

2002 年度修士論文

分光放射計を用いた  
水面におけるクロロフィル濃度の評価

Spectroradiometer Evaluation of Water Surface Chlorophyll  
Concentration

2003 年 1 月

指導教員 村上雅博

高知工科大学大学院工学研究科基盤工学専攻社会システム工学コース

1055143 佐藤博信

## 要旨

衛星デジタルデータは、地球上の広範なエリアの環境情報の把握に有用な方法である。水域のクロロフィル濃度推定に関しても、衛星デジタルデータを用いたクロロフィル濃度分布の推定の研究が行われている。

本研究の目的は、水面のクロロフィル濃度の推定に適した波長域を、分光放射計を用いて同定することが目的である。

実験では、はじめに、分光放射計と水質測定機器を利用し、淡水と海水中のクロロフィル濃度を測定した。異なったサンプルのクロロフィル濃度の溶液を、ホテイアオイの絞り汁を用いて作成した。また、光源としては、ノイズの混入を避けるため、ハロゲンライトを用いた。

次に、分光反射率を、band 1(450~520nm)、band 2 (520~600 nm),band 3(630~690nm)、band 4(750~900nm)、band 5(1550~1750nm)、band 7(2080~2350nm)の6種類のband域に分類し、それぞれのband域の平均分光反射率を求めた。これらの6つのバンド域はLandsat 7/ETM+データに対応している。

最後に、それぞれのバンド域の分光反射率同士の比演算、及び、NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)を算出した。そして、クロロフィル濃度と算出した比演算の値 (NDVIを含む)を独立変数として、クロロフィル濃度との相関を解析した。

その結果、クロロフィル濃度推定に適した独立変数は、淡水の場合は  $R_{\text{band2}}/R_{\text{band1}}$  と、海水の場合は  $R_{\text{band4}}/R_{\text{band1}}$  及び  $(R_{\text{band4}}-R_{\text{band5}})/R_{\text{band1}}$  であり、淡水と海水では、クロロフィル濃度推定に適した独立変数は異なることが明らかになった。

今後の課題として、この結果を衛星リモートセンシングに適用する場合、大気中のエアロゾルの影響を考慮し、上記結果の有効性を再評価する必要があると考えられる。

キーワード：クロロフィル濃度，分光反射率，分光放射計，Landsat 7/ETM

# Spectroradiometer Evaluation of Water Surface Chlorophyll Concentration

SATO Hironobu

## ABSTRACT

The satellite digital data is one of the most useful information to evaluate the environmental conditions on the large extent area of the earth. The research of estimating chlorophyll concentration in the water surface has been carried out by using remote sensing technology including Landsat-7 Enhanced Thematic Mapper (ETM) Plus multispectral digital data.

This study aims to identify the optimal spectral reflectance range of chlorophyll concentration in the water surface using a spectroradiometer.

First, in the experiments, chlorophyll concentration and spectral reflectance were measured in fresh lake water and seawater in Kochi Prefecture, using both a spectroradiometer and a water quality monitoring sonde. Squeezed water hyacinth was adapted to prepare the standard sample with different chlorophyll concentration. Halogen light was used to avoid the influence of spectral contamination.

Secondly, the spectral reflectances were divided into 6 bands, namely, band 1 (450~520nm), band 2 (520~600nm), band 3 (630~690nm), band 4 (750~900nm), band 5 (1550~1750nm) and band 7 (2080~2350nm), to calculate the average of spectral reflectances on each band. These 6 bands correspond to the band range of Landsat-7/ETM Plus multispectral digital data.

Third, the ratios of spectral reflectance on each band, NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) were calculated to analyze the correlation of chlorophyll concentration with the ratio of spectral reflectance on each band like  $\text{Ref}_{\text{band}i}/\text{Ref}_{\text{band}j}$ ,  $(\text{Ref}_{\text{band}i} - \text{Ref}_{\text{band}j})/(\text{Ref}_{\text{band}i} + \text{Ref}_{\text{band}j})$ , etc; “ $\text{Ref}_{\text{band}i}$ ” refers to “Reflectance of band  $i$ ”.

In conclusion, this study demonstrates that fresh water and seawater is different in terms of the independent variables suitable for estimating chlorophyll concentration. That is to say, it was found that, as for the independent variables suitable for estimating chlorophyll concentration, they are  $R_{\text{band}2}/R_{\text{band}1}$  and  $(R_{\text{band}4}-R_{\text{band}5})/R_{\text{band}1}$  in the case of fresh water, whereas they are  $R_{\text{band}4}/R_{\text{band}1}$  and  $(R_{\text{band}4}-R_{\text{band}5})/R_{\text{band}1}$  in the case of seawater.

It is still necessary to reevaluate the results of the experiments in this study by taking into account of the effect of aerosol in the atmosphere, in case of applying this method to satellite remote sensing.

Keywords: Chlorophyll concentration, Spectral reflectance, Spectroradiometer, Landsat-7

## 目次

### 第1章 研究概要

- 1-1 研究背景及び研究目的
- 1-2 研究の構成

### 第2章 既存研究のレビュー

- 2-1 人為的富栄養化現象とクロロフィルの関係
- 2-2 クロロフィル a 濃度推定モデルに関する既存研究
  - 2-2-1 Landsat/TM を用いた長崎県大村湾の事例
  - 2-2-2 海色データを用いた長崎県大村湾の事例
  - 2-2-3 東京湾の事例
  - 2-2-4 島根県宍道湖・中海の事例
  - 2-2-5 霞ヶ浦での分光反射率と各種水質指標との相関に関する研究
- 2-3 人工衛星による植生分布の把握手法
- 2-4 レビューに関する考察

### 第3章 分光反射率を用いた淡水中のクロロフィル濃度推定モデルの開発

- 3-1 実験方法
  - 3-1-1 実験装置
  - 3-1-2 実験手順
  - 3-1-3 クロロフィル測定法
  - 3-1-4 分光反射率の測定法
  - 3-1-5 サンプル水の採水場所及び水質
- 3-2 実験結果
- 3-3 モデル解析
  - 3-3-1 解析方法
  - 3-3-2 解析結果
  - 3-3-3 解析の考察

## 第4章 分光反射率を用いた海水中のクロロフィル濃度推定モデルの開発

### 4-1 海水の成分組成

### 4-2 実験方法及び解析方法

#### 4-2-1 サンプル水の採水場所及び水質

### 4-3 実験結果

### 4-4 モデル解析

#### 4-4-1 解析結果

#### 4-4-2 解析の考察

## 第5章 実験のまとめと今後の展望

謝辞

Appendix

## 第1章 研究概要

### 1-1 研究背景及び研究目的

富栄養化とは、湖沼の栄養塩類濃度の増加により貧栄養湖から富栄養湖に遷移するプロセスであり、一般に数万年～数百万年かかる<sup>1)</sup>。しかし、近年、生活排水、工場排水、農業排水など、人間活動に由来する排水の閉鎖系湖沼及び閉鎖系海域への流入の増加により、水中の窒素(N)、リン(P)などの栄養塩類濃度が急速に上昇し、その結果、植物プランクトンが急速に増加する人為的富栄養化が見られるようになった<sup>2)</sup>。この人為的富栄養化に伴い、水道水の異臭、漁業への影響、透明度の低下、赤潮等の問題が生じ<sup>3)</sup>、対策が必要となった。

そこで、環境省は、人為的富栄養化が発生しやすい内湾、内海及び湖沼等の閉鎖性水域に関しては、富栄養化の防止を図るために、窒素及びリンに係る排水基準を設定するなど、富栄養化対策を視野に入れた排水規制を行っている<sup>4)</sup>。また、水域の栄養塩類を含む底泥の浚渫や覆砂、礫間接触酸化法による水質浄化施設の設置などの対策がとられているところもある<sup>5)</sup>。しかし、湖沼に流入する汚濁負荷の発生源の影響の度合いは、流域の土地利用や産業構造によって異なるため、全国一律の対策は困難であり<sup>3)</sup>、地域ごとに個別に対策を考える必要がある。

富栄養化防止対策として水域への栄養塩類の流入規制を効率的に行う場合には、富栄養化が問題となっていなかった過去の年代と、富栄養化が問題となっている現在の、水域への栄養塩類流入量の比較を行うことが必要である。また、あわせて富栄養化の進行の変遷を把握することが重要である。その際、該当する水域のある部分の富栄養化の進行のみを測定しただけでは不十分で、該当する水域全体の富栄養化の進行具合を把握することが必要である。

一般に、広範なエリアの自然環境情報を把握するには、Landsat、NOAAなどの衛星デジタルデータの利用が適している。富栄養化に関連する水質指標として窒素、リン、クロロフィル a、Algal growth potential (AGP)が用いられるが<sup>6)</sup>、クロロフィルは0.45  $\mu\text{m}$  と0.65  $\mu\text{m}$ の波長域を選択的に吸収することが知られている<sup>7)</sup>。従って、衛星デジタルデータを用いたクロロフィル濃度推定モデルが、実際の水域のグランド・トゥルスデータと対比させて開発された例がある。しかし、大気の影響を無視した段階で、純粋に海水と淡水において、Landsat7/ETM データ（以下、ETM データ）の、どの band がクロロフィル濃度把握に適しているかを把握することが、ETM データを用いたクロロフィル濃度を把握する技術を確立するためには必要である。

本研究では、上記を踏まえ、ETMデータを用いた水面のクロロフィル濃度を推定する手法を開発する基礎段階として、実験室にて分光放射計を用いて、クロロフィル濃度を推定するのに適した波長の組み合わせを明らかにした。

## 1-2 研究の構成

第 2 章では、人為的富栄養化の発生メカニズム、及び、人工衛星を用いたクロロフィル a 濃度推定モデルに関する既存研究、水中のクロロフィル a 濃度の分光反射特性に関する研究について整理する。

第 3 章では、実験室レベルにて、実際の湖沼に存在する淡水を用いて、クロロフィル濃度を上昇させ、クロロフィル濃度と分光放射計による各波長域の平均化した分光反射率比との相関関係について把握し、淡水中のクロロフィル濃度推定に適した band の組み合わせを検討する。

第 4 章では、第 3 章とは違い、海水中のクロロフィル濃度推定に適した band の組み合わせを検討する。

第 5 章では、本研究のまとめ、及び、本研究の今後の展望について述べる(図 1-1)。

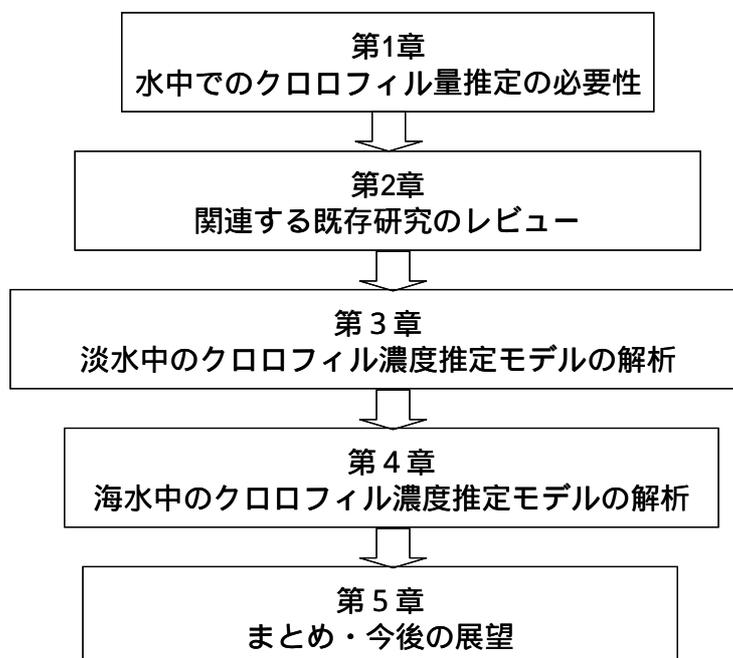


図 1-1 研究の流れ

## 第2章 既存研究のレビュー

### 2-1 人為的富栄養化現象とクロロフィルの関係

人為的富栄養化は、生活排水、農業排水、工業排水中に含有する栄養塩類が閉鎖系水域に過剰に流入することにより発生する<sup>2)</sup>。富栄養化により栄養塩が蓄積されると植物プランクトンが発生し、アオコ・赤潮の発生や、浄水場でのろ過障害、植物プランクトンが放出する悪臭や毒素の原因となる<sup>8)</sup>。

クロロフィルは、富栄養化による植物プランクトン量の指標となるが、クロロフィルには a, b, c, d の 4 種類存在し、通常はクロロフィル a のみが測定対象となる<sup>9)</sup>。

### 2-2 クロロフィル a 濃度推定モデルに関する既存研究

過去における衛星データを用いたクロロフィル a 濃度推定は、長崎県大村湾、島根県宍道湖・中海、東京湾、霞ヶ浦などで行われている（図 2-2）。



図 2-2 大村湾，東京湾，霞ヶ浦及び宍道湖・中海の位置

### 2-2-1 Landsat/TM を用いた長崎県大村湾の事例

Wouthuyzen<sup>10)</sup>によると、長崎県大村湾のクロロフィル a 濃度推定モデルは、式 2-1 により表される。

$$Chla[\mu g \cdot l^{-1}] = \begin{cases} 21.279(band2/band1) - 0.908 & (\text{for spring}) \\ 10.359(band2/band1) - 2.355 & (\text{for summer}) \\ 28.899(band2/band1) - 9.596 & (\text{for autumn}) \\ 30.544(band2/band1) - 7.684 & (\text{for winter}) \end{cases} \dots \dots \dots (\text{式2-1})^{10)}$$

*Chla* : クロロフィル濃度

*band1* , *band2* : それぞれ Landsat-TM データによる *band1* , *band2* の大気補正後の値

### 2-2-2 海色データを用いた長崎県大村湾の事例

石坂 *et.al.*<sup>11)</sup>は、大村湾にて、クロロフィル a 濃度のグラントゥールースデータと、ADEOS/OCTS バージョン 4 と SeaWiFS バージョン 2 で推定したクロロフィル a 濃度の比較を行った。解析の結果、ADEOS/OCTS バージョン 4 及び SeaWiFS バージョン 2 は、いずれも、大村湾のクロロフィル a 濃度を約 10 倍程度、過大評価をしたことが報告されている。

### 2-2-3 東京湾の事例

水尾 *et.al.*<sup>12)</sup>は、東京湾をフィールドとして、従来から水質情報がないと思われていた中間赤外域 (TM データでは *band5* 及び *band7* に相当する) の波長域がクロロフィル a 濃度と関連する傾向を示したと報告している。

この中で、TM データを用いてクロロフィル a 濃度を推定する場合、*band5* は *band2* , *band3* と比較して濁りの影響を受けにくいことが報告されている。

### 2-2-4 島根県宍道湖・中海の事例

作野 *et.al.*<sup>13)</sup>は、島根県宍道湖・中海をフィールドとして、現場のクロロフィル a 濃度と、可視・近赤外域の分光反射率データの平均値より求めた擬似 ASTER データとの相関関係を調べた。この研究では、クロロフィル a 濃度及び分光反射率データは、2001 年に観測されたものを用いている。その結果、ASTER の *band1*(520~600nm)と *band2*(630~690nm)に対応する分光反射率データの比と、クロロフィル濃度の対数値に相関があることを明らかにした(式 2-2)。しかし、2001 年 7 月の 1 データを削除した場合、相関は著しく悪くなるとも述べており、今後のデータセットの蓄積により、両者の相関についてさらに議論する必要があると指摘している。

$$\ln Chla[\mu g \cdot l^{-1}] = 3.41 - 0.56(band1 / band2) \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (式 2-2)^{13)}$$

( 相関係数=-0.65 )

*band1* , *band2* : それぞれ , 擬似 ASTER データの *band1* , *band2* の値

また , 作野 *et.al.*<sup>14,15)</sup>は , 同じく宍道湖・中海において , HRV *band1* (XS1, 0.50~0.59 μ m)と HRV *band2* (XS2, 0.61~0.68 μ m)の比演算モデルがクロロフィル a 濃度の推定に有効であると報告している(式 2-3) .

$$Chla[\mu g \cdot l^{-1}] = a(XS1 / XS2) + b \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (式 2-3)^{14,15)}$$

XS1, XS2: 暗画素法による大気補正後の SPOT/HRV データの値

*a*, *b* はそれぞれ定数

## 2-2-5 霞ヶ浦での分光反射率と各種水質指標との相関に関する研究

岡見 *et.al.*<sup>16)</sup>は , 霞ヶ浦湖水の分光反射率とクロロフィル a 量 , 透明度 , SS など水質との相関解析を行い , 遠隔計測によって湖水の水質を定量的に求めるための最適波長とアルゴリズムを検討している .

この研究の中で , 岡見 *et.al.*<sup>16)</sup>は , 1)~4)のように報告している .

