

平成 1 6 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 1 7 年 1 月 1 1 日付第 0 4 - 3 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

衛星画像、GPS、係留気球を用いた湾奥部
水質モニタリングシステム構築に関する研究

平成 1 8 年 3 月

芝浦工業大学工学部教授

菅 和利

目 次

1 . はじめに -----	1
2 . 現地調査 -----	3
2.1 現地調査の概要 -----	3
2.2 水質分析結果 -----	11
2.3 デジタル画像の分解能 -----	13
3 . 現地データを用いた水質推定モデル -----	13
3.1 光量補正 -----	13
3.2 デジタル値 (D N) と水質の三色係数法によるモデル式 -----	15
3.2.1 水質水定式 -----	16
3.2.2 水質分布画像の作成 -----	16
3.2.3 独立変数による水質分布画像 -----	25
3.3 N O A A 画像から見た宇和島湾 -----	29
4 . デジタル画像の R G B 値とスペクトルについて -----	36
5 . 吸光度と分光反射率との関係 -----	38
5.1 吸光度と分光反射率との関係を検討する室内実験 -----	38
5.1.1 使用機器の概要 -----	41
5.1.2 実験手順 -----	42
5.1.3 クロロフィル-a 付加溶液の作成 -----	43
5.1.4 クロロフィル-a 測定方法 (三波長吸光光度法) -----	45
5.1.5 吸光度の測定方法 -----	48
5.1.6 濁度測定方法 -----	50
5.1.7 画像解析方法 -----	51
6 . 吸光度と分光反射率との関係 -----	52
6.1 クロロフィル-a 濃度と R G B 値の関係 -----	55
6.1.1 光源からの距離と D N 値 -----	56
6.2 クロロフィル-a 濃度と濁度付加時の D N の値 -----	64
6.2.1 光源からの距離と D N 値 -----	66
7 . まとめ -----	76
付録 -----	78

1. はじめに

湾内での水質モニタリングに衛星画像を利用する試みは東京湾、大阪湾などで行なわれている。しかし、これらの衛星画像は中分解能の画像を用いているために、湾全体の水質の挙動は把握できるが、湾奥のような小領域での複雑な水質の変化には対応できない。湾奥では養殖などで活用されており、湾奥に向かう風による吹き寄せ、沖に向かう陸風での分散によって水質の短時間での変化の情報が重要である。

陸域と水域の接点である湾奥河口部は多目的、高度に利用されており、河口部から湾内へかけての水質管理は、施設管理と共に重要な課題であると考えている。河川水の海域での挙動を広域で解析するのに衛星画像が用いられているが、湾内、湾奥部に適用する場合には撮影頻度、分解能において十分でない。関連する研究として当財団での助成で行っている研究（衛星画像とGPSを用いた湾内水質モニタリングシステム構築に関する研究）により、毎日1回と撮影頻度の高いNOAA画像の高分解能化（NOAA画像の1kmの解像度を30mの解像度に変換）を行った。この研究により数kmの範囲での水質モニタリングに衛星画像が活用できるようになった。小領域での水質モニタリングでは、この領域内での多点水質観測データが必要である。小領域での水質調査にGPSシステム、係留気球での写真を利用する。係留気球で高度150mから撮影したデジタル写真の輝度値と、海上で観測した水質とから小領域での水質モニタリングシステムを構築する。この結果と高分解能化NOAA画像での水質分析結果とを比較することにより、高分解能化NOAA画像で反射率と水質項目との回帰式を作成する。この成果をいくつかの湾奥での水質解析、水質調査に適用して、小領域での水質モニタリングへの適応性を確認する。

小領域で衛星画像を用いる際には、分解能が30cm程度の衛星画像を活用することができるが、画像が高価で継続的な水質モニタリングへの活用は困難である。他方、係留気球はヘリウムガスの価格のみで安価で且つ機動性に富んでいる。気球にはGPS、デジタルカメラ、ビデオカメラ、パソコンが搭載できる。湾奥、河口部分など小領域での水質モニタリングシステム構築に衛星画像、高分解能化NOAA画像、係留気球からの写真を総合的に活用する。

衛星画像、係留気球の活用による湾奥部水質モニタリングシステムの構築は、港湾、海岸の環境面からの維持管理に資するものである。

今回の調査研究では水質項目のうち可視域の波長に反応するクロロフィル-a濃度に着目し、現地調査では窒素、リン、溶存酸素についても測定を行なった。

水質項目としてのクロロフィル-aは、植物プランクトンを形成する主要な物質である。植物プランクトンには原核から真核までの幅広い生物群が含まれており、基本的に単細胞ですが群体としても生活し、大きさは $0.5\mu\text{m}$ ～5mmと4桁にわたる。ほとんどの植物プランクトンは光合成によって無機物（二酸化炭素）と光から有機物を合成して生活する独立栄養生物で、海で生活する多くの生きものに物質とエネルギーを供給する一次生産者としての役割を担っている。地球上のすべての植物プランクトンを合わせても、乾燥重量に換算して、全植物現存量の1%程度しかありませんが、その植物プランクトンが1年間に生産する有機物量は、地球上のすべての植物が生産する量の50%（炭素量に換算して50,000,000,000t/年）に相当するといわれている。その生産物のほんの一部が水産資源をはじめとした膨大な量の生物をはぐくみ、多くの人々の生活も支えることになり、クロロフィルの役割は大きい。地球誕生時の酸素がほとんどなかった状態を、20.87%もの酸素を含む現在の大気に変えたのも植物プランクトンの仲間の光

合成であったと考えられています。

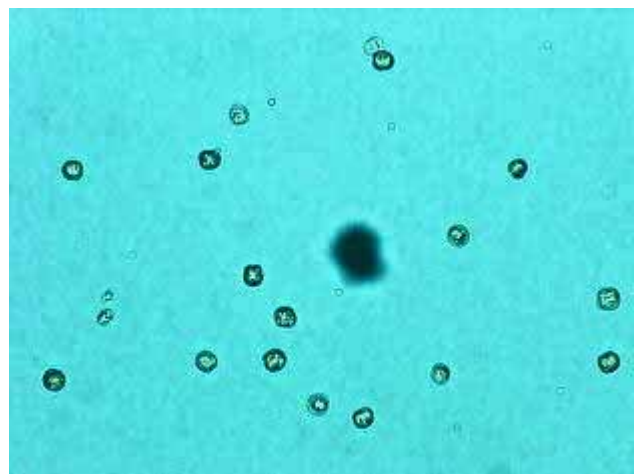
光合成

一般的に植物プランクトン(藻類・バクテリア)は光合成によって得たエネルギーを利用して、二酸化炭素と水から必要とする有機物を合成している。



光合成は 1.光エネルギーを化学的エネルギーに変換 2.化学的エネルギーでATP/NADPHを生成 3.ATP/NADPHにより二酸化炭素を固定 この3つの段階を経て進む。この光合成を行う上で主役となるのが生理活性物質クロロフィル-aで、自らが光を吸収しエネルギーに変換するだけでなく補色素が吸収した光エネルギーも最終的にはこのクロロフィル-aに受け渡され、体内の電子伝達系で利用される。補色素はアンテナ色素とも呼ばれ、植物が幅広い波長の光を有効に利用するために役立っている。

観測対象の宇和島湾では夏季に赤潮の発生が繰り返され、漁業資源に多大の被害を及ぼしている。海域の水温変化をNOAA画像からぶんせきし、赤潮発生の可能性のある期間に現地調査を行なった。沿岸域や湖沼でしばしば発生して問題となる、赤潮やアオコの原因も植物プランクトンである。赤潮はブルームとも呼ばれ、1mlの中に1,000,000細胞もの植物プランクトンが存在することがある一方で少ない海域では1000細胞程度しか存在せず、ある程度、細胞数によってその量を表すことができるが、植物プランクトンのサイズは4桁にも及んでいるため、細胞数が量を正確に表しているとはいえないので、クロロフィル-a濃度でその量を表すことが一般的である。湖沼や沿岸域のクロロフィル濃度は高く、外洋域では特別な場合を除きごく低い値を示す。たとえばブルーム時など非常に高い沿岸域での最大クロロフィル-a濃度は数十~200mg/m³を示すことがあるが、風や流れによって吹き寄せられた場合には700mg/m³またはそれ以上の濃度に達する場合もある。また外洋域や珊瑚礁などでは0.1mg/m³以下の値を示します。水温の上昇と栄養塩類濃度の増加などにより、プロロセントラムなどの植物プランクトンが大量に増殖し、湾内での養殖に多大の影響を与える。発生して顕微鏡による観察で植物プランクトンを同定、カウントすることも大切ですが、クロロフィル-a量を指標とすることで、水域での生産量がより効率的に判断できます。赤潮とは、プロロセントラムなどの植物プランクトンが大量に発生して、水の色が濃い赤やピンク、茶褐色になってしまう状態のことを言います。およその目安として、クロロフィルaが50マイクログラム/リットル以上になると、水に色が着いて見えるようになる。



