

平成17年度（財）港湾空港建設技術サービスセンター
研究開発助成報告書

助成番号：平成18年1月16日付第05－1号

助成開発項目：（3）品質確保、環境保全、労働安全衛生に関するもの

デジタルカメラのDNを用いたスペクトル逆推定法と
衛星画像処理を用いた湾奥部水質モニタリングシステム
構築に関する研究

平成19年4月

芝浦工業大学大学院工学研究科教授

菅 和利

平成 17 年 S C O P E 研究開発助成事業研究開発の方法（研究開発フロー図）

「デジタルカメラの DN を用いたスペクトル逆推定法と衛星画像処理を用いた湾奥部水質モニタリングシステム構築に関する研究」

湾奥、河口部など小領域での水質モニタリングシステムの開発

目的

湾内湾奥部には多くの河川が流入し、この河口部分は親水水辺、船舶の係留、養殖など多目的に活用されており、陸域からの影響による水質に係る事故も多発している。この湾奥部は地形が複雑で、複雑な海水の挙動により水質が複雑に変化し、広域的な水質の把握と共に局所的な水質変化の把握が重要な場所である。この水質変化を面的にモニタリングすることは港湾の維持管理の上で重要である。

この研究では、当財団の研究助成で開発した高分解能NOAA画像、係留気球で撮影したデジタルカメラのDNの処理による水質モニタリングシステムをベースとして、湾奥河口部分での複合的な水質項目のモニタリングを係留気球を用いて随時の時間と場所を実施するモニタリングシステムを構築することを目的としている。

NOAA画像の定時、広域性と係留気球で撮影するデジタルカメラの局所性を組み合わせた研究である。

- 1)湾奥、河口部に着目した水質環境の変化、湾内での河川からの汚染物質拡散
 - 2)船舶からの汚染水（洗浄水、油類）の排出の拡がり
- 等を衛星画像、係留気球での写真を用いてモニタリングする

調査対象地点及びモニタリング項目

*調査対象地点

継続調査として宇和島湾、伊勢湾を対象にする

*継続的な水質モニタリング項目

海面水温、クロロフィル a、濁度

（水質項目として特定できないが差画像から、窒素、リンなど水質の細かい変化を検討する）

*水質事故などの短期的な変化

重油・・・船舶からの排水

*短期的な水質事故の長期水質への影響

高分解能化 NOAA 画像を用いた小領域の水質分析

- * NOAA 画像を高分解能化し、湾全体での水温分布を画像化する。
- * 高分解能化 NOAA 画像での湾奥小領域の水質モニタリングの可能性の検討
- * NOAA 画像の各バンド毎の水質との相関解析

対象小領域（数キロ範囲）での水質現地調査

- * 衛星画像、デジタル写真での水質解析の検証に利用するためのデータ取得
- * 係留気球と水質観測船を用い、GPS を活用して 100m 範囲内に数点の水質観測地点があるように観測
- * 観測項目は窒素、リン、Ph、電気伝導度、水温、濁度、クロロフィル a

係留気球でのデジタル写真の撮影

- * 係留気球にタイマーとデジタルカメラを搭載して写真撮影を行う
- * 写真の位置を決めるために GPS 搭載の水質観測船を写真に写し込むようにする
- * 高度 150m～200m で、デジタルカメラで撮影し、各ピクセルのデジタルナンバーを測定し、RGB の DN をパソコンソフトで読み取る

係留気球でのデジタル写真のデジタルナンバーと水質項目との相関分析

- * デジタル画像の各画素の RGB 輝度値を使って、種々の組み合わせなどと水質項目との相関分析を行ない、水質推定モデルを作成
- * デジタルナンバーからスペクトルを逆推定する手法の検討
- * 逆推定スペクトルを用いて衛星画像の水質推定モデルを適用する。
- * 複数水質項目を、この逆推定スペクトルを用いることにより分離できることの検討

実験室水槽でのデジタル写真の DN と水質との相関

- * 水槽に色々な水質の水を入れ、デジタルカメラで撮影し、RGB の DN を読み取る
- * RGB の DN と水質項目との相関から水質推定モデルを検討
- * 各水質のスペクトルを測定し、RGB の DN から逆推定したスペクトルとの相関を検討し、逆推定法を確立する

デジタル写真の DN から逆推定したスペクトルからの水質と NOAA 画像との相関

- * 逆推定スペクトルと NOAA 画像のスペクトルとの相関を検討
- * 水質項目と NOAA 画像の各バンドとの相関の検討
- * 高分解能化 NOAA 画像を用いて小領域の水質を継続的にモニタリングできるシステムを構築する

デジタル写真のデジタルナンバー DN と水質との相関、逆推定スペクトルから推定した水質との相関

- * NOAA 画像のバンド 1 と水質項目との相関
- * デジタル画像の ND から推定した水質と逆推定スペクトルを用いて衛星画像処理手法から推定した水質との相関の検討
- * スペクトルを媒介にすることにより、複数の水質項目をデジタル写真の RGB から推定するモデルが構成できる
- * NOAA 画像、上空から撮影したデジタル写真を用いて小領域の水質を随時にモニタリングできるシステムを構築する
- * デジタルカメラを用いるためにバンド 1 ～ 3 で推定できる水質項目に限定されるが、安価で且つ自分たちの意思で時間、場所を随意に決めたモニタリングが可能になる

開発したシステムを用いた湾奥部小領域での水質モニタリング

- * 高分解能 NOAA 画像を用いて水温、濁度を中心とした水質の定期的モニタリングを行う
- * 必要に応じて随時に係留気球でのデジタル写真を撮影し、デジタルナンバー、逆推定スペクトルから水質をモニタリングする
- * 事故発生の報告があり次第、あるいは NOAA 画像で変化を感知した時には、気球で写真を撮影し、水質分布の画像から水域の変化をモニタリングする
- * 係留気球はヘリウムガスをその都度入れなければならず、将来的には模型ヘリコプターでの定期的な撮影が機能的である。撮影手段に経費をかけても、機器、分析の安易さを考慮すると、衛星画像に比べて有用である
- * 過去の水域でのデジタル写真も経年的な水質変化を分析するのに使用できる可能性を有している

デジタルカメラと衛星画像を用いた湾奥部小領域での水質モニタリングシステムの構築

目 次

1. はじめに	1
2. デジタルカメラのデジタルナンバーとCCDカメラのCCD値との関係	3
2. 1 CCD値	3
2. 2 DN値	3
3. 室内実験	4
3. 1 実験装置及び実験手順の概要	4
3. 2 デジタルカメラによるクロロフィル-a 撮影結果	9
3. 3 撮影画像からのDN値の読み取り	14
3. 4 撮影画像からのCCD値の読み取り	15
4. 反射スペクトルから算定したデジタルナンバー	16
5. クロロフィル-a と反射スペクトル、デジタルカメラからのデジタルナンバーの相関	18
5. 1 理論デジタルナンバーからのクロロフィル濃度の推定式	19
6. 琵琶湖での現地調査	20
7. 現地での藻類の影響を室内実験で検討	23
7. 1 藻類の影響の分離	23
7. 2 水質推定式と分布画像	24
8. 広域での航空写真を利用した水質分布画像の作成	28
8. 1 水質推定モデル	30
8. 2 三色係数法での水質推定モデル	31
8. 3 その他の水質推定式	31
8. 4 分布画像の作成	33
8. 4. 1 作成方法	36
8. 4. 2 分布画像を用いた水質モニタリング	38
9. 結論	51
付録	52
2007年土木学会学術講演会への投稿原稿	52

1. はじめに

わが国の海岸線は約 3 万 4 千 km あり、世界でも有数の海岸線保有国である。沿岸域への需要は年々高まり、全人口の約 40%が住み、工業出荷額、商業出荷額においてもそれぞれ全体の約 40%に達し、生活・経済活動の主要な空間となっている。沿岸域は、土地造成価格が内陸に比べて安価なため、内陸の需要に応える供給可能な用地として、漁業・船舶航路からエネルギー基地、廃棄物処理場まで多種多様に用地活用されてきた。そのため沿岸域では、周辺の陸上からの生活排水や工業排水などの流入による流入負荷や河口域周辺の船舶による排水、湾奥などで展開されている養殖業などにより、急速に水質が悪化し水質汚濁が進んでいる。沿岸域でも特に湾奥では、閉鎖性が高く、水深が浅いという特徴を持っているので、高濃度の浮遊物質が沈殿しやすく、多量の栄養塩を貯め込む状態になってしまうことで、湾奥の溶存酸素 (DO) を枯渇させることも多くなり、湾奥の富栄養化や水質汚濁現象を引き起こしている。

そもそも、沿岸域では、流入物質の沈殿や吸着などの物理的变化、分解や変質などの化学的变化のほか、生物への転換が行われている。沖合海域と比べると、高濃度の流入物質の滞留時間が長いために、流入物質の一部は湾外に流出するものの、多くは浮遊物質 (SS) として沈殿する。沈殿した栄養分の含まれる物質が、浅海部の光合成で海藻類を芽生えさせ、プランクトンを生み、デトリタスやベントスなどになる。これらを捕食して浮遊動物、底生動物、魚類が育ち、さらにこれを捕食し、回遊魚、鳥、動物が育つ。あるものは、死滅してバクテリアに分解され、またプランクトンを大量に発生させる。この多様性と物質循環が各沿岸域の特性に合わせて、時間とともに変化しながら均衡し安定していることで今までは、沿岸域において巨大な自然の浄化機能が働いていた。しかし、経済成長とともに沿岸域の急激な埋め立てや、沿岸部の浅場において、垂直の護岸、岸壁が設けられ、浄化機能を持つ自然海岸が次々と取り壊されたため、沿岸域での自然浄化機能が失われつつあるのが現状である。

そのため、現在では 1994 年発行の国連海洋法条約や、アジェンダ 21、ミチゲーションなどにより、沿岸域の保全・保護の範囲を拡大して、沿岸国の沿岸地域の環境問題に対する責任の在り方や重さなどが明らかにされることで、沿岸地域を有する各国は、水産資源の枯渇だけでなく、慢性的な海洋汚染など顕著な環境変化の上で更なる経済発展と人間の豊かさを目指して持続可能な発展を考えるようになってきている。

そこで、最近では沿岸地域の閉鎖性水域における水質汚染の中でも、廃水処理施設や下水道の普及によりかなり減少してきている、有機物質汚濁、重金属汚染、化学物質汚染、細菌汚染などの一次汚染ではなく、富栄養化などの二次汚染による水質汚染の濃度や、進行速度などの水質変化を把握し、モデリングするための、船舶観測や人工衛星を利用した衛星リモートセンシングなどを用いた水質検査手法の研究が盛んに行われている。しかし、船舶観測などの採水を用いた計測では点計測になり広域計測には不向きであり、衛星を用いたリモートセンシングによる計測は、観測周期や分解能が衛星に依存していることが多いことや、計測にかかる費用が高いなどの問題を抱えているので、最適な水質検査手法が確立されていないのが現状である。

本研究では、閉鎖水域での面的な水質モニタリングとして、デジタルカメラの画像解析手法について検討を行ってきた。閉鎖水域では船舶による定点観測、衛星画像を用いる手法などが実施されているが、情報の収集が簡易で、任意の時刻でのモニタリングを行なうことができる航空写真の活用を実際の湾内で検討を行なっている。係留気球にデジタルカメラを係留し、その撮影されている海面範囲を船舶で移動しながら採水し、デジタル画像の各画素のデジタルナンバーとの関連を分析し、推定モデルを作成した。対象とする水質項目はクロロフィルである。クロロフィルの分析では可視域の吸光度を用いるので、同じ可視域を対象とするデジタル画像のデジタルナンバー (DN) には水面のクロロフィル濃度が反映されている。

しかし、デジタルカメラの各画素に格納される DN に水面のクロロフィル濃度によって異なる反射スペクトルが反映されているかの検討が行なわれていない。本研究では、実験室内でクロロフィル濃度と CCD カメラの各波長の CCD 値を測定し、理論的に算定した DN とデジタル画像の DN との関係について検討を行なった。

また、面的な水質モニタリングに航空写真を用いる際、デジタル画像各ピクセルの RGB デジタルナンバーと水質との関係が必要である。湖沼などの閉鎖水域では沿岸域の水質が相対的に悪く、

改善が必要である。この沿岸域での水質モニタリングに航空写真を活用することの手始めとして、係留気球でのデジタル写真の解析から水質を推定することを検討している。沿岸域では水質が浅く、藻類が繁茂している場所があり、100m上空からのデジタル写真にはこれらの藻類が、水面でのクロロフィル濃度の高濃度として画像化されることとなる。この藻類が繁茂する場所での水質モニタリングのためには、藻類のクロロフィル濃度に寄与する見かけの影響を分離することが必要である。琵琶湖沿岸域を対象とした現地調査、室内実験から、デジタル画像を処理し、藻類と水溶液中のクロロフィル濃度を分離し、実用的なモニタリングシステムを構築した。

2. デジタルカメラのデジタルナンバーとCCDカメラのCCD値との関係

物体表面の性質に応じ、可視域での各波長の反射率が異なる。この各波長の反射率が反射スペクトルで、デジタルカメラの各画素（ピクセル）にはこの反射スペクトルから計算されたデジタルナンバーが0～255の間の数値として格納されている。しかし、物体特有の反射スペクトルがデジタルナンバーに正確に反映されているは、反射スペクトルをCCDカメラで測定する必要がある。

2.1 CCD 値 (Charge Coupled Device)

CCD は Charge Coupled Device（電荷結合素子）のことであり、撮影した画像は白黒であり、撮影した物自体の光量（強さ・明るさ）を測れる半導体のことである。つまり、CCD 値は、撮影した物の情報に対してなんの加工も施していないデータのことである。各波長のこのCCD値を測定するにはCCDカメラと、フィルタが必要である。本実験ではパソコンで波長選択が制御できるフィルタを用いることにより、可視域での反射スペクトルを測定した。

2.2 DN 値 (Digital Number)

DN 値は、白黒画像として取り込まれた CCD 値の情報を一度、画像解析回路に通して解析し、CCD 値の情報に光の三原色である Red (R)、Green (G)、Blue (B) を合わせ、各色を 0～255 の数値として 256 段階に分けてから、カラー画像にした時の情報である。つまり、CCD 値は、画像情報の初期情報であり、DN 値は、画像情報の最終情報といえる。

各波長の反射率 $S_i(\lambda)$ と等色関数算定 $f_i(\lambda)$ から式 (1) を用いて DN は計算することが出来る。図 1 は R G B の等色関数を示した図である。

$$DN_i = \alpha \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} f_i(\lambda) S(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

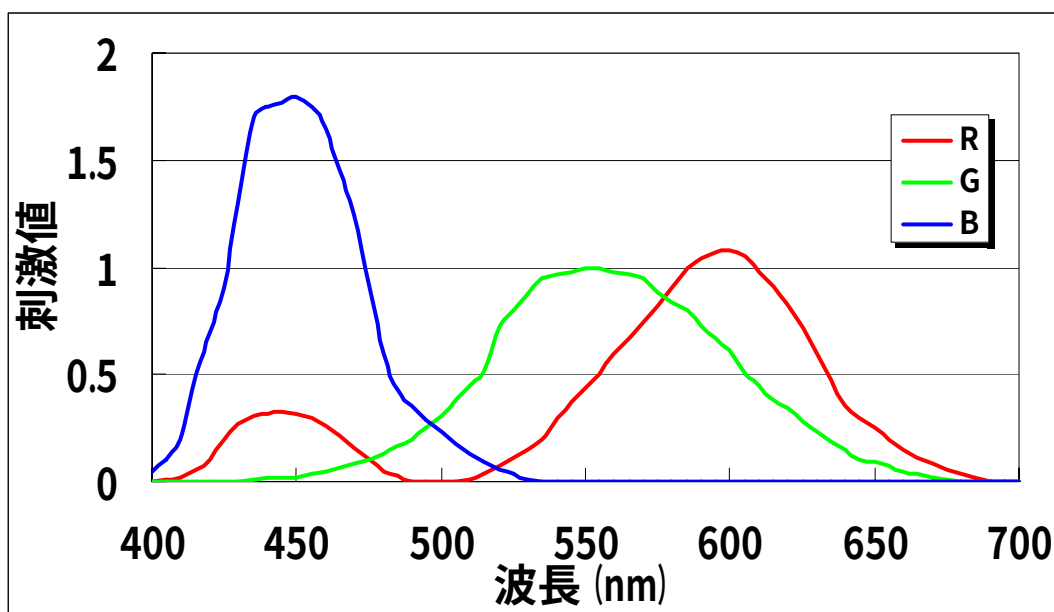


図 1 等色関数

3. 室内実験

室内実験では、反射スペクトルをCCDカメラで撮影し、デジタル画像のデータである DN 値がクロロフィル a 濃度そのものを反映しているのかを検証した。実験では、デジタル画像、クロロフィル a 濃度、各サンプルの吸光度、DN 値、CCD 値を測定した。また、クロロフィル溶液はほうれん草をすりつぶし、濾過して作成した。

1) クロロフィル a 濃度と DN の関係

クロロフィル a 濃度を变化させ、デジタルカメラで RGB のデジタルナンバーを測定した。

2) クロロフィル a 濃度と CCD 値の関係

ほうれん草で模擬したクロロフィル溶液の濃度を变化させ、可視域での波長を 5nm ずつ变化させながら CCD 値を測定した。

3) CCD から変換した RGB のデジタルナンバーとデジタルカメラで撮影した画像のデジタルナンバーとの比較。

3.1 実験装置及び実験手順の概要

実験装置作成にあたり、可能な限り外部の光を遮断すること、溶液そのものの反射スペクトルを撮影すること、カメラを固定することが必要である。外部の光の強弱が撮影の際に影響を及ぼすので、暗幕で囲うことでデジタル画像のデジタルナンバー (DN) のばらつきを防止した。また、水面に対して光の量が一定になるように、カメラの位置から上下左右に同距離の所に蛍光灯を配置した。

カメラを上部固定にすることで、光源直下からの距離の違いによる DN の変動やカメラの角度による DN の変動を抑制し、確実に同じポイントでの DN を読み取るようにした。

外部の光を遮断した暗室内にクロロフィルが含まれた溶液を満たし、上方からデジタルカメラ、CCD カメラで撮影を行なった。水槽は高さ、径共に約 80 cm の大きさで、光源には太陽光に波長が最も近いとされる D65 蛍光ランプを用いた。CCD カメラにバリスペック液晶チューナブルフィルターをセットし、PC 操作によって可視域の 720nm から 400nm までの波長域を 5nm 刻みで CCD 値を測定した。

高感度冷却 CCD カメラでは、CCD チップを冷却することにより、微弱な光をも蓄積して高感度な情報を数値で表すことが出来る。したがって、光を蓄積する時間によって CCD の値が異なる。最初に白色板を水面に浮かべ、各波長で同じ CCD 値を得るために必要な時間を測定した。この結果が図 2 である。

なお、実験装置の概要を図 3、4 に示す。

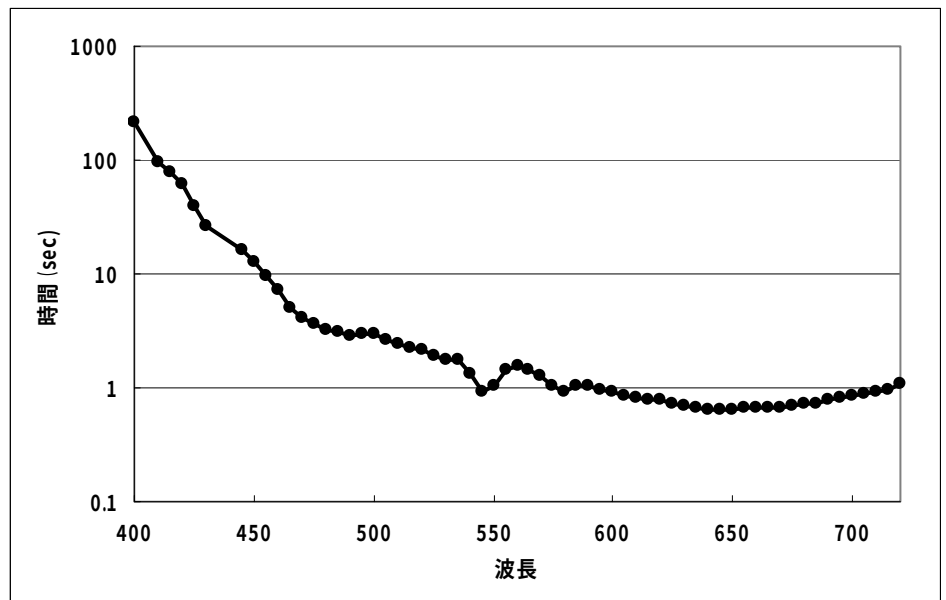


図 2 各波長での蓄積時間



～暗室詳細～

- ・ 高さ 3m
- ・ 底面 2.5m の正方形
- ・ 幅 8cm 長さ 50cm の穴にカメラを設置
- ・ 水面～カメラ距離 約 160cm
- ・ 水面～光源距離 約 160cm