- 1) 水面の分光反射率 *R* と水質の単相関は , いずれの水質に対しても , 720nm 付近の波長で相関が高く , 他の波長では水面の反射光の影響で相関は認められなかった .
- 2) 反射光を除いた分光反射率 *R<sub>w</sub>* と水質の単相関では , 透明度が最も相関がよい .
- 3) *R<sub>w</sub>* の逆数と透明度の相関を求めたほうがよい結果が得られた . クロロフィル a 量と SS に対しては , 対数処理を行ったほうが , *R<sub>w</sub>* との相関が高い .
- 4) 2 つの特定波長の分光反射率の比 , 2 つの特定波長の和と差の比と水質の相関は相関係数 0.7 以上で , クロロフィルに対してもかなりよい結果を得た . 特に  $\ln Chla$  と  $R_{694}/R_{442}$  と  $(R_{442} - R_{694}) / (R_{442} + R_{694})$  がもっとも相関が高い ( 相関係数はそれぞれ 0.896 , -0.809 ) ことを報告している ( *R(i)* : *i* nm の分光反射率) . また , 分光反射率の比又は分光反射率の差と和の比をとれば , 水面の反射光の効果が小さくなることを明らかにしている .

さらに , この研究の中では , Smith と Baker<sup>17)</sup>により海洋のクロロフィル定量のために提案された ,  $R_{445}/R_{550}$  と  $R_{670}/R_{550}$  の 2 つの組み合わせについて , クロロフィル a 濃度が海と比較して数十倍大きい霞ヶ浦で適用できるかどうかを検討するために , この波長域と近い ,  $R(442)/R(540)$  ,  $R_w(441)/R_w(540)$  ,  $R(672)/R(540)$  ,  $R_w(671)/R_w(540)$  (  $R_w(i)$  : *i* nm の反射光を除いた分光反射率) とクロロフィル濃度 , 透明度 , SS との相関を解析している . その結果 ,  $R(442)/R(540)$  との相関は 0.7 以上であるが ,  $R(672)/R(540)$  は , 水質との相関は認められないことを報告している .

また , 沖 *et.al.*<sup>18)</sup>は , 霞ヶ浦において , 725nm と 675nm の分光反射率の比とクロロフィル a

濃度が、高い相関(相関係数=0.958)があることを明らかにした。

### 2-3 人工衛星による植生分布の把握手法

一般の植生分布の把握については、正規化植生指標(Normalized Difference Vegetation Index: NDVI)が多く用いられる<sup>7)</sup>。また、O'neill<sup>19)</sup>や谷口 *et.al.*<sup>20)</sup>は、中間赤外域の反射強度は葉の水ストレスに強く影響される性質を用いて、西オーストラリア乾燥地の植物現存濃度推定に、STVI: Stress Related Vegetation Index が用いられている。

### 2-4 レビューに関する考察

既存の研究成果では、実際のフィールドを対象としてクロロフィル濃度を衛星画像より求める研究はなされている。しかし、ETM データを用いてクロロフィル濃度を把握する手法を技術として確立するためには、実験室レベルで、海水と淡水とに分けて、クロロフィル濃度と ETM データのバンドごとの分光反射率の相関について明らかにする必要があると考えられる。また、併せて、陸域の植生分布把握に用いられている指標も、水域に適用可能か否かを検討することが必要であると考えられる。

### 第3章 分光反射率を用いた淡水中のクロロフィル濃度推定モデルの開発

本章では、分光反射率を用いた、淡水中のクロロフィル濃度推定に適したモデルについて実験結果、解析結果及び考察を報告する。

#### 3-1 実験方法

##### 3-1-1 実験装置

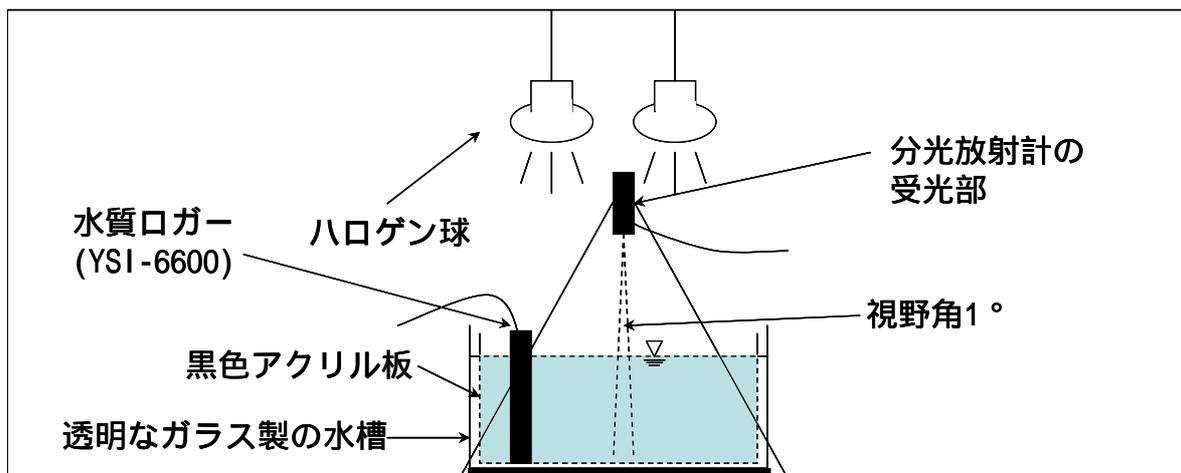


図3-1 実験装置

実験は、屋内暗室にて行った。透明なガラスの水槽の内側に周囲と底部を黒色のアクリル板で覆い、サンプル水で満たした。また、光源はノイズの無いハロゲンランプを用い、上部より照射した（図3-1）。サンプル水の採水場所及び水質は、3-1-5に示す。

##### 3-1-2 実験手順

実験は、次の1)~6)に示す手順で行った。

- 1) 水槽内にサンプル水を投入する。
- 2) 水面の波が静止後、分光反射率を測定する。
- 3) ホテイアオイの絞り汁を5ml、水槽内に混入する。
- 4) 水槽内のクロロフィル濃度が一定になるようにかき混ぜる。
- 5) 水面の波が静止後、分光反射率を測定する。
- 6) 水槽内のサンプル水のクロロフィル濃度が $60 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ 程度になるまで3)~5)を繰り返す。

### 3-1-3 クロロフィル測定法

今回のクロロフィル濃度測定には、一般に広く用いられているSCOR/UNESCO<sup>21)</sup>による測定法ではなく、米国YSI社製の光学センサ(YSI-6600)を用いた。

今回用いた光学センサは、LEDより約470nmの光を照射し、その結果、クロロフィルより生じる650~700nmの光を検出することにより、クロロフィル濃度を算出する<sup>22)</sup>。

### 3-1-4 分光反射率の測定法

分光放射計は、米国ASD社製のFieldSpec Pro FRを用いた。白色補正は、ノイズの無いハロゲンランプの光の下で、分光反射率が一定の標準校正白色反射版を用いて行った。

分光放射計の性能仕様を表3-1に示す。

表3-1 FieldSpec Pro FRの仕様<sup>23)</sup>

仕様	
測定波長範囲	350-2500 nm
サンプリング間隔	350-1050nmの範囲は1.4nm 1000-2500nmの範囲は2nm
波長精度	±1nm

### 3-1-5 サンプル水の採水場所及び水質

サンプル水は、高知県南国市西部に位置する石土池（図3-2）より採取した淡水（表3-2）を使用した。



図3-2 石土池の位置

表3-2 石土池の水質

水温 ( )	PO <sub>4</sub> -P (mg·l <sup>-1</sup> )	T-N (mg·l <sup>-1</sup> )	BOD (mg·l <sup>-1</sup> )	COD (mg·l <sup>-1</sup> )	Turbidity (NTU)	Chlorophyll (μg·l <sup>-1</sup> )
20.0	0.08	2.39	1.72	2.0	0.9	0.8

### 3-2 実験結果

クロロフィル濃度別の各波長域の分光反射率を図 3-3 に示す。この図より、約 450~約 900nm の波長域は、クロロフィル濃度が上昇するに従って分光反射率も上昇する傾向を示しているため、クロロフィル濃度推定に利用できる可能性がある。また、図より、670nm 及び 760nm 付近は、隣接する波長域と比較して分光反射率が低いこと、700nm 及び 800nm 付近は、

隣接する波長域と比較して分光反射率が高いことが見て取れる。

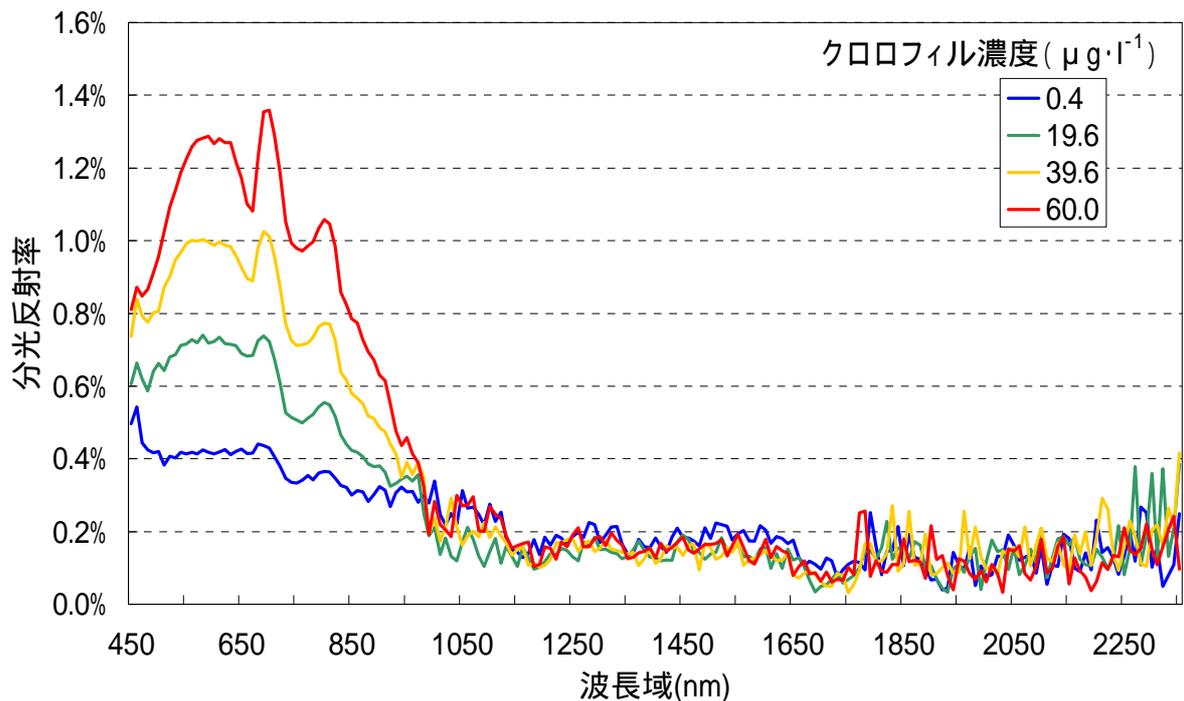


図 3-3 各波長域における水面の分光反射率（クロロフィル濃度別）

図 3-4 に分光反射率とクロロフィル濃度の相関を Landsat-7/ETM センサの band 別に示す。ここで、各 band の分光反射率とは、表 3-4 に示す波長域の分光反射率の算術平均値である。表 3-3 に、分光反射率の標準偏差と、分光反射率とクロロフィル濃度との相関係数及び回帰係数を band 別に示す。この表に掲載している標準偏差は、得られた分光反射率を用いて band 別に算出したものである。

クロロフィル濃度上昇に伴い分光反射率が上昇する傾向を示したのは band1~band4 であり、band5、band7 に関しては、クロロフィル濃度上昇に関わらず、分光反射率は比較的一定の値をとった（図 3-4）。また、band5 と band7 を比較すると、band5 の方が、標準偏差が 0.00013 と、band7 と比較して、ばらつきが少ないことがわかる（表 3-3）。

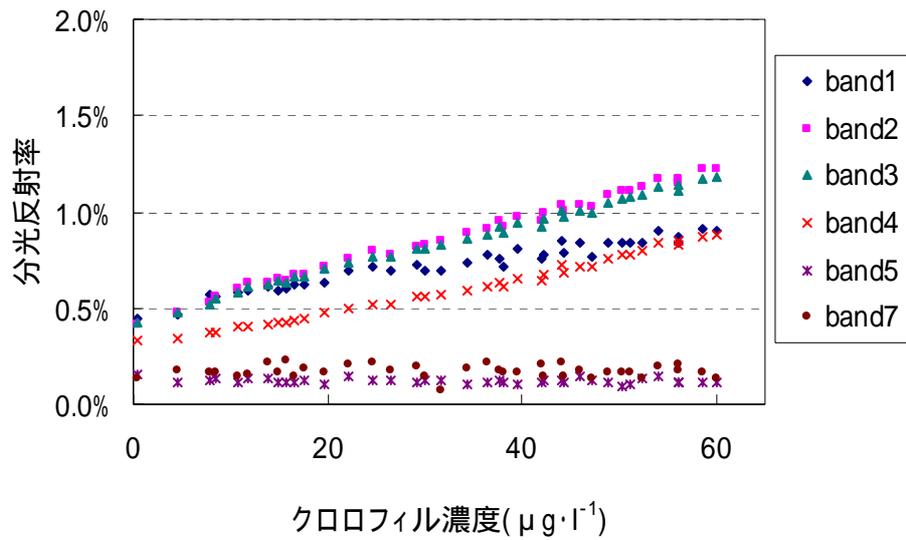


図 3-4 band 別の分光反射率とクロロフィル濃度の関係

表 3-3 band 別の分光反射率の標準偏差，クロロフィル濃度との相関係数及び回帰係数

band	標準偏差	相関係数	回帰係数
band1	0.00120	0.972	0.000069
band2	0.00222	0.997	0.000130
band3	0.00210	0.997	0.000123
band4	0.00165	0.994	0.000096
band5	0.00012	-0.241	-0.000002
band7	0.00032	-0.042	-0.000001

表 3-4 ETM データの波長域

band	波長域
band1	0.45-0.52μm
band2	0.52-0.60μm
band3	0.63-0.69μm
band4	0.76-0.90μm
band5	1.55-1.75μm
band7	2.08-2.35μm

### 3-3 モデル解析

#### 3-3-1 解析方法

はじめに，式 3-1 と仮定する．

$$\text{Chlorophyll}[\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}] = \hat{\beta}_1 x + \hat{\beta}_0 \dots\dots\dots (\text{式 3-1})$$

(  $\hat{\beta}_1$  : 回帰係数 ,  $\hat{\beta}_0$  : 切片 ,  $x$  : 独立変数 )

独立変数としては，NDVI を含む，以下の 6 種類を用意した．

変数 1 :  $R_{\text{band } i} / R_{\text{band } j}$

変数 2 :  $\frac{R_{\text{band } i} - R_{\text{band } j}}{R_{\text{band } i} + R_{\text{band } j}}$  ( 注 :  $\text{NDVI} = \frac{R_{\text{band } 4} - R_{\text{band } 3}}{R_{\text{band } 4} + R_{\text{band } 3}}$  )

変数 3 :  $\frac{R_{\text{band } i}}{R_{\text{band } j} + R_{\text{band } k}}$

変数 4 :  $\frac{R_{\text{band } i} + R_{\text{band } j}}{R_{\text{band } k}}$

変数 5 :  $\frac{R_{\text{band } i}}{R_{\text{band } j} - R_{\text{band } k}}$

変数 6 :  $\frac{R_{\text{band } i} - R_{\text{band } j}}{R_{\text{band } k}}$

$R_{\text{band } i}$  ,  $R_{\text{band } j}$  ,  $R_{\text{band } k}$  は，それぞれ，ETM データの band  $i$  , band  $j$  , band  $k$  に対応する，分光放射計で求められた分光反射率の算術平均値であり， $i$  ,  $j$  ,  $k$  はいずれも，1 , 2 , 3 , 4 , 5 , 7 の数字である．これらの変数とクロロフィル濃度との相関を検討した．なお，band6 , band8 については，それぞれ空間分解能が 60m , 15m と他の band の空間分解能(30m)と異なるので，解析の対象から除外した．

#### 3-3-2 解析結果

2 つの band を用いた場合，クロロフィル濃度と相関が一番高かった変数は  $R_{\text{band}2}/R_{\text{band}1}$  であり ( 表 3-5 ) , 3 つの band を用いた場合は， $(R_{\text{band}4}-R_{\text{band}5})/R_{\text{band}1}$  であった ( 表 3-6 ) .

