

## 要旨

東京湾は、閉鎖性の海域であるために富栄養化が進行し、赤潮の発生や低層水の貧酸素化などが大きな問題となっている。東京湾の汚染状況を把握し植物プランクトンの増殖などの環境要因と水質悪化との関連を解明することが、環境保全に重要とされている。本共同研究は、横浜市環境科学研究所と宇宙開発事業団とが協力することで、今後打ち上げ予定の陸域観測技術衛星（ALOS）の実利用性の予備検討と共に衛星データの利用促進に寄与すること、また、地球観測衛星データにより東京湾の水質（クロロフィル-a 濃度、濁度、透明度、水温）モニタリング手法開発に資することを目的に実施した。その結果、地球観測衛星データによる水質モニタリング手法について、LANDSAT/TM では、東京湾の閉鎖性海域に対応できる実測値無しのモデル（理論モデル）を作成するのは容易ではないことが分かった。それに対して、実測値を用いたモデル（統計モデル）は、実測値を必要条件とするだけで、水質推定がきわめて容易であり、各水質項目の分布状況を一定精度で把握でき、半定量的に十分利用できることが分かった。ADEOS/AVNIR については、海上観測と同期した観測日は1日しかなかったが、LANDSAT/TM と同様な統計モデルを用いることで、同日に観測したLANDSAT/TM より、高い相関値を得ることができた。ALOS/AVNIR-2 でも東京湾の水質モニタリングへの利用が期待される。SPOT/HRV については、画像中央部分を境に、海域の輝度値が異なり、センサに起因した問題の可能性が高く、水質推定することが困難であった。

また、宇宙開発事業団は、地球観測衛星データの精密幾何補正手法などの前処理技術を横浜市環境科学研究所に提供することで、衛星データの行政における定常利用の促進に寄与できた。

「地球観測衛星データを利用した東京湾の水質モニタリング手法開発に関する共同研究」

共同研究担当者

横浜市環境科学研究所	主 任	水尾 寛己
宇宙開発事業団衛星総合システム本部	主任開発部員	森山 隆
	副主任開発部員	富井 直弥

共同研究協力者

神奈川県環境科学センター	専門研究員	岡 敬一
リモートセンシング・技術センター解析研究本部	計画推進室長	小路 光明
	研究員	向井田 明
	技師	川人 しのぶ

水質調査協力者

横浜市環境科学研究所	主 任	二宮 勝幸
同 上	主 任	下村 光一郎
千葉県環境研究センター	主任研究員	小倉 久子
同 上	上席研究員	飯村 晃
東京都環境科学研究所	主任研究員	安藤 晴夫
東京都環境保全局	主任	三嶋 義人
前神奈川県環境科学センター (現県央地区行政センター)	部長	吉見 洋
同 上 (現県土整備部)	副技官	大道 章一

## 目 次

### 要旨

#### 共同研究担当者等一覧

はじめに	1
1 共同研究の目的	2
2 共同研究の範囲	2
3 実施期間と体制	2
4 研究内容	3
4.1 地球観測衛星データによる水質推定の現状	3
4.1.1 海上観測データ	4
4.1.2 地球観測衛星データ	8
4.2 衛星データ前処理等の技術提供	9
5.研究成果	12
5.1 導入	12
5.1.1 地球観測衛星データによる水質推定アルゴリズムの背景	12
5.1.2 地球観測衛星データによる水質推定の留意点	13
5.2 LANDSAT/TM データと海上観測データの統計解析	14
5.2.1 平均値データによる解析	14
5.2.2 全データによる解析	15
5.2.3 水質実測値と推定値との比較	31
5.3 水質推定アルゴリズムのケース区分	33
5.4 LANDSAT/TM データを用いたクロロフィル-a 濃度推定	38
5.4.1 水質推定アルゴリズムを用いたクロロフィル-a 濃度推定アルゴリズム	38
5.4.2 実測値を用いたクロロフィル-a 濃度推定値とケース区分	40
5.4.3 クロロフィル-a 濃度推定アルゴリズムと大気補正との関係 (参考)	50
5.5 LANDSAT/ TM データによる水質推定手法	56
5.5.1 水質推定手順	56
5.5.2 水質推定式と水質推定画像一覧	58
5.6 他の地球観測衛星データによる水質推定手法の検討	78
5.6.1 ADEOS/AVNIR による水質推定手法	78
5.6.2 SPOT/HRV による水質推定手法	82
5.7 実測データのない場合の水質推定手法	86
5.8 地球観測衛星データによる環境監視項目 COD、全窒素などの把握と監視体制	86
6.まとめ	87
おわりに	88

#### 参考文献

#### 資料

- (1)海上観測データ及び地球観測衛星データ
- (2)太陽高度角データ

## はじめに

本報告書は、平成11年度から12年度にかけて横浜市環境科学研究所と宇宙開発事業団が共同研究として実施した「地球観測衛星データを利用した東京湾の水質モニタリング手法開発に関する共同研究」の結果についてとりまとめたものである。

東京湾は、閉鎖性の海域であるために富栄養化が進行し、赤潮の発生や低層水の貧酸素化などが大きな問題となっている。東京湾の汚染状況を把握し植物プランクトンの増殖などの環境要因と水質悪化との関連を解明することが、環境保全に重要とされている。これまで東京湾域においては、関連自治体が水質汚濁防止法に基づき公共用水域水質測定計画を作成し、その計画に沿って定点水質測定を毎月実施している。広い海域の各種水質項目の分布状況を正確に把握するには、船舶観測では非常に困難である。その補完手段として地球観測衛星データは非常に有効である。横浜市環境科学研究所では1989年より地球観測衛星データと同期した調査を実施し、1993年からは「関連自治体による環東京湾プロジェクト」として、衛星データを用いた東京湾のクロロフィル-a濃度等推定モデルの構築に取り組んできた。

本共同研究は、横浜市環境科学研究所と宇宙開発事業団とが協力することで、これまでに横浜市環境科学研究所で蓄積した成果を豊富な観測データを用いて更に発展させ、衛星データによる水質モニタリングの実利用化研究の推進を目指したものである。

## 1 共同研究の目的

本共同研究では、公共用水域の水質監視業務に貢献するために地球観測衛星データを利用し東京湾の水質モニタリング手法に資するため、宇宙開発事業団（以下「事業団」）は、今後打ち上げ予定の陸域観測技術衛星（ALOS）の実利用性の予備検討と共に衛星データの利用促進に寄与することを目的に、また、横浜市環境科学研究所（以下「研究所」）は、東京湾の環境保全に有益な水質モニタリング手法開発に資することを目的として、衛星データの活用に向けた共同研究を推進する。

## 2 共同研究の範囲

本共同研究の範囲は以下の通りである。なお（）内は実施作業の主担当機関を示す。研究の実施にあたっては、研究所におけるこれまでの開発研究の実績を土台として、汎用性のある水質推定手法の検討を目指した。

### (1) 東京湾の地球観測衛星データ解析処理手法の検討及び検証

- －LANDSAT/TM データによる水質（水温、透明度、濁度、クロロフィル-a 濃度）推定手法の検討（研究所）
- －ADEOS/AVNIR と SPOT/HRV による水質（透明度、濁度、クロロフィル-a 濃度）推定手法の検討（事業団）
- －海上観測データ（水温、透明度、濁度、クロロフィル-a 濃度）の取得（研究所担当）、及び地球観測衛星データとの統計解析（研究所／事業団）

### (2) 地球観測衛星データの前処理（幾何補正、放射量補正など）技術の提供（事業団）

- －地球観測衛星データの補正処理（幾何補正、放射量補正等）の検討

## 3 実施期間と体制

### (1) 実施期間

平成 11 年度（1999 年度）～平成 12 年度（2000 年度）

### (2) 実施体制

図 3.1 に示す。

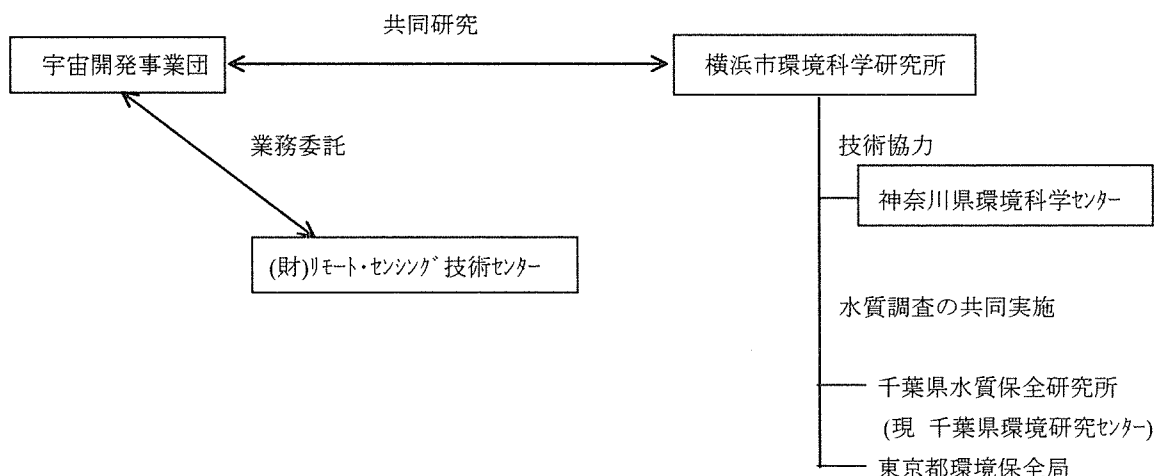


図 3-1 実施体制

## 4 研究内容

### 4.1 地球観測衛星データによる水質推定の現状

地球観測衛星データを利用して水質を推定する手法は、海洋においては水温及びクロロフィル-a 濃度分布の推定や生物生産の推定に利用されてきているが、湾岸や湖沼のクロロフィル-a 濃度、濁度の推定には研究段階で実用には至っていない。現在、環境監視としての湾岸や湖沼の水質の把握は、ボートや船による調査によりおこなわれ、限られた地点数のデータを用いている。これらの限られた海上観測データから湾岸や湖沼におけるクロロフィル-a 濃度や濁度の分布状況を正確に把握することは困難である。地球観測衛星データは、これらを補完するものとして有望であり、水質推定アルゴリズムの確立が求められる。容易にアルゴリズムができない理由は、現在水質解析に利用されている陸上観測用の LANDSAT/TM や海洋観測用の ADEOS/OCTS などは湾岸や湖沼を対象としたセンサではないこと、また、湾岸や湖沼は海洋に比べて水質汚濁が著しく、大気汚染や周辺環境からの影響も複雑であることから、海洋観測のアルゴリズムでは適応できないことによる。湾岸や湖沼の水質改善を図るためには、正確な水質汚濁の分布状況の把握が望ましく、地球観測衛星データによる水質推定アルゴリズムの開発が求められる。

本共同研究では、主として現在運行している陸上観測用の LANDSAT/TM データと同期した海上観測データの解析結果を中心に報告する。今回の水質解析に陸上観測用の LANDSAT/TM データを使用したのは、観測波長が可視域から赤外域までの 7 バンドを有していること、また、海洋観測用の NOAA/AVHRR や NIMBUS-7/CZCS の空間分解能 1 km に比べて、30m と良いことと、長期間観測され、それに同期した東京湾の海上観測データを取得できたことによる。

しかし、各バンドの波長域幅が広いいため水質測定には感度が悪く水域観測用でないという欠点がある。一方、ADEOS/AVNIR や SPOT/HRV は、湖沼や湾岸の状況も把握でき、NOAA/AVHRR や NIMBUS-7/CZCS に比べて空間分解能も良く、今後の海洋観測を進めていく上で有効な情報を有していると思われる。そこで、本共同研究では、LANDSAT/TM データによる東京湾の統計的手法による簡易水質推定アルゴリズムを明らかにすると共に、今まで取得したデータより水質推定画像を作成した。あわせて、LANDSAT/TM 及び海上観測と同期した ADEOS/AVNIR、SPOT/HRV データについて比較検討した。

#### 4.1.1 海上観測データ

##### (1) 調査地点

調査地点は、横浜市沿岸・沖合側 5～10 地点と千葉県沿岸・沖合側の 8 地点、東京都沖合 1 地点を対象とした。図 4-1 に代表的な水質調査地点を示す。

##### (2) 調査方法

本共同研究に関連した測定項目は、水温、透明度、SS（懸濁物質）または濁度、クロロフィル-a 濃度で、測定方法は表 4-1 に示す通りである。大気中のエアロゾル濃度の指標として用いた SPM（浮遊粒子状物質）については、横浜市内臨海部の地上 1.5m で測定している 7 地点の 9 時と 10 時の 1 時間値の平均値を用いた。水温は、横浜市側ではポリバケツによる表層水温を測定し、千葉県側では多成分水質分析計により、表層下 50cm 水深の水温を測定した。懸濁物質は、1992 年までは SS を測定し、1993 年以降は濁度計（TURBIDIMETER TB-50）により測定した。SS は濁度と近似できるので、ここでは SS も濁度として取扱った。クロロフィル a 濃度は、1996 年までは、溶媒としてアセトンを用いた LORENZEN 法で測定し、1997 年以降は溶媒を N.N.ジメチルホルムアミドに変え、UNESCO 法で測定した。UNESCO 法の方が LORENZEN 法に比べて値が少し高めであったが、解析に影響を及ぼさないため、各々の測定法による結果を用いた。

##### (3) 水質データ

今までに地球観測衛星と同期して取得した海上観測データは 23 日分で、そのうち 4 日分（'93.10.12、'96.11.21、'97.07.03、'97.12.10）については、それぞれ海上観測データが 2 地点分と少ないために、今回の解析には使用しなかった。表 4-2～5 に、解析に使用した水質の平均値等を示した。



図 4-1 調査地点

表 4-1 調査項目及び方法

	横浜市	千葉県
採水	ポリバケツ	ポリバケツ
水温	検定付棒状温度計	多成分水質計
クロロフィル-a	LORENZEN 法 (一部 UNESCO 法)	
SS	JISK0102	—
濁度 (Tb)	濁度計	—
透明度	セッキ板	セッキ板



表 4-2 水温の平均値一覧

調査年月日	水 温 (°C)					
	N	最小値	最大値	平均値	標準偏差	変動係数
860806	7	23.6	25.7	24.75	0.776	0.0314
870302	10	8.2	11.3	9.33	1.051	0.1126
890814	10	24.8	26.5	25.34	0.544	0.0215
900222	10	10.0	11.5	10.72	0.501	0.0467
900427	10	16.0	17.0	16.46	0.280	0.0170
900529	9	19.8	21.0	20.34	0.357	0.0176
901105	10	19.1	19.6	19.4	0.189	0.0097
920603	9	20.5	22.0	21.22	0.447	0.0210
930521	22	17.4	19.4	18.30	0.611	0.0334
930910	14	22.2	25.4	23.64	0.974	0.0412
940422	18	14.5	17.4	15.93	0.966	0.0543
950815	7	27.0	28.0	27.56	0.395	0.0143
970108	3	10.2	11.6	11.03	0.737	0.0668
970414	5	14.0	15.1	14.50	0.447	0.0318
990114	6	10.3	12.0	11.08	0.611	0.0552
000218	6	9.5	10.1	9.82	0.223	0.0227
000524	15	18.9	22.9	20.27	1.033	0.0510
000711	13	24.5	27.6	25.74	0.908	0.0353
000828	12	27.4	30.9	28.95	1.017	0.0351

表 4-3 クロロフィル-a 濃度の平均値一覧

調査年月日	クロロフィル-a (μg/l)					
	N	最小値	最大値	平均値	標準偏差	変動係数
860806	7	12.0	56.0	35.43	17.116	0.4831
870302	10	1.6	12.2	6.61	3.577	0.5412
890814	10	48.1	102.4	70.31	15.907	0.2262
900222	10	8.0	20.3	13.46	3.491	0.2594
900427	10	23.0	78.0	51.66	20.163	0.3903
900529	9	28.5	172.0	82.10	56.099	0.6833
901105	10	4.8	21.9	12.06	5.956	0.4938
920603	9	11.6	484.0	121.80	165.325	1.3574
930521	22	5.2	106.5	49.67	26.508	0.5337
930910	14	19.8	53.4	35.66	9.255	0.2596
940422	18	6.0	82.3	24.53	19.428	0.7919
950815	7	16.1	34.2	23.63	6.400	0.2709
970108	8	5.3	12.0	8.61	2.317	0.2690
970414	6	4.4	15.2	10.70	4.552	0.4254
990114	6	2.5	14.8	7.12	4.508	0.6334
000218	7	14.1	22.3	17.17	2.798	0.1630
000524	15	13.1	94.7	47.80	29.751	0.6223
000711	13	42.8	147.0	85.08	36.963	0.4344
000828	12	13.9	63.1	34.03	18.071	0.5310

表 4-4 濁度の平均値一覧

調査年月日	濁 度					
	N	最小値	最大値	平均値	標準偏差	変動係数
860806	7	-	-	-	-	-
870302	10	-	-	-	-	-
890814	10	1.3	4.8	3.52	1.316	0.3740
900222	10	2.9	4.4	3.75	0.493	0.1314
900427	10	5.7	14.0	9.96	2.773	0.2785
900529	9	5.9	17.5	10.88	4.230	0.3887
901105	10	1.4	3.6	2.43	0.633	0.2603
920603	9	3.4	26.0	9.96	8.015	0.8050
930521	22	2.7	22.4	10.23	5.556	0.5430
930910	14	2.5	6.5	4.36	1.103	0.2527
940422	7	1.9	5.2	3.54	1.147	0.3238
950815	7	3.3	4.6	3.90	0.420	0.1078
970108	3	2.9	3.8	3.47	0.493	0.1423
970414	6	3.0	11.8	5.48	3.589	0.6551
990114	6	0.5	1.5	0.85	0.356	0.4193
000218	7	0.6	1.7	1.12	0.371	0.3323
000524	15	0.9	9.0	4.11	2.835	0.6861
000711	13	5.0	16.5	10.49	3.633	0.3462
000828	12	1.8	5.8	3.37	1.394	0.4142

表 4-5 透明度の平均値一覧

調査年月日	透 明 度 (m)					
	N	最小値	最大値	平均値	標準偏差	変動係数
860806	7	1.5	3.5	2.31	0.701	0.3029
870302	10	1.4	7.0	3.93	1.560	0.3971
890814	10	1.9	2.8	2.20	0.306	0.1389
900222	10	2.3	3.2	2.83	0.362	0.1280
900427	10	1.5	2.3	1.79	0.292	0.1633
900529	9	0.8	2.3	1.43	0.512	0.3575
901105	10	1.7	3.5	2.45	0.600	0.2451
920603	9	0.5	2.2	1.27	0.602	0.4753
930521	22	1.1	6.0	1.74	1.034	0.5957
930910	14	1.7	3.1	2.23	0.412	0.1850
940422	18	1.2	4.5	2.58	0.842	0.3266
950815	7	2.2	2.5	2.37	0.125	0.0529
970108	8	2.9	4.0	3.46	0.434	0.1254
970414	6	1.8	2.8	2.22	0.449	0.2025
990114	6	4.0	8.0	5.46	1.429	0.2638
000218	7	4.0	5.5	4.67	0.516	0.1107
000524	15	0.9	4.0	2.33	1.129	0.4850
000711	13	0.8	1.5	1.02	0.196	0.1920
000828	12	1.7	3.1	2.33	0.465	0.2002

#### 4.1.2 地球観測衛星データ

##### (1) 解析対象データ

今回用いた地球観測衛星 LANDSAT/TM、ADEOS/AVNIR、SPOT/HRV データを以下に示す。いずれも東京湾を含むシーンである。

表 4-6 解析対象データ一覧

観測日	海上観測データ	LANDSAT/TM	ADEOS/AVNIR	SPOT/HRV
860806	○	○		
870302	○	○		
890814	○	○		
900222	○	○		
900427	○	○		
900529	○	○		
901105	○	○		
920603	○	○		
930521	○	○		
930910	○	○		
940422	○	○		
950815	○	○		
970108	○	○		
970414	○	○	○	
990114	○	○		
000218	○	○		
000524	○	○		
000711	○	○		○
000828	○	○		○

##### (2) 前処理と輝度値の抽出

衛星画像を用いた解析の前準備として、解析に用いる全地球観測衛星データについて、東京湾周辺地域を切り出し、国土地理院発行の 1/25,000 地形図を用いて精密幾何補正を施した。地図を用いて精密幾何補正を行うことで衛星画像に正確な緯経度が与えられ、画像上における各海上観測地点のピクセル位置を特定することが出来る。なお精密幾何補正にあたっては、補正前と補正後で画像の輝度値を変えないよう最近隣内挿法（ニアレストネイバー法）を用いて画像の再配列を行った。補正済みの画像において、各海上観測地点に対応するピクセル座標を特定し、各ピクセルとその周辺ピクセルにおけるデータの輝度値を抽出した。種類の異なった衛星データ間の比較も考慮して、観測データとの統計解析をおこなう上から、TM データについては 3×3 ピクセル平均値（約 90m×90m）、ADEOS データについては 5×5 ピクセル平均値（約 80m×80m）、SPOT データについては 5×5 ピクセル平均値（約 100m×100m）を求めた。

また、異なる観測日のデータや衛星データ間の比較を行う上から、太陽高度角条件を以下の式で補正した。

太陽高度角補正後の DN 値 = DN 値 × 1 / SIN (X) (但し、X は太陽高度角)

ここで抽出した輝度値は 0~255 の数値幅で観測された DN 値であり、これを絶対放射輝度に変換するには、衛星データの添付ファイルに記述されているセンサのゲインとオフセットを用いた。(詳細は、資料(2)を参照)。

絶対放射輝度値への変換は、以下の式で実施した。

#### ① LANDSAT/TM 輝度変換

TM の DN 値から放射輝度値 (単位:  $\text{mW}/\text{cm}^2 \cdot \text{s tr} \cdot \mu\text{m}$ ) へ変換するには、「地球観測データ利用ハンドブック-ランドサット編・改定版-」の LANDSAT/TM 値の最大・最小放射輝度を用いて、次式により変換する。

絶対放射輝度 = (最大放射輝度 - 最小放射輝度) × DN 値 / 255 - 最小放射輝度

#### ② ADEOS/AVNIR 輝度変換

AVNIR の DN 値から放射輝度値 (単位:  $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{s tr} \cdot \mu\text{m}$ ) へ変換するには、衛星データの添付ファイルより各バンドのゲイン・オフセットを抽出し次式により変換する。

絶対放射輝度 = DN 値 × ゲイン + オフセット

#### ③ SPOT/HRV 輝度変換

HRV の DN 値から放射輝度値 (単位:  $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{s tr} \cdot \mu\text{m}$ ) へ変換するには、②と同様にゲインとオフセットの値を抽出して次式により変換する。

絶対放射輝度 = DN 値 / ゲイン + オフセット

## 4.2 衛星データ前処理等の技術提供

衛星データの利用を推し進めるために、事業団が衛星データ処理に関連する技術を利用機関へ提供することは共同研究の重要な役割の一つである。本共同研究においては、精密幾何補正の処理手順や太陽高度角等の関連情報の抽出・適用法など、前処理に係る事項を事業団にて手順書に纏めて研究所へ提供し、解析ソフトウェアの実際の操作とあわせて説明を行った。

また、水質推定解析によって得られた推定式より水質推定分布図を作成するにあたっては、多数のデータについて画像出力を行うことが必要になるため、水質推定画像出力用のバンド間演算ソフトを作成し、これを用いて水質分布の推定画像を出力した。水質分布推定画像出力フローを図 4-2、技術提供フローを図 4-3 に示す。

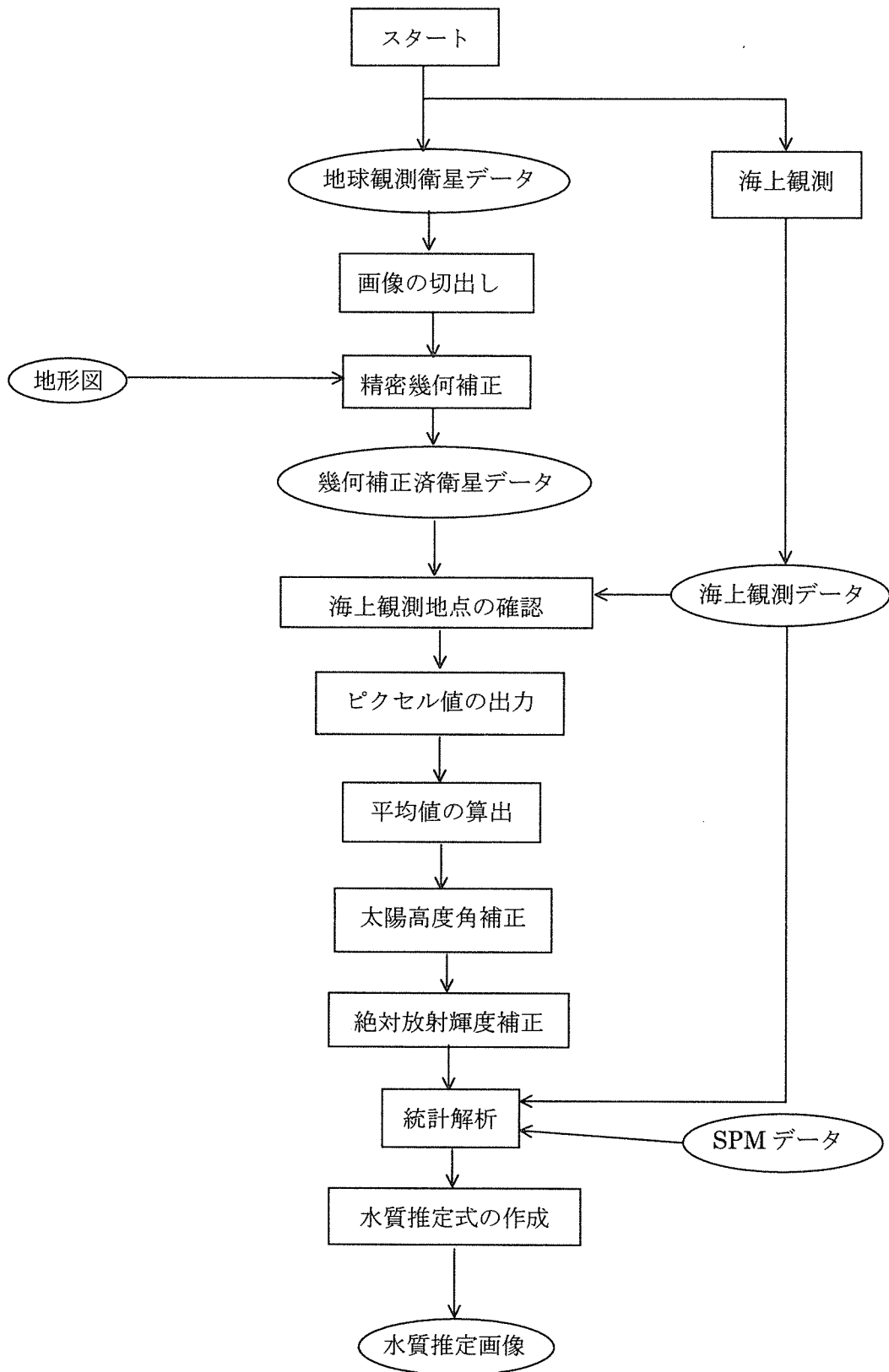


図 4-2 水質分布推定画像出力フロー

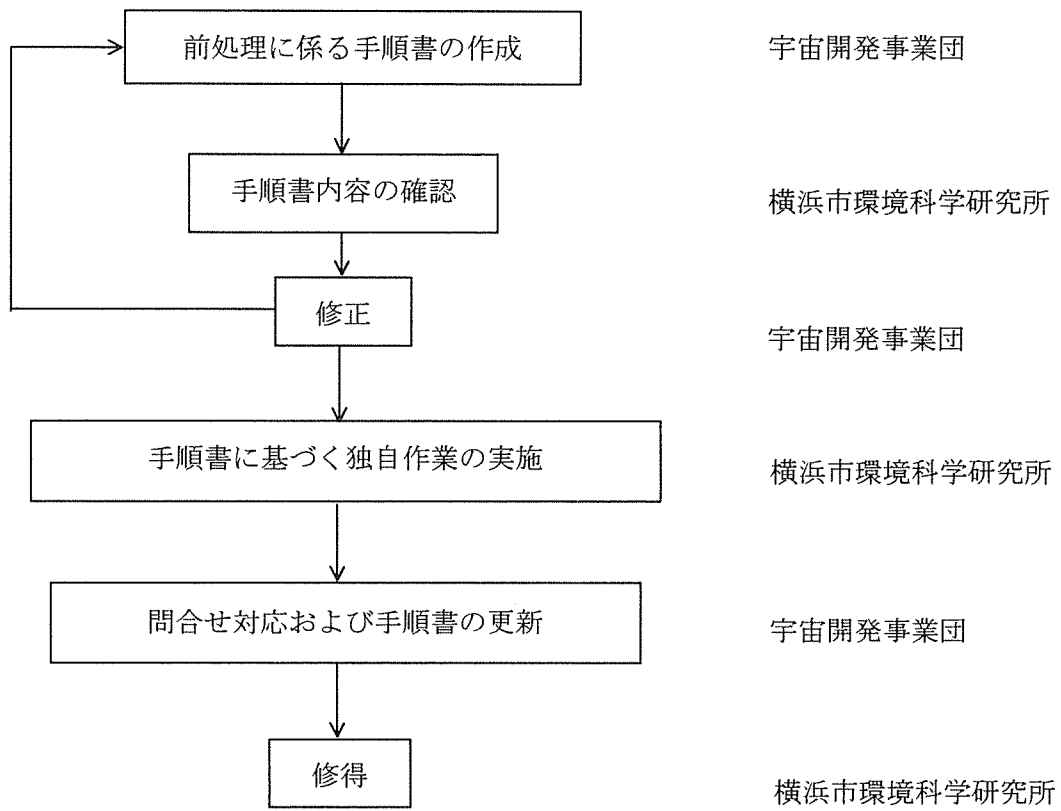


図 4-3 技術提供フロー

## 5 研究成果

### 5.1 導入

#### 5.1.1 地球観測衛星データによる水質推定アルゴリズムの背景

地球観測衛星の検出器に検知される全輝度の 80%程度は大気の散乱光（光路輝度）が占めると推測され、それに比し水質情報は微弱であるために、水質を推定する上で大気の影響を除去することが極めて重要である。Gordon<sup>\*1</sup>は外洋の水質推定において、NIMBUS-7/CZCS の 670nm の波長帯においては水中からの情報が含まれず、主として大気情報によると仮定して、670nm の情報で補正した 520nm と 550nm の比演算 ( $L_w(520)/L_w(550)$ )、443nm と 550nm の比演算 ( $L_w(443)/L_w(550)$ ) で水中のクロロフィル-a 濃度を推定している。安岡ら<sup>\*2</sup>は、湖沼などのように水質の濃度が高い水域では、近赤外域でも水中の情報を含むことが多く、必ずしも有効でないとして、LANDSAT/MSS データと水中放射輝度計による水面分光放射輝度の回帰分析から大気透過率、光路輝度を推定し、その結果から求めた MSS の分光反射率と水質の回帰分析から水質を推定する統計モデルを示した。透明度と SS については良い結果が得られたが、クロロフィル-a 濃度については良好な結果が得られなかった。水尾ら<sup>\*3</sup>は、東京湾のようなクロロフィル-a 濃度の高い水域においては、近赤外域にも水質情報が含まれ、Gordon モデルによる大気補正が適用できないことを大気が清浄な日の LANDSAT/TM データと水質の観測結果から明らかにしている。沖ら<sup>\*4</sup>は、霞ヶ浦の水質と分光反射率の測定結果から、クロロフィル-a 濃度が高く、懸濁物質や溶存有機物の影響が強い水域に対し、クロロフィル-a 濃度推定モデルとして  $R(700nm)/R(675nm)$  が有効であることを示している。クロロフィル-a 濃度が 0~30  $\mu\text{g/l}$  の場合、675nm と 700nm との反射率の比から SS 濃度に関係なくクロロフィル-a 濃度を抽出でき、クロロフィル-a 濃度が 30~60  $\mu\text{g/l}$  で SS 濃度が既知ならば、クロロフィル-a 濃度が推定可能であることを明らかにしている。但し、地球観測衛星データにより水質を推定する場合には、675nm と 700nm のそれぞれの波長で大気補正できることが前提となる。さらに沖らは、Gordon モデルと比較した結果、沖らのモデルの方が相関は高いと報告している。

宮崎・灘岡<sup>\*5</sup>は、海中物質濃度を物理モデルにより推定する手法として、two flow model に直達光モデルを加えたモデル four flux model を用いている。この場合の大気補正は、放射伝達モデルによるもので、各バンドの放射輝度のノイズが 5%程度であれば、推定誤差は 20%程度以内で推定可能とのことである。作野ら<sup>\*6</sup>は SPOT/HRV のデータを用いて、宍道湖表層のクロロフィル-a 濃度を統計モデルにより推定している。暗画素法により、大気の影響を除き、バンド 1 とバンド 2 の比演算により推定している。宮崎ら、作野らの方法いずれにおいても、解析対象地域のエアロゾル濃度分布が不均一の場合には大気の影響を受けやすいと思われる。

Bukata ら<sup>\*7</sup>は、水中からの物質の反射が、水中のクロロフィル-a 濃度、SM (Suspended Minerals) と DOC (Dissolved Organic Carbon) の存在状態の違いにより、いずれの波長でも異なることを明らかにしている。図 5-18 より、水中の SM が 0.1mg/l、DOC が 0 で、クロロフィル-a 濃度が 1  $\mu\text{g/l}$  以下の場合、青色域の波長ではクロロフィル-a 濃度が高いほど反射は弱く、赤色域の波長ではクロロフィル-a 濃度の反射は殆どない。クロロフィル-a 濃度が 2  $\mu\text{g/l}$  以上の場合、青色域の波

長ではクロロフィル-a 濃度が高いほど反射は弱く、赤色域の波長ではクロロフィル-a 濃度が高いほど反射が強くなる。図 5-17 より、SM が 0、水中の DOC が 2.0mgC/l 場合、青色域から赤色域までのいずれの波長でもクロロフィル-a 濃度が高いほど反射が強くなる。また、同様な条件で SM が高いほど、いずれの波長域でも反射が強くなる関係を明らかにしている。

水尾ら<sup>\*8</sup>は LANDSAT/TM データと水質データとの統計モデルによる解析結果から、バンド 4 (760nm~900nm) とバンド 1 (450nm~520nm) の差演算からなる重回帰式を用いることで、大気補正され、クロロフィル-a 濃度の推定が可能であることを明らかにした。しかし、この際使用したデータはクロロフィル-a 濃度が高い場合であった。今回は、クロロフィル-a 濃度が低い場合もあり、その場合、高濃度の場合とは異なり、Gordon が述べていたように近赤外のバンド 4 に水質情報が含まれない結果も得られた。また、DOC については測定していないものの、Bukata らが明かにした内容が東京湾でも該当すると思われる結果が得られた。

### 5.1.2 地球観測衛星データによる水質推定の留意点

海域での衛星データに含まれる情報は、大気中の分子散乱光、大気中のエアロゾル散乱光、水面反射光、水中反射光などが挙げられる。

上空に雲がある場合、雲の下の水質情報を得ることが困難になり、また、雲影の部分は、影により光が吸収されるために水面及び水中反射光が弱くなり水質情報を得ることが困難になる。雲の影響範囲は、フルカラー画像から目視で推定でき、また、可視域と近赤外域の各バンドにおいて、DN 値が雲の付近で高くなることから推定できる。また、熱バンドで DN 値が低くなることから雲の影響範囲を推定可能である。

