

第8章 大気補正アルゴリズムによるクロロフィル a 濃度の推定

水尾寛己*, 岡 敬一**, 安岡善文***, 二宮勝幸*, 吉見 洋**

8-1 はじめに

第7章において、エアロゾルの影響のあるシーンについて、クロロフィル a と TM 各バンドとの相関係数行列を大気中の SPM (浮遊粒子状物質) 濃度との関係で検討し、SPM が $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上の場合、TM 各バンドとクロロフィル a 濃度との間に相関が見られず、TM データからのクロロフィル a 濃度の推定が難しいことを明らかにした。

大気補正アルゴリズムについては、Gordon ら^{1,2)}や安岡ら^{3,4)}及び東海大学^{5,6)}など数多くの研究^{7~11)}があるが、Gordon らによる大気補正アルゴリズムは有名である。アメリカ近海で C Z C S (Coastal zone color scanner, 沿岸域海色操作計) データに対する大気補正により、クロロフィル濃度の推定ができたと報告されている。しかし、東海大学の報告⁶⁾によれば、日本近海でのエアロゾル濃度は一般に高く、春先には黄砂の影響もあることから、日本周辺の海域に適した大気補正手法が必要であるとのべている。安岡ら³⁾は、茨城県霞ヶ浦で航空機 MSS (Multispectral scanner) とランドサット MSS による水質推定について検討し、クロロフィル a 濃度については、航空機 MSS とは相関が見られたが、ランドサット MSS とは相関が得られず、原因の一つとして大気の影響をあげ、実用的大気補正手法の必要性を述べている。また、ランドサット TM データについては海域での大気補正アルゴリズムの研究例は少ないけれども、MSS に比べてバンド数が多く、1画素が 30 m^2 と解像度が高い特徴がある。

今回、筆者らは、TM データによるクロロフィル a 濃度の推定における実用的大気補正手法について検討し、横浜市沿岸近辺の SPM 濃度 (エアロゾルの指標として使用) と各 TM データとの関係において得られる単回帰式を用いることによって、バンド 1 によって SPM 濃度を推定し、その推定値をバンド 4 から除くことによってクロロフィル a 濃度の推定が可能であることを数式で明らかにした。この数式から求めたクロロフィル a 濃度について実測値と相関分析をおこない、クロロフィル a 濃度推定モデルの有効性が推定できたので報告する。

8-2 水質観測データによる大気補正アルゴリズムの推定モデル

8-2-1 TM データの前処理法及び解析に使用したデータ

TM データは、リモートセンシング技術センターから購入した幾何補正済みのもので水質調査地点の周辺 3画素×3画素の平均値を用いた。(但し、1画素は 30 m^2 である。1986年8月6日と1987年3月2日の TM データについては9画素×9画素の平均値を使用した。)

また、エアロゾルとの関係を見るうえから、各 TM データに対して太陽高度角補正及び CCT (Computer Compatible Tape, 電子計算機適合テープ) 上の値から輝度値への変換を行った。太陽高度角補正は、太陽

Removal of atmospheric effects in the remote sensing of Chlorophyll-a

*Hiromi Mizuo, **Keichi Oka, ***Yoshihumi Yasuoka, *Katsuyuki Ninomiya, **Hiroshi Yoshimi

*横浜市環境科学研究所, **神奈川県環境科学センター, ***国立環境研究所

高度角が90度の時の係数を1として、それぞれの仰角から求めた係数を用いて行った。輝度値への変換は、表8-1の式によりおこなった。

CCT値から輝度値への変換は次式により、おこなった。

$$R = \frac{V}{D_{\max}} \times (R_{\max} - R_{\min}) + R_{\min}$$

ここで、Vは補正済みCCTのデジタル値、Rはその時の絶対輝度、Rmax、Rminは検出器の最大及び最小の放射輝度で、デジタル値Dmaxおよび0にそれぞれ対応している。各バンドのRmax、Rminは表8-1の値を使用した。DmaxはTMデータでは255である。

大気中のエアロゾル濃度の指標は、横浜市内の臨海部にある大気常時監視測定局で地上1.5mのところ測定している大気浮遊粒子状物質濃度の9時と10時の1時間値の平均値を用いた。

水質データは、1986年8月6日と1987年3月2日については広域調査のものを使用し、1989年8月14日、1990年4月27日、1990年5月29日、1990年11月5日及び1992年6月3日については横浜市環境科学研究所で取得したものを使用した。解析に用いたクロロフィルa濃度及びTMデータを表8-2に示した。

8-2-2 推定モデル作成に先だって1, 2の検討

8-2-2-1 クロロフィルa濃度とTM各バンドとの関係

第7章の7-2-2 (大気中のエアロゾルの影響が小さいと思われる条件下で) 無機懸濁物質の影響の弱い水質でのクロロフィルa濃度とTMデータとの関係 において、クロロフィルa濃度とTMデータのバンド2, 3, 4, 5, 7とそれぞれに正の相関が確認されている。Gordonらの海洋におけるクロロフィルa濃度とCZCSデータとの比較結果では、443nmでの海面放射輝度(Lw(443))では、クロロフィル濃度に比例して吸収が増加する関係を示し、670nmでの海面放射輝度(Lw(670))では水質情報は0(ゼロ)とみなせるとしている。その結果670nmでのエアロゾルによる散乱光の放射輝度(LA(670))等から波長443nm, 520nm, 550nmでのエアロゾルによる散乱光の放射輝度(LA(λ))を求め、その結果からそれぞれの海面放射輝度(Lw(λ))を推定し、たとえば{Lw(443)/Lw(520)}、または{Lw(443)/Lw(550)}等からクロロフィル濃度を推定するモデルを示し、海洋に適用できることを明らかにしている。しかし、日本においては

表8-1 ランドサット5号TMの最大・最小放射輝度

(単位: mw/cm²sr)

| バンド | Rmin | Rmax | バンド幅 |
|-----|----------|--------|-------|
| 1 | -0.0099 | 1.004 | 0.066 |
| 2 | -0.0227 | 2.404 | 0.081 |
| 3 | -0.0083 | 1.410 | 0.069 |
| 4 | -0.0194 | 2.660 | 0.129 |
| 5 | -0.00799 | 0.5873 | 0.216 |
| 7 | -0.00375 | 0.3595 | 0.250 |

(「地球観測データ利用ハンドブック」RESTECより引用)

表8-2 解析に使用したデータ(I)

(バンドの単位: $\text{mw}/\text{cm}^2 \cdot \text{sr}$)

| データの種類 | バンド1 | バンド2 | バンド3 | バンド4 | バンド5 | バンド7 | クロフィル-a ($\mu\text{g}/\text{l}$) |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------------------------------------|
| 1986. 08. 06 | | | | | | | |
| 11 | 0.306 | 0.239 | 0.112 | 0.077 | 0.009 | 0.001 | 38.0 |
| 12 | 0.314 | 0.238 | 0.117 | 0.092 | 0.013 | 0.003 | 41.0 |
| 14 | 0.309 | 0.239 | 0.115 | 0.084 | 0.011 | 0.002 | 37.0 |
| 15 | 0.315 | 0.248 | 0.122 | 0.093 | 0.013 | 0.003 | 51.0 |
| 16 | 0.305 | 0.230 | 0.101 | 0.078 | 0.008 | 0.002 | 13.0 |
| 17 | 0.319 | 0.255 | 0.128 | 0.102 | 0.015 | 0.004 | 56.0 |
| 49 | 0.305 | 0.240 | 0.106 | 0.069 | 0.007 | 0.001 | 12.0 |
| 1987. 03. 02 | | | | | | | |
| 2 | 0.392 | 0.308 | 0.138 | 0.109 | 0.013 | 0.003 | 10.0 |
| 3 | 0.389 | 0.300 | 0.135 | 0.116 | 0.013 | 0.003 | 10.0 |
| 11 | 0.383 | 0.293 | 0.135 | 0.122 | 0.013 | 0.003 | 8.5 |
| 12 | 0.383 | 0.302 | 0.135 | 0.113 | 0.015 | 0.003 | 6.9 |
| 14 | 0.381 | 0.290 | 0.134 | 0.099 | 0.010 | 0.002 | 5.6 |
| 15 | 0.389 | 0.295 | 0.133 | 0.102 | 0.010 | 0.002 | 5.3 |
| 16 | 0.390 | 0.300 | 0.132 | 0.099 | 0.011 | 0.003 | 1.7 |
| 17 | 0.391 | 0.297 | 0.132 | 0.104 | 0.010 | 0.002 | 4.3 |
| 22 | 0.388 | 0.284 | 0.122 | 0.094 | 0.009 | 0.001 | 1.6 |
| 26 | 0.388 | 0.310 | 0.144 | 0.115 | 0.011 | 0.003 | 12.2 |
| 1989. 08. 14 | | | | | | | |
| 1 | 0.393 | 0.340 | 0.187 | 0.185 | 0.031 | 0.010 | 102.4 |
| 2 | 0.409 | 0.341 | 0.189 | 0.178 | 0.034 | 0.009 | 65.0 |
| 3 | 0.376 | 0.311 | 0.166 | 0.157 | 0.024 | 0.005 | 85.4 |
| 4 | 0.427 | 0.352 | 0.200 | 0.213 | 0.038 | 0.012 | 73.0 |
| 5 | 0.400 | 0.333 | 0.189 | 0.176 | 0.030 | 0.009 | 68.5 |
| 6 | 0.393 | 0.325 | 0.182 | 0.170 | 0.029 | 0.007 | 76.5 |
| 7 | 0.400 | 0.326 | 0.176 | 0.172 | 0.029 | 0.008 | 72.1 |
| 8 | 0.398 | 0.334 | 0.179 | 0.173 | 0.028 | 0.007 | 51.6 |
| 9 | 0.410 | 0.344 | 0.191 | 0.189 | 0.033 | 0.009 | 60.5 |
| 10 | 0.387 | 0.314 | 0.160 | 0.154 | 0.024 | 0.006 | 48.1 |
| 1990. 04. 27 | | | | | | | |
| 1 | 0.494 | 0.460 | 0.265 | 0.249 | 0.039 | 0.012 | 23.0 |
| 2 | 0.503 | 0.460 | 0.271 | 0.270 | 0.046 | 0.013 | 50.2 |
| 3 | 0.474 | 0.438 | 0.241 | 0.229 | 0.038 | 0.010 | 24.0 |
| 4 | 0.470 | 0.426 | 0.251 | 0.252 | 0.045 | 0.013 | 33.1 |
| 5 | 0.460 | 0.416 | 0.244 | 0.241 | 0.039 | 0.012 | 70.5 |
| 6 | 0.444 | 0.400 | 0.227 | 0.231 | 0.035 | 0.010 | 75.3 |
| 7 | 0.468 | 0.417 | 0.249 | 0.246 | 0.042 | 0.014 | 78.0 |
| 8 | 0.480 | 0.456 | 0.265 | 0.267 | 0.039 | 0.011 | 61.9 |
| 9 | 0.460 | 0.413 | 0.238 | 0.237 | 0.038 | 0.011 | 52.5 |
| 10 | 0.475 | 0.443 | 0.261 | 0.262 | 0.040 | 0.011 | 48.1 |