表 3-5 淡水中のクロロフィル濃度との相関が高かった変数(2つの band を用いたもの)と、その相関係数(r)，決定係数( $r^2$ )，p 値，回帰係数，切片(相関の高いもの上位 10 個)

変数	r	$r^2$	p値	回帰係数	切片
$R_{\text{band}2}/R_{\text{band}1}$	0.968	0.938	<0.001	133.614	-125.880
$(R_{\text{band}1}-R_{\text{band}2})/(R_{\text{band}1}+R_{\text{band}2})$	-0.965	0.931	<0.001	-310.671	7.085
$R_{\text{band}1}/R_{\text{band}2}$	-0.958	0.919	<0.001	-175.764	182.487
$R_{\text{band}3}/R_{\text{band}1}$	0.958	0.919	<0.001	145.753	-135.686
$(R_{\text{band}1}-R_{\text{band}3})/(R_{\text{band}1}+R_{\text{band}3})$	-0.956	0.913	<0.001	-331.024	9.698
$(R_{\text{band}1}-R_{\text{band}4})/(R_{\text{band}1}+R_{\text{band}4})$	-0.953	0.909	<0.001	-268.183	61.363
$R_{\text{band}1}/R_{\text{band}4}$	-0.952	0.907	<0.001	-106.320	165.565
$R_{\text{band}4}/R_{\text{band}1}$	0.952	0.906	<0.001	162.380	-99.208
$R_{\text{band}1}/R_{\text{band}3}$	-0.951	0.904	<0.001	-183.928	193.474
$(R_{\text{band}4}-R_{\text{band}5})/(R_{\text{band}4}+R_{\text{band}5})$	0.945	0.893	<0.001	165.581	-74.005

表 3-6 淡水中のクロロフィル濃度との相関が高かった変数(3つの band を用いたもの)と、その相関係数(r)，決定係数( $r^2$ )，p 値，回帰係数，切片(相関の高いもの上位 10 個)

変数	r	$r^2$	p値	回帰係数	切片
$(R_{\text{band}4}-R_{\text{band}5})/R_{\text{band}1}$	0.980	0.961	<0.001	124.710	-46.972
$R_{\text{band}4}/(R_{\text{band}1}+R_{\text{band}5})$	0.978	0.956	<0.001	156.584	-75.947
$(R_{\text{band}1}+R_{\text{band}5})/R_{\text{band}4}$	-0.977	0.955	<0.001	-73.964	141.653
$(R_{\text{band}1}-R_{\text{band}4})/R_{\text{band}2}$	-0.974	0.949	<0.001	-157.669	59.660
$(R_{\text{band}4}-R_{\text{band}5})/R_{\text{band}3}$	0.973	0.946	<0.001	255.984	-107.441
$(R_{\text{band}2}+R_{\text{band}4})/R_{\text{band}1}$	0.973	0.946	<0.001	73.630	-114.288
$(R_{\text{band}1}-R_{\text{band}4})/R_{\text{band}3}$	-0.972	0.946	<0.001	-154.544	59.766
$(R_{\text{band}1}+R_{\text{band}4})/R_{\text{band}4}$	-0.972	0.945	<0.001	-103.745	266.685
$R_{\text{band}1}/(R_{\text{band}4}+R_{\text{band}4})$	-0.972	0.945	<0.001	-207.491	162.940
$(R_{\text{band}1}+R_{\text{band}1})/R_{\text{band}4}$	-0.972	0.945	<0.001	-51.873	162.940

### 3-3-3 解析の考察

2つの band の分光反射率の比を用いた場合、 $R_{\text{band}2}/R_{\text{band}1}$  が、クロロフィル濃度と高い相関を得ることができた。この理由は、 $R_{\text{band}1}$ 、 $R_{\text{band}2}$  は、いずれも水中のクロロフィル濃度上昇に従って増加し、かつクロロフィル濃度と高い相関を有しているが、 $R_{\text{band}2}$  と  $R_{\text{band}1}$  の差は、クロロフィル濃度上昇に伴って大きくなる傾向にある(図 3-5, 表 3-7)。この結果、クロロフィル濃度上昇に伴って  $R_{\text{band}2}/R_{\text{band}1}$  の値も大きくなるためであると考えられる。

3つの band の分光反射率の比を用いた場合、 $(R_{\text{band}4}-R_{\text{band}5})/R_{\text{band}1}$  が、クロロフィル濃度と高い相関があることがわかった。 $R_{\text{band}1}$ 、 $R_{\text{band}4}$  は、それぞれクロロフィル濃度と相関があるが、 $R_{\text{band}5}$  はクロロフィル濃度増加に関わらず、ほぼ一定の値である。従って、クロロフィル濃度が増加すると、 $R_{\text{band}4}-R_{\text{band}5}$  も増加する。しかし、 $R_{\text{band}4}-R_{\text{band}5}$  と  $R_{\text{band}1}$  の分光反射率の差は、ク

クロロフィル濃度上昇に伴って次第に小さくなる傾向にある（図 3-6、表 3-7）。この結果、クロロフィル濃度上昇に伴って $(R_{\text{band4}}-R_{\text{band5}})/R_{\text{band1}}$  の値が小さくなるためであると考えられる。

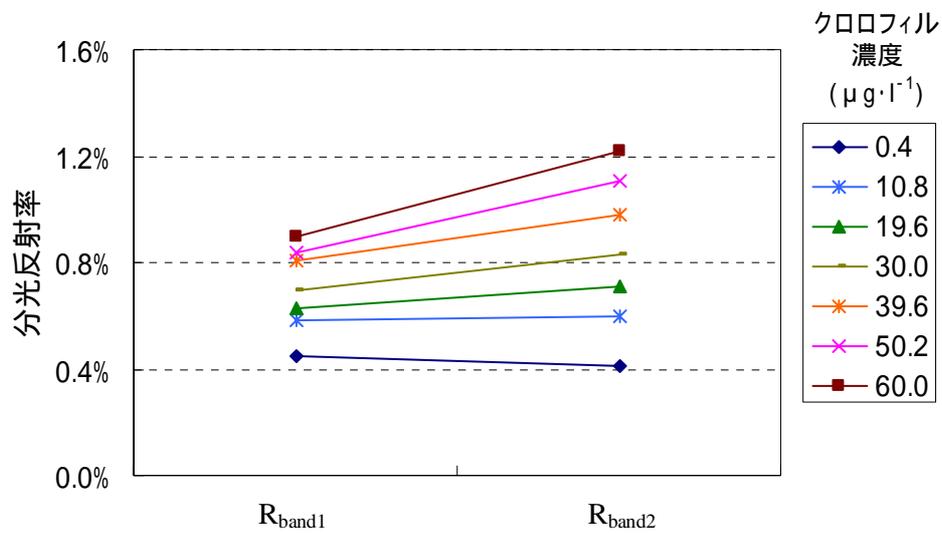


図 3-5 クロロフィル濃度と  $R_{\text{band1}}$  及び  $R_{\text{band2}}$

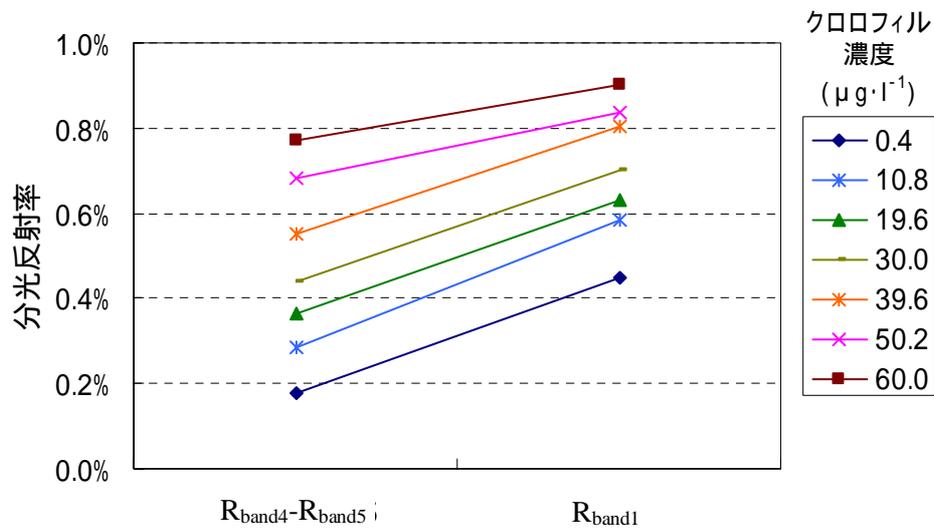


図 3-6 クロロフィル濃度と  $R_{\text{band4}}-R_{\text{band5}}$  及び  $R_{\text{band1}}$

表 3-7 各クロロフィル濃度と  $R_{\text{band2}}-R_{\text{band1}}$  及び  $(R_{\text{band4}}-R_{\text{band5}})-R_{\text{band1}}$  の値

クロロフィル濃度( $\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ )	0.4	10.8	19.6	30	39.6	50.2	60
$R_{\text{band2}}-R_{\text{band1}}$	-0.0003	0.0002	0.0008	0.0013	0.0017	0.0027	0.0032
$(R_{\text{band4}}-R_{\text{band5}})-R_{\text{band1}}$	-0.0027	-0.0030	-0.0027	-0.0026	-0.0025	-0.0015	-0.0013

## 第4章 分光反射率を用いた海水中のクロロフィル濃度推定モデルの開発

### 4-1 海水の成分組成

一般的な，海水と河川水のイオン濃度を表 4-1 に示す．

表 4-1 河川水と海水のイオン濃度（全球の平均値， $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ）．  
（Berner&Berner, 1987 及び Broecker&Peng, 1982）<sup>24)</sup>

	河川水	海水
$\text{Na}^+$	0.23	470
$\text{Mg}^{2+}$	0.14	53
$\text{K}^+$	0.03	10
$\text{Ca}^{2+}$	0.33	10
$\text{HCO}_3^-$	0.85	2
$\text{SO}_4^{2-}$	0.09	28
$\text{Cl}^-$	0.16	550
$\text{Si}$	0.16	0.1

河川水と海水では，イオン濃度が大きく異なる．湖沼の水に関しても，河川水に準じると考えられるので，第 3 章の成果を，そのまま海水に適用することが可能か否かは不明である．よって，本章では，海水中のクロロフィル濃度推定に適した band について，実験及び考察を行う．

### 4-2 実験方法及び解析方法

実験装置及び実験手順は，第 3 章で用いたものと同じである．しかし，サンプル水として，高知県高知市と春野町の市町境界付近の沿岸（図 4-1）の海水（表 4-2）を用いた．また，解析は，3 章と同じ手順により行った．

#### 4-2-1 サンプル水の採水場所及び水質

サンプル水のサンプル海水の水質を表 4-2，採水地点を図 4-1 に示す．

表 4-2 海水の水質

水温 ( )	$\text{PO}_4\text{-P}$ ( $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ )	T-N ( $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ )	BOD ( $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ )	COD ( $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ )	Turbidity (NTU)	Chlorophyll ( $\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ )
18.2	0.01	0.54	2.09	3.5	0.9	0.8



図 4-1 海水の採水地点

#### 4-3 実験結果

クロロフィル濃度別の各波長域の分光反射率を図 4-2 に示す。淡水の場合と違い、約 550~約 900nm の範囲が、クロロフィル濃度が上昇するに従って分光反射率も上昇する傾向を示している。これは、海水に含まれるイオンが何らかの影響を示していると考えられるが、詳しくは不明である。しかし、淡水の場合と同じく、670nm 及び 760nm 付近は、隣接する波長域と比較し、分光反射率が低いこと、700nm 及び 800nm 付近は、隣接する波長域と比較し、分光反射率が高いことが見て取れる。

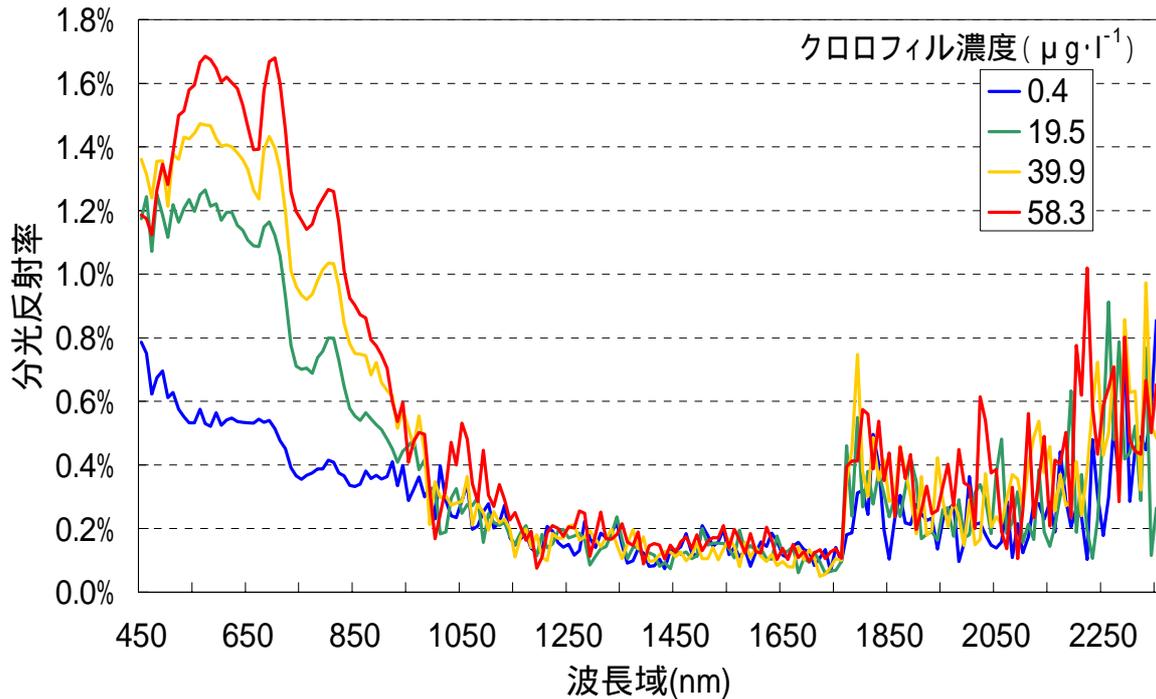


図 4-2 各波長域における水面の分光反射率（クロロフィル濃度別）

図 4-3 に分光反射率とクロロフィル濃度の相関を Landsat-7/ETM センサの band 別に示す。表 4-3 に、分光反射率の標準偏差と、分光反射率とクロロフィル濃度との相関係数、回帰係数を band 別に示す。この表に掲載している標準偏差は、band 別に実験で得られた分光反射率を用いて算出した。

クロロフィル濃度上昇に伴い分光反射率が上昇する傾向を示したのは淡水と同様に、band1 ~ band4 である。しかし、band1~band3 に関しては、クロロフィル濃度との相関は、淡水の場合ほど高くはなかった。しかし、band4 に限っては、海水であるにも関わらずクロロフィル濃度との相関は高いことが見て取れる。

また、band5、band7 に関しては淡水と同様に、クロロフィル濃度上昇に関わらず、分光反射率は比較的一定の値をとった(図 4-3)。また、band5 と band7 を比較すると、band5 の方が、標準偏差が 0.00013 と、band7 と比較して、ばらつきが少ないことも淡水の場合と同じである(表 4-3)。

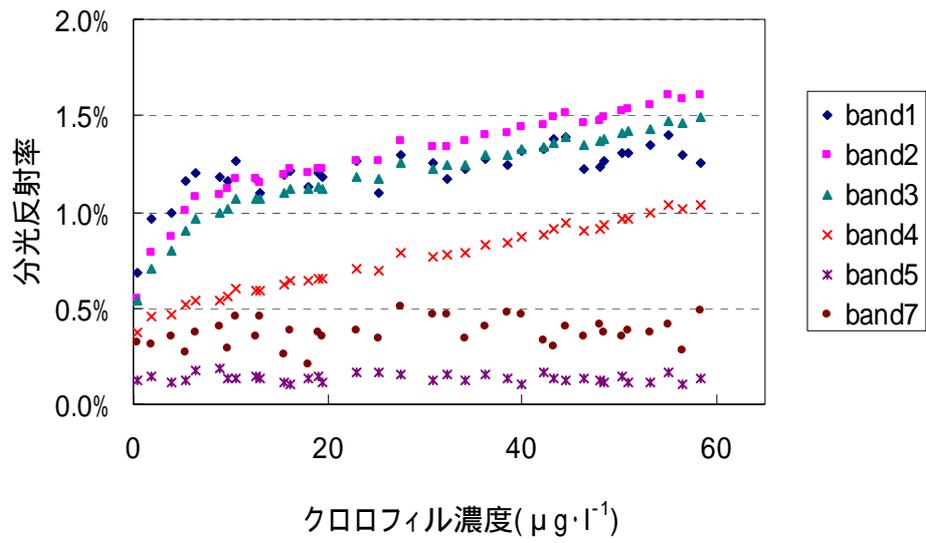


図 4-3 band 別分光反射率とクロロフィル濃度の相関

表 4-3 band 別のクロロフィル濃度と分光反射率の相関係数，回帰係数及び標準偏差

band	標準偏差	相関係数	回帰係数
band1	0.00131	0.706	0.000052
band2	0.00237	0.930	0.000124
band3	0.00220	0.938	0.000116
band4	0.00183	0.992	0.000102
band5	0.00021	-0.190	-0.000002
band7	0.00069	0.266	0.000010

#### 4-4 モデル解析

##### 4-4-1 解析結果

解析の結果，クロロフィル濃度と相関の高かった独立変数は，2 波長域を用いた場合は  $R_{\text{band4}}/R_{\text{band1}}$  であり(表 4-4)，3 波長域を用いた場合は， $(R_{\text{band4}}-R_{\text{band5}})/R_{\text{band1}}$  であった(表 4-5)。

表 4-4 海水中のクロロフィル濃度との相関が高かった変数(2 つの band を用いたもの)と，その相関係数( $r$ )，決定係数( $r^2$ )， $p$  値，回帰係数，切片(相関の高いもの上位 10 個)