大気中のエアロゾルは各バンドの DN 値に影響を与えるので、水質推定にあたり考慮する必要がある。具体的には、各バンドと陸上のエアロゾルとの関係が線形回帰式で示せることが明らかになっており<sup>\*9</sup>、バンド間の演算により、エアロゾルの情報をある程度除去できると考えられる。

また、透明度が高い場合、水深が透明度より浅ければ、底質の反射光の情報が主となることから、解析する場合にはこの点にも留意する。

(\*1~\*9の参考文献については、巻末を参照)



## 5.2 LANDSAT/TM データと海上観測データの統計解析

解析にあたっては、まず、観測日別にデータの吟味をおこなう。次にデータの特徴を把握する上から平均値データによる解析をおこない、その中で得られた特徴について、全データの層別解析をおこなった。

なお、LANDSAT/TM の観測仕様について以下に示す。

バンド	波長域	空間分解能	観測幅
band1	0.45～0.52 $\mu$ m	30m	185km
band2	0.52～0.60 $\mu$ m		
band3	0.63～0.69 $\mu$ m		
band4	0.75～0.90 $\mu$ m		
band5	1.55～1.75 $\mu$ m		
band7	2.08～2.35 $\mu$ m		
band6	10.40～12.50 $\mu$ m	120m	

### 5.2.1 平均値データによる解析

1986年8月6日から2000年8月26日までの期間で取得した19日間の水質、TM及びSPMの平均値データ(表5-1)を用いて、TMデータと水質との関係について検討した。統計解析には(株)日本科学技術研修所のJuse-MAを用いた。TMデータ及び海上観測データの基本統計量及び相関係数行列を表5-2、3に示した。

#### (1) 水質項目間の相関

クロロフィル-a濃度(Log(Ch-a))と濁度(Tb)で正の相関( $r=0.788$ )、クロロフィル-a濃度と透明度(Tp)で負の相関( $r=-0.789$ )、濁度と透明度で負の相関( $r=-0.770$ )が見られた。この結果から、今回解析に使用した濁度はクロロフィル-aを含有するプランクトンに起因しているところが多いと思われる。また、その結果が透明度にも反映されていると推定される。

#### (2) TMバンド間の相関

熱バンドであるバンド6を除き、TMバンド間の相関については、いずれも正の相関が見られるが、バンド7と1、2、3、4との相関は弱い。バンド1とバンド4、5の相関( $r=0.727$ 、 $r=0.628$ )、バンド2と5の相関( $r=0.763$ )が他のバンド間の相関( $r=0.8$ 以上)に比べて弱い。これらのうち、バンド1とバンド4の関係について、11月から3月までの季節と4月から10月までの季節に分けて比較すると、図5-2のバンド1とバンド4との関係を示した散布図に示すように概ねその時期に対応した分布が見られた。また、クロロフィル-a濃度別でも図5-3に示すように2つの分布が見られた。

#### (3) 水質とTMバンド間の相関

表5-3に示すように水温と熱バンド6は正の相関で $r=0.861$ であった。熱バンド6はクロロフィルa濃度及び濁度と正の相関、透明度と負の相関が見られたが、これは、水温とプランクトンの増殖とが関連していることによる。クロロフィル-a濃度(Log(Chl-a))とTMデータとの相

関はバンド4、5、7と弱い正の相関、バンド1と弱い負の相関、バンド2、3と無相関であった。濁度とTMデータはバンド1を除いて弱い正の相関で、バンド1とは無相関であった。透明度とTMデータはバンド1と弱い正の相関 ( $r=0.277$ )、バンド7と弱い負の相関 ( $r=-0.377$ ) でバンド2、3とは無相関であった。

#### (4) 大気浮遊粒子状物質 (SPM) と TM データ等との相関

SPM とバンド1、7、6との相関は弱いですが、バンド2、3、4、5とは正の相関が見られた。特にバンド4とは相関係数  $r=0.612$ 、バンド5との相関係数  $r=0.526$  であることから、バンド4とバンド5は他のバンドに比べてSPMの影響を受けていると推定される。また、SPMがLog(Chl-a)と弱い正の相関 ( $r=0.507$ )、濁度と弱い正の相関 ( $r=0.401$ ) が見られたが、これは、クロロフィル-a濃度の高くなる時期とSPMが高くなる時期が一致していたためと思われる。

### 5.2.2 全データによる解析

全サンプル ( $n=172$ ) による水質とTMデータの基本統計量、相関係数行列を表5-4~5に示した。

#### (1) 水質項目間の相関

クロロフィル-a濃度 (Log(Chl-a)) と濁度 (Tb) で正の相関 ( $r=0.717$ )、クロロフィル-a濃度と透明度 (Tp) で負の相関 ( $r=-0.741$ )、濁度と透明度で負の相関 ( $r=-0.670$ ) が見られた。5.2.1(2)における平均値TMバンド間の相関分析によりクロロフィル-a濃度別に2つの分布で示せることが明らかになったので、水質項目間の解析においてもクロロフィル-a濃度別に比較した。

クロロフィル-a濃度が平均値で  $24\mu\text{g/l}$  以下のデータにおいては、表5-6~7、図5-4~6に示すように、クロロフィル-a (Log10(Chl-a)) と透明度 (Tp) で負の相関 ( $r=-0.532$ )、クロロフィル-a濃度 (Log(Chl-a)) と濁度で弱い正の相関 ( $r=0.314$ )、濁度と透明度で負の相関 ( $r=-0.653$ ) が見られた。この時のクロロフィル-a濃度 (Log10(Chl-a)) と濁度の相関は弱いことから、この時の濁度はプランクトン以外の懸濁物質によるところが多いと推定される。

クロロフィル-a濃度が平均値で  $13.5\mu\text{g/l}$  以上のデータでは、表5-8~9、図5-7~9に示すように、クロロフィル-a濃度と濁度で正の相関 ( $r=0.751$ )、クロロフィル-a濃度と透明度で負の相関 ( $r=-0.705$ )、濁度と透明度で負の相関 ( $r=-0.691$ ) が見られた。この時の濁度はクロロフィル-aを含有するプランクトンが占めていると推定される。

#### (2) TM バンド間の相関

バンド6は熱バンドのため、ここでは他のバンドとの比較は行わない。表5-4~5に示すように、バンド7とバンド1は無相関 ( $r=0.181$ )、バンド7とバンド2、3、4とは弱い正の相関であった。また、バンド1とバンド4との相関 ( $r=0.773$ )、バンド5との相関 ( $r=0.636$ ) が他のバンド間の相関に比べて弱かった。平均値データによる解析と同様に層別分析の結果、観測が

11月から3月までの季節と4月から10月までの季節に分けて比較すると、図5-10の散布図に示すように概ねその時期に対応した分布が見られた。地域別比較では、図5-11に示すように千葉側と横浜側で分布が重なっていたことより、水質調査地域の違いによる影響はないと思われた。年別比較では、図5-12に示すように1993年3月以前において2つの分布が見られた。クロロフィル-a濃度別比較では、図5-13~14に示すようにクロロフィル-a濃度の平均値が $24\mu\text{g/l}$ 以下の時期に対応する分布と $13.5\mu\text{g/l}$ 以上の時期に対応する分布が見られた。

クロロフィル-a濃度の平均値が $24\mu\text{g/l}$ 以下の時において、表5-6~7に示すようにバンド1とバンド3との相関は $r=0.888$ 、バンド1とバンド4との相関は $r=0.811$ で、クロロフィル-a濃度の平均値が $13.5\mu\text{g/l}$ 以上の時においては表5-8~9に示すように、バンド1とバンド3との相関は $r=0.881$ 、バンド1とバンド4との相関は $r=0.864$ であった。全サンプルでの相関分析結果に比べて、クロロフィル-aの濃度別で相関をとるとバンド1とバンド3及び4において強い正の相関が見られた。バンド1とバンド3及び4との層別分析において、季節別とクロロフィル-a濃度別でほとんど共通した分布が見られた。これは、クロロフィル-aを含有するプランクトンの増減が季節と関連が強いために、間接的に季節的因子と一致したと考えられる。

### (3) 水質とTMデータとの関係

#### ①水温とバンド6について

水温について、熱バンドのバンド6と実測値を比較した結果、図5-15~16に示すように1993年を境に分布が2つに分かれており、1993年9月以降の水温に対して検出されるセンサの値が1993年3月以前のデータに比べて低くなっていることがわかる。この原因については不明であるが、センサの劣化による可能性も考えられる。

#### ②クロロフィル-a濃度とTMデータについて

クロロフィル-a濃度について、TMデータの各バンドとクロロフィル-aの対数値を全サンプル( $n=172$ )で比較した結果は、バンド1と負の相関で、バンド2、3、4、5、7と正の相関であるが、相関係数は低い値であった。バンド6とは正の相関( $r=0.619$ )が見られたが、これはクロロフィル-a濃度の高・低が水温の高・低と関係が深いことによるものである。

クロロフィル-a濃度が $24\mu\text{g/l}$ 以下の時の結果は、表5-7に示すように、サンプル数67で、クロロフィル-a濃度とバンド6を除く各バンドとで全て負の相関であった。バンド1との相関係数は $-0.345$ 、バンド2は $-0.321$ 、バンド3は $-0.205$ に対し、バンド4は $-0.115$ であった。

クロロフィル-a濃度が $13.5\mu\text{g/l}$ 以上の時の結果は、表5-9に示すように、サンプル数134で $24\mu\text{g/l}$ 以下の結果と異なり、クロロフィル-a濃度と各バンドで正の相関で、相関係数は低い値であった。

#### ③濁度とTMデータについて

全サンプルでは、濁度と各バンドは全て正の相関であるが、相関係数は低い値であった。また、クロロフィル-a濃度の平均値が $24\mu\text{g/l}$ 以下及び $13.5\mu\text{g/l}$ 以上で比較した結果でも、全サンプルでの結果と同様に、正の相関で相関係数は低い値であった。

#### ④透明度と TM データについて

全サンプルでの比較結果では、バンド1、バンド2とは無相関で、他のバンドとは負の相関であった。クロロフィル-a濃度が  $24\mu\text{g/l}$  以下の時には、バンド6とは負の相関 ( $r = -0.409$ ) で他のバンドとは、無相関であった。クロロフィル-a濃度の平均値が  $13.5\mu\text{g/l}$  以上の時には、バンド6を除いて相関係数は低かった。バンド6との相関係数は  $r = -0.469$  であった。

表 5-1 水質、TM データ及び SPM の平均値データ

調査年月日	N	水温 (Wt)	Chl-a	LogChl-a	Tb(SS)	透明度(Tp)	SPM
860806	7	24.8	31.0	1.5	—	2.3	11.0
870302	10	9.3	6.6	0.8	—	3.9	23.0
890814	10	25.3	70.3	1.9	3.5	2.2	53.0
900222	10	10.7	13.5	1.1	3.8	2.8	18.0
900427	10	16.5	51.7	1.7	10.0	1.8	102.0
900529	9	20.3	82.1	1.9	10.9	1.6	38.0
901105	10	19.4	11.7	1.0	2.4	2.5	29.0
920603	10	21.1	143.6	2.2	10.9	1.3	91.0
930521	9	17.9	38.7	1.6	6.9	1.7	49.4
930910	9	24.7	37.9	1.6	4.5	1.8	61.2
940422	7	14.9	27.4	1.4	3.5	2.6	62.7
950815	7	27.6	23.6	1.4	3.9	2.4	37.3
970108	8	11.0	8.6	0.9	3.5	3.5	18.6
970414	6	14.5	9.9	1.0	—	2.5	41.0
990114	6	11.1	7.1	0.8	0.9	5.4	55.9
000218	7	10.0	15.2	1.2	1.0	4.8	31.1
000524	7	19.9	27.7	1.4	2.9	3.3	135.0
000711	8	25.3	79.4	1.9	13.4	1.1	95.1
000828	7	28.2	36.4	1.6	4.2	2.1	53.1

調査年月日	RSB1	RSB2	RSB3	RSB4	RSB5	RSB7	RB6
860806	0.378	0.297	0.140	0.106	0.014	0.003	1.160
870302	0.387	0.298	0.134	0.106	0.012	0.002	0.820
890814	0.399	0.284	0.182	0.177	0.030	0.008	1.116
900222	0.420	0.340	0.162	0.135	0.012	0.003	0.835
900427	0.472	0.433	0.251	0.249	0.040	0.012	0.993
900529	0.357	0.288	0.156	0.143	0.020	0.005	1.043
901105	0.336	0.239	0.107	0.078	0.007	0.001	0.990
920603	0.417	0.362	0.208	0.218	0.022	0.004	1.095
930521	0.360	0.308	0.170	0.161	0.022	0.006	0.991
930910	0.332	0.268	0.137	0.101	0.008	0.001	0.993
940422	0.370	0.306	0.174	0.164	0.023	0.006	1.009
950815	0.355	0.253	0.134	0.094	0.010	0.001	1.060
970108	0.451	0.323	0.200	0.162	0.019	0.000	0.871
970414	0.450	0.346	0.257	0.220	0.024	0.003	0.921
990114	0.443	0.330	0.192	0.122	0.018	0.002	0.856
000218	0.363	0.233	0.117	0.110	0.008	0.002	0.897
000524	0.434	0.340	0.201	0.221	0.026	0.000	0.986
000711	0.343	0.254	0.145	0.124	0.013	0.002	1.055
000828	0.420	0.310	0.169	0.166	0.013	0.003	1.037

\*RS～の R は絶対放射輝度への変換を、S は太陽高度角の補正を表す。

表 5-2 平均値データの基本統計量

全カブル数[19]

No	変数名	データ数	合計	最小値	最大値	平均値	標準偏差	変動係数	ひずみ	とがり
3	水温 (Wt)	19	352.60	9.3	28.2	18.56	6.330	0.3411	-0.030	-1.366
4	Chl-a	19	722.38	6.6	143.6	38.02	34.906	0.9181	1.769	3.570
5	LogChl-a	19	26.85	0.8	2.2	1.41	0.399	0.2823	0.028	-0.880
6	Tb (SS)	16	86.09	0.8	13.4	5.38	3.830	0.7117	0.949	-0.301
7	透明度	19	49.59	1.1	5.4	2.61	1.144	0.4382	1.120	0.978
8	SPM	19	1005.38	11.0	135.0	52.91	32.717	0.6183	1.041	0.757
9	RSB1	19	7.49	0.332	0.472	0.3941	0.04348	0.1103	0.214	-1.272
10	RSB2	19	5.81	0.233	0.433	0.3060	0.04824	0.1576	0.746	1.342
11	RSB3	19	3.24	0.107	0.257	0.1704	0.04112	0.2413	0.650	0.071
12	RSB4	19	2.86	0.078	0.249	0.1503	0.04922	0.3274	0.529	-0.691
13	RSB5	19	0.34	0.007	0.040	0.0180	0.00858	0.4772	0.906	0.860
14	RSB7	19	0.07	-0.000	0.012	0.0034	0.00297	0.8651	1.471	2.549
15	RB6	19	18.73	0.820	1.160	0.9856	0.09668	0.0981	-0.182	-0.712

表 5-3 平均値データによる水質と TM データの相関係数行列

全カブル数[19], (+: |r|>0.3, ++: |r|>0.6)

No	変数名	水温 (Wt)	Chl-a	LogChl-a	Tb (SS)	透明度	SPM	RSB1	RSB2	RSB3	RSB4	RSB5	RSB7	RB6
3	水温 (Wt)	1.000	0.472	0.665+	0.348	-0.683+	0.264	-0.373	-0.261	-0.180	-0.053	-0.060	0.060	0.861++
4	Chl-a	0.472	1.000	0.899++	0.785+	-0.662+	0.463	-0.094	0.163	0.169	0.365	0.296	0.395	0.635+
5	LogChl-a	0.665+	0.899++	1.000	0.788+	-0.789+	0.507	-0.218	0.089	0.094	0.348	0.335	0.480	0.789+
6	Tb (SS)	0.348	0.785+	0.788+	1.000	-0.770+	0.401	-0.090	0.255	0.258	0.348	0.289	0.415	0.512
7	透明度	-0.683+	-0.662+	-0.789+	-0.770+	1.000	-0.271	0.277	-0.082	-0.093	-0.246	-0.198	-0.377	-0.691+
8	SPM	0.264	0.463	0.507	0.401	-0.271	1.000	0.230	0.400	0.441	0.812+	0.526	0.219	0.260
9	RSB1	-0.373	-0.094	-0.218	-0.090	0.277	0.230	1.000	0.845++	0.842++	0.727+	0.628+	0.210	-0.320
10	RSB2	-0.261	0.163	0.089	0.255	-0.082	0.400	0.845++	1.000	0.867++	0.818++	0.763+	0.484	-0.133
11	RSB3	-0.180	0.169	0.094	0.258	-0.093	0.441	0.842++	0.867++	1.000	0.907++	0.827++	0.431	-0.067
12	RSB4	-0.053	0.365	0.348	0.348	-0.246	0.612+	0.727+	0.818++	0.907++	1.000	0.868++	0.496	0.104
13	RSB5	-0.060	0.296	0.335	0.289	-0.198	0.526	0.628+	0.763+	0.827++	0.868++	1.000	0.742+	0.175
14	RSB7	0.060	0.395	0.480	0.415	-0.377	0.219	0.210	0.484	0.431	0.496	0.742+	1.000	0.311
15	RB6	0.861++	0.635+	0.789+	0.512	-0.691+	0.260	-0.320	-0.133	-0.067	0.104	0.175	0.311	1.000

表 5-4 全サンプルの基本統計量

全サンプル数[172]

No	変数名	データ数	合計	最小値	最大値	平均値	標準偏差	変動係数	ひずみ	とがり
9	WT	167	3241.60	8.200	30.900	19.4108	5.92370	0.3052	-0.158	-0.882
12	Log10(Ch_a)	172	246.98	0.204	2.685	1.4360	0.41832	0.2913	-0.124	-0.003
13	SS(TB)	145	926.20	0.500	26.141	6.3876	5.15936	0.8077	1.528	2.403
14	Tp	172	404.10	0.500	7.000	2.3494	1.16742	0.4969	1.176	1.686
15	RSuTM1	172	67.30	0.314	0.503	0.3913	0.04589	0.1173	0.452	-0.815
16	RSuTM2	172	53.41	0.216	0.461	0.3105	0.05149	0.1658	0.630	0.450
17	RSuTM3	172	29.32	0.100	0.292	0.1704	0.04199	0.2464	0.775	0.228
18	RSuTM4	172	26.60	0.063	0.287	0.1546	0.05162	0.3338	0.572	-0.462
19	RSuTM5	172	3.09	0.004	0.046	0.0179	0.00910	0.5072	0.789	0.264
20	RSuTM7	172	0.58	-0.002	0.014	0.0034	0.00317	0.9396	1.217	1.417
22	RBand6	172	231.61	1.107	1.550	1.3466	0.10756	0.0799	-0.478	-0.388

表 5-5 全サンプルによる水質と TM データの相関係数行列

全サンプル数[172], (+:|r|>0.8, ++:|r|>0.6)

No	変数名	WT	Log10(Ch_a)	SS(TB)	Tp	RSuTM1	RSuTM2	RSuTM3	RSuTM4	RSuTM5	RSuTM7	RBand6
9	WT		0.515	0.090	-0.505	-0.241	-0.194	-0.106	-0.022	-0.114	-0.087	0.852++
12	Log10(Ch_a)			0.717+	-0.741+	-0.103	0.132	0.186	0.344	0.291	0.312	0.619+
13	SS(TB)				-0.670+	-0.091	0.159	0.194	0.235	0.196	0.277	0.278
14	Tp					0.127	-0.145	-0.209	-0.279	-0.184	-0.233	-0.567
15	RSuTM1						0.872++	0.845++	0.773+	0.636+	0.181	-0.246
16	RSuTM2							0.908++	0.875++	0.825++	0.501	-0.045
17	RSuTM3								0.932++	0.815++	0.387	0.003
18	RSuTM4									0.836++	0.407	0.114
19	RSuTM5										0.716+	0.134
20	RSuTM7											0.220
22	RBand6											

表 5-6 クロロフィル a 濃度 24  $\mu$ g/l 以下の基本統計量

全サンプル数[67]

No	変数名	データ数	合計	最小値	最大値	平均値	標準偏差	変動係数	ひずみ	とがり
14	WT	60	852.20	8.200	28.000	14.2033	6.02661	0.4243	1.229	0.310
17	Log10(Ch_a)	65	65.38	0.204	1.534	1.0058	0.27374	0.2721	-0.769	0.784
13	SS(TB)	50	141.70	0.500	11.800	2.8340	1.84353	0.6505	2.191	10.264
16	Tp	65	223.60	1.400	8.000	3.4400	1.34731	0.3917	1.134	1.373
5	RSuTM1	67	26.78	0.322	0.479	0.3997	0.04480	0.1121	0.004	-1.303
6	RSuTM2	67	19.87	0.216	0.385	0.2966	0.04692	0.1582	-0.076	-1.219
7	RSuTM3	67	10.74	0.100	0.292	0.1603	0.04886	0.3049	1.032	0.438
8	RSuTM4	67	8.40	0.063	0.243	0.1254	0.04241	0.3383	1.196	1.045
9	RSuTM5	67	0.90	0.004	0.028	0.0135	0.00588	0.4369	0.640	-0.327
10	RSuTM7	67	0.12	-0.001	0.005	0.0018	0.00124	0.7087	-0.160	0.276
11	RBand6	67	82.63	1.107	1.436	1.2333	0.09358	0.0759	0.922	-0.384

表 5-7 クロロフィル a 濃度 24  $\mu$ g/l 以下の水質と TM データの相関係数行列

全サンプル数[67], (+:|r|>0.8, ++:|r|>0.6)

No	変数名	WT	Log10(Ch_a)	SS(TB)	Tp	RSuTM1	RSuTM2	RSuTM3	RSuTM4	RSuTM5	RSuTM7	RBand6
14	WT		0.408	0.272	-0.471	-0.510	-0.443	-0.211	-0.290	-0.261	-0.270	0.971++
17	Log10(Ch_a)			0.314	-0.532	-0.345	-0.321	-0.205	-0.115	-0.241	-0.004	0.343
13	SS(TB)				-0.653+	0.185	0.376	0.378	0.436	0.208	0.091	0.220
16	Tp					0.191	-0.009	-0.033	-0.113	0.051	-0.017	-0.409
5	RSuTM1						0.911++	0.888++	0.811++	0.860++	0.121	-0.507
6	RSuTM2							0.842++	0.777+	0.783+	0.289	-0.476
7	RSuTM3								0.933++	0.914++	0.176	-0.192
8	RSuTM4									0.847++	0.210	-0.264
9	RSuTM5										0.194	-0.254
10	RSuTM7											-0.236
11	RBand6											



表 5-8 クロロフィル a 濃度 13.5  $\mu\text{g/l}$  以上の基本統計量

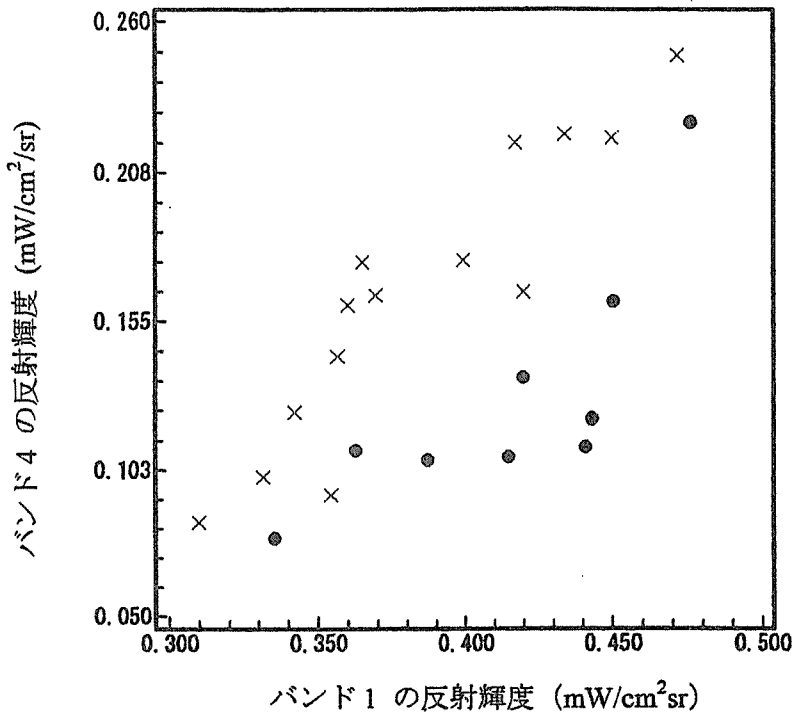
全サブル数[134]

No	変数名	データ数	合計	最小値	最大値	平均値	標準偏差	変動係数	ひずみ	とがり
18	WT	131	2703.10	9.500	30.900	20.6344	5.39298	0.2614	-0.314	-0.558
21	Log10(Ch_a)	131	207.39	0.716	2.685	1.5831	0.33381	0.2109	0.179	0.159
17	SS(TB)	121	818.24	0.600	26.000	6.7623	4.94637	0.7315	1.304	1.718
20	Tp	131	271.50	0.500	6.000	2.0725	0.99977	0.4824	1.297	2.323
9	RSuTM1	134	51.67	0.305	0.503	0.3856	0.04819	0.1250	0.477	-0.625
10	RSuTM2	134	41.65	0.216	0.461	0.3108	0.05569	0.1792	0.643	0.093
11	RSuTM3	134	22.85	0.101	0.271	0.1706	0.03863	0.2265	0.697	0.069
12	RSuTM4	134	21.48	0.069	0.287	0.1603	0.05125	0.3197	0.542	-0.478
13	RSuTM5	134	2.50	0.004	0.046	0.0187	0.00956	0.5122	0.761	-0.014
14	RSuTM7	134	0.50	-0.002	0.014	0.0038	0.00335	0.8911	1.073	0.796
15	RBand6	134	184.57	1.155	1.550	1.3774	0.09270	0.0673	-0.758	0.831

表 5-9 クロロフィル a 濃度 13.5  $\mu\text{g/l}$  以上の水質と TM データの相関係数行列

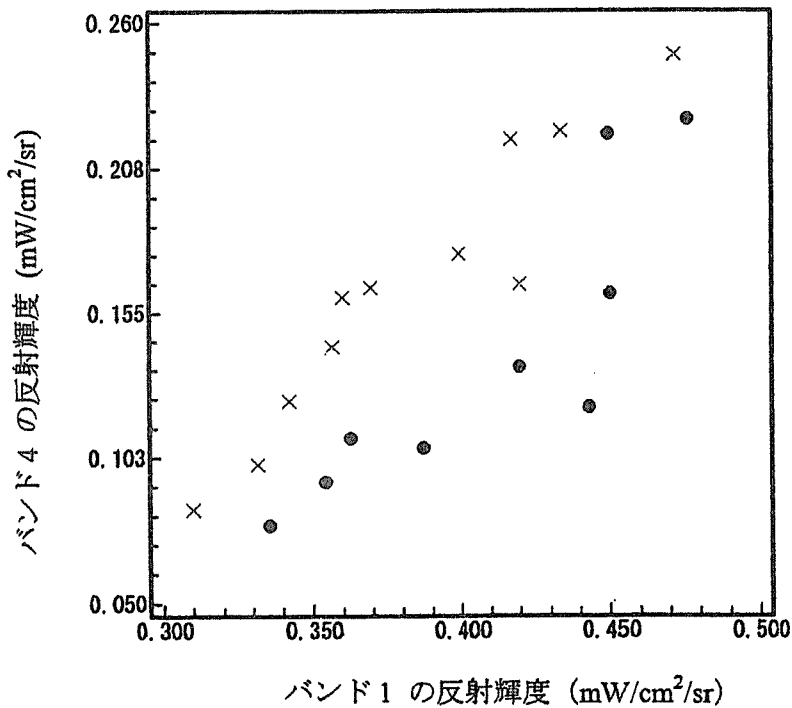
全サブル数[134], (+: $|r|>0.8$ , ++: $|r|>0.6$ )

No	変数名	WT	Log10(Ch_a)	SS(TB)	Tp	RSuTM1	RSuTM2	RSuTM3	RSuTM4	RSuTM5	RSuTM7	RBand6
18	WT		0.318	0.050	-0.390	-0.269	-0.293	-0.191	-0.191	-0.241	-0.229	0.794+
21	Log10(Ch_a)			0.751+	-0.705+	-0.025	0.101	0.226	0.268	0.240	0.201	0.444
17	SS(TB)				-0.691+	-0.107	0.123	0.191	0.178	0.156	0.248	0.258
20	Tp					0.056	-0.159	-0.244	-0.197	-0.149	-0.164	-0.469
9	RSuTM1						0.902++	0.881++	0.864++	0.664+	0.292	-0.282
10	RSuTM2							0.964++	0.907++	0.825++	0.536	-0.156
11	RSuTM3								0.966++	0.855++	0.497	-0.053
12	RSuTM4									0.834++	0.422	-0.041
13	RSuTM5										0.750+	0.044
14	RSuTM7											0.073
15	RBand6											



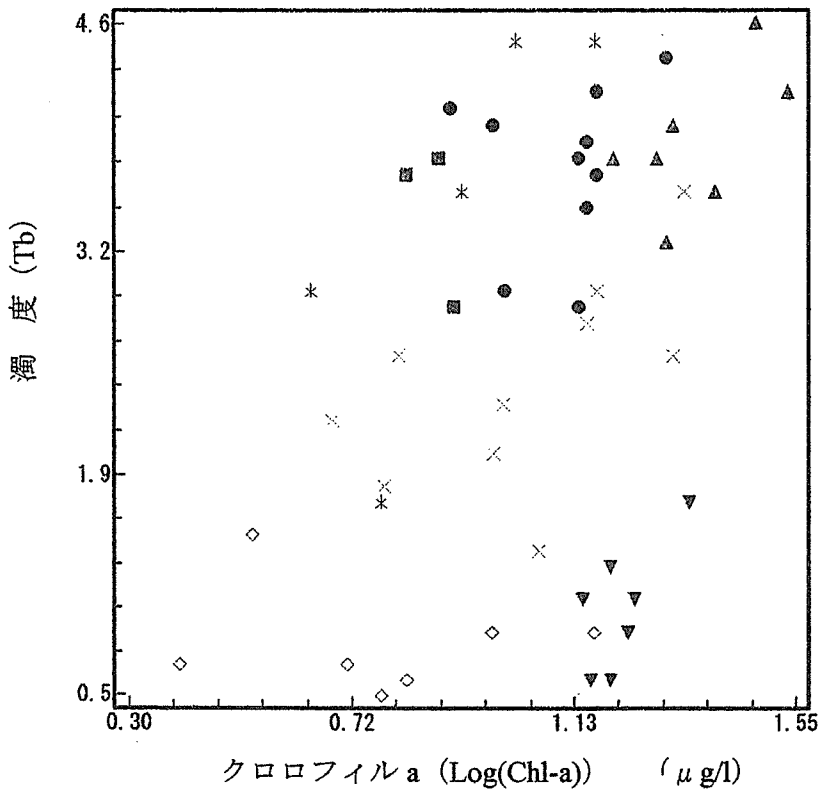
No.	種類	カテゴリ名
1	●	11~3月
2	×	4~10月

図 5-2 バンド1とバンド4との関係 (季節別)



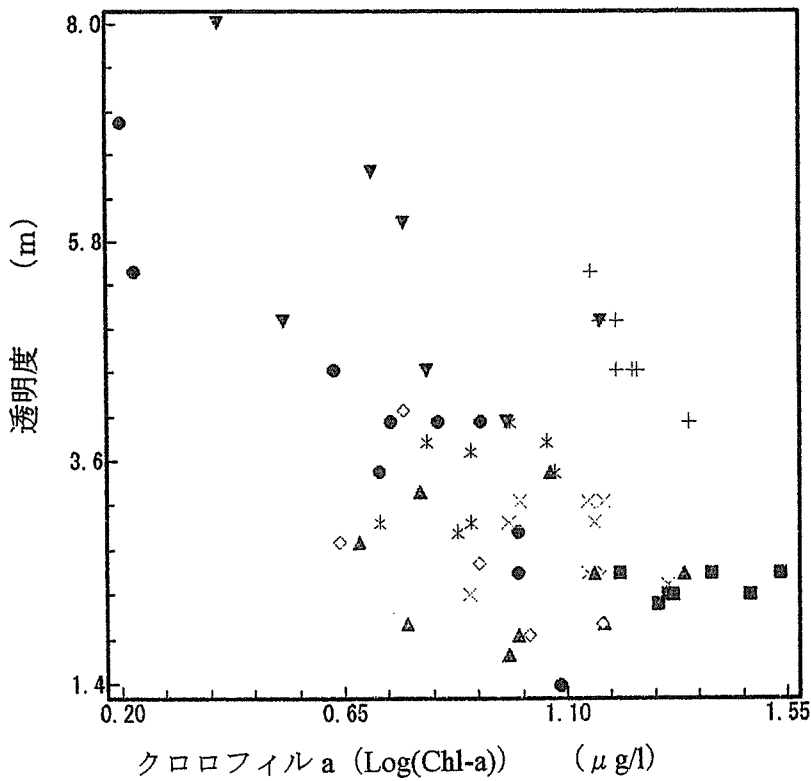
No.	種類	カテゴリ名
1	●	低クロロフィル a
2	×	高クロロフィル a

図 5-3 バンド1とバンド4との関係 (クロロフィル a 濃度別)



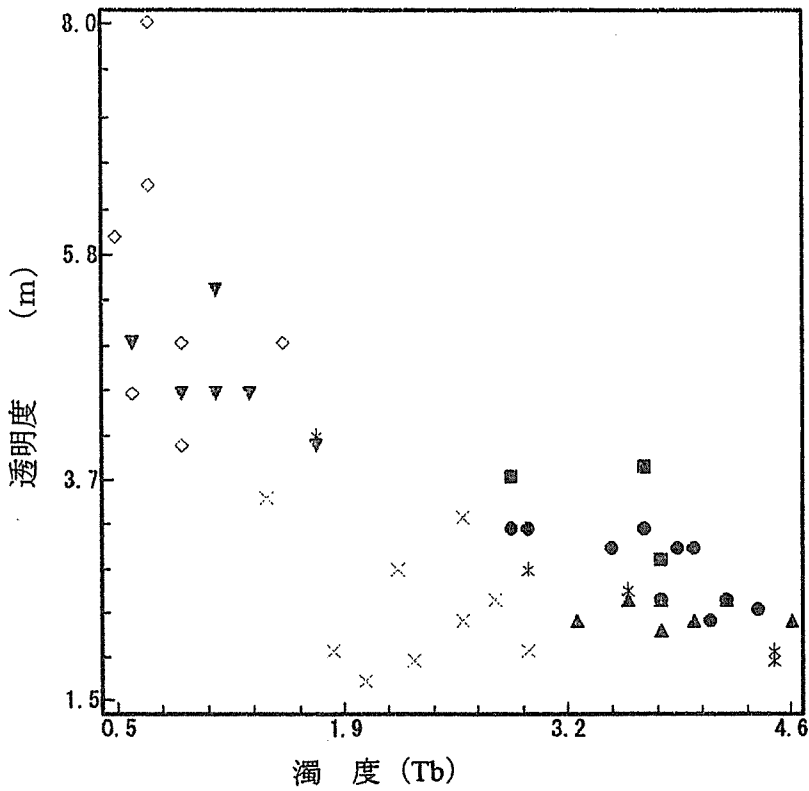
No.	種類	カテゴリ名
2	●	カテゴリ2
3	×	カテゴリ3
4	▲	カテゴリ4
5	▲	カテゴリ5
6	×	カテゴリ6
7	◇	カテゴリ7
8	▼	カテゴリ8