表8-2 解析に使用したデータ(2)

(バンドの単位: $\text{mw}/\text{cm}^2 \cdot \text{sr}$)

| データの種別 | バンド1 | バンド2 | バンド3 | バンド4 | バンド5 | バンド7 | クロフィル-a ($\mu\text{g}/\text{l}$) |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------------------------------------|
| 1990.05.29 | | | | | | | |
| 1 | 0.383 | 0.325 | 0.181 | 0.168 | 0.024 | 0.006 | 172.0 |
| 2 | 0.378 | 0.310 | 0.179 | 0.181 | 0.027 | 0.007 | 162.0 |
| 3 | 0.350 | 0.285 | 0.154 | 0.148 | 0.020 | 0.006 | 126.0 |
| 4 | 0.352 | 0.276 | 0.145 | 0.129 | 0.014 | 0.004 | 46.7 |
| 5 | 0.344 | 0.274 | 0.141 | 0.129 | 0.017 | 0.004 | 42.7 |
| 6 | 0.347 | 0.275 | 0.150 | 0.134 | 0.018 | 0.005 | 45.3 |
| 7 | 0.355 | 0.288 | 0.157 | 0.144 | 0.019 | 0.005 | 40.9 |
| 8 | 0.352 | 0.279 | 0.146 | 0.135 | 0.021 | 0.005 | 74.8 |
| 9 | 0.352 | 0.283 | 0.149 | 0.130 | 0.019 | 0.006 | 28.5 |
| 1990.11.05 | | | | | | | |
| 1 | 0.340 | 0.247 | 0.105 | 0.082 | 0.008 | 0.005 | 6.0 |
| 2 | 0.340 | 0.243 | 0.117 | 0.087 | 0.012 | 0.004 | 20.8 |
| 3 | 0.337 | 0.247 | 0.109 | 0.082 | 0.006 | 0.005 | 10.0 |
| 4 | 0.352 | 0.255 | 0.117 | 0.090 | 0.010 | 0.003 | 9.6 |
| 5 | 0.327 | 0.229 | 0.101 | 0.080 | 0.007 | 0.003 | 4.8 |
| 6 | 0.322 | 0.228 | 0.104 | 0.076 | 0.005 | 0.004 | 15.0 |
| 7 | 0.337 | 0.228 | 0.111 | 0.083 | 0.007 | 0.005 | 21.9 |
| 8 | 0.331 | 0.250 | 0.105 | 0.078 | 0.004 | 0.005 | 6.4 |
| 9 | 0.336 | 0.231 | 0.100 | 0.067 | 0.004 | 0.003 | 14.4 |
| 10 | 0.335 | 0.233 | 0.105 | 0.063 | 0.005 | 0.006 | 11.7 |
| 1992.06.03 | | | | | | | |
| 1 | 0.435 | 0.395 | 0.232 | 0.231 | 0.024 | 0.005 | 16.0 |
| 2 | 0.415 | 0.362 | 0.205 | 0.209 | 0.020 | 0.004 | 340.0 |
| 3 | 0.421 | 0.372 | 0.213 | 0.239 | 0.023 | 0.005 | 484.0 |
| 4 | 0.423 | 0.363 | 0.210 | 0.231 | 0.021 | 0.003 | 144.0 |
| 5 | 0.411 | 0.358 | 0.202 | 0.199 | 0.020 | 0.003 | 35.6 |
| 6 | 0.429 | 0.372 | 0.216 | 0.232 | 0.020 | 0.004 | 69.4 |
| 7 | 0.407 | 0.349 | 0.197 | 0.205 | 0.021 | 0.005 | 11.6 |
| 8 | 0.435 | 0.381 | 0.227 | 0.265 | 0.024 | 0.005 | 300.0 |
| 9 | 0.375 | 0.301 | 0.165 | 0.160 | 0.017 | 0.003 | 11.6 |
| 10 | 0.421 | 0.368 | 0.214 | 0.225 | 0.024 | 0.006 | 24.0 |

このモデルの成功例は見られず、荻島氏らによれば、陸地起源のSSの少ない外洋域で、クロロフィル濃度が5 $\mu\text{g/l}$ 以下において成り立つとのことである⁹⁾。

1986年8月6日の東京湾での調査結果では、熱赤外域のバンド6を除いて各バンドともクロロフィルa濃度と正の相関である。バンド1の波長は450~520 nm、バンド2の波長は520~600 nmで、クロロフィルに対して吸収領域であり、Gordonらの理論からいくなれば、クロロフィル濃度とバンド1、2で負の相関であるはずが、実際には東京湾の海水において正の相関である。この理由としては、東京湾の海水中のクロロフィル濃度はGordonらが扱っている海洋よりも著しく濃度が高く、クロロフィルの色素による吸収よりもクロロフィル濃度の原因であるプランクトンの量に起因する濁度による散乱光の影響が強いためによるのではないかとと思われる。

一方、バンド3と4の波長は630~690 nmと760~900 nmで、クロロフィルによる吸収と反射が打ち消し合って水質情報がないと思われるLw(670)に近い領域であるが、東京湾の調査の結果からは、バンド3及び4はクロロフィルa濃度に比例して反射強度が増加する関係が見られる。図8-1に大気のエアロゾルの影響が小さいと思われる1986年8月6日のデータを用いてのクロロフィルa濃度と各バンドとの関係を示した。

8-2-2-2 エアロゾルの影響 (SPM 濃度) と TM 各バンドとの関係

人工衛星データは大気中のエアロゾルの影響を強く受けるため、衛星データから水質情報を抽出するためには、大気がクリーンな場合及び均一な汚染を除いては、大気補正は不可欠である。大気補正の手法については、Gordonらが海洋でCZCSデータを用いて、大気中のエアロゾルによる散乱光輝度をLA(670)で推定しLA(λ)を求め、Lw(λ)でクロロフィル濃度を推定している。

これらの研究は、通常、マルチスペクトルメータによる計測等による大気透過率、大気光散乱量などの推定値などから水質を推定し、水質実測値で検証する手法がとられている。

しかし、CZCSデータの1画素は825 m \times 825 mで海洋のような広域な水域の観測には向いているが、海洋に比べて狭く変化のある東京湾のような水域には、TMデータのような1画素30 m \times 30 mのようなデータの方が向いていると思われる。TMデータについては、安岡らにより霞ヶ浦でクロロフィルa濃度推定モデル