変数	$r$	$r^2$	$p$ 値	回帰係数	切片
$R_{\text{band4}}/R_{\text{band1}}$	0.969	0.939	<0.001	160.872	-69.380
$(R_{\text{band1}}-R_{\text{band4}})/(R_{\text{band1}}+R_{\text{band4}})$	-0.967	0.935	<0.001	-207.627	80.190
$R_{\text{band1}}/R_{\text{band4}}$	-0.954	0.911	<0.001	-56.221	123.875
$R_{\text{band2}}/R_{\text{band1}}$	0.918	0.843	<0.001	140.338	-119.411
$R_{\text{band3}}/R_{\text{band1}}$	0.910	0.828	<0.001	146.668	-113.816
$(R_{\text{band1}}-R_{\text{band2}})/(R_{\text{band1}}+R_{\text{band2}})$	-0.910	0.827	<0.001	-284.446	21.963
$(R_{\text{band1}}-R_{\text{band3}})/(R_{\text{band1}}+R_{\text{band3}})$	-0.902	0.814	<0.001	-274.400	33.550
$R_{\text{band1}}/R_{\text{band2}}$	-0.896	0.803	<0.001	-140.571	163.670
$R_{\text{band1}}/R_{\text{band3}}$	-0.890	0.791	<0.001	-124.752	158.902
$R_{\text{band4}}/R_{\text{band5}}$	0.874	0.764	<0.001	8.730	-20.575

表 4-5 海水中のクロロフィル濃度との相関が高かった変数(3 つの band を用いたもの)と，その相関係数( $r$ )，決定係数( $r^2$ )， $p$  値，回帰係数，切片(相関の高いもの上位 10 個)

変数	$r$	$r^2$	$p$ 値	回帰係数	切片
$(R_{\text{band4}}-R_{\text{band5}})/R_{\text{band1}}$	0.980	0.960	<0.001	145.749	-43.545
$R_{\text{band4}}/(R_{\text{band1}}+R_{\text{band5}})$	0.979	0.958	<0.001	170.817	-64.985
$R_{\text{band4}}/(R_{\text{band1}}+R_{\text{band1}})$	0.969	0.939	<0.001	321.743	-69.380
$(R_{\text{band1}}+R_{\text{band4}})/R_{\text{band1}}$	0.969	0.939	<0.001	160.872	-230.252
$(R_{\text{band4}}+R_{\text{band4}})/R_{\text{band1}}$	0.969	0.939	<0.001	80.436	-69.380
$(R_{\text{band1}}-R_{\text{band4}})/R_{\text{band1}}$	-0.969	0.939	<0.001	-160.872	91.492
$(R_{\text{band1}}-R_{\text{band4}})/R_{\text{band2}}$	-0.967	0.935	<0.001	-118.692	74.439
$R_{\text{band4}}/(R_{\text{band1}}+R_{\text{band4}})$	0.967	0.935	<0.001	415.254	-127.437
$R_{\text{band1}}/(R_{\text{band1}}+R_{\text{band4}})$	-0.967	0.935	<0.001	-415.255	287.818
$R_{\text{band4}}/(R_{\text{band1}}+R_{\text{band7}})$	0.966	0.933	<0.001	199.822	-64.401

##### 4-4-2 解析の考察

淡水のときに高い相関を示した  $R_{\text{band2}}/R_{\text{band1}}$  は，海水の場合は，淡水時よりも相関は高くないことが見て取れる．これは，海水の場合， $R_{\text{band1}}$  とクロロフィル濃度の相関が，淡水と比較して高くなく，ばらつきも多いので，比の状態にした場合に，相関が崩れたためであると考

えられる。一方,  $R_{\text{band4}}$  は, 海水においても, クロロフィル濃度と非常に高い相関があるので,  $R_{\text{band4}}/R_{\text{band1}}$  とクロロフィル濃度に高い相関が見られたと考えられる。実際,  $R_{\text{band1}}$  と  $R_{\text{band4}}$  はクロロフィル濃度が上昇するに従って小さくなる傾向にあるので (図 4-4, 図 4-6), クロロフィル濃度との相関があらわれたと考えられる。

3 波長域を用いたときに, クロロフィル濃度と高い相関が見られたのは, 淡水の場合と同じく,  $(R_{\text{band4}}-R_{\text{band5}})/R_{\text{band1}}$  であった。これは,  $R_{\text{band5}}$  は, クロロフィル濃度の上昇に関わらずほぼ一定の値をとるが, 一方で,  $R_{\text{band4}}$  は高いクロロフィル濃度と高い相関があるため, その結果,  $(R_{\text{band4}}-R_{\text{band5}})/R_{\text{band1}}$  に高い相関が得られたと考えられる。

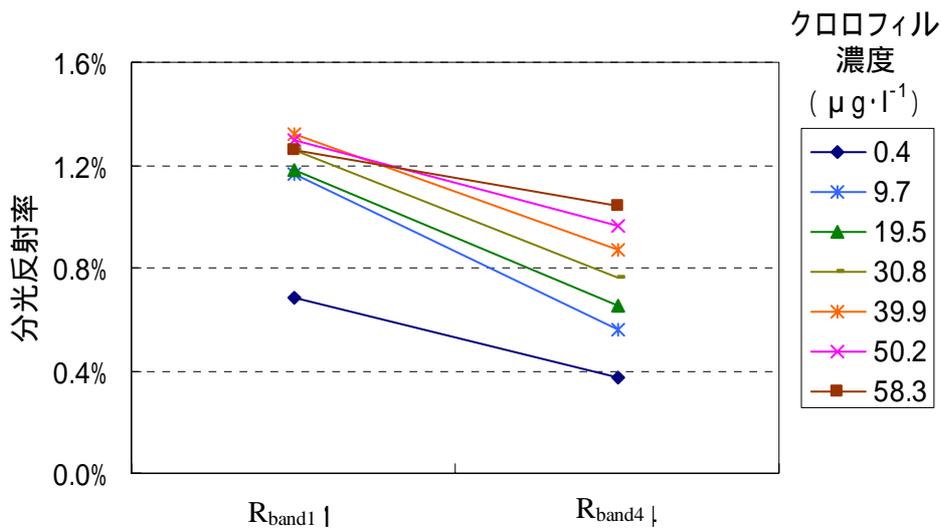


図 4-4 クロロフィル濃度と  $R_{\text{band1}}$  及び  $R_{\text{band4}}$

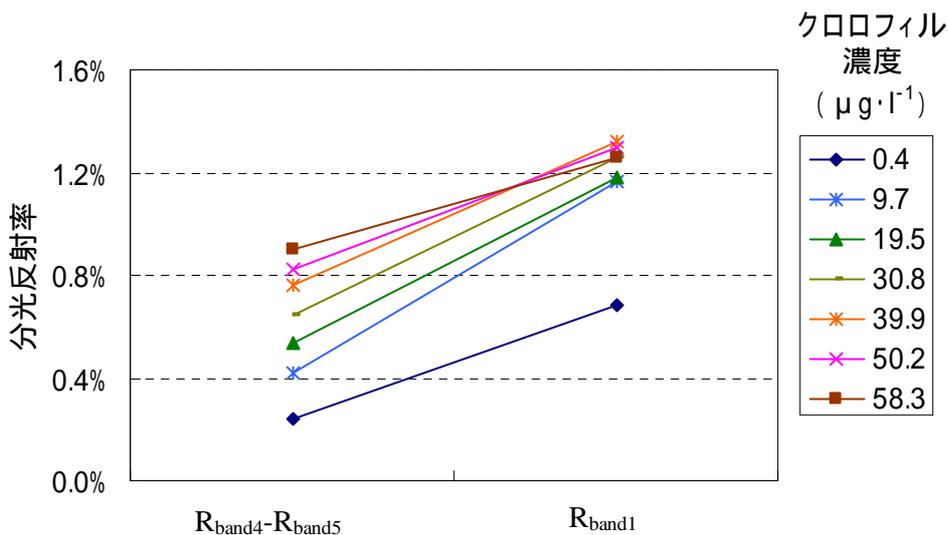


図 4-5 クロロフィル濃度と  $R_{\text{band4}}-R_{\text{band5}}$  及び  $R_{\text{band1}}$

表 4-6 クロロフィル濃度と  $R_{\text{band4}}/R_{\text{band1}}$  及び  $(R_{\text{band4}}-R_{\text{band5}})/R_{\text{band1}}$  の推移

クロロフィル濃度 ( $\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ )	0.4	9.7	19.5	30.8	39.9	50.2	58.3
$R_{\text{band4}}-R_{\text{band1}}$	-0.0031	-0.0061	-0.0053	-0.0049	-0.0045	-0.0034	-0.0022
$(R_{\text{band4}}-R_{\text{band5}})-R_{\text{band1}}$	-0.0044	-0.0074	-0.0064	-0.0061	-0.0056	-0.0048	-0.0035

## 第5章 実験のまとめと今後の展望

第3章及び第4章にて行った実験より、以下のことが明らかになった。

- 2つの band を用いた変数を利用し、クロロフィル濃度推定モデルを作成する場合、淡水と海水では、クロロフィル濃度推定に利用可能な変数は異なる。
- 2つの band を利用した変数を利用した場合、淡水中のクロロフィル濃度推定に利用可能な変数は、 $R_{\text{band2}}/R_{\text{band1}}$  であった。
- 2つの band を利用した変数を利用した場合、海水中のクロロフィル濃度推定に利用可能な変数は、 $R_{\text{band4}}/R_{\text{band1}}$  であった。
- $(R_{\text{band4}}-R_{\text{band5}})/R_{\text{band1}}$  は、淡水・海水両方ともに、クロロフィル濃度と高い相関が見受けられた。

2つの band による変数を用いた場合で、海水と淡水とでは、変数に用いる band が異なるという現象は、海水と淡水のイオン組成の相違によるものであると考えられるが、詳しくは不明であるので、より詳細な実験が必要であると考えられる。

今後は、この成果を実際に過去の ETM データに適用に向けて、実際の水域のクロロフィル a 濃度推定に適用可能かを検討する必要がある。

実際に、今回の成果を用いて ETM データにより水域のクロロフィル濃度を推定するためには、以下の点を、今後、解明していくことが必要である。

- 1) 混濁物質の相違がクロロフィル濃度推定に及ぼす影響
- 2) 大気中のエアロゾル及び水蒸気量がクロロフィル濃度推定に及ぼす影響
- 3) 海水のイオン組成の相違がクロロフィル濃度推定に及ぼす影響
- 4) 水域の深度がクロロフィル濃度推定に及ぼす影響

## 謝辞

本研究を行うにあたりましては、多くの皆様に多大なご協力をいただきました。ここに心より厚く感謝いたします。

第一に指導教員の村上雅博教授には、研究の発端から終始暖かいご指導をいただきました。また、高木方隆助教授には、リモートセンシングの専門家としての見地から、貴重なご意見を賜りました。明神千代助教授からは、論文の論理的なとりまとめに関しまして非常に有益な情報を賜りました。

本研究の中核となる実験の準備を行うにあたりましては、高知工科大学の公文勇喜氏、斎藤由貴女史、中本良徳氏、春田修一氏、及び、高知工科大学大学院の濱津陽一氏、馬淵泰氏、山岡大洋氏、米田周平氏には入れ替わり立ち代り補助をしていただきました。

また、高知工科大学社会システム工学科の荒木英昭教授、大谷英人教授、藤澤伸光教授、渡邊法美助教授、上野勝助手の諸先生方には、修士論文の中間発表会等で、貴重なご意見を賜りました。

このように多くの皆様のご協力をいただきまして、本論文は完成しました。今後は、本研究の今後の課題、また、本研究の遂行で露呈しました私の人間性に関する弱点等を把握し、今後のさらなる発展の糧とする所存です。

## 参考文献

- 1) 琵琶湖研究所ホームページ<<http://www.lbri.go.jp/omia/3/3-2.html>>
- 2) 琵琶湖研究所ホームページ<<http://www.lbri.go.jp/omia/38/38-2.htm>>
- 3) 平成 14 年度版環境白書  
<<http://www.env.go.jp/policy/hakusyo/honbun.php3?kid=215&serial=12931&bflg=1&bakserial=12930>>
- 4) 平成 14 年度版環境白書  
<<http://www.env.go.jp/policy/hakusyo/honbun.php3?kid=215&serial=12933&bflg=1&bakserial=12930>>
- 5) 伊勢湾富栄養化対策指導指針<<http://www.pref.aichi.jp/kankyo/hourei/jyourei/fueiyouka.pdf>>
- 6) 武田育郎(2001): 『水と水質環境の基礎知識』オーム社, pp.52-57
- 7) 日本リモートセンシング研究会編: 改訂版図解リモートセンシング, 社団法人日本測量協会, 2001
- 8) 武田育郎(2001): 『水と水質環境の基礎知識』オーム社, pp.8-9
- 9) 武田育郎(2001): 『水と水質環境の基礎知識』オーム社, p.56
- 10) Wouthuyzen, S.(1991): Analysis of the Potential Utility of Remote Sensing Data Acquired from Earth Observation Satellites for Monitoring the Coastal Zone Environment, 長崎大学大学院海洋生産科学研究科学学位申請論文: pp.18-23
- 11) 石坂丞二・田島清史・岸野元彰(2002): 海色データから推定した大村湾のクロロフィル a 濃度の検証. 海の研究 11-2: pp.235-241
- 12) 水尾寛己・二宮勝幸・雫石雅美・多賀保志・安岡善文(1991): TM データによる東京湾のクロロフィル a 量の観測の検討—中間赤外域における水質情報抽出の可能性—. 日本リモートセンシング学会誌 11-3: pp.135-139
- 13) 作野裕司・本井裕志・松永恒雄・古津年章・高安克己・下舞豊志・中山大介(2002): 衛星光学センサを用いた汽水域のクロロフィル濃度推定の可能性—宍道湖・中海における 2001 年の現場調査結果—. LAGUNA(汽水研究)9: pp.55-61
- 14) 作野裕司・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(1999): 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 19-2: pp.20-36
- 15) 作野裕司・松永恒雄・高安克己・國井秀伸・中村幹雄・六川修一(2001): 衛星リモートセンシングによる宍道湖の一次生産量モニタリングの試み. LAGUNA(汽水研究)8: pp.23-30
- 16) 岡見登・岸野元彰・宮崎忠国(1982): 霞ヶ浦湖水の分光反射率と水質. 日本リモートセンシング学会誌 2-1: pp.21-31
- 17) R.C. Smith, and K.S. Barker: The remote sensing of chlorophyll, Proc. XXth Meet. COSPER Sym. Contribution of Space observation to global food information system: pp.161-172
- 18) 沖一雄・安岡善文・田村正行(2001): 高濃度水域における水質リモートセンシング. 日本リモートセンシング学会誌 21-5: pp.449-457

- 19) O'Neill A.L.: Satellite-derived vegetation indices applied to semi-arid shrublands in Australia. *Australian Geographer*, **27**: pp.185-199
- 20) 谷口雅彦・安部征雄・菅沼秀樹・斉藤昌宏・山田興一(2002): Landsat を利用した西オーストラリア乾燥地の植物現存量の推定. *砂漠研究* **12-2**: pp55-66
- 21) The SCOR/UNESCO Working Group on Photosynthetic Pigments(1966): *Monographs on Oceanographic Methodology, No.1*, Publ.Unesco, p.69
- 22) YSI のクロロフィルセンサー<<http://www.ysi.jp/Chlorophyll.htm>>
- 23) Analytical Spectral Devices 社ホームページ<<http://www.asdi.com/index.htm>>
- 24) J.アンドリュース・P.プリブルコム, T.ジッケルズ, P.リス(1997): 『地球環境化学入門』シュプリンガー・フェアラーク東京, p.147

# Appendix

A・・・淡水における各変数とクロロフィル濃度との相関

B・・・海水における各変数とクロロフィル濃度との相関

A.各変数とクロロフィル濃度との相関(淡水)

A-1  $R_{\text{band}[i]}/R_{\text{band}[j]}$ とクロロフィル濃度の相関関係

band[i]	band[j]	r	r <sup>2</sup>	p値	回帰係数	切片
1	2	-0.958	0.919	<0.001	-175.764	182.487
1	3	-0.951	0.904	<0.001	-183.928	193.474
1	4	-0.952	0.907	<0.001	-106.320	165.565
1	5	0.870	0.757	<0.001	11.671	-38.208
1	7	0.558	0.312	<0.001	7.150	1.368
2	1	0.968	0.938	<0.001	133.614	-125.880
2	3	0.737	0.544	<0.001	1093.910	-1090.275
2	4	-0.363	0.132	0.025	-104.050	185.207
2	5	0.931	0.867	<0.001	7.404	-21.683
2	7	0.701	0.491	<0.001	6.027	0.730
3	1	0.958	0.919	<0.001	145.753	-135.686
3	2	-0.733	0.537	<0.001	-1122.230	1126.025
3	4	-0.555	0.308	<0.001	-161.869	263.772
3	5	0.928	0.862	<0.001	7.758	-22.684
3	7	0.689	0.475	<0.001	6.163	0.918
4	1	0.952	0.906	<0.001	162.380	-99.208
4	2	0.316	0.100	0.053	183.068	-92.405
4	3	0.533	0.285	<0.001	309.986	-184.817
4	5	0.941	0.885	<0.001	10.251	-18.925
4	7	0.726	0.527	<0.001	8.809	0.625
5	1	-0.843	0.711	<0.001	-340.423	91.580
5	2	-0.876	0.767	<0.001	-272.607	73.817
5	3	-0.881	0.777	<0.001	-278.878	75.739
5	4	-0.931	0.866	<0.001	-209.056	78.844
5	7	-0.072	0.005	0.668	-5.691	36.953
7	1	-0.719	0.517	<0.001	-201.767	82.078
7	2	-0.840	0.706	<0.001	-200.199	75.275
7	3	-0.832	0.693	<0.001	-198.171	75.864
7	4	-0.842	0.709	<0.001	-133.318	74.365
7	5	0.068	0.005	0.685	3.993	27.029