図 5-4 クロロフィル a と濁度 (Tb) との関係  
(クロロフィル a 濃度 24 μg/l 以下)



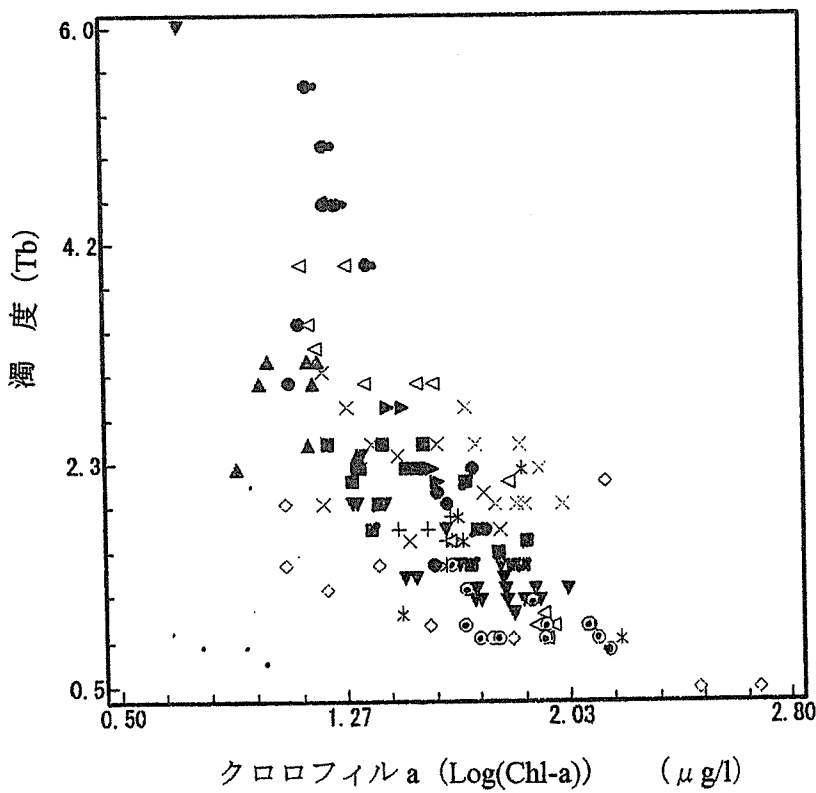
No.	種類	カテゴリ名
1	●	カテゴリ1
2	×	カテゴリ2
3	▲	カテゴリ3
4	▲	カテゴリ4
5	×	カテゴリ5
6	◇	カテゴリ6
7	▼	カテゴリ7
8	+	カテゴリ8

図 5-5 クロロフィル a と透明度 (Tp) との関係  
(クロロフィル a 濃度 24 μg/l 以下)



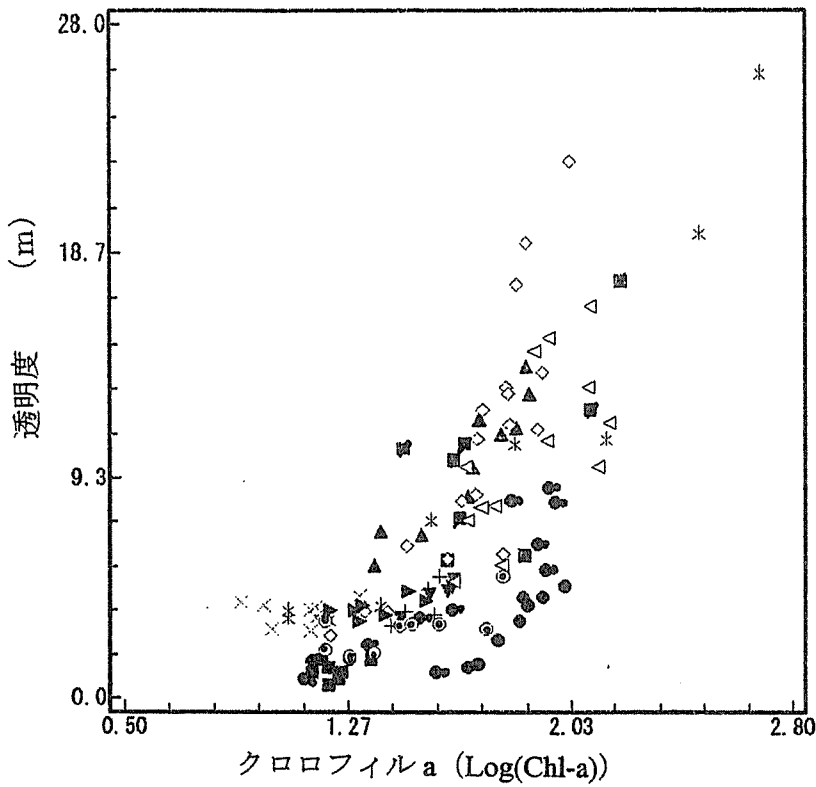
No.	種類	カテゴリ名
2	●	カテゴリ2
3	×	カテゴリ3
4	▲	カテゴリ4
5	▼	カテゴリ5
6	◇	カテゴリ6
7	○	カテゴリ7
8	▽	カテゴリ8

図 5-6 濁度 (Tb) と透明度 (Tp) との関係  
(クロロフィル a 濃度  $24 \mu\text{g/l}$  以下)



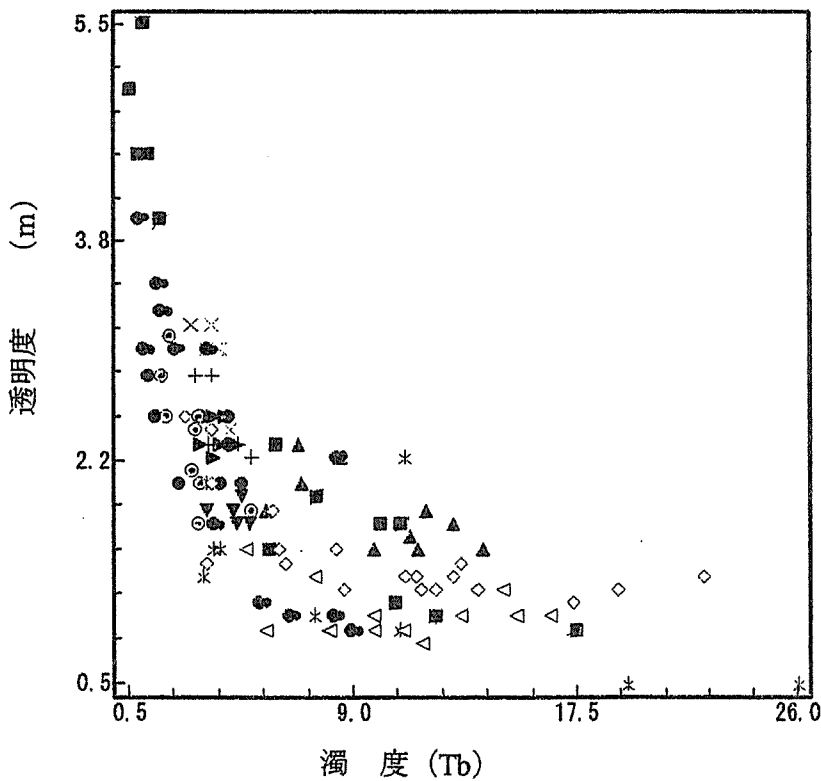
No.	種類	カテゴリ名
1	●	カテゴリ1
2	×	カテゴリ2
3	▲	カテゴリ3
4	▼	カテゴリ4
5	◇	カテゴリ5
6	○	カテゴリ6
7	▽	カテゴリ7
8	+	カテゴリ8
9	△	カテゴリ9
10	■	カテゴリ10
11	□	カテゴリ11
12	○	カテゴリ12
13	○	カテゴリ13
14	×	カテゴリ14

図 5-7 クロロフィル a と濁度 (Tb) との関係  
(クロロフィル a 濃度  $13.5 \mu\text{g/l}$  以上)



No.	種類	カテゴリー	リ名
2	●	カテゴリー	リ2
3	×	カテゴリー	リ3
4	▲	カテゴリー	リ4
5	◆	カテゴリー	リ5
6	◇	カテゴリー	リ6
7	×	カテゴリー	リ7
8	▼	カテゴリー	リ8
9	+	カテゴリー	リ9
10	■	カテゴリー	リ10
11	▲	カテゴリー	リ11
12	●	カテゴリー	リ12
13	△	カテゴリー	リ13
14	◎	カテゴリー	リ14

図 5-8 クロロフィル a と透明度 (Tp) との関係  
(クロロフィル a 濃度  $13.5 \mu\text{g/l}$  以上)



No.	種類	カテゴリー	リ名
2	●	カテゴリー	リ2
3	×	カテゴリー	リ3
4	▲	カテゴリー	リ4
5	◆	カテゴリー	リ5
6	◇	カテゴリー	リ6
7	×	カテゴリー	リ7
8	▼	カテゴリー	リ8
9	+	カテゴリー	リ9
10	■	カテゴリー	リ10
11	▲	カテゴリー	リ11
12	●	カテゴリー	リ12
13	△	カテゴリー	リ13
14	◎	カテゴリー	リ14

図 5-9 濁度 (Tb) と透明度 (Tp) との関係  
(クロロフィル a 濃度  $13.5 \mu\text{g/l}$  以上)

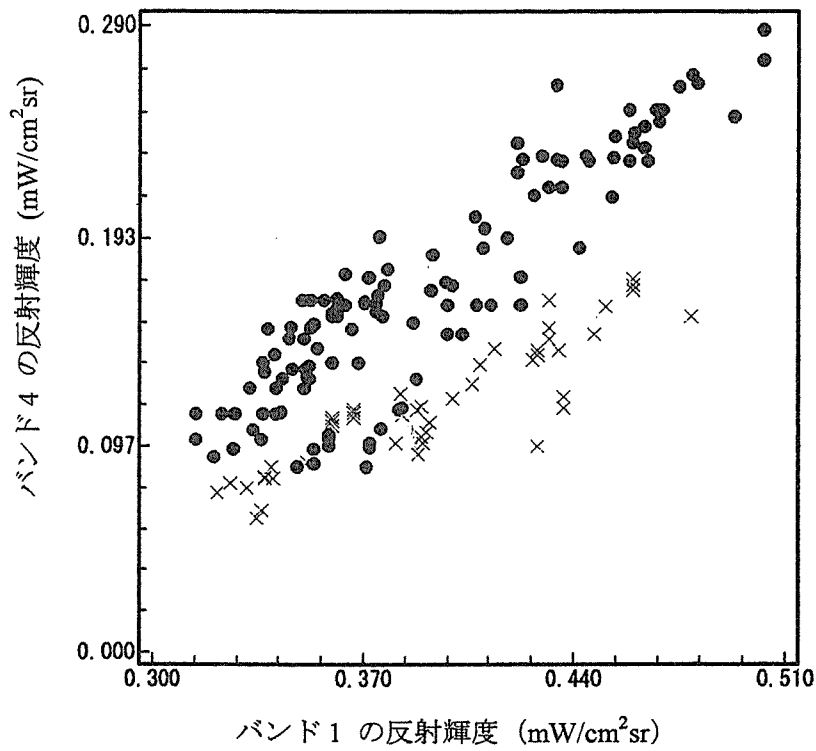
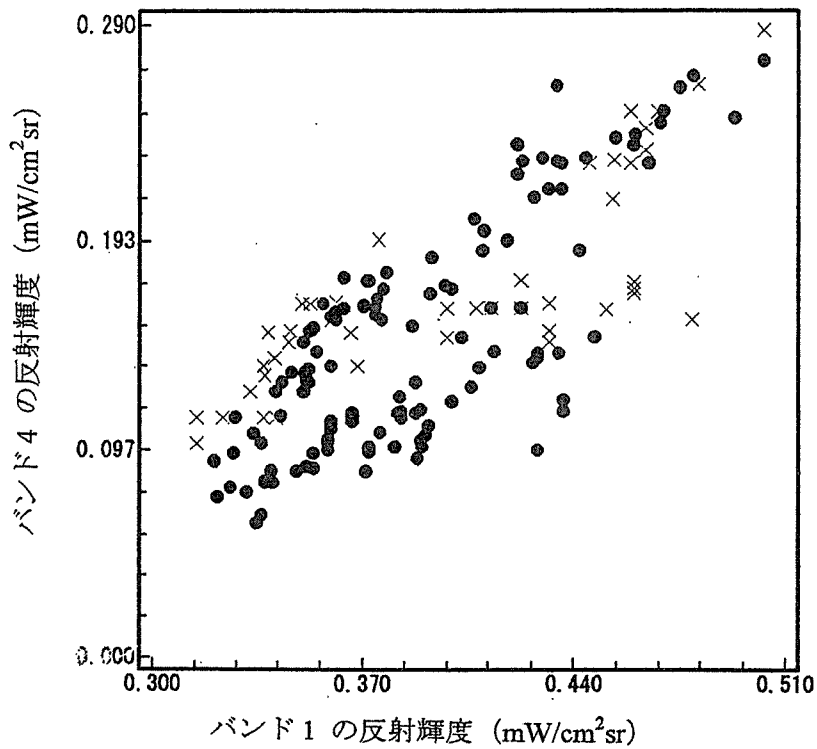
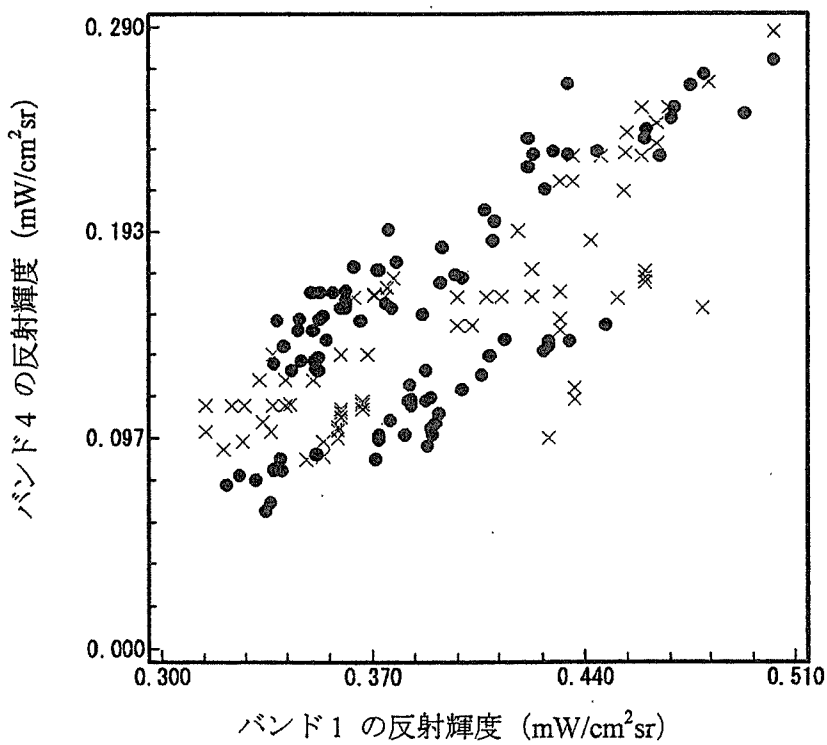


図 5-10 バンド1とバンド4との関係  
(季節別)



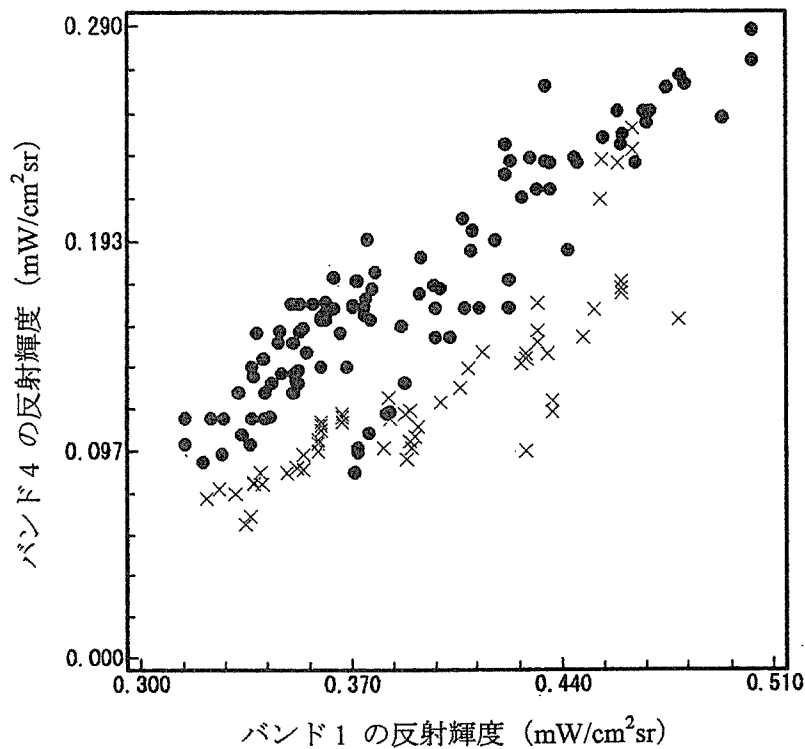
No.	種類	行名
1	●	横浜市サンプル
2	×	千葉県サンプル

図 5-11 バンド1とバンド4との関係  
(地域別)



No.	種類	行名
1	●	～1993年3月
2	×	1993年9月～

図 5-12 バンド1とバンド4との関係  
(年別)



No.	種類	カテゴリ名
1	●	高クロロフィル a
2	×	低クロロフィル a

図 5-13 バンド1とバンド4との関係  
(クロロフィル濃度別)

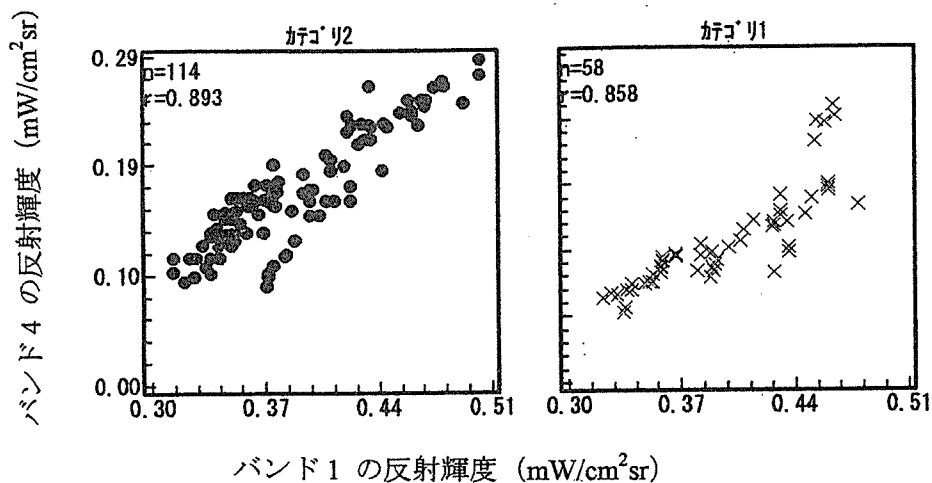


図 5-14 バンド1とバンド4との関係  
 カテゴリ 1; クロロフィル濃度平均  $24 \mu\text{g/l}$  以下  
 カテゴリ 2; クロロフィル濃度平均  $13 \mu\text{g/l}$  以上



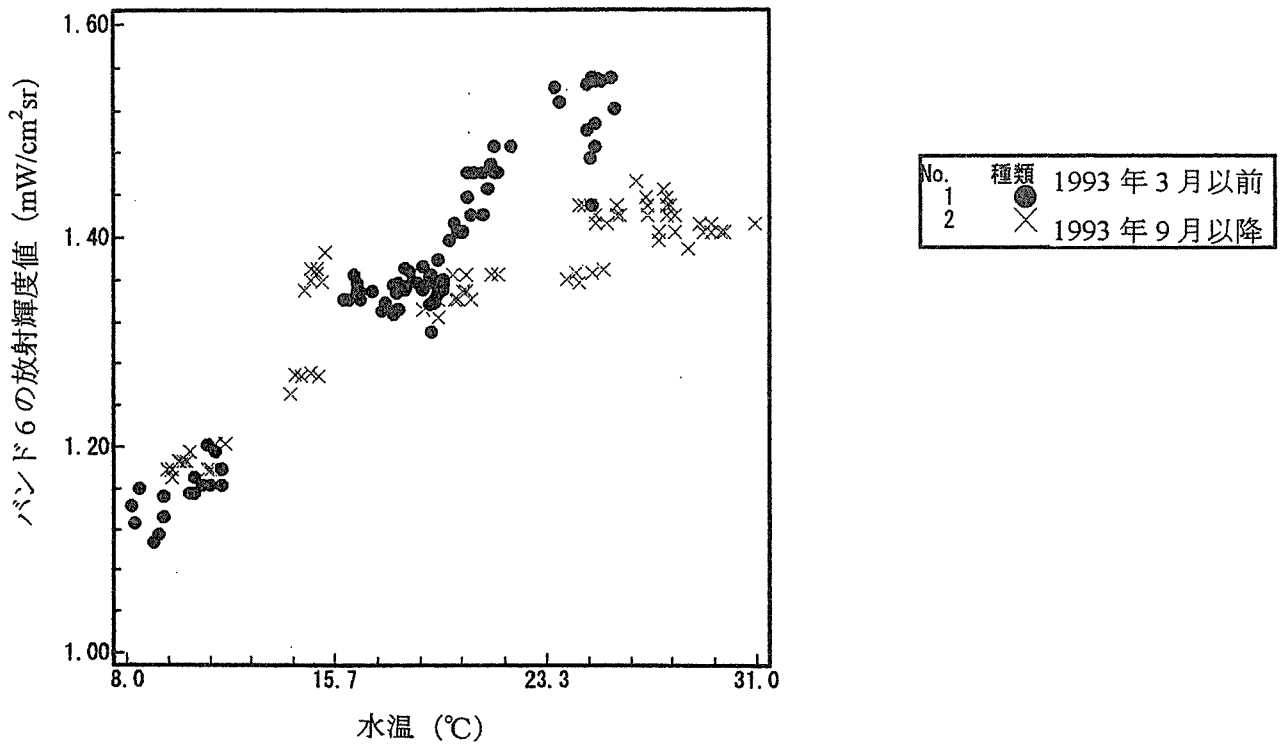


図 5-15 水温とバンド6との関係 (年別)

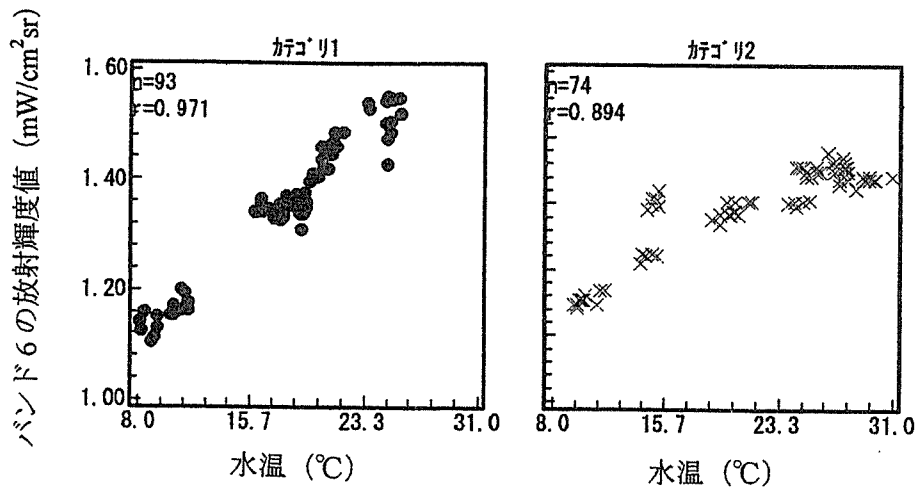


図 5-16 水温とバンド6との関係

カテゴリ 1 ; 1993年3月以前のサンプル

カテゴリ 2 ; 1993年9月以降のサンプル

### 5.2.3 水質実測値と推定値との比較

汎用的なアルゴリズムを検討するために、全観測日のデータに共通する各水質項目の推定式を求め、この推定式によって得た推定値と実測値とを比較した。

クロロフィル-a 濃度推定値は、水尾ら\*<sup>8</sup>が作成したバンド4とバンド1の差演算からなる式から求めた。推定濁度と推定透明度については、表5-1の平均値データにおいてクロロフィル-a濃度が $24\mu\text{g/l}$ 以下の時と $13.5\mu\text{g/l}$ 以上の時に区分して推定式を作り、全サンプルについて推定値を求めた。 $24\mu\text{g/l}$ 以下の時は、推定濁度はバンド2とバンド1の差演算式で、推定透明度はバンド1とバンド5とバンド3からなる重回帰式で求めた。 $13.5\mu\text{g/l}$ 以上の時は、推定濁度はバンド3とバンド1の差演算式で、推定透明度はバンド1とバンド4とバンド2からなる重回帰式で求めた。水質実測値と推定値との相関係数行列を表5-10、11に示した。クロロフィル-a濃度が $24\mu\text{g/l}$ 以下の時には、クロロフィル-a濃度(LogChl-a)とクロロフィル-a濃度推定値(E\_LogChl-a)は弱い正の相関( $r=0.382$ )、濁度(Tb)と推定濁度(E\_Tb)は正の相関( $r=0.686$ )、透明度(Tp)と推定透明度(E\_Tp)は正の相関( $r=0.632$ )であった。クロロフィル-a濃度が $13.5\mu\text{g/l}$ 以上の時には、クロロフィル-a濃度(LogChl-a)とクロロフィル-a濃度推定値(E\_LogChl-a)は正の相関( $r=0.588$ )、濁度(Tb)と推定濁度(E\_Tb)は正の相関( $r=0.588$ )、透明度(Tp)と推定透明度(E\_Tp)は正の相関( $r=0.716$ )であった。特に、クロロフィル-a濃度推定値と実測値の相関係数が低かったが、これは、クロロフィル-a濃度条件の他に、5.4.3で示すSPMの影響や濁度の影響などがデータにより異なっていることが関係していると考えられる。

表 5-10 クロロフィル a 濃度 13.5  $\mu$ g/l 以上の実測水質と  
推定水質との相関

全サンプル数[134], (+: $|r|>0.8$ , ++: $0.8 \geq |r| > 0.6$ )

No	変数名	WT	Log10(Ch_	SS(TB)	Tp	RBand6	ELCh-aHo	ETb3-1	ETp1+5-3
18	WT		0.318	0.050	-0.390	0.794+	0.098	0.120	-0.179
21	Log10(Ch_a			0.751+	-0.705+	0.444	0.588	0.537	-0.519
17	SS(TB)				-0.691+	0.258	0.519	0.588	-0.612+
20	Tp					-0.469	-0.499	-0.638+	0.716+
15	RBand6						0.420	0.436	-0.369
25	ELCh-aHo							0.862++	-0.759+
23	ETb3-1								-0.903++
22	ETp1+5-3								

表 5-11 クロロフィル a 濃度 24  $\mu$ g/l 以下の実測水質と  
推定水質との相関

全サンプル数[67], (+: $|r|>0.8$ , ++: $0.8 \geq |r| > 0.6$ )

No	変数名	WT	Log10(Ch_	SS(TB)	Tp	RBand6	LChasiki	ETb2-1	ETp1-4-2
14	WT		0.408	0.272	-0.471	0.971++	0.351	0.094	-0.303
17	Log10(Ch_a			0.314	-0.532	0.343	0.382	0.133	-0.281
13	SS(TB)				-0.653+	0.220	0.400	0.686+	-0.594
16	Tp					-0.409	-0.501	-0.580	0.632+
11	RBand6						0.399	0.083	-0.293
23	LChasiki							0.660+	-0.800++
20	ETb2-1								-0.919++
19	ETp1-4-2								

### 5.3 水質推定アルゴリズムのケース区分

LANDSAT/TM の観測値と実測値より、統計モデルを用いて水質推定アルゴリズムを検討する。水質、大気などの情報は、センサの各バンドの特性に応じて観測されていると仮定し、各バンドの違いを利用することで、水質情報の抽出が可能と考える。

センサに入力される主な因子として、大気中の分子散乱光、大気浮遊粒子状物質 (SPM) などのエアロゾル、海面の波、水中物質 (植物プランクトン、動物プランクトン、デトリタス、無機懸濁物質、溶存有機炭素など)、海底物質などがあげられる。水質推定アルゴリズムを容易にするために、モデルに使用する因子をできるだけ少なくする。今回取得したデータは、海上の波の高さは 1m未満でほとんど白波のない条件下なので、海面の波の因子については均一条件と仮定する。水中物質についても、植物プランクトンの指標としてクロロフィル-a を用い、動物プランクトンやその他の懸濁物質と合わせて濁度、溶存有機炭素の 3 因子に区分する。水深は透明度より充分深く、海底物質に関する情報は 0 と仮定する。溶存有機炭素は、クロロフィル-a 濃度が低い場合には低く、クロロフィル-a 濃度が高い場合には高いと仮定する。また、エアロゾル情報は、陸上で観測した SPM 値を使用する。

以下に示す Case1 から Case5 に区分して、Gorden アルゴリズムをベースに検討する。

**Case1:** エアロゾルがない (SPM=0) 水質については濃度変化が見られる場合

但し、クロロフィル-a 濃度は  $13.5 \mu\text{g/l}$  以上で溶存有機炭素 (DOC) も高いと仮定する

**Case2:** エアロゾル濃度が均一 (SPM=C) 水質については濃度変化が見られる場合

但し、クロロフィル-a 濃度は  $13.5 \mu\text{g/l}$  以上で溶存有機炭素 (DOC) も高いと仮定する

**Case2-1:** 濁度はクロロフィル-a 濃度と相関の強いプランクトン由来の場合

但し、クロロフィル-a 濃度は  $13.5 \mu\text{g/l}$  以上で溶存有機炭素 (DOC) も高いと仮定する

**Case2-2:** 濁度はクロロフィル-a 濃度との相関が弱く、プランクトン以外の懸濁物質による場合

**Case3:** Case1 または Case2 の場合で、クロロフィル-a 濃度は  $24 \mu\text{g/l}$  以下で溶存有機炭素 (DOC) も低いと仮定する場合

**Case3-1:** 濁度はクロロフィル-a 濃度と相関の強いプランクトン由来の場合

**Case3-2:** 濁度はクロロフィル-a 濃度との相関が弱く、プランクトン以外の懸濁物質による場合

**Case4:** 水質濃度は一定 ( $Ltw(x)=W(x)$ )、エアロゾルに濃度変化が見られる場合

**Case5:** 水質及びエアロゾル両方に濃度変化が見られる場合

**Case5-1:** 濁度はクロロフィル-a 濃度との相関が強く、プランクトン由来の場合

**Case5-2:** 濁度はクロロフィル-a 濃度との相関が弱く、プランクトン以外の懸濁物質による場合

Gordon アルゴリズムより

$$Lt(x) = t(x)Lw(x) + Lta(x) + Ltm(x) \quad \dots\dots(1)$$

$Ltw(x) = t(x)Lw(x)$  とすると

$$Lt(x) = Ltw(x) + Lta(x) + Ltm(x) \quad \dots\dots(2)$$

( 但し  $Ltw(x) = LtChl-a(x) + LtTb(x)$  )

上記式はバンド x で観測される情報 ( $Lt(x)$ ) は主として下記の情報からなると仮定したものである。(但し、ここでは、波の影響の他、測定誤差やサンプリング上の地点誤差、衛星観測時間とサンプリング時間差からくる誤差の問題については、計算を複雑にするので省略する。また、水質を推定する前提としては、推定値がこれらの誤差を無視できる範囲であると仮定する。)

$$Lt(x) = (\text{水質情報}) + (\text{エアロゾル情報}) + (\text{分子散乱光})$$

(但し (水質情報) は (クロロフィル-a 情報) + 濁度情報)

但し、 $Lt(x)$ ; バンド x におけるセンサで観測された放射輝度値

$t(x)$ ; バンド x における大気の大気透過率

$Lw(x)$ ; バンド x における海面及び海中からの放射輝度値

$Lta(x)$ ; バンド x におけるセンサで観測されたエアロゾル散乱光の放射輝度値

$Ltm(x)$ ; バンド x におけるセンサで観測された分子散乱光の放射輝度値

$Ltw(x)$ ; バンド x におけるセンサで観測された海面及び海中からの放射輝度値

$LtChl-a(x)$ ; バンド x におけるセンサで観測された海面及び海中からのクロロフィル-a の放射輝度値

$LtTb(x)$ ; バンド x におけるセンサで観測された海面及び海中からの懸濁物質の放射輝度値

図 5-1 の模式図参照

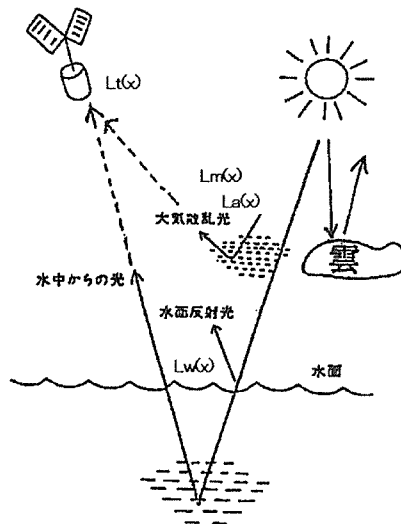


図 5-1 東京湾における簡易水質推定概略図 (安岡原図一部改図)

**【Case1】**

$$Lt(x) = (\text{水質情報}) + (\text{エアロゾル情報}) + (\text{分子散乱光})$$

$$Lt(x) = Lt_w(x) + 0 + Lt_m(x)$$

水質情報はクロロフィル-aのみとすると  $Lt_w(x) = Lt(\text{Chl-a}(x))$  で

$$Lt(x) = Lt(\text{Chl-a}(x)) + Lt_m(x) \quad \dots\dots(3)$$

(但し、 $Lt_m(x)$ ; 定数)

TM データと水質データとの関係は直線的である。水質は各バンド間では多重共線性のために重回帰式は不要で単回帰式となる。

**【Case2】****【Case2-1】**

$$(2) \text{式より } Lt(x) = Lt_w(x) + C(x) + Lt_m(x)$$

$$(Lt_w(x) = Lt(\text{Chl-a}(x)))$$

$$Lt(x) = (\text{クロロフィル-a 情報}) + ((\text{エアロゾル情報}) + (\text{分子散乱光}))$$

$$Lt(x) = Lt(\text{Chl-a}(x)) + (C(x) + Lt_m(x))$$

$$(但し、C(x)、Lt_m(x); 定数) \quad \dots\dots (4)$$

TM データと水質データとの関係は直線的である。水質は各バンド間では多重共線性のために重回帰式は不要で単回帰式となる。

但し、 $C(x)$ ; バンド  $x$  におけるセンサで観測されたエアロゾルの放射輝度値 (定数)