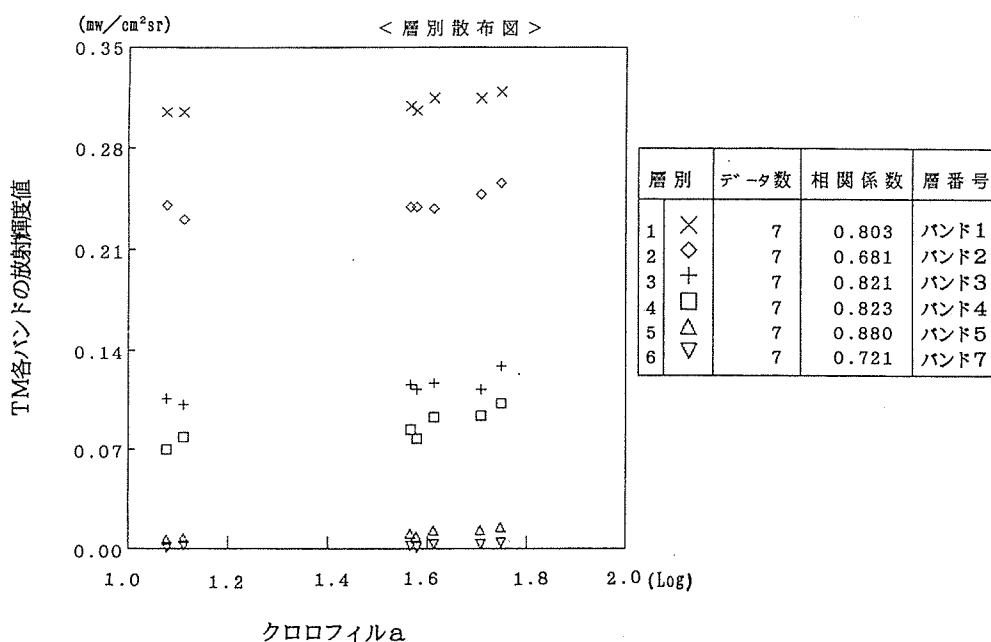


図8-1 クロロフィルa濃度と各TMバンドとの関係

について検討されてきているところである。筆者らは、水質情報を取得してある7種類のTMデータについて大気中のエアロゾルの影響との関連で検討した。大気中のエアロゾルの情報については、直接海上で調査したデータではないが、海岸線付近に設置してある大気常時連続監視測定局7ヶ所の浮遊粒子状物質(SPM)濃度のデータを使用した。検討の結果、図8-2に示すように、10地点のTMデータの各バンドの平均値と7地点の大気中SPM濃度の平均値との間に強い正の相関が見られた。

各バンドとも大気の影響を受けていて、TMデータとSPM濃度との関係は単回帰式で表されることがわかった。よって、この回帰式を用いることによって、大気中のSPM濃度の推定が可能であり、このSPM濃度が大気中のエアロゾル濃度を反映しているとするならば、各バンドでエアロゾルの影響の推定が可能である。

8-2-3 TMデータからのクロロフィルa濃度の推定モデルの検討

8-2-3-1 GordonモデルについてのTMデータへの適用

実用的大気補正アルゴリズムの基礎となるモデルの一つとしてGordonの大気補正アルゴリズムがある。このモデルの基本は以下のとおりである。これらの関係について、図8-3に示した。

Gordonの大気補正アルゴリズム

$$L_t(\lambda) = t(\lambda) L_w(\lambda) + L_a(\lambda) + L_m(\lambda) \dots (1)$$

$L_t(\lambda)$; 実際にセンサで観測された放射輝度

$L_m(\lambda)$; 分子散乱光の放射輝度

$L_a(\lambda)$; エアロゾル散乱光の放射輝度

$t(\lambda)$; 大気の大気透過率

$L_w(\lambda)$; 海面の放射輝度

ここで $L_{tw}(\lambda)$ をセンサで観測された海面の放射輝度とすると

$$L_{tw}(\lambda) = t(\lambda) L_w(\lambda) \dots (2)$$

(2) 式を (1) 式に代入すると

$$L_t(\lambda) = L_{tw}(\lambda) + L_a(\lambda) + L_m(\lambda) \dots (3)$$

TMデータのXバンドにモデルをあてはめた式を以下のとおりとする。

$$L_{tx} = L_{twx} + L_{ax} + L_{mx}$$

よって

$$L_{twx} = L_{tx} - L_{ax} - L_{mx} \dots (4)$$

(但し、ここでは L_{mx} については晴天時で太陽高度角を同一条件に補正したTMデータでの検討を前提に、大気の影響を無視し一定と仮定する)

上記式について 1) $L_{ax} = 0$ または $L_{ax} = ex$ (定数) のとき、

2) $L_{ax} \neq ex$ の場合にわけて検討する。

1) $L_{ax} = 0$ または $L_{ax} = ex$ (定数) のとき

$$L_{ax} + L_{mx} = P_x \text{ (一定)}$$

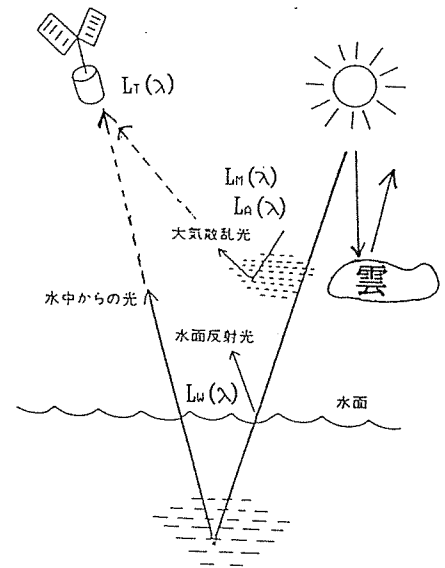


図8-3 水質リモートセンシングの概略図 (安岡原図一部改図)

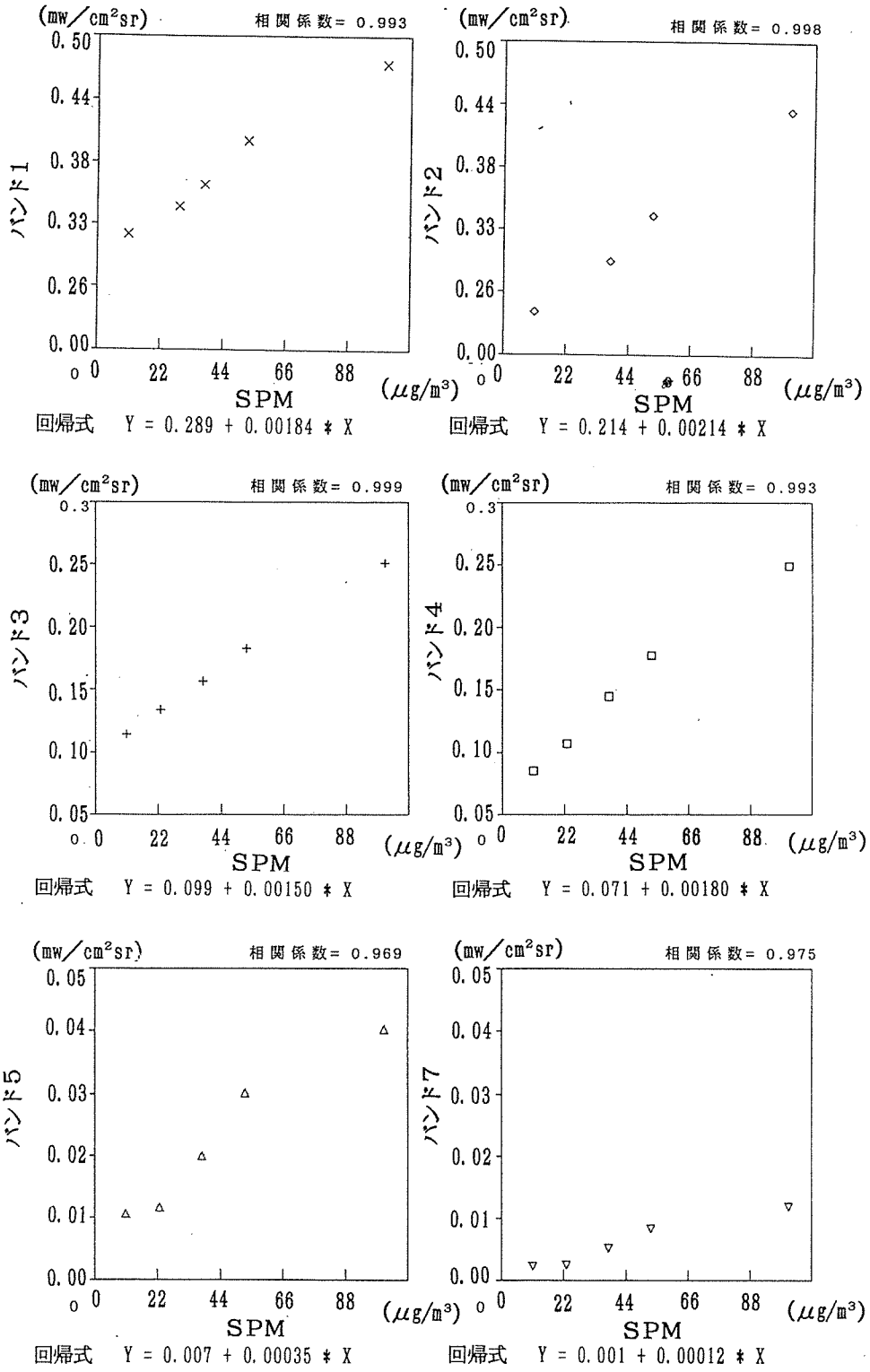


図8-2 SPMとTM各バンドとの関係

が成立するので

$$* \quad L_{twx} = L_{tx} - P_x \cdot \dots \cdot (5)$$

但し、この式において

$$L_{twx} = r_x \cdot Ch + q_x \cdot T_b$$

r_x ; センサで検出されるクロロフィル a 濃度の係数

Ch ; クロロフィル a 濃度 (Log 10)