A-2  $(R_{\text{band}[i]} - R_{\text{band}[j]}) / (R_{\text{band}[i]} + R_{\text{band}[j]})$  とクロロフィル濃度の相関関係

band[i]	band[j]	r	r <sup>2</sup>	p値	回帰係数	切片
1	2	-0.965	0.931	<0.001	-310.671	7.085
1	3	-0.956	0.913	<0.001	-331.024	9.698
1	4	-0.953	0.909	<0.001	-268.183	61.363
1	5	0.859	0.738	<0.001	250.399	-144.384
1	7	0.709	0.503	<0.001	154.262	-61.491
2	3	0.735	0.540	<0.001	2216.667	3.709
2	4	-0.336	0.113	0.039	-283.364	86.089
2	5	0.900	0.810	<0.001	198.366	-114.405
2	7	0.836	0.700	<0.001	148.870	-64.795
3	5	0.903	0.815	<0.001	202.283	-116.217
3	7	0.828	0.686	<0.001	148.149	-63.283
4	3	0.543	0.295	<0.001	461.040	113.676
4	5	0.945	0.893	<0.001	165.581	-74.005
4	7	0.839	0.705	<0.001	115.707	-29.075
5	7	-0.075	0.006	0.656	-11.287	30.891

A-3  $R_{\text{band}[i]} / (R_{\text{band}[j]} + R_{\text{band}[k]})$  とクロロフィル濃度の相関関係 (その1)

band[i]	band[j]	band[k]	r	r <sup>2</sup>	p値	回帰係数	切片
1	1	2	-0.962	0.926	<0.001	-634.882	323.808
1	1	3	-0.951	0.904	<0.001	-662.152	340.769
1	1	4	-0.972	0.945	<0.001	-523.049	322.752
1	1	5	0.883	0.779	<0.001	609.753	-488.679
1	1	7	0.703	0.495	<0.001	294.398	-203.798
1	2	2	-0.957	0.917	<0.001	-364.076	187.593
1	2	3	-0.952	0.907	<0.001	-367.399	191.084
1	2	4	-0.970	0.941	<0.001	-287.136	178.270
1	2	5	-0.931	0.866	<0.001	-307.786	260.526
1	2	7	-0.841	0.708	<0.001	-334.506	267.182
1	3	3	-0.945	0.894	<0.001	-370.091	194.403
1	3	4	-0.964	0.930	<0.001	-289.141	181.609
1	3	5	-0.905	0.820	<0.001	-316.737	272.751
1	3	7	-0.791	0.626	<0.001	-330.984	270.035
1	4	4	-0.972	0.945	<0.001	-207.491	162.940
1	4	5	-0.909	0.826	<0.001	-193.042	231.168
1	4	7	-0.758	0.575	<0.001	-193.654	217.593
1	5	5	0.856	0.733	<0.001	23.849	-39.880
1	5	7	0.820	0.672	<0.001	26.115	-32.610
1	7	7	0.549	0.301	<0.001	13.469	3.870
2	1	1	0.965	0.932	<0.001	269.702	-127.421
2	1	2	0.962	0.926	<0.001	634.881	-311.073
2	1	3	0.970	0.941	<0.001	582.457	-287.428
2	1	4	0.894	0.800	<0.001	475.305	-278.472
2	1	5	0.971	0.944	<0.001	127.600	-97.215
2	1	7	0.932	0.869	<0.001	115.321	-77.844
2	2	3	0.740	0.547	<0.001	5617.212	-2813.496
2	2	4	-0.708	0.502	0.039	-1442.077	891.833
2	2	5	0.932	0.868	<0.001	481.793	-387.778
2	2	7	0.824	0.679	<0.001	288.044	-205.338
2	3	3	0.740	0.548	<0.001	2741.550	-1375.322
2	3	4	-0.476	0.226	0.722	-1019.298	650.140
2	3	5	0.946	0.894	<0.001	408.733	-332.700
2	3	7	0.850	0.722	<0.001	264.429	-190.917
2	4	4	-0.710	0.505	0.025	-477.638	384.888
2	4	5	0.631	0.398	<0.001	204.016	-213.961
2	4	7	0.651	0.424	<0.001	141.160	-125.718
2	5	5	0.924	0.853	<0.001	14.916	-22.137
2	5	7	0.892	0.796	<0.001	16.670	-17.724
2	7	7	0.688	0.474	<0.001	11.449	2.863
3	1	1	0.954	0.910	<0.001	289.834	-134.670
3	1	2	0.928	0.862	<0.001	708.897	-340.757
3	1	3	0.951	0.904	<0.001	662.152	-321.383
3	1	4	0.849	0.721	<0.001	517.619	-296.982
3	1	5	0.964	0.929	<0.001	136.328	-102.289
3	1	7	0.923	0.851	<0.001	122.000	-81.023
3	2	2	-0.739	0.546	<0.001	-2876.113	1432.826
3	2	3	-0.740	0.547	<0.001	-5617.201	2803.711

A-4  $R_{\text{band}[i]} / (R_{\text{band}[j]} + R_{\text{band}[k]})$  とクロロフィル濃度の相関関係 (その2)

band[i]	band[j]	band[k]	r	r <sup>2</sup>	p値	回帰係数	切片
3	2	4	-0.854	0.730	<0.001	-1295.092	783.559
3	2	5	0.879	0.772	<0.001	541.801	-427.359
3	2	7	0.776	0.602	<0.001	303.289	-211.111
3	3	4	-0.799	0.639	<0.001	-1438.407	880.106
3	3	5	0.928	0.861	<0.001	480.397	-385.176
3	3	7	0.818	0.669	<0.001	285.706	-202.341
3	4	4	-0.798	0.637	<0.001	-488.723	383.363
3	4	5	0.526	0.276	<0.001	191.064	-191.929
3	4	7	0.591	0.350	<0.001	139.302	-119.322
3	5	5	0.921	0.847	<0.001	15.605	-23.044
3	5	7	0.887	0.786	<0.001	17.340	-18.264
3	7	7	0.678	0.460	<0.001	11.704	3.074
4	1	1	0.970	0.940	<0.001	316.554	-95.308
4	1	2	0.951	0.904	<0.001	586.761	-183.420
4	1	3	0.960	0.921	<0.001	555.892	-175.150
4	1	4	0.972	0.945	<0.001	523.049	-200.297
4	1	5	0.978	0.956	<0.001	156.584	-75.947
4	1	7	0.949	0.900	<0.001	146.488	-63.029
4	2	2	0.707	0.500	0.053	1013.198	-311.188
4	2	3	0.760	0.577	0.007	1018.460	-317.755
4	2	4	0.708	0.502	0.039	1442.075	-550.243
4	2	5	0.945	0.894	<0.001	425.093	-219.616
4	2	7	0.897	0.805	<0.001	329.397	-152.558
4	3	3	0.800	0.640	<0.001	992.383	-313.554
4	3	4	0.799	0.639	<0.001	1438.407	-558.301
4	3	5	0.960	0.921	<0.001	385.655	-201.820
4	3	7	0.911	0.830	<0.001	305.298	-143.025
4	4	5	0.950	0.902	<0.001	355.881	-260.347
4	4	7	0.843	0.711	<0.001	223.485	-138.169
4	5	5	0.935	0.874	<0.001	20.284	-18.284
4	5	7	0.907	0.822	<0.001	22.879	-14.630
4	7	7	0.725	0.526	<0.001	16.887	2.561
5	1	1	-0.883	0.780	<0.001	-884.045	108.034
5	1	2	-0.917	0.840	<0.001	-785.987	94.657
5	1	3	-0.914	0.835	<0.001	-784.494	95.403
5	1	4	-0.925	0.855	<0.001	-662.337	95.811
5	1	5	-0.883	0.779	<0.001	-609.752	121.074
5	1	7	-0.815	0.664	<0.001	-593.654	113.748
5	2	2	-0.927	0.859	<0.001	-714.818	85.396
5	2	3	-0.925	0.856	<0.001	-711.424	85.813
5	2	4	-0.935	0.875	<0.001	-593.329	84.874
5	2	5	-0.932	0.868	<0.001	-481.793	94.014
5	2	7	-0.908	0.824	<0.001	-512.484	94.383
5	3	3	-0.923	0.852	<0.001	-707.836	86.230
5	3	4	-0.933	0.871	<0.001	-589.545	85.329
5	3	5	-0.928	0.861	<0.001	-480.397	95.222
5	3	7	-0.902	0.814	<0.001	-509.520	95.354
5	4	4	-0.944	0.892	<0.001	-468.908	83.821

A-5  $R_{\text{band}[i]} / (R_{\text{band}[j]} + R_{\text{band}[k]})$  とクロロフィル濃度の相関関係 (その3)

band[i]	band[j]	band[k]	r	r <sup>2</sup>	p値	回帰係数	切片
5	4	5	-0.950	0.902	<0.001	-355.881	95.534
5	4	7	-0.912	0.831	<0.001	-381.879	95.193
5	5	7	0.029	0.001	0.656	8.889	29.972
5	7	7	0.021	0.000	0.668	3.382	32.424
7	1	1	-0.714	0.510	<0.001	-385.501	80.447
7	1	2	-0.787	0.620	<0.001	-392.049	77.595
7	1	3	-0.782	0.612	<0.001	-389.058	77.875
7	1	4	-0.790	0.625	<0.001	-327.203	77.998
7	1	5	-0.660	0.436	<0.001	-225.845	80.411
7	1	7	-0.703	0.495	<0.001	-294.397	90.599
7	2	2	-0.827	0.684	<0.001	-388.014	74.239
7	2	3	-0.825	0.680	<0.001	-385.341	74.477
7	2	4	-0.836	0.699	<0.001	-323.635	74.032
7	2	5	-0.796	0.633	<0.001	-238.292	76.824
7	2	7	-0.824	0.679	<0.001	-288.044	82.706
7	3	3	-0.822	0.675	<0.001	-382.537	74.708
7	3	4	-0.833	0.695	<0.001	-320.806	74.292
7	3	5	-0.789	0.622	<0.001	-235.152	77.232
7	3	7	-0.818	0.669	<0.001	-285.706	83.365
7	4	4	-0.847	0.717	<0.001	-257.653	73.503
7	4	5	-0.802	0.643	<0.001	-172.146	76.966
7	4	7	-0.843	0.711	<0.001	-223.485	85.316
7	5	5	-0.031	0.001	0.685	-3.671	36.317
7	5	7	-0.029	0.001	0.656	-8.889	38.861

A-6  $(R_{\text{band}[i]}+R_{\text{band}[j]})/R_{\text{band}[k]}$ とクロロフィル濃度の相関関係(その1)

band[i]	band[j]	band[k]	r	r <sup>2</sup>	p値	回帰係数	切片
1	1	2	-0.957	0.917	<0.001	-91.019	187.593
1	1	3	-0.945	0.894	<0.001	-92.523	194.404
1	1	4	-0.972	0.945	<0.001	-51.873	162.940
1	1	5	0.856	0.733	<0.001	5.962	-39.880
1	1	7	0.549	0.301	<0.001	3.367	3.870
1	2	1	0.965	0.932	<0.001	134.851	-262.272
1	2	2	-0.957	0.917	<0.001	-182.038	369.631
1	2	3	-0.922	0.851	<0.001	-192.042	397.875
1	2	4	-0.954	0.909	<0.001	-81.020	253.778
1	2	5	0.903	0.815	<0.001	4.633	-29.571
1	2	7	0.635	0.403	<0.001	3.162	2.666
1	3	1	0.954	0.910	<0.001	144.917	-279.587
1	3	2	-0.965	0.932	<0.001	-172.070	346.580
1	3	3	-0.945	0.894	<0.001	-185.046	379.450
1	3	4	-0.963	0.927	<0.001	-79.072	245.354
1	3	5	0.900	0.810	<0.001	4.761	-30.309
1	3	7	0.627	0.393	<0.001	3.192	2.861
1	4	1	0.970	0.940	<0.001	158.277	-253.585
1	4	2	-0.883	0.780	<0.001	-192.593	327.615
1	4	3	-0.839	0.704	<0.001	-198.869	345.568
1	4	4	-0.972	0.945	<0.001	-103.745	266.685
1	4	5	0.907	0.823	<0.001	5.575	-29.270
1	4	7	0.645	0.416	<0.001	3.884	2.170
1	5	1	-0.883	0.780	<0.001	-442.024	550.058
1	5	2	-0.959	0.920	<0.001	-123.710	156.178
1	5	3	-0.951	0.904	<0.001	-124.990	160.801
1	5	4	-0.977	0.955	<0.001	-73.964	141.653
1	5	5	0.856	0.733	<0.001	11.924	-51.805
1	5	7	0.489	0.239	0.0019	5.309	6.327
1	7	1	-0.714	0.510	<0.001	-192.750	273.197
1	7	2	-0.931	0.866	<0.001	-101.195	140.398
1	7	3	-0.922	0.851	<0.001	-101.739	143.873
1	7	4	-0.952	0.907	<0.001	-61.806	129.794
1	7	5	0.786	0.618	<0.001	10.147	-43.668
1	7	7	0.549	0.301	<0.001	6.734	-2.865
2	2	1	0.965	0.932	<0.001	67.425	-127.421
2	2	3	0.740	0.548	<0.001	685.377	-1375.300
2	2	4	-0.710	0.505	0.0250	-119.409	384.888
2	2	5	0.924	0.853	<0.001	3.729	-22.137
2	2	7	0.688	0.474	<0.001	2.862	2.863
2	3	1	0.960	0.922	<0.001	69.933	-131.106
2	3	2	-0.739	0.546	<0.001	-1438.010	2870.791
2	3	3	0.740	0.548	<0.001	1370.775	-2746.098
2	3	4	-0.761	0.579	0.0035	-122.576	389.349
2	3	5	0.922	0.850	<0.001	3.814	-22.587
2	3	7	0.683	0.467	<0.001	2.894	2.962
2	4	1	0.973	0.946	<0.001	73.630	-114.288
2	4	2	0.707	0.500	0.0534	506.599	-817.788

A-7  $(R_{\text{band}[i]}+R_{\text{band}[j]})/R_{\text{band}[k]}$ とクロロフィル濃度の相関関係(その2)

band[i]	band[j]	band[k]	r	r <sup>2</sup>	p値	回帰係数	切片
2	4	3	0.856	0.734	<0.001	434.469	-716.940
2	4	4	-0.710	0.505	0.0250	-238.819	623.707
2	4	5	0.929	0.864	<0.001	4.307	-20.617
2	4	7	0.704	0.496	<0.001	3.420	2.667
2	5	1	0.931	0.867	<0.001	168.456	-195.909
2	5	2	-0.927	0.859	<0.001	-357.410	442.805
2	5	3	-0.873	0.762	<0.001	-379.569	480.186
2	5	4	-0.946	0.894	<0.001	-151.086	288.188
2	5	5	0.924	0.853	<0.001	7.458	-29.595
2	5	7	0.641	0.411	<0.001	4.955	3.414
2	7	1	0.851	0.724	<0.001	169.688	-210.230
2	7	2	-0.827	0.684	<0.001	-194.006	268.245
2	7	3	-0.783	0.613	<0.001	-195.813	276.953
2	7	4	-0.894	0.799	<0.001	-103.972	218.728
2	7	5	0.896	0.803	<0.001	7.049	-29.319
2	7	7	0.688	0.474	<0.001	5.725	-2.862
3	3	1	0.954	0.910	<0.001	72.459	-134.670
3	3	2	-0.739	0.546	<0.001	-719.013	1432.796
3	3	4	-0.798	0.637	<0.001	-122.181	383.363
3	3	5	0.921	0.847	<0.001	3.901	-23.044
3	3	7	0.678	0.460	<0.001	2.926	3.074
3	4	1	0.967	0.936	<0.001	76.594	-117.719
3	4	2	0.470	0.221	0.8392	364.995	-569.927
3	4	3	0.800	0.640	<0.001	496.186	-809.736
3	4	4	-0.798	0.637	<0.001	-244.361	627.724
3	4	5	0.928	0.861	<0.001	4.420	-21.100
3	4	7	0.699	0.488	<0.001	3.468	2.763
3	5	1	0.906	0.821	<0.001	181.825	-208.136
3	5	2	-0.941	0.886	<0.001	-318.295	389.422
3	5	3	-0.923	0.852	<0.001	-353.918	440.148
3	5	4	-0.961	0.923	<0.001	-143.904	270.390
3	5	5	0.921	0.847	<0.001	7.802	-30.847
3	5	7	0.630	0.397	<0.001	5.031	3.723
3	7	1	0.799	0.639	<0.001	175.704	-213.088
3	7	2	-0.850	0.722	<0.001	-184.873	252.203
3	7	3	-0.822	0.675	<0.001	-191.268	265.976
3	7	4	-0.908	0.824	<0.001	-100.802	209.095
3	7	5	0.891	0.794	<0.001	7.342	-30.373
3	7	7	0.678	0.460	<0.001	5.852	-2.778
4	4	1	0.970	0.940	<0.001	79.138	-95.308
4	4	2	0.707	0.500	0.0534	253.301	-311.190
4	4	3	0.800	0.640	<0.001	248.093	-313.551
4	4	5	0.935	0.874	<0.001	5.071	-18.284
4	4	7	0.725	0.526	<0.001	4.222	2.561
4	5	1	0.905	0.820	<0.001	196.382	-159.402
4	5	2	-0.633	0.400	<0.001	-282.508	266.852
4	5	3	-0.536	0.287	<0.001	-256.501	251.240
4	5	4	-0.944	0.892	<0.001	-234.454	318.275