図 3 実験装置の概要

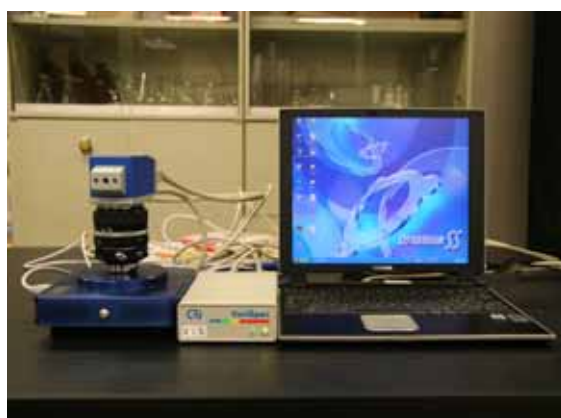


図 4 水槽及びCCDカメラ、液晶チューナブルフィルター

CCDカメラの波長選択を行なうバリスペック（Vari Spec）液晶チューナブルフィルターは、米国のCRI社により独自に開発された製品である。可動部品を使用せずに電氣的に波長を制御する液晶フィルタである。このフィルタは、偏光子とネマティック液晶セルを積層することにより構成されており、印加電圧を可変することによりピーク波長を任意に高速で可変することが可能な結果、任意の波長成分の光を1nmごとに取り出すことが可能である。また、PC操作によって可視域から近赤外域のいかなる波長帯域も瞬時に選べ、画像処理も可能である。一般的に、バリスペックは波長ごとのデータを画素ごとに取得し、RGBの合成ではなくマルチスペクトルのデータを画像化することが出来るので、航空機などに搭載し、地形・地質・水質などのリモートセンシングに使われている。

実験手順を図5に示す。

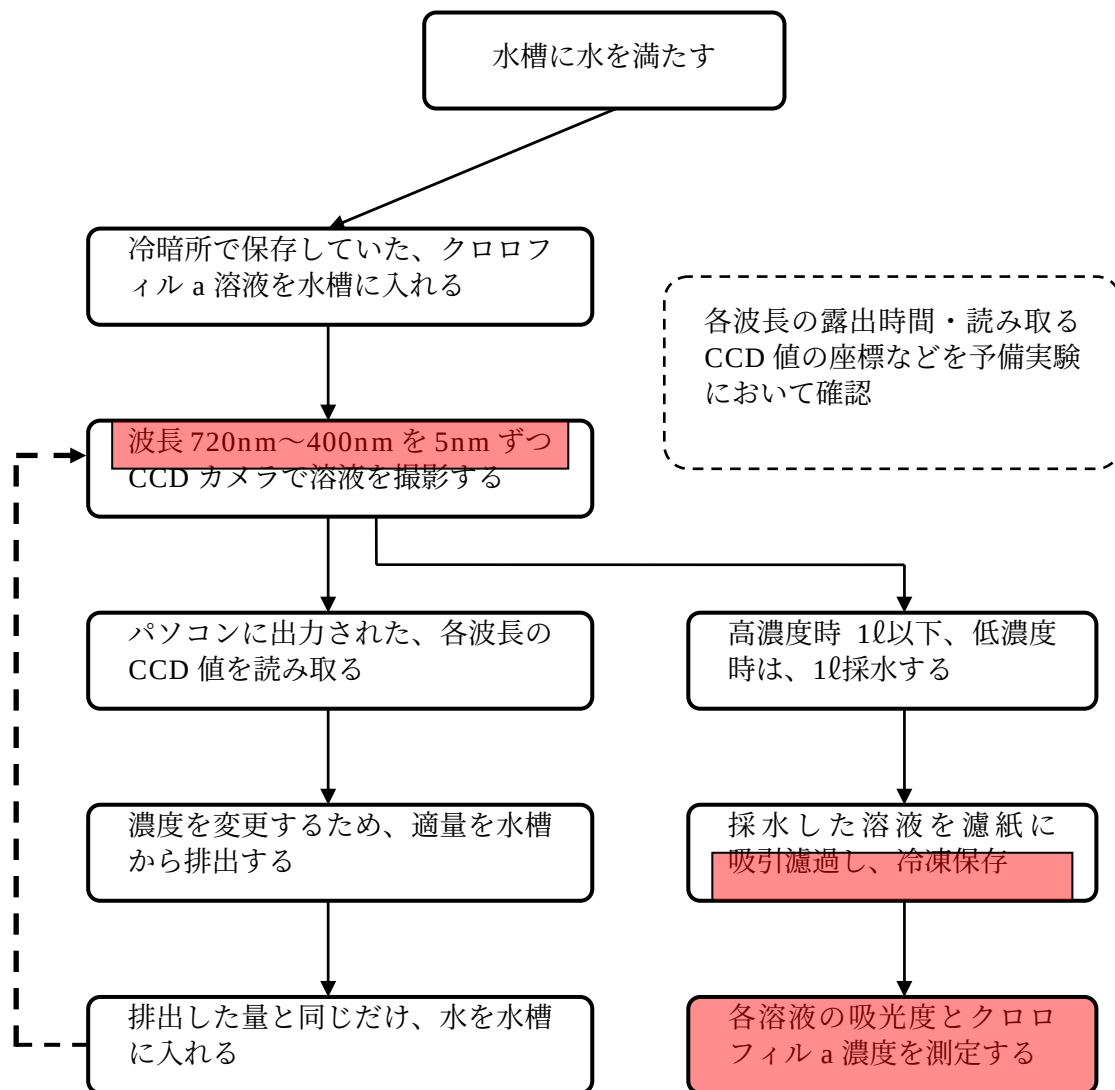


図 5 実験手順及び撮影手順

今回行った室内実験では大量の水を使用するため、クロロフィル a を付加するにあたり、コストや数量の面で入手がしやすいこと、作業効率向上のために播り潰し易いこと、設定量のクロロフィル a をできるだけ少ない分量で満たせることが必要である。理想としては、現地データに基づき、現地に生息している植物プランクトンを使用するのが最適であるが、設定量を満たす植物プランクトンを入手するのは困難であることから、代用するものの選定を行うこととした。室内実験において選定を行った結果、水草のホテイアオイやアナカリス、野菜のハウレン草などが上記の 3 点を満たしていることが判明した。しかし、ホテイアオイやアナカリスは入手するのに季節が限定されるなど、室内実験を行っていくうえで問題があるので今回の室内実験では、既往の研究でも使用し良好な実験結果が得られているハウレン草を使用することにした。そこで、今回はクロロフィル a を付加するためにハウレン草を使用しクロロフィル a 付加溶液を作成した。

クロロフィル a 付加溶液作成手順を以下に示す。

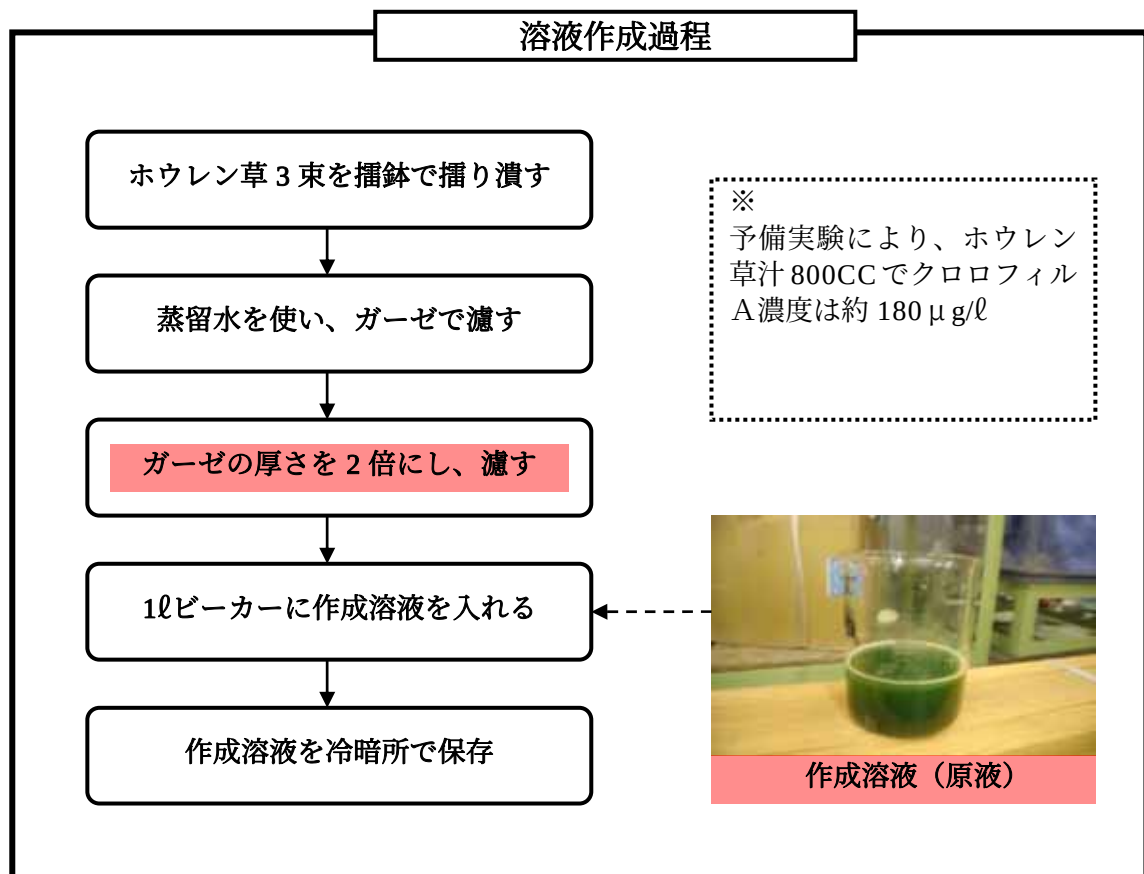


図 6 クロロフィル溶液作成手順

クロロフィル-a の測定は蛍光吸光度計で 750nm, 663nm, 645nm, 630nm の波長の吸光度を測定し、計算式より求めた。

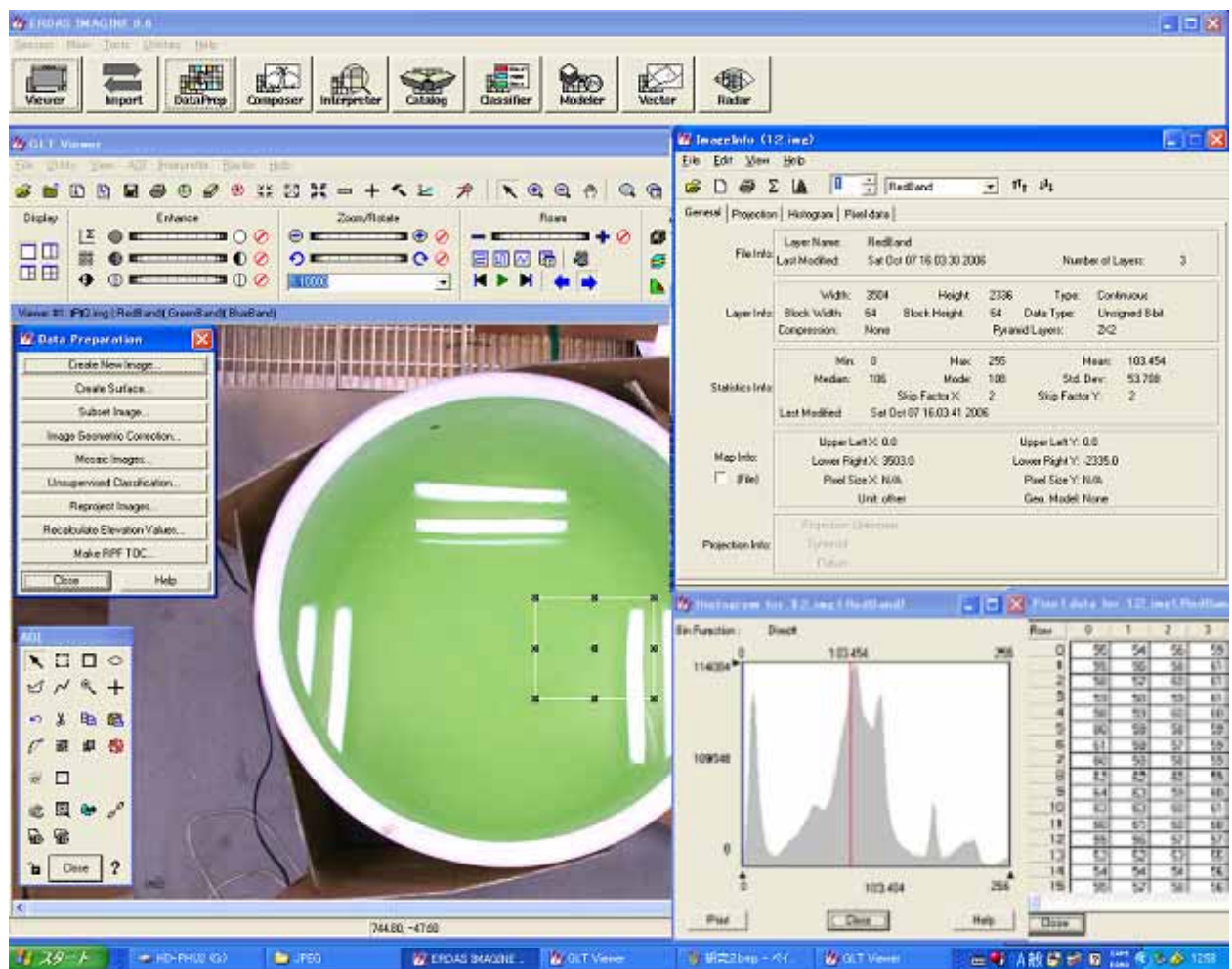


蛍光吸光度計 UVmini-1240

実験では CCD 値を測定すると共に、デジタルカメラでの撮影を行っており、画像中央部分のピクセルの RGB デジタルナンバーを、ERDAS IMAGINE8.6 という画像解析ソフトを使用して読み取った。手順に関しては以下ようになる。

- (1) 取得した jpg データを ERDAS IMAGINE8.6 上で import することで、余計なデータが含まれている jpg データから img データに変換する。
- (2) メニュー上で AOI から Tool をクリックする。Tool バーを開いたら、選択方法を選び、img データの DN を見たい部分を選択する。
- (3) 範囲を選択後、Date Drop から Subset Image を選択する。必要事項を入力後、選択した部分のみの画像が作成され、細かい範囲の DN を得ることが出来る。下図は、Sample11 の img データであ

る。



3. 2 Digital カメラによるクロロフィル-a 撮影結果

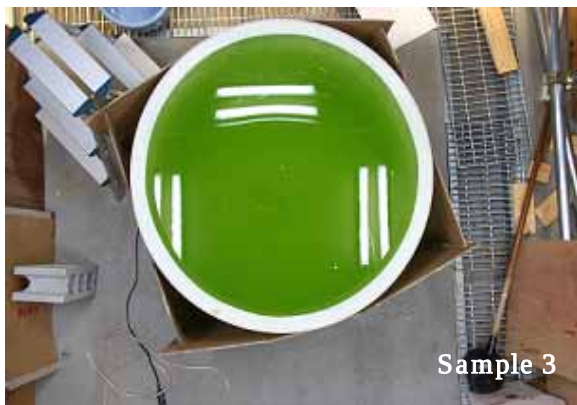
クロロフィル a 濃度を含んだ溶液撮影方法として、暗室の高さ 2.5m の場所から、Canon 製のデジタルカメラで溶液を撮影した。撮影サンプルは全部で 23 Sample あり、下図に示す。



Sample 1



Sample 2



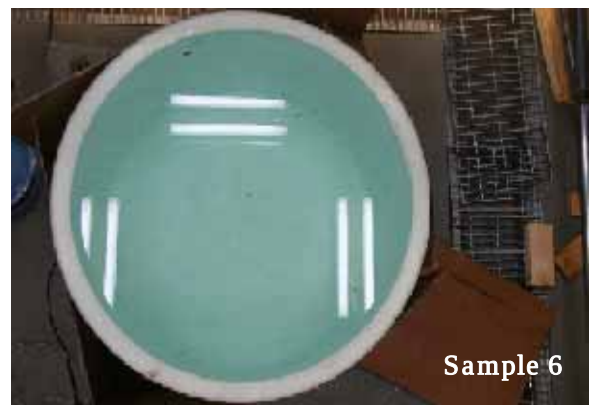
Sample 3



Sample 4

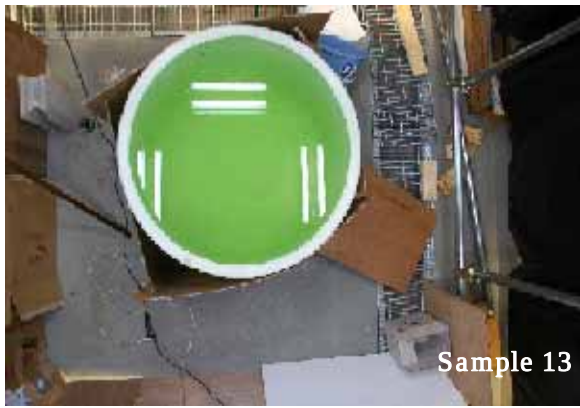


Sample 5



Sample 6





Sample 13



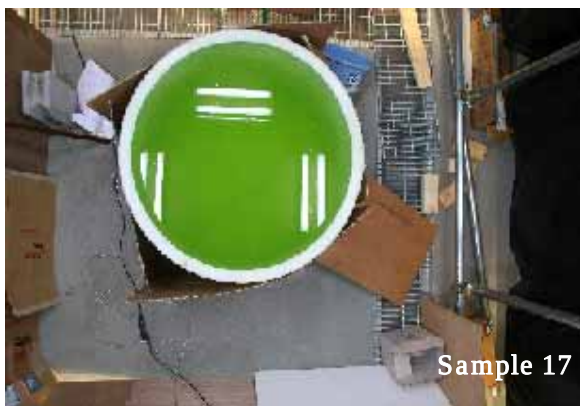
Sample 14



Sample 15



Sample 16



Sample 17



Sample 18



表1 各サンプルのクロロフィル-a 濃度

サンプル番号	クロロフィル濃度	サンプル番号	クロロフィル濃度	サンプル番号	クロロフィル濃度
1	186.7	9	16.7	17	71.1
2	99.8	10	16.3	18	84.7
3	98.1	11	22.7	19	86.0
4	110.9	12	27.8	20	1.91
5	84.9	13	29	21	0.21
6	3.75	14	45.7	22	2.34
7	8.5	15	56.8	23	5.3
8	17.84	16	63.2		

3. 3 撮影画像からの DN 値の読み取り

クロロフィル a 付加溶液をサンプル別に Erdas Imagine8.6 を使用し、画像から DN 値を読み取った。ひとつの画像から 4 点ずつ DN 値を読み取り平均した DN 値を使用することにした。各サンプルの DN 値を表 2 に示す。

表 2 各サンプルの DN 値

サンプル番号	濃度	DN (R)	DN(G)	DN(B)
1	186.7	57	115	2
2	99.8	62	119	4
3	98.1	78	131	4
4	110.9	101	152	8
5	84.9	109	156	18
6	3.75	86	125	106
7	8.5	124	162	137
8	17.84	113	154	91
9	16.7	128	189	145
10	16.3	99	145	99
11	22.7	112	159	78
12	27.78	102	162	66
13	29	94	154	56
14	45.7	81	137	36
15	56.8	83	141	28
16	63.15	84	139	22
17	71.1	99	156	17
18	84.65	78	129	10
19	85.93	77	138	8
20	1.91	134	173	180
21	0.21	147	200	218
22	2.34	125	169	170
23	5.3	142	205	195

3. 4 撮影画像からの CCD 値の読み取り

クロロフィル a 付加溶液をサンプル別に解析ソフトのイメージング Maxlm DL /CCD を使用し、画像からは波長 720nm~400nm まで 5nm ずつの CCD 値を読み取った。予備実験により CCD 値の読み取る場所は、X=250、Y=200 とした。また、白色板での全ての波長での CCD 値が 4000 になるのに要する時間（図 1）を基準とし、クロロフィル溶液での CCD 値測定での各波長の露出時間とした。水槽に水のみを入れて撮影した時の各波長の CCD 値を図 7 に、クロロフィル a 付加溶液での各波長の CCD 値を図 8 に示す。