q_x ; センサで検出される濁度の係数

T_b ; 濁度

1-1) $q_x \cdot T_b = 0$ の場合には

$$L_{twx} = r_x \cdot Ch \cdot \dots \cdot (6)$$

よって、(5), (6) 式から

$$Ch = 1/r_x \cdot (L_{tx} - p_x) \cdot \dots \cdot (7)$$

1-2) $q_x \cdot T_b = f_x$ (定数) の場合には

$$L_{twx} = r_x \cdot ch + f_x$$

$$r_x = L_{tx} - p_x - f_x$$

$$= L_{tx} - p'_x \text{ (但し } p'_x = p_x + f_x)$$

1-3) $q_x \cdot T_b \neq f_x$ (定数) の場合には

$$Ch = 1/r_x \cdot (L_{tx} - P_x - q_x T_b) \cdot \dots \cdot (8)$$

2) $L_{ax} \neq e_x$ の場合には

$$L_{twx} = L_{tx} - L_{ax} - L_{mx} \cdot \dots \cdot (9)$$

この式において

$$L_{ax} = u_x \cdot A$$

u_x ; センサで検出される浮遊粒子状物質濃度の係数

A ; 浮遊粒子状物質濃度 (spm)

$$u_x \cdot A = L_{tx} - (L_{twx} + L_{mx})$$

$$A = 1/u_x \cdot (L_{tx} - L_{twx} - L_{mx}) \cdot \dots \cdot (10)$$

この式において、x バンドが L_{twx} の偏差値を無視しても影響が少ないとすると

$$L_{twx} + L_{mx} \approx Q_x \text{ (定数) で}$$

$$A = 1/u_x \cdot (L_{tx} - Q_x) \cdot \dots \cdot (11)$$

8-2-3-2 クロロフィル a 濃度と TM 各バンドとの関係についての Gordon モデルへの適用

8-2-2-1 のクロロフィル a 濃度と TM 各バンドとの関係において、エアロゾルの影響が少ないと思われる 1986 年 8 月 6 日のデータからクロロフィル a (対数値) と TM 各バンドに正の相関が見られ、これらの関係を単回帰式であらわせることがわかった。この関係式を Gordon のモデルに適用してみた。

基本モデル (5) 式から

$$L_{tx} = L_{twx} + P_x \text{ (但し } L_{twx} = r_x \cdot Ch, Ch; \text{クロロフィル a 濃度の対数値)}$$

(バンド1) $R=0.803$ (La, Lm)
 $Lt1 = 0.016 \text{ c h} + 0.286$ (0.020, 0.266)

(バンド2) $R=0.681$
 $Lt2 = 0.020 \text{ c h} + 0.212$ (0.023, 0.189)

(バンド3) $R=0.821$
 $Lt3 = 0.026 \text{ c h} + 0.075$ (0.017, 0.058)

(バンド4) $R=0.823$
 $Lt4 = 0.034 \text{ c h} + 0.065$ (0.020, 0.045)

(バンド5) $R=0.947$
 $Lt5 = 0.010 \text{ c h} - 0.004$ (-, -)

(バンド7) $R=0.926$
 $Lt7 = 0.003 \text{ c h} - 0.002$ (-, -)

(但し, La の値は, SPM が 11 の時における反射輝度値で, 8-2-3-3 のエアロゾルの影響についての Gordon モデルへの適用の結果から推定。Lm の値は SPM と反射輝度との関係式の反射輝度側の Y 切辺の値から La を差し引いた値)

上記式を用いて求めたクロロフィル a と推定輝度値の関係は下記の通りである。この結果より, バンド1が全反射に対するクロロフィル a 濃度に対する反射強度が弱く, 一方バンド4が全反射に対する反射強度が強いことがわかる。(但し, クロロフィル a 濃度の単位; $\mu\text{g/l}$, 推定輝度値の単位; $\text{mw/cm}^2 \cdot \text{str}$, 推定輝度値は La と Lm の影響を差し引いた値)

バンド1について, 推定式から求めたクロロフィル濃度と放射輝度値の比較

| クロロフィル a 濃度 | 推定輝度値 | Lw 1/Lm 1 比 | Lw 1/Lt 1 |
|-------------|-------|-------------|-----------|
| 1 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 10 | 0.016 | 0.060 | 0.053 |
| 50 | 0.027 | 0.102 | 0.083 |
| 100 | 0.032 | 0.120 | 0.101 |
| 300 | 0.040 | 0.150 | 0.123 |

バンド2について, 推定式から求めたクロロフィル濃度と放射輝度値の比較

| クロロフィル濃度 | 推定輝度値 | Lw 2/Lm 2 比 | Lw 2/Lt 2 |
|----------|-------|-------------|-----------|
| 1 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 10 | 0.020 | 0.106 | 0.086 |
| 50 | 0.034 | 0.180 | 0.138 |
| 100 | 0.040 | 0.212 | 0.159 |
| 300 | 0.050 | 0.265 | 0.191 |

バンド3について、推定式から求めたクロロフィル濃度と放射輝度値の比較

| クロロフィル濃度 | 推定輝度値 | Lw 3/Lm 3 比 | Lw 3/Lt 3 |
|----------|-------|-------------|-----------|
| 1 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 10 | 0.026 | 0.448 | 0.257 |
| 50 | 0.044 | 0.759 | 0.370 |
| 100 | 0.052 | 0.897 | 0.409 |
| 300 | 0.064 | 1.103 | 0.460 |

バンド4について、推定式から求めたクロロフィル濃度と放射輝度値の比較

| クロロフィル濃度 | 推定輝度値 | Lw 4/Lm 4 比 | Lw 4/Lt 4 |
|----------|-------|-------------|-----------|
| 1 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 10 | 0.034 | 0.155 | 0.343 |
| 50 | 0.058 | 1.289 | 0.472 |
| 100 | 0.068 | 1.511 | 0.511 |
| 300 | 0.084 | 1.867 | 0.564 |

バンド5について、推定式から求めたクロロフィル濃度と放射輝度値の比較

| クロロフィル濃度 | 推定輝度値 | Lw 5/Lm 5 比 | Lw 5/Lt 5 |
|----------|-------|-------------|-----------|
| 1 | 0.000 | — | — |
| 10 | 0.010 | — | — |
| 50 | 0.017 | — | — |
| 100 | 0.020 | — | — |
| 300 | 0.025 | — | — |

バンド7について、推定式から求めたクロロフィル濃度と放射輝度値の比較

| クロロフィル濃度 | 推定輝度値 | Lw 7/Lm 7 比 | Lw 7/Lt 7 |
|----------|-------|-------------|-----------|
| 1 | 0.000 | — | — |
| 10 | 0.003 | — | — |
| 50 | 0.005 | — | — |
| 100 | 0.006 | — | — |
| 300 | 0.007 | — | — |

8-2-3-3 エアロゾルの影響 (SPM) についての Gordon モデルへの適用

8-2-2-2 エアロゾル (SPM) の影響と TM データとの関係において、強い相関が見られることが明らかになったので、SPM 濃度の高かった 1990 年 4 月 27 日の平均値のデータから濃度の低かった 1986 年 8 月 6 日の平均値のデータまでの 7 種類のデータを使用して直線回帰式を算出し、Gordon のモデルに適用してみた。

$$L_{tx} = L_{ax} + L_{twx} + L_{mx} \quad (\text{但し, } L_{ax} = u_x \cdot A, \text{ A は SPM}(\mu\text{g}/\text{m}^3))$$

使用したデータ

| | SPM | バンド 1 | バンド 2 | バンド 3 | バンド 4 | バンド 5 | バンド 7 |
|------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 4/27 | 102 | 0.473 | 0.433 | 0.251 | 0.248 | 0.040 | 0.012 |
| 6/3 | 91 | 0.417 | 0.362 | 0.208 | 0.220 | 0.021 | 0.005 |
| 8/14 | 53 | 0.399 | 0.332 | 0.182 | 0.177 | 0.030 | 0.008 |
| 5/29 | 38 | 0.357 | 0.288 | 0.156 | 0.144 | 0.020 | 0.005 |
| 11/5 | 29 | 0.336 | 0.239 | 0.107 | 0.079 | 0.007 | 0.004 |
| 3/2 | 23 | 0.387 | 0.298 | 0.134 | 0.107 | 0.012 | 0.003 |
| 8/6 | 11 | 0.310 | 0.241 | 0.114 | 0.085 | 0.009 | 0.002 |

(バンドの単位 ; m w / cm² · str)

