沖 一雄・安岡善文（1996）：高濃度水域における近赤外波長帯を含む二波長によるクロロフィルa推定モデルの作成，日本リモートセンシング学会誌，vol.16, No.4, pp.1-9.
- 小林 拓・大田幸雄・村尾直人・橘 治国・山形 定（1996）：リモートセンシングによる赤潮プランクトン濃度推定のための基礎的研究，環境工学研究論文集，第33巻，pp.85-93.
- 杉森康宏（1982）：海洋のリモートセンシング，共立出版，275p.
- 杉森康宏・坂本 亘（1985）：海洋環境光学，東海大学出版会，356p.
- 土屋 清（1990）：リモートセンシング概論，朝倉書店，328p.
- 水尾寛己・二宮勝幸・雫石雅美・多賀保志・安岡善文（1991）：TMデータによる東京湾のクロロフィルa量の観測の検討 - 中間赤外域における水質情報抽出の可能性 -，日本リモートセンシング学会誌，vol.11, No.3, pp.135-139.
- Gordon, H.R. et al (1980): Remote sensing optical properties of a stratified ocean: an improved interpretation, Appl. Optics, 19, pp.3428-3430.
- Gordon, H.R. et al. (1983): Phytoplankton pigment concentrations in the Middle Atlantic Bight: comparison of ship determinations and CZCS estimates, Appl. Optics, 22(1), pp.20-36.
- Sugihara, S, M. Kishino and N. Okami (1985): Correlation of chlorophyll concentrations and suspended solids with near-surface upward irradiance within LANDSAT Bands 4, 5 and 6, Jour. of the Oceanography Society of Japan, vol.41, pp.81-88.
- Tassan, S (1993): An improved in-water algorithm for the determination of chlorophyll and suspended sediment concentration from Thematic Mapper data in coastal waters, Int. Jour. of Remote Sensing, vol.14, No.6, pp.1221-1229.