**【Case2-2】**

( $Lt_w(x) = Lt(\text{Chl-a}(x)) + Lt_{Tb}(x)$ ) であるから

$$Lt(x) = (\text{クロロフィル-a 情報}) + (\text{濁度情報}) + ((\text{エアロゾル情報}) + (\text{分子散乱光}))$$

$$Lt(x) = Lt(\text{Chl-a}(x)) + Lt_{Tb}(x) + (C(x) + Lt_m(x))$$

$$(但し、C(x)、Lt_m(x); 定数) \quad \dots\dots(5)$$

**【Case3】****【Case3-1】**

$$Lt(x) = Lt_w(x) + C(x) + Lt_m(x)$$

$$(Lt_w(x) = Lt(\text{Chl-a}(x)))$$

$$Lt(x) = (\text{クロロフィル-a 情報}) + ((\text{エアロゾル情報}) + (\text{分子散乱光}))$$

$$Lt(x) = Lt(\text{Chl-a}(x)) + (C(x) + Lt_m(x))$$

$$(但し、C(x)、Lt_m(x); 定数) \quad \dots\dots (6)$$

但し、エアロゾルが 0 の場合は

$$Lt(x) = Lt(\text{Chl-a}(x)) + Lt_m(x) \quad (\text{但し、} Lt_m(x); \text{定数}) \quad \dots\dots (7)$$

衛星データと水質データとの関係は直線的である。水質は各バンド間では多重共線性のために重回帰式は不要で単回帰式となる。

**【Case3-2】**

$$\begin{aligned}
 & (Ltw(x)=L_t(\text{Chl-a}(x)) + LfTb(x)) \text{ であるから} \\
 & Lt(x) = (\text{クロロフィル-a 情報}) + (\text{濁度情報}) + ((\text{エアロゾル情報}) + (\text{分子散乱光})) \\
 & Lt(x) = L_t(\text{Chl-a}(x)) + LfTb(x) + (C(x) + Ltm(x)) \cdots \cdots (8) \\
 & (\text{但し、} C(x)、Ltm(x); \text{定数})
 \end{aligned}$$

**【Case4】**

$$\begin{aligned}
 & Lt(x) = (\text{水質情報}) + (\text{エアロゾル情報}) + (\text{分子散乱光}) \\
 & Lt(x) = W(x) + Lta(x) + Ltm(x) \cdots \cdots (9) \\
 & (\text{但し、} W(x)、Ltm(x); \text{定数})
 \end{aligned}$$

衛星データとエアロゾルとの関係は直線的である。エアロゾル濃度は各バンド間では多重共線性のために重回帰式は不要で単回帰式となる。

但し、 $W(x)$ はバンド  $x$  における水質の放射輝度値 (定数)

**【Case5】**

$$\begin{aligned}
 & Lt(x) = (\text{クロロフィル-a 情報}) + (\text{濁度情報}) + (\text{エアロゾル情報}) + (\text{分子散乱光}) \\
 & Lt(x) = L_t(\text{Chl-a}(x)) + LfTb(x) + Lta(x) + Ltm(x) \cdots \cdots (10)
 \end{aligned}$$

衛星データは水質とエアロゾル両方の情報が含まれているが、TM の各バンドの水質とエアロゾル情報量の違いを利用して、水質情報を抽出する。

**【Case5-1】**

$$Ltw(x) = L_t(\text{Chl-a}(x))$$

濁度がクロロフィル-a を有するプランクトン由来かどうかについては、水質項目間の相関分析により把握できる。濁度とクロロフィル-a 濃度との相関が強く、クロロフィル-a 濃度と透明度の負の相関も強い場合には、濁度はプランクトン由来によるところが多いと推定される。

濁度がプランクトン由来による場合にはバンド  $x$  で観測される情報 ( $Lt(x)$ ) は

$$\begin{aligned}
 & Lt(x) = (\text{クロロフィル-a 情報}) + (\text{エアロゾル情報}) + (\text{分子散乱光}) \\
 & Lt(x) = L_t(\text{Chl-a}(x)) + Lta(x) + Ltm(x) \cdots \cdots (11)
 \end{aligned}$$

よって、

$$(\text{クロロフィル-a 情報}) = Lt(x) - (\text{エアロゾル情報}) - (\text{分子散乱光})$$

バンドxで観測される情報(Lt(x))は(クロロフィル-a情報)と(エアロゾル情報)の2変数からなっているから、統計的手法では、(クロロフィル-a情報)を目的変数として、2個以上の多重共線性のないバンドからなる重回帰分析で求めることが可能である。

### 【Case5-2】

この場合、水質項目間の相関分析において、濁度とクロロフィル-a濃度との相関が弱く、クロロフィル-a濃度と透明度の相関も弱く、濁度と透明度との負の相関は強い関係から、懸濁物質の影響が強いことが推定される。

$$\begin{aligned} Lt(x) &= (\text{クロロフィル-a情報}) + (\text{濁度情報}) + (\text{エアロゾル情報}) + (\text{分子散乱光}) \\ Lt(x) &= Lt(\text{Chl-a}(x)) + LtTb(x) + Lta(x) + Ltm(x) \quad \dots\dots(12) \end{aligned}$$

よって、

$$(\text{クロロフィル-a情報}) = Lt(x) - (\text{濁度情報}) - (\text{エアロゾル情報}) - (\text{分子散乱光})$$

バンドxは(クロロフィル-a情報)と(濁度情報)と(エアロゾル情報)の3変数からなっているから、統計的手法では、(クロロフィル-a情報)を目的変数として、3個以上の多重共線性のないバンドからなる重回帰分析で求めることが可能である。

(クロロフィル-a濃度推定値)と(クロロフィル-a実測値)との関係は、下記の通りである。

$$(\text{クロロフィル-a濃度推定値}) = (\text{クロロフィル-a実測値}) + (\text{地点・時間ずれによる誤差}) + (\text{懸濁物質残差} + \text{エアロゾル残差})$$

$$(\text{但し、クロロフィル-a濃度実測値}) = (\text{クロロフィル-a濃度}) + (\text{測定誤差})$$



## 5.4 LANDSAT/TM データを用いたクロロフィル-a 濃度推定

5.3 では、水質の状態により Case 区分し、東京湾の水質推定アルゴリズムを明らかにした。ここでは、まず、このアルゴリズムを用いたクロロフィル-a 濃度の推定アルゴリズムについて述べる。次にクロロフィル-a 濃度推定アルゴリズムに、実際の TM データを適用し、調査日別にクロロフィル-a 濃度を推定した。

### 5.4.1 水質推定アルゴリズムを用いたクロロフィル-a 濃度推定アルゴリズム

東京湾での観測結果では、濁度がクロロフィル-a と相関の強いプランクトン由来の場合が多く、ランドサット TM データを用いてクロロフィル-a を推定するためには、水尾ら<sup>8</sup>によりバンド 1 とバンド 4 の重回帰式が有効であることがわかっている。ここでは、バンド 1 とバンド 4 からなるクロロフィル-a 濃度推定アルゴリズムについて、5.3 の水質推定アルゴリズムを用いて示した。

バンド 1 で観測される情報を  $Lt(1)$  とすると

$$\begin{aligned} & \text{(バンド 1 で観測される情報)} \\ & = \text{(クロロフィル-a 情報)} + \text{(エアロゾル情報)} + \text{(大気分子散乱光)} \\ Lt(1) & = Lt(\text{Chl-a}(1)) + Lt(a(1)) + Ltm(1) \quad \dots\dots (1) \end{aligned}$$

同様に、バンド 4 で観測される情報を  $Lt(4)$  とすると

$$\begin{aligned} & \text{(バンド 4 で観測される情報)} \\ & = \text{(クロロフィル-a 情報)} + \text{(エアロゾル情報)} + \text{(大気分子散乱光)} \\ Lt(4) & = Lt(\text{Chl-a}(4)) + Lt(a(4)) + Ltm(4) \quad \dots\dots (2) \end{aligned}$$

但し、

$Lt(1)$  ; バンド 1 におけるセンサで観測された放射輝度値

$Lt(4)$  ; バンド 4 におけるセンサで観測された放射輝度値

$Lt(a(1))$  ; バンド 1 におけるセンサで観測されたエアロゾル散乱光の放射輝度値

$Lt(a(4))$  ; バンド 4 におけるセンサで観測されたエアロゾル散乱光の放射輝度値

$Ltm(1)$  ; バンド 1 におけるセンサで観測された分子散乱光の放射輝度値

$Ltm(4)$  ; バンド 4 におけるセンサで観測された分子散乱光の放射輝度値

$Lt(\text{Chl-a}(1))$  ; バンド 1 におけるセンサで観測されたクロロフィル-a の放射輝度値

$Lt(\text{Chl-a}(4))$  ; バンド 4 におけるセンサで観測されたクロロフィル-a の放射輝度値

(バンド 1 で観測される情報)と (バンド 4 で観測される情報)は目的変数

(クロロフィル-a 情報)と(エアロゾル情報)は従属変数

(大気分子散乱光)は定数

$\text{Log}(\text{Ch-a})$ はクロロフィル-a の 10 を底とした対数値

$$Lt(\text{Ch-a}(1))=r1 \cdot \text{Log}(\text{Ch-a}) \quad , \quad Lt(\text{Ch-a}(4))=r4 \cdot \text{Log}(\text{Ch-a})$$

但し、r1 はバンド 1 におけるクロロフィル-a 濃度の係数、r4 バンド 4 におけるクロロフィル-a 濃度の係数

$$Lt(a(4))=u4 \cdot A+e \quad , \quad Lt(a(1))=S \cdot Lt(a(4))+b \quad \text{とすると} \quad Lt(a(1))=S \cdot (u4 \cdot A+e) + b$$

但し、クロロフィル-a 濃度  $\text{Log}(\text{Ch-a})$  とエアロゾル濃度  $A (\mu\text{g}/\text{m}^3)$  は変数、u4 は A の係数、S は  $Lt(a(4))$  の係数、e と b は定数

$$Lt(1)= r1 \cdot \text{Log}(\text{Ch-a}) \quad + \quad S \cdot (u4 \cdot A+e) + b \quad + \quad Ltm(1) \quad \dots\dots (3)$$

$$Lt(4)= r4 \cdot \text{Log}(\text{Ch-a}) \quad + \quad u4 \cdot A+e \quad + \quad Ltm(4) \quad \dots\dots (4)$$

$$Lt(1)= r1 \cdot \text{Log}(\text{Ch-a}) \quad + \quad S \cdot u4 \cdot A \quad + \quad (S \cdot e+b \quad + \quad Ltm(1)) \quad \dots\dots (5)$$

$$Lt(4)= r4 \cdot \text{Log}(\text{Ch-a}) \quad + \quad u4 \cdot A \quad + \quad (e \quad + \quad Ltm(4)) \quad \dots\dots (6)$$

(6) 式両辺に S を乗じて、(5) 式を引くと

$$S \cdot Lt(4)- Lt(1)= (S \cdot r4-r1) \cdot \text{Log}(\text{Ch-a}) \quad + \quad (S \cdot Ltm(4)- Ltm(1)- b)$$

$S \cdot (r4-r1)>0$  または  $S \cdot (r4-r1)<0$  の場合

$$\text{Log}(\text{Ch-a})=Lt(4)/(r4-r1)- Lt(1)/(S \cdot (r4-r1))- (S \cdot Ltm(4)- Ltm(1)- b) / (S \cdot (r4-r1)) \quad \dots\dots (7)$$

以上より、クロロフィル-a ( $\text{Log}(\text{Ch-a})$ ) はバンド 4 ( $Lt(4)$ ) とバンド 1 ( $Lt(1)$ ) の 2 変数からなる回帰式で求まることがわかる。

(7) 式は、 $Lt(4)/(r4-r1)$  と  $Lt(1)/(S \cdot (r4-r1))$  でのバンド 4 とバンド 1 のクロロフィル-a の情報係数 ( $r4-r1$ ) とバンド 4 とバンド 1 の間のエアロゾル情報係数 S がクロロフィル-a ( $\text{Log}(\text{Ch-a})$ ) 推定式を左右することを示している。

クロロフィル-a が高濃度で溶存有機炭素 (DOC) が高いと仮定できる場合、クロロフィル-a とバンド 1、クロロフィル-a とバンド 4 は正の相関で、クロロフィル-a 情報がバンド 4 でバンド 1 の 2 倍近くある経験式より、 $r4 \approx 2 \cdot r1$  の関係があると仮定すると

$$\text{Log}(\text{Ch-a})=Lt(4)/r1-Lt(1)/(2S-1) \cdot r1+(Ltm(1)-S \cdot Ltm(4)+b)/(2S-1) \cdot r1 \quad \dots\dots(8)$$

クロロフィル-a が低濃度で溶存有機炭素 (DOC) が低いと仮定できる場合、クロロフィル-a 濃度とバンド 1 で負の相関、クロロフィル-a 濃度とバンド 4 で弱い正の相関が考えられ、 $r1<0$  で、 $1>r4>0$  の関係が見られると仮定すると

$$\text{Log}(\text{Ch-a})= \{S \cdot Lt(4)-Lt(1)+Ltm(1)-S \cdot Ltm(4)\} / (S \cdot r4-r1) \quad \dots\dots (9)$$

### 5.4.2 実測値を用いたクロロフィル-a 濃度推定値とケース区分

5.2.1(2) において、クロロフィル-a 濃度の平均値が  $24 \mu\text{g/l}$  以下の時期に対応する分布と  $13.5 \mu\text{g/l}$  以上の時期に対応する分布が見られたことから、 $24 \mu\text{g/l}$  以下の時期を低クロロフィル-a 濃度領域に、 $13.5 \mu\text{g/l}$  以上の時期を高濃度クロロフィル-a 濃度領域に分けて、クロロフィル-a 濃度の推定値を検討した。実測値の適用にあたっては、雲による影響があると推定される地点や透明度が高い時における水深の浅い地点などの異常値を除いた。

クロロフィル-a 濃度の推定は、5.4.1 のクロロフィル-a 濃度推定アルゴリズムに基づき、クロロフィル-a 濃度が高濃度時において求めたバンド4とバンド1からなる推定式\*<sup>8</sup>を全調査日に対して用いた。その上で、以下により実測値に近い推定式に調整した。

使用するクロロフィル-a 濃度推定式を

$$E\_Log(\text{Chl-a}) = a \times \text{バンド4} - b \times \text{バンド1} + c \dots (1) \quad (\text{但し } a, b \text{ は係数、} c \text{ は定数})$$

$$(\text{文献}^*8 \text{ より、} E\text{-LogChl-a} = 15.0376 * \text{RSB4} - 14.336 * \text{RSB1} + 4.6618)$$

実測値を目的変数として、上記式から求められた推定値を従属変数として単回帰式をもとめる。

$$\text{実測値 } \text{Log}(\text{Chl-a}) = \alpha \times E\_Log(\text{Chl-a}) + \gamma \dots (2) \quad (\text{但し、} \alpha \text{ は係数、} \gamma \text{ は定数})$$

(1) 式を (2) 式に代入すると、

$$\text{Log}(\text{Chl-a}) = \alpha \times (a \times \text{バンド4} - b \times \text{バンド1} + c) + \gamma$$

よって

$$\text{Log}(\text{Chl-a}) = \alpha \times a \times \text{バンド4} - \alpha \times b \times \text{バンド1} + (\alpha \times c + \gamma) \dots (3)$$

$\alpha \times a = A$  (係数)、 $\alpha \times b = B$  (係数)、 $\alpha \times c + \gamma = C$  (定数) とすると

(3) 式は

$$\text{Log}(\text{Chl-a}) = A \times \text{バンド4} - B \times \text{バンド1} + C$$

#### (1) 低クロロフィル-a 濃度領域についての検討

水質推定アルゴリズムの Case 区分を判断するために、表 5-12 に水質項目間の相関係数を示した。

表 5-12 調査日別水質項目間の相関

No	調査日	N	水温 バンド6	LogCh-a Tb	LogCh-a Tp	Tb Tp
1	870302	10	0.724		-0.920	
2	900222	9	0.647	0.140	0.019	-0.728
3	901105	10	0.795	0.568	-0.159	-0.159
4	950815	7	0.064	0.599	0.215	-0.032
5	970108	8	0.979	-0.668	0.470	-0.500
6	970414	5	0.574	0.939	-0.867	-0.984

7	990114	4	-0.942	0.797	-0.549	-0.214
8	000218	6	0.733	0.631	-0.893	-0.592

990114 のデータは SPM が  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  以上、他のデータについては SPM が  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  未満だった。クロロフィル-a 濃度とバンド1、バンド4、推定クロロフィル-a 濃度との関係を図 5-19~22 に示した。但し、推定クロロフィル-a 濃度は、8 シーンから導かれたバンド4 とバンド1 からなる推定式で算出した値である。表 5-13 にクロロフィル-a 実測値とバンド4、バンド1、クロロフィル-a 推定値との相関係数及び推定アルゴリズムの Case 区分を示す。あわせ、図 5-23 に示す推定パターンいずれに該当するかを示す。この推定パターンにより、バンド1 とバンド4 との重回帰分析の妥当性をチェックすることが可能である。

表 5-13 クロロフィル-a 実測値とバンド4、1、クロロフィル-a 推定値との相関

No	調査日	N	LogCh-a バンド4	LogCh-a バンド1	LogCh-a 推定値	パターン	Case 区分
1	870302	10	0.806	-0.181	0.754	3	3-1
2	900222	9	-0.266	-0.588	0.741	1	3-2
3	901105	10	-0.020	0.116	-0.126	2	5-2
4	950815	7	0.468	0.620	0.166	2	3-1
5	970108	8	-0.515	-0.828	0.593	1	3-1
6	970414	5	0.894	0.454	0.981	4	3-1
7	990114	4	0.428	-0.355	0.796	3	3-1
8	000218	6	-0.479	-0.756	0.651	1	3-1

水質推定アルゴリズム Case 区分からは、8 調査日のうち Case 区分 3-1 の濁度もクロロフィル-a に起因する場合は 6 回見られ、Case 区分 3-2 に該当するのが 1 回、Case 5-2 に該当するのが 1 回見られた。クロロフィル-a、バンド4、バンド1 との推定パターンは、図 5-23 に示すパターン 1 が 3 回、パターン 2 が 2 回、パターン 3 が 2 回、パターン 4 が 1 回見られた。

901105 についてはバンド3 とバンド2 とバンド5 からなる重回帰式 ( $r^2=0.656$ ) を用いることによって推定が可能である。

950815 については多重共線性により相関は弱くなるため、単回帰式で推定せざるを得ない。

## (2) 高クロロフィル-a 濃度領域についての検討

低クロロフィル-a 濃度領域の場合と同様に、表 5-14 水質項目間の相関係数を示した。濁度がプランクトンに起因する調査日が 14 調査日中、12 回見られた。

表 5-14 調査日別水質項目間の相関

No	調査日	N	水温 バンド6	LogCh-a Tb	LogCh-a Tp	Tb Tp
1	860806	7	0.793		-0.852	
2	890814	8	0.434	0.961	-0.634	-0.545

3	900222	9	0.647	0.140	0.019	-0.728
4	900427	10	0.304	0.938	-0.582	-0.653
5	900529	8	0.662	0.614	-0.353	-0.759
6	920603	9	0.526	0.954	-0.558	-0.676
7	930521	22	0.747	0.851	-0.851	-0.685
8	930910	5	0.709	0.966	-0.163	-0.198
9	940422	5	0.275	0.771	-0.960	-0.761
10	950815	7	0.064	0.599	0.215	-0.032
11	000218	6	0.733	0.631	-0.893	-0.592
12	000524	13	0.717	0.888	-0.935	-0.855
13	000711	13	0.582	0.686	-0.530	-0.238
14	000828	9	0.600	0.693	-0.559	-0.738

図 5-24～27、表 5-15 にクロロフィル-a 濃度とバンド 1、バンド 4、推定クロロフィル-a 濃度との関係、推定パターン及び推定アルゴリズムの Case 区分を示した。但し、クロロフィル-a 濃度推定値はバンド 4 とバンド 1 からなる推定式で算出した値である。

表 5-15 クロロフィル-a 実測値とバンド 4、1、クロロフィル-a 推定値との相関

No	調査日	N	LogCh-a バンド 4	LogCh-a バンド 1	LogCh-a 推定値	パターン	Case 区分
1	860806	7	0.819	0.778	0.819	4	1
2	890814	8	0.243	-0.105	0.761	3	5-1
3	900222	9	-0.266	-0.588	0.741	1	3-2
4	900427	10	0.093	-0.378	0.731	3	5-1
5	900529	8	0.811	0.640	0.836	4	5-1
6	920603	9	0.717	0.509	0.839	4	5-1
7	930521	22	0.106	-0.393	0.616	3	5-1
8	930910	5	0.725	0.865	-0.417	2	2-1
9	940422	5	0.070	-0.365	0.822	3	5-1
10	950815	7	0.468	0.620	0.166	2	3-1
11	000218	6	-0.479	-0.756	0.651	1	3-1
12	000524	13	0.784	0.802	0.379	2	2-1
13	000711	13	0.484	0.260	0.161	2	5-1
14	000828	9	0.142	-0.421	0.825	1	5-1

表 5-15 の水質推定アルゴリズムの Case 区分からは、14 調査日中、Case1 は 860806 だけであり、Case2-1 は 930910 と 000524 の 2 調査日で、Case3-1 が 950815 と 000218 の 2 調査日、Case3-2 は 900222、Case5-1 の、エアロゾルの影響があり濁度がクロロフィルに起因する場合は、8 調査日に見られた。クロロフィル a とバンド 4、バンド 1、推定値パターンでは、図 5-23 に示すパターン 1 は 900222、000218、000828 の 3 調査日で見られた。パターン 2 は、930910、950815、000524、000711 の 4 調査日、パターン 3 は 980814、900427、930521、940422 の 4 調査日、パターン 4 は 860806、900529、920603 の 3 調査日で見られた。

900222 と 950815 のデータは平均クロロフィル-a 濃度  $13.5 \mu\text{g/l}$  ～  $24 \mu\text{g/l}$  の範囲であるために低濃度領域と重複して載せてある。930910、950815 と 000524 は多重共線性のために単バンド

でクロロフィル-aを推定せざるを得ない結果となっている。950815のSPM濃度は $21.3\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、000524のSPM濃度は $27.7\mu\text{g}/\text{m}^3$ と低い値なので、単バンド推定時におけるエアロゾルの影響は無視できるのではと考える。

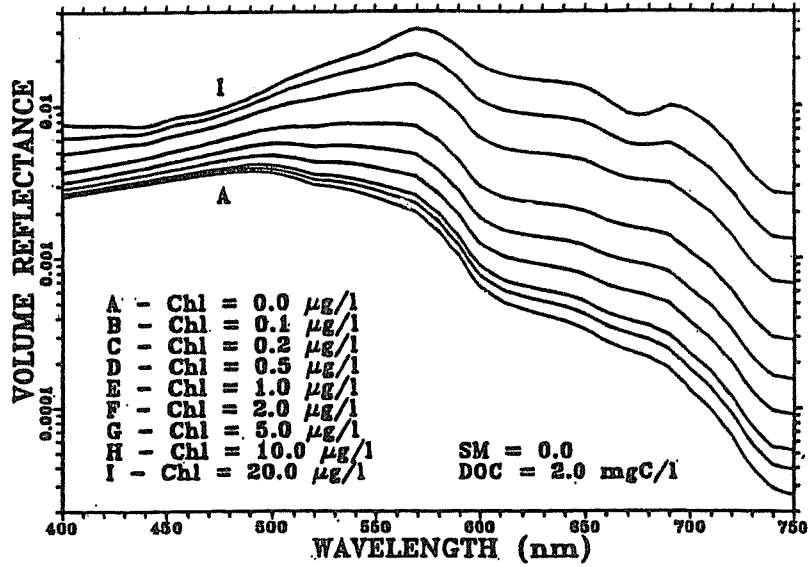


図 5-17 クロロフィル a 濃度と光学的反射量との関係  
 溶存有機炭素が 2mg/l、SM 物質が 0 の時  
 (Bukata らの図を引用)

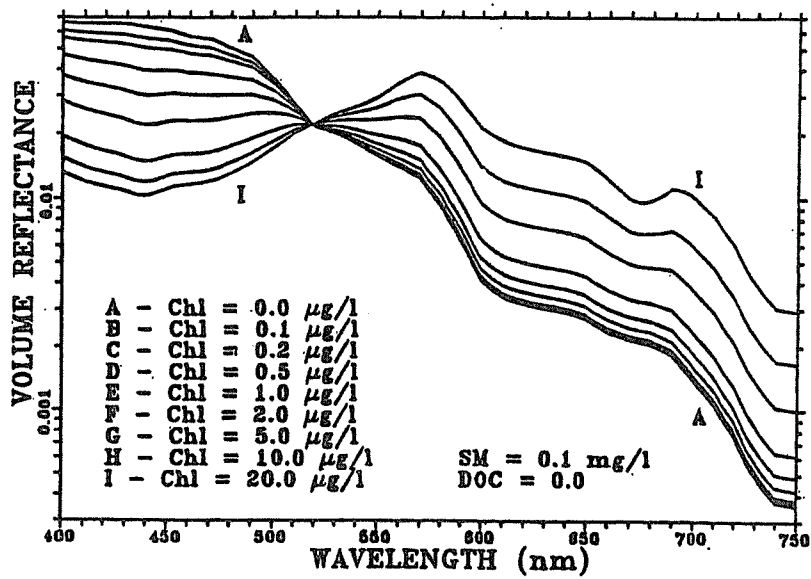


図 5-18 クロロフィル a 濃度と光学的反射量との関係  
 溶存有機炭素が 0、SM 物質が 0.1mg/l の時  
 (Bukata らの図を引用)

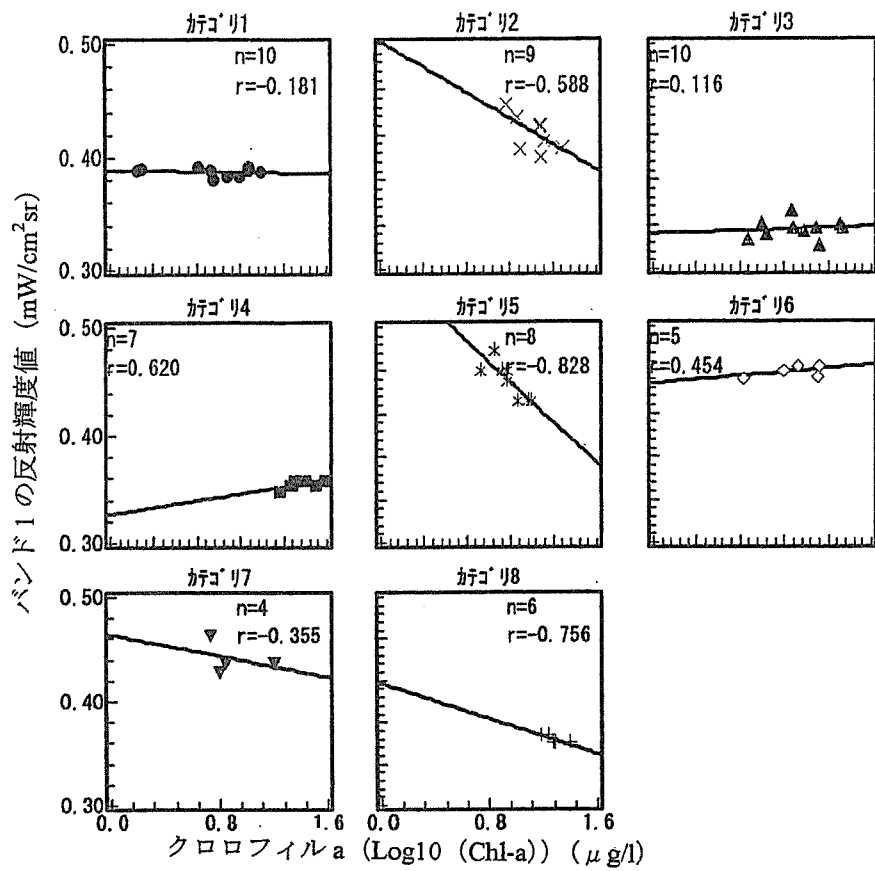


図 5-19 クロロフィル a とバンド 1 との関係  
(低濃度クロロフィル a サンプル)

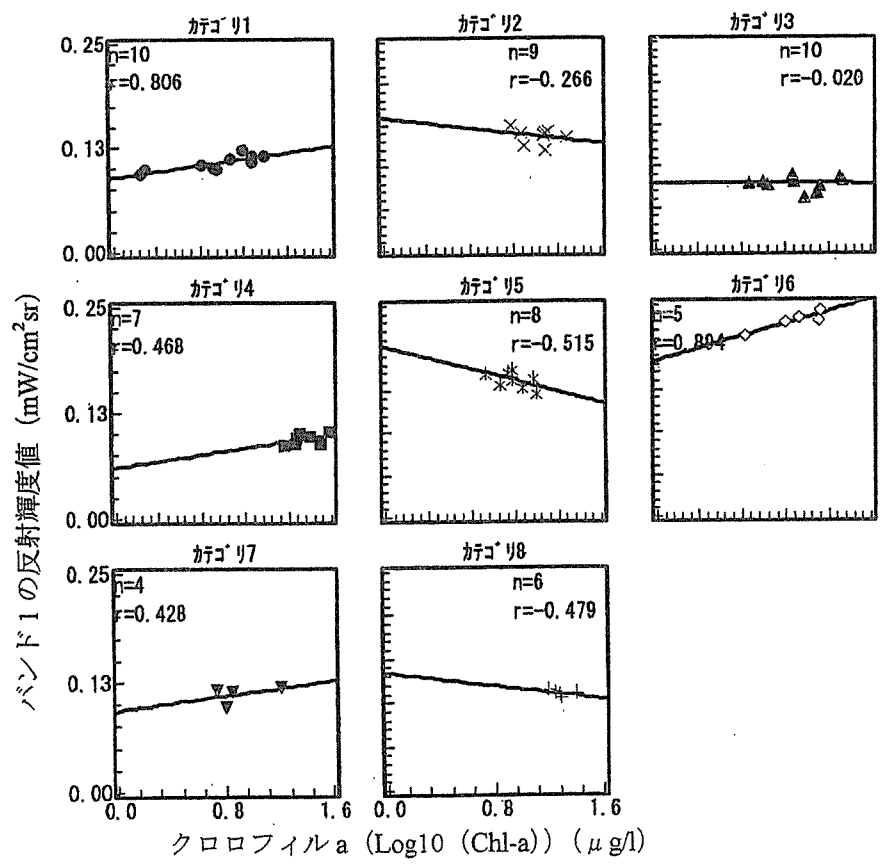


図 5-20 クロロフィル a とバンド 4 との関係  
(低濃度クロロフィル a サンプル)



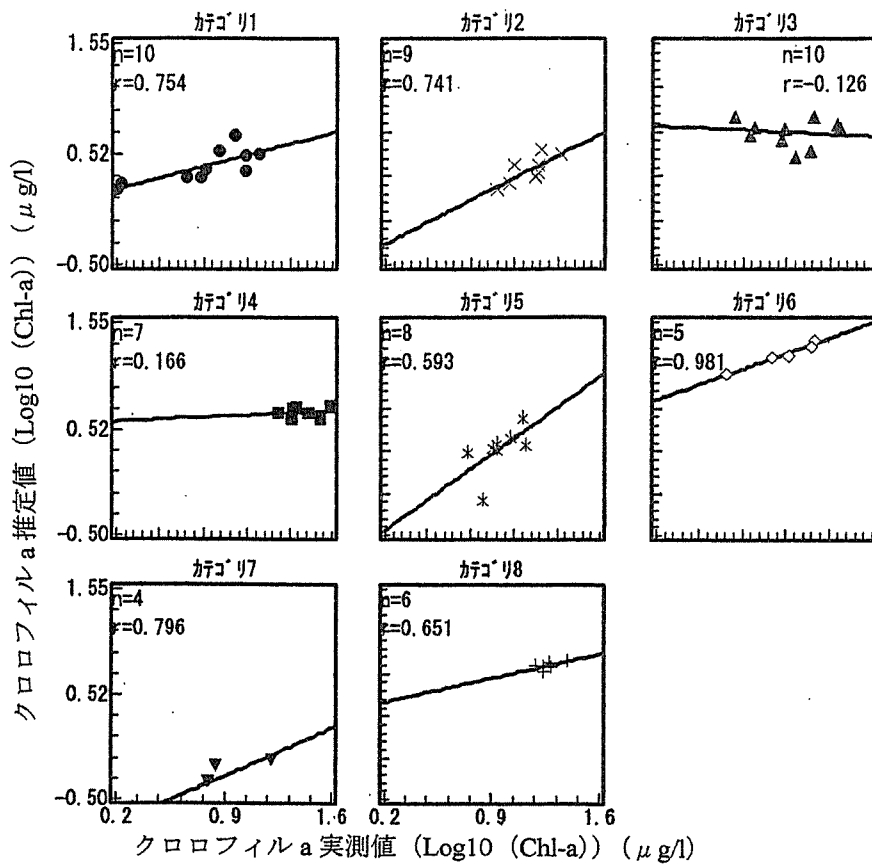


図 5-21 クロロフィル a 実測値とクロロフィル a 推定値との関係  
(低濃度クロロフィル a サンプル、シーン別)

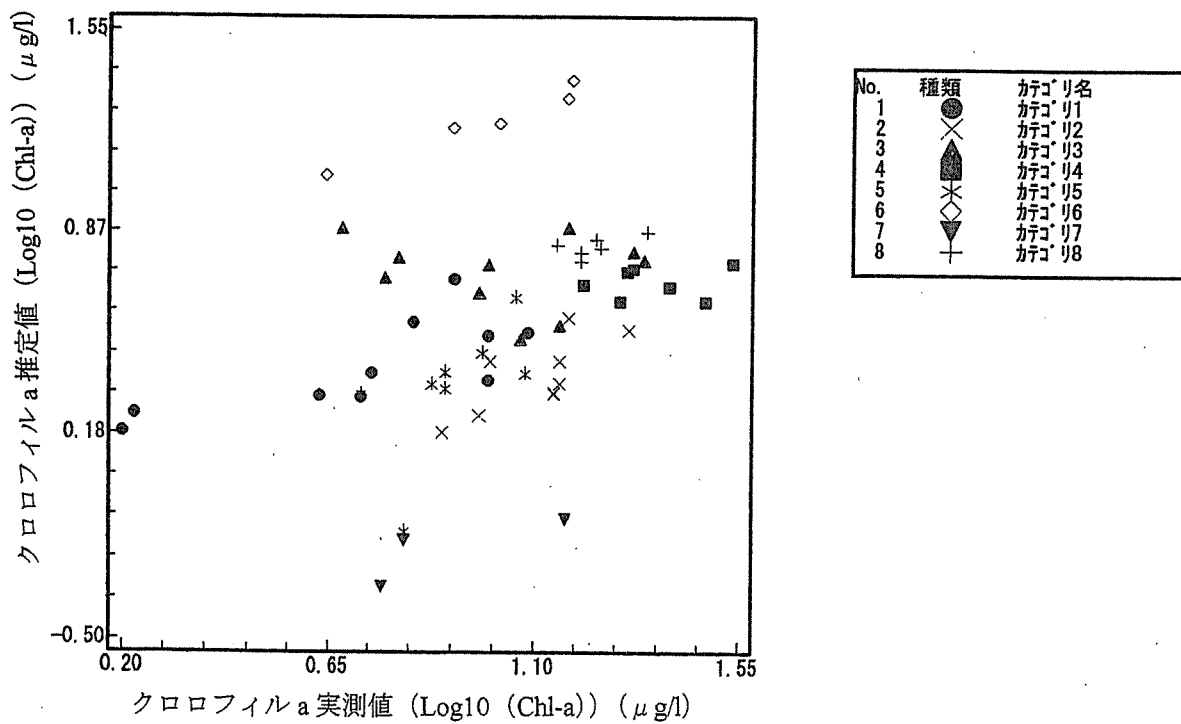


図 5-22 クロロフィル a 実測値とクロロフィル a 推定値との関係  
(低濃度クロロフィル a サンプル)