各バンドにおけるエアロゾルの影響の推定式は、下記のとおりである

$$\begin{aligned} & (\text{バンド 1}) \quad R=0.993 \quad (L_{tw}, L_m) \\ & L_{t1} = 0.00184 A + 0.289 \quad (0.027, 0.262) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & (\text{バンド 2}) \quad R=0.998 \\ & L_{t2} = 0.00214 A + 0.214 \quad (0.034, 0.180) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & (\text{バンド 3}) \quad R=0.999 \\ & L_{t3} = 0.00150 A + 0.099 \quad (0.044, 0.055) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & (\text{バンド 4}) \quad R=0.993 \\ & L_{t4} = 0.00180 A + 0.071 \quad (0.056, 0.015) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & (\text{バンド 5}) \quad R=0.919 \\ & L_{t5} = 0.00035 A + 0.007 \quad (0.007, -) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & (\text{バンド 7}) \quad R=0.952 \\ & L_{t7} = 0.00012 A + 0.001 \quad (-, -) \end{aligned}$$

(但し、L_{tw} はクロロフィル濃度を 50 μg/l と仮定して、8-2-3-2 の反射輝度推定式から算出した値。
L_m はエアロゾル推定式の中の反射輝度側の切辺の値から L_{tw} を差し引いた値)

ここで求められた L_m の値は、クロロフィル推定式における L_m 値よりも低い。この理由としては、クロロフィル推定式で使った SPM 濃度は 11 で、上記計算で使ったデータの SPM 濃度はそれよりも値の高いものからなっており、大気の影響による光の透過率の低下が考えられる。

8-3 推定式から求めたクロロフィル a 濃度の推定及び推定画像例

8-3-1 推定式から求めたクロロフィル a 濃度の推定モデル

基本モデルは

$$L_{twx} = L_{tx} - L_{ax} - L_{mx}$$

8-2-3-2 のクロロフィル a 濃度の推定式から求めたクロロフィル a 濃度と輝度値の比較より、バンド 1 がクロロフィル a 濃度の影響が少ないことから、エアロゾルの影響をバンド 1 から推定する。

(10) 式において

$$\begin{aligned} L_{t1} + L_{m1} &\doteq Q_1 \text{ (定数) であるから} \\ A &= 1/u_1 \cdot (L_{t1} - Q_1) \quad \dots \dots (12) \end{aligned}$$

次にクロロフィルの情報を有しているバンド4を用いてクロロフィルa濃度を(9)式により推定する。大気補正は(12)式の結果を用いる。

$$\begin{aligned} L_{tw4} &= L_{t4} - L_{a4} - L_{m4} \\ &= L_{t4} - u_4 \cdot A - L_{m4} \end{aligned}$$

Aに(12)式を代入

$$\begin{aligned} L_{tw4} &= L_{t4} - u_4 \cdot (1/u_1(L_{t1} - Q_1)) - L_{m4} \\ L_{tw4} &= L_{t4} - u_4/u_1(L_{t1} - Q_1) - L_{m4} \end{aligned}$$

$$L_{tw4} = L_{t4} - (u_4/u_1) L_{t1} + (u_4/u_1) Q_1 - L_{m4} \quad \dots (13)$$

無機懸濁物による濁りの影響を無視できる場合には (6) 式より

$$L_{tw4} = r_4 \cdot C_h$$

よって、クロロフィルa濃度(c_h)は、

$$c_h = 1/r_4 (L_{t4} - (u_4/u_1)L_{t1} + (u_4/u_1)Q_1 - L_{m4}) \quad \dots (14)$$

水質推定に用いるバンドを4、エアロゾル補正に用いるバンドを1とした場合におけるクロロフィルa濃度の推定式を以下に示す。

バンド4におけるエアロゾルの影響の推定式は8-2-2-3のエアロゾルの影響(SPM)についてのGordonモデルへの適用におけるバンド4の推定式より

$$\begin{aligned} L_{t4} &= 0.00180 A + L_{tw4} + L_{m4} \\ \therefore L_{tw4} &= L_{t4} - 0.00180 A - L_{m4} \end{aligned}$$

L_{m4}に0.015を代入すると

$$L_{tw4} = L_{t4} - 0.00180 A - 0.015 \quad \dots (15)$$

浮遊粒子状物質濃度(A)は8-2-2-3のエアロゾルの影響(SPM)についてのGordonモデルへの適用におけるバンド1の推定式より

$$\begin{aligned} L_{t1} &= 0.00184 A + 0.289 \\ \therefore A &= (L_{t1} - 0.289)/0.00184 \end{aligned}$$

Aを(15)式に代入

$$L_{tw4} = L_{t4} - 0.00180 ((L_{t1} - 0.289)/0.00184) - 0.015$$

$$L_{tw4} = L_{t4} - 0.9783 L_{t1} + 0.2677 \quad \dots (16)$$

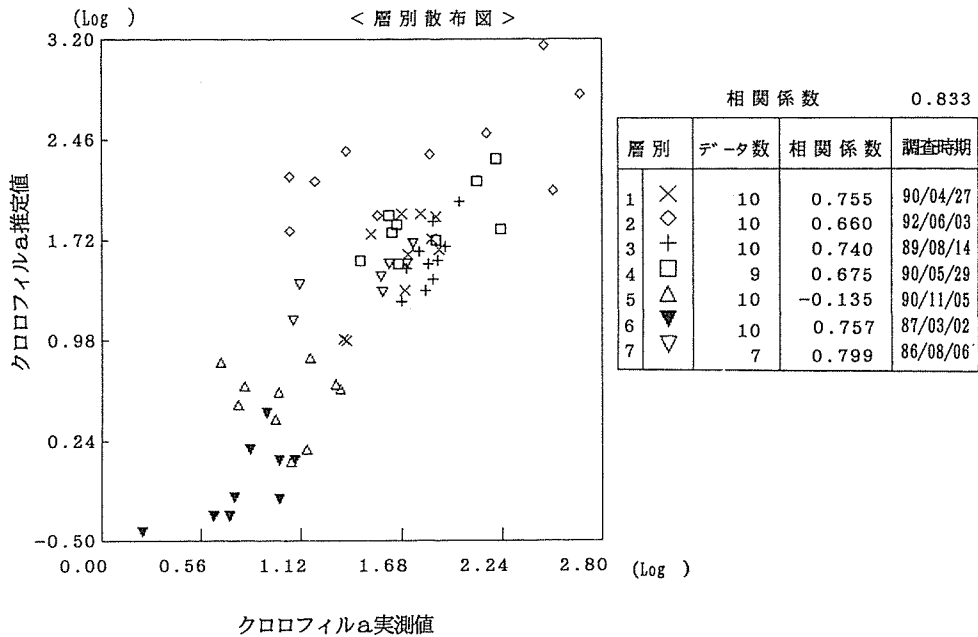
クロロフィル a 濃度 (対数值) は、8-2-3-2 のクロロフィル a 濃度と TM 各バンドとの関係についての Gordon モデルへの適用におけるバンド 4 の式より

$$L_{tw4} = 0.034 c h$$

$$\therefore c h = 29.4 \times L_{tw4}$$

Ch を (16) 式に代入

$$ch = 29.4 L_{t4} - 28.76 L_{t1} + 7.870 \quad (\text{但し, } c h \text{ の値は } \text{Log } 10) \quad \dots (17)$$



クロロフィル a 実測値
 図 8-4 クロロフィル a 濃度の推定値と実測値との関係
 (但し、クロロフィル a 推定値については、(17)式より求めた値である)

上記大気補正アルゴリズムにより求めたクロロフィル a 濃度の推定値と実測値の関係を図 8-4 に示した。全データでの相関係数は 0.833 であった。また、個々のデータの比較の結果からは 1990 年 11 月 5 日を除いては、エアロゾル濃度の影響が強くクロロフィル a 濃度の推定が困難と思われた時期においても、クロロフィル a 濃度の推定値と実測値の間に正の相関が見られた。11 月 5 日のデータにおいて無相関であった原因の一つとしては、クロロフィル a 濃度が低かったことがあげられるが、1987 年 3 月 2 日のデータにおいてはクロロフィル a 濃度が低いにもかかわらず正の相関が見られることから、クロロフィル a 以外の要因についての検討が必要と思われる。

8-3-2 推定式から求めたクロロフィル a 濃度の推定画像例

大気補正アルゴリズムによる推定式をベースに求めたクロロフィル a 濃度の 4 種類の推定値画像を写真 8-1, 2, 3, 4 に示し、またバンド 1 と 4 の原画像を写真 8-5, 6, 7, 8 に示した。

(1) 1986 年 8 月 6 日と 1987 年 3 月 2 日の推定画像については、濃度差がみられなかったので示さなかった。濃度差が見られなかった理由としては、3 月 2 日と 11 月 5 日の画像については、補正の対象である SPM 濃度が $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下と低く、クロロフィル a 濃度が $12 \mu\text{g}/\text{l}$ 以下と低いためと思われる。8 月 6 日のデータについては、クロロフィル a 濃度は平均値で $35.4 \mu\text{g}/\text{l}$ と 3 月、11 月に比べて高いが SPM 濃度が $11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ と低いために、バンド 1 による大気補正の過程でクロロフィル a 濃度も補正されてしまったのではと考えられる。