2．現地調査

対象地域の宇和島湾では、リアス式海岸の波の静かな内湾を利用して古くから真珠、真鯛やハマチなどの魚類の養殖が行われてきた。また、太平洋との海水交換が多いために赤潮などの問題が発生する心配がなかった。しかし、養殖が盛んになるにしたがって餌量の過剰投与による水質悪化が問題になり、養殖魚の大量死が起こり地元の産業に被害を与えている。

2.1 現地調査の概要

調査日は2005年8月3日～6日の期間で、海水温が上昇し、赤潮が発生した直後での観測となった。調査対象場所は宇和島湾での北緯 $33^{\circ}10'48'' \sim 33^{\circ}14'4.99''$ 、東経 $132^{\circ}27'58.86'' \sim 132^{\circ}32'20.94''$ の範囲である。

調査は母船からデジタルカメラを掲載した係留気球を用いて上空約120～150mから海面を撮影し、その撮影範囲を他の観測船で採水を行った。分解能は9～10cmである。なお、採水ポイントの位置を採水船に搭載したGPSにより測定し、この採水船を写真に写し込むことにより、画像の方向、緯度・経度の位置を決定した。

なお、水質測定項目は、クロロフィル-a、溶存酸素、全窒素、全リンの4項目である。



図-1 宇和島湾の航空写真



図-2 観測航路と観測地点（緑、青の線が航路で、赤丸が観測地点）

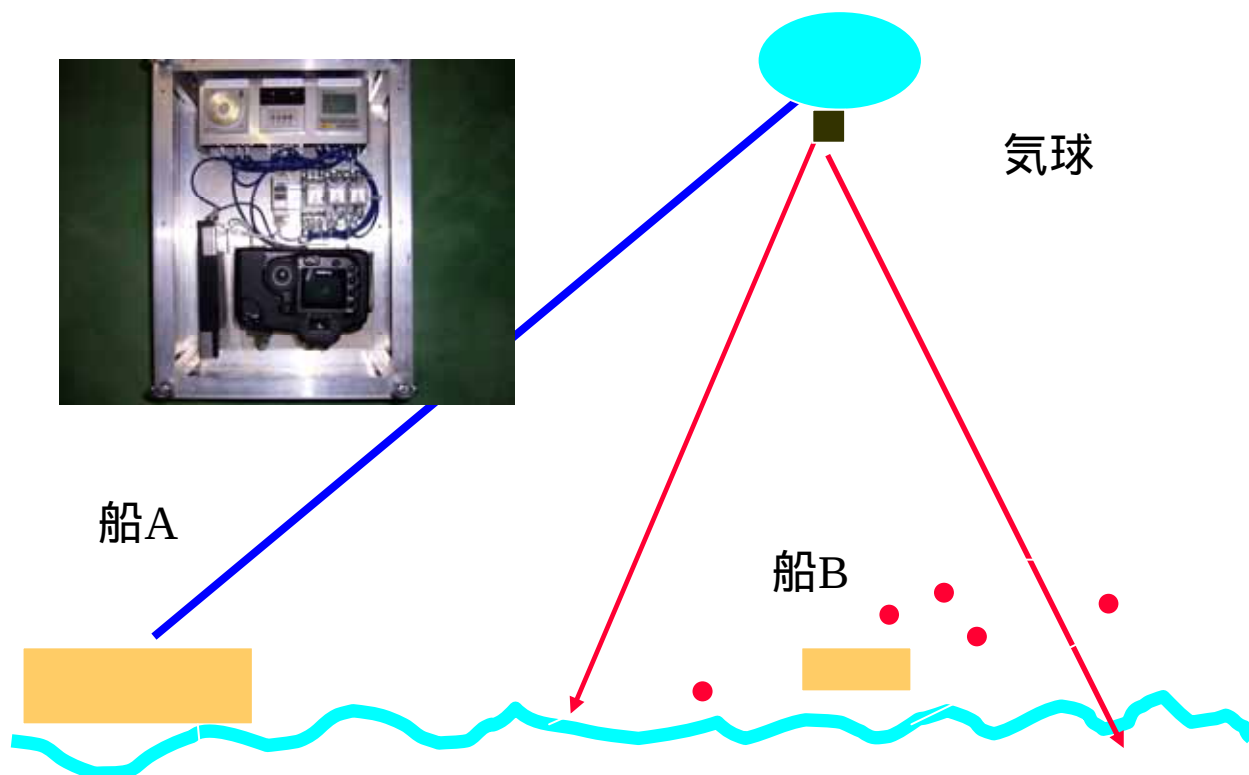


図-3 宇和島湾の現地調査の模式図(船 A で係留気球を係留し、カメラで観測している範囲を船 B で移動しながら採水する)

船 A ・ ・ 気球にデジタルカメラを係留し写真を撮影

船 A を定点に固定し、係留気球で 150m 上空からデジタルカメラで写真を撮る
タイマーで一定間隔連続撮影

船 B ・ ・ 海面の水質測定

船 A で写真を撮影している範囲内を船 B で移動しながら多地点での採水を行なう。採水地点が分かるように G P S を搭載する予定であったが、係留重量の関係から搭載が不可能であった。最水地点の緯度、経度を知るために観測船に G P S を搭載し、気球からの画像にこの観測船を映しこむことによって同定した。

観測の様子を以下に示す。













2.2 水質分析結果

水質観測は8月3日と8月5日に行い、4日、6日にそれぞれ前日に採水したサンプルの分析を行なった。調査地点は宇和島水産高校の援助を受けて行なったが、水質分析は時間的な自由が取れる今治市の宿泊場所で行なった。移動が大変であったが、分析場所の確保のためにやむを得なかった。表1、2はそれぞれ8月3、4日の水質観測地点の緯度経度とその場所でのChlorophyll-a、溶存酸素量、全窒素、全リンの測定結果である。Chlorophyll-aは濾過した後、に冷凍し、大学に移送して分析を行なった。Chlorophyll-aは三波長吸光光度法で、全窒素はペルオキシ二硫酸カリウム分解—紫外線吸光光度法で、全リンはペルオキシ二硫酸カリウム分解—吸光光度法でそれぞれ分析した。

表-1 観測地点の緯度・経度と水質（2005年8月3日観測）

2005/8/3	緯度	経度	Chlorophyll-a ($\mu\text{g/l}$)	溶存酸素 (mg/l)	全窒素 (mg/l)	全リン (mg/l)
A-1	33° 14'4.86"N	132° 32'17.82"E	17.197	9.09	0.955	0.020
A-2	33° 14'6.3"N	132° 32'14.7"E	6.665	8.80	0.970	0.060
A-3	33° 14'2.7"N	132° 32'15"E	151.366	6.97	3.215	0.195
A-4	33° 13'59.46"N	132° 32'16.14"E	5.156	8.73	2.440	0.035
A-5	33° 14'0.3"N	132° 32'18.96"E	17.056	8.90	0.950	0.030
A-6	33° 14'2.7"N	132° 32'20.94"E	6.648	9.33	1.925	0.020
A-7	33° 14'4.98"N	132° 32'20.22"E	6.264	8.91	1.595	0.010
A-8	33° 14'6.42"N	132° 32'17.7"E	5.812	8.02	0.960	0.045
A-9	33° 14'4.44"N	132° 32'15.6"E	5.937	8.79	0.975	0.030
A-10	33° 14'3.36"N	132° 32'18.78"E	9.481	8.78	0.930	0.055
B-1	33° 14'4.97"N	132° 30'7.44"E	0.840	8.75	0.770	0.000
B-2	33° 14'4.98"N	132° 30'10.02"E	1.257	8.77	1.235	0.000
B-3	33° 14'4.99"N	132° 30'3.78"E	1.238	8.42	2.620	0.000