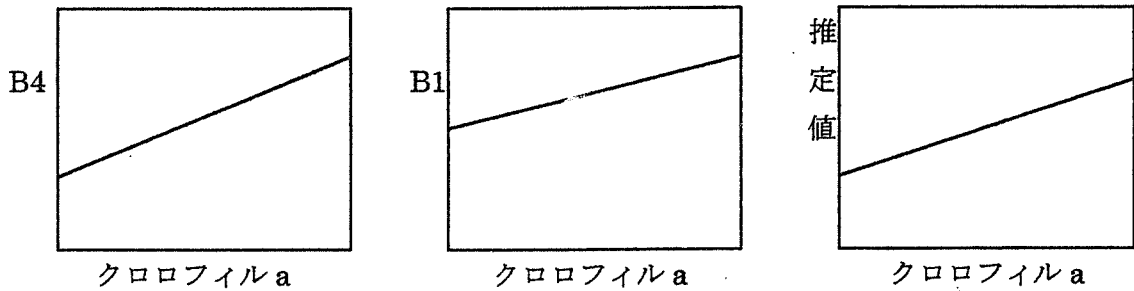
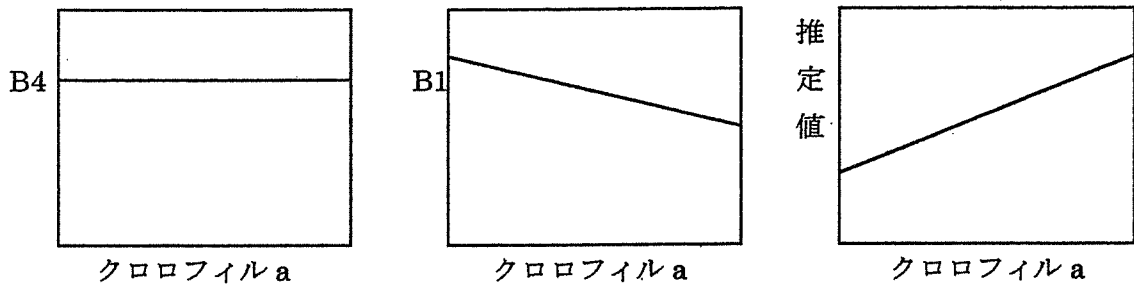
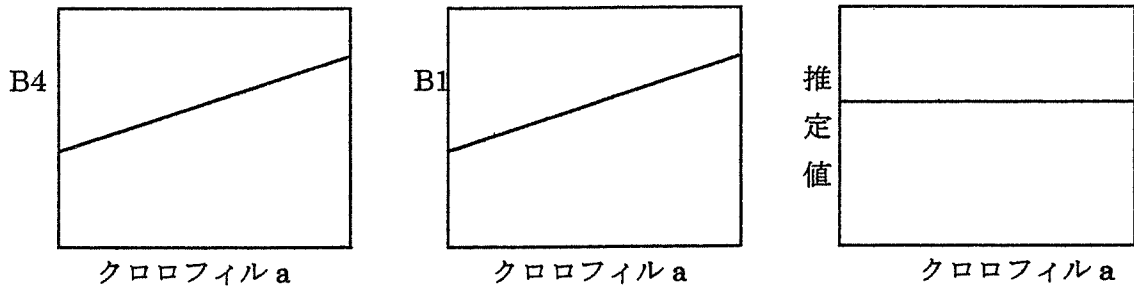
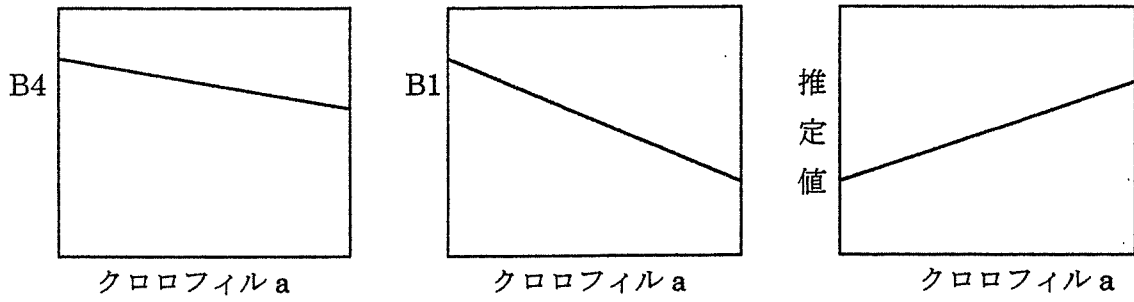


図 5-23 クロロフィル a 濃度推定パターン

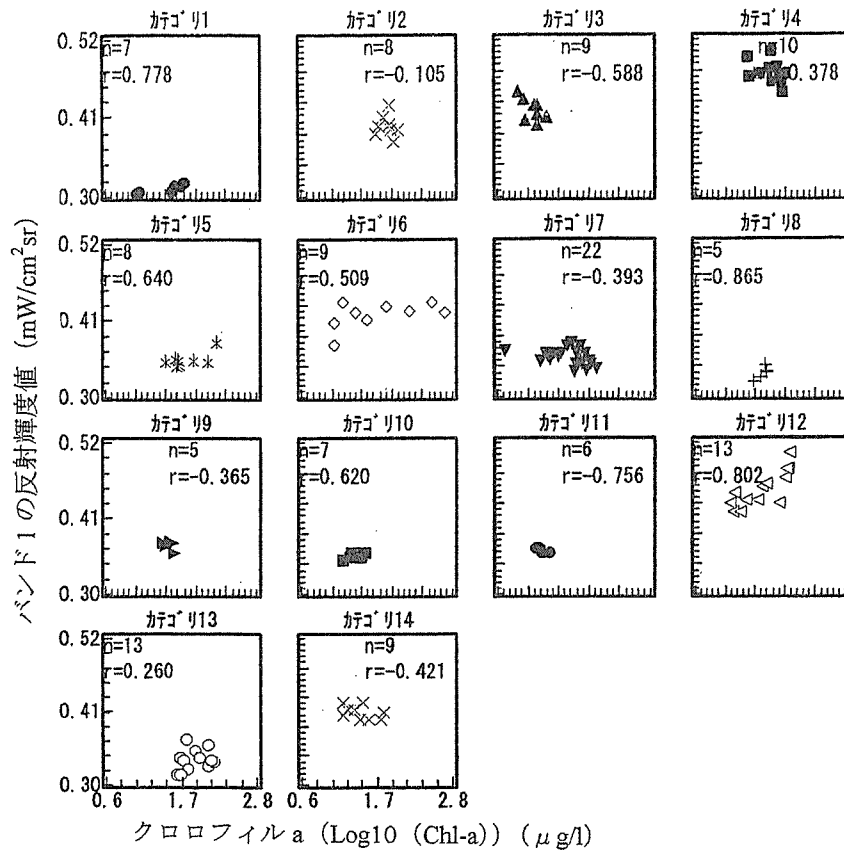


図 5-24 クロロフィル a とバンド 1 との関係  
(高濃度クロロフィル a サンプル)

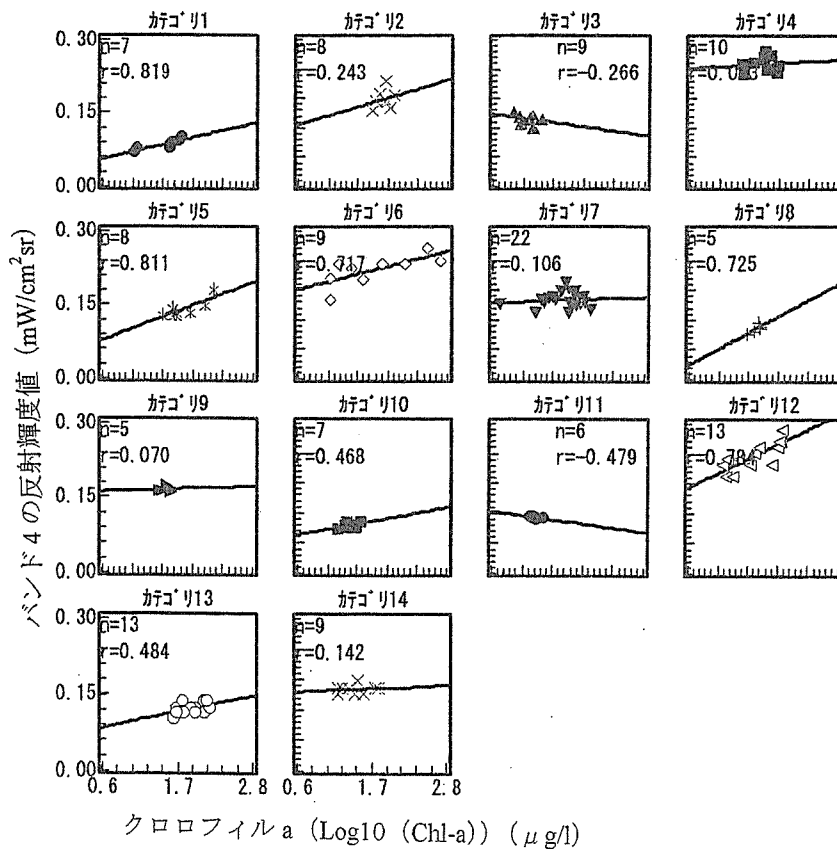


図 5-25 クロロフィル a とバンド 4 との関係  
(高濃度クロロフィル a サンプル)

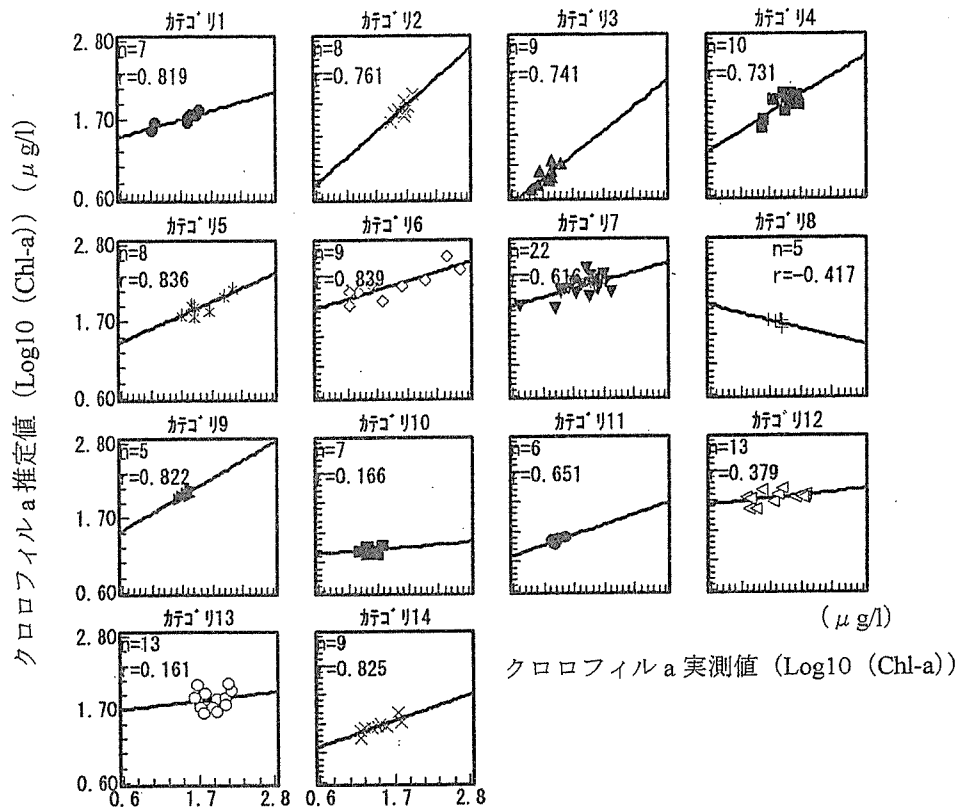


図 5-26 クロロフィル a 実測値とクロロフィル a 推定値との関係  
(高濃度クロロフィル a サンプル、シーン別)

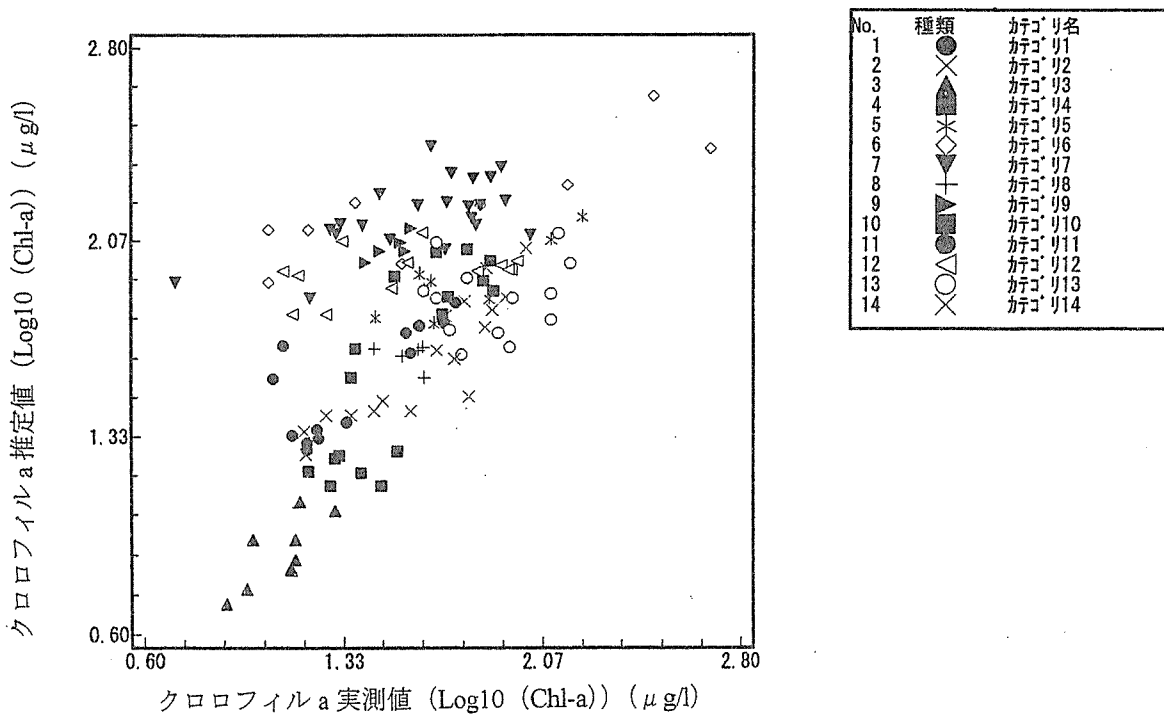


図 5-27 クロロフィル a 実測値とクロロフィル a 推定値との関係  
(高濃度クロロフィル a サンプル)

### 5.4.3 クロロフィル-a 濃度推定アルゴリズムと大気補正との関係（参考）

バンド4とバンド1の差演算からなるクロロフィル-a濃度推定アルゴリズムは、クロロフィル-a濃度の情報を抽出するとともに、大気中のエアロゾルの影響を効果的に補正できるという経験則を水尾らは利用しているが、このことを証明するには、バンド4とバンド1それぞれに対して大気補正をおこない、補正後のバンド4とバンド1の差演算の結果においてクロロフィル-a情報が顕著になることを示す必要がある。そのためには、有効な大気補正式が必要となる。今回エアロゾルの指標としてSPMのデータで検討した。SPMのデータが横浜沿岸部の測定値であることから、横浜側のLANDSAT/TMデータを用いて、重回帰分析の変数増減法ではめの良い回帰式を選択した結果、バンド4とバンド7の差演算からなる式が以下の通り導かれた。図5-28にこの式から得られた推定値E<sub>SPM</sub>と実測値の散布図を示した。

$$E_{\text{SPM}} = 656.234 \times \text{RSB4} - 4365.722 \times \text{RSB7} - 23.900 \quad (N=20, r = 0.825, r^2 = 0.644)$$

この関係式を用いて、全データについてSPM推定値求めた。このSPM推定値をバンド1及びバンド4それぞれの輝度値に変換し、その推定値を差し引くことにより、バンド1及びバンド4を補正した。TMとSPMとの関係式については、水尾らが経験的に得たものを用いた。

バンド1とSPMとの関係式

$$\text{RSB1} = 0.00184 \times (\text{SPM 推定値}) + 0.289$$

(クロロフィル-a+大気分子散乱光)

バンド1からSPMを除去する

$$\text{B1の推定クロロフィル-a} = \text{RSB1} - 0.00184 \times (\text{SPM 推定値}) - (\text{大気分子散乱光})$$

バンド4とSPMとの関係式

$$\text{RSB4} = 0.00180 \times (\text{SPM 推定値}) + 0.071$$

(クロロフィル-a+大気分子散乱光)

バンド4からSPMを除去する

$$\text{B4の推定クロロフィル-a} = \text{RSB4} - 0.00180 \times (\text{SPM 推定値}) - (\text{大気分子散乱光})$$

クロロフィル-aと補正バンド1とは、弱い負の相関 ( $r = -0.467$ ) で、図5-29、30の散布図に示すようにクロロフィル-a濃度が増加すると、クロロフィル-aの吸収が増加することにより、反射輝度値が減少する傾向を示した。バンド1の波長域 (450nm~520nm) はクロロフィルの吸収帯であり、光学的な面からも一致する。

クロロフィル-aと補正バンド4とは、弱い正の相関 ( $r = 0.253$ ) で、図5-31、32の散布図に示すように、クロロフィル-a濃度が増加すると、バンド4の反射輝度値が増加する傾向を示した。バンド4の波長域 (760nm~900nm) は溶存有機炭素が少ないような低クロロフィル濃度水域では、水質情報が少なく、溶存有機炭素が多いような水域では反射が増す関係であり、そのために強い正の相関が得られなかったと推定される。

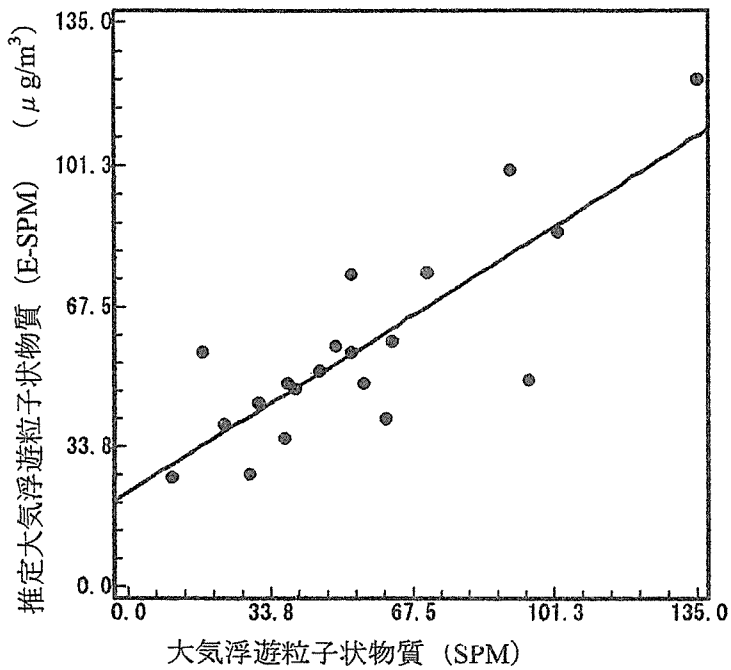
#### クロロフィル-a 推定値

＝バンド4の推定クロロフィル-a－バンド1の推定クロロフィル-a

$$= \{RSB4 - 0.00180 \times (\text{SPM 推定値})\} - \{RSB1 - 0.00184 \times (\text{SPM 推定値})\} + \text{定数}$$

バンド4の推定クロロフィル-aからバンド1の推定クロロフィル-aを差し引いて求められたクロロフィル-a推定値とクロロフィル-a実測値を比較すると、図5-33、34の散布図に示すように、正の相関（ $r=0.674$ ）が得られた。一方、前項までのバンド4とバンド1の差演算からなるクロロフィル-a濃度推定式を用いて全サンプルの推定値を算出し実測値と比較した結果、ほぼ同様の正の相関値（ $r=0.675$ ）が得られた。

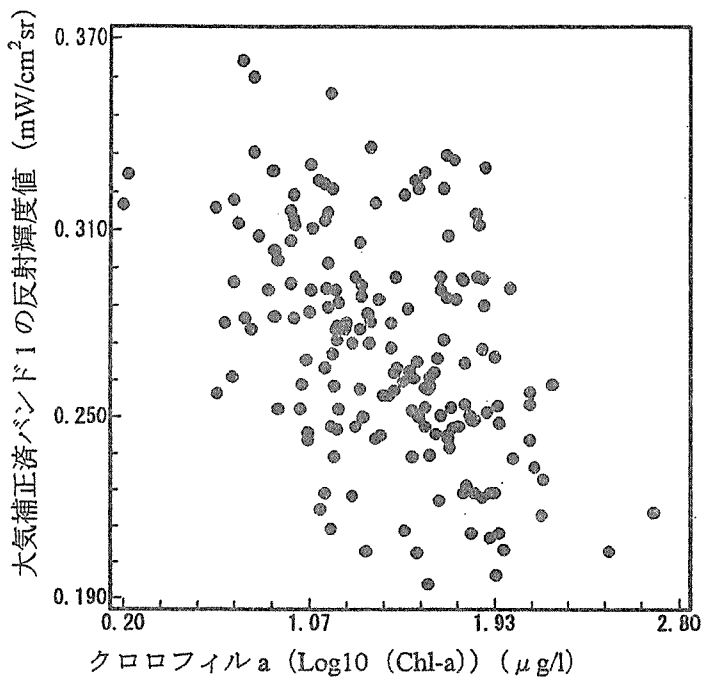
バンド4、バンド1それぞれからSPMを補正した場合と、SPM補正を考慮しない前項までの差演算式とで近い結果が得られたことから、バンド4とバンド1からなるクロロフィル-a濃度推定アルゴリズムの有効性が明らかになった。SPMの推定式が普遍性を有しているならば、SPMの推定式を用いたクロロフィル-a濃度の推定アルゴリズムも可能と思われ、今後の検討課題である。



項目	横軸	縦軸
変数番号	10	26
変数名	SPM	E-SPM
データ数	20	20
最小値	11.000	26.646
最大値	135.000	121.671
平均値	55.1190	57.6613
標準偏差	31.11757	23.88953
相関係数	0.825	
t値	6.190	
回帰定数	22.758	
回帰係数1次	0.633	

回帰式 :  $Y = 22.757611 + 0.633243X$

図 5-28 大気浮遊粒子状物質 (SPM) と推定大気浮遊粒子状物質 (E-SPM) との関係



項目	横軸	縦軸
変数番号	5	12
変数名	Log10(Ch_a)	B1-EspmB1
データ数	172	172
最小値	0.204	0.195
最大値	2.685	0.363
平均値	1.4360	0.2725
標準偏差	0.41832	0.03593
相関係数	-0.467	

図 5-29 クロロフィル a (Log10 (Chl-a)) と大気補正済バンド 1 との関係 (全サンプル)

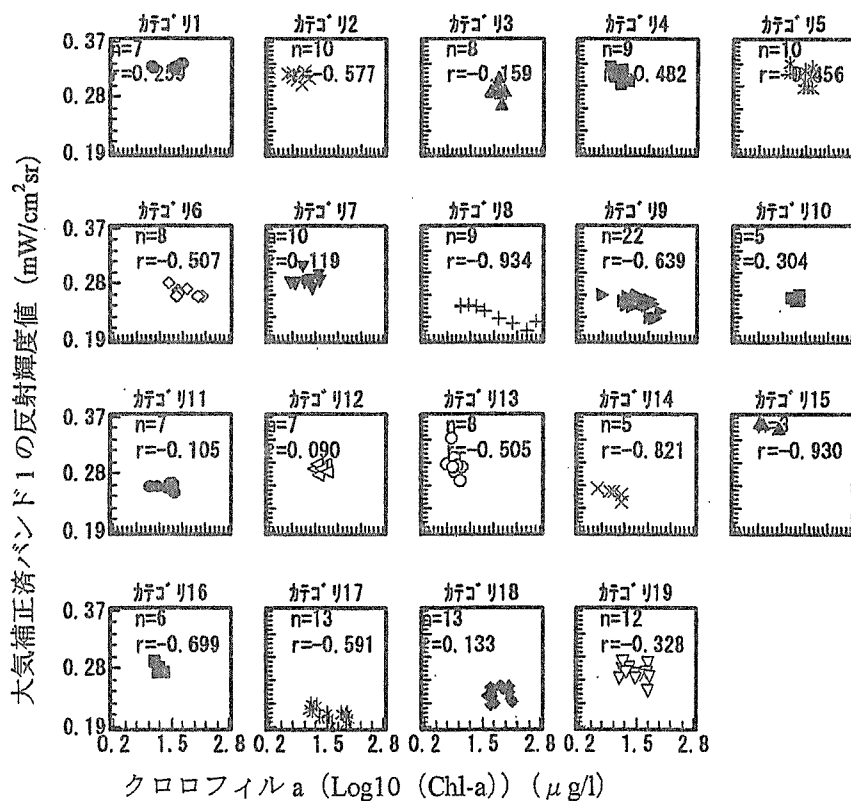
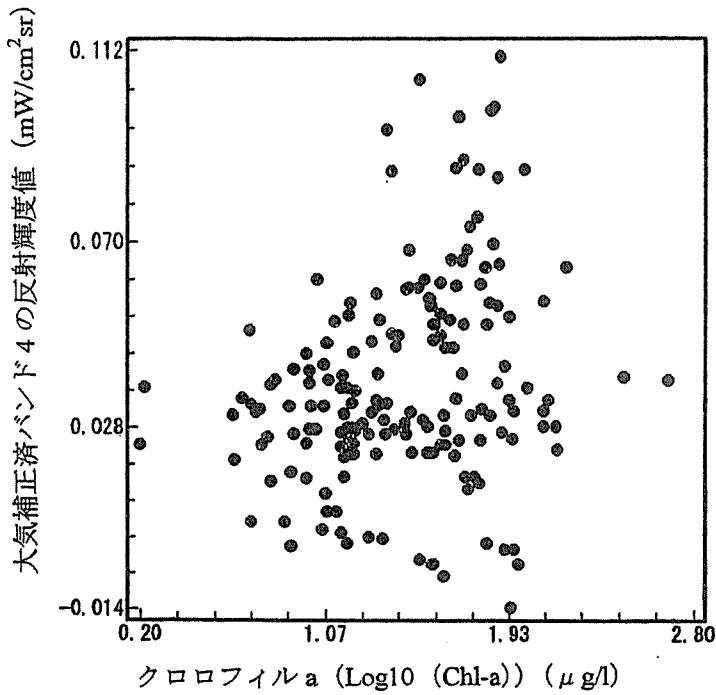


図 5-30 クロロフィル a (Log10 (Chl-a)) と大気補正済バンド 1 との関係 (各シーン別)





項目	横軸	縦軸
変数番号	5	14
変数名	Log10(Ch_a)	B4-EspmB4
データ数	172	172
最小値	0.204	-0.013
最大値	2.685	0.111
平均値	1.4360	0.0384
標準偏差	0.41832	0.02350
相関係数	0.253	

図 5-31 クロロフィル a (Log10 (Chl-a)) と大気補正済バンド 4 との関係 (全サンプル)

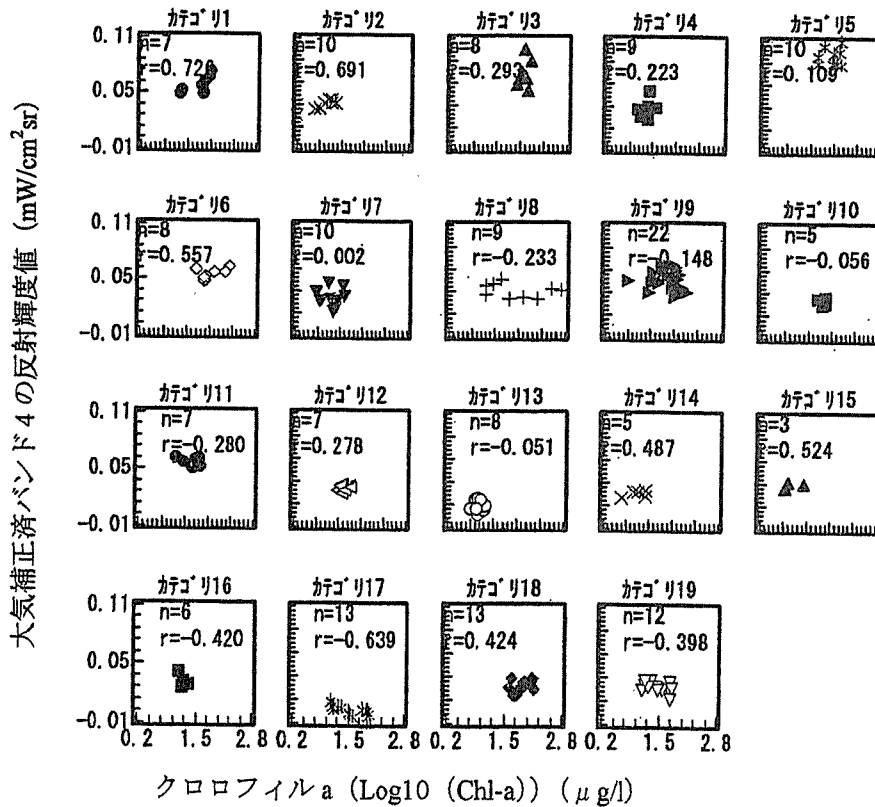
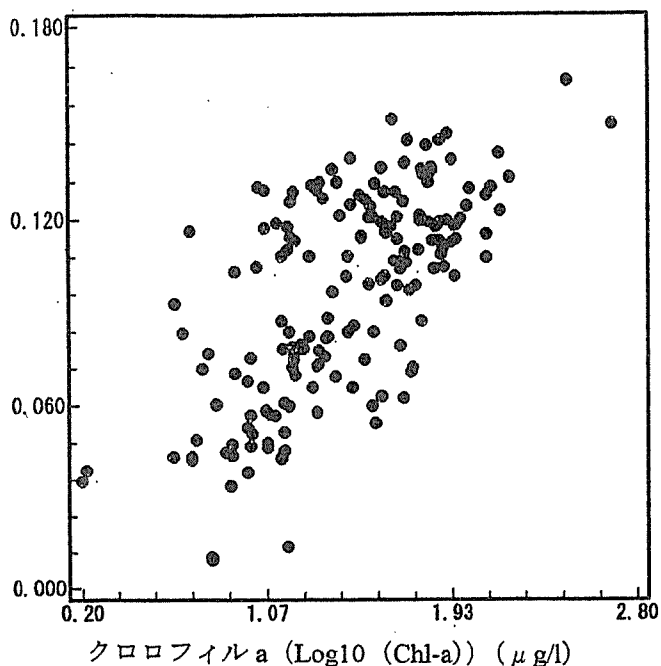


図 5-32 クロロフィル a (Log10 (Chl-a)) と大気補正済バンド 4 との関係 (各シーン別)

大気補正済バンド4 - バンド1の反射輝度値 (mW/cm<sup>2</sup>sr)



項目	横軸	縦軸
変数番号	5	16
変数名	Log10 (Ch_a)	EB4ho-EB1ho
データ数	172	172
最小値	0.204	-0.000
最大値	2.685	0.164
平均値	1.4360	0.0959
標準偏差	0.41832	0.03370
相関係数	0.674	

図 5-33 クロロフィル a (Log10 (Chl-a)) と大気補正済バンド 4-1 データとの関係 (全サンプル)

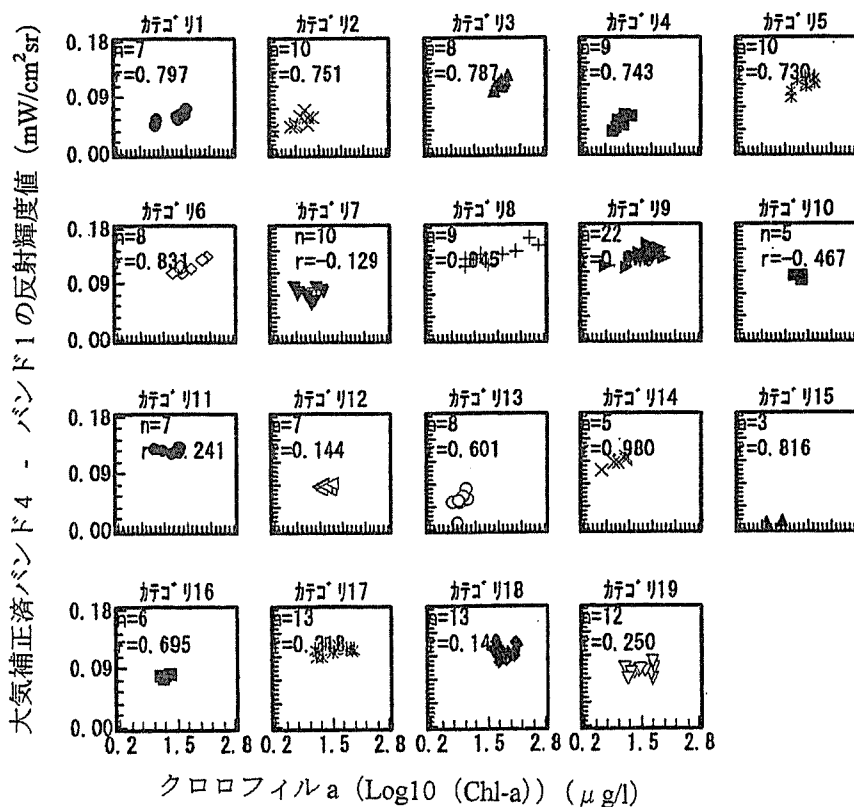


図 5-34 クロロフィル a (Log10 (Chl-a)) と大気補正済バンド 4-1 データとの関係 (各シーン別)

## 5.5 LANDSAT/TM データによる水質推定手順と水質推定式

### 5.5.1 水質推定手順

観測日毎の水質推定式を以下の手順に沿って求めた。

#### (1) データ異常値の除去

雲の影響や、水深に比べ透明度の高い地点の有無などについて、確認し、異常値を除く。

雲の影響がある場合には、バンド6の放射輝度は雲の影響がない地点に比べて低く、バンド1～バンド4の反射輝度は、雲の影響がない地点に比べて高いので、雲の範囲が識別可能である。

#### (2) SPM 濃度チェック

SPM が  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  以上の場合、更に大気中の SPM 濃度分布に変動があると水質推定に影響を及ぼすことが予想されるため、SPM が  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  以上のデータかどうかチェックする。

#### (3) クロロフィル-a 濃度領域の振り分け

実測データより、クロロフィル-a 濃度が低濃度領域と高濃度領域のいずれに区分されるかを識別する。

#### (4) 水質項目間の相関分析

濁度とクロロフィル-a 濃度との相関について調べる。濁度とクロロフィル-a 濃度との相関が強い場合は、濁度はクロロフィル-a を含有するプランクトン由来であり、相関が弱い場合には、クロロフィル-a を含有しないプランクトンや懸濁物質の影響が考えられる。