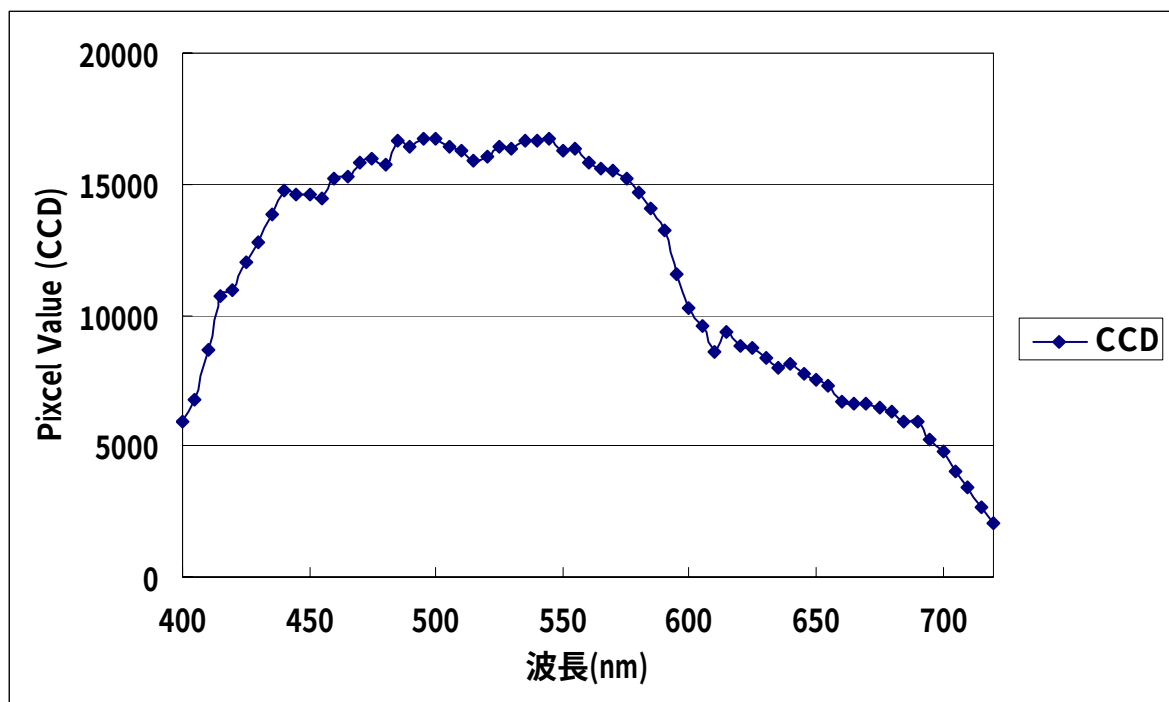


図 7 水のみの場合の CCD 値

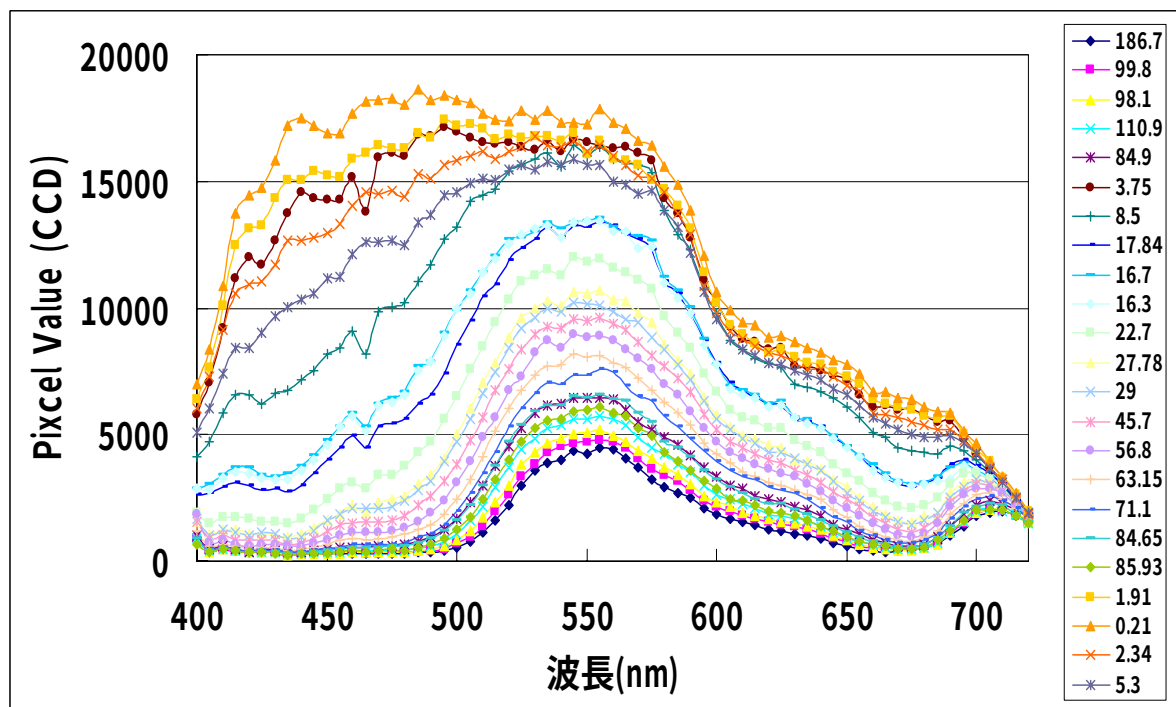


図 8 クロロフィル溶液での CCD 値

4. 反射スペクトルから算定したデジタルナンバー

図 8 の C C D 値を反射率に変換し、式 (1) でデジタルナンバーを計算した。反射スペクトルは波長 550nm でピークを示し、相似な形をしている。濃度が低い場合、あるいは水だけの場合には、波長の短い領域で反射率が大きくなる傾向を示しており、水槽材質の影響が出たと思われる。水槽内面に黒色塩ビ板を巻くなどの工夫をしたが、十分には影響を除去することが出来なかった。

デジタルナンバーは 1 から 255 の数値であるので、反射率 1 (白色) でのデジタルナンバーが 255 になるように補正係数 $\alpha=2.5$ とした。各濃度での C C D カメラから算定したデジタルナンバーとデジタルカメラでのデジタルナンバーとの相関を示したのが図 9 である。B については R, G と多少関数形を異にしているが、これは実験装置の影響と思われる。C C D 値から変換の D N は理論的な D N であるが、図 9 に示すようにデジタルカメラでの D N と 1 : 1 の関係とはなっていない。R, G についての傾きは 1 であるが、理論 D N が小さく、反射率の計算について検討が必要である。しかし、一定の関係が有るので、この理論 D N を用いてクロロフィル-a の水質推定式を検討した。

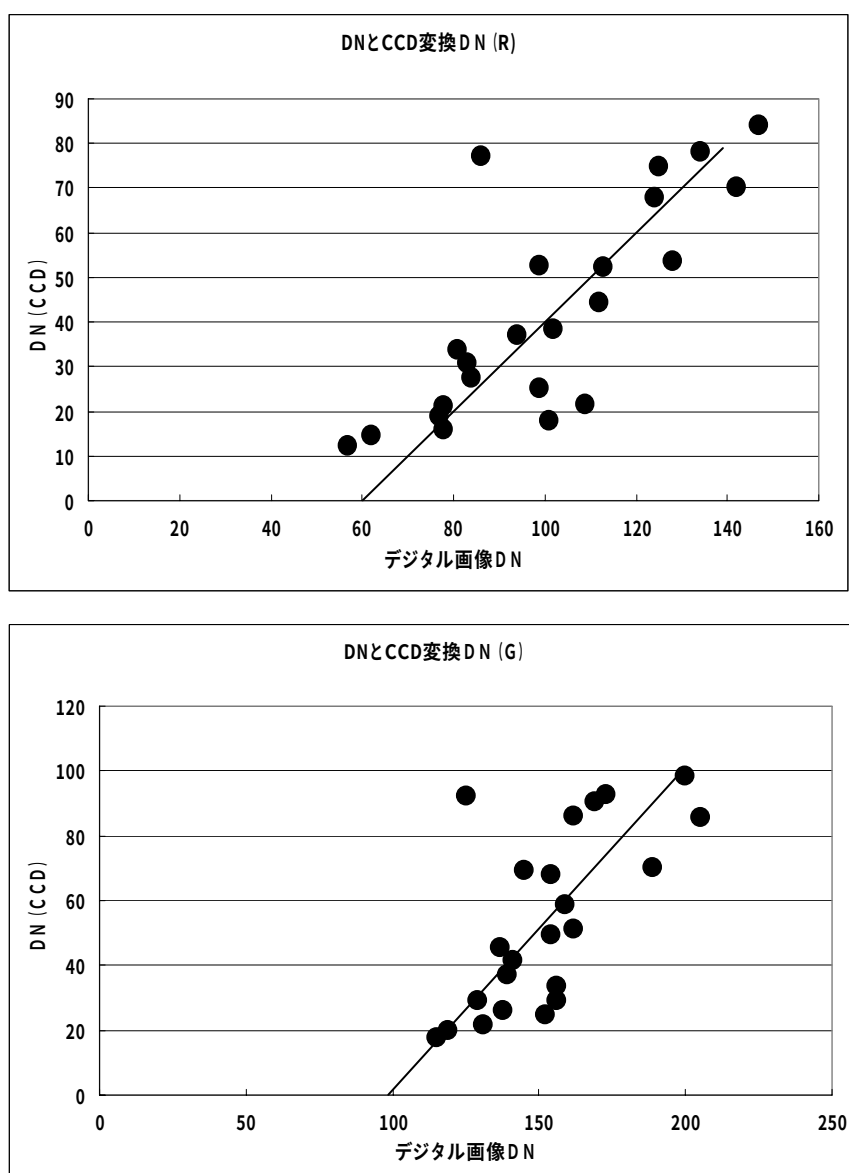


図 9 各濃度での C C D 値から変換の D N とデジタルカメラでの D N (R, G)

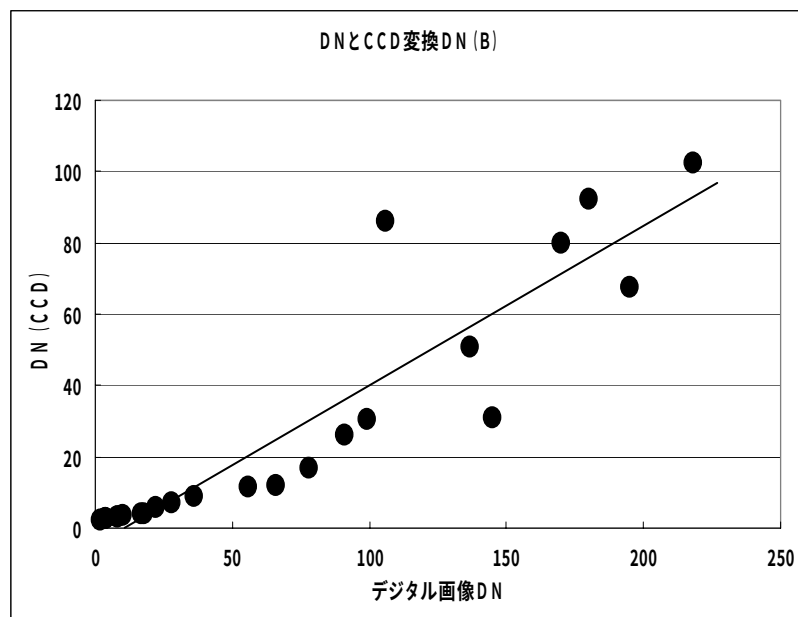


図9 各濃度でのCCD値から変換のDNとデジタルカメラでのDN (B)

5. クロロフィル-a と反射スペクトル、デジタルカメラからのデジタルナンバーの相関

図 10 はデジタルカメラでの DN (R) とクロロフィル-a 濃度の対数との相関を、図 11 は反射スペクトルから理論的に算定したデジタルナンバーとクロロフィル-a 濃度の対数との相関を示した図である。図 10 はデータのばらつきがあるが、図 11 の $\log(\text{Chl-a})$ と理論デジタルナンバーとは直線関係を示している。図 10,11 は R についての図であるが、G, B についても同様の結果であった。

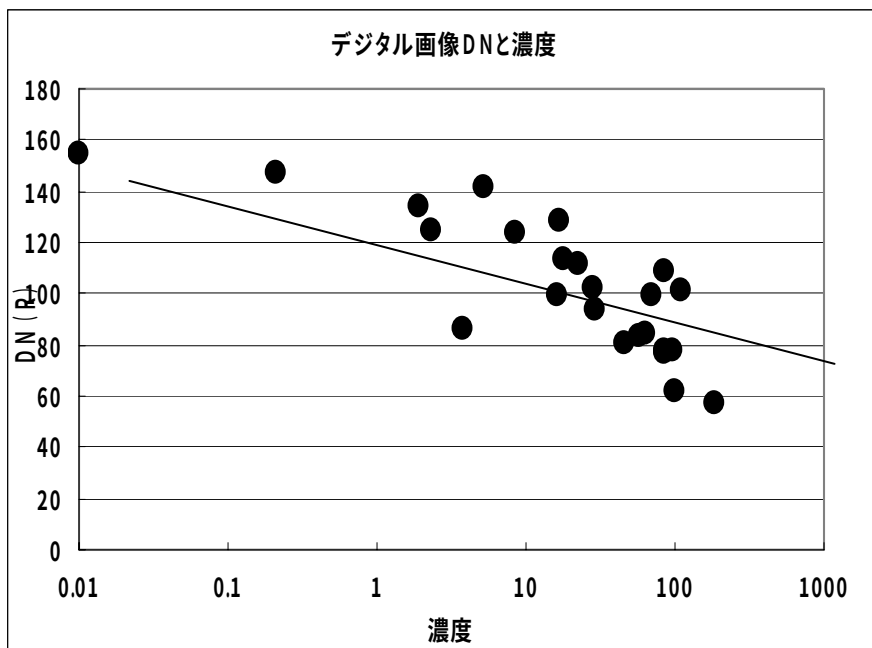


図 10 デジタルカメラでのデジタルナンバーとクロロフィル-a

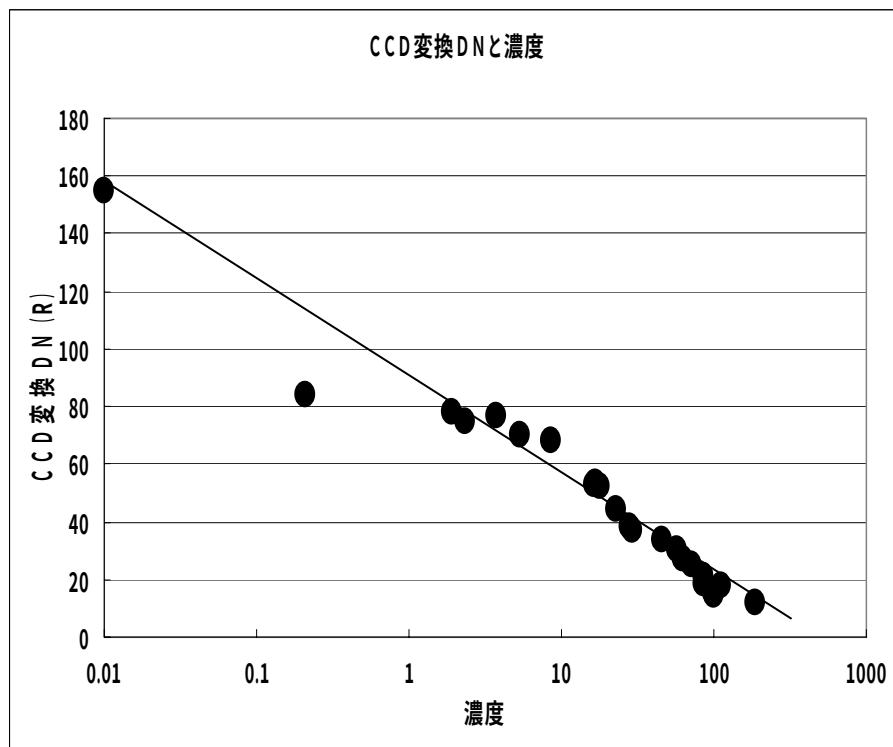


図 11 反射スペクトルから理論的に算定したデジタルナンバーとクロロフィル-a

5. 1 理論デジタルナンバーからのクロロフィル濃度の推定式

光源等の影響を除去するため、三色係数を変数とした。

$$rf = \frac{R}{R + G + B} \quad , \quad gf = \frac{G}{R + G + B} \quad , \quad bf = \frac{B}{R + G + B} \quad (2)$$

CCD 値から理論的に算定したデジタルナンバーを用いた三色係数での推定式を求めた。

$$\log(\text{Chl}) = 6.27rf + 43.91gf + 23.42bf - 25.72 \quad (3)$$

この推定式と実測値との相関を示したのが図 12 である。推定値と実測値の間には高い相関が見られるが、高濃度での推定式の適応性に課題が有ることを示している。しかし、通常の閉鎖水域でのクロロフィル-a 濃度の範囲での適応性は十分である。

デジタルカメラで撮影した DN を式 (3) に代入してクロロフィル-a 濃度を推定すると、全くオーダーの異なる推定値となる。

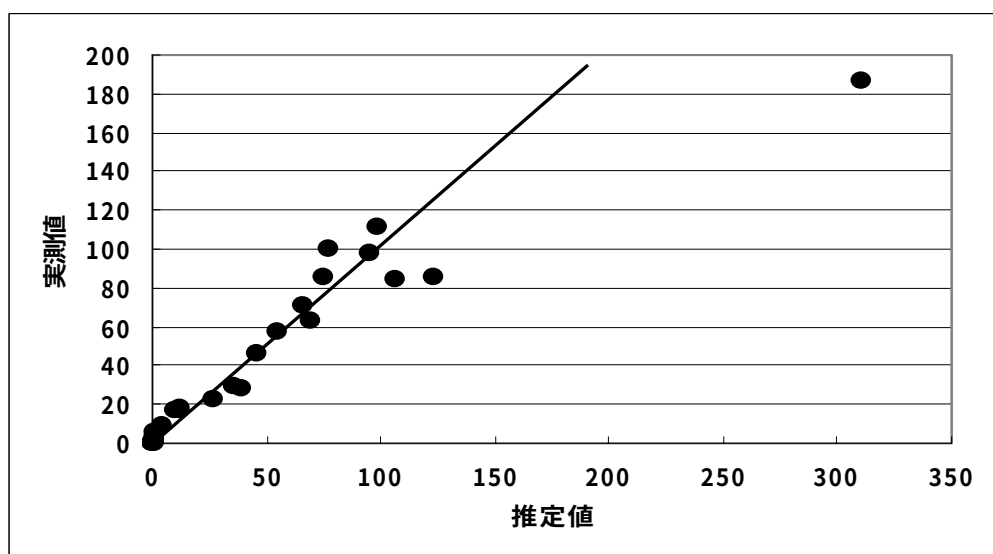


図 12 実測値と推定値の比較

室内実験により CCD カメラで測定した反射スペクトル値から理論的に算定したデジタルナンバーと同時に撮影したデジタル画像のデジタルナンバーとの相関を検討した。水面、クロロフィル、更に水槽底面からの反射を含んでおり、両者の相関は 1:1 ではなかった。しかし、傾向は一致しており、両者はほぼ同じ反射スペクトルを測定していると判断できる。CCD カメラは反射スペクトルを正確に測定しており、多くの情報の積分値と思われる。従って、理論デジタルナンバーとクロロフィル-a 濃度の関係は、色々な影響が入っているデジタル写真からクロロフィル濃度の寄与のみを抽出する際には有効な情報である。

今後は色々な水質条件での検討が必要である。

6. 琵琶湖での現地調査

現地での調査データから水質を推定する際に、室内実験での知見を応用することを検討するために琵琶湖沿岸域での現地調査を行なった。沿岸域では水質が浅く、係留気球から撮影したデジタル写真には藻類と水中のクロロフィルとの両者がクロロフィルとして撮影されている。100m上空からのデジタル写真にはこれらの藻類が、水面でのクロロフィル濃度の高濃度として画像化されることとなる。この藻類が繁茂する場所での水質モニタリングのためには、藻類のクロロフィル濃度に寄与する見かけの影響を分離することが必要である。

琵琶湖沿岸域を対象とした現地調査、室内実験から、デジタル画像を処理し、藻類と水溶液中のクロロフィル濃度とを分離することをおこなった。

現地調査の対象地域は琵琶湖野洲川河口部で、デジタルカメラを搭載した係留気球を用いて湖水面の撮影を行うと共に、画像内をボートで移動しながら多地点の水質移動測定を行った。その後、デジタル画像より得られる各ピクセルのデジタル値と植物プランクトン量と比例関係にあり水質汚濁の重要な指標の一つであるクロロフィル-a 濃度との関係について解析を行なった。

調査日は2006年8月26日、27日で、デジタルカメラを搭載した係留気球を用いて上空約100mから湖水面を撮影し、同範囲内においてゴムボートを用いて採水し、クロロフィル-a 濃度、溶存酸素等の測定を行った。

図13は、係留気球からの画像の一例である。宇和島湾での現地調査を教訓に、太陽高度が低くホワイトキャップの影響が無い午前中を中心に調査を行なった。



図 13 係留気球からの写真（藻類とクロロフィルが共に写されている）



図 14 係留気球と採水風景

画像内での採水地点に相当する画素のデジタルナンバー（DN）とクロロフィル-a 濃度との関係を見ると、DNには藻類が見かけ上の高濃度として作用していた。藻類のクロロフィルと溶液中でのクロロフィルとを分離して評価するために室内実験を行なった。模擬藻類としてほうれん草を使用し、水槽底面に固定して、濃度の異なる水溶液で満たして上方よりデジタルカメラで撮影した。併せて、模擬藻類の無い水溶液だけでの実験を行なった。

7. 現地での藻類の影響を室内実験で検討

現地調査での撮影を琵琶湖沿岸の水深が約3メートル以下の浅瀬で行ったためデジタル画像には湖底の砂や水草が写りこんでしまった。この藻類の影響とクロロフィルの影響を分離するために室内実験を行なった。この際に、すでに室内実験で得られているCCDカメラで理論的に計算したデジタルナンバーとクロロフィル濃度との関係を参考にした。

藻類を模擬するためにほうれん草を水槽内に沈め、これに濃度を変化させた溶液を加えることにより室内実験を行なった。

7. 1 藻類の影響の分離

藻類の影響を分離し、デジタル画像のDNからクロロフィル濃度推定式を以下の手順で検討した。

図15は模擬藻類を設置した水槽でのデジタルナンバー(R1)とクロロフィル濃度との関係を示した。この図ではRのみを示した。

図16は琵琶湖でのDNとクロロフィル-aとの関係を示した図である。

図15中の相関式の傾きはそのまま、現地調査のデータに対応するように移動し、図16中の相関式を求める。この式から各クロロフィル濃度に相当するDN(R2)を読み取る。また、直線とx軸との切片のデジタルナンバーDN(R0) (クロロフィル濃度がゼロ)を読み取る。

$$R: Y = -0.5215 \times X + 25.861 \quad DN(R_0) = 49.6$$

$$G: Y = -0.3845 \times X + 20.353 \quad DN(G_0) = 52.9$$

$$B: Y = -0.3873 \times X + 15.512 \quad DN(B_0) = 40.0 \quad (4)$$

図17はクロロフィル溶液のみの実験室でのデータを示した図である。

図中の回帰式にクロロフィル濃度を代入してデジタルナンバーDN(R3)を読み取る。

図16、17中の回帰式を用いて各クロロフィル濃度でのデジタルナンバーDN(R)をそれぞれ読み取り、式(5)より α 、 β 、 γ をそれぞれ求める。

$$\alpha(R) = \{DN(R_3) - DN(R_2)\} / DN(R_0)$$

$$\beta(G) = \{DN(G_3) - DN(G_2)\} / DN(G_0)$$

$$\gamma(B) = \{DN(B_3) - DN(B_2)\} / DN(B_0) \quad (5)$$

各濃度での α 、 β 、 γ の値はほぼ一定値でそれぞれ1.75、2.65、2.89の値であった。

したがって、藻類のクロロフィル濃度への見かけの影響を除去したRGBデジタルナンバーDN(R')、DN(G')、DN(B')を以下の式(6)で算定することができる。