表-2 観測地点の緯度・経度と水質（2005年8月5日観測）

2005/8/5	緯度	経度	Chlorophyll-a ($\mu\text{g/l}$)	溶存酸素 (mg/l)	全窒素 (mg/l)	全リン (mg/l)
C-1	33 ° 10'53.43"N	132 ° 30'7.86"E	0.785	7.18	0.650	0.055
C-2	33 ° 10'56.04"N	132 ° 30'9.00"E	0.970	7.97	0.670	0.020
C-3	33 ° 10'53.7"N	132 ° 30'4.08"E	0.746	7.46	1.650	0.015
C-4	33 ° 10'51.3"N	132 ° 30'6.66"E	0.710	7.05	1.555	0.030
C-5	33 ° 10'52.62"N	132 ° 30'10.68"E	0.645	7.01	1.685	0.025
D-1	33 ° 10'51.36"N	132 ° 28'2.52"E	0.687	7.62	0.620	0.030
D-2	33 ° 10'52.74"N	132 ° 28'6.42"E	0.594	7.53	0.610	0.030
D-3	33 ° 10'54.66"N	132 ° 28'1.62"E	0.735	7.53	0.850	0.020
D-4	33 ° 10'50.16"N	132 ° 27'58.86"E	0.900	7.68	1.015	0.030
D-5	33 ° 10'48.00"N	132 ° 28'4.14"E	0.633	7.29	0.365	0.060
M-1	33 ° 11'7.14"N	132 ° 28'24.96"E	1.208	8.75	0.720	0.010
M-2	33 ° 12'31.92"N	132 ° 29'49.26"E	1.776	8.77	0.820	0.020
M-3	33 ° 13'16.74"N	132 ° 32'0.96"E	1.252	8.42	0.790	0.020

2.3 デジタル画像の分解能

デジタル画像の一ピクセルが実際の海面の何メートルに相当するかの分解能は、画像内に写しこまれている係留気球用船舶（全長 9.7m）、採水用船舶（長さ 8.3m）の大きさと相当するピクセル数から算定した。画像内に映された 2 艘の船舶の船首と船尾の座標からそれぞれの船舶の全長のピクセル数を出し、船舶の実際の長さをピクセル数で割って分解能を算出した。結果を表 3 に示す。

表-3 デジタル画像の分解能

観測地点	係留気球用船舶を指標にした分解能 m/pixel	採水用船舶を指標にした分解能 m/pixel	平均の分解能 m/pixel
A-1	0.0951	0.0946	0.0949
A-2	0.0955	0.0956	0.0956
A-3	0.0947	0.0915	0.0931
A-6	0.0922	0.1027	0.0975
A-7	0.0928	0.0912	0.0920
A-8	0.0937	0.1012	0.0975
A-10	0.0943	0.943	0.0943

3．現地データを用いた水質推定モデル

3.1 光量補正

現地での水質調査の値とその地点でのデジタル画像の R G B デジタルナンバー（DN）との相関から水質推定モデルを構築した。撮影した画像は、同じ日でも雲の影響、日射量の差の影響を受けるために、同じ水質でも DN の値が異なる。この補正を行なわないと正確な推定モデルができないが、情報量が少ないので以下の方法で補正を行なった。

係留気球からのデジタル画像には水質を測定している船舶、係留気球を挙げている船舶、移動に使用する船舶の三艘が映し出されている。この船舶の R G B 値に注目して補正を行なった。

画像内の三艘の船舶のデータを切り取り、各船舶のピクセル数と各ピクセルの R G B のデジタル値を読み取る。

各船舶の R G B デジタル値の平均を採る。

式（1）を用いて三艘の R G B デジタル値の平均値を算定し、各画像から補正する。この補正をすることにより、処理する画像内に映し出された三艘の観測船の R G B デジタル値は各画像で同一となる。

$$DN_R = \frac{\text{船舶1の R の平均 DN} * p_1 + \text{船舶2の R の平均 DN} * p_2 + \text{船舶3の R の平均 DN} * p_3}{p_1 + p_2 + p_3} \quad (1)$$

p1、p2、p3 は各船のピクセル数である。DN_G、DN_Bについての式（1）と同様に計算した。使用する画像での三艘平均の R G B デジタル値を示したのが図-4 である。

各画像の R G B それぞれの平均からの偏差を画像補正量とした。

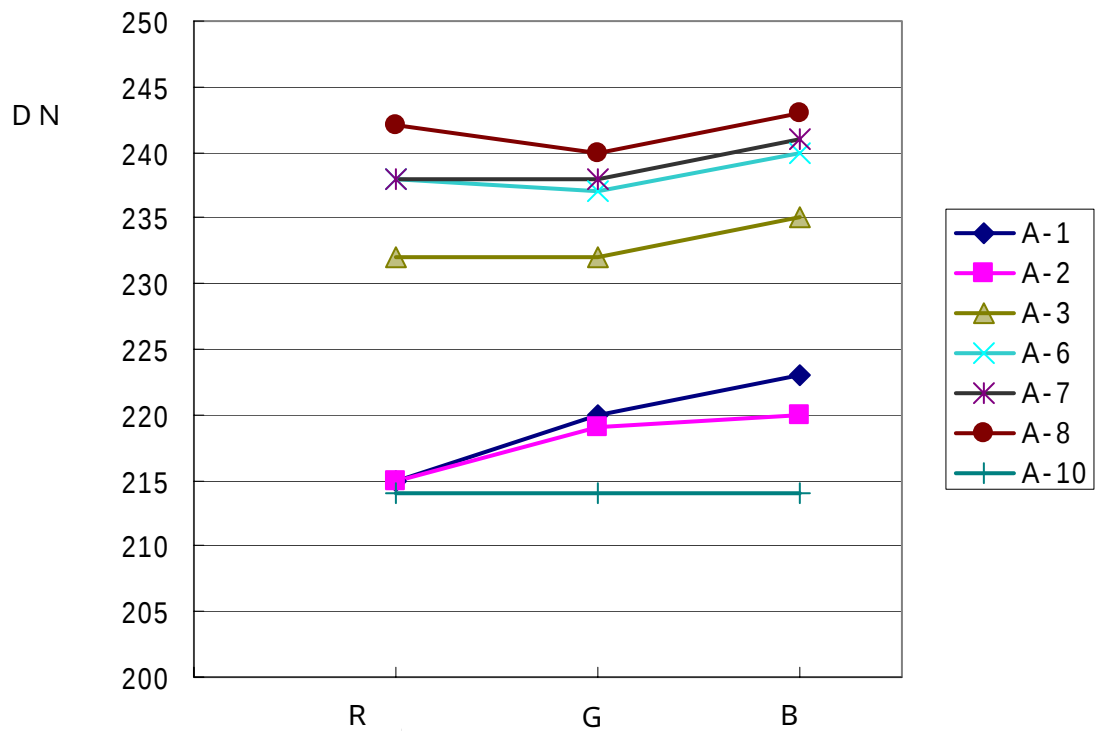
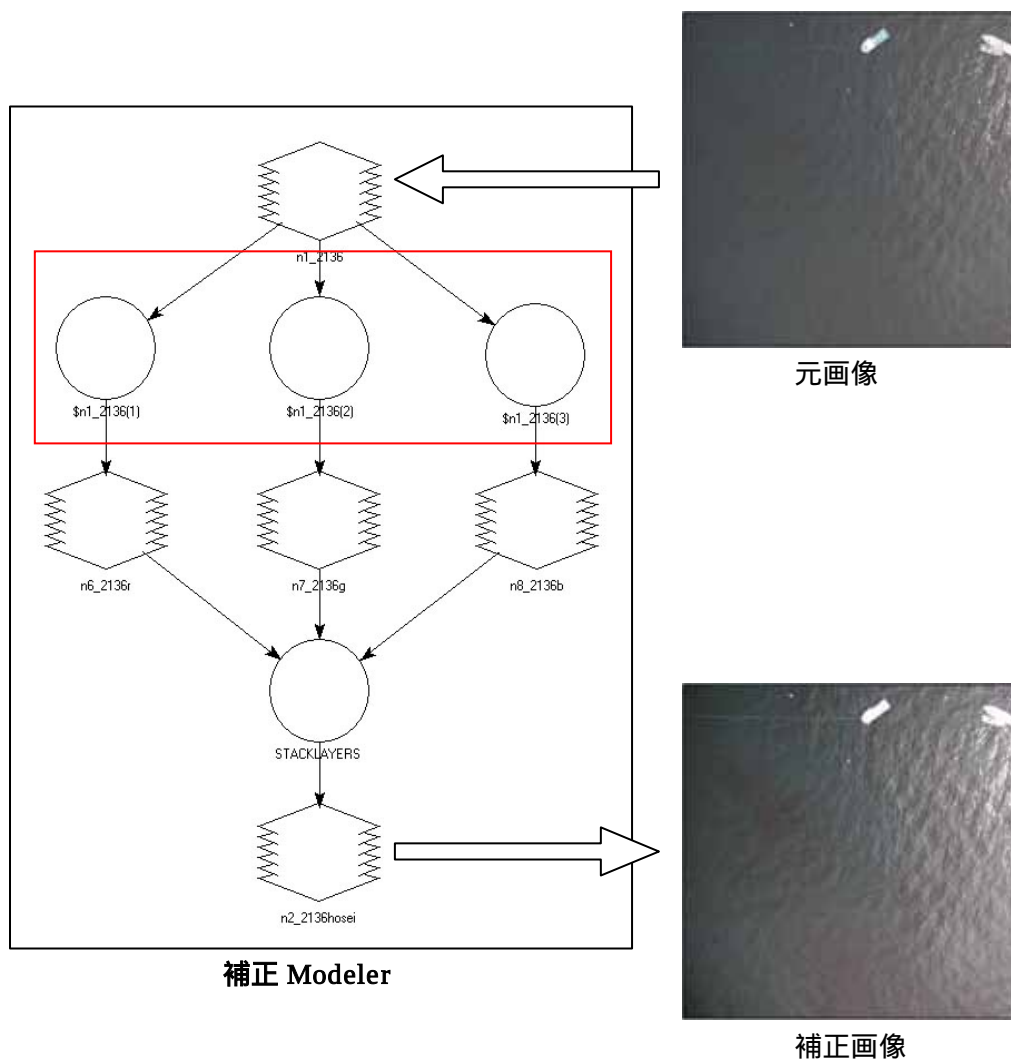