(2) 1990 年 4 月 27 日の画像について

SPM 濃度は平均値で $111 \mu\text{g}/\text{m}^3$ と高く、この影響と雲の影響がバンド 1 とバンド 4 の画像に見られる。大

気補正した推定画像では、浦賀水道より北側では大気の影響が補正され、クロフィル a 濃度の分布が推定される。この時のクロロフィル a 濃度の平均値は $51.7 \mu\text{g}/\text{l}$ であった。

(3) 1992年6月3日の画像について

SPM 濃度は平均で 91 と高く、この影響でバンド 1 とバンド 4 の画像が不鮮明である。大気補正した推定画像では、大気補正効果が認められて、クロロフィル a 濃度の顕著な分布が推定される。

この時のクロロフィル a 濃度の平均値は $143.6 \mu\text{g}/\text{l}$ と濃度が高かった。

(4) 1989年8月14日の画像について

SPM 濃度の平均は $52 \mu\text{g}/\text{m}^3$ であった。バンド 1 とバンド 4 の画像からは、すじ状に大気の影響が見られる。補正後の画像においても大気の影響が残っていると思われ、クロロフィル a 濃度の推定が難しい。しかし、クロロフィル a の平均濃度が $70.3 \mu\text{g}/\text{l}$ と高い値であることから、大気の影響が残っていると思われる部分に分布している可能性がある。

(5) 1990年5月29日の画像について

SPM 濃度は $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ であった。バンド 1 の画像では東京湾上が全体的にもやっとしているように見える。バンド 4 の画像では、不鮮明であるが、水塊のような分布が見られる。推定画像では、大気補正効果により、クロロフィル a 濃度の分布と関係していると思われる水塊が明瞭に見られる。

以上の結果より、今回作成したモデルを使うことにより、水質実測データのない TM データにおいても、東京湾でのクロロフィル a 濃度の相対的分布の推定が可能と思われた。

また、日本の他の東京湾と似たような水域においても係数を補正することにより、モデルの適用の可能性が考えられるが、さらに改善が必要と思われる。

8-3-4 まとめ

クロロフィル a 濃度の推定における TM データに対する実用的大気補正手法を検討し、横浜市沿岸域の SPM 濃度 (エアロゾルの指標として使用) と各 TM データとの関係において得られた単回帰式を用いることによって、バンド 1 によって SPM 濃度を推定し、その推定値をバンド 4 から除くことによってクロロフィル a 濃度の推定が可能であることを数式で明らかにした。この数式から求めたクロロフィル a 濃度について実測値と相関分析の結果から、クロロフィル a 濃度差が大きい時に有効と思われた。

謝 辞

本研究におきましては、調査に協力下さった横浜市港湾局海務課及び「ひばり」「おおとり」の関係職員の方々並びに大気浮遊粒子状物質濃度の情報を提供して下さった環境保全局環境監視センターの鶴東正博氏に深く感謝の意を表します。また、本研究にランドサットデータを提供して下さった宇宙開発事業団並びに、データ処理等に協力して下さったりリモートセンシング技術センターの関係職員の方々に深く感謝の意を表します。

「衛星データ所有：米国政府」

「衛星データ提供：EOSAT/宇宙開発事業団」

文 献

- 1) Gordon, H.R., D.K.Clark, J.W.Brown, O.B.Brown R.H.Evans, and W.W.Broenkow: "Phytoplankton pigment Phytoplankton pigment concentrations in the Middle Atlantic Bight: comparisonship determination and CZCS estimates, *Applied Optics*, **22**, 20. (1983).

- 2) Gordon, H.R.and.K.Clark: Atomospheric effects in the remote sensing of phytoplankton pigments, *Boundary-Layer Meteorology* **18**, 299-313(1980).
- 3) 安岡善文, 宮崎忠国: 遠隔計測による水質の定量, 環境汚染の遠隔計測・評価手法の開発に関する研究 国立環境研究所研究報告第 77 号, 昭和 58 年度, 165-185(1984).
- 4) 安岡善文, 宮崎忠国: 遠隔計測による湖水域の水質分布計測—回帰分析を用いた大気補正と水質推定—, 国立環境研究所研究報告第 39 号, 129-143(1983).
- 5) 東海大学海洋研究所: 昭和 60 年度新観測手法評価試験研究報告書, 78-101(1986).
- 6) 東海大学海洋研究所: 平成元年度新観測手法評価試験研究報告書, 60-91(1990).
- 7) 水尾寛己, 二宮勝幸, 畠中潤一郎, 岡 敬一, 吉見 洋; TM データによる広域的水質状況の検討—東京湾でのクロロフィル a 及び濁度分布, 横浜市環境科学研究所報第 17 号, 149-156(1993).
- 8) 杉森康宏, 坂本 亘編: 海洋環境光学, 東海大学出版会, 1-353(1985).
- 9) 江村富男, 宗山 敬, 佐々木保徳, 浅沼市男: 1. 海水の光学的特性に関する研究 (その 1)—水中のにごりの性質分布等に関する研究—, 海洋遠隔探査 (海洋リモートセンシング) 技術の研究最終研究成果報告書, 科学技術庁研究調整局宇宙開発課, 1-30(1982).
- 10) 宇野木 早苗, 岡見 登, 岸野元彰, 杉原滋彦: 2. 海水の光学的特性に関する研究 (その 2)—海中及び海面直上における放射輝度の伝達に関する研究—, 海洋遠隔探査 (海洋リモートセンシング) 技術の研究最終研究成果報告書, 科学技術庁研究調整局宇宙開発課, 31-54(1982).
- 11) アジア航測株式会社, 香川県赤潮研究所, 広島県水産試験場: 昭和 58 年度赤潮対策技術開発試験報告書 3. 赤潮動態遠隔探査技術開発試験, 1-137(1984).