式中DN(R)などは実際の画像でのデジタルナンバーDNを表す。

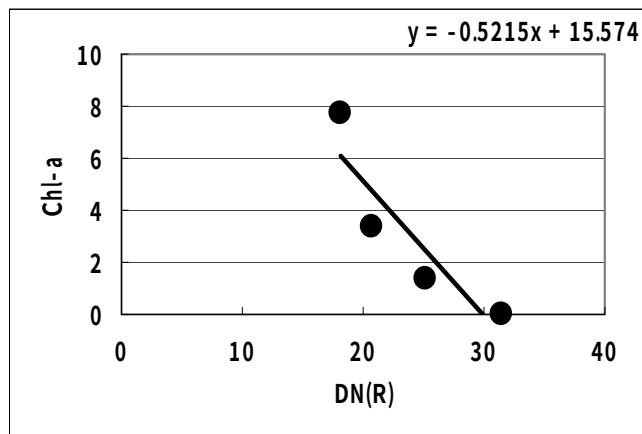


図15 模擬藻類+クロロフィル溶液

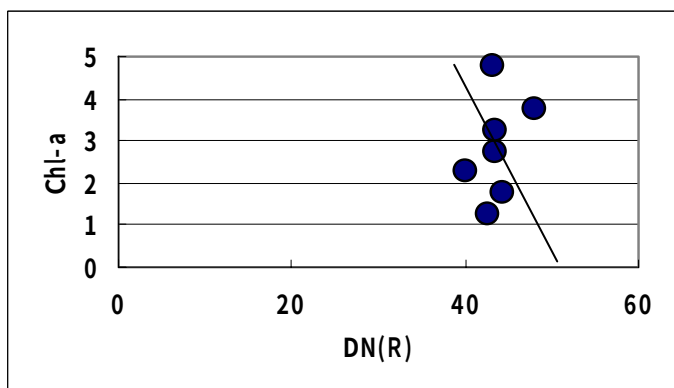
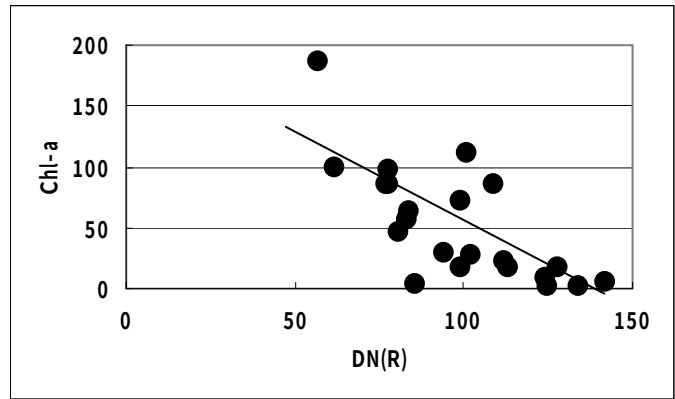


図16 琵琶湖 藻類+クロロフィル

$$\begin{aligned}
DN(R') &= \alpha(R) \times DN(R) + DN(R_0) \\
&= 1.75DN(R) + 49.59 \\
DN(G') &= \beta(G) \times DN(G) + DN(G_0) \\
&= 2.6DN(G) + 52.93 \\
DN(B') &= \gamma(B) \times DN(B) + DN(B_0) \\
&= 2.89DN(B) + 40.05
\end{aligned}$$

(6)



7. 2 水質推定式と分布画像

琵琶湖での係留気球からの画像画素のDN 図 17 クロロフィル溶液でのDN
から式 (6) によって補正したデジタルナンバーDNと水質データからクロロフィル-a 推定式を検討した。

$\log(\text{Chl-a})$ と理論DNとは直線関係を示している。G, Bについても同様であるので、 $\log(\text{Chl-a})$ と理論DNとの関係式を求めた。光源等の影響を除去するため、DNを三色係数での変数とし、 $\log(\text{Chl-a})$ との回帰式 (8) を求めた。

$$rf = \frac{R}{R+G+B}, \quad gf = \frac{G}{R+G+B}, \quad bf = \frac{B}{R+G+B} \quad (7)$$

$$\log(\text{Chl}) = -1.8134 \times rf + 16.539 \times gf - 34.289 \times bf + 4.9579 \quad (8)$$

式 (8) を用いてデジタル画像からクロロフィル濃度の分布画像を作成した。

画像により濃度分布の段階は異なっているが、図中の色が青に近いほどクロロフィル-a 濃度が低く、逆に色が赤に近いほどクロロフィル-a 濃度が高くなっている。また陸地、ゴムボート、係留気球を操作するためのワイヤーなどを切り取った不要部分は真白になっている。

琵琶湖の水質については、調査地点ではクロロフィル-a 濃度は1~10($\mu\text{g/l}$)と低いですが、藻場のデジタルデジタル画像から、藻類の影響を除去した水質分布画像を得ることが出来た。図 18、19 に時刻の異なる画像を示したが、このような画像の時間変化を利用すると、濃度分布を指標として、流動の特性も把握することができる。

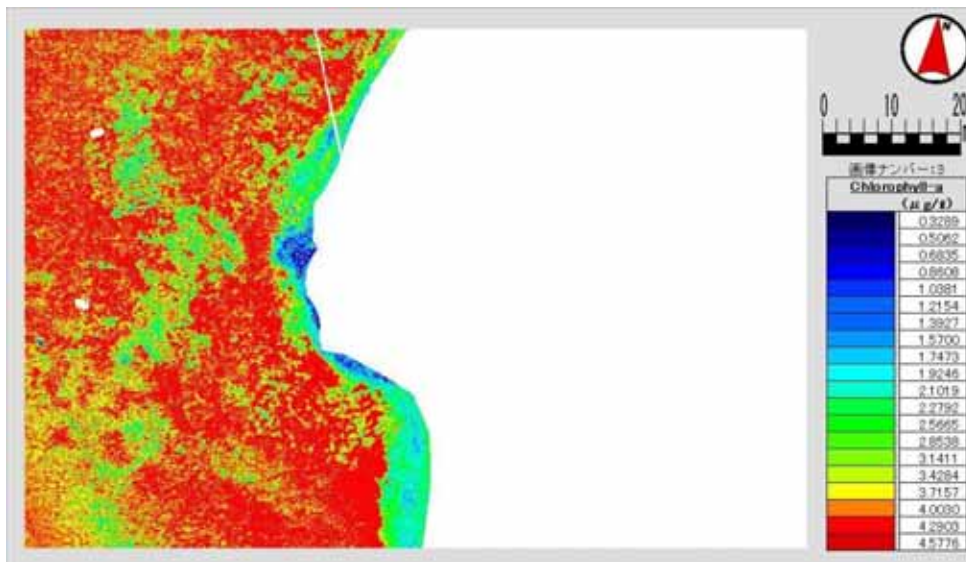


図 18 デジタル画像と分布画像（撮影時刻 9：49）

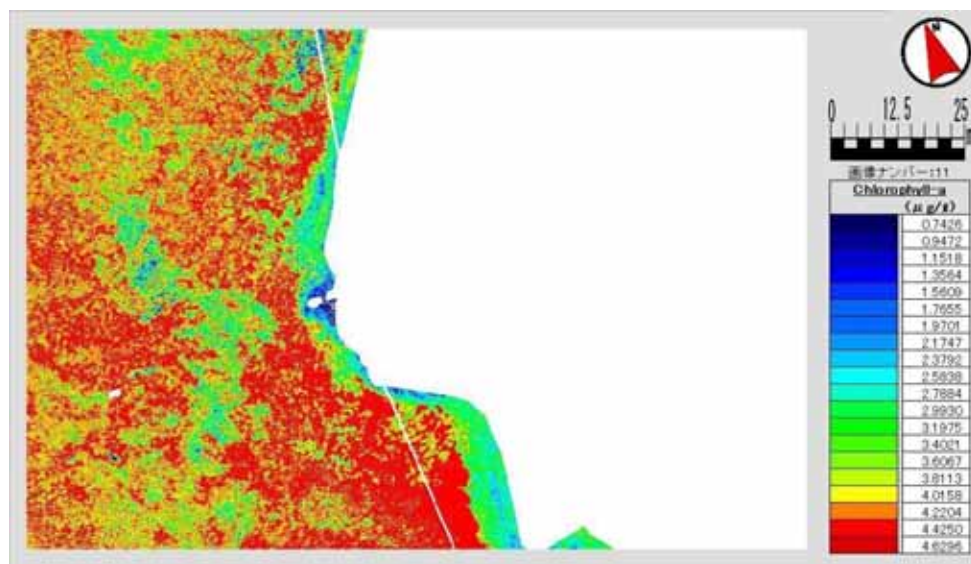


図 19 デジタル画像と分布画像（撮影時刻 10：08）

琵琶湖野洲川河口部沿岸域の浅瀬においてクロロフィル-a 濃度の空間的な分布状況を視覚化し、把握することができた。また、撮影したデジタル画像の分解能は衛星リモートセンシングでは得ることが難しい約 4.5 cmであった。

分布画像上では沿岸部分(右側)はほとんどの画像にて低濃度を示しているが、これは画像に写りこんだ砂の影響を考慮しきれなかったためと思われ、やや信頼性に欠ける。しかし、それ以外の部分では藻類の影響を考慮した式を用いてのデジタル値補正を行った。

また作成した画像を用いると、衛星画像では得ることが難しかった微小範囲における分単位、時間単位でのクロロフィル-a 濃度分布の変化を知ることが可能である。

現地調査、室内実験よりデジタル画像に写りこんだ藻類の影響を考慮したデジタル値補正式を求めた。これを用いた分布画像により、クロロフィル-a 濃度の空間的な分布状況を沿岸域の浅瀬のような水域であっても大まかにではあるが把握することが可能になった。しかし、場所によっては藻類の影響を 100%の除去に成功したとはいいきれないためデジタル値補正式の精度の向上が必要である。

また今回の調査中は、風が穏やかだったために係留気球を飛ばすことができたが、風があった場合に係留気球が流されて目標の高度まで上がらず、また撮影時にデジタルカメラがぶれてしまいきれいな画像を撮影できないなどということが考えられる。同様に、波の影響も多少なりとも存在するのでその処理方法を考えていく必要もある。

最後に本調査方法では撮影した画像に採水用船舶が含まれていないと水質・位置・方位の情報が全くないデータになってしまう。そのためにそのデジタル画像はまったく意味をもたない画像になってしまう。このため、撮影した画像をすぐに見られるシステムを使用することによって効率的な調査を行うことができると考えられる。

8. 広域での航空写真を利用した水質分布画像の作成

衛星 RS では、船舶での水質測定のように直接採水などを行わないので、正確なデータを得ることは難しいが、どの水域でも自由に観測でき、広範囲のデータを瞬時に取得することが可能である。しかし、衛星 RS では、回帰周期や被雲などによっては定期モニタリングができないなどの問題がある。また、広範囲でデータを取得できる反面、微小範囲でのモニタリングが困難である。

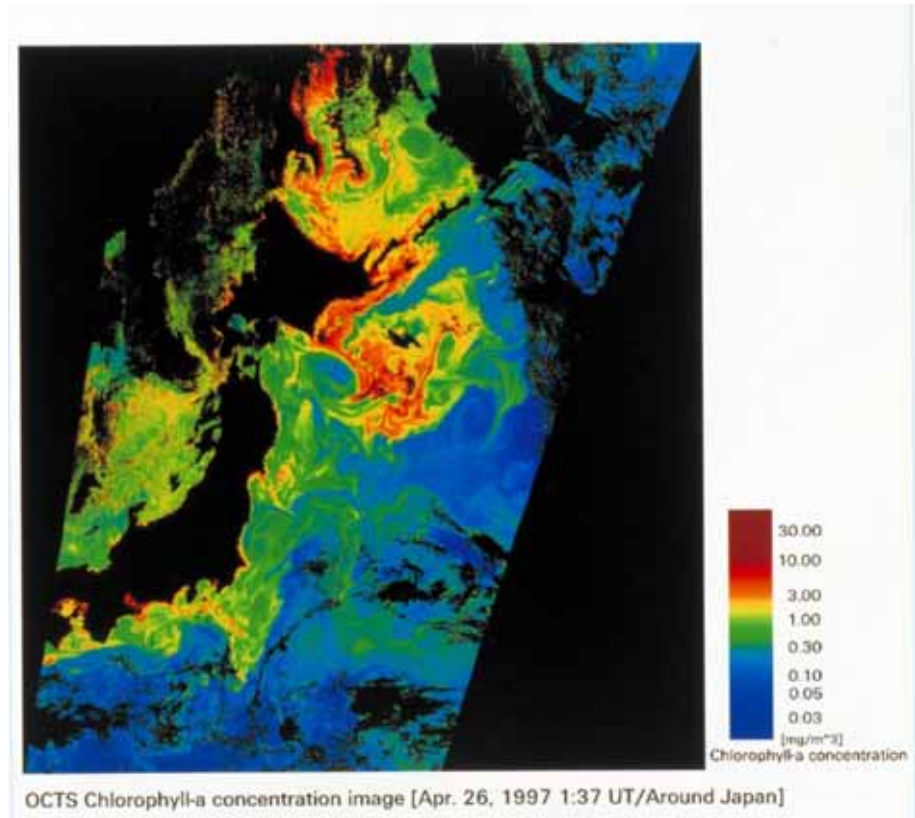


図 20 衛星データによる水質観測の例「提供：宇宙航空研究開発機構(JAXA)」



図 21 東京都江東区の空中写真「国土画像情報（カラー空中写真）国土交通省」

他方、空中写真を利用した航空リモートセンシング（以下航空 RS）は、主に地図作成や地形・土地利用の判読解析などに利用され幅広い領域で活用されている。しかし、空中写真を用いた水質モニタリングの研究・開発が進んでいない。

琵琶湖における空中写真を用いて水質分布画像の作成を行なった。航空写真は航空路に沿って撮影されており、琵琶湖全域を網羅するためには何枚かの写真を合成する必要がある。さらに、撮影時期が異なるために精度はかなり低いことが予想される。

空中写真は、太陽光の反射、雲、波などの余分な情報ができるだけ少ないものを選ぶ必要がある。このような条件で湖面を撮影している空中写真を探した。

今回使用したのは、国土交通省近畿地方整備局琵琶湖河川事務所のホームページに公開されている航空写真である。

使用する空中写真は、撮影高度はおよそ 1000m、撮影範囲は南北に約 1.5km、東西に約 2.2km である。分解能は撮影範囲を縦横それぞれのピクセル数で割って算出した結果、約 2m であることが分かった。

図 22 は現地調査を行った地点での航空写真である。現地調査の結果を用いて水質推定モデルを作成するために調査場所の採水地点を緯度・経度から割り出しデジタルナンバー DN を抽出した。



図 22 調査場所の空中写真 「国土交通省近畿地方整備局琵琶湖河川事務所提供」

8. 1 水質推定モデル

現地調査から得たクロロフィル-a 濃度測定データ及び入手した調査場所の空中写真から抽出した DN を基に三色係数法、独立変数法などを用いた回帰分析を行い、水質推定モデルを作成する。

水質推定モデルを作成する前に RGB のデジタルナンバー DN とクロロフィル a 濃度との相関について、現地調査でのデータと航

空写真から読み取ったデジタルナンバーとで検討した。

全体的に多少のばらつきはあるが、正の相関を示している。

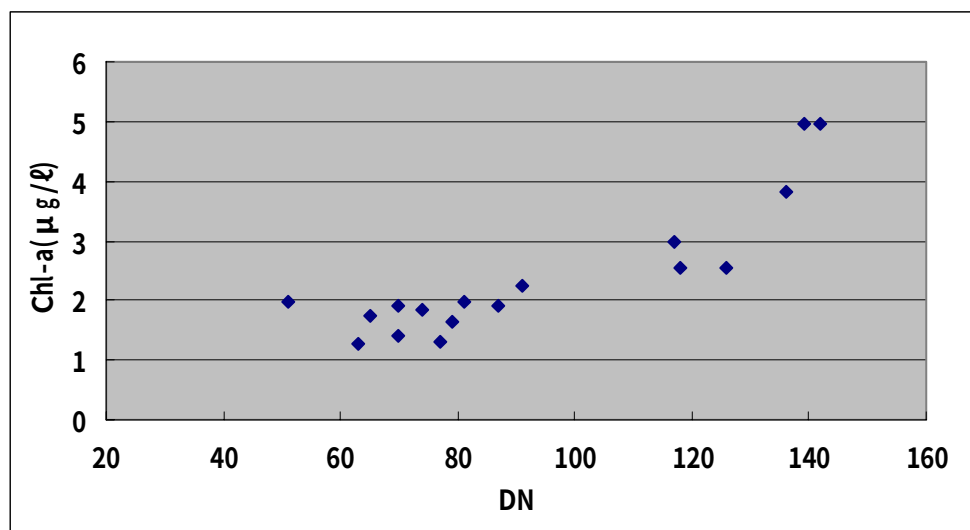


図 23 R (赤) の DN とクロロフィル-a 濃度の相関グラフ

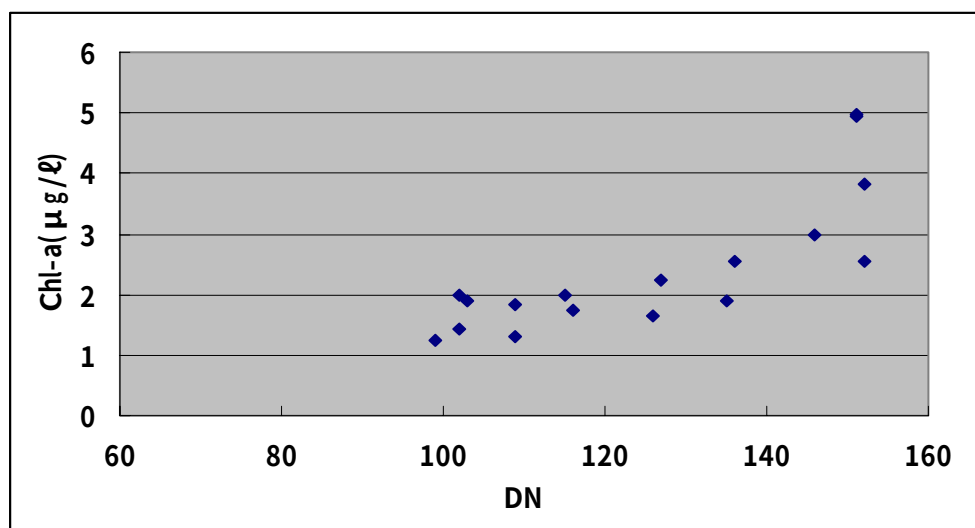


図 24 G (緑) の DN とクロロフィル-a 濃度の相関グラフ

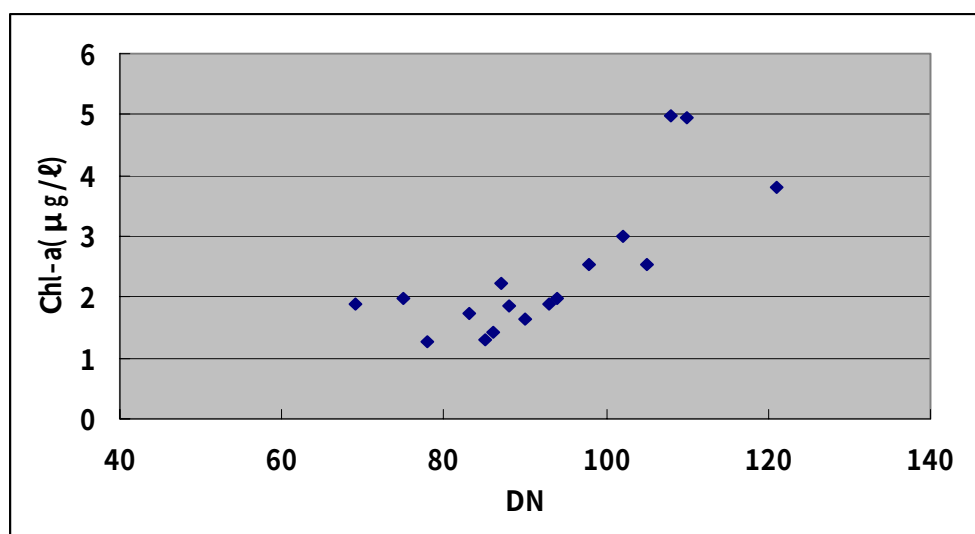


図 25 B (青) の DN とクロロフィル-a 濃度の相関グラフ

8. 2 三色係数法での水質推定モデル

三色係数での推定式 (9) を求めた。

$$\log(\text{Chl}) = 3.048272 \times \text{rf} - 0.63708 \times \text{gf} - 0.62167 \times \text{bf} - 0.12944 \quad (9)$$