図-4 三艘の観測船のR G Bの平均値

表-4 画像補正值

	R	G	B
A-1	13.7	10.07	10.18
A-2	12.83	9.93	10.48
A-3	-5.95	-4.81	-5.65
A-6	-10.09	-8.85	-10.33
A-7	-10.69	-9.38	-9.86
A-8	-14.85	-12.59	-12.74
A-10	15.06	15.62	17.92



画像補正の手順

3.2 デジタル値（DN）と水質との三色係数法によるモデル式

現地では4項目の水質を測定したが、デジタル画像の可視域でのスペクトル測定データのクロロフィル-aに着目し、デジタル値を用いた水質分布画像を作成した。画像補正した各ピクセルのDNと現地観測での水質との相関を検討した。三色係数法はリモートセンシング分野では適用され、その有効性が認められているが、人工衛星画像を用いた場合には高い相関性は得られていない。三色係数法は水中から上方に放射される輝度の光量測定のために用いられたものであり、デジタルカメラは物体から放射されるRGBの輝度値を測定していることより、水質推定モデルへの適用が期待できる、

三色係数rf、gf、bfは式(2)で定義される。

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

3.2.1 水質推定式

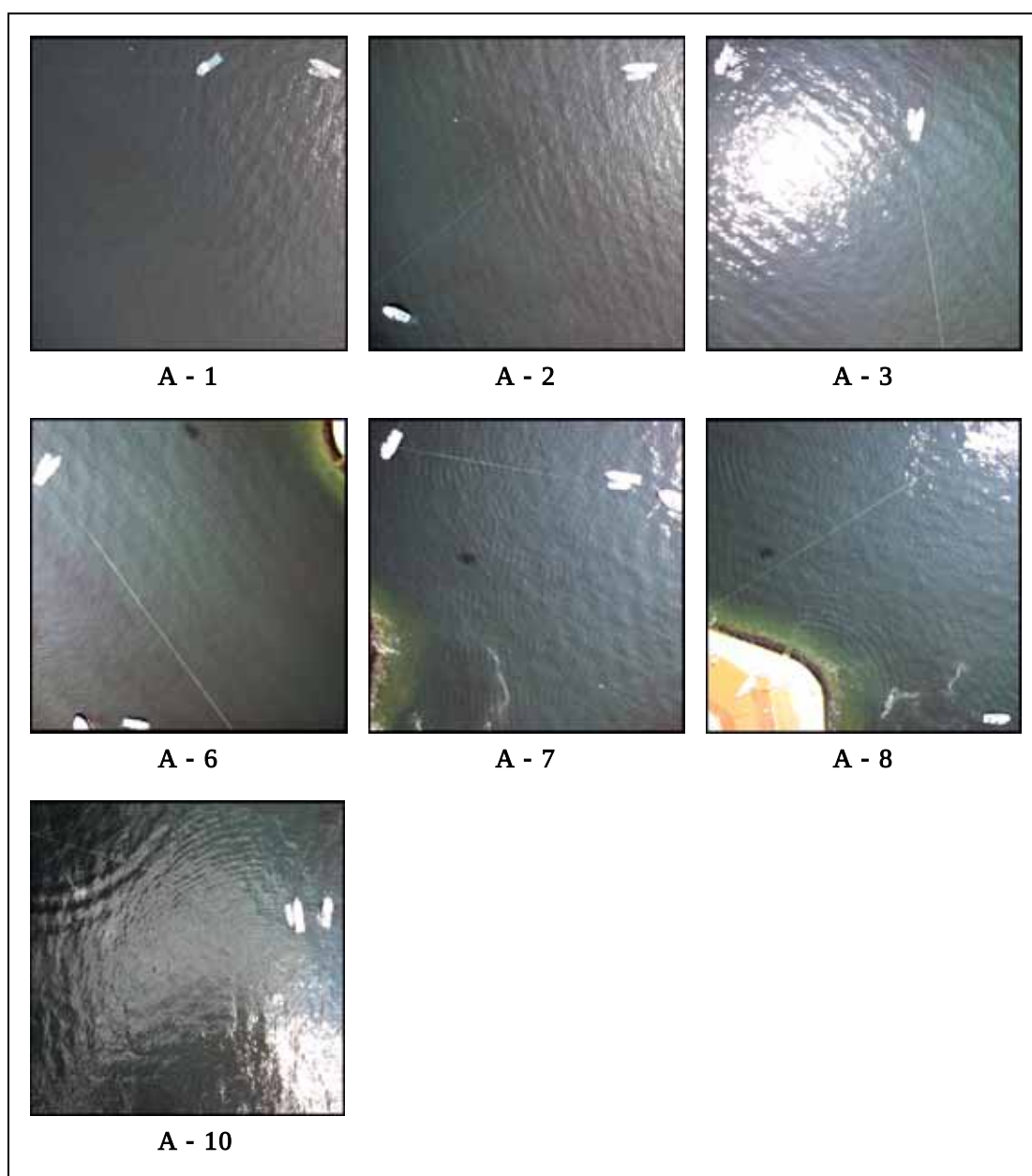
三色係数とクロロフィル-a との関係を回帰分析によって検討した結果式(3)の推定式が比較的高い相関が得られた。相関係数は 0.959 である。

$$\log(\text{Chl}) = 12.07119 * \frac{1}{\text{rf}} + 18.03279 * \frac{1}{\text{gf}} + 16.19595 * \frac{1}{\text{bf}} - 137.53 \quad (3)$$