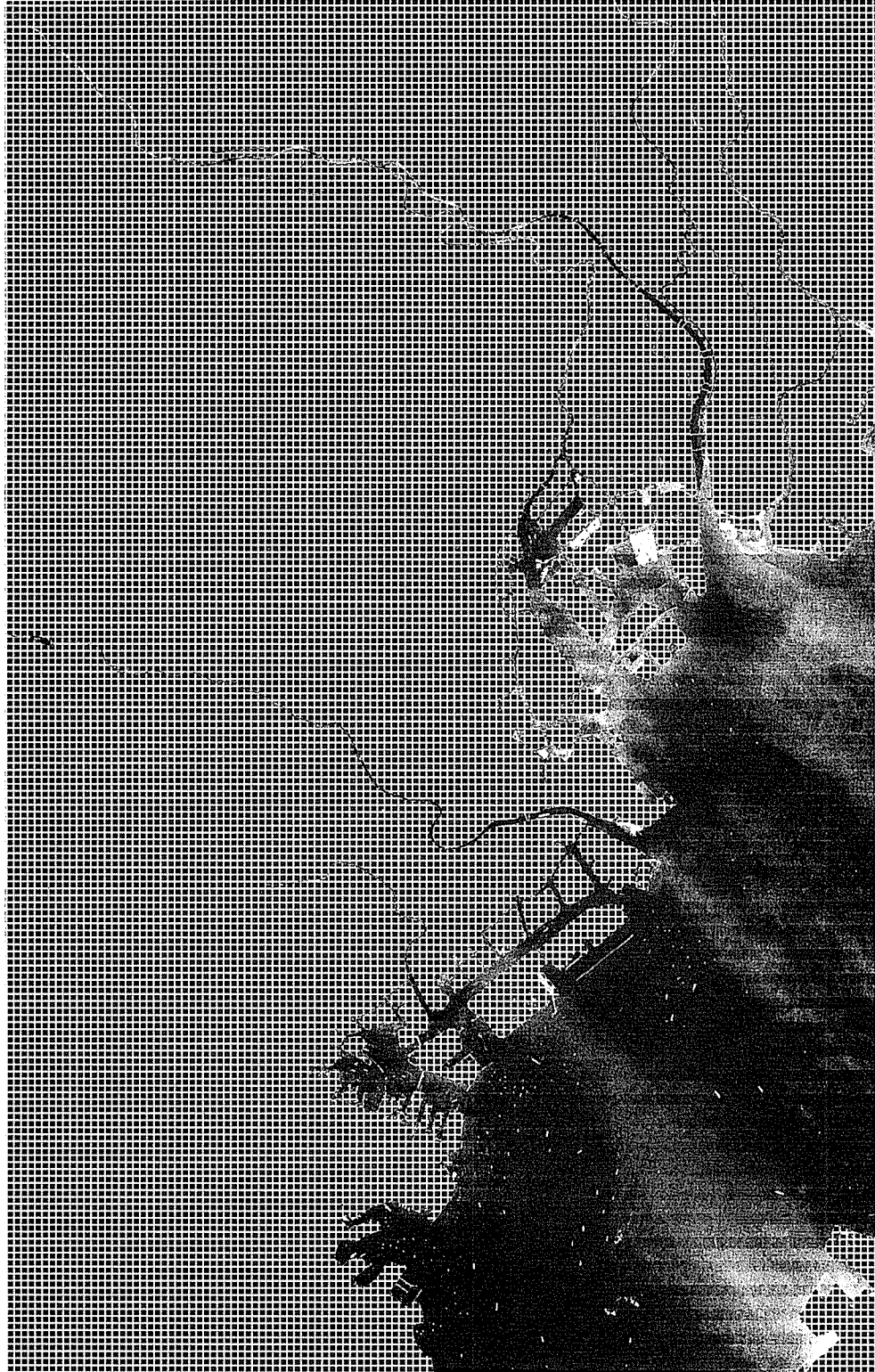


写真8-1 1989年8月14日のクロロフィル a 濃度推定画像

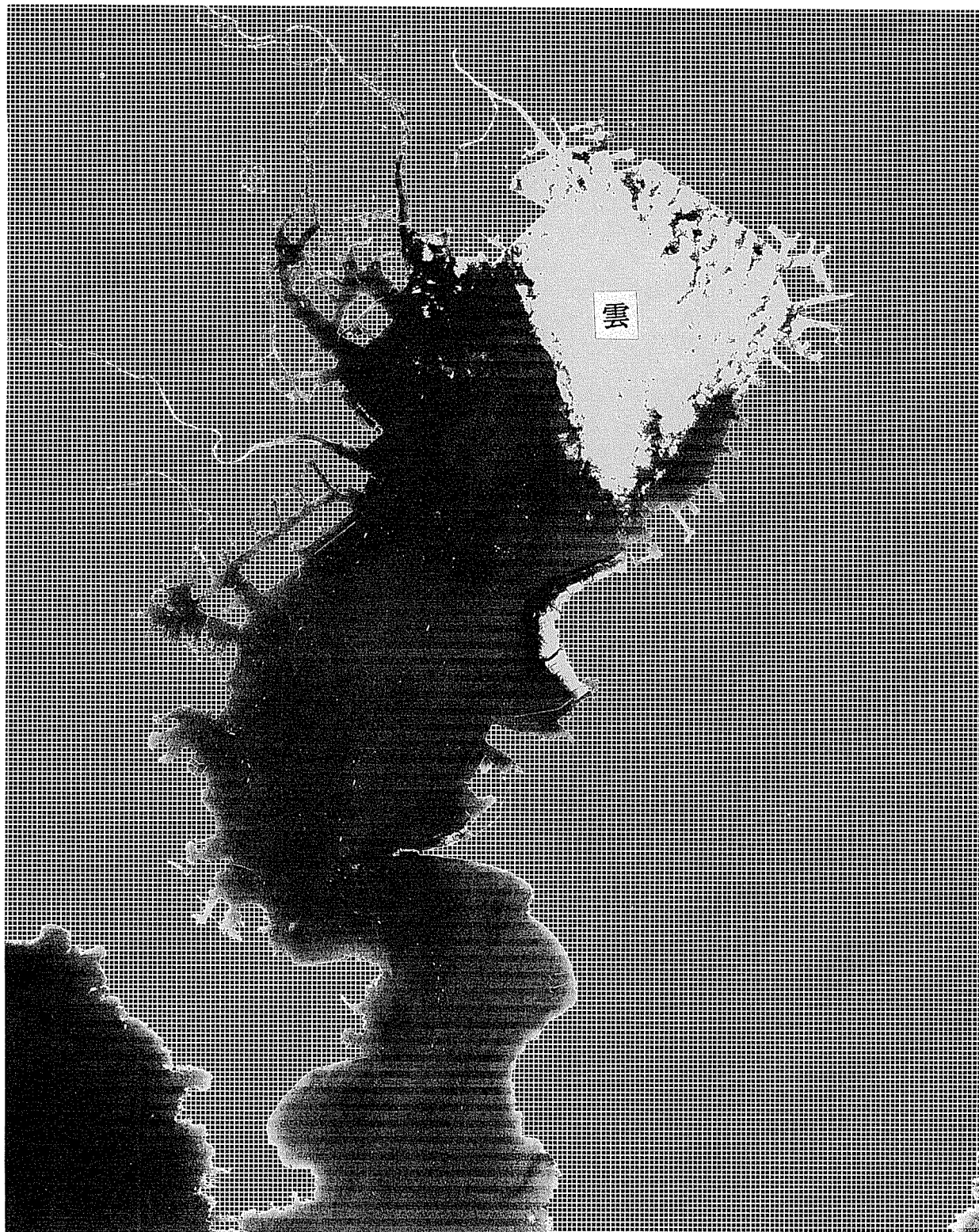


写真8-2 1990年4月27日のクロロフィル a 濃度推定画像

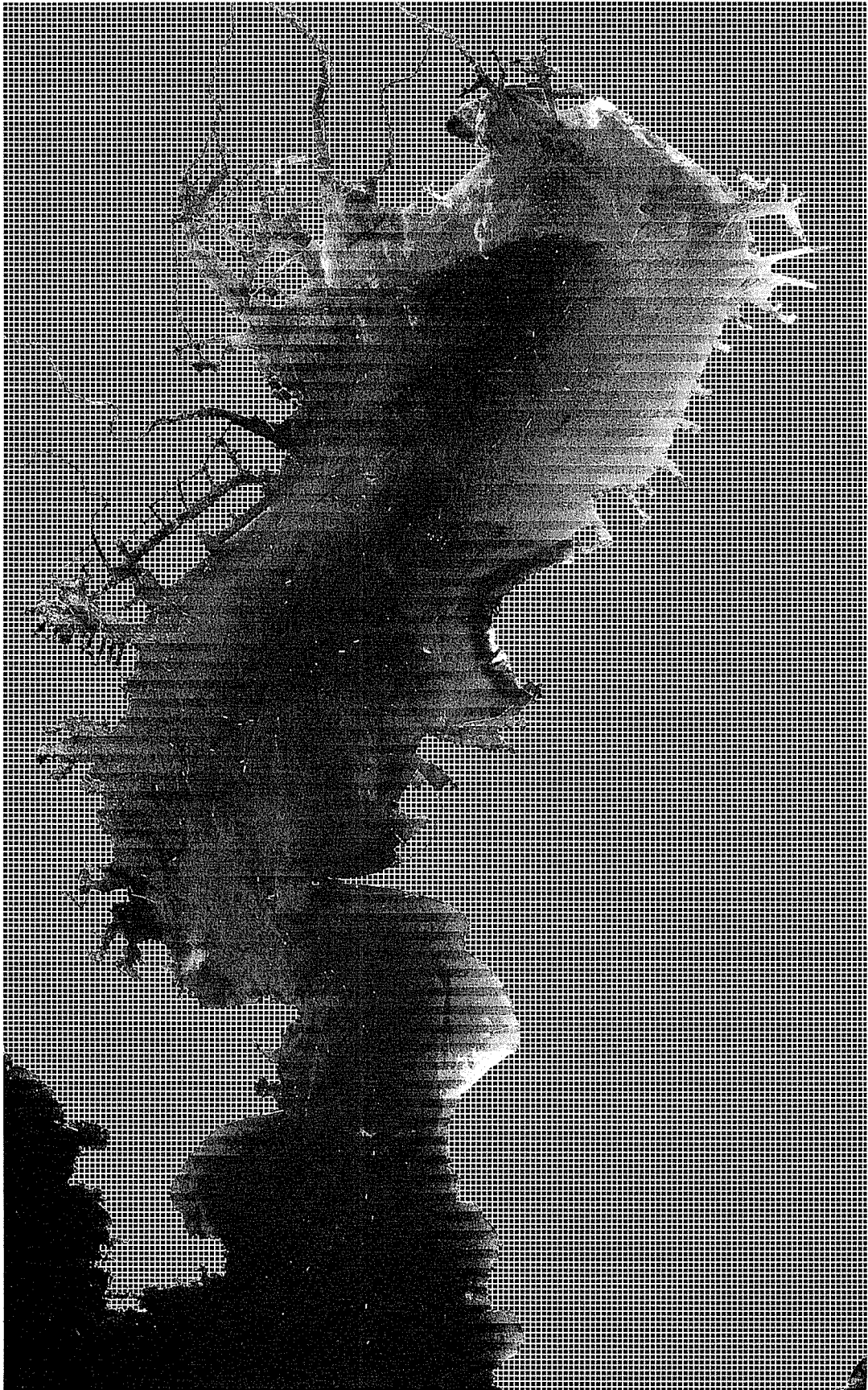


写真8-3 1990年5月29日のクロロフィルa濃度推定画像

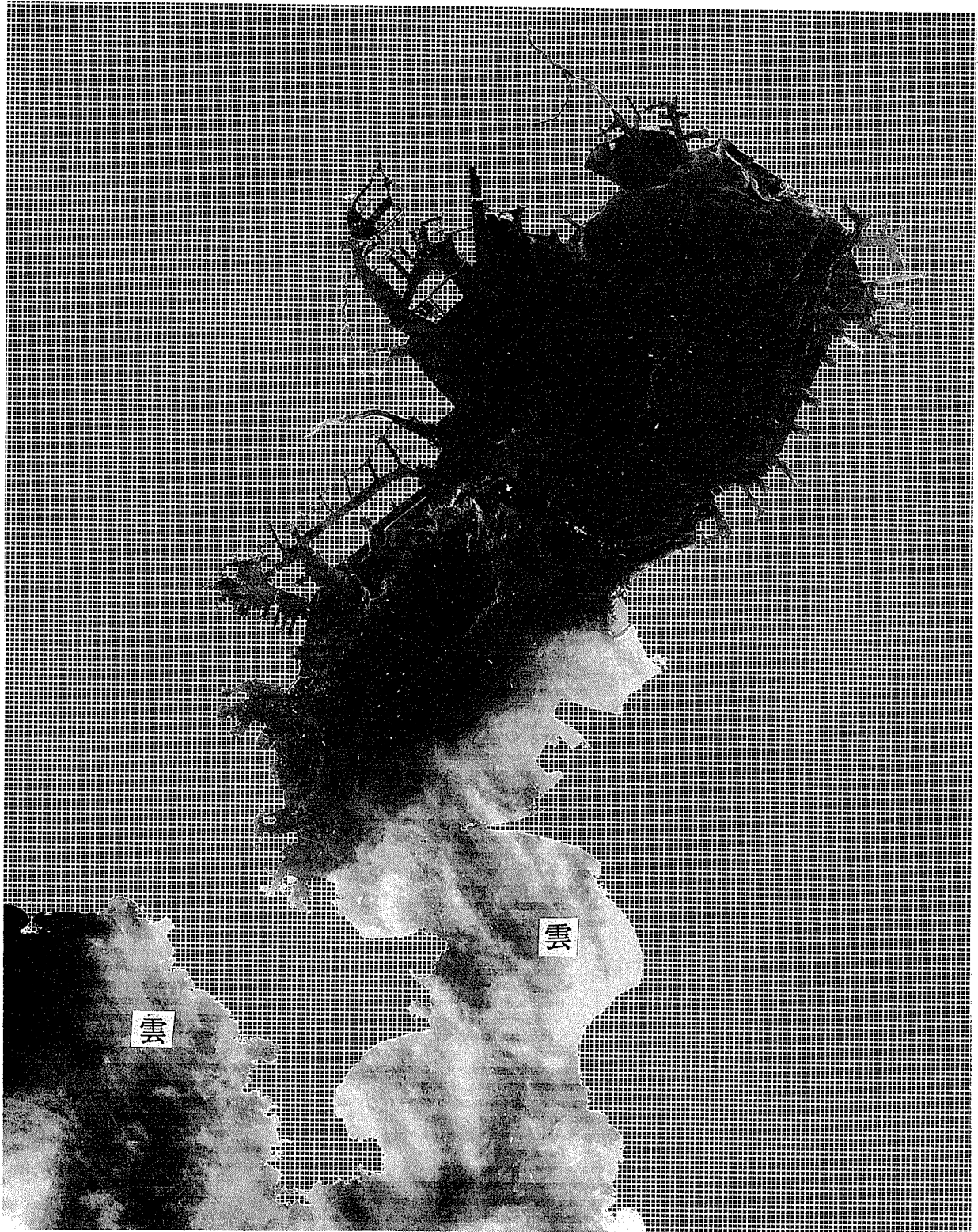


写真8-4 1992年6月3日のクロロフィルa濃度推定画像

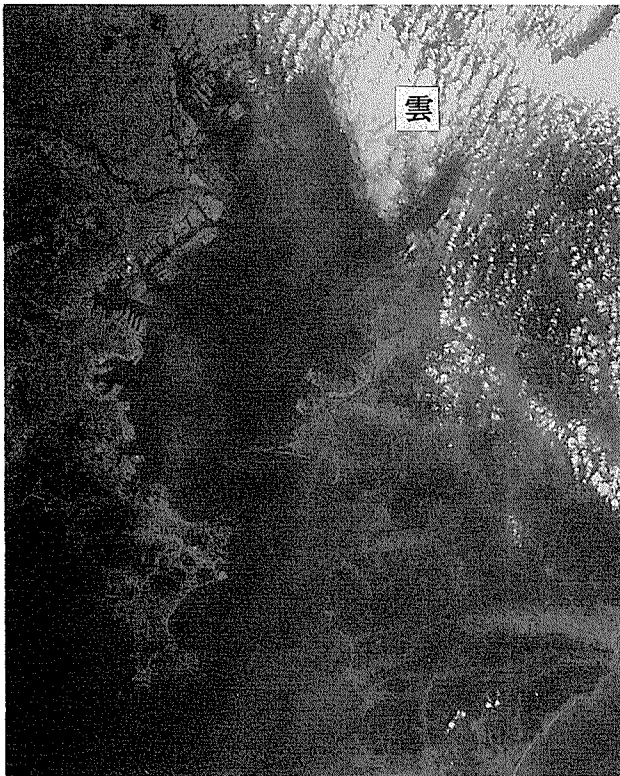


バンド1

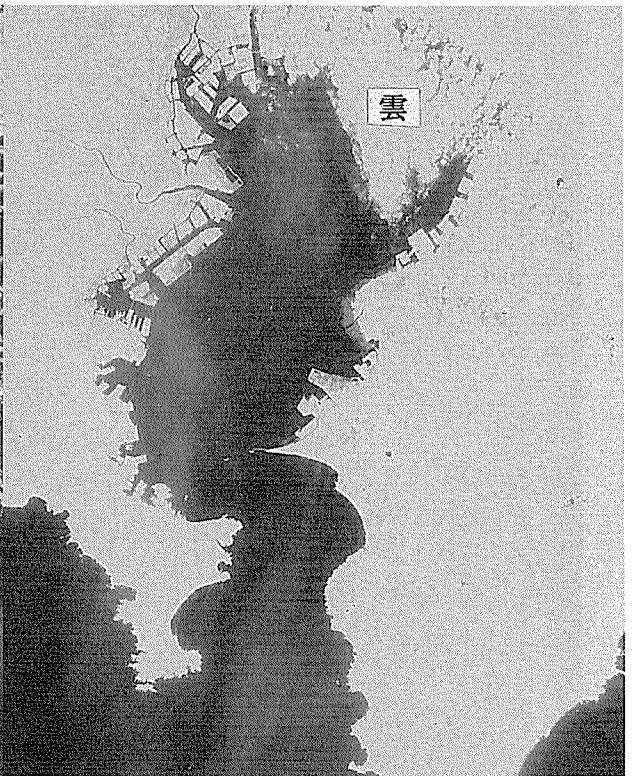