実測データとの相関は予想外に低いが、実用的には使用できるレベルである。

図 26 に式 (9) と実測データとの相関を示した。

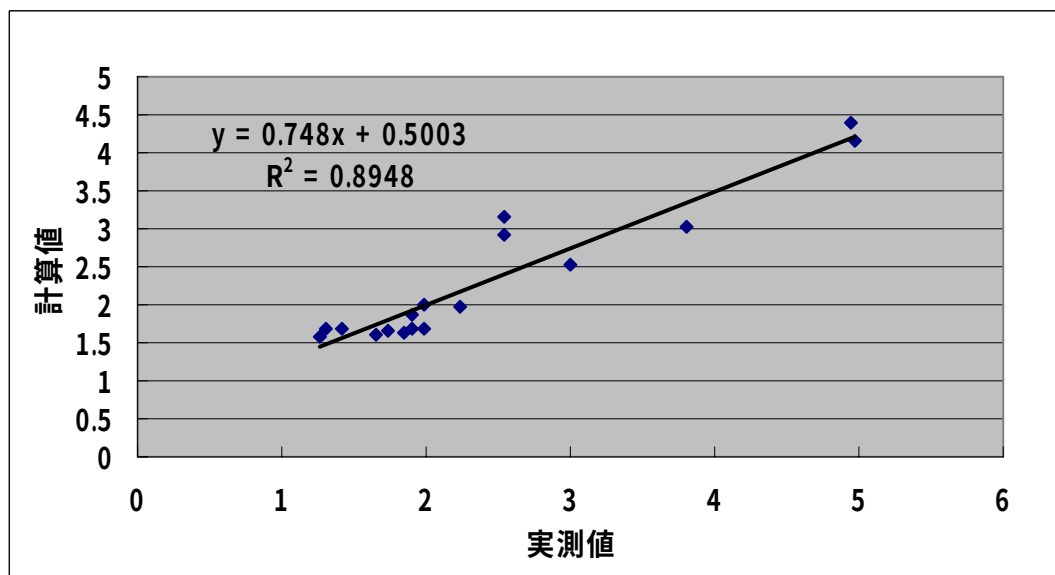


図 26 クロロフィル-a 濃度実測値と計算値の近似直線（三色係数法）

8. 3 その他の水質推定モデル

三色係数法を用いたモデル式だけではなく、様々な独立変数パターンを使用した一次式(10)のモデル式についても検討を行なった。

独立変数パターンは、これまでの検証でクロロフィル-a 濃度と相関関係が強く現れていた赤色(R)を中心に構成した7パターンについて行った。

$$\log(\text{Chl}) = a \times I + b \quad (10)$$

I : 独立変数パターン

独立変数パターン

変数. 1	X/Y
変数. 2	$X/Y + Z$
変数. 3	$(X+Y)/X$
変数. 4	$(X-Y)/X$
変数. 5	$(X-Y)/(X+Y)$
変数. 6	$(X+Y)/Z$
変数. 7	$(X-Y)/Z$

X, Y, Z に採水地点の RGB の DN を組み合わせて代入する。

相関の良さそうなモデル式はいくつかできたが、クロロフィル-a 濃度の計算値を求めるとほとんどの式が実測値と大きな誤差が生じる結果となり、三色係数法によるモデル式よりも誤差が大きくなった。

$$\log(Chl) = 1.060988 \times \frac{R}{G} - 0.44969 \quad (11)$$

$$\log(Chl) = 1.06099 \times \frac{(G - R)}{G} + 0.622416 \quad (12)$$

$$\log(Chl) = 1.060988 \times \frac{(G + R)}{G} - 1.51068 \quad (13)$$

$$\log(Chl) = 0.005061 \times \left(\frac{B}{G} + R \right) - 0.156 \quad (14)$$

$$\log(Chl) = 0.956816 \times \frac{(R - B)}{G} + 0.328677 \quad (15)$$

色々な独立変数の組み合わせでの回帰式の相関を表 3 に示す。

表3 独立変数パターンの相関係数一覧

パターン	X	Y	Z	相関係数
X/Y	R	G		0.622415662
	R	B		0.600035151
	G	R		0.502434158
	G	B		0.006672752
	B	R		0.495593849
	B	G		0.01065278
$X/Y+Z$	R	G	B	0.628231586
	R	B	G	0.647407374
	G	R	B	0.622969026
	G	B	R	0.767016677
	B	R	G	0.644576909
	B	G	R	0.767108596
$(X+Y)/X$	R	G		0.502434158
	R	B		0.495593849
	G	R		0.622415662
	G	B		0.01065278
	B	R		0.600035151
	B	G		0.006672752
$(X-Y)/X$	R	G		0.502434158
	R	B		0.495593849
	G	R		0.622415662
	G	B		0.01065278
	B	R		0.600035151
	B	G		0.006672752
$(X-Y)/(X+Y)$	R	G		0.577432685
	R	B		0.552302184
	G	B		0.008873821
$(X+Y)/Z$	R	G	B	0.372754815
	R	B	G	0.409177722
	G	B	R	0.528750179
$(X-Y)/Z$	R	G	B	0.554776123
	R	B	G	0.598350632
	G	B	R	0.105338867

8.4 分布画像の作成

対象地域は琵琶湖で、国土交通省近畿地方整備局琵琶湖河川事務所のホームページに公開されている航空写真を用いる。まず琵琶湖南湖が少しでも撮影されている空中写真だけを選び、画像編集ソフトを用いて結合する。図 27、28 に示す。撮影されていない湖面部分が多少あるが、この他に鮮明に水面を撮影できている写真がなかったので、この写真を使って分布画像を作成することにした。

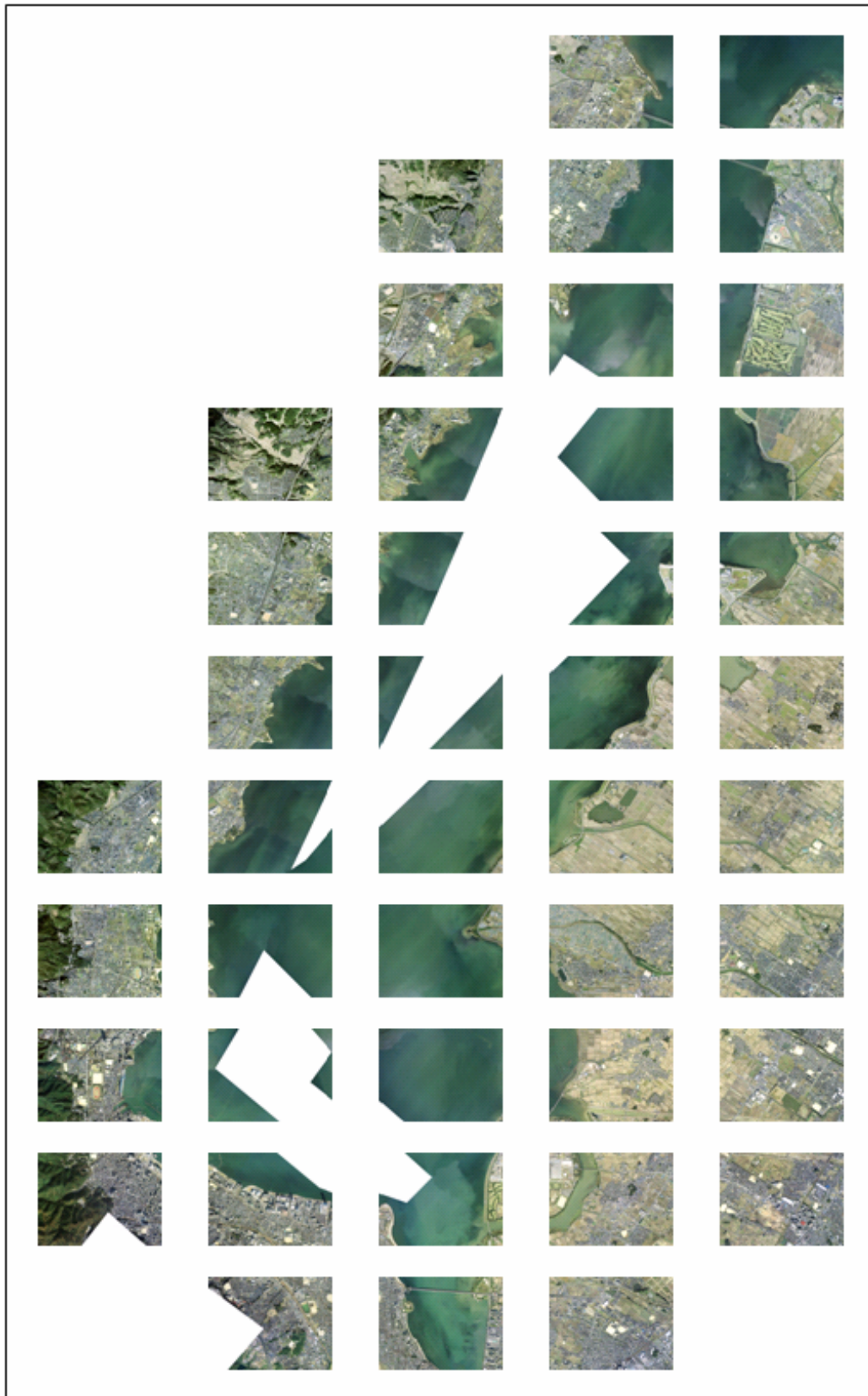


図 27 琵琶湖南湖の空中写真 43 枚
国土交通省近畿地方整備局琵琶湖河川事務所提供

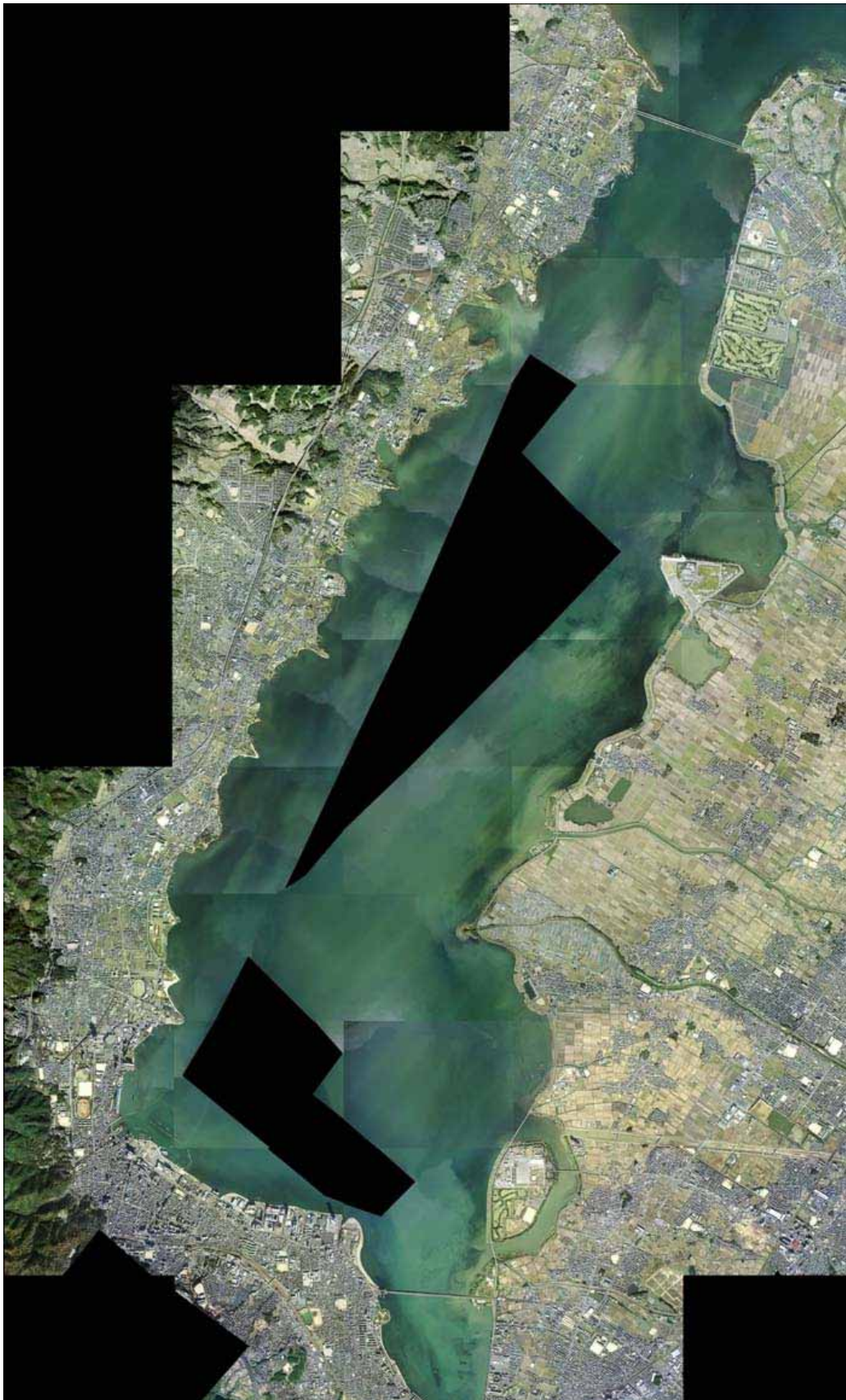


図 28 琵琶湖南湖の結合（モザイク処理）画像

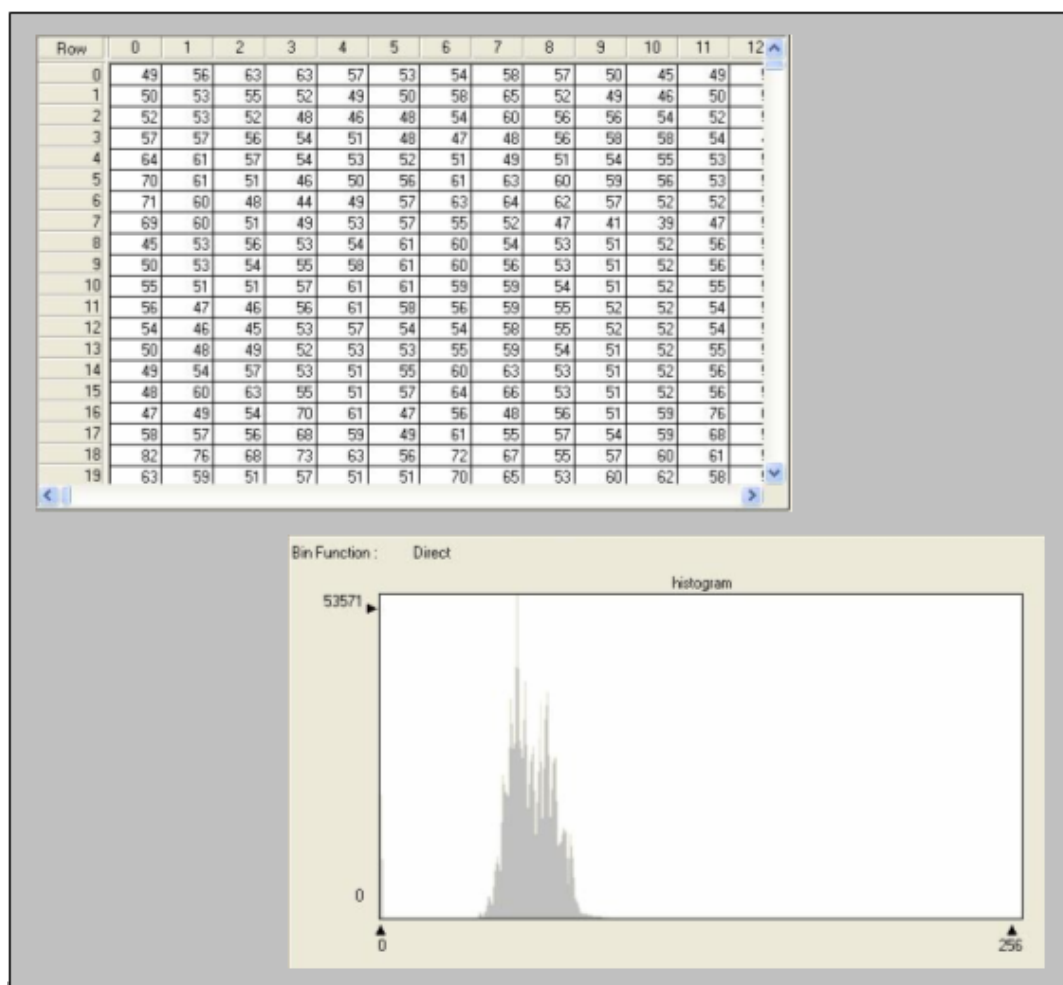
8. 4. 1 作成方法

最初に「ERDAS IMAGE8.6」で画像解析を行えるようにするため、画像フォーマットを JPEG から IMG に変換する。これによって、ERDAS IMAGE で画像の RGB のピクセルデータやヒストグラム（各バンドの DN の割合を示すグラフ）などの情報を引き出すことが可能となる。

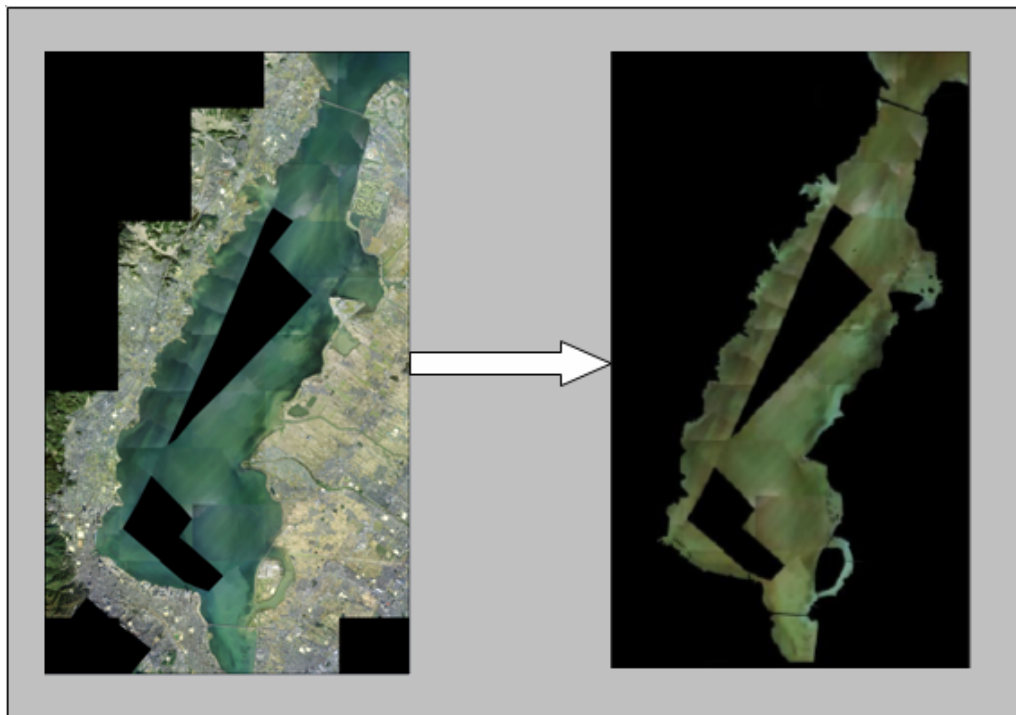
次に画像から水面以外の情報を切り取る。この作業をしないと濃度分布結果を出すときに陸地や船などの余分なデータも組み込んでしまうからである。また切り取る時にその物の大きさぎりぎり
で切り取ってしまうとエッジ効果によって分布画像を作るときに切り取った周辺に影響がで
しまうので、少し余分に切り取る必要がある。

これらの処理を終えたら、ERDAS IMAGE の Modeler に第 2 章で作成したモデル式を投入し
てクロロフィル-a 濃度結果を出す。このままでは、各ピクセルにクロロフィル-a 濃度が細かく表示
されるだけなので、この濃度を 10 段階に分類して表示して、さらに分かりやすくするために色を
付ける。

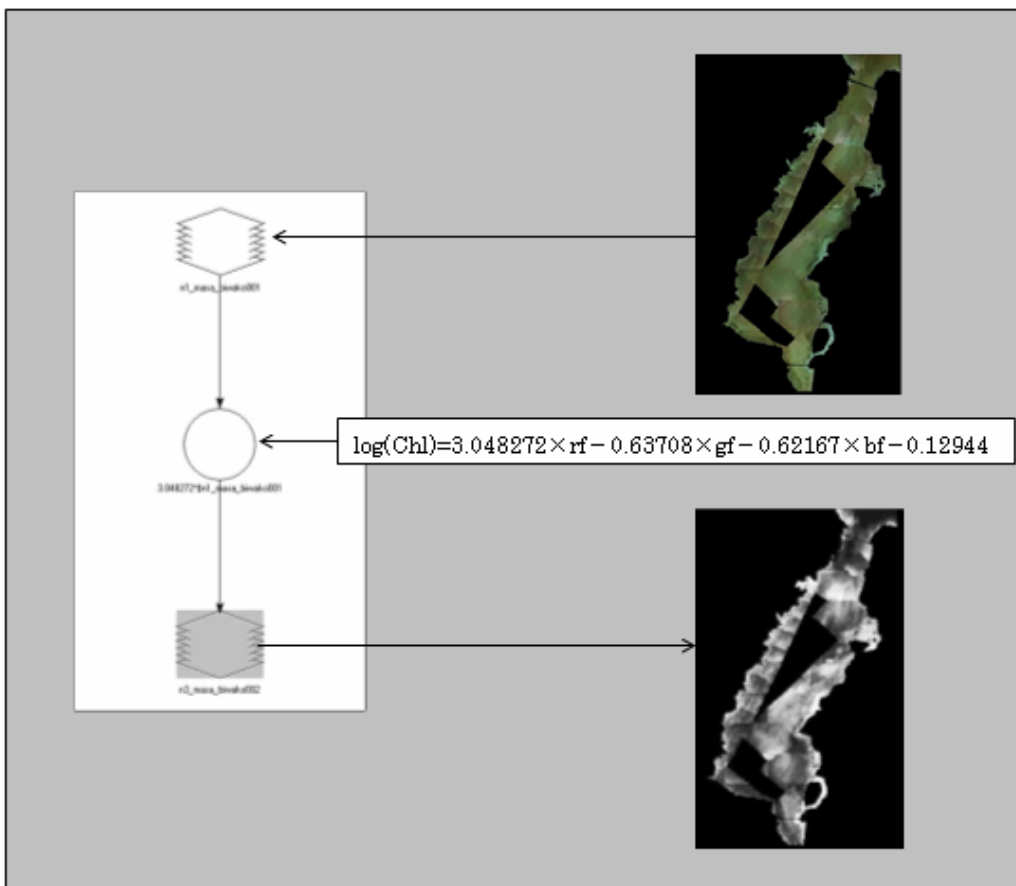
(1) 画像のピクセルデータとヒストグラム



(2) 画像から余分な情報を切り取る



(3) Modeler にモデル式を投入して濃度分布結果を出す



8. 4. 2 分布画像を用いた水質モニタリング

一枚一枚写真を貼り合わせた画像を使用したので、画像間の色調差が出ている所が数ヶ所見られるがあまり支障なくきれいな濃度分布を表すことが出来た（図 29）。

図 29 での濃度は港湾などがある沿岸域が高く、流れの有る中央部及び画像上部の北湖の部分は濃度が低くなっている。ただしこの写真の撮影時期がいずれも夏ではないことと、この時期は赤潮などの被害が少なかったこともあり、高濃度域（赤色部分）でも低い値を示している。