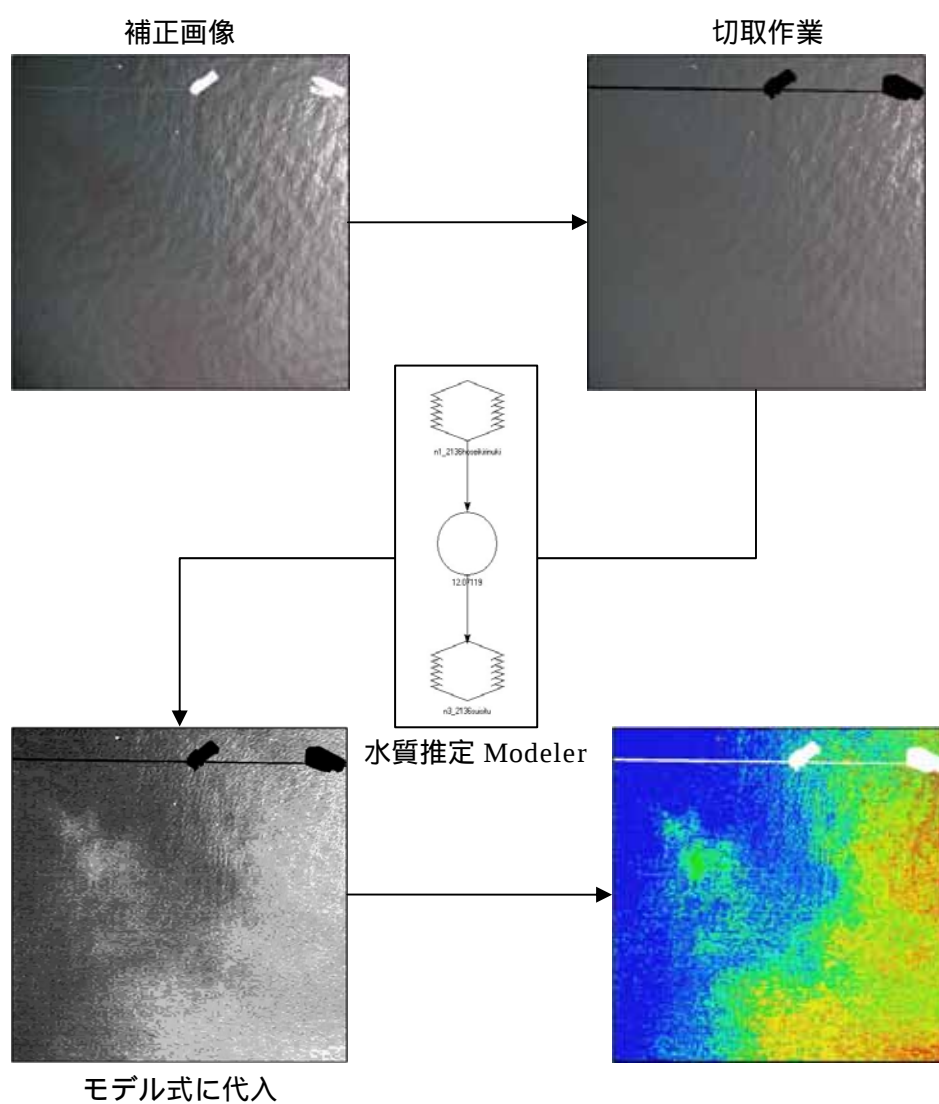
R G B 値を独立変数とした種々の式形についても検討したが、式(3)に比べて相関は低かった。