バンド4

写真8-5 1989年8月14日のTMバンド1とバンド4の画像



バンド1



バンド4

写真8-6 1990年4月27日のTMバンド1とバンド4の画像



バンド1

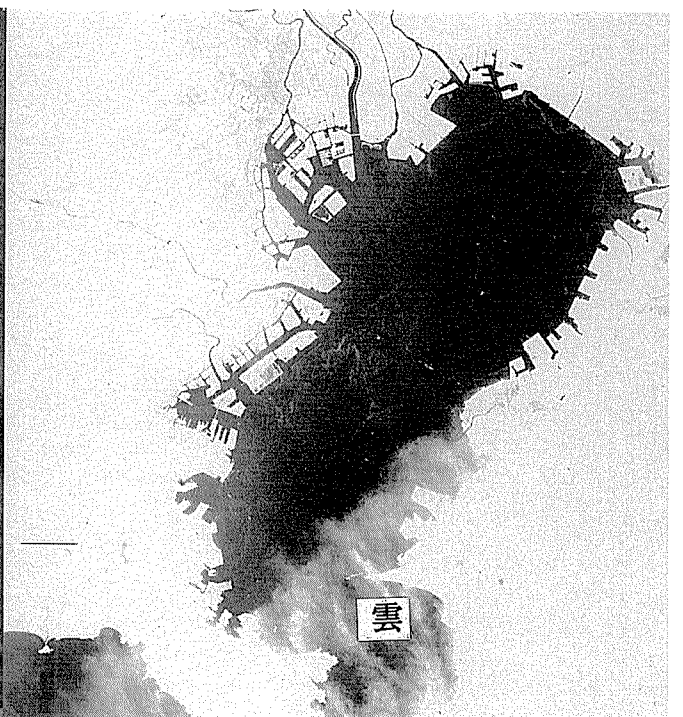


バンド4

写真8-7 1990年5月29日のTMバンド1とバンド4の画像



バンド1



バンド4

写真8-8 1992年6月3日のTMバンド1とバンド4の画像

東京湾の富栄養化に関する調査

報告書

1995年3月

編集発行 横浜市環境科学研究所
〒235 横浜市磯子区滝頭 1-2-15
電話 045 (752) 2605
FAX 045 (752) 2609
横浜市広報印刷物登録第060689号
類別・分類 A-GA100
ISBN 4-89697-101-9
印刷 株式会社 シュープリント