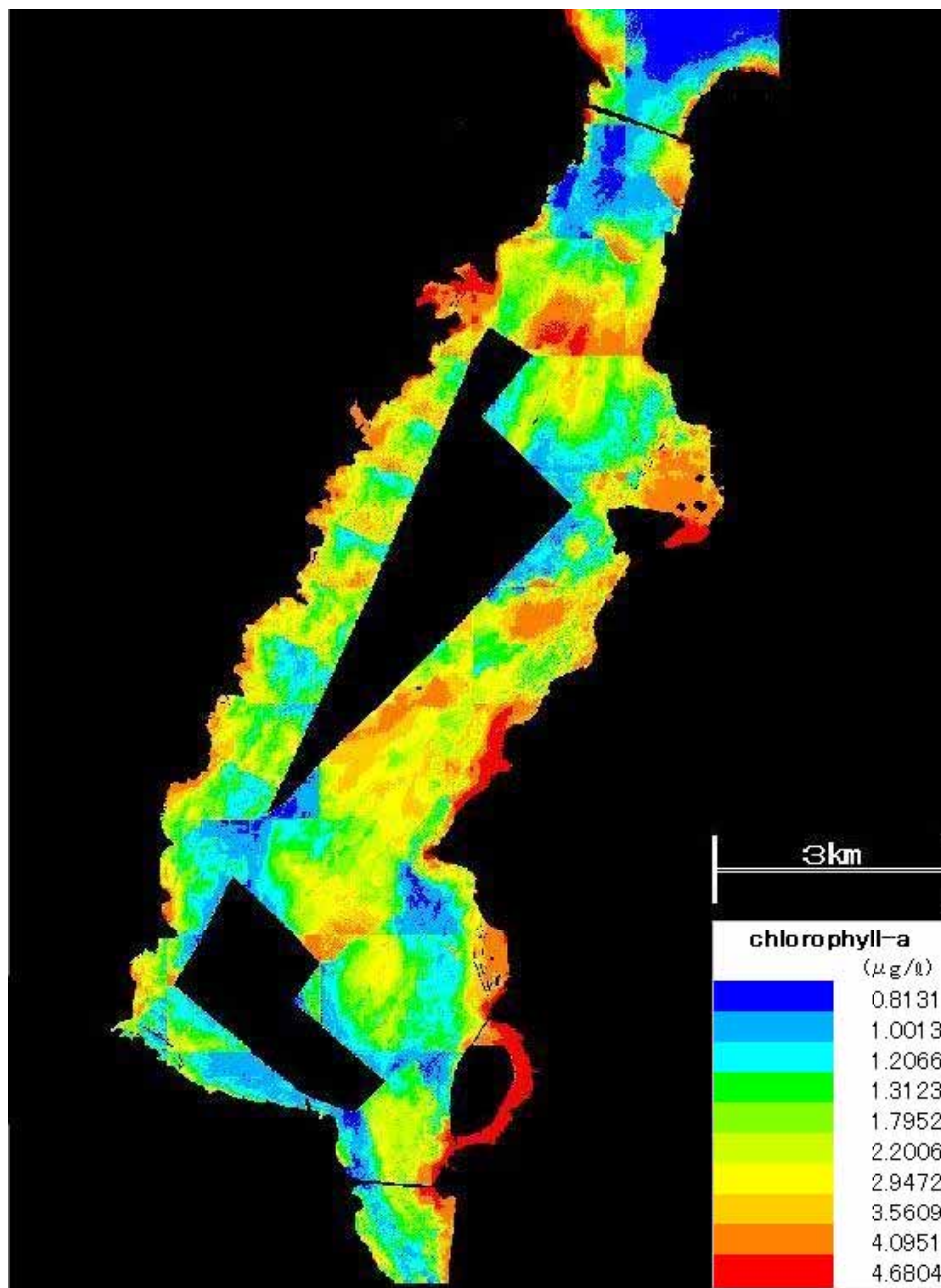


図 29 琵琶湖南湖のクロロフィル-a 濃度分布画像

その他の閉鎖性水域の空中写真をいくつか入手し、琵琶湖南湖の写真と同様の方法でクロロフィル-a 濃度分布画像を作成してみた。

図 30 は東京湾での航空写真で、図 31 はクロロフィル濃度の分布画像である。

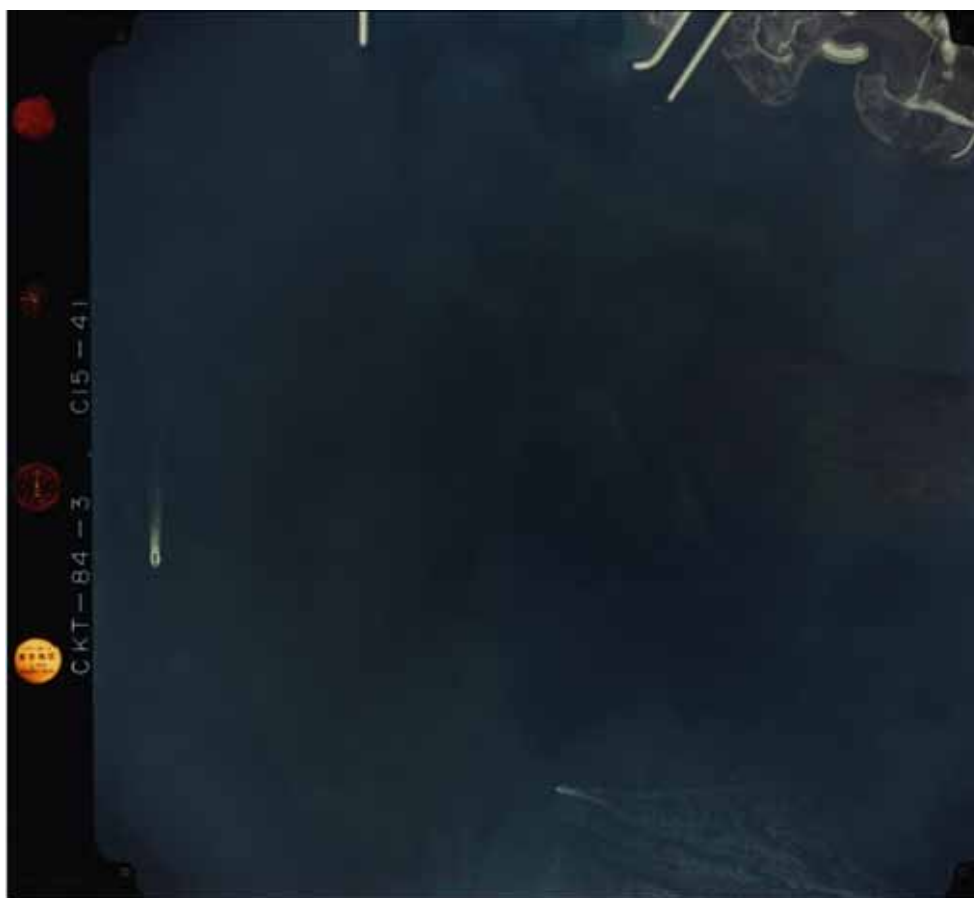


図-30 東京湾①の空中写真及び撮影場所

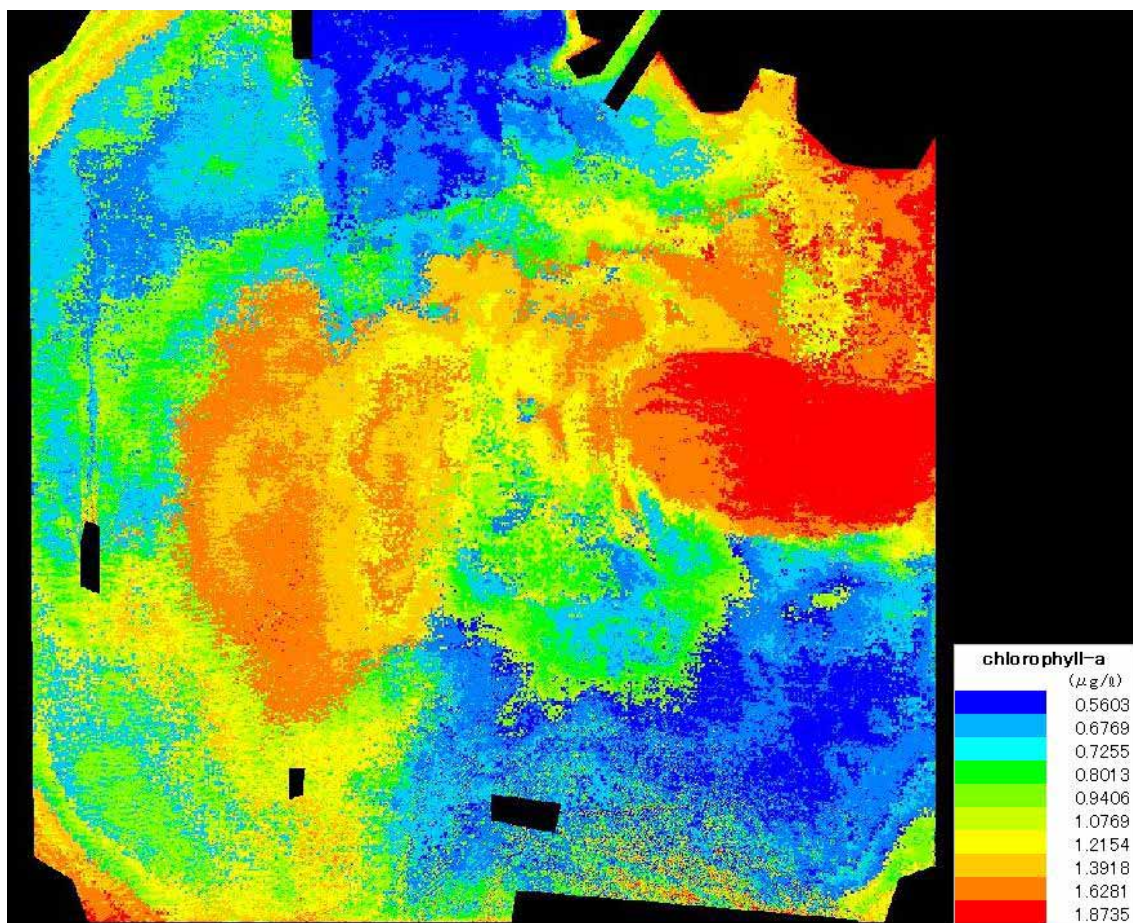


図 31 東京湾のクロロフィル-a 濃度分布画像 その 1

撮影時期	縮尺	緯度・経度	
		北緯	東経
昭和59年	1/10000	35° 37' 34"	139° 51' 15"

空間的な水質分布をよく表しており、それぞれの濃度域がかたまりとしてはっきりしている。また右下部分に非常に細かく分布が点在している所は、波によってその部分の DN が影響を受けたためだと思われる。

CKT-84-3 7 CIG-A-40 11:22 KO 2140

An aerial photograph showing a coastal region. A large, irregularly shaped landmass, possibly a peninsula or island, is visible on the left side of the frame. The land is covered in dense vegetation and has a complex shoreline with several inlets and points. To the right of the landmass is a body of water, which appears to be a bay or a large lake. The water is dark and has some lighter patches, possibly indicating different depths or underwater features. The overall image is in black and white, with a grainy texture. There are some small, dark, rectangular marks on the right edge of the image, which might be artifacts from the scanning process or physical damage to the original photograph.

41

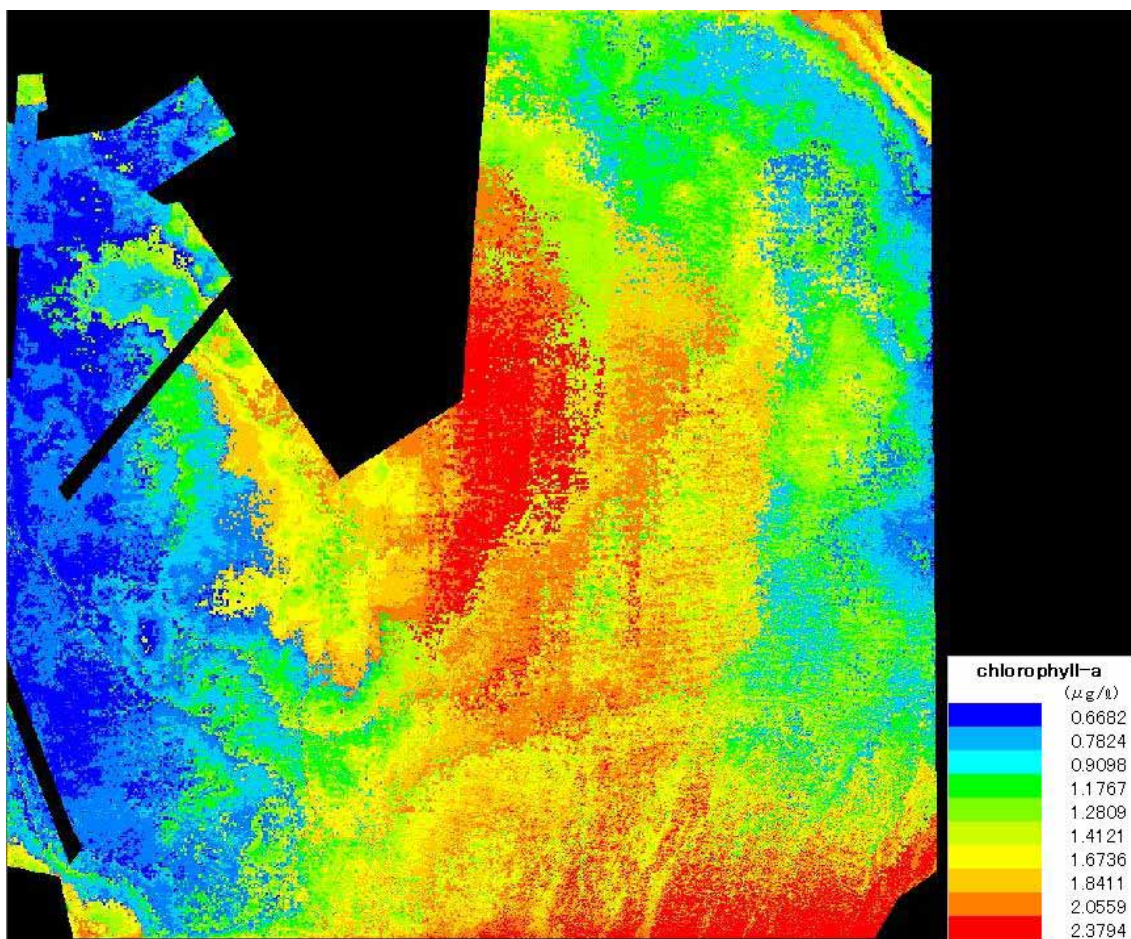


図 33 東京湾のクロロフィル-a 濃度分布画像 その 2

撮影時期	縮尺	緯度・経度	
		北緯	東経
昭和59年	1/10000	35° 36' 45"	139° 50' 21"

中央から右下にかけて高濃度分布となっている。また左側の陸地にやや囲まれた形となっている部分では水が交換しにくく水質が悪いことが一般的だが、この部分が低濃度であることが特徴的である。

図 34、35 は伊勢湾での航空写真と分布画像である。

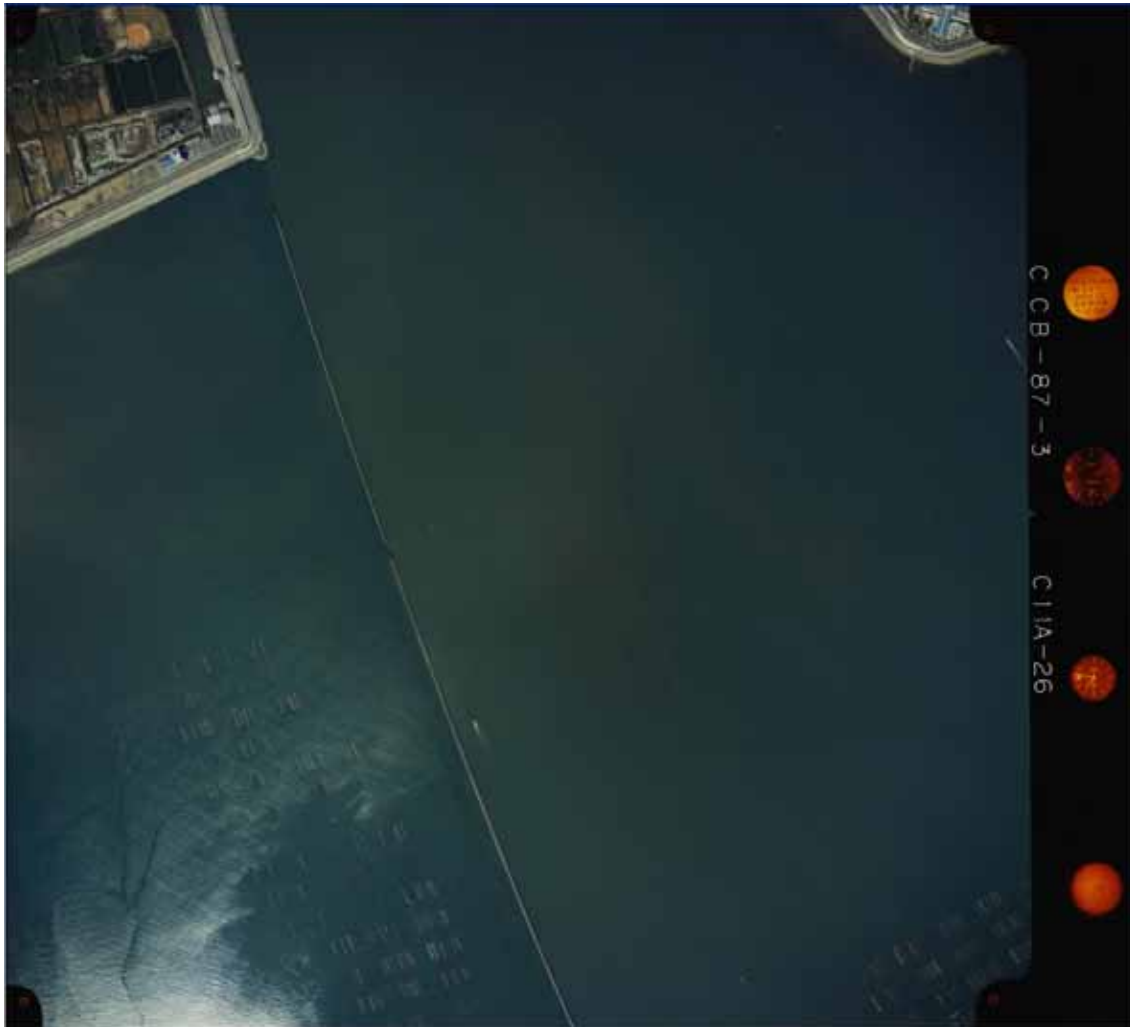


図 34 伊勢湾①の空中写真及び撮影場所

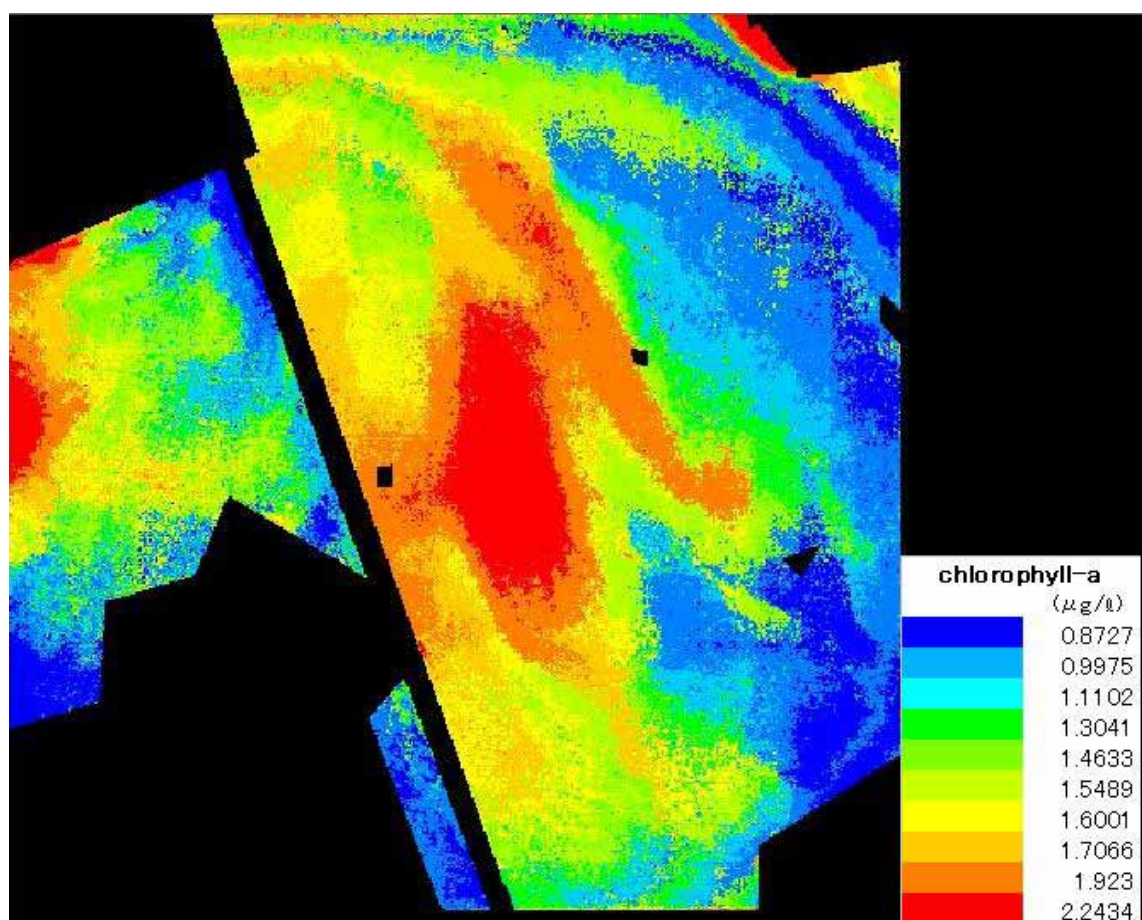


図 35 伊勢湾のクロロフィル-a 濃度分布画像 その 1

撮影時期	縮尺	緯度・経度	
		北緯	東経
昭和62年	1/10000	35° 0' 59"	136° 42' 56"