3.2.2 水質分布画像の作成

画像処理に用いた画像は以下の 7 ポイントである。日射の関係、水質の関係でこの 7 ポイントを選定した。

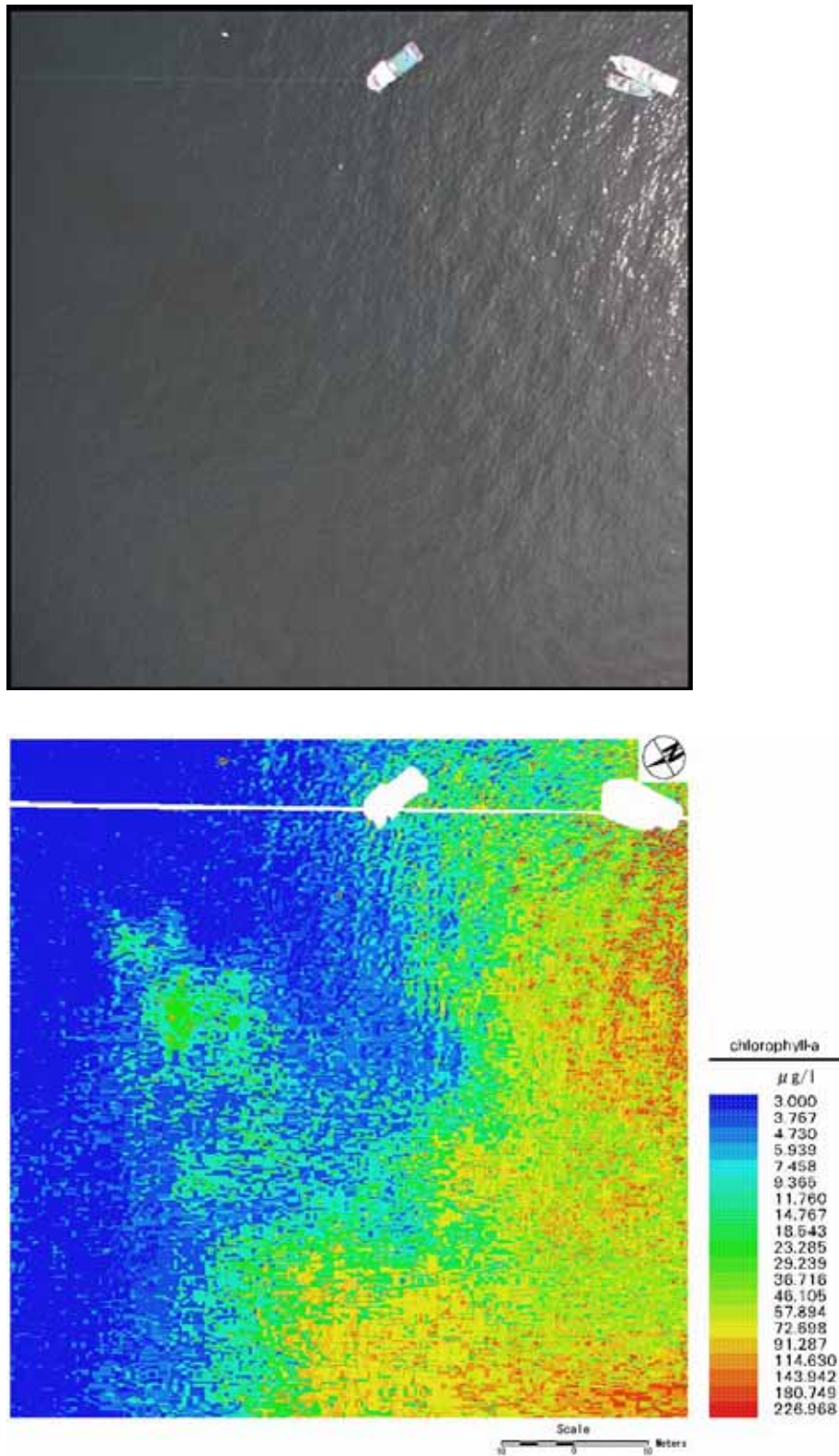


分布画像の作成手順



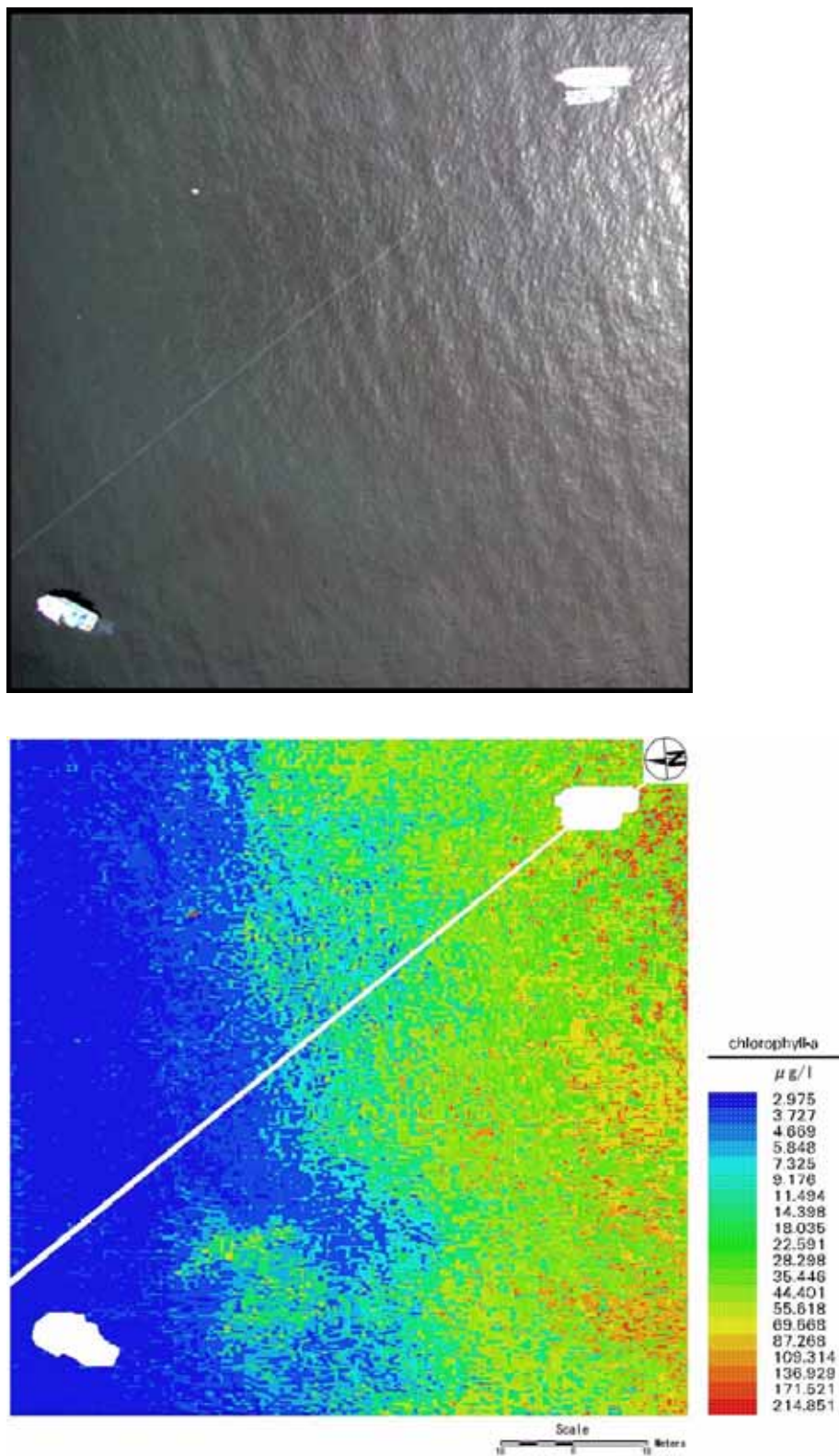
それぞれの画像から水質分布画像を作成した結果を示す。

A-1 分布画像



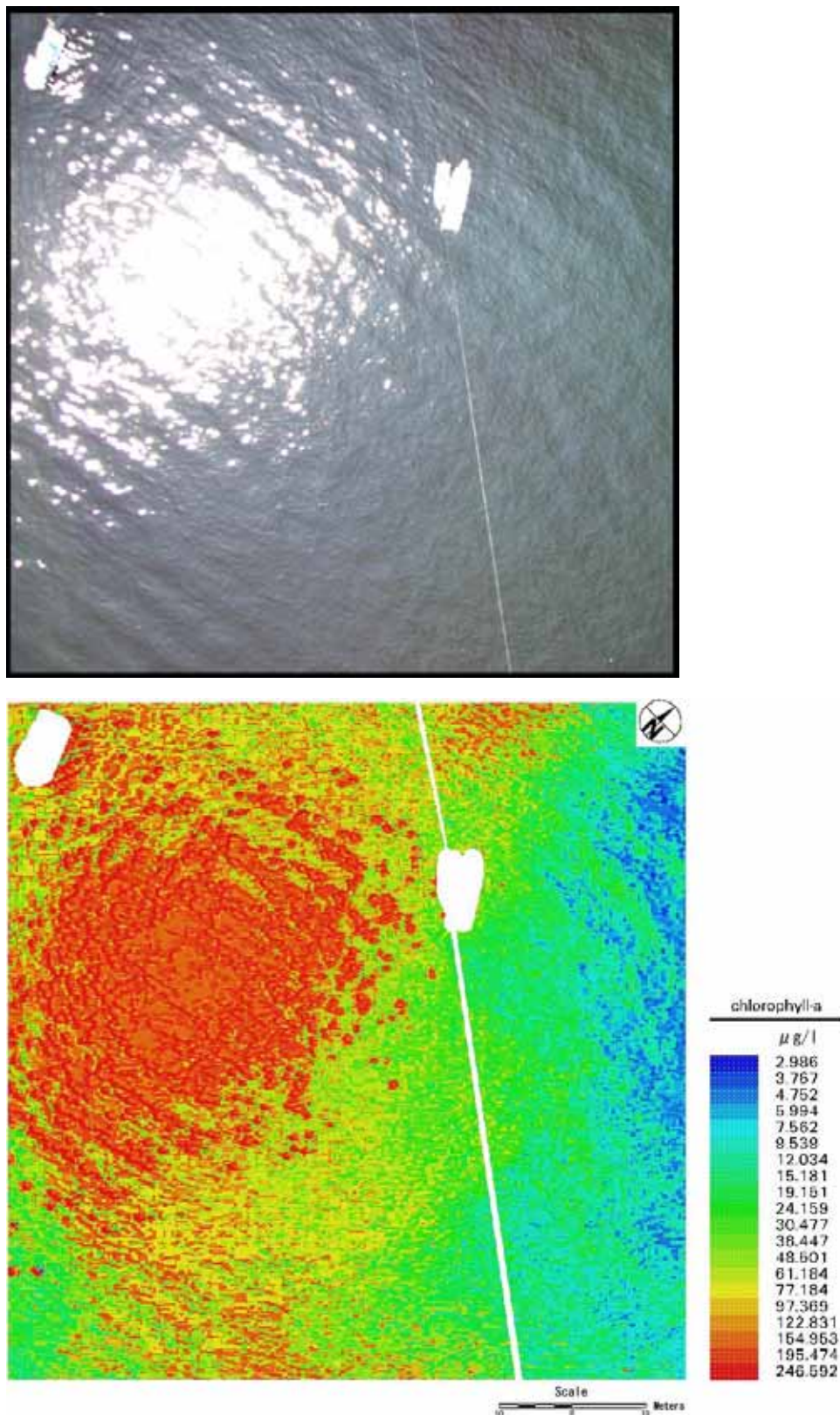
海水温が上昇し、赤潮発生後の観測だったために全体的にクロロフィル-a 濃度が高く示す部分が数多く存在した。A-1 の撮影ポイントは、ちょうど高濃度域と通常に近い濃度域との境目だったために中央部分で色がわかれていることがわかる。画像の右側に行くにしたがって濃度が上昇し、最大値は 226 μg/l となっている。また、中央左側のあたりに小規模の高濃度域が存在することもこの画像から判断することができる。