#### (5) 最適な水質推定式の作成

水温は、水温の実測値とバンド6との関係をベースにして、回帰分析により推定式を求める。

クロロフィル-a 濃度及び透明度は、5.4.2 の(3)式より推定し、実測値に近づけるための再補正をおこなう。なおクロロフィル-a 濃度については、東京湾における簡易水質推定アルゴリズムのどの Case に該当するか、どの分布パターンに該当するかを確認し、その上で水質推定式を作成する。透明度についても同様に行う。

濁度は、重回帰分析により、最適な回帰式を求める。

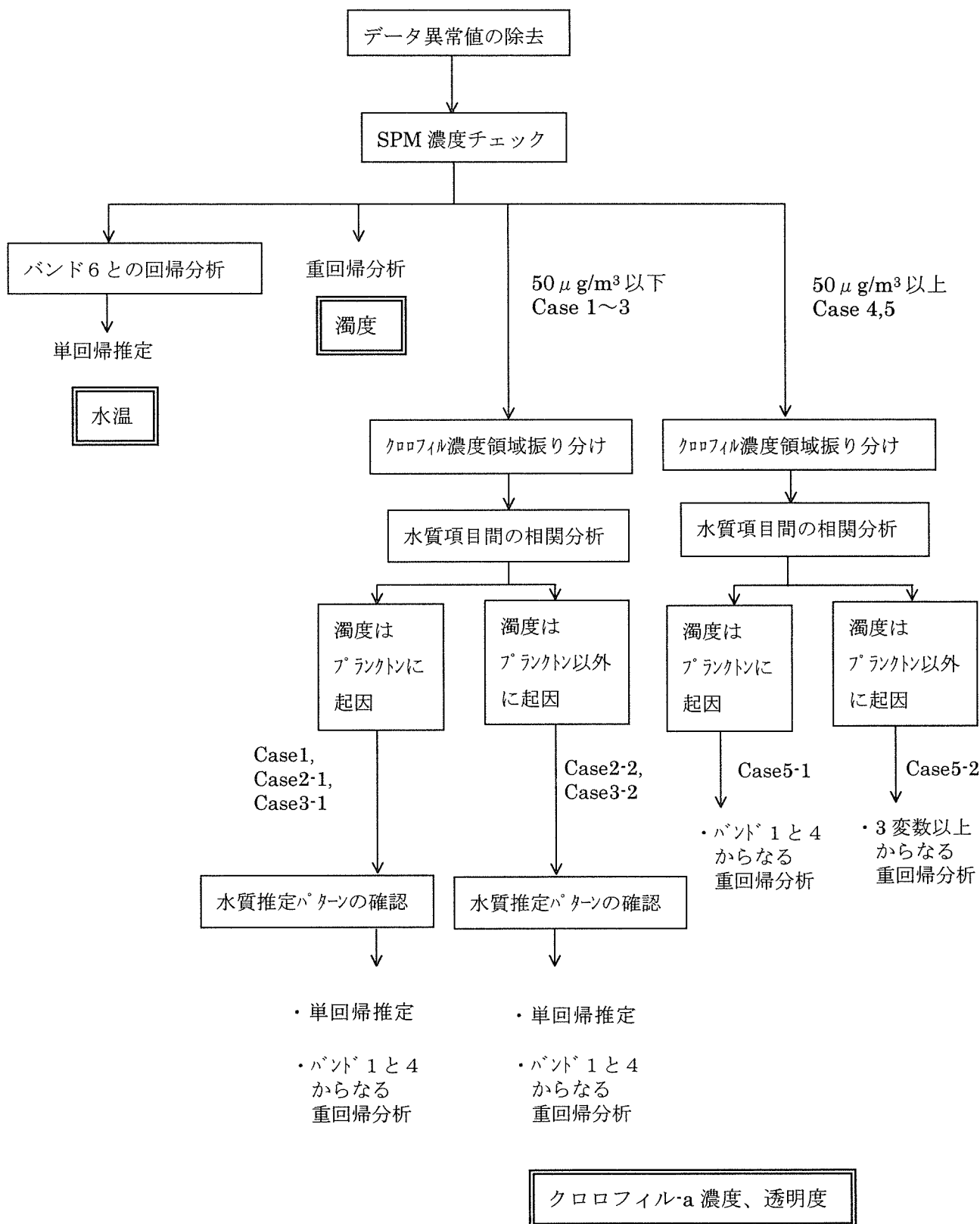


図 5-35 水質（水温、クロロフィル-a 濃度、濁度、透明度）推定フロー

## 5.5.2 水質推定式と推定画像一覧

水質推定式と推定画像一覧は以下の通りである。

ここで用いている RSB1、RSB2、RSB3、RSB4、RSB5、RSB7 は太陽高度角補正済みで絶対輝度値変換済みのデータを示す。RB6 は絶対輝度値補正済みのデータを示す。また、 $r$  は相関係数、 $r^2$  は自由度調整寄与率を表す。

### (1) 低濃度クロロフィル-a 試料の水質推定式

#### 1 水質推定式 87.03.02 (画像 5-1)

水温(Water temperature)

$$26.5254 * RB6 - 16.9231 \quad (r = 0.724)$$

クロロフィル-a(Chlorophyll-a)濃度 1 式

$$18.6994 * RSB4 - 26.6428 * RSB1 + 9.07 \quad (r = 0.709)$$

クロロフィル-a 濃度 2 式

$$27.578 * RSB4 - 2.197 \quad (r = 0.800)$$

クロロフィル-a 濃度 3 式

$$14.927 * RSB4 + 31.14 * RSB3 - 5.024 \quad (r^2 = 0.769)$$

クロロフィル-a 濃度 4 式

$$28.262 * RSB4 + 40.464 * RSB3 - 217.326 * RSB7 - 7.165 \quad (r^2 = 0.804)$$

SS(Suspended substance)

欠測

透明度(Transparency) 1 式

$$53.995 * RSB1 - 44.891 * RSB4 - 139.251 * RSB2 + 29.273 \quad (r^2 = 0.583)$$

透明度 2 式

$$40.114 - 270 * RSB3 \quad (r = 0.951)$$

#### 2 水質推定式 90.02.22

水温

$$47.8630 * RB6 - 3.7352 \quad (r = 0.675)$$

クロロフィル-a 濃度

$$11.716 * RSB4 - 10.639 * RSB1 + 3.991 \quad (r = 0.742)$$

SS

$$43.72 * RSB2 - 35.078 * RSB1 + 3.509 \quad (r^2 = 0.567)$$

透明度

$$29.111 * RSB1 - 28.72 * RSB2 + 0.505 \quad (r^2 = 0.587)$$

#### 3 水質推定式 90.11.05 (画像 5-2)

水温

$$12.5919 * RB6 + 6.9363 \quad (r = 0.795)$$

クロロフィル-a 濃度

$$54.023 * RSB3 - 18.463 * RSB2 - 59.953 * RSB5 + 0.055 \quad (r^{*2}=0.656)$$

SS

$$90.267 * RSB4 - 45.44 * RSB2 - 195.145 * RSB5 + 7.572 \quad (r^{*2}=0.448)$$

透明度

$$9.104 - 10.08 * RSB1 - 41.81 * RSB4 \quad (r^{*2}=0.252)$$

**4 水質推定式 95.08.15** 高濃度クロロフィル-a 試料の水質推定式に記載

**5 水質推定式 97.01.08** (画像 5-3)

水温

$$91.4585 * RB6 - 68.2046 \quad (r = 0.979)$$

クロロフィル-a 濃度

$$3.8538 * RSB4 - 5.4909 * RSB1 + 2.7704 \quad (r = 0.708)$$

濁度、透明度は欠測

**6 水質推定式 97.04.14** (画像 5-4)

水温

$$40.2535 * RB6 - 22.6879 \quad (r = 0.574)$$

クロロフィル-a 濃度 1 式

$$28.9673 * RSB4 - 41.2725 * RSB1 + 13.267 \quad (r = 0.946)$$

クロロフィル-a 濃度 2 式

$$27.242 * RSB4 - 27.624 * RSB1 + 7.403 \quad (r^{*2}=0.926)$$

濁度 (Turbidity)

$$59.767 * RSB2 - 64.627 * RSB1 + 8.7271 \quad (r = 0.996)$$

透明度 1 式

$$45.218 * RSB1 - 20.8598 * RSB4 - 25.0298 * RSB2 - 4.5697 \quad (r = 0.943)$$

透明度 2 式

$$13.028 - 29.53 * RSB2 \quad (r = 0.937)$$

**7 水質推定式 99.01.14** (画像 5-5)

水温  
推定困難

クロロフィル-a 濃度

$$35.898 * RSB4 - 51.276 * RSB1 + 19.2021 \quad (r = 0.883)$$

濁度

$$15.4525 * RSB2 - 16.7089 * RSB1 + 3.19505 \quad (r = 0.974)$$

透明度

$$45.433 * RSB1 - 20.9591 * RSB4 - 25.1489 * RSB2 - 3.993 \quad (r = 0.912)$$

**8 水質推定式 00.02.18** (画像 5-6)

水温

$$29.2667 * RB6 - 15.1393 \quad (r=0.733)$$

クロロフィル-a 濃度

$$6.735 * RSB4 - 16.563 * RSB1 + 6.506 \quad (r=0.775)$$

濁度

$$124.267 * RSB4 - 371.279 * RSB5 - 9.555 \quad (r^2=0.427)$$

透明度

$$377.526 * RSB5 + 302.796 * RSB7 - 29.64 * RSB3 + 4.544 \quad (r^2=0.966)$$

## (2) 高濃度クロロフィル-a 試料の水質推定式

### 1 水質推定式 86.08.06 (画像 5-7)

水温

$$83.8251 * B6 - 72.3323 \quad (r=0.927)$$

クロロフィル-a 濃度 1 式

$$36.8883 * RSB4 - 35.1285 * RSB1 + 9.2925 \quad (r=0.819)$$

クロロフィル-a 濃度 2 式

$$60.448 * RSB3 - 24.862 * RSB2 - 23.375 * RSB1 + 7.813 \quad (r^2=0.932)$$

透明度

$$5.4173 - 36.801 * RSB4 \quad (r=0.587)$$

### 2 水質推定式 89.08.14

水温

欠測

クロロフィル-a 濃度

$$10.487 * RSB4 - 9.99774 * RSB1 + 3.9778 \quad (r=0.778)$$

透明度

$$26.301 * RSB2 - 48.82 * RSB3 + 2.286 \quad (r^2=0.804)$$

SS

$$143.822 * RSB3 - 91.668 * RSB1 + 13.752 \quad (r^2=0.401)$$

### 3 水質推定式 90.02.22 (低濃度クロロフィル-a 試料の水質推定式に記載)

### 4 水質推定式 90.04.27 (画像 5-8)

水温

$$32.0105 * RB6 - 15.4292 \quad (r=0.787)$$

クロロフィル-a 濃度

$$13.8372 * RSB4 - 13.1916 * RSB1 + 4.4593 \quad (r=0.731)$$

透明度

$$22.5315 * RSB2 - 22.7575 * RSB1 + 2.7733 \quad (r^2=0.224)$$

SS

$$180.826 * RSB1 - 237.58 * RSB2 + 27.6193 \quad (r^2=0.865)$$

### 5 水質推定式 90.05.29 (画像 5-9)

水温

$$22.7630 * RB6 + 7.6331 \quad (r=0.864)$$

クロロフィル-a 濃度

$$23.9959 * RSB4 - 22.8764 * RSB1 + 6.51106 \quad (r=0.836)$$

透明度

$$65.487 * RSB1 - 82.882 * RSB2 + 1.871 \quad (r^2=0.464)$$

SS

$$244.387 * RSB1 - 76.348 \quad (r=0.680)$$

### 6 水質推定式 92.06.03 (画像 5-10)

水温

$$21.6290 * B6 - 2.4266 \quad (r=0.526)$$

クロロフィル-a 濃度

$$35.6539 * RSB4 - 33.9904 * RSB1 + 8.0805 \quad (r=0.839)$$

透明度

$$3.887 - 11.95 * RSB4 \quad (r=0.583)$$

SS

$$541.759 * RSB4 - 630.978 * RSB1 + 154.487 \quad (r^2=0.555)$$

### 7 水質推定式 93.05.21 (画像 5-11)

水温

$$36.2152 * RB6 - 17.8174 \quad (r=0.747)$$

クロロフィル-a 濃度

$$10.5817 * RSB4 - 10.088 * RSB1 + 3.9226 \quad (r=0.704)$$

透明度

$$37.412 * RSB1 - 37.475 * RSB4 - 4.9509 \quad (r=0.566)$$

濁度

$$860.762 * RSB3 - 446.858 * RSB1 - 1155.67 * RSB5 + 47.818 \quad (r^2=0.699)$$

### 8 水質推定式 93.09.10

水温

$$89.9380 * RB6 - 65.8889 \quad (r=0.709)$$

クロロフィル-a 濃度

$$7.814 * RSB1 - 1.023 \quad (r=0.865)$$

透明度



推定困難

濁度

$$121.194 * RSB1 - 79.672 * RSB4 - 27.761 \quad (r^2=0.467)$$

### 9 水質推定式 94.04.22

水温

$$47.9120 * RB6 - 32.7973 \quad (r=0.719)$$

クロロフィル-a 濃度

$$84.665 * RSB1 - 31.497 * RSB2 - 20.424 \quad (r^2=0.813)$$

透明度

$$41.154 * RSB4 - 185.067 * RSB1 + 64.963 \quad (r^2=0.813)$$

濁度

$$167.048 * RSB1 - 267.682 * RSB5 - 65.15 \quad (r^2=0.813)$$

### 10 水質推定式 95.08.15

水温

$$51.2168 * RB6 - 26.9667 \quad (r=0.613)$$

クロロフィル-a 濃度

$$18.66 * RSB1 - 5.298 \quad (r^2=0.813)$$

透明度

推定困難

濁度

$$-69.643 * RSB4 + 10.176 \quad (r = 0.625)$$

### 11 水質推定式 00.02.18 (低濃度クロロフィル-a 試料の水質推定式に記載)

### 12 水質推定式 00.05.24 (画像 5-12)

水温

$$45.3367 * RB6 - 24.8453 \quad (r=0.717)$$

クロロフィル-a 濃度 1 式

$$10.839 * RSB3 - 0.775 \quad (r=0.812)$$

クロロフィル-a 濃度 2 式

$$8.565 * RSB2 - 145.144 * RSB7 - 1.578 \quad (r^2=0.661)$$

クロロフィル-a 濃度 3 式

$$12.319 * RSB1 - 1.901 * RSB4 - 3.540 \quad (r^2=0.581)$$

透明度 1 式

$$76.099 * RSB5 - 40.359 * RSB2 + 15.013 \quad (r^2=0.837)$$

透明度 2 式

$$18.234 - 30.76 * RSB1 - 8.341 * RSB4 \quad (r^2=0.714)$$

濁度 1 式

$$197.11 * RSB4 - 43.598 * RSB2 - 779.112 * RSB5 - 6.311 \quad (r^{*2}=0.615)$$

濁度 2 式

$$177.758 * RSB4 - 37.188 * RSB1 - 724.101 * RSB5 - 2.166 \quad (r^{*2}=0.608)$$

### 13 水質推定式 00.07.11 (画像 5-13)

水温

$$52.8378 * RB6 - 30.3347 \quad (r=0.582)$$

クロロフィル-a 濃度

$$15.886 * RSB4 + 23.931 * RSB3 - 24.711 * RSB1 + 5.016 \quad (r^{*2}=0.349)$$

透明度

$$46.061 * RSB5 - 13.932 * RSB4 + 2.279 \quad (r^{*2}=0.443)$$

濁度

$$611.714 * RSB3 - 420.481 * RSB1 + 67.109 \quad (r^{*2}=0.449)$$

### 14 水質推定式 00.08.28 (画像 5-14)

水温

$$114.6280 * RB6 - 90.3896 \quad (r=0.600)$$

クロロフィル-a 濃度 1 式

$$29.084 * RSB4 - 27.727 * RSB1 + 8.135 \quad (r=0.825)$$

クロロフィル-a 濃度 2 式

$$62.167 * RSB5 - 283.326 * RSB7 + 1.321 \quad (r^{*2}=0.366)$$

透明度 1 式

$$56.866 * RSB1 - 56.962 * RSB4 - 11.663 \quad (r=0.186)$$

透明度 2 式

$$21.617 * RSB1 - 42.806 * RSB3 + 0.585 \quad (r^{*2}=0.210)$$

濁度

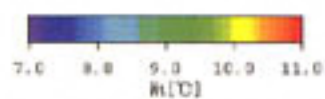
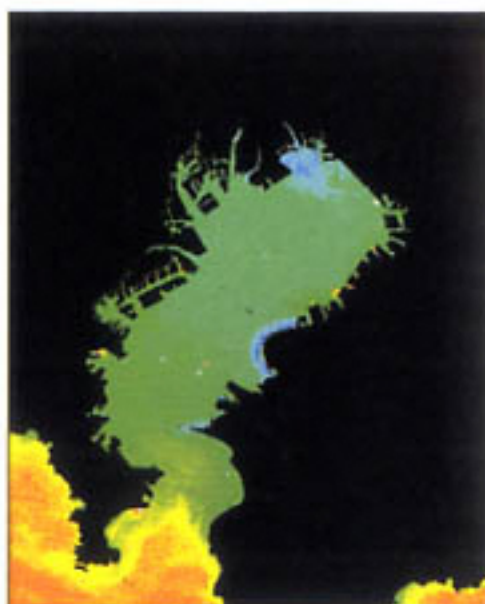
$$51.374 * RSB2 - 12.487 \quad (r=0.517)$$

画像5-1 TM 87.03.02

クロロフィル-a 濃度



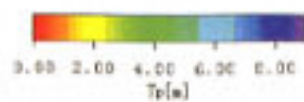
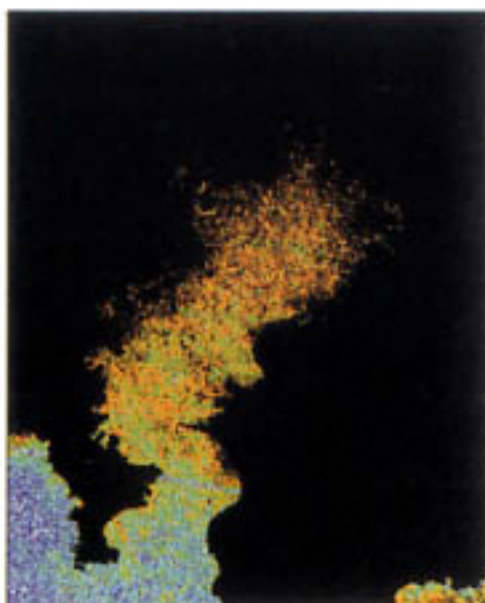
水温



濁度/SS

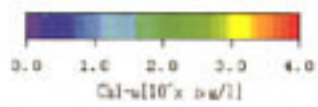
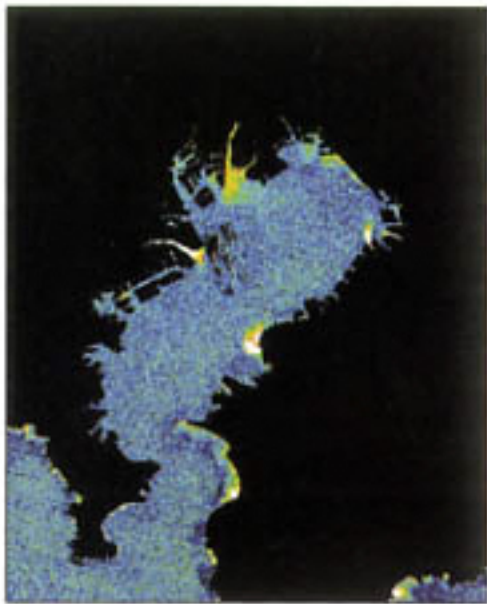
—欠測—

透明度

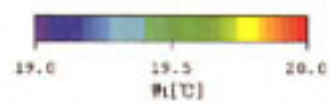
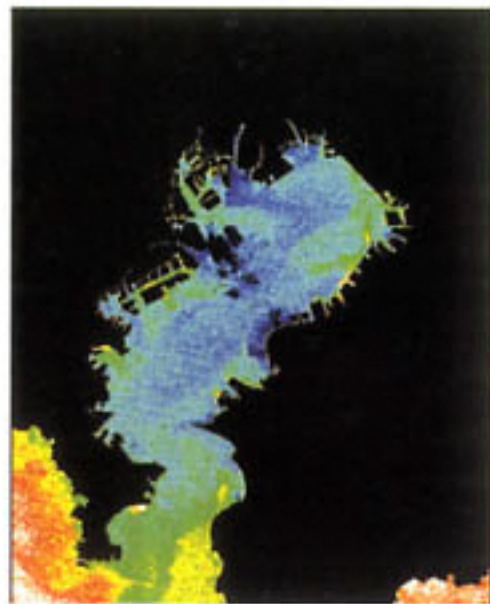


画像5-2 TM 90.11.05

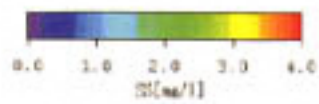
クロロフィル-a 濃度



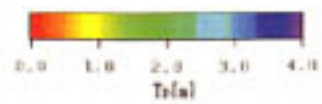
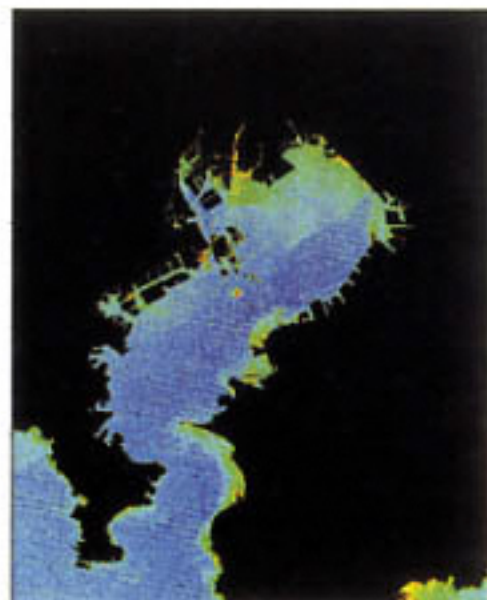
水温



濁度/SS

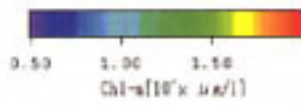
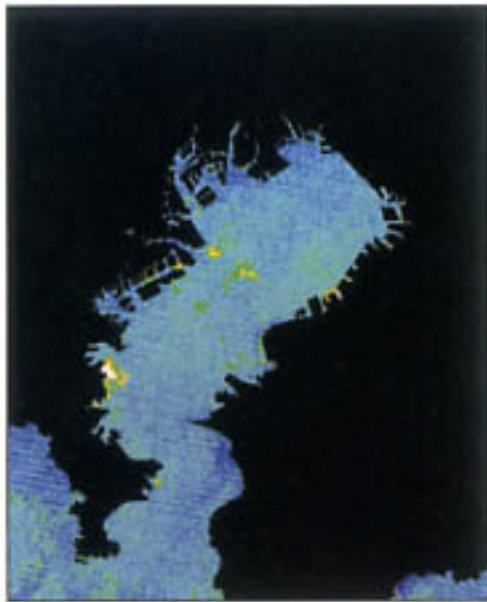


透明度



画像5-3 TM 97.01.08

クロロフィル-a 濃度



濁度/SS

—欠測—

水温

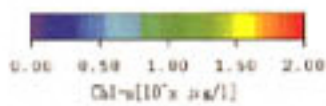


透明度

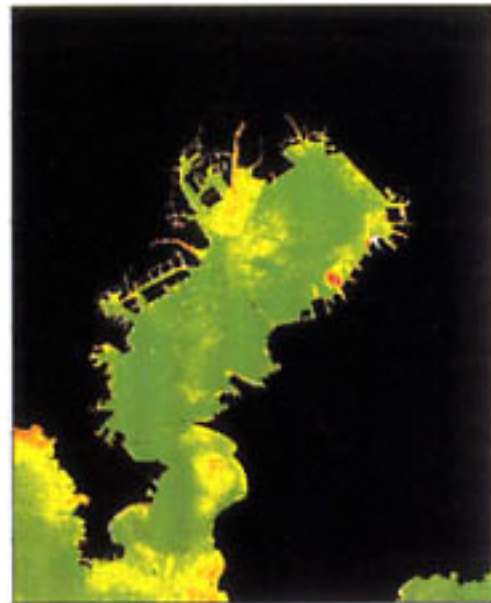
—欠測—

画像5-4 TM 97.04.14

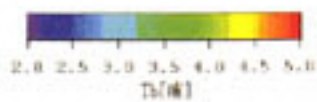
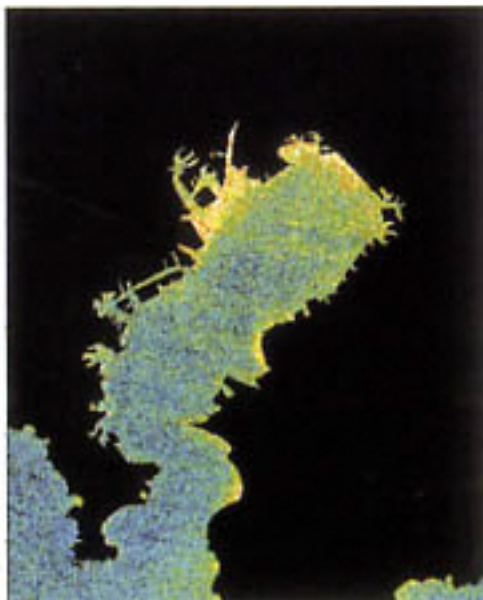
クロロフィル-a 濃度



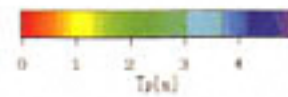
水温



濁度/SS

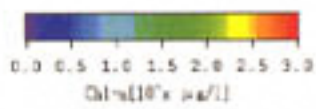


透明度



画像5-5 TM 99.01.14

クロロフィル-a 濃度



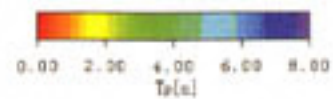
水温

—推定困難—

濁度/SS

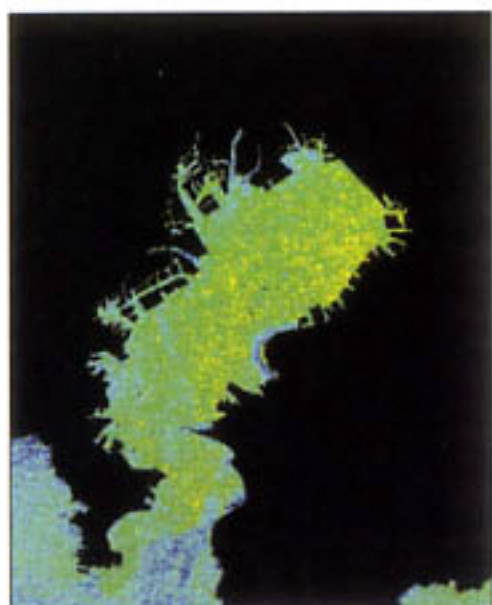


透明度

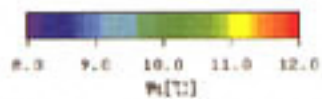


画像5-6 TM 00.02.18

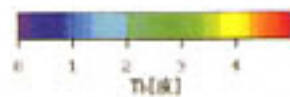
クロロフィル-a 濃度



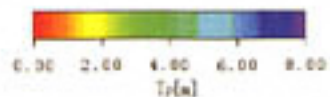
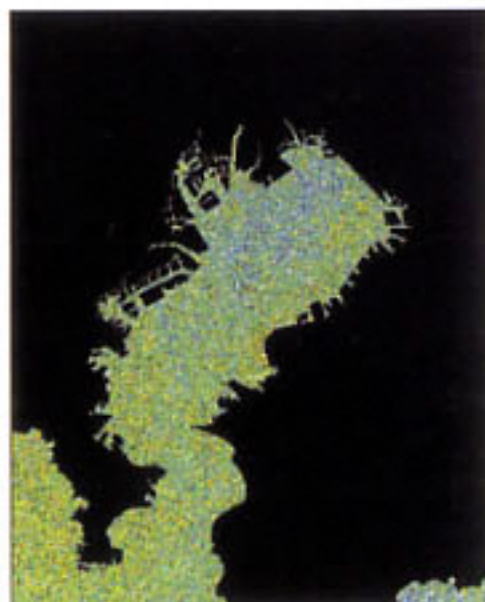
水温



濁度/SS



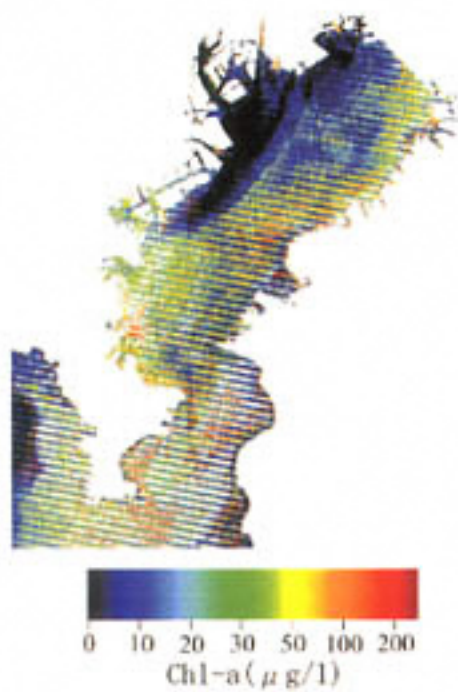
透明度



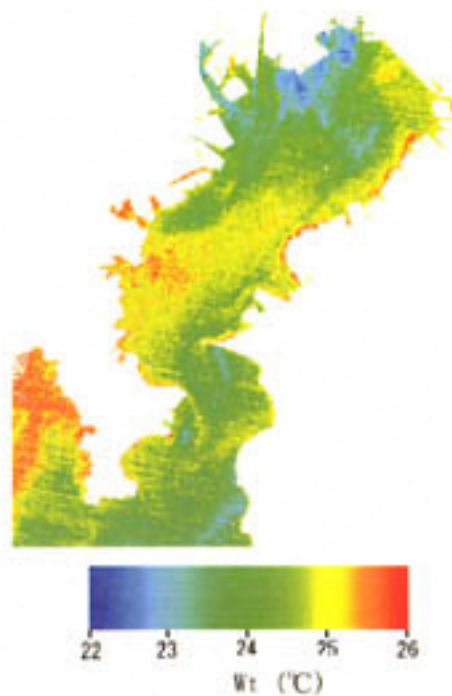


画像5-7 TM 86.08.06

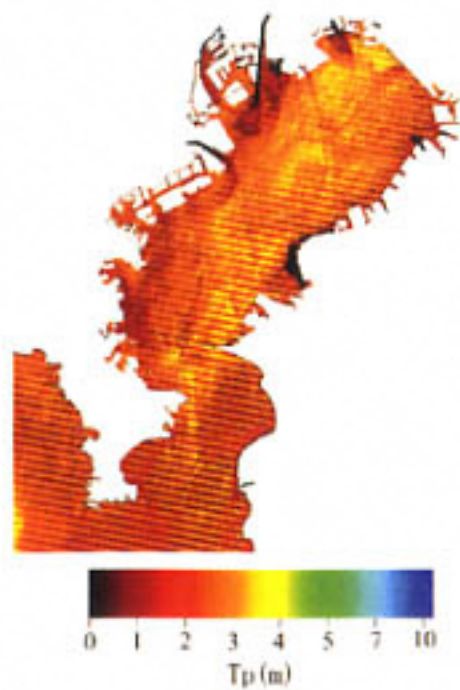
クロロフィル-a 濃度



水温



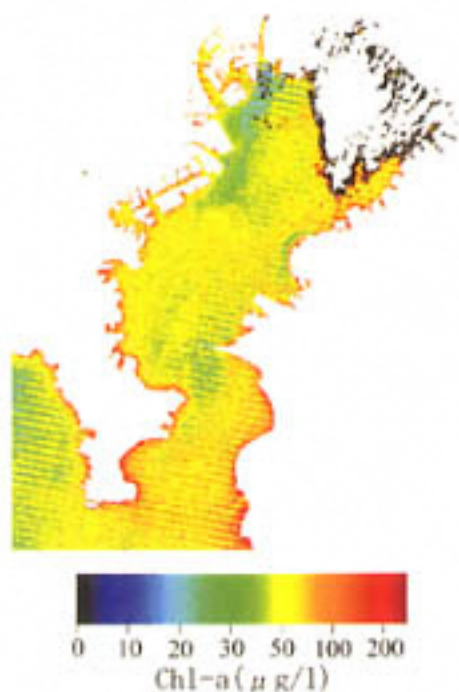
透明度



—欠測—

画像5-8 TM 90.04.27

クロロフィル-a 濃度



水温



濁度/SS

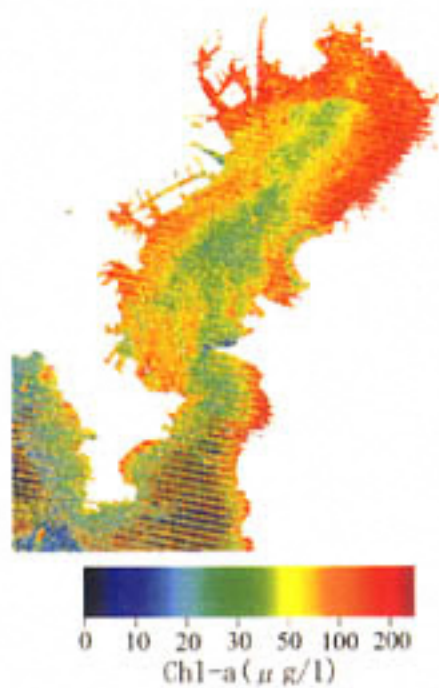


透明度



画像5-9 TM 90.05.29

クロロフィル-a 濃度



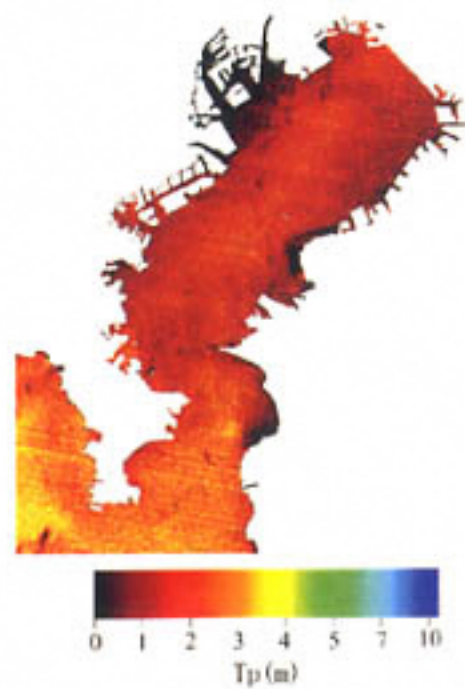
水温



濁度/SS

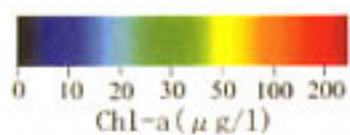
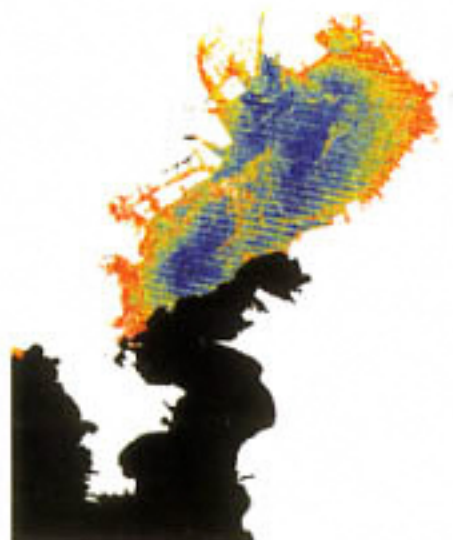