中央部分が高濃度で外側に広がるにつれて低濃度になっている。全体的に沿岸部分に高濃度域が集中している。なお左下は、陸地ではなく太陽光の反射と人工物があつたので切り取った海水面である。

図 36、37 は伊勢湾での航空写真と分布画像である。

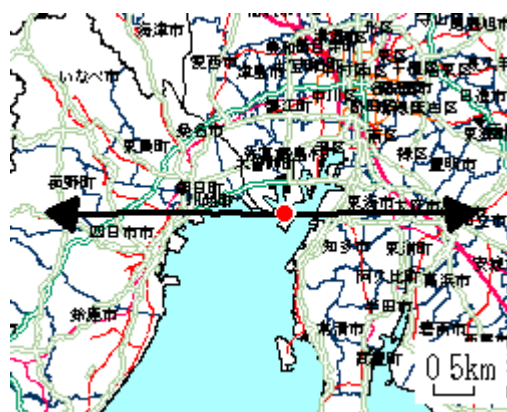


図 36 伊勢湾②の空中写真及び撮影場所

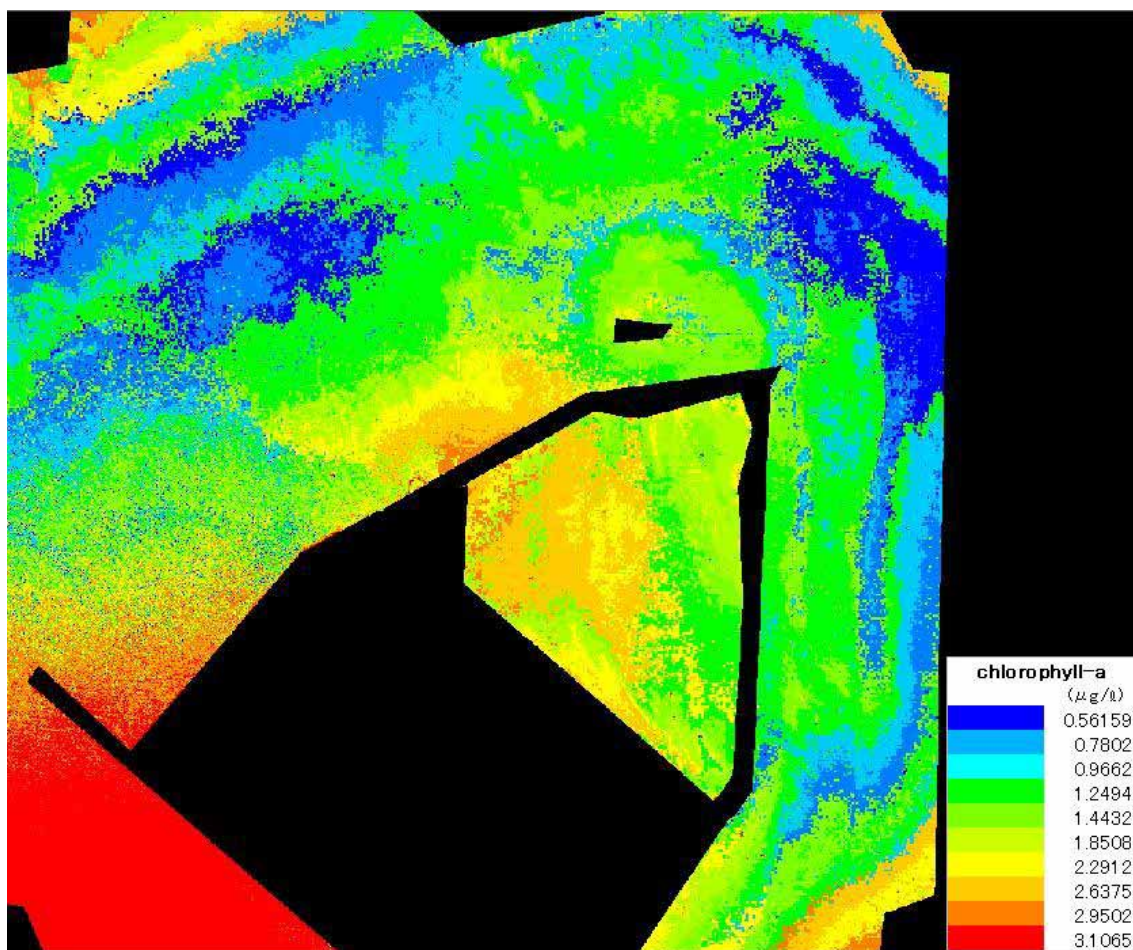


図 37 伊勢湾のクロロフィル-a 濃度分布画像 その 2

撮影時期	縮尺	緯度・経度	
		北緯	東経
昭和62年	1/10000	35° 0' 56"	136° 48' 31"

この画像はあえて左下の太陽光による反射を切り取らずに濃度分布結果を出してみた。やはり光の影響を受けて高濃度域として表されている。他の場所では、やはり陸地に沿った部分がやや濃度が高い。

図 38、39 は宇和島湾での航空写真と分布画像である。

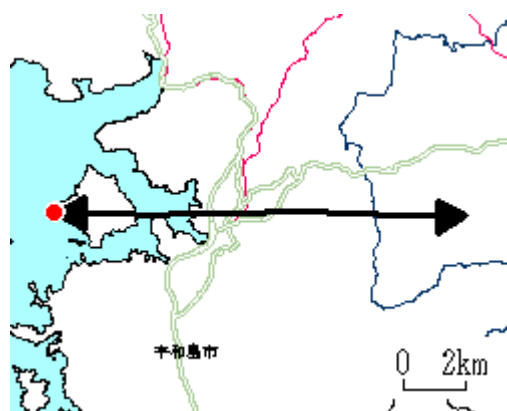
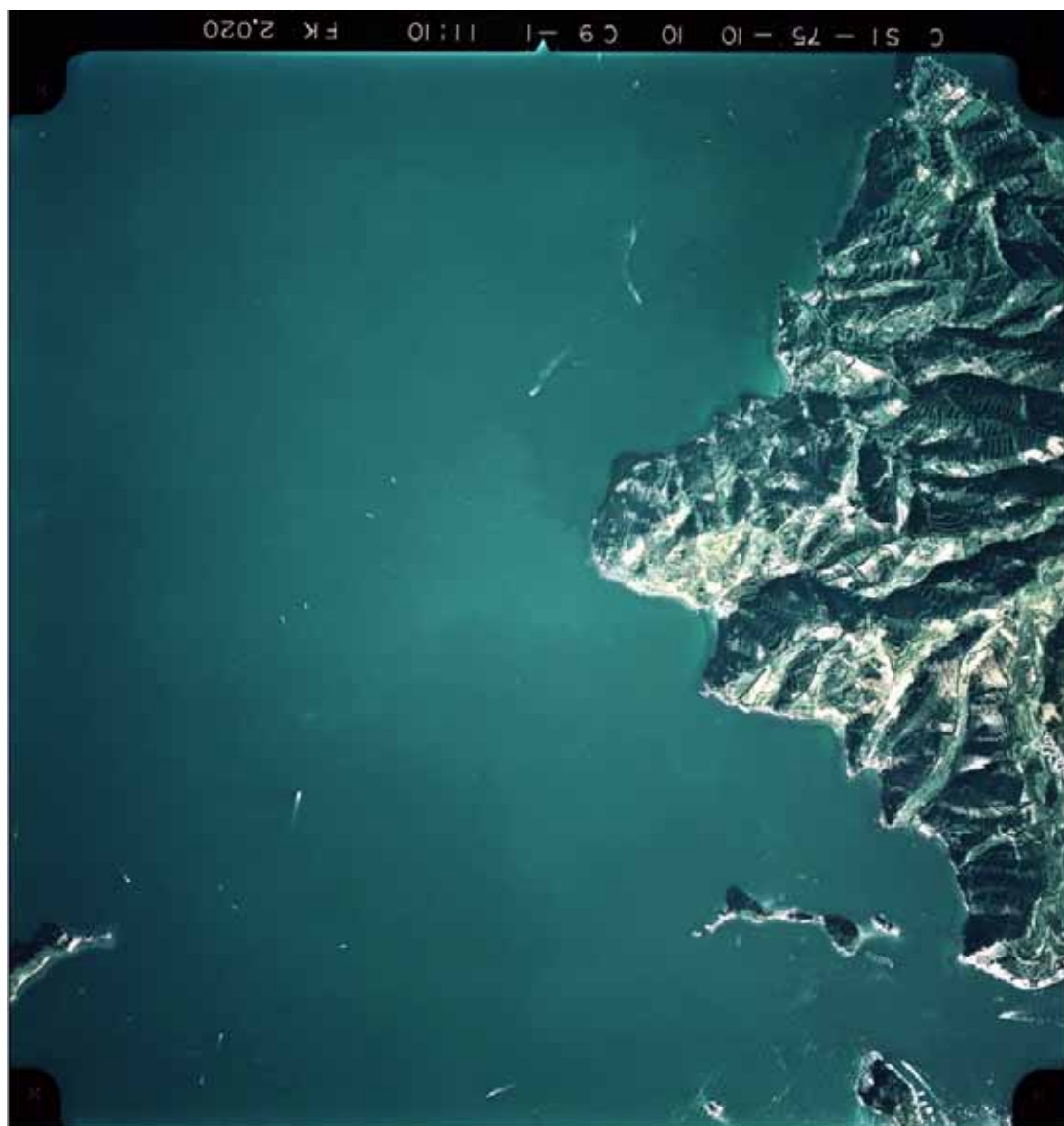


図 38 宇和島湾①の空中写真及び撮影場所

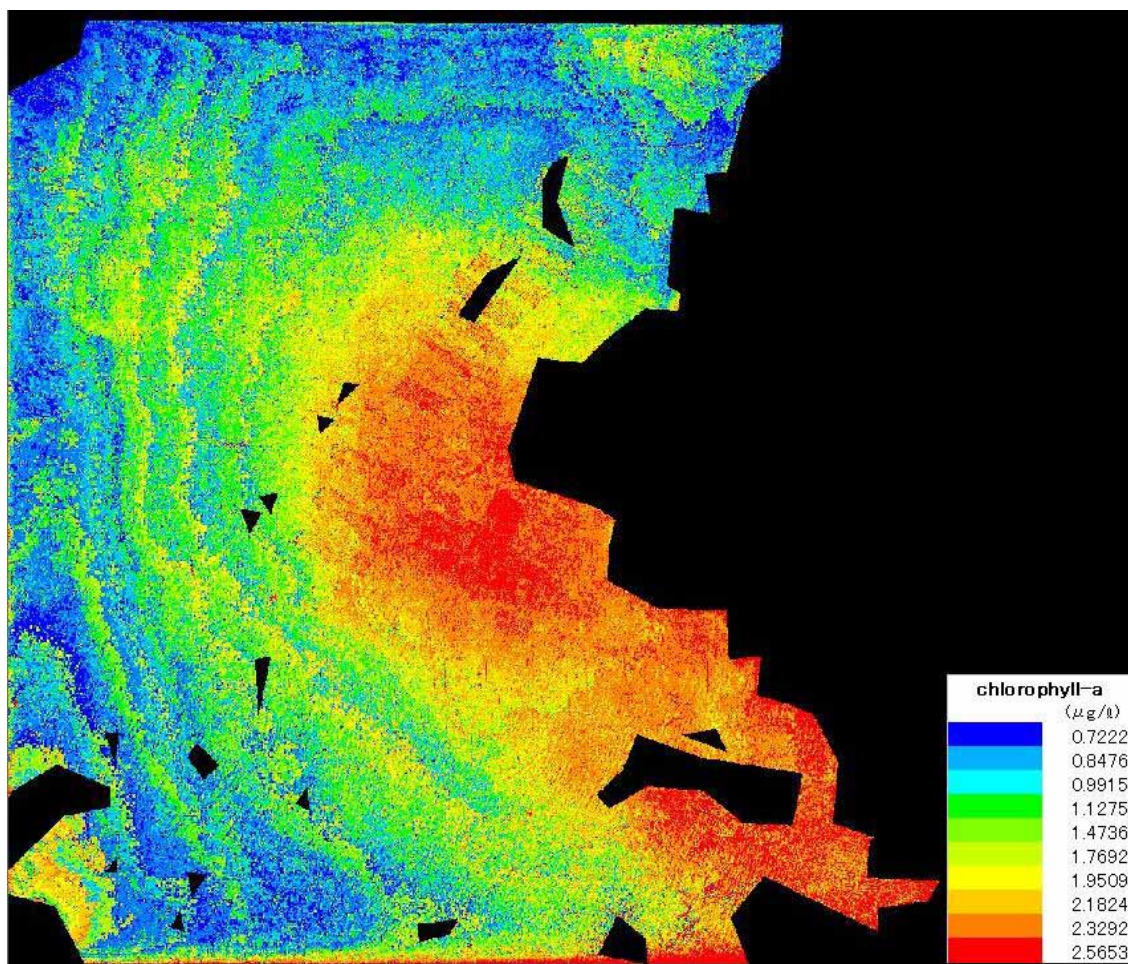


図 39 宇和島湾のクロロフィル-a 濃度分布画像 その1

撮影時期	縮尺	緯度・経度	
		北緯	東経
昭和50年	1/10000	33° 13' 39"	132° 30' 26"

陸地から沖に向かって帯状に濃度が分布している。これまでの分布とは異なり濃度の点が細かく表現されている。

図 40、41 は宇和島湾での航空写真と分布画像である。

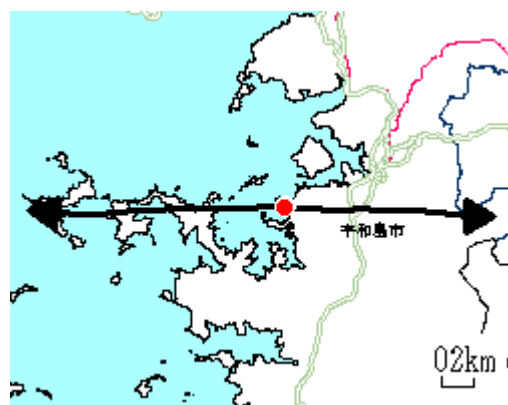


図 40 宇和島湾②の空中写真及び撮影場所

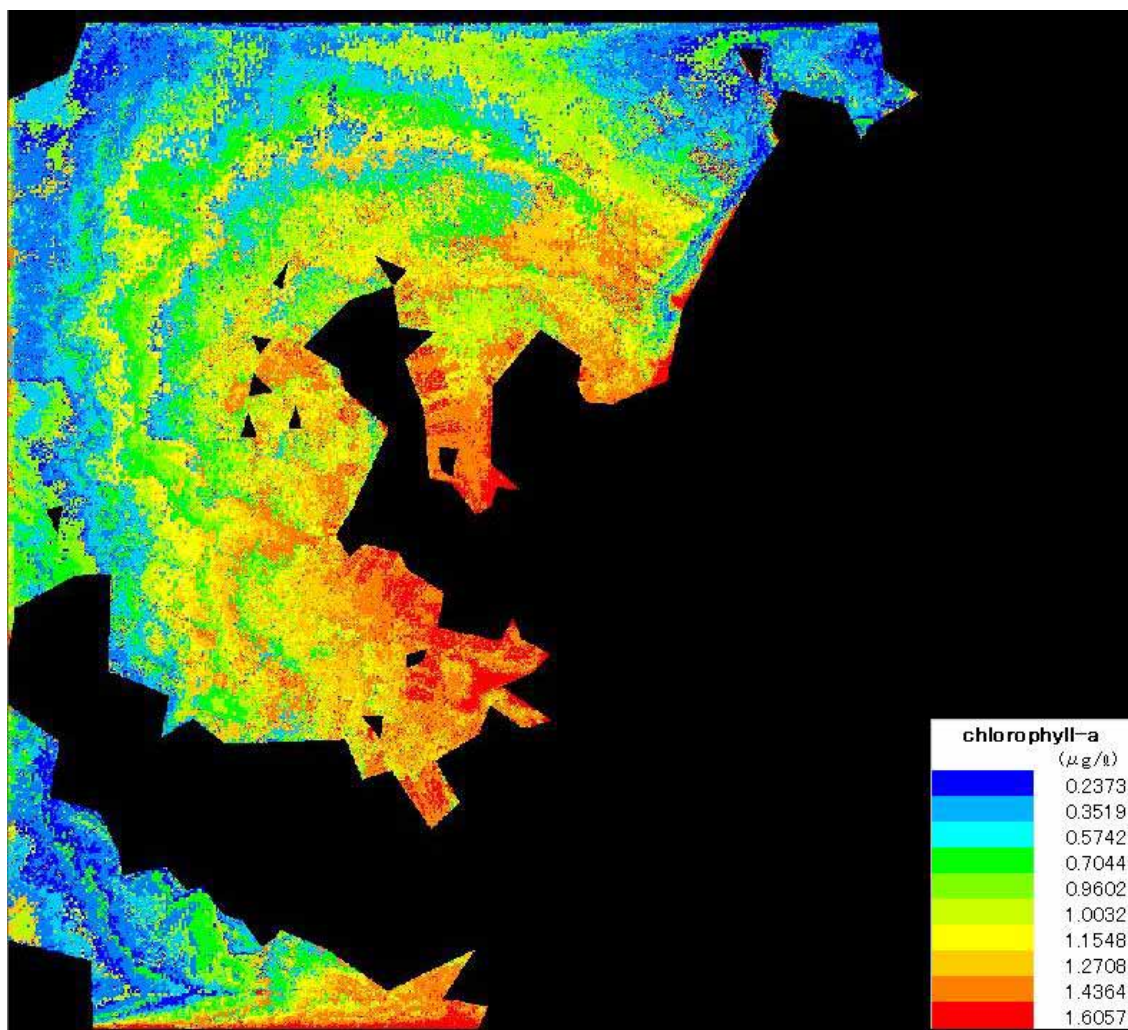


図 41 宇和島湾のクロロフィル-a 濃度分布画像 その 2

撮影時期	縮尺	緯度・経度	
		北緯	東経
昭和50年	1/10000	33° 12' 9"	132° 30' 15"

図 39 と同様に帯状の濃度分布となっている。沿岸域でも閉鎖的な所とそうでない所にやや濃度差が見られる。

9. 結論

室内実験により CCD カメラで測定した反射スペクトル値から理論的に算定したデジタルナンバーと同時に撮影したデジタル画像のデジタルナンバーとの相関を検討した。水面、クロロフィル、更に水槽底面からの反射を含んでおり、両者の相関は 1:1 ではなかった。しかし、傾向は一致しており、両者はほぼ同じ反射スペクトルを測定していると判断できる。CCD カメラは反射スペクトルを正確に測定しており、多くの情報の積分値と思われる。従って、理論デジタルナンバーとクロロフィル-a 濃度の関係は、色々な影響が入っているデジタル写真からクロロフィル濃度の寄与のみを抽出する際には有効な情報である。

現地調査、室内実験よりデジタル画像に写りこんだ藻類の影響を考慮したデジタル値補正式を求めた。これを用いた分布画像により、クロロフィル-a 濃度の空間的な分布状況を沿岸域の浅瀬のような水域であっても大まかにではあるが把握することが可能になった。しかし、場所によっては藻類の影響を 100%の除去に成功したとは言いきれないためデジタル値補正式の精度の向上が必要である。