A-8  $(R_{\text{band}[i]}+R_{\text{band}[j]})/R_{\text{band}[k]}$ とクロロフィル濃度の相関関係(その3)

band[i]	band[j]	band[k]	r	r <sup>2</sup>	p値	回帰係数	切片
4	5	5	0.935	0.874	<0.001	10.142	-28.426
4	5	7	0.660	0.436	<0.001	6.963	2.971
4	7	1	0.766	0.587	<0.001	178.089	-154.688
4	7	2	-0.669	0.447	<0.001	-176.008	190.280
4	7	3	-0.617	0.380	<0.001	-169.539	188.676
4	7	4	-0.847	0.717	<0.001	-128.827	202.330
4	7	5	0.897	0.805	<0.001	9.397	-28.125
4	7	7	0.725	0.526	<0.001	8.443	-5.882
5	5	1	-0.883	0.780	<0.001	-221.011	108.034
5	5	2	-0.927	0.859	<0.001	-178.705	85.396
5	5	3	-0.923	0.852	<0.001	-176.959	86.230
5	5	4	-0.944	0.892	<0.001	-117.227	83.821
5	5	7	0.021	0.000	0.6683	0.845	32.424
5	7	1	-0.845	0.714	<0.001	-161.984	100.236
5	7	2	-0.904	0.818	<0.001	-137.878	82.458
5	7	3	-0.901	0.811	<0.001	-136.629	83.278
5	7	4	-0.921	0.849	<0.001	-90.566	81.047
5	7	5	-0.031	0.001	0.6852	-1.836	38.152
5	7	7	0.021	0.000	0.6683	1.691	30.733
7	7	1	-0.714	0.510	<0.001	-96.375	80.447
7	7	2	-0.827	0.684	<0.001	-97.003	74.239
7	7	3	-0.822	0.675	<0.001	-95.634	74.708
7	7	4	-0.847	0.717	<0.001	-64.413	73.503
7	7	5	-0.031	0.001	0.6852	-0.918	36.317

A-9  $R_{\text{band}[i]} / (R_{\text{band}[j]} - R_{\text{band}[k]})$  とクロロフィル濃度の相関関係 (その1)

band[i]	band[j]	band[k]	r	r <sup>2</sup>	p値	回帰係数	切片
1	1	2	0.449	0.201	0.021	0.277	37.002
1	1	3	-0.198	0.039	0.261	-0.017	34.024
1	1	4	0.670	0.449	<0.001	0.865	24.633
1	1	5	-0.881	0.777	<0.001	-298.243	392.806
1	1	7	-0.715	0.512	<0.001	-105.227	173.551
1	2	3	-0.553	0.306	0.024	-0.242	43.349
1	2	4	-0.560	0.313	<0.001	-39.900	139.423
1	2	5	-0.950	0.903	<0.001	-101.233	134.509
1	2	7	-0.919	0.844	<0.001	-72.115	112.052
1	3	4	-0.269	0.072	0.012	-19.800	91.061
1	3	5	-0.941	0.886	<0.001	-100.523	136.970
1	3	7	-0.910	0.829	<0.001	-70.905	113.373
1	4	5	-0.967	0.935	<0.001	-46.605	108.853
1	4	7	-0.909	0.827	<0.001	-27.266	85.121
1	5	7	-0.300	0.090	0.027	-0.174	30.168
2	1	2	0.449	0.201	0.021	0.277	37.279
2	1	3	-0.198	0.039	0.260	-0.016	34.010
2	1	4	0.674	0.454	<0.001	0.630	25.192
2	1	5	0.896	0.802	<0.001	150.632	-182.277
2	1	7	0.560	0.314	<0.001	88.806	-106.512
2	2	3	-0.510	0.260	0.048	-0.225	43.926
2	2	4	0.697	0.486	0.309	48.762	-119.882
2	2	5	-0.917	0.842	<0.001	-248.014	324.398
2	2	7	-0.818	0.669	<0.001	-111.689	176.068
2	3	4	0.824	0.679	<0.001	40.572	-106.421
2	3	5	-0.874	0.765	<0.001	-250.728	337.044
2	3	7	-0.790	0.624	<0.001	-108.963	177.417
2	4	5	-0.956	0.914	<0.001	-75.175	175.601
2	4	7	-0.849	0.721	<0.001	-32.509	105.011
2	5	7	-0.336	0.113	0.019	-0.144	30.069
3	1	2	0.451	0.204	0.021	0.286	37.305
3	1	3	-0.198	0.039	0.261	-0.017	34.008
3	1	4	0.673	0.453	<0.001	0.651	25.184
3	1	5	0.863	0.744	<0.001	160.187	-189.688
3	1	7	0.475	0.226	<0.001	79.779	-88.840
3	2	3	-0.510	0.260	0.048	-0.225	43.701
3	2	4	0.631	0.399	0.633	47.074	-110.526
3	2	5	-0.932	0.869	<0.001	-231.466	297.739
3	2	7	-0.834	0.696	<0.001	-109.895	170.061
3	3	4	0.799	0.638	0.004	42.680	-109.642
3	3	5	-0.913	0.834	<0.001	-243.131	319.956
3	3	7	-0.814	0.663	<0.001	-108.956	173.580
3	4	5	-0.965	0.931	<0.001	-74.197	170.048
3	4	7	-0.857	0.735	<0.001	-32.716	103.597
3	5	7	-0.335	0.112	0.019	-0.149	30.051
4	1	2	0.446	0.199	0.024	0.412	37.278
4	1	3	-0.198	0.039	0.258	-0.025	34.007
4	1	4	0.670	0.449	<0.001	0.865	25.498

A-10  $R_{\text{band}[i]} / (R_{\text{band}[j]} - R_{\text{band}[k]})$ とクロロフィル濃度の相関関係(その2)

band[i]	band[j]	band[k]	r	r <sup>2</sup>	p値	回帰係数	切片
4	1	5	0.913	0.834	<0.001	164.031	-126.634
4	1	7	0.716	0.513	<0.001	128.757	-104.801
4	2	3	-0.478	0.228	0.082	-0.297	42.907
4	2	4	0.697	0.486	0.309	48.762	-71.120
4	2	5	-0.518	0.269	0.001	-228.057	215.483
4	2	7	-0.634	0.402	<0.001	-140.000	154.998
4	3	4	0.799	0.638	0.004	42.680	-66.962
4	3	5	-0.412	0.170	0.003	-188.275	188.612
4	3	7	-0.592	0.351	<0.001	-132.665	152.641
4	4	5	-0.930	0.864	<0.001	-133.434	204.690
4	4	7	-0.816	0.666	<0.001	-50.909	109.414
4	5	7	-0.345	0.119	0.016	-0.210	30.035
5	1	2	0.442	0.196	0.028	1.155	36.520
5	1	3	-0.193	0.037	0.265	-0.082	34.024
5	1	4	0.649	0.421	<0.001	6.570	23.543
5	1	5	-0.881	0.777	<0.001	-298.243	94.563
5	1	7	-0.892	0.796	<0.001	-246.144	89.309
5	2	3	-0.572	0.327	0.028	-1.037	41.329
5	2	4	-0.841	0.707	<0.001	-112.062	84.180
5	2	5	-0.917	0.842	<0.001	-248.014	76.384
5	2	7	-0.918	0.843	<0.001	-207.439	72.817
5	3	4	-0.807	0.652	<0.001	-107.942	86.643
5	3	5	-0.913	0.834	<0.001	-243.131	76.826
5	3	7	-0.916	0.838	<0.001	-203.053	73.261
5	4	5	-0.930	0.864	<0.001	-133.434	71.256
5	4	7	-0.918	0.843	<0.001	-95.546	65.429
5	5	7	-0.201	0.040	0.062	-0.751	31.211
7	1	2	0.474	0.225	0.013	0.963	36.999
7	1	3	-0.179	0.032	0.307	-0.059	33.958
7	1	4	0.634	0.402	<0.001	4.503	23.827
7	1	5	-0.768	0.590	<0.001	-152.523	78.533
7	1	7	-0.715	0.512	<0.001	-105.227	68.324
7	2	3	-0.541	0.293	0.013	-0.606	40.276
7	2	4	-0.746	0.557	<0.001	-59.663	72.497
7	2	5	-0.854	0.729	<0.001	-147.251	70.275
7	2	7	-0.818	0.669	<0.001	-111.689	64.379
7	3	4	-0.710	0.504	<0.001	-56.444	73.644
7	3	5	-0.850	0.723	<0.001	-144.600	70.711
7	3	7	-0.814	0.663	<0.001	-108.956	64.624
7	4	5	-0.883	0.780	<0.001	-83.053	67.427
7	4	7	-0.816	0.666	<0.001	-50.909	58.505
7	5	7	-0.201	0.040	0.062	-0.751	30.459

A-11  $(R_{\text{band}[i]} - R_{\text{band}[j]})/R_{\text{band}[k]}$  とクロロフィル濃度の相関関係 (その1)

band[i]	band[j]	band[k]	r	r <sup>2</sup>	p値	回帰係数	切片
1	2	1	-0.965	0.932	<0.001	-134.851	7.430
1	2	2	-0.957	0.917	<0.001	-182.038	5.554
1	2	3	-0.959	0.920	<0.001	-175.984	5.644
1	2	4	-0.945	0.893	<0.001	-127.689	4.982
1	2	5	-0.962	0.925	<0.001	-17.492	10.671
1	2	7	-0.879	0.772	<0.001	-20.313	14.234
1	3	1	-0.954	0.910	<0.001	-144.917	10.247
1	3	2	-0.943	0.889	<0.001	-190.961	9.340
1	3	3	-0.945	0.894	<0.001	-185.046	9.358
1	3	4	-0.931	0.867	<0.001	-133.306	9.000
1	3	5	-0.956	0.914	<0.001	-19.397	12.313
1	3	7	-0.874	0.764	<0.001	-22.545	15.554
1	4	1	-0.970	0.940	<0.001	-158.277	62.969
1	4	2	-0.974	0.949	<0.001	-157.669	59.660
1	4	3	-0.972	0.946	<0.001	-154.544	59.766
1	4	4	-0.972	0.945	<0.001	-103.745	59.194
1	4	5	-0.864	0.746	<0.001	-30.199	65.230
1	4	7	-0.798	0.636	<0.001	-36.164	60.410
1	5	1	0.883	0.780	<0.001	442.023	-333.989
1	5	2	-0.895	0.802	<0.001	-304.611	247.146
1	5	3	-0.862	0.742	<0.001	-306.503	254.380
1	5	4	-0.917	0.841	<0.001	-158.508	197.266
1	5	5	0.856	0.733	<0.001	11.924	-27.956
1	5	7	0.620	0.385	<0.001	8.664	1.609
1	7	1	0.714	0.510	<0.001	192.750	-112.303
1	7	2	-0.568	0.322	<0.001	-213.525	169.546
1	7	3	-0.493	0.243	<0.001	-186.967	155.936
1	7	4	-0.715	0.511	<0.001	-144.131	168.681
1	7	5	0.887	0.787	<0.001	12.692	-26.166
1	7	7	0.549	0.301	<0.001	6.734	10.604
2	3	1	0.855	0.731	<0.001	1159.159	-4.543
2	3	2	0.739	0.546	<0.001	1438.011	-5.229
2	3	3	0.740	0.548	<0.001	1370.774	-4.547
2	3	4	0.682	0.466	<0.001	940.806	-3.609
2	3	5	0.903	0.815	<0.001	140.903	3.544
2	3	7	0.839	0.704	<0.001	170.456	7.542
2	4	1	0.559	0.313	<0.001	321.510	-88.421
2	4	2	-0.707	0.500	0.053	-506.599	195.410
2	4	3	-0.647	0.418	0.155	-470.103	187.902
2	4	4	-0.710	0.505	0.025	-238.819	146.069
2	4	5	0.851	0.724	<0.001	25.685	-26.952
2	4	7	0.578	0.334	<0.001	16.347	5.927
2	5	1	0.970	0.942	<0.001	108.538	-77.727
2	5	2	0.927	0.859	<0.001	357.410	-272.014
2	5	3	0.941	0.885	<0.001	315.481	-243.752
2	5	4	0.510	0.260	<0.001	153.973	-159.856
2	5	5	0.924	0.853	<0.001	7.458	-14.679
2	5	7	0.738	0.545	<0.001	6.610	2.887

A-12  $(R_{\text{band}[i]} - R_{\text{band}[j]})/R_{\text{band}[k]}$  とクロロフィル濃度の相関関係 (その2)

band[i]	band[j]	band[k]	r	r <sup>2</sup>	p値	回帰係数	切片
2	7	1	0.933	0.871	<0.001	91.186	-53.127
2	7	2	0.827	0.684	<0.001	194.006	-119.767
2	7	3	0.847	0.718	<0.001	182.707	-114.928
2	7	4	0.628	0.394	<0.001	114.157	-98.931
2	7	5	0.935	0.875	<0.001	7.609	-12.208
2	7	7	0.688	0.474	<0.001	5.725	8.587
3	4	1	0.231	0.053	0.021	156.072	-20.466
3	4	2	-0.822	0.676	<0.001	-494.846	178.279
3	4	3	-0.800	0.640	<0.001	-496.186	182.635
3	4	4	-0.798	0.637	<0.001	-244.361	139.001
3	4	5	0.811	0.658	<0.001	29.334	-29.294
3	4	7	0.519	0.269	<0.001	16.508	8.183
3	5	1	0.963	0.927	<0.001	115.220	-80.787
3	5	2	0.885	0.782	<0.001	386.681	-286.593
3	5	3	0.923	0.852	<0.001	353.918	-267.688
3	5	4	0.394	0.155	0.003	129.470	-123.935
3	5	5	0.921	0.847	<0.001	7.802	-15.242
3	5	7	0.730	0.533	<0.001	6.807	3.013
3	7	1	0.923	0.853	<0.001	95.536	-54.119
3	7	2	0.793	0.628	<0.001	199.749	-118.909
3	7	3	0.822	0.675	<0.001	191.268	-116.560
3	7	4	0.573	0.328	<0.001	110.936	-90.796
3	7	5	0.932	0.869	<0.001	7.966	-12.654
3	7	7	0.678	0.460	<0.001	5.852	8.926
4	5	1	0.980	0.961	<0.001	124.710	-46.972
4	5	2	0.965	0.932	<0.001	274.992	-113.721
4	5	3	0.973	0.946	<0.001	255.984	-107.441
4	5	4	0.944	0.892	<0.001	234.454	-150.633
4	5	5	0.935	0.874	<0.001	10.142	-8.142
4	5	7	0.794	0.631	<0.001	10.180	3.538
4	7	1	0.937	0.877	<0.001	102.206	-24.809
4	7	2	0.888	0.789	<0.001	174.804	-48.766
4	7	3	0.897	0.804	<0.001	166.819	-47.270
4	7	4	0.847	0.717	<0.001	128.827	-55.324
4	7	5	0.943	0.889	<0.001	10.249	-3.934
4	7	7	0.725	0.526	<0.001	8.443	11.004
5	7	1	0.307	0.094	0.331	107.279	41.642
5	7	2	0.431	0.186	0.104	165.245	44.297
5	7	3	0.423	0.179	0.111	159.105	44.166
5	7	4	0.449	0.202	0.072	114.436	44.562
5	7	5	0.031	0.001	0.685	1.836	34.481
5	7	7	0.021	0.000	0.668	1.691	34.115

B.各変数とクロロフィル濃度との相関(海水)