透明度

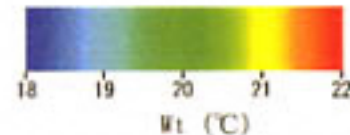


画像5-10 TM 92.06.03

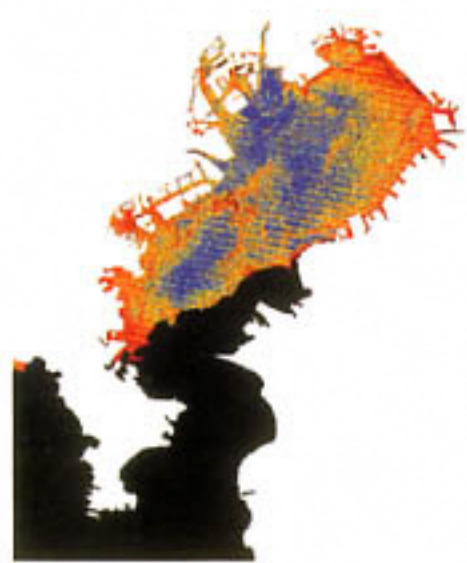
クロロフィル-a 濃度



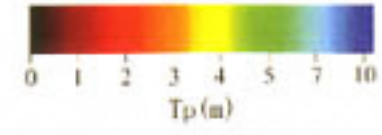
水温



濁度/SS

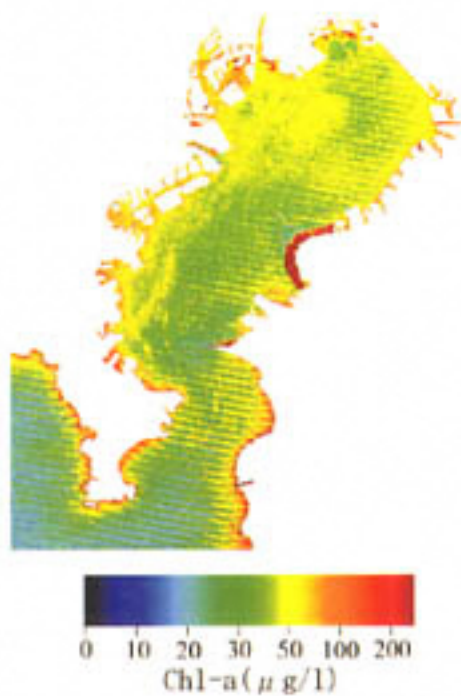


透明度



画像5-11 TM 93.05.21

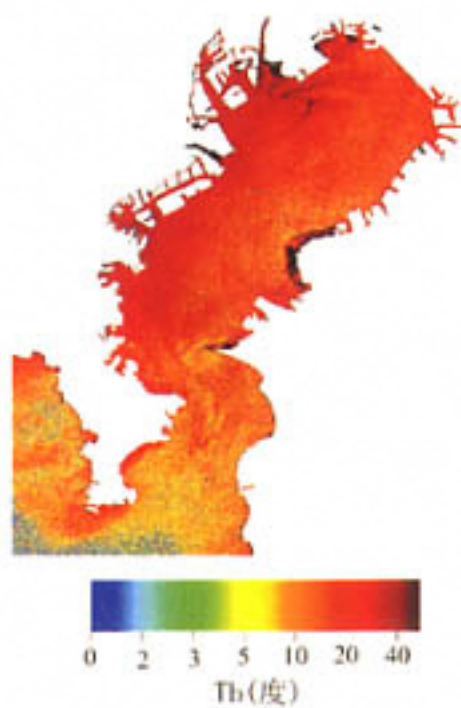
クロロフィル-a 濃度



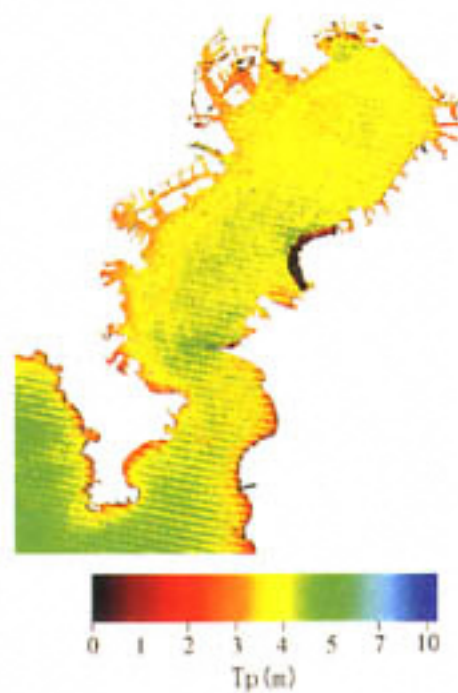
水温



濁度/SS

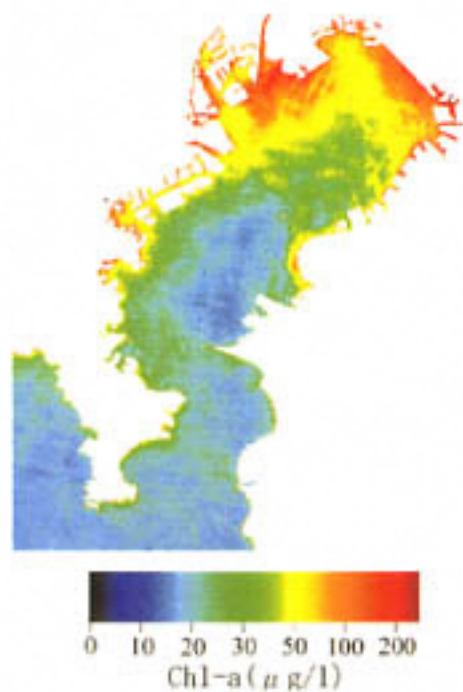


透明度

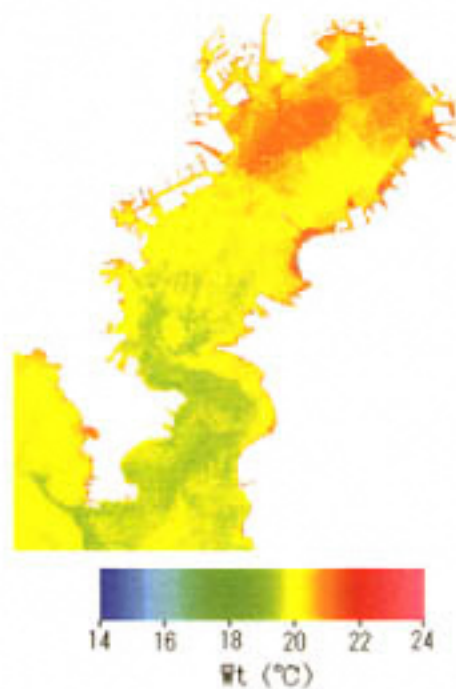


画像5-12 TM 00.05.24

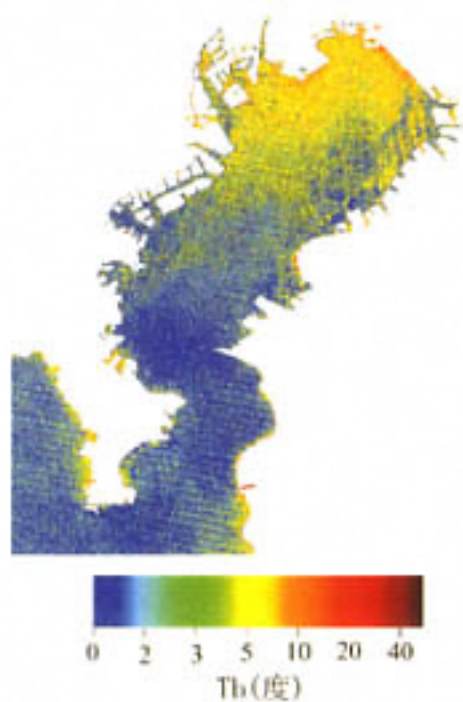
クロロフィル-a 濃度



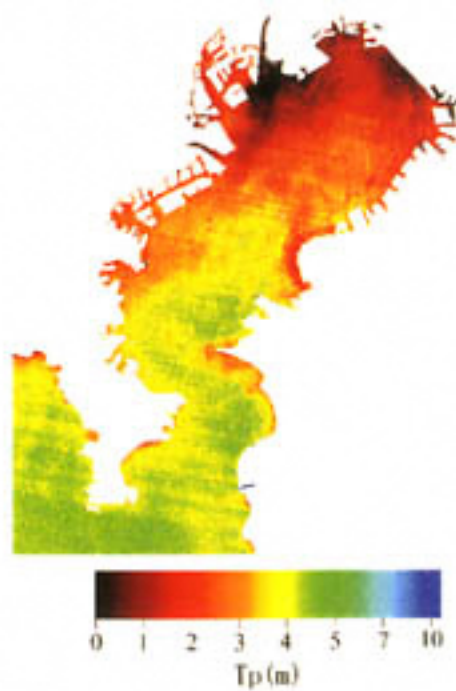
水温



濁度/SS

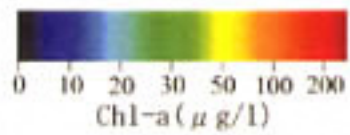
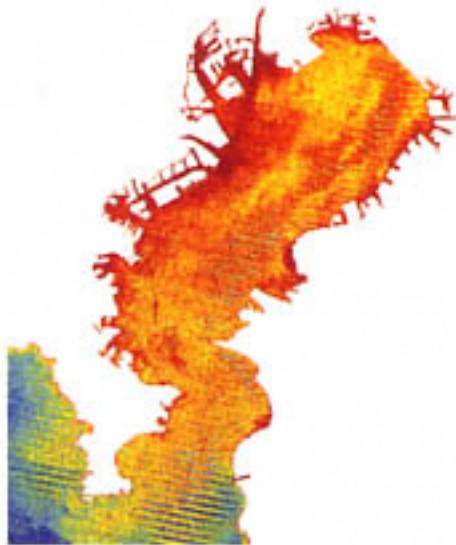


透明度

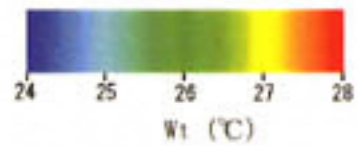
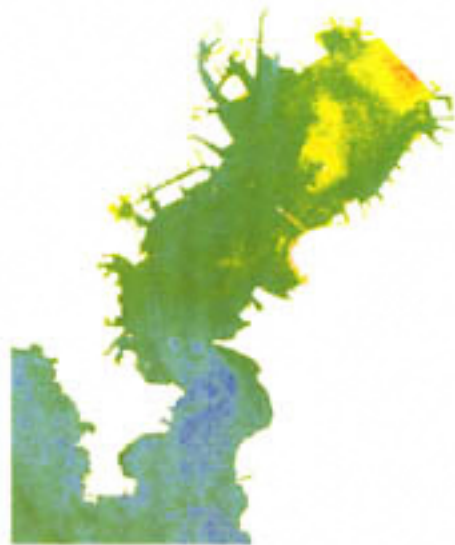


画像5-13 TM 00.07.11

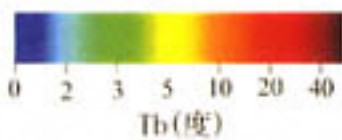
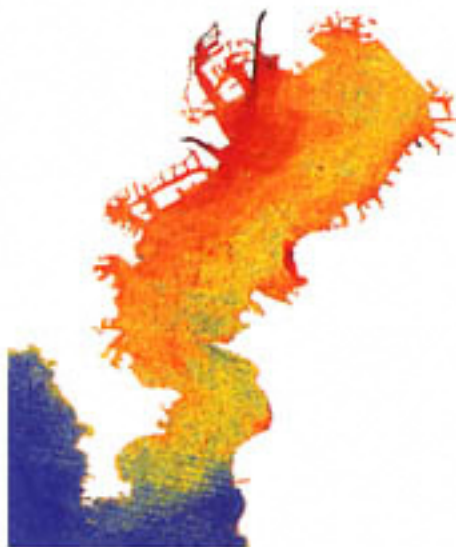
クロロフィル-a 濃度



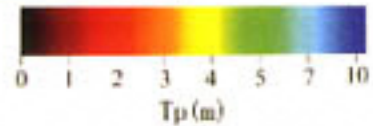
水温



濁度/SS

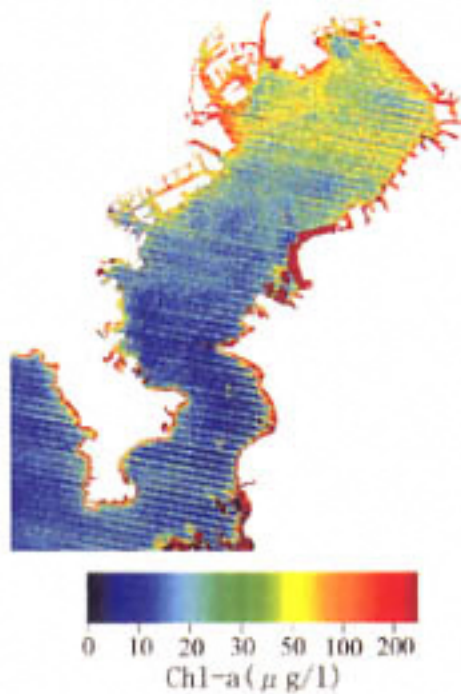


透明度

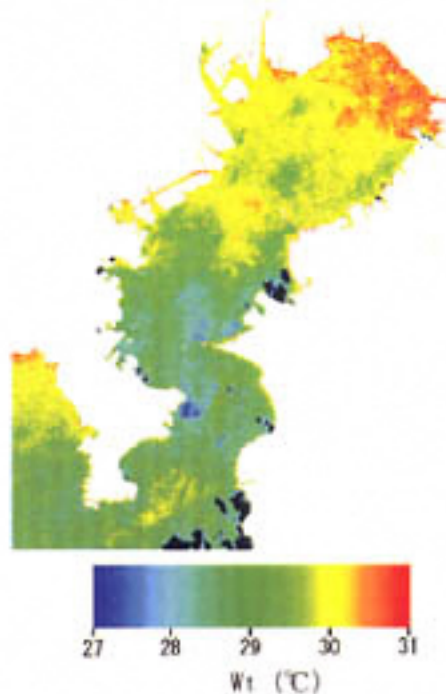


画像5-14 TM 00.08.28

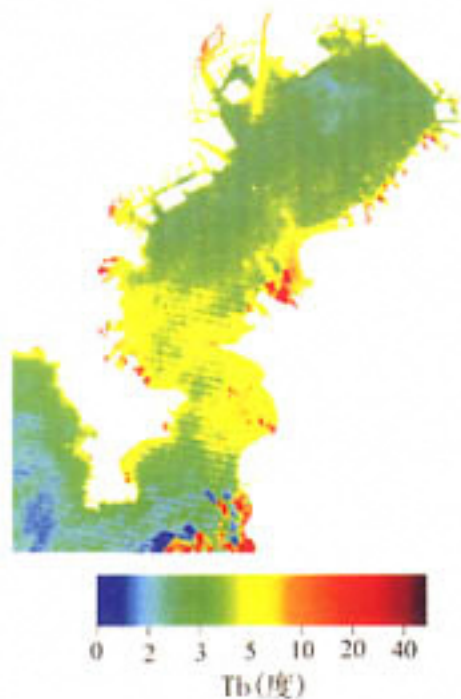
クロロフィル-a 濃度



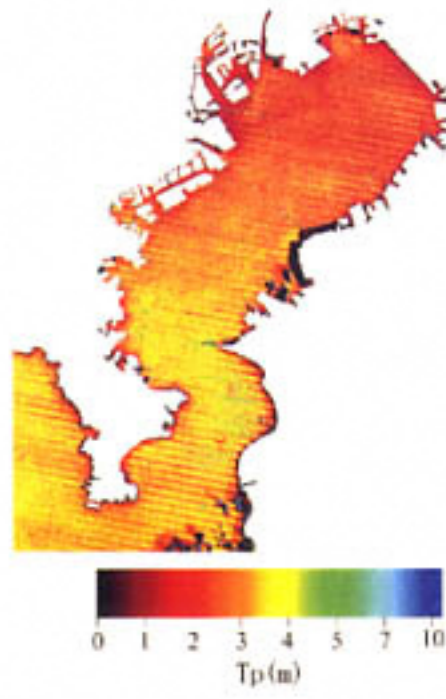
水温



濁度/SS



透明度





## 5.6 他の地球観測衛星データによる水質推定手法の検討

5.1～5 項では LANDSAT/TM データによる水質推定手法について検討した。ここでは、他の地球観測衛星データとして ADEOS/AVNIR、SPOT/HRV による水質推定手法の検討結果を報告する。特に ADEOS/AVNIR については、その後継センサが陸域観測技術衛星 ALOS に搭載されることから、目的にある ALOS の実利用性の予備検討を行った。

### 5.6.1 ADEOS/AVNIR による水質推定手法

#### (1) ADEOS/AVNIR の観測仕様

ADEOS/AVNIR は、以下の波長域の観測バンドを有している。LANDSAT/TM のバンド 1～バンド 4 に比較的近い観測波長域の設定になっている。

バンド	波長域	空間分解能	観測幅
band1	0.40～0.50 $\mu$ m	16m	80 k m
band2	0.52～0.62 $\mu$ m		
band3	0.62～0.72 $\mu$ m		
band4	0.82～0.92 $\mu$ m		

#### (2) 海上観測データとの統計解析による水質推定

##### ①水質と各バンドの相関

'97.4.14 の AVNIR データについて、TM データによる水質アルゴリズムと同様な考え方で、海上で実測した透明度、濁度、クロロフィル-a 濃度に関して、AVNIR データとの相関関係から、水質と関係の深いバンドを抽出した。

表 5-17 の相関分析結果からは、クロロフィル-a 濃度 (LogChl-a) と各バンドで強い正の相関 ( $r=0.85$  以上)、濁度 ( $T_b$ ) と各バンドで正の相関 ( $r=0.5$  以上)、透明度 ( $T_p$ ) と各バンドで負の相関 ( $-0.64$  以上) が見られた。特にバンド 2 とバンド 3 が各水質項目と強い相関が見られ、単バンドで水質推定可能な結果が得られた。このことは、TM バンド 4 とクロロフィル-a 濃度の相関係数が  $0.894$  であり単バンドでもクロロフィル-a 濃度の推定が可能な結果が得られているのと共通している。表 5-1 に示すように大気のス PM は  $50\mu\text{g}/\text{m}^3$  以下で大気の影響も少なく、濁度はプランクトンに起因しており、前項の水質アルゴリズムの Case3-1 に該当している。また、クロロフィル-a 濃度は平均値が  $24\mu\text{g}/\text{l}$  以下の低濃度で、クロロフィル-a 濃度と濁度で正の相関がみられることから、この日の濁度がクロロフィル-a に起因することが推測される。

##### ②水質推定式

5.4 項及び 5.5 項の TM データによる水質推定においては、バンド 1 とバンド 4 の関係の有効性を示したうえで、バンド 1 と 4 からなるクロロフィル-a 濃度推定式と透明度推定式に実測値を適用し回帰式を抽出した。ここでは、ADEOS/AVNIR のバンド 1～4 の観測波長域が TM データのそれとは若干異なることを踏まえ、変数を選択しあてはめの良い回帰式

を求めたところ、次の推定式を得た。クロロフィル-a 濃度はバンド 2 単独、もしくはバンド 2 からバンド 1 を引く関係、濁度はバンド 2 からバンド 3 を引く関係、透明度はバンド 1 からバンド 2 を引く関係が、最適と推定された。

この日の AVNIR データにおいては、どのバンドにおいても水質との相関が非常に強く、とりわけバンド 2 の単バンドだけでもクロロフィル-a 濃度と強い相関があったために、バンド 2 を中心とした関係式が導かれた。しかし、表 4-3 よりクロロフィル-a 濃度の最大観測値と最小観測値の差が 10 $\mu$ g/l 程度と小さいこと、またデータ数が 1 シーンしかなく、かつ、海上観測データが沿岸域の千葉の観測点 5 点分に限られるため、汎用的な水質推定手法を議論することは難しいと思われる。

ADEOS/AVNIR のバンド 1 は TM と比べて広い観測波長幅を有し、クロロフィル-a の吸収帯である 0.43 $\mu$ m 付近の特徴をより強く捉えることが期待されるが、この日に関しては、クロロフィル-a とは関係のうすい緑 (バンド 2) の波長域が他の水中情報をより強く反映していた為に有効なバンドとして選択された可能性が考えられる。

ADEOS/AVNIR 97.04.14 の水質推定式 (N=5)

$$\begin{aligned} \text{ElogCh-a} &= 8.096 \cdot \text{B2} - 3.192 && (r = 0.855) \\ \text{ElogCh-a} &= 10.195 \cdot \text{B2} - 3.244 \cdot \text{B1} - 1.778 && (r^2 = 0.797) \\ \text{ETb} &= 558.488 \cdot \text{B2} - 536.44 \cdot \text{B3} - 132.474 && (r^2 = 0.828) \\ \text{ETp} &= 37.623 \cdot \text{B1} - 39.242 \cdot \text{B2} - 6.475 && (r^2 = 0.948) \end{aligned}$$

表 5-17 水質、AVNIR データ、TM データの相関行列表

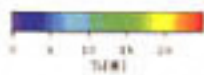
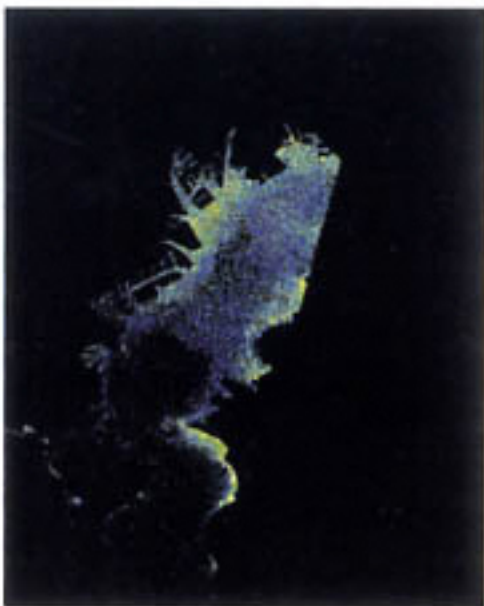
変数名	Chl-a	LogChl-a	Tb	Tp	RSuADB1	RSuADB2	RSuADB3	RSuADB4	RSuTM1	RSuTM2	RSuTM3	RSuTM4	RSuTM5	RSuTM7
Chl-a	1	0.983++	0.679+	-0.893++	0.916++	0.988++	0.973++	0.923++	0.360	0.809++	0.804++	0.848++	-0.090	0.577
LogChl-a		1	0.624+	-0.900++	0.862++	0.944++	0.928++	0.858++	0.454	0.813++	0.821++	0.894++	0.080	0.697+
Tb			1	-0.663+	0.621+	0.733+	0.607+	0.516	0.577	0.845++	0.849++	0.779+	-0.453	-0.053
Tp				1	-0.645+	-0.856++	-0.792+	-0.731+	-0.609+	-0.937++	-0.916++	-0.878++	-0.111	-0.570
RSuADB1					1	0.943++	0.968++	0.946++	0.051	0.568	0.569	0.651+	-0.350	0.392
RSuADB2						1	0.983++	0.946++	0.288	0.791+	0.778+	0.801++	-0.245	0.447
RSuADB3							1	0.984++	0.139	0.675+	0.661+	0.711+	-0.230	0.495
RSuADB4								1	-0.017	0.577	0.548	0.582	-0.298	0.432
RSuTM1									1	0.772+	0.810++	0.787+	0.409	0.354
RSuTM2										1	0.994++	0.932++	0.000	0.371
RSuTM3											1	0.961++	0.039	0.401
RSuTM4												1	0.152	0.569
RSuTM5													1	0.718+
RSuTM7														1

AVNIR 97.04.14

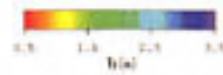
クロロフィル-a 濃度



濁度



透明度



### (3) LANDSAT/TM との比較検討

'97.04.14 に観測された、ADEOS/AVNIR の観測データと、同日の LANDSAT/TM について両者の比較を行った。なお ADEOS は LANDSAT の約 1 時間後に観測が行われた。画像から判断して、AVNIR の方が、TM より高い空間分解能を有するために TM より詳細に分布のパターンを捉えている。しかしながら、AVNIR の捉えた細かな分布パターンが、実際にクロロフィル-a 濃度などの水質の分布を正確に表しているかどうか結論を出すためには、TM の場合の解析と同様に、より多くの同期海上観測データとの検証を行うことが必要である。

以下に、TM と AVNIR の比較のため、AVNIR と同様のバンド 2 について、TM とクロロフィル-a 濃度との相関値を示す。但し、ADEOS/AVNIR と LANDSAT/TM では各バンドの波長帯が異なるため、あくまで参考とする。

クロロフィル-a 実測値と TM バンド 2 の相関値 :	0.813
クロロフィル-a 実測値と AVNIR バンド 2 の相関値 :	0.944

この日の TM は、バンド 2 単バンドのみでもクロロフィル-a との相関が強いが、AVNIR と比べると相関値は小さい。異なる理由として、TM のバンド 2 の波長帯域 (0.52~0.60  $\mu\text{m}$ ) と AVNIR のバンド 2 波長帯域 (0.52~0.62  $\mu\text{m}$ ) の帯域幅に差があることや、AVNIR が TM に比べ湾岸や湖沼の水質状況把握により適していることが挙げられる。

## 5.6.2 SPOT/HRV による水質推定手法

### (1) SPOT/HRV の観測仕様

SPOT/HRV は、以下の波長域の観測バンドを有している。これらは、LANDSAT/TM のバンド 2~4 に比較的近い観測波長域となっている。

バンド	波長域	空間分解能	観測幅
band1	0.50~0.59 $\mu\text{m}$	20m	60km×2
band2	0.61~0.68 $\mu\text{m}$		
band3	0.79~0.89 $\mu\text{m}$		

### (2) 海上観測データとの統計解析による水質推定

#### ① 水質と各バンドの相関

'00.07.11 と '00.08.28 のデータについて、TM データによる水質アルゴリズムと同様な考え方で、海上で実測した透明度、濁度、クロロフィル-a 濃度に関して、HRV データとの相関関係から、水質と関係の深いバンドを抽出した。両日とも、画像の中央部分を境に、横浜側と千葉側で輝度値が異なっていた。特に'00.07.11 のデータについては、輝度値の差が顕著なことから、横浜側の水質データのみを用いて解析した。

表 5-1 より、'00.07.11 と '00.08.28 においては、どちらもクロロフィル-a 濃度が 13.5  $\mu\text{g/l}$  以上で、高濃度領域に相当する。また、沿岸大気のス PM 値も、両日とも 50  $\mu\text{g/m}^3$  以上と高濃度になっている。

'00.07.11 においては、透明度 (Tp) と濁度 (Tb) の負の相関、クロロフィル-a 濃度 (Log(Chl-a)) と濁度で強い正の相関、クロロフィル-a 濃度と透明度で強い負の相関で、この日の濁度はプランクトンに起因していると考えられる。'00.08.28 においては、クロロフィル-a 濃度と濁度で正の相関、クロロフィル-a と透明度で負の相関、透明度と濁度で負の相関を示しており、濁度はクロロフィル-a を含むプランクトンに起因していると考えられる。

表 5-18~19 より、'00.07.11 における水質と SPOT データとの相関は、SPOT のバンド 1、バンド 2 とクロロフィル-a 濃度で負の相関 ( $r = -0.592$ 、 $r = -0.510$ )、バンド 1、2 と濁度が強い負の相関 ( $r = -0.879$ 、 $r = -0.634$ )、バンド 1、2 と透明度が弱い正の相関 ( $r = 0.447$ 、 $r = 0.593$ ) が見られ、濁度については、バンド 1 単バンドによる推定の可能性が見られた。

'00.08.28 においては、SPOT のバンド 1、バンド 2 とクロロフィル-a 濃度で負の相関 ( $r = -0.598$ 、 $r = -0.663$ )、バンド 2 と濁度が弱い負の相関 ( $r = -0.334$ )、バンド 3 と透明度が弱い負の相関 ( $r = -0.363$ ) が見られ、いずれの水質項目についても、単バンドでの水質推定は困難と思われた。

#### ② 水質推定式

重回帰分析により水質推定式を抽出した結果を次に示す。

両日ともに、画像中央部分を境に海域の輝度値が異なっていたため、水質推定が困難であった。この原因は、センサの内部構造に起因しているものと推測されるため、ここでは、水質推

定について、これ以上は言及しない。

SPOT/HRV 00.07.11 の水質推定式 (N=5)

$$\text{ElogCh-a} = 2.099 \cdot B3 - 1.668 \cdot B1 + 8.536 \quad (r^2 = 0.690)$$

$$\text{ETb} = 10.912 \cdot B3 - 27.903 \cdot B1 + 148.14 \quad (r^2 = 0.611)$$

透明度については、推定困難

$$\text{ETp} = 1.103 \cdot B2 - 1.937 \quad (r = 0.135)$$

SPOT/HRV 00.08.28 水質推定式 (N=9)

$$\text{ELogCh-a} = 2.049 \cdot B3 + 1.121 \cdot B1 - 2.08 \cdot B2 - 1.502 \quad (r^2 = 0.684)$$

$$\text{ETb} = 8.567 \cdot B3 + 8.084 \cdot B1 - 10.817 \cdot B2 - 24.971 \quad (r^2 = 0.641)$$

透明度については、推定困難

$$\text{ETp} = 1.306 \cdot B2 - 2.964 \cdot B3 + 1.742 \quad (r^2 = 0.123)$$

表 5-18 00.07.11 の水質、HRV データ、TM データの相関行列表

変数名	Chl-a	Log(Chl-a)	Tb	Tp	RSuSp1	RSuSp2	RSuSp3	RSuTM1	RSuTM2	RSuTM3	RSuTM4	RSuTM5	RSuTM7
Chl-a	1	0.989++	0.737+	-0.892++	-0.535	-0.518	0.200	0.001	-0.084	0.226	-0.011	-0.194	-0.360
Log(Chl-a)		1	0.815++	-0.912++	-0.592	-0.510	0.096	0.028	0.028	0.319	-0.007	-0.225	-0.419
Tb			1	-0.764+	-0.879++	-0.634+	-0.479	-0.210	0.165	0.312	-0.336	-0.587	-0.743+
Tp				1	0.447	0.593	-0.155	0.068	0.000	-0.233	0.000	0.301	0.188
RSuSp1					1	0.707+	0.693+	0.485	0.096	0.000	0.671+	0.767+	0.950++
RSuSp2						1	0.294	0.836++	0.612+	0.516	0.791+	0.901++	0.494
RSuSp3							1	0.404	-0.187	-0.029	0.620+	0.650+	0.775+
RSuTM1								1	0.782+	0.834++	0.949++	0.897++	0.373
RSuTM2									1	0.943++	0.645+	0.475	0.000
RSuTM3										1	0.699+	0.506	-0.058
RSuTM4											1	0.927++	0.625+
RSuTM5												1	0.637+
RSuTM7													1

表 5-19 00.08.28 の水質、HRV データ、TM データの相関行列表

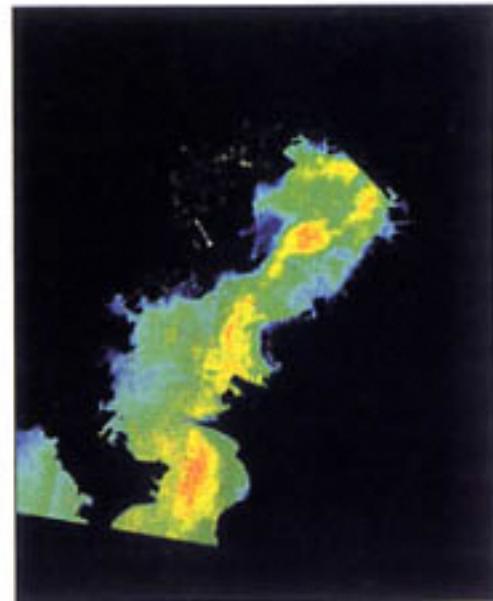
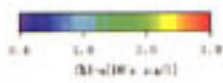
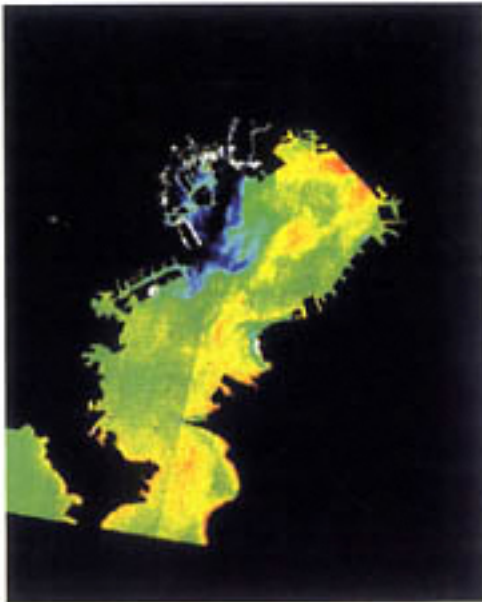
変数名	Chl-a	Log(Chl-a)	Tb	Tp	RSuSp1	RSuSp2	RSuSp3	RSuTM1	RSuTM2	RSuTM3	RSuTM4	RSuTM5	RSuTM7
Chl-a	1	0.980++	0.742+	-0.551	-0.530	-0.609+	-0.097	-0.396	0.073	0.062	0.140	-0.244	-0.652+
Log(Chl-a)		1	0.693+	-0.559	-0.598	-0.663+	-0.130	-0.420	0.043	0.059	0.142	-0.308	-0.689+
Tb			1	-0.738+	-0.181	-0.334	-0.017	-0.315	0.220	0.012	-0.078	-0.083	-0.374
Tp				1	0.124	0.034	-0.363	0.183	-0.203	-0.218	-0.225	0.463	0.487
RSuSp1					1	0.868++	0.314	0.871++	0.704+	0.596	0.468	0.672+	0.667+
RSuSp2						1	0.682+	0.808++	0.589	0.629+	0.529	0.316	0.499
RSuSp3							1	0.392	0.455	0.601+	0.530	-0.265	-0.165
RSuTM1								1	0.799+	0.823++	0.760+	0.673+	0.614+
RSuTM2									1	0.918++	0.768+	0.519	0.205
RSuTM3										1	0.945++	0.324	0.117
RSuTM4											1	0.231	0.063
RSuTM5												1	0.787+
RSuTM7													1