また今回の調査中は、風が穏やかだったために係留気球を飛ばすことができたが、風があった場合に係留気球が流されて目標の高度まで上がらず、また撮影時にデジタルカメラがぶれてしまいきれいな画像を撮影できないなどということが考えられる。同様に、波の影響も多少なりとも存在するのでその処理方法を考えていく必要もある。

三色係数法を用いて作成したモデル式によって、航空写真からのデジタル画像からクロロフィル-a 濃度の分布画像を作成した。特に琵琶湖南湖は、入手した空中写真自体が非常に高精度だったので、全体的に低濃度であったにもかかわらず、沿岸域と中央部の濃度分布の違い、琵琶湖の北湖と南湖の水質状況の差、水の流れの速度による水質の違いなどが濃度分布にはっきりと表されている。またそれぞれの画像に違った濃度分布の特徴があり興味深い結果となった。しかし太陽光の反射や波などが濃度分布に大きな影響を与えてしまっている画像もいくつかあった。

本研究で作成した分布画像によって、琵琶湖南湖、東京湾、伊勢湾、宇和島湾のクロロフィル-a 濃度を視覚化することが出来た。しかし琵琶湖南湖以外の画像は太陽光の反射による影響があったため、その部分が高濃度域として表されてしまうなどの問題点もいくつかあった。また今回作成した分布画像はいずれも全体的に低濃度だったので、赤潮やアオコが発生するぐらい水質汚濁状況が悪い場所ではどのぐらいの濃度分布結果を示すのかを検証することができなかった。しかし、航空写真撮影の目的が水質解析ではないために、水面の写真が少なく、また定期的に撮影された画像も少ない。

湾内の水質モニタリングには湾が見渡せる山の上、ビルの上などからの定期的なデジタル画像を得ることにより、日、時間変化の水質モニタリングが可能である。

最後に本調査方法では撮影した画像に採水用船舶が含まれていないと水質・位置・方位の情報が全くないデータになってしまう。そのためにそのデジタル画像はまったく意味をもたない画像になってしまう。このため、撮影した画像をすぐに見られるシステムを使用することによって効率的な調査を行うことができると考えられる。

今年度の成果を 2007 年土木学会年次学術講演会((2007 年 9 月))へ投稿を行なった

CCDカメラから推定したDNを用いた水質モニタリングについて

○芝浦工業大学 正員 菅 和利
芝浦工業大学大学院 学員 佐藤允彦
芝浦工業大学大学院 学員 矢内祐一

1. はじめに

閉鎖水域での面的な水質モニタリングとして、デジタルカメラの画像解析手法について検討を行ってきた。閉鎖水域では船舶による定点観測、衛星画像を用いる手法などが実施されているが、情報の収集が簡易で、任意の時刻でのモニタリングを行なうことができる航空写真の活用を実際の湾内で検討を行なっている。係留気球にデジタルカメラを係留し、その撮影されている海面範囲を船舶で移動しながら採水し、デジタル画像の各画素のデジタルナンバーとの関連を分析し、推定モデルを作成した。対象とする水質項目はクロロフィルである。クロロフィルの分析では可視域の吸光度を用いるので、同じ可視域を対象とするデジタル画像のデジタルナンバー(DN)には水面のクロロフィル濃度が反映されている。

しかし、デジタルカメラの各画素に格納されるDNに水面のクロロフィル濃度によって異なる反射スペクトルが反映されているかの検討が行なわれていない。本研究では、実験室内でクロロフィル濃度とCCDカメラの各波長のCCD値を測定し、理論的に算定したDNとデジタル画像のDNとの関係について検討を行なった。

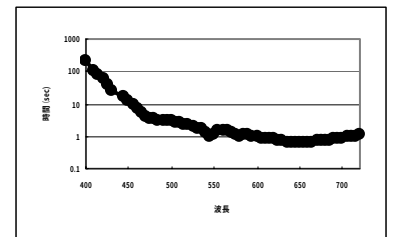
2. 実験方法

外部の光を遮断した暗室内にクロロフィルが含まれた溶液を満たし、上方からデジタルカメラ、CCDカメラで撮影を行なった。水槽は高さ、径共に約80cmの大きさで、光源には太陽光に波長が最も近いとされるD65蛍光ランプを用いた。CCDカメラにバリスペック液晶チューナブルフィルターをセットし、PC操作によって可視域の720nmから400nmまでの波長域を5nm刻みでCCD値を測定した。高感度冷却CCDカメラでは、CCDチップを冷却することにより、微弱な光をも蓄積して高感度な情報を数



図1 液晶チューナブルフィルターとCCDカメラ

値で表すことが出来る。したがって、光を蓄積する時間によってCCDの値が異なる。最初に白色板を水面に浮かべ、各波長で同じCCD値を得るために必要な時間



時間を測定した。この結果が図2であ

図2 各波長での蓄積時間

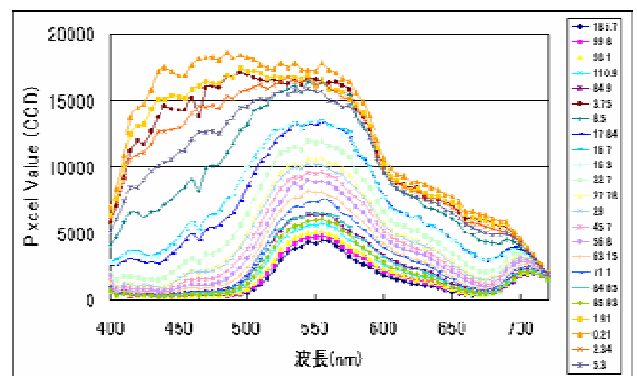


図3 各濃度、各波長でのCCD値

る。この時間を基にし、クロロフィル溶液を満たした水槽での各波長でのCCDを測定した。

各濃度、各波長でのCCD値の測定結果が図3である。図3から各濃度、各波長の反射率 $S_i(\lambda)$ 算定する。各濃度でのデジタルナンバーを次式で算定する。

$$DN_i = \alpha \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} f_i(\lambda) S(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

キーワード：水質モニタリング、クロロフィル、デジタルカメラ、デジタルナンバー、CCDカメラ

芝浦工業大学工学部土木工学科水圏環境研究室 〒135-8548 東京都江東区豊洲3-7-5 tel 03-5859-8362

$f_i(\lambda)$ は図 4 に示す R G B の等色関数である。なお、水質としてクロロフィル-a を対象にするため、ほうれん草をすりつぶして溶液を作成した。

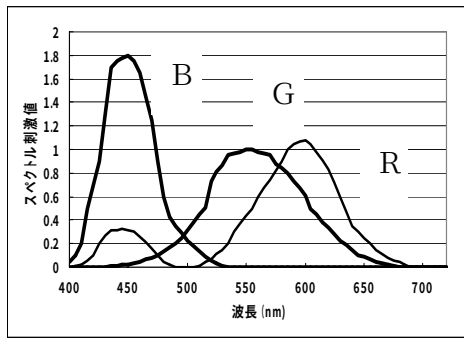


図 4 等色関数

3. 結果および考察

図 3 の CCD 値を反射率に変換し、式 (1) で DN を計算した。DN は 1 から 255 の数値であるので、反射率 1 (白色) で DN が 255 になるように補正係数 $\alpha=2.5$ とした。各濃度での CCD カメラから算定した DN とデジタルカメラでの DN との相関を示したのが図 5 である。B については R、G と多少関数形を異にしているが、これは実験装置の影響と思われる。CCD 値から変換の DN は理論的な DN であるが、図 5 に示すようにデジタルカメラでの DN と 1 : 1 の関係とはなっていない。R、G については傾きは 1 であるが、理論 DN が小さく、反射率の計算について検討が必要である。しかし、一定の関係が有るので、この理論 DN を用いてクロロフィル-a の水質推定式を検討した。

図 6 はデジタルカメラでの DN (R) とクロロフィル-a 濃度の対数との相関を、図 7 は理論 DN とクロロフィル-a 濃度の対数との相関を示した図である。図 6 はデータのばらつきがあるが、図 7 の $\log(\text{Chl-a})$ と理論 DN とは直線関係を示している。G、B についても同様であるので、 $\log(\text{Chl-a})$ と理論 DN との関係式を求めた。

光源等の影響を除去するため、三色係数を変数とした。

$$rf = \frac{R}{R+G+B}, \quad gf = \frac{G}{R+G+B}, \quad bf = \frac{B}{R+G+B} \quad (2)$$

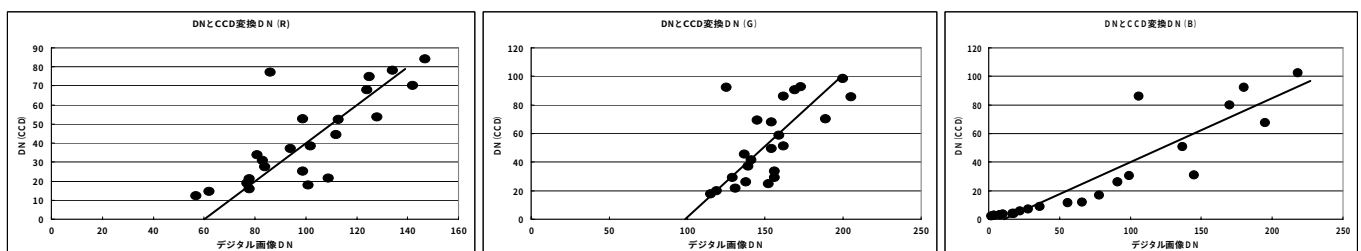


図 5 各濃度での CCD 値から変換の DN とデジタルカメラでの DN (R、G、B)

CCD 値から理論的に算定した DN を用い、以下の推定式を求めた。この推定式と実測値との相関を示したのが図 8 である。推定値と実測値の間には高い相関が見られるが、高濃度での推定式の適応性に課題が有ることを示している。

しかし、通常の閉鎖水域でのク

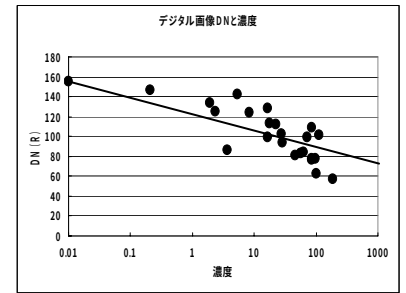


図 6 DN とクロロフィル-a

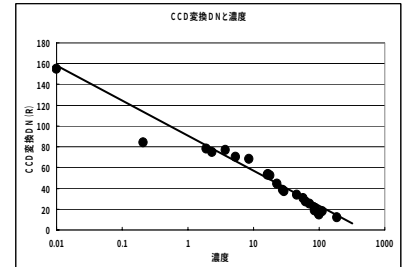


図 7 理論 DN とクロロフィル-a

ロロフィル-a 濃度の範囲での適応性は十分である。

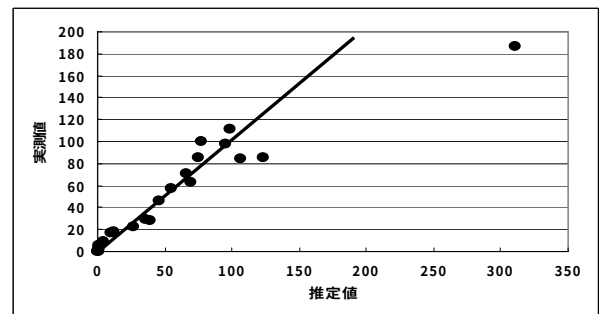


図 8 実測値と推定値の比較

$$\log(\text{Chl}) = 6.27rf + 43.91gf + 23.42bf - 25.72 \quad (3)$$

デジタルカメラで撮影した DN を式 (3) に代入してクロロフィル-a 濃度を推定すると、全くオーダーの異なる推定値となる。

図 5 の理論 DN とデジタルカメラからの DN の違いを補正すると、ある程度の精度での推定が可能である。

しかし、CCD 値から DN に変換する際に、測定した CCD 値を白板の CCD 値で単純に割って反射率としたが、水面、水、溶液中のクロロフィル、実験装置の特性などが含まれており、反射率の算定についての検討が必要である。

藻類の影響を考慮したDNを用いたクロロフィル濃度推定法について

芝浦工業大学 正員 菅 和利
○芝浦工業大学大学院 学員 佐藤允彦
セントラルコンサルタント 佐々木啓太

1. はじめに

面的な水質モニタリングに航空写真を用いる際、デジタル画像各ピクセルのRGBデジタルナンバーと水質との関係が必要である。湖沼では沿岸域の水質が相対的に悪く、改善が必要である。この沿岸域での水質モニタリングに航空写真を活用することの手始めとして、係留気球でのデジタル写真の解析から水質を推定することを検討している。沿岸域では水質が浅く、藻類が繁茂している場所があり、100 m上空からのデジタル写真にはこれらの藻類が、水面でのクロロフィル濃度の高濃度として画像化されることとなる。この藻類が繁茂する場所での水質モニタリングのためには、藻類のクロロフィル濃度に寄与する見かけの影響を分離することが必要である。

本研究では、琵琶湖沿岸域を対象とした現地調査、室内実験から、デジタル画像を処理し、藻類と水溶液中のクロロフィル濃度とを分離することを目的とした。

2. 現地調査及び室内実験

現地調査の対象地域を琵琶湖野洲川河口部とし、デジタルカメラを搭載した係留気球を用いて湖水面の撮影を行うと共に、画像内をボートで移動しながら多地点の水質移動測定を行った。その後、デジタル画像より得られる各ピクセルのデジタル値と植物プランクトン量と比例関係にあり水質汚濁の重要な指標の一つであるクロロフィル-a 濃度との関係について解析を行なった。

調査日は 2006 年 8 月 26 日、27 日で、デジタルカメラを搭載した係留気球(図 1)を用いて上空約 100m から湖水面を撮影し、同範囲内においてゴムボ

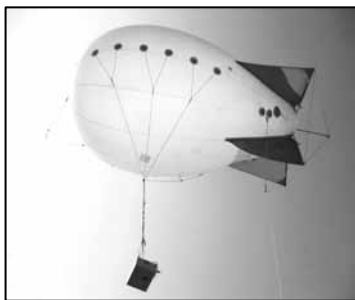


図 1 係留気球

ートを用いて採水し、クロロフィル-a 濃度、溶存酸素等の水質測定を行った。

画像内での採水地点に相当する画素のデジタルナンバー (DN) とクロロフィル-a 濃度との関係を見ると、DNには藻類が見かけ上の高濃度として作用していた。

藻類のクロロフィルと溶液中でのクロロフィルとを分離して評価するために室内実験を行なった。模擬藻類としてほうれん草を使用し、水槽底面に固定して、濃度の異なる水溶液で満たして上方よりデジタルカメラで撮影した。併せて、模擬藻類の無い水溶液だけでの実験を行なった。

3. 藻類の影響の分離と水質推定式

藻類の影響を分離し、デジタル画像のDNからクロロフィル濃度推定式を以下の手順で検討した。

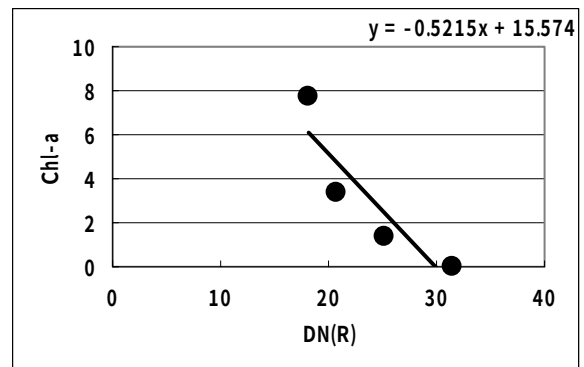


図 2 模擬藻類+クロロフィル溶液

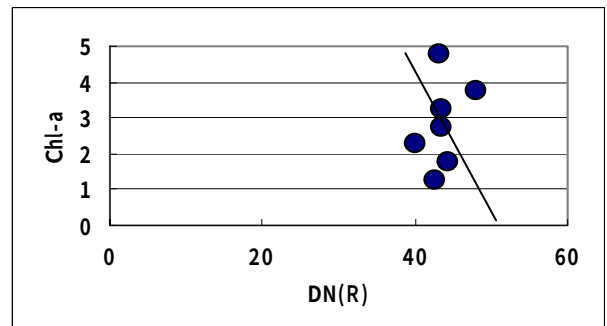


図 3 琵琶湖藻類+クロロフィル

キーワード：藻場、水質モニタリング、クロロフィル、デジタルカメラ、デジタルナンバー

芝浦工業大学工学部土木工学科水圏環境研究室 〒135-8548 東京都江東区豊洲 3-7-5 tel 03-5859-8362

図2は模擬藻類を設置した水槽でのDN(R1)とクロロフィル濃度との関係を示した。

図3は琵琶湖でのDNとクロロフィル-aとの関係を示した図である。

図2中の相関式の傾きはそのまま、現地調査のデータに対応するように移動し、図3中の相関式を求める。この式から各クロロフィル濃度に相当するDN(R2)を読み取る。また、直線とx軸との切片の値DN(R0)（クロロフィル濃度がゼロ）を読み取る。

$$\begin{aligned} R: Y &= -0.5215 \times X + 25.861 & DN(R_0) &= 49.6 \\ G: Y &= -0.3845 \times X + 20.353 & DN(G_0) &= 52.9 \\ B: Y &= -0.3873 \times X + 15.512 & DN(B_0) &= 40.0 \end{aligned} \quad (1)$$

図4はクロロフィル溶液のみの実験室でのデータを示した図である。

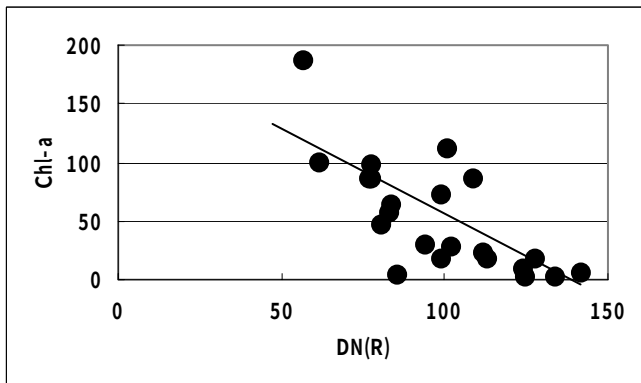


図4 クロロフィル溶液でのDN
図中の回帰式にクロロフィル濃度を代入してDN(R3)を読み取る。

図3、4中の回帰式を用いて各クロロフィル濃度でのDN(R)をそれぞれ読み取り、式(2)より α 、 β 、 γ をそれぞれ求める。

$$\begin{aligned} \alpha(R) &= \{DN(R_3) - DN(R_2)\} / DN(R_0) \\ \beta(G) &= \{DN(G_3) - DN(G_2)\} / DN(G_0) \\ \gamma(B) &= \{DN(B_3) - DN(B_2)\} / DN(B_0) \end{aligned} \quad (2)$$

各濃度での α 、 β 、 γ の値はほぼ一定値でそれぞれ1.75、2.65、2.89の値であった。

したがって、藻類のクロロフィル濃度への見かけの影響を除去したRGBデジタルナンバーDN(R')、DN(G')、DN(B')を以下の式(3)で算定することとする。式中DN(R)などは実際の画像でのDNを表す。

$$DN(R') = \alpha(R) \times DN(R) + DN(R_0)$$

$$\begin{aligned} DN(G') &= \beta(G) \times DN(G) + DN(G_0) \\ &= 2.65DN(G) + 52.93 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} DN(B') &= \gamma(B) \times DN(B) + DN(B_0) \\ &= 2.89DN(B) + 40.05 \end{aligned} \quad (3)$$

3. 水質推定式と分布画像

琵琶湖での係留気球からの画像画素のDNから式(3)によって補正したDNと水質データからクロロフィル-a推定式を検討した。

$\log(\text{Chl-a})$ と理論DNとは直線関係を示している。G、Bについても同様であるので、 $\log(\text{Chl-a})$ と理論DNとの関係式を求めた。

光源等の影響を除去するため、DNを三色係数での変数とし、 $\log(\text{Chl-a})$ との回帰式を求めた。

$$rf = \frac{R}{R+G+B}, \quad gf = \frac{G}{R+G+B}, \quad bf = \frac{B}{R+G+B} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \log(\text{Chl}) &= -1.8134 \times rf + 16.539 \times gf \\ &\quad - 34.289 \times bf + 4.9579 \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)を用いてデジタル画像からクロロフィル濃度の分布画像を作成した。図中の色が薄く白に近いほど濃度が低く、色が濃く黒に近いほど濃度が高くなることを示している。

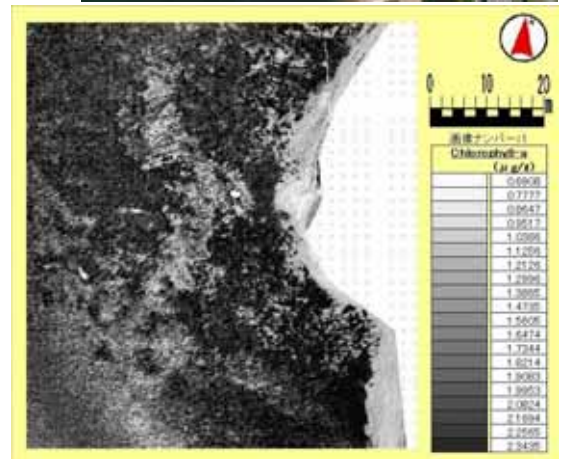


図5 デジタル写真と水質分布画像

琵琶湖の水質については、調査地点ではクロロフィル-a濃度は1~10($\mu\text{g/l}$)と低いが、藻場のデジタルデジタル画像から、藻類の影響を除去した水質分布画像を得ることが出来た。このような画像の時間変化を利用すると、濃度分布を指標として、流動の特性も把握することができる。