B-1  $R_{\text{band}[i]}/R_{\text{band}[j]}$ とクロロフィル濃度の相関関係

band[i]	band[j]	r	r <sup>2</sup>	p値	回帰係数	切片
1	2	-0.896	0.803	<0.001	-140.571	163.670
1	3	-0.890	0.791	<0.001	-124.752	158.902
1	4	-0.954	0.911	<0.001	-56.221	123.875
1	5	0.553	0.306	<0.001	5.528	-21.520
1	7	0.118	0.014	0.4941	2.983	19.091
2	1	0.918	0.843	<0.001	140.338	-119.411
2	3	-0.162	0.026	0.3465	-184.379	229.396
2	4	-0.774	0.600	<0.001	-89.141	185.220
2	5	0.789	0.622	<0.001	5.590	-25.602
2	7	0.504	0.254	0.0017	10.454	-7.975
3	1	0.910	0.828	<0.001	146.668	-113.816
3	2	0.140	0.020	0.4149	185.116	-141.348
3	4	-0.796	0.633	<0.001	-106.576	200.819
3	5	0.794	0.630	<0.001	6.080	-25.672
3	7	0.513	0.263	0.0014	11.497	-8.423
4	1	0.969	0.939	<0.001	160.872	-69.380
4	2	0.760	0.577	<0.001	267.282	-124.704
4	3	0.799	0.638	<0.001	278.348	-144.824
4	5	0.874	0.764	<0.001	8.730	-20.575
4	7	0.706	0.498	<0.001	22.170	-16.318
5	1	-0.562	0.316	<0.001	-420.825	76.932
5	2	-0.743	0.552	<0.001	-387.290	71.822
5	3	-0.758	0.574	<0.001	-369.796	73.404
5	4	-0.855	0.731	<0.001	-234.049	74.703
5	7	-0.362	0.131	0.0298	-73.918	56.727
7	1	-0.179	0.032	0.2950	-52.361	45.377
7	2	-0.565	0.319	<0.001	-129.948	68.009
7	3	-0.586	0.343	<0.001	-128.023	70.714
7	4	-0.745	0.556	<0.001	-92.346	77.684
7	5	0.352	0.124	0.0355	9.919	1.155

B-2  $(R_{\text{band}[i]} - R_{\text{band}[j]}) / (R_{\text{band}[i]} + R_{\text{band}[j]})$  とクロロフィル濃度の相関関係

band[i]	band[j]	r	r <sup>2</sup>	p値	回帰係数	切片
1	2	-0.910	0.827	<0.001	-284.446	21.963
1	3	-0.902	0.814	<0.001	-274.400	33.550
1	4	-0.967	0.935	<0.001	-207.627	80.190
1	5	0.562	0.316	<0.001	265.706	-182.582
1	7	0.166	0.028	0.3326	41.756	7.008
2	3	-0.151	0.023	0.3808	-370.377	44.402
2	4	-0.766	0.587	<0.001	-334.338	119.639
2	5	0.755	0.570	<0.001	253.185	-174.187
2	7	0.562	0.316	<0.001	114.943	-33.461
3	5	0.768	0.591	<0.001	244.464	-163.497
3	7	0.578	0.334	<0.001	115.214	-30.215
4	3	0.798	0.637	<0.001	365.908	114.030
4	5	0.868	0.753	<0.001	175.516	-90.009
4	7	0.741	0.550	<0.001	108.831	-5.929
5	7	-0.364	0.132	0.0291	-72.229	-4.235

B-3  $R_{\text{band}[j]} / (R_{\text{band}[j]} + R_{\text{band}[k]})$  とクロロフィル濃度の相関関係 (その1)

band[i]	band[j]	band[k]	r	r <sup>2</sup>	p値	回帰係数	切片
1	1	2	-0.910	0.827	<0.001	-568.891	306.409
1	1	3	-0.902	0.814	<0.001	-548.800	307.950
1	1	4	-0.967	0.935	<0.001	-415.255	287.818
1	1	5	0.562	0.316	<0.001	531.416	-448.291
1	1	7	0.166	0.028	0.333	83.510	-34.746
1	2	2	-0.896	0.803	<0.001	-281.141	163.670
1	2	3	-0.895	0.802	<0.001	-266.867	162.147
1	2	4	-0.950	0.902	<0.001	-203.413	153.074
1	2	5	-0.877	0.769	<0.001	-192.736	194.956
1	2	7	-0.781	0.610	<0.001	-204.554	179.646
1	3	3	-0.890	0.791	<0.001	-249.504	158.902
1	3	4	-0.940	0.884	<0.001	-184.907	147.878
1	3	5	-0.854	0.730	<0.001	-168.792	185.617
1	3	7	-0.743	0.552	<0.001	-173.262	165.031
1	4	4	-0.954	0.911	<0.001	-112.441	123.875
1	4	5	-0.903	0.815	<0.001	-82.437	144.832
1	4	7	-0.763	0.582	<0.001	-90.818	129.131
1	5	5	0.553	0.306	<0.001	11.055	-21.520
1	5	7	0.281	0.079	0.097	11.905	0.231
1	7	7	0.118	0.014	0.494	5.966	19.091
2	1	1	0.918	0.843	<0.001	280.676	-119.411
2	1	2	0.910	0.827	<0.001	568.891	-262.483
2	1	3	0.907	0.823	<0.001	532.617	-255.493
2	1	4	0.654	0.427	<0.001	309.372	-173.516
2	1	5	0.929	0.863	<0.001	143.949	-107.899
2	1	7	0.875	0.765	<0.001	156.138	-97.233
2	2	3	-0.151	0.023	0.381	-740.588	414.693
2	2	4	-0.766	0.587	<0.001	-668.673	453.975
2	2	5	0.755	0.570	<0.001	506.370	-427.372
2	2	7	0.562	0.316	<0.001	229.886	-148.404
2	3	3	-0.162	0.026	0.347	-368.762	229.398
2	3	4	-0.712	0.507	<0.001	-488.498	356.131
2	3	5	0.637	0.405	<0.001	343.322	-304.381
2	3	7	0.512	0.262	0.001	179.957	-119.024
2	4	4	-0.774	0.600	<0.001	-178.282	185.219
2	4	5	-0.345	0.119	0.040	-60.301	117.464
2	4	7	-0.029	0.001	0.869	-4.884	34.687
2	5	5	0.789	0.622	<0.001	11.180	-25.602
2	5	7	0.661	0.437	<0.001	20.719	-24.254
2	7	7	0.504	0.254	0.002	20.907	-7.975
3	1	1	0.910	0.828	<0.001	293.337	-113.817
3	1	2	0.885	0.783	<0.001	561.774	-235.989
3	1	3	0.902	0.814	<0.001	548.801	-240.850
3	1	4	0.671	0.450	<0.001	333.534	-171.976
3	1	5	0.925	0.856	<0.001	152.148	-104.225
3	1	7	0.878	0.771	<0.001	167.393	-95.588
3	2	2	0.140	0.020	0.415	370.192	-141.329
3	2	3	0.151	0.023	0.381	740.588	-325.896

B-4  $R_{\text{band}[i]} / (R_{\text{band}[j]} + R_{\text{band}[k]})$ とクロロフィル濃度の相関関係(その2)

band[i]	band[j]	band[k]	r	r <sup>2</sup>	p値	回帰係数	切片
3	2	4	-0.793	0.628	<0.001	-858.192	530.950
3	2	5	0.778	0.606	<0.001	532.264	-412.561
3	2	7	0.612	0.375	<0.001	275.872	-166.942
3	3	4	-0.798	0.637	<0.001	-731.818	479.939
3	3	5	0.768	0.591	<0.001	488.929	-407.962
3	3	7	0.578	0.334	<0.001	230.427	-145.428
3	4	4	-0.796	0.633	<0.001	-213.152	200.819
3	4	5	-0.327	0.107	0.051	-66.746	119.091
3	4	7	0.003	0.000	0.986	0.593	28.426
3	5	5	0.794	0.630	<0.001	12.161	-25.672
3	5	7	0.670	0.449	<0.001	22.696	-24.688
3	7	7	0.513	0.263	0.001	22.993	-8.423
4	1	1	0.969	0.939	<0.001	321.743	-69.380
4	1	2	0.941	0.886	<0.001	450.461	-104.084
4	1	3	0.954	0.909	<0.001	438.559	-106.056
4	1	4	0.967	0.935	<0.001	415.254	-127.437
4	1	5	0.979	0.958	<0.001	170.817	-64.985
4	1	7	0.966	0.933	<0.001	199.822	-64.401
4	2	2	0.760	0.577	<0.001	534.569	-124.705
4	2	3	0.781	0.610	<0.001	548.461	-135.189
4	2	4	0.766	0.587	<0.001	668.673	-214.698
4	2	5	0.896	0.803	<0.001	305.768	-129.619
4	2	7	0.904	0.817	<0.001	325.132	-115.428
4	3	3	0.799	0.638	<0.001	556.696	-144.824
4	3	4	0.798	0.637	<0.001	731.818	-251.879
4	3	5	0.918	0.842	<0.001	297.401	-137.164
4	3	7	0.903	0.816	<0.001	303.429	-114.631
4	4	5	0.868	0.753	<0.001	351.032	-265.525
4	4	7	0.741	0.550	<0.001	217.662	-114.760
4	5	5	0.874	0.764	<0.001	17.459	-20.575
4	5	7	0.817	0.668	<0.001	36.452	-25.240
4	7	7	0.706	0.498	<0.001	44.340	-16.318
5	1	1	-0.562	0.316	<0.001	-841.650	76.932
5	1	2	-0.686	0.470	<0.001	-864.883	77.338
5	1	3	-0.690	0.476	<0.001	-849.662	78.470
5	1	4	-0.731	0.534	<0.001	-736.699	81.604
5	1	5	-0.562	0.316	<0.001	-531.416	83.125
5	1	7	-0.562	0.316	<0.001	-604.275	81.379
5	2	2	-0.743	0.552	<0.001	-774.582	71.822
5	2	3	-0.751	0.563	<0.001	-758.751	72.672
5	2	4	-0.796	0.633	<0.001	-642.287	74.252
5	2	5	-0.755	0.570	<0.001	-506.370	78.998
5	2	7	-0.743	0.552	<0.001	-610.954	80.515
5	3	3	-0.758	0.574	<0.001	-739.590	73.404
5	3	4	-0.804	0.647	<0.001	-617.640	74.849
5	3	5	-0.768	0.591	<0.001	-488.928	80.967
5	3	7	-0.748	0.559	<0.001	-583.955	81.448
5	4	4	-0.855	0.731	<0.001	-468.098	74.703

B-5  $R_{\text{band}[i]} / (R_{\text{band}[j]} + R_{\text{band}[k]})$ とクロロフィル濃度の相関関係(その3)

band[i]	band[j]	band[k]	r	r <sup>2</sup>	p値	回帰係数	切片
5	4	5	-0.868	0.753	<0.001	-351.032	85.507
5	4	7	-0.809	0.654	<0.001	-429.116	83.130
5	5	7	-0.364	0.132	0.029	-144.458	67.994
5	7	7	-0.362	0.131	0.030	-147.836	56.727
7	1	1	-0.179	0.032	0.295	-104.722	45.377
7	1	2	-0.415	0.172	0.012	-222.614	62.950
7	1	3	-0.415	0.173	0.012	-218.634	63.734
7	1	4	-0.466	0.217	<0.001	-201.930	68.308
7	1	5	-0.119	0.014	0.490	-40.418	40.354
7	1	7	-0.166	0.028	0.333	-83.510	48.763
7	2	2	-0.565	0.319	<0.001	-259.896	68.009
7	2	3	-0.575	0.331	<0.001	-258.352	69.363
7	2	4	-0.643	0.414	<0.001	-232.110	73.310
7	2	5	-0.519	0.270	0.001	-148.912	69.077
7	2	7	-0.562	0.316	<0.001	-229.886	81.482
7	3	3	-0.586	0.343	<0.001	-256.046	70.714
7	3	4	-0.658	0.433	<0.001	-228.079	74.854
7	3	5	-0.532	0.283	<0.001	-145.994	71.289
7	3	7	-0.578	0.334	<0.001	-230.427	84.999
7	4	4	-0.745	0.556	<0.001	-184.693	77.684
7	4	5	-0.667	0.445	<0.001	-115.885	79.724
7	4	7	-0.741	0.550	<0.001	-217.662	102.902
7	5	5	0.352	0.124	0.036	19.838	1.155
7	5	7	0.364	0.132	0.029	144.458	-76.464

B-6  $(R_{\text{band}[i]}+R_{\text{band}[j]})/R_{\text{band}[k]}$ とクロロフィル濃度の相関関係(その1)

band[i]	band[j]	band[k]	r	r <sup>2</sup>	p値	回帰係数	切片
1	1	2	-0.896	0.803	<0.001	-70.285	163.670
1	1	3	-0.890	0.791	<0.001	-62.376	158.902
1	1	4	-0.954	0.911	<0.001	-28.110	123.875
1	1	5	0.553	0.306	<0.001	2.764	-21.520
1	1	7	0.118	0.014	0.494	1.491	19.091
1	2	1	0.918	0.843	<0.001	140.338	-259.749
1	2	2	-0.896	0.803	<0.001	-140.571	304.241
1	2	3	-0.871	0.758	<0.001	-116.859	277.662
1	2	4	-0.927	0.859	<0.001	-37.485	157.944
1	2	5	0.702	0.493	<0.001	2.958	-26.936
1	2	7	0.339	0.115	0.043	3.961	1.794
1	3	1	0.910	0.828	<0.001	146.668	-260.485
1	3	2	-0.889	0.790	<0.001	-140.784	293.469
1	3	3	-0.890	0.791	<0.001	-124.752	283.653
1	3	4	-0.941	0.885	<0.001	-39.991	160.954
1	3	5	0.702	0.493	<0.001	3.098	-27.174
1	3	7	0.337	0.113	0.045	4.117	1.880
1	4	1	0.969	0.939	<0.001	160.872	-230.252
1	4	2	-0.637	0.406	<0.001	-114.224	204.149
1	4	3	-0.666	0.444	<0.001	-109.559	211.529
1	4	4	-0.954	0.911	<0.001	-56.221	180.096
1	4	5	0.739	0.546	<0.001	3.822	-27.644
1	4	7	0.405	0.164	0.014	6.047	-3.518
1	5	1	-0.562	0.316	<0.001	-420.825	497.757
1	5	2	-0.893	0.797	<0.001	-111.643	148.297
1	5	3	-0.895	0.800	<0.001	-101.340	146.687
1	5	4	-0.964	0.929	<0.001	-48.069	119.503
1	5	5	0.553	0.306	<0.001	5.528	-27.048
1	5	7	0.067	0.005	0.697	1.576	23.199
1	7	1	-0.179	0.032	0.295	-52.361	97.738
1	7	2	-0.840	0.705	<0.001	-86.226	137.476
1	7	3	-0.856	0.732	<0.001	-81.164	139.945
1	7	4	-0.957	0.916	<0.001	-41.209	120.257
1	7	5	0.545	0.297	<0.001	4.379	-23.328
1	7	7	0.118	0.014	0.494	2.983	16.108
2	2	1	0.918	0.843	<0.001	70.169	-119.411
2	2	3	-0.162	0.026	0.347	-92.190	229.397
2	2	4	-0.774	0.600	<0.001	-44.571	185.220
2	2	5	0.789	0.622	<0.001	2.795	-25.602
2	2	7	0.504	0.254	0.002	5.227	-7.975
2	3	1	0.915	0.838	<0.001	71.913	-117.075
2	3	2	0.140	0.020	0.415	185.111	-326.455
2	3	3	-0.162	0.026	0.347	-184.382	413.781
2	3	4	-0.786	0.618	<0.001	-48.826	193.281
2	3	5	0.791	0.626	<0.001	2.913	-25.654
2	3	7	0.508	0.258	0.002	5.478	-8.211
2	4	1	0.962	0.925	<0.001	78.092	-101.343
2	4	2	0.760	0.577	<0.001	267.283	-391.987

B-7  $(R_{\text{band}[i]}+R_{\text{band}[j]})/R_{\text{band}[k]}$ とクロロフィル濃度の相関関係(その2)

band[i]	band[j]	band[k]	r	r <sup>2</sup>	p値	回帰係数	切片
2	4	3	0.797	0.636	<0.001	295.867	-477.247
2	4	4	-0.774	0.600	<0.001	-89.141	274.361
2	4	5	0.829	0.687	<0.001	3.458	-24.411
2	4	7	0.591	0.350	<0.001	7.474	-12.715
2	5	1	0.881	0.776	<0.001	147.655	-143.950
2	5	2	-0.743	0.552	<0.001	-387.290	459.112
2	5	3	-0.769	0.591	<0.001	-348.503	449.522
2	5	4	-0.882	0.778	<0.001	-78.979	182.819
2	5	5	0.789	0.622	<0.001	5.590	-31.192
2	5	7	0.447	0.200	0.0062	8.888	-5.755
2	7	1	0.779	0.607	<0.001	112.653	-125.238
2	7	2	-0.565	0.319	<0.001	-129.948	197.958
2	7	3	-0.628	0.394	<0.001	-139.575	226.131
2	7	4	-0.892	0.795	<0.001	-62.379	171.183
2	7	5	0.754	0.569	<0.001	4.600	-28.863
2	7	7	0.504	0.254	0.0017	10.454	-18.429
3	3	1	0.910	0.828	<0.001	73.334	-113.816
3	3	2	0.140	0.020	0.4149	92.558	-141.348
3	3	4	-0.796	0.633	<0.001	-53.288	200.819
3	3	5	0.794	0.630	<0.001	3.040	-25.672
3	3	7	0.513	0.263	0.0014	5.748	-8.423
3	4	1	0.956	0.913	<0.001	79.549	-97.110
3	4	2	0.691	0.477	<0.001	210.599	-285.957
3	4	3	0.799	0.638	<0.001	278.347	-423.171
3	4	4	-0.796	0.633	<0.001	-106.576	307.395
3	4	5	0.833	0.694	<0.001	3.632	-24.285
3	4	7	0.600	0.360	<0.001	7.937	-13.063
3	5	1	0.861	0.741	<0.001	151.419	-135.671
3	5	2	-0.612	0.374	<0.001	-283.949	321.792
3	5	3	-0.758	0.574	<0.001	-369.796	443.201
3	5	4	-0.903	0.816	<0.001	-89.991	191.642
3	5	5	0.794	0.630	<0.001	6.080	-31.752
3	5	7	0.451	0.204	0.0057	9.664	-6.068
3	7	1	0.744	0.554	<0.001	110.071	-112.477
3	7	2	-0.509	0.259	0.0015	-110.154	163.475
3	7	3	-0.586	0.343	<0.001	-128.023	198.738
3	7	4	-0.893	0.798	<0.001	-66.760	171.805
3	7	5	0.755	0.571	<0.001	4.912	-28.978
3	7	7	0.513	0.263	0.0014	11.497	-19.920
4	4	1	0.969	0.939	<0.001	80.436	-69.380
4	4	2	0.760	0.577	<0.001	133.641	-124.704
4	4	3	0.799	0.638	<0.001	139.174	-144.823
4	4	5	0.874	0.764	<0.001	4.365	-20.575
4	4	7	0.706	0.498	<0.001	11.085	-16.318
4	5	1	0.914	0.836	<0.001	164.419	-90.256
4	5	2	0.248	0.062	0.1447	83.614	-28.278
4	5	3	0.257	0.066	0.1298	89.752	-37.775
4	5	4	-0.855	0.731	<0.001	-234.049	308.752