HRV

クロロフィル-a 濃度

00.07.11

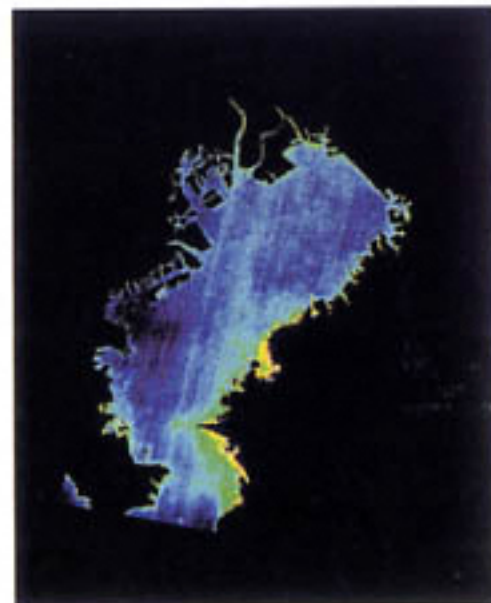
濁度



00.08.28

クロロフィル-a 濃度

濁度





## 5.7 実測データのない場合の水質推定手法

これまでの検討から、実測データ無しモデル（理論モデル）から水質を推定することは、東京湾のような海域では容易でないことがわかった。

但し、ADEOS/AVNIRについては、海上観測と同期した日が1日であり、また海上測定点も少ないことから、実測データ無しで推定可能かどうか議論することは難しい。

特に、ADEOS/AVNIRの後継センサである陸域観測技術衛星ALOSのAVNIR-2により、多くの海上同期観測データとの検証を行い、実測データなしで水質推定が可能になることを期待したい。

## 5.8 地球観測衛星データによる環境監視項目COD、全窒素などの把握と監視体制

湖沼、湾、海の富栄養化対策として水質のモニタリングを考えた場合には、有機汚濁物質の指標であるCODや栄養塩を代表する全P（リン）や全N（窒素）などの項目がモニタリングの対象となる。これらの項目は現在、地球観測衛星で直接把握することは困難であるが、水域の条件により間接的には把握可能である。

例えば、環境基準にあるCOD（化学的酸素要求量）は水中の懸濁有機物質と溶解有機物質総量の指標であるが、光学センサでは、CODを直接把握することは困難である。しかし、光学センサは水中の懸濁物質を濁度として、懸濁有機物質をクロロフィル-a濃度として推定できる。赤潮が発生するような時期ではCODとクロロフィル-a濃度との相関は強く、地球観測衛星データにより間接的にCODの推定画像を求めることが可能である。東京湾の場合、特に赤潮が発生する春季から夏季にCODが環境基準を超えることが多く、このような時に、地球観測衛星データは役立つと考える。同様に全P、全Nについても推定が可能である。

共同研究で使用したLANDSAT/TMは16日周期で運行しており、しかも晴天の日しか有効なデータが得られないために、海上観測と同期して得られたデータは年平均2回程度で、監視業務にはなじまない。気象衛星「ひまわり」のように毎日観測できる衛星があれば、監視業務への利用にも拡大可能である。

NOAAのように毎日観測されている衛星に、LANDSAT/TM程度の分解能でバンド1に相当する波長域を有するセンサが搭載されれば、水質監視業務への利用が可能である。

統計モデルにより水質を推定には実測データが必須であり、実際に地球観測衛星で水質を監視していく場合には、水質の観測手段は船上による調査ではなく、岸壁やブイなどでの常時監視システム体制を整備することが望まれる。これは1自治体に負う業務ではなく、国の支援が必要であるとともに、東京湾の関連自治体が協力し測定を行う体制が必要となる。

## 6 まとめ

東京湾の関連自治体による共同的取り組みにより、延べ 19 シーンの水質実測値と同期した TM データを取得した。湾岸、沿岸の水質推定の難しさは、Bukata らが明らかにしたように、水中のクロロフィル-a 濃度が低濃度であるか高濃度であるかの違いによって、クロロフィル-a の吸収・反射量が異なるとともに、水中に溶存する有機物質の濃度や懸濁物質濃度によりさらにクロロフィル-a の吸収と反射量との関係が異なってしまうことなどによる。このような複雑な水域に対応できる理論モデルを作成するのは容易ではない。例え理論モデルが構築された場合でも、モデル係数を選択するために必要な光学計測と、推定結果の検証のために実測値も必要となる。それに対して、統計モデルは、実測値を必要条件とするだけであり、水質の推定がきわめて容易である。

今回用いた TM データは陸上観測用のセンサで、バンド幅が広い中での解析結果である。実測値の少ないシーンや、重回帰分析において多重共線性の影響が見られるシーンもあったが、たとえば水温の分布画像とクロロフィル-a 濃度など他の分布画像と比較し、水温変化する境界線と水質変化境界線が一致する様子などが確認できる。COD などの分布図を作成する上でも、衛星画像を利用することで、精度の向上が望める。

ADEOS/AVNIR については、海上観測と同期した観測日は 1 日しかなかったが、LANDSAT/TM と同様な統計モデルを用いることで、同日に観測した LANDSAT/TM より、高い相関値を得ることができた。ALOS/AVNIR-2 でも東京湾の水質モニタリングへの利用が期待される。SPOT/HRV については、画像中央部分を境に、海域の輝度値が異なり、センサに起因した問題の可能性が高く、水質推定することが困難であった。

また、宇宙開発事業団は、地球観測衛星データの精密幾何補正手法などの前処理技術を横浜市環境科学研究所に提供することで、衛星データの行政における定常利用の促進に寄与できた。

今後、更に水質推定精度を向上するために、LANDSAT/TM と同程度の空間分解能をもち、水質情報の抽出に最適な感度とバンド設定がなされたセンサの開発が期待される。また、地球観測衛星データの水質監視業務への実用化の為には、衛星により 1 日 1 回程度の観測がなされることが望まれる。

## おわりに

本共同研究において、東京湾の各調査地点の実測値を衛星データが面的に補完できる可能性が十分あることが分かった。これまでは、各調査地点の実測値から、各水質項目について有識者が推測して東京湾全体のコンターマップを作成してきた。衛星データと海上観測データを組み合わせ解析することで、各水質項目の湾全体の分布状況を一定精度で把握することができ、また、コンターマップと比較しても視覚的に理解しやすいという利点が考えられる。各水質項目の定量的な把握は、大気補正やセンサ性能などの点から現時点では難しいが、半定量的には十分利用できる。

本共同研究の成果として、宇宙開発事業団は、陸域観測技術衛星（ALOS）搭載 AVNIR-2 の予備検討として、ADEOS/AVNIR の解析結果から ALOS/AVNIR-2 でも東京湾の水質監視への利用が期待できることを確認した。また、ここで得た成果は、将来の衛星搭載センサ開発にフィードバック出来るものとする。あわせて、地球観測衛星データの精密幾何補正手法などの前処理技術を提供し、自治体における衛星データの定常利用の促進に寄与できた。

横浜市環境科学研究所は、水質推定モデルを用いてケース別で解析することで、これまでより正確に各水質項目を把握することができた。また、ここでの成果は市民への広報普及活動で広報誌や Web などに利用出来るものとしている。

本共同研究の成果が、他の水域においても検討され、地球観測衛星データによる水質監視の実用化につながれば幸いである。

## 謝辞

研究内容について貴重なご意見を下さった東京大学生産技術研究所教授の安岡善文氏には心から感謝致します。調査に協力して下さった横浜市港湾局海務課及び港務艇「ひばり」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横浜市環境保全局監視センターの鵜東正博氏に深く感謝の意を表します。本研究に協力して下さった（財）リモート・センシング技術センター並びに東京湾岸自治体環境会議の関係の方々にお礼申し上げます。

以上

【参考文献】

- 1) Gordon,H.R., D.K.Clark., J.W.Brown, O.B.Brown, R.H.Evans and W.W.Broenkow: Phytoplankton Pigment Concentration in the Middle Atlantic Bight : Comparison of Ship Determination and Coastal Zone Color Scanner Measurements. *Appl. Optics*, Vol. 22, No.20,pp.20-36,1983.
- 2) 安岡義文,宮崎忠国: 遠隔計測による湖水域の水質分布計測一回帰分析を用いた大気補正と水質推定一,国立公害研究所研究報告,第 39 号,pp.129-143,1983.
- 3) 水尾寛己,二宮勝幸,雫石雅美,多賀保志,安岡義文: 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可能性—,日本リモートセンシング学会誌,Vol.11,No.3,pp.135-139,1991.
- 4) 沖 一雄,安岡善文: 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.1-9,1996.
- 5) 宮崎早苗,灘岡和夫: 光学理論に基づく海域内複数物質濃度の逆推定法,日本リモートセンシング学会誌,Vol.19,No.2,pp.50-63,1999.
- 6) 作野祐司,松永恒雄,中山大介,六川修一,高安克己,國井秀伸,中村幹雄,山室真澄: SPOT/HRV データによるアオコ発生時の宍道湖表層クロロフィル a 濃度分布の推定,日本リモートセンシング学会誌,Vol.19,No.2,pp.20-36,1999.
- 7) Bukata,R.P., Jerome,J.H. ,Kondratyev,K.Ya., Pozdnyakov,D.V.: The Effects of Chlorophyll, Suspended Minerals, and Dissolved Organic Carbon on Volume Reflectance,Optical Properties and Remote Sensing of Inland and Coastal Waters,CRC Press,INC.,pp.135-166,1995.
- 8) 水尾寛己,岡 敬一,小倉久子,二宮勝幸,大道章一,飯村 晃,安藤晴夫,三嶋義人,安岡義文: 人工衛星データによる水質モニタリング—関連自治体による環東京湾プロジェクトの紹介—日本リモートセンシング学会誌,Vol.18,No.3,pp.62-66,1998.
- 9) 水尾寛己,岡 敬一,安岡義文,二宮勝幸,吉見 洋: 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,東京湾の富栄養化に関する調査報告書,横浜市環境研資料 No. 117,pp.113-127,1995.

# 資料

## (1) 海上観測データ及び地球観測衛星データ

	サンプ名	St	WT	Chl-a	Log(Chl_a)	SS(TB)	透明度	RSuTM1	RSuTM2	RSuTM3	RSuTM4	RSuTM5	RSuTM7	RBand6
1	86806y1	1	24.8	38.0	1.58	—	2.1	0.372	0.294	0.138	0.096	0.012	0.002	1.160
2	12	1	25.7	41.0	1.61	—	2.0	0.382	0.293	0.144	0.114	0.017	0.004	1.166
3	14	1	25.3	37.0	1.57	—	1.5	0.376	0.294	0.141	0.105	0.015	0.003	1.163
4	15	1	25.1	51.0	1.71	—	2.3	0.383	0.304	0.149	0.115	0.017	0.005	1.162
5	16	1	23.8	13.0	1.11	—	3.5	0.372	0.283	0.124	0.098	0.011	0.003	1.147
6	17	1	25.0	56.0	1.75	—	1.8	0.388	0.314	0.156	0.128	0.020	0.005	1.166
7	49	1	23.6	12.0	1.08	—	3.0	0.371	0.300	0.131	0.087	0.010	0.002	1.158
8	87302y2	2	9.0	10.0	1.00	—	2.5	0.392	0.308	0.139	0.108	0.013	0.003	0.790
9	3	2	9.0	10.0	1.00	—	2.9	0.389	0.300	0.135	0.115	0.013	0.003	0.789
10	11	2	8.3	8.5	0.93	—	4.0	0.383	0.293	0.135	0.121	0.013	0.003	0.805
11	12	2	8.2	6.9	0.84	—	4.0	0.383	0.302	0.135	0.112	0.015	0.003	0.820
12	14	2	9.4	5.6	0.75	—	4.0	0.381	0.290	0.134	0.098	0.010	0.002	0.811
13	15	2	9.4	5.3	0.72	—	3.5	0.389	0.295	0.134	0.101	0.010	0.002	0.827
14	16	2	11.3	1.7	0.23	—	5.5	0.390	0.300	0.132	0.098	0.011	0.003	0.864
15	17	2	8.5	4.3	0.63	—	4.5	0.391	0.297	0.132	0.104	0.010	0.002	0.834
16	22	2	11.0	1.6	0.20	—	7.0	0.388	0.284	0.122	0.093	0.009	0.001	0.869
17	26	2	9.2	12.2	1.09	—	1.4	0.388	0.310	0.144	0.114	0.011	0.003	0.796
18	89814y1	3	25.1	102.4	2.01	4.8	2.0	0.393	0.340	0.187	0.185	0.031	0.010	1.129
19	3	3	25.2	85.4	1.93	4.3	2.3	0.376	0.311	0.166	0.157	0.024	0.005	1.165
20	4	3	25.0	73.0	1.86	4.3	2.5	0.427	0.352	0.200	0.213	0.038	0.012	1.063
21	6	3	25.8	76.5	1.88	4.0	2.0	0.393	0.325	0.182	0.170	0.029	0.007	1.140
22	7	3	24.9	72.1	1.86	3.3	2.0	0.400	0.326	0.176	0.172	0.029	0.008	1.101
23	8	3	25.1	51.6	1.71	1.5	2.5	0.398	0.334	0.179	0.173	0.028	0.007	1.110
24	9	3	25.1	60.5	1.78	2.5	2.0	0.410	0.344	0.191	0.189	0.033	0.009	1.110
25	10	3	24.8	48.1	1.68	1.3	2.8	0.387	0.314	0.160	0.154	0.024	0.006	1.124
26	90222y1	4	10.5	8.0	0.90	4.1	2.3	0.447	0.368	0.181	0.149	0.012	0.003	0.844
27	2	4	10.5	20.3	1.31	4.4	2.4	0.409	0.340	0.153	0.135	0.012	0.003	0.830
28	4	4	10.5	13.9	1.14	3.8	2.5	0.428	0.360	0.178	0.139	0.014	0.002	0.830
29	5	4	11.5	10.1	1.00	3.0	3.2	0.406	0.315	0.143	0.126	0.011	0.002	0.850
30	6	4	10.3	14.4	1.16	3.5	3.0	0.400	0.326	0.153	0.119	0.011	0.001	0.830
31	7	4	10.5	15.0	1.18	3.7	3.2	0.414	0.331	0.164	0.142	0.013	0.005	0.830
32	8	4	11.5	9.6	0.98	4.0	3.0	0.435	0.362	0.171	0.141	0.013	0.002	0.837
33	9	4	10.8	13.9	1.14	2.9	3.2	0.426	0.335	0.165	0.137	0.013	0.003	0.837
34	10	4	11.1	14.4	1.16	3.9	3.0	0.428	0.346	0.167	0.141	0.014	0.002	0.837
35	90427y1	5	16.4	23.0	1.36	5.7	1.8	0.493	0.461	0.265	0.249	0.039	0.012	1.008
36	2	5	16.5	50.2	1.70	9.8	1.5	0.503	0.460	0.271	0.274	0.046	0.013	0.994
37	3	5	16.5	24.0	1.38	7.1	2.0	0.464	0.438	0.241	0.229	0.038	0.010	1.001
38	4	5	17.0	33.1	1.52	7.0	2.3	0.470	0.426	0.251	0.252	0.045	0.013	0.994
39	5	5	16.6	70.5	1.85	11.5	1.5	0.460	0.416	0.244	0.241	0.039	0.012	0.994
40	6	5	16.6	75.3	1.88	14.0	1.5	0.444	0.401	0.228	0.231	0.035	0.010	0.994
41	7	5	16.0	78.0	1.89	12.9	1.7	0.468	0.418	0.249	0.246	0.042	0.014	0.987
42	8	5	16.6	61.9	1.79	11.2	1.6	0.480	0.456	0.265	0.267	0.039	0.011	0.987
43	9	5	16.2	52.5	1.72	11.8	1.8	0.460	0.413	0.238	0.237	0.038	0.011	0.987
44	10	5	16.2	48.1	1.68	8.6	2.2	0.475	0.443	0.261	0.262	0.040	0.011	0.987
45	90529y2	6	20.5	162.0	2.21	17.5	0.9	0.378	0.310	0.179	0.179	0.027	0.007	1.069
46	3	6	20.0	126.0	2.10	12.2	1.0	0.350	0.285	0.154	0.147	0.020	0.006	1.049
47	4	6	20.1	46.7	1.67	10.8	1.7	0.352	0.276	0.145	0.128	0.014	0.004	1.042
48	5	6	20.3	42.7	1.63	10.1	1.7	0.344	0.274	0.141	0.128	0.017	0.004	1.042
49	6	6	20.3	45.3	1.66	7.7	1.9	0.347	0.275	0.150	0.133	0.018	0.005	1.042

	サンプル名	St	WT	Chl-a	Log(Chl_a)	SS(TB)	透明度	RSuTM1	RSuTM2	RSuTM3	RSuTM4	RSuTM5	RSuTM7	RBand6
50	7	6	21.0	40.9	1.61	5.9	1.5	0.355	0.288	0.157	0.142	0.019	0.005	1.055
51	8	6	19.8	74.8	1.87	6.1	2.3	0.352	0.279	0.146	0.134	0.021	0.005	1.035
52	9	6	20.6	28.5	1.46	10.6	1.1	0.352	0.283	0.149	0.129	0.019	0.006	1.055
53	901105y1	7	19.1	6.0	0.78	1.8	2.0	0.340	0.247	0.105	0.081	0.008	0.001	0.984
54	2	7	19.2	20.8	1.32	2.6	2.3	0.340	0.243	0.117	0.087	0.012	0.003	0.962
55	3	7	19.6	10.0	1.00	2.3	1.9	0.337	0.247	0.109	0.081	0.006	0.001	0.995
56	4	7	19.6	9.6	0.98	2.0	1.7	0.352	0.255	0.117	0.089	0.010	0.003	1.004
57	5	7	19.3	4.8	0.68	2.2	2.8	0.326	0.229	0.101	0.079	0.007	0.002	0.987
58	6	7	19.3	15.0	1.18	3.0	2.0	0.322	0.229	0.104	0.075	0.005	0.001	0.988
59	7	7	19.3	21.9	1.34	3.6	2.5	0.337	0.229	0.111	0.083	0.007	0.001	0.986
60	8	7	19.6	6.4	0.81	2.6	3.3	0.331	0.250	0.105	0.077	0.004	0.001	0.999
61	9	7	19.4	14.4	1.16	2.8	2.5	0.336	0.231	0.100	0.067	0.004	0.000	0.992
62	10	7	19.6	11.7	1.07	1.4	3.5	0.335	0.233	0.105	0.063	0.005	-0.001	1.001
63	92603y1	8	20.7	16.0	1.20	3.4	1.3	0.435	0.395	0.232	0.230	0.024	0.005	1.090
64	3	8	22.0	484.0	2.69	26.0	0.5	0.421	0.372	0.213	0.237	0.023	0.005	1.110
65	4	8	20.5	144.0	2.16	11.0	2.2	0.423	0.363	0.210	0.230	0.021	0.003	1.090
66	5	8	21.3	35.6	1.55	7.6	1.0	0.411	0.358	0.202	0.198	0.020	0.003	1.096
67	6	8	21.4	69.4	1.84	10.8	0.9	0.429	0.372	0.216	0.231	0.020	0.004	1.110
68	7	8	21.5	11.6	1.06	3.8	1.5	0.407	0.349	0.197	0.203	0.021	0.005	1.090
69	8	8	21.4	300.0	2.48	19.5	0.5	0.435	0.381	0.227	0.263	0.024	0.005	1.090
70	9	8	21.2	11.6	1.06	3.5	2.0	0.375	0.301	0.165	0.159	0.017	0.003	1.076
71	10	8	21.0	24.0	1.38	4.0	1.5	0.421	0.368	0.214	0.223	0.024	0.006	1.090
72	93521y	9	18.2	29.5	1.47	7.6	1.4	0.357	0.307	0.176	0.165	0.026	0.007	0.997
73	T3	9	17.9	66.6	1.82	13.5	1.2	0.352	0.307	0.165	0.152	0.019	0.005	0.999
74	T4	9	18.0	54.0	1.73	14.2	1.2	0.364	0.312	0.181	0.177	0.027	0.008	1.001
75	T5	9	18.3	16.2	1.21	3.2	2.5	0.351	0.290	0.155	0.133	0.015	0.003	0.999
76	T6	9	17.8	21.2	1.33	4.3	2.4	0.353	0.308	0.162	0.153	0.023	0.005	1.000
77	T7	9	17.5	32.2	1.51	4.1	1.4	0.361	0.309	0.169	0.157	0.024	0.006	0.986
78	T8	9	17.8	63.0	1.80	7.2	1.5	0.372	0.314	0.178	0.176	0.023	0.007	0.976
79	T9	9	17.9	25.3	1.40	4.3	2.0	0.361	0.308	0.169	0.161	0.022	0.005	0.980
80	T10	9	18.0	40.6	1.61	7.0	1.8	0.372	0.319	0.179	0.176	0.024	0.006	0.980
81	93521c	9	19.1	69.6	1.84	20.3	1.1	0.361	0.315	0.177	0.166	0.023	0.006	1.007
82	C2	9	19.4	45.6	1.66	9.8	1.5	0.375	0.340	0.189	0.194	0.028	0.008	1.019
83	C3	9	18.5	82.7	1.92	13.3	1.3	0.350	0.298	0.167	0.165	0.020	0.004	1.003
84	C4	9	19.2	64.6	1.81	15.4	1.4	0.346	0.287	0.155	0.147	0.013	0.003	1.001
85	C5	9	19.2	86.1	1.94	16.1	1.2	0.346	0.292	0.162	0.152	0.015	0.003	1.008
86	C6	9	18.4	75.5	1.88	22.3	1.2	0.339	0.285	0.154	0.151	0.014	0.003	1.010
87	C8	9	18.9	65.3	1.82	15.1	1.3	0.353	0.306	0.174	0.165	0.028	0.007	0.997
88	C9	9	18.9	51.4	1.71	10.2	1.2	0.337	0.290	0.153	0.131	0.015	0.003	1.014
89	C10	9	18.7	51.9	1.72	12.8	1.3	0.346	0.296	0.162	0.152	0.021	0.005	1.001
90	C11	9	18.2	106.5	2.03	26.1	1.3	0.341	0.300	0.168	0.139	0.014	0.003	1.013
91	C13	9	17.4	5.2	0.72	—	6.0	0.366	0.310	0.166	0.151	0.020	0.005	0.979
92	C14	9	17.9	19.4	1.29	—	2.0	0.361	0.309	0.171	0.160	0.022	0.005	0.993
93	C15	9	17.4	20.4	1.31	—	2.0	0.360	0.300	0.164	0.157	0.023	0.006	0.978
94	93910y3	10	24.0	42.4	1.63	4.8	1.9	0.334	0.271	0.141	0.104	0.009	0.002	1.004
95	4	10	24.4	40.7	1.61	4.6	1.7	0.343	0.281	0.146	0.112	0.010	0.001	1.008
96	5	10	25.0	43.0	1.63	5.1	1.7	0.337	0.268	0.137	0.099	0.009	0.001	1.009
97	6	10	25.4	28.0	1.45	3.5	1.8	0.321	0.257	0.128	0.092	0.008	0.001	1.012
98	7	10	24.5	35.5	1.55	4.5	1.8	0.327	0.263	0.132	0.095	0.007	0.001	1.001
99	94422y1	11	15.3	34.9	1.54	4.7	2.3	0.377	0.317	0.184	0.171	0.026	0.007	1.026

	サンプル名	St	WT	Chl-a	Log(Chl_a)	SS(TB)	透明度	RSuTM1	RSuTM2	RSuTM3	RSuTM4	RSuTM5	RSuTM7	RBand6
100	2	11	15.2	38.4	1.58	5.2	2.2	0.360	0.294	0.166	0.159	0.021	0.005	1.002
101	3	11	14.8	15.4	1.19	2.6	3.0	0.370	0.308	0.176	0.164	0.023	0.006	1.004
102	4	11	14.8	29.4	1.47	3.7	2.8	0.370	0.305	0.175	0.163	0.024	0.006	1.013
103	5	11	14.5	10.8	1.03	1.9	4.5	0.364	0.296	0.167	0.162	0.024	0.006	0.996
104	6	11	15.0	26.1	1.42	3.1	2.8	0.374	0.312	0.178	0.164	0.021	0.005	1.009
105	7	11	15.0	36.5	1.56	3.6	2.3	0.375	0.308	0.175	0.167	0.023	0.006	1.012
106	950815y1	12	27.0	29.8	1.47	4.6	2.3	0.353	0.255	0.133	0.089	0.009	0.002	1.055
107	Y2	12	27.7	20.8	1.32	4.0	2.3	0.358	0.267	0.140	0.101	0.009	0.002	1.055
108	Y3	12	27.7	16.1	1.21	3.8	2.5	0.348	0.243	0.133	0.087	0.009	0.001	1.062
109	Y4	12	27.0	20.2	1.31	3.3	2.3	0.353	0.243	0.133	0.095	0.009	0.001	1.062
110	Y5	12	27.8	19.4	1.29	3.8	2.2	0.353	0.255	0.133	0.089	0.012	0.002	1.062
111	Y6	12	27.7	24.9	1.40	3.6	2.5	0.358	0.255	0.133	0.097	0.012	0.001	1.069
112	Y7	12	28.0	34.2	1.53	4.2	2.5	0.358	0.255	0.133	0.102	0.012	0.002	1.055
113	970108C1	13	11.6	6.6	0.82	—	3.8	0.479	0.337	0.215	0.157	0.018	0.001	0.871
114	C3	13	—	5.3	0.72	—	3.0	0.460	0.337	0.202	0.169	0.025	0.000	0.857
115	C4	13	11.3	8.1	0.91	—	3.7	0.460	0.315	0.202	0.174	0.017	-0.001	0.871
116	C7	13	—	8.1	0.91	—	3.0	0.451	0.315	0.202	0.162	0.020	0.001	0.871
117	C8	13	—	11.5	1.06	—	3.8	0.432	0.315	0.189	0.164	0.021	-0.001	0.871
118	C9	13	—	12.0	1.08	—	3.5	0.432	0.315	0.189	0.147	0.014	0.000	0.871
119	C13	13	—	9.7	0.99	—	4.0	0.432	0.315	0.189	0.152	0.021	0.001	0.871
120	C99	13	10.2	7.6	0.88	3.8	2.9	0.460	0.337	0.215	0.172	0.015	0.000	0.857
121	97414c1	14	14.4	10.6	1.03	4.5	1.9	0.464	0.374	0.283	0.234	0.028	0.003	0.926
122	3	14	15.1	15.2	1.18	11.8	1.8	0.464	0.385	0.292	0.243	0.022	0.003	0.926
123	4	14	14.0	8.4	0.92	3.6	2.6	0.459	0.356	0.270	0.228	0.026	0.003	0.913
124	8	14	14.2	4.4	0.64	3.0	2.8	0.453	0.349	0.262	0.212	0.023	0.002	0.928
125	99	14	14.8	14.9	1.17	4.5	2.0	0.454	0.365	0.275	0.230	0.024	0.003	0.928
126	990114y2	15	10.3	14.8	1.17	0.9	5.0	0.437	0.334	0.188	0.119	0.019	0.003	0.864
127	Y4	15	11.0	6.6	0.82	0.6	4.5	0.437	0.313	0.175	0.115	0.019	0.003	0.850
128	Y5	15	11.1	5.9	0.77	0.5	6.0	0.428	0.313	0.175	0.096	0.016	0.002	0.850
129	000218y1	16	9.7	15.9	1.20	0.6	5.0	0.367	0.233	0.121	0.112	0.010	0.001	0.850
130	Y2	16	9.7	17.2	1.24	0.9	4.5	0.360	0.233	0.111	0.108	0.007	0.002	0.844
131	Y3	16	9.5	17.6	1.25	1.1	4.5	0.360	0.216	0.111	0.106	0.007	0.002	0.850
132	Y4	16	9.9	14.1	1.15	1.1	5.5	0.367	0.250	0.121	0.114	0.010	0.003	0.857
133	Y5	16	10.0	22.3	1.35	1.7	4.0	0.360	0.233	0.121	0.110	0.007	0.001	0.857
134	Y7	16	10.1	15.9	1.20	1.3	4.5	0.367	0.233	0.111	0.110	0.008	0.001	0.857
135	000524Y1	17	20.6	32.8	1.52	3.5	3.0	0.436	0.340	0.198	0.216	0.023	-0.001	0.987
136	Y2	17	20.3	67.6	1.83	8.4	2.2	0.432	0.340	0.198	0.216	0.021	0.000	0.994
137	Y3	17	20.0	14.0	1.15	1.6	3.5	0.418	0.319	0.185	0.193	0.018	0.000	0.987
138	Y4	17	20.1	13.1	1.12	0.9	4.0	0.432	0.340	0.198	0.216	0.023	0.001	0.987
139	Y5	17	18.9	18.7	1.27	1.7	4.0	0.418	0.319	0.185	0.193	0.023	-0.001	0.980
140	Y6	17	19.4	21.5	1.33	2.3	3.0	0.436	0.351	0.204	0.228	0.029	0.000	0.973
141	Y7	17	20.0	37.5	1.57	1.1	3.0	0.454	0.351	0.216	0.240	0.031	-0.001	0.987
142	000524C1	17	20.4	94.7	1.98	8.3	1.0	0.503	0.415	0.260	0.287	0.031	0.000	0.994
143	C3	17	21.5	90.2	1.96	9.0	0.9	0.481	0.404	0.248	0.264	0.026	0.000	1.008
144	C4	17	20.4	82.5	1.92	6.6	1.0	0.467	0.383	0.235	0.252	0.026	0.000	1.008
145	C9	17	19.9	42.1	1.62	3.8	1.7	0.459	0.372	0.223	0.252	0.029	-0.001	1.008
146	C13	17	19.4	17.4	1.17	1.7	3.3	0.445	0.351	0.210	0.228	0.026	0.000	0.987
147	C99	17	21.3	88.1	1.95	5.5	1.1	0.481	0.394	0.248	0.264	0.029	-0.002	1.008
148	000711Y1	18	25.1	90.7	1.96	15.2	1.0	0.341	0.268	0.149	0.123	0.011	0.002	1.049
149	Y2	18	26.0	80.1	1.90	14.7	1.2	0.350	0.279	0.156	0.123	0.012	0.002	1.055



	サンプル名	St	WT	Chl-a	Log(Chl_a)	SS(TB)	透明度	RSuTM1	RSuTM2	RSuTM3	RSuTM4	RSuTM5	RSuTM7	RBand6
150	Y4	18	25.5	126.0	2.10	16.5	1.0	0.328	0.236	0.137	0.112	0.009	0.002	1.049
151	Y6	18	24.9	48.0	1.68	7.6	1.3	0.341	0.247	0.137	0.123	0.013	0.003	1.062
152	Y7	18	25.1	125.0	2.10	13.2	1.0	0.359	0.268	0.156	0.135	0.015	0.002	1.055
153	000711C1	18	25.9	89.4	1.95	10.9	0.9	0.341	0.258	0.143	0.112	0.005	0.001	1.055
154	C3	18	26.9	147.5	2.17	11.7	0.8	0.332	0.236	0.137	0.123	0.008	0.001	1.069
155	C4	18	24.7	53.5	1.73	8.1	0.9	0.337	0.247	0.137	0.112	0.007	0.000	1.062
156	C7	18	27.6	134.1	2.13	9.8	0.9	0.337	0.247	0.137	0.135	0.011	0.003	1.076
157	C8	18	25.9	59.0	1.77	8.2	0.9	0.369	0.279	0.162	0.135	0.007	0.000	1.055
158	C9	18	25.9	42.8	1.63	5.0	1.5	0.314	0.225	0.124	0.100	0.008	0.001	1.062
159	C13	18	24.5	62.2	1.79	5.7	0.9	0.323	0.236	0.124	0.112	0.005	0.000	1.062
160	C99	18	26.6	47.8	1.68	9.8	1.0	0.314	0.225	0.118	0.112	0.004	0.001	1.083
161	000828Y1	19	27.4	15.5	1.19	3.3	2.0	0.403	0.295	0.157	0.149	0.009	0.002	1.035
162	Y2	19	29.3	22.9	1.36	2.0	2.5	0.413	0.295	0.164	0.162	0.012	0.003	1.042
163	Y4	19	28.5	57.1	1.76	5.5	2.0	0.423	0.318	0.170	0.162	0.013	0.003	1.028
164	Y6	19	27.4	49.9	1.70	5.8	2.0	0.442	0.330	0.184	0.188	0.017	0.002	1.042
165	000828C1	19	28.9	37.9	1.58	3.2	2.5	0.398	0.295	0.157	0.149	0.010	0.001	1.049
166	C3	19	29.8	63.1	1.80	5.2	1.8	0.408	0.318	0.170	0.162	0.012	0.002	1.042
167	C4	19	29.3	28.1	1.45	3.1	2.4	0.398	0.295	0.157	0.149	0.010	0.002	1.049
168	C7	19	30.9	30.4	1.48	3.2	1.7	0.423	0.330	0.184	0.175	0.010	0.002	1.049
169	C8	19	28.0	13.9	1.14	2.2	3.0	0.408	0.307	0.164	0.162	0.010	0.002	1.042
170	C9	19	29.7	18.7	1.27	1.8	2.8	0.413	0.307	0.170	0.162	0.010	0.002	1.042
171	C13	19	29.0	15.6	1.19	2.1	3.1	0.423	0.318	0.170	0.162	0.015	0.003	1.042
172	C99	19	29.3	55.3	1.74	3.0	2.1	0.398	0.295	0.164	0.162	0.008	0.000	1.049

\*RSu～のRは絶対放射輝度への変換を、Suは太陽高度角の補正を表す。B6についてはRの変換のみ行う。

(2) 太陽高度角データ

各センサ観測時の太陽高度角（単位：度）を以下に示す。

観測日	LANDSAT/TM	ADEOS/AVNIR	SPOT/HRV
'86.08.06	57		
'87.03.02	36		
'90.04.27	55		
'90.05.29	60		
'90.11.05	33		
'92.06.03	62		
'93.05.21	60		
'93.09.10	50		
'94.04.22	54		
'95.08.15	52		
'97.01.08	25		
'97.04.14	53	61	
'99.01.14	27		
'00.02.18	34		
'00.05.24	63		
'00.07.11	62		67.5
'00.08.28	54		59.8

「地球観測衛星データを利用した東京湾の水質モニタリング手法開発に関する共同研究  
 成果報告書」正誤表

P25	図 5-7	誤	図 5-7	クロロフィル a と濁度との関係
		正	図 5-7	クロロフィル a と透明度との関係
P26	図 5-8	誤	図 5-8	クロロフィル a と透明度との関係
		正	図 5-8	クロロフィル a と濁度との関係
P45	図 5-20	誤	バンド 1 の反射輝度値(mw/cm <sup>2</sup> sr)	
		正	バンド 4 の反射輝度値(mw/cm <sup>2</sup> sr)	
P57	図 5-35	図の中		
		誤	50 μg/m <sup>3</sup> 以下 Case1~3	正 エアロゾル濃度均一 (SPM 50 μg/m <sup>3</sup> 以下目安)
		誤	50 μg/m <sup>3</sup> 以上 Case4、5	正 エアロゾル濃度不均一 (SPM 50 μg/m <sup>3</sup> 以上目安)

---

地球観測衛星データを利用した  
東京湾の水質モニタリング手法開発に関する  
共同研究 成果報告書  
平成 13 年 7 月

製 作 宇宙開発事業団  
横浜市環境科学研究所  
編 集 (財) リモート・センシング技術センター  
編集協力 神奈川県環境科学センター  
発 行 宇宙開発事業団  
〒105-8060 東京都港区浜松町 2-4-1  
世界貿易センタービル  
Tel 03-3438-6347(代)

---