A-2 分布画像



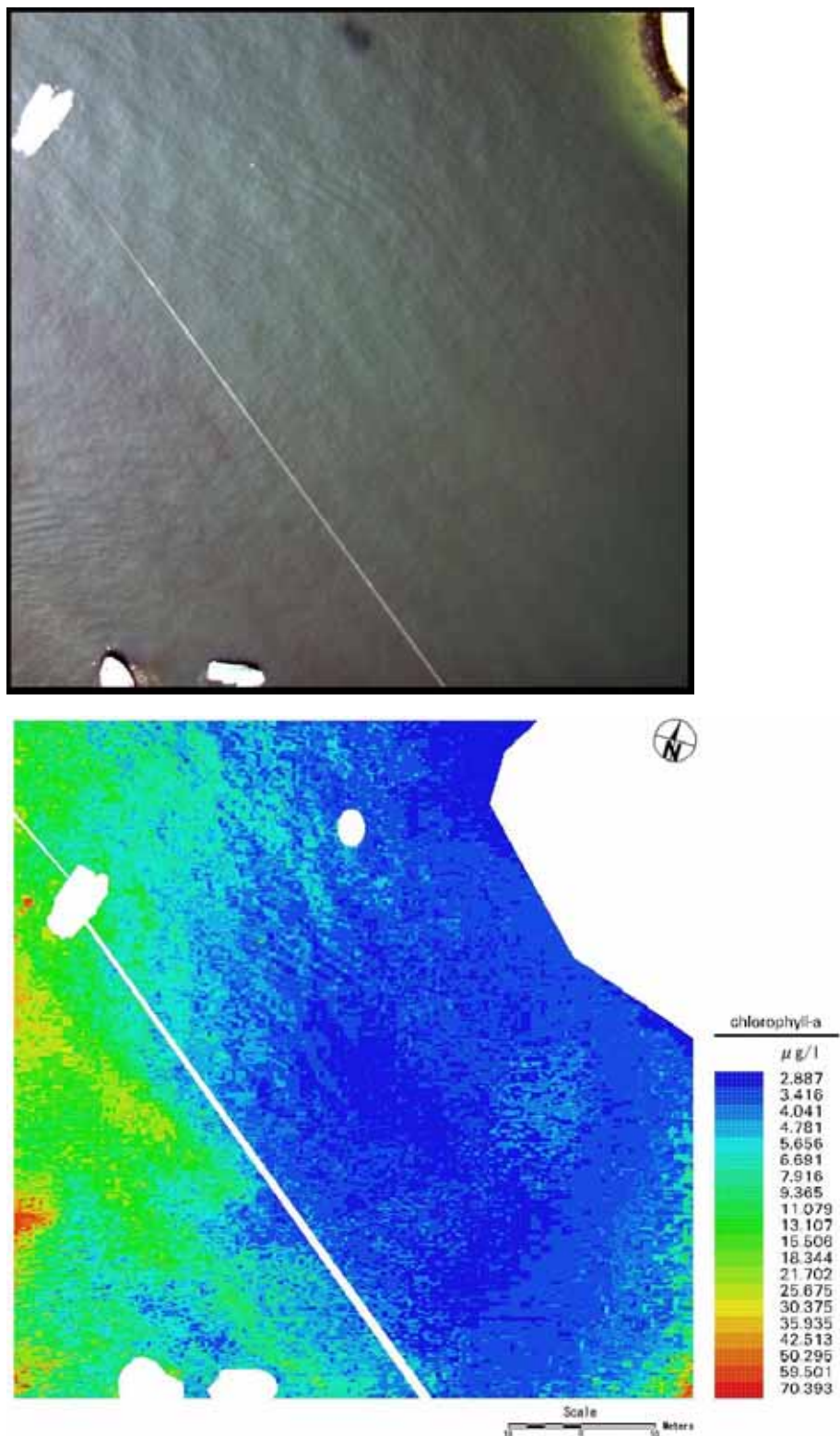
A-1 のポイントに近いために、この画像からも高濃度域と通常に近い濃度域の境目が存在している。画像左側では、 $3\mu\text{g/l}$ となっているが右側端部分では $100\mu\text{g/l}$ 前後の値を示している。また、A-1 と同様に画像内の濃度段階も約 $3\sim 215\mu\text{g/l}$ である。

A-3 分布画像



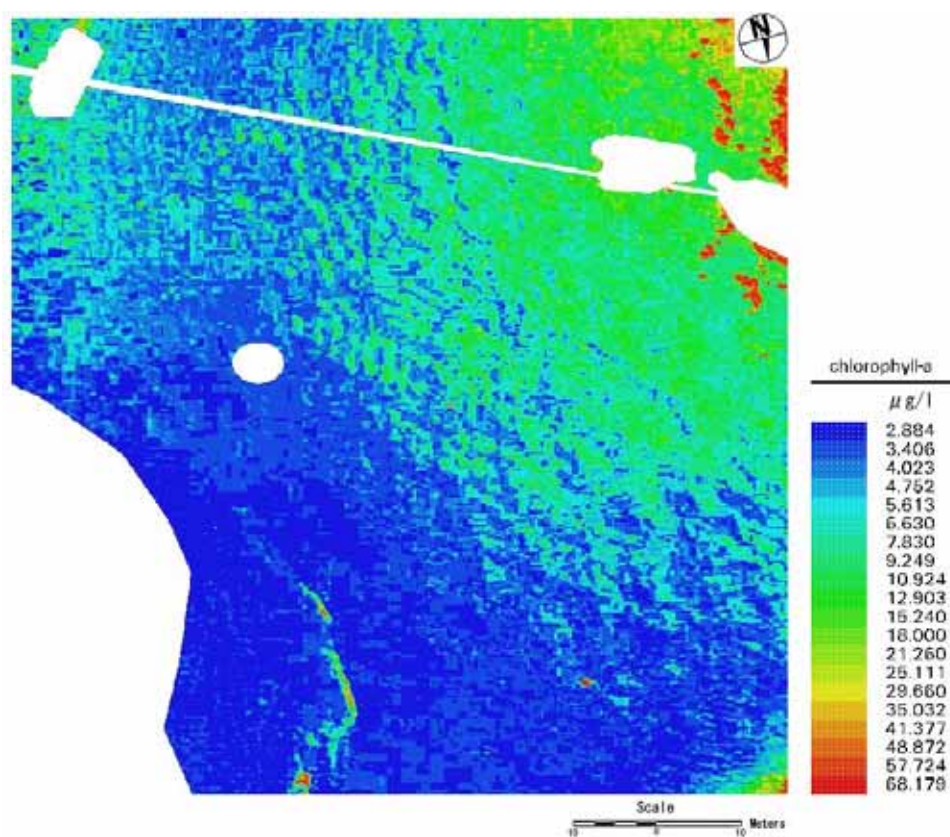
採水を行った中で最も高い濃度の $151 \mu\text{g/l}$ を示したポイントの分布画像である。しかし、画像の左中央部に太陽光によってできたホワイトキャップにより、円状の高濃度域が存在しているようになっている。そのために、クロロフィル-a 濃度とホワイトキャップによる影響とを見分けることができない。正しく濃度分布として見ることは右側の $1/3$ 程度となっている。この結果から、ホワイトキャップが分布画像を作る際にかなりの影響を与えることが伺える。