B-8  $(R_{\text{band}[i]}+R_{\text{band}[j]})/R_{\text{band}[k]}$ とクロロフィル濃度の相関関係(その3)

band[i]	band[j]	band[k]	r	r <sup>2</sup>	p値	回帰係数	切片
4	5	5	0.874	0.764	<0.001	8.730	-29.305
4	5	7	0.622	0.387	<0.001	18.687	-16.185
4	7	1	0.774	0.600	<0.001	114.813	-76.986
4	7	2	-0.060	0.004	0.7277	-12.135	39.674
4	7	3	-0.080	0.006	0.6443	-16.305	44.547
4	7	4	-0.745	0.556	<0.001	-92.346	170.031
4	7	5	0.812	0.659	<0.001	6.595	-26.986
4	7	7	0.706	0.498	<0.001	22.170	-38.489
5	5	1	-0.562	0.316	<0.001	-210.413	76.932
5	5	2	-0.743	0.552	<0.001	-193.645	71.821
5	5	3	-0.758	0.574	<0.001	-184.898	73.404
5	5	4	-0.855	0.731	<0.001	-117.025	74.703
5	5	7	-0.362	0.131	0.0298	-36.959	56.727
5	7	1	-0.328	0.108	0.0505	-79.023	62.678
5	7	2	-0.661	0.438	<0.001	-112.720	75.292
5	7	3	-0.685	0.469	<0.001	-110.852	78.421
5	7	4	-0.827	0.684	<0.001	-74.874	83.086
5	7	5	0.352	0.124	0.0355	9.919	-8.764
5	7	7	-0.362	0.131	0.0298	-73.918	130.645
7	7	1	-0.179	0.032	0.2950	-26.180	45.377
7	7	2	-0.565	0.319	<0.001	-64.974	68.009
7	7	3	-0.586	0.343	<0.001	-64.012	70.714
7	7	4	-0.745	0.556	<0.001	-46.173	77.684
7	7	5	0.352	0.124	0.0355	4.959	1.155

B-9  $R_{\text{band}[i]} / (R_{\text{band}[j]} - R_{\text{band}[k]})$ とクロロフィル濃度の相関関係(その1)

band[i]	band[j]	band[k]	r	r <sup>2</sup>	p値	回帰係数	切片
1	1	2	-0.118	0.014	0.4926	-0.029	28.930
1	1	3	-0.286	0.082	0.0910	-0.059	28.214
1	1	4	0.911	0.829	<0.001	17.771	-20.982
1	1	5	-0.561	0.314	<0.001	-320.914	391.433
1	1	7	-0.204	0.042	0.2321	-26.855	68.392
1	2	3	-0.336	0.113	0.0452	-0.818	39.674
1	2	4	-0.170	0.029	0.3224	-9.522	50.702
1	2	5	-0.872	0.761	<0.001	-90.643	127.166
1	2	7	-0.735	0.540	<0.001	-36.418	80.155
1	3	4	-0.028	0.001	0.8718	-1.370	32.893
1	3	5	-0.878	0.771	<0.001	-80.516	124.853
1	3	7	-0.771	0.594	<0.001	-33.669	82.486
1	4	5	-0.945	0.893	<0.001	-30.604	94.427
1	4	7	-0.783	0.613	<0.001	-5.496	52.509
1	5	7	0.101	0.010	0.5578	0.834	33.717
2	1	2	-0.118	0.014	0.4926	-0.029	28.900
2	1	3	-0.285	0.081	0.0920	-0.054	28.156
2	1	4	0.912	0.831	<0.001	12.321	-8.776
2	1	5	0.866	0.750	<0.001	129.071	-124.892
2	1	7	0.642	0.412	<0.001	56.079	-57.691
2	2	3	-0.159	0.025	0.3544	-0.516	35.960
2	2	4	0.720	0.519	<0.001	43.949	-75.937
2	2	5	-0.723	0.523	<0.001	-278.683	342.825
2	2	7	-0.536	0.288	<0.001	-47.024	97.232
2	3	4	0.812	0.659	<0.001	36.928	-79.800
2	3	5	-0.765	0.585	<0.001	-241.620	327.902
2	3	7	-0.609	0.371	<0.001	-47.370	106.641
2	4	5	-0.897	0.804	<0.001	-46.958	132.388
2	4	7	-0.756	0.571	<0.001	-6.678	57.610
2	5	7	-0.145	0.021	0.3996	-1.112	22.498
3	1	2	-0.117	0.014	0.4973	-0.031	28.899
3	1	3	-0.286	0.082	0.0910	-0.059	28.155
3	1	4	0.909	0.826	<0.001	13.227	-8.380
3	1	5	0.851	0.725	<0.001	132.480	-116.449
3	1	7	0.626	0.392	<0.001	56.885	-52.006
3	2	3	-0.159	0.025	0.3544	-0.516	35.444
3	2	4	0.676	0.457	<0.001	41.628	-62.573
3	2	5	-0.593	0.351	<0.001	-216.429	253.389
3	2	7	-0.490	0.240	0.0024	-42.855	86.302
3	3	4	0.796	0.634	<0.001	38.015	-74.151
3	3	5	-0.741	0.549	<0.001	-262.521	327.896
3	3	7	-0.569	0.324	<0.001	-45.495	97.683
3	4	5	-0.912	0.831	<0.001	-53.804	137.957
3	4	7	-0.742	0.551	<0.001	-6.985	56.579
3	5	7	-0.150	0.023	0.3819	-1.243	22.310
4	1	2	-0.120	0.014	0.4844	-0.056	28.857
4	1	3	-0.279	0.078	0.0992	-0.086	28.109
4	1	4	0.911	0.829	<0.001	17.771	-3.212

B-10  $R_{\text{band}[i]} / (R_{\text{band}[j]} - R_{\text{band}[k]})$ とクロロフィル濃度の相関関係(その2)

band[i]	band[j]	band[k]	r	r <sup>2</sup>	p値	回帰係数	切片
4	1	5	0.937	0.878	<0.001	146.573	-72.004
4	1	7	0.788	0.621	<0.001	82.157	-44.495
4	2	3	-0.045	0.002	0.7941	-0.202	30.635
4	2	4	0.720	0.519	<0.001	43.949	-31.988
4	2	5	0.390	0.152	0.0187	117.724	-47.132
4	2	7	-0.086	0.007	0.6191	-10.056	37.445
4	3	4	0.796	0.634	<0.001	38.015	-36.136
4	3	5	0.387	0.149	0.0198	119.885	-56.097
4	3	7	-0.144	0.021	0.4007	-16.196	44.297
4	4	5	-0.827	0.684	<0.001	-134.329	197.113
4	4	7	-0.657	0.431	<0.001	-10.318	54.029
4	5	7	-0.336	0.113	0.0450	-4.551	13.637
5	1	2	-0.115	0.013	0.5028	-0.255	28.916
5	1	3	-0.312	0.097	0.0642	-0.691	28.229
5	1	4	0.608	0.370	<0.001	118.104	-7.737
5	1	5	-0.561	0.314	<0.001	-320.913	70.519
5	1	7	-0.510	0.260	0.0015	-194.430	61.733
5	2	3	-0.377	0.142	0.0233	-4.415	35.987
5	2	4	-0.462	0.213	0.0046	-89.314	52.425
5	2	5	-0.723	0.523	<0.001	-278.684	64.142
5	2	7	-0.654	0.428	<0.001	-141.110	52.377
5	3	4	-0.446	0.199	0.0064	-78.963	54.390
5	3	5	-0.741	0.549	<0.001	-262.521	65.375
5	3	7	-0.687	0.471	<0.001	-134.524	54.190
5	4	5	-0.827	0.684	<0.001	-134.329	62.785
5	4	7	-0.708	0.502	<0.001	-28.554	44.020
5	5	7	0.333	0.111	0.0472	21.338	42.622
7	1	2	-0.102	0.010	0.5531	-0.091	28.869
7	1	3	-0.295	0.087	0.0810	-0.208	28.094
7	1	4	0.688	0.474	<0.001	36.783	-3.127
7	1	5	-0.247	0.061	0.1462	-59.079	49.897
7	1	7	-0.204	0.042	0.2321	-26.855	41.537
7	2	3	-0.316	0.100	0.0601	-1.491	35.381
7	2	4	-0.243	0.059	0.1524	-19.384	42.912
7	2	5	-0.597	0.357	<0.001	-103.130	64.129
7	2	7	-0.536	0.288	<0.001	-47.024	50.209
7	3	4	-0.192	0.037	0.2632	-14.106	41.429
7	3	5	-0.626	0.392	<0.001	-101.481	66.939
7	3	7	-0.569	0.324	<0.001	-45.495	52.188
7	4	5	-0.794	0.630	<0.001	-60.109	69.350
7	4	7	-0.657	0.431	<0.001	-10.318	43.711
7	5	7	0.333	0.111	0.0472	21.338	63.960

B-11  $(R_{\text{band}[i]} - R_{\text{band}[j]})/R_{\text{band}[k]}$  とクロロフィル濃度の相関関係 (その1)

band[i]	band[j]	band[k]	r	r <sup>2</sup>	p値	回帰係数	切片
1	2	1	-0.918	0.843	<0.001	-140.338	20.926
1	2	2	-0.896	0.803	<0.001	-140.571	23.100
1	2	3	-0.898	0.806	<0.001	-129.914	23.115
1	2	4	-0.881	0.777	<0.001	-81.958	23.704
1	2	5	-0.943	0.890	<0.001	-15.918	19.066
1	2	7	-0.921	0.848	<0.001	-43.161	20.345
1	3	1	-0.910	0.828	<0.001	-146.668	32.852
1	3	2	-0.892	0.795	<0.001	-136.590	34.124
1	3	3	-0.890	0.791	<0.001	-124.752	34.150
1	3	4	-0.886	0.785	<0.001	-76.486	34.786
1	3	5	-0.914	0.836	<0.001	-17.291	31.633
1	3	7	-0.899	0.809	<0.001	-44.384	32.634
1	4	1	-0.969	0.939	<0.001	-160.872	91.492
1	4	2	-0.967	0.935	<0.001	-118.692	74.439
1	4	3	-0.958	0.918	<0.001	-106.373	73.323
1	4	4	-0.954	0.911	<0.001	-56.221	67.655
1	4	5	-0.620	0.384	<0.001	-11.943	70.429
1	4	7	-0.696	0.484	<0.001	-27.157	64.195
1	5	1	0.562	0.316	<0.001	420.826	-343.894
1	5	2	-0.863	0.745	<0.001	-173.582	176.115
1	5	3	-0.844	0.713	<0.001	-148.878	166.159
1	5	4	-0.922	0.851	<0.001	-65.058	126.091
1	5	5	0.553	0.306	<0.001	5.528	-15.993
1	5	7	0.175	0.031	0.3067	4.781	14.873
1	7	1	0.179	0.032	0.2950	52.361	-6.984
1	7	2	-0.660	0.436	<0.001	-133.769	117.058
1	7	3	-0.644	0.414	<0.001	-113.103	109.974
1	7	4	-0.787	0.619	<0.001	-60.805	99.588
1	7	5	0.511	0.261	0.0015	6.080	-9.475
1	7	7	0.118	0.014	0.4941	2.983	22.074
2	3	1	0.485	0.236	0.0027	651.470	-25.545
2	3	2	-0.140	0.020	0.4149	-185.114	43.768
2	3	3	-0.162	0.026	0.3465	-184.374	45.017
2	3	4	-0.457	0.208	0.0051	-265.243	66.248
2	3	5	0.654	0.427	<0.001	56.524	-14.842
2	3	7	0.343	0.118	0.0406	81.684	5.986
2	4	1	0.067	0.004	0.6983	26.222	17.360
2	4	2	-0.760	0.577	<0.001	-267.283	142.578
2	4	3	-0.743	0.551	<0.001	-226.662	133.747
2	4	4	-0.774	0.600	<0.001	-89.141	96.078
2	4	5	0.487	0.238	0.0026	10.018	-11.939
2	4	7	0.089	0.008	0.6044	4.368	22.522
2	5	1	0.923	0.852	<0.001	126.134	-90.034
2	5	2	0.743	0.552	<0.001	387.290	-315.469
2	5	3	0.627	0.393	<0.001	278.288	-239.949
2	5	4	-0.495	0.245	0.0021	-68.119	135.105
2	5	5	0.789	0.622	<0.001	5.590	-20.011
2	5	7	0.561	0.314	<0.001	12.056	-9.139

B-12  $(R_{\text{band}[i]} - R_{\text{band}[j]})/R_{\text{band}[k]}$  とクロロフィル濃度の相関関係 (その2)

band[i]	band[j]	band[k]	r	r <sup>2</sup>	p値	回帰係数	切片
2	7	1	0.846	0.716	<0.001	108.143	-51.643
2	7	2	0.565	0.319	<0.001	129.948	-61.939
2	7	3	0.527	0.278	0.0010	109.474	-54.273
2	7	4	-0.081	0.007	0.6391	-9.221	40.354
2	7	5	0.795	0.633	<0.001	6.406	-15.557
2	7	7	0.504	0.254	0.0017	10.454	2.478
3	4	1	-0.084	0.007	0.6274	-36.692	42.346
3	4	2	-0.803	0.644	<0.001	-313.624	137.335
3	4	3	-0.799	0.638	<0.001	-278.348	133.524
3	4	4	-0.796	0.633	<0.001	-106.576	94.243
3	4	5	0.415	0.172	0.0118	10.682	-6.358
3	4	7	0.023	0.001	0.8960	1.320	27.454
3	5	1	0.921	0.848	<0.001	132.637	-85.058
3	5	2	0.779	0.607	<0.001	396.534	-292.176
3	5	3	0.758	0.574	<0.001	369.796	-296.392
3	5	4	-0.460	0.212	0.0047	-75.219	135.612
3	5	5	0.794	0.630	<0.001	6.080	-19.592
3	5	7	0.574	0.329	<0.001	13.365	-9.512
3	7	1	0.846	0.716	<0.001	114.303	-46.659
3	7	2	0.611	0.373	<0.001	145.470	-61.246
3	7	3	0.586	0.343	0.0002	128.024	-57.309
3	7	4	0.010	0.000	0.9555	1.219	27.733
3	7	5	0.801	0.641	<0.001	7.031	-14.453
3	7	7	0.513	0.263	0.0014	11.497	3.074
4	5	1	0.980	0.960	<0.001	145.749	-43.545
4	5	2	0.934	0.873	<0.001	243.515	-84.142
4	5	3	0.942	0.888	<0.001	230.958	-87.522
4	5	4	0.855	0.731	<0.001	234.049	-159.346
4	5	5	0.874	0.764	<0.001	8.730	-11.846
4	5	7	0.780	0.608	<0.001	25.055	-12.843
4	7	1	0.907	0.823	<0.001	127.569	-9.238
4	7	2	0.851	0.724	<0.001	156.764	-14.134
4	7	3	0.847	0.717	<0.001	144.182	-14.096
4	7	4	0.745	0.556	<0.001	92.346	-14.662
4	7	5	0.873	0.761	<0.001	10.141	-0.073
4	7	7	0.706	0.498	<0.001	22.170	5.852
5	7	1	-0.043	0.002	0.8020	-13.848	26.314
5	7	2	0.315	0.099	0.0610	96.204	47.271
5	7	3	0.324	0.105	0.0538	93.262	48.218
5	7	4	0.490	0.240	0.0024	82.843	56.522
5	7	5	-0.352	0.124	0.0355	-9.919	11.074
5	7	7	-0.362	0.131	0.0298	-73.918	-17.191