A-6 分布画像



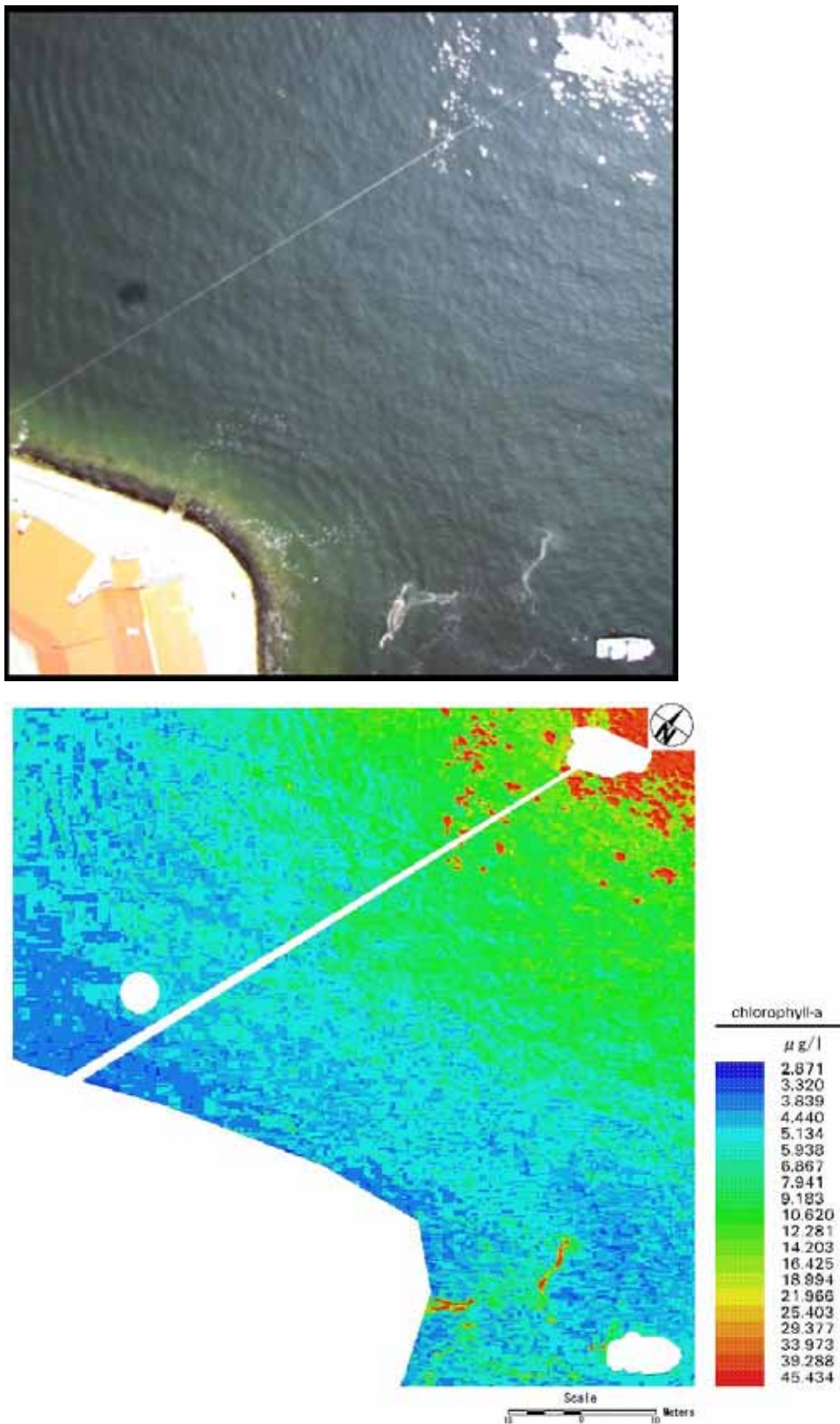
沿岸域に近いポイントの分布画像である。画像の右上の部分は、陸地となっていたために切り取った箇所である。陸地に近い部分より画像中央部分の濃度が僅かに低くなっている。これは、切り取った陸地のところに排水などを行っている箇所が存在し陸地から流れ出る排水により栄養塩が増えたためにその影響から僅かにだがクロロフィル-a 濃度が高くなったのだと思われる。しかし、先ほどまでの3つのポイントとは異なり画像内での急激な濃度変化を示すところがあり存在していないことがわかる。濃度段階も A-1 ~ A-3 の範囲の 1/3 程度の 3 ~ 70 µg/l となった。

A-7 分布画像



A-6 の分布画像と同様に全体的に $3\mu\text{g/l}$ 前後の濃度域が多く広がっている。しかし、右下部分に微かにだが高濃度域が存在することがわかる。また、波の影響と思われる箇所が何箇所も見受けられ高い値と低い値が交互になったしま状の所が存在する。

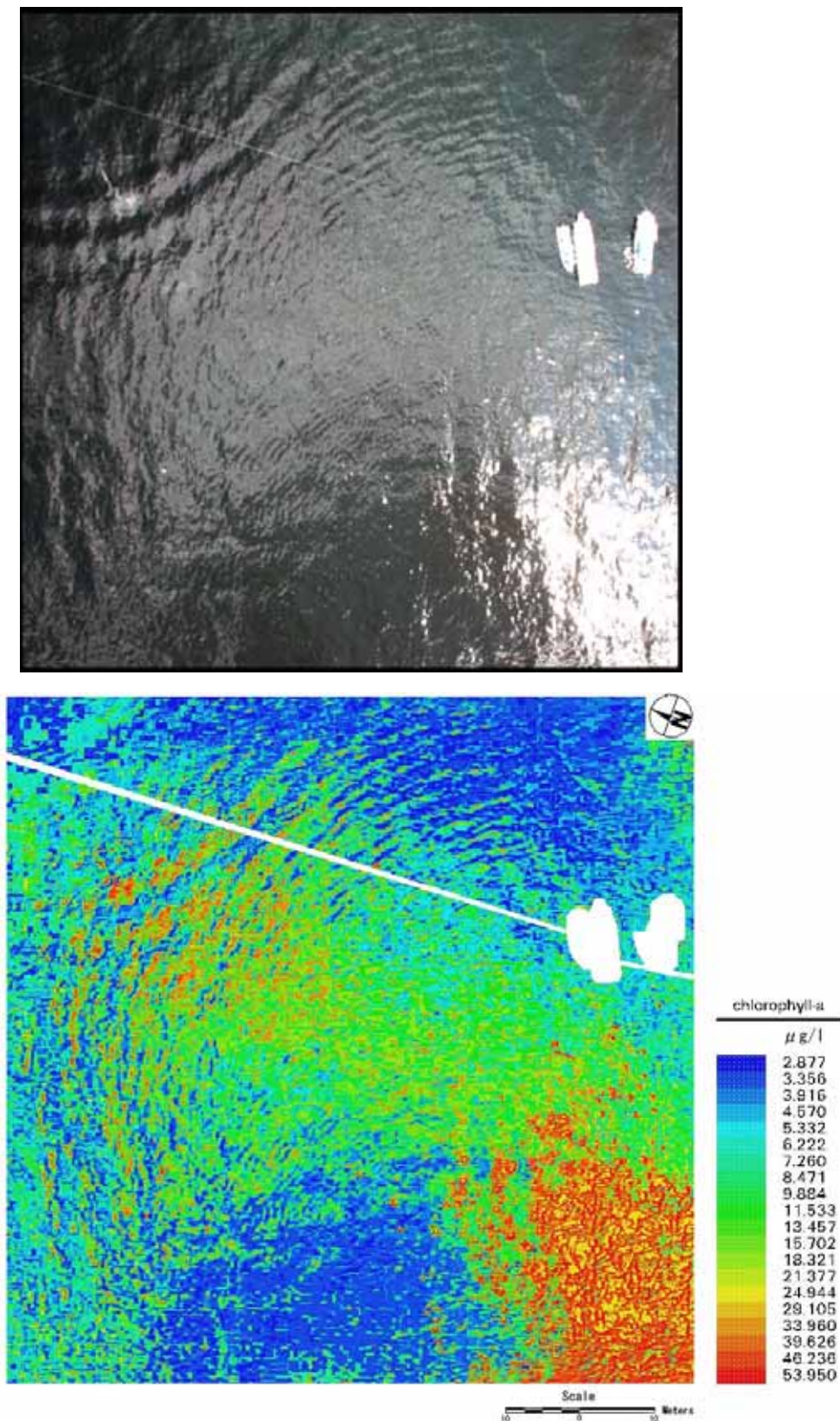
A-8 分布画像



クロロフィル-a 濃度は約 $5\mu\text{g/l}$ 前後の濃度域が広がり、極端に高い値を示箇所が少ない。

右下の船舶の近い部分に、線状の高濃度の色をしたところがあるがこれは陸上より流される排水によってできた波のために、デジタル値が高い値を示した影響によるものと思われる。

A-10 分布画像



画像全体にホワイトキャップによる影響が出てしまっているために、この画像では正しい濃度分布がわからない。特に、右下部分に $40\mu\text{g/l}$ 前後の濃度域が存在してしまっているように見えている。また、波があるために高い濃度と低い濃度がしま状に存在しているようになっているが、実際には低い値が画面全体的にあるのだと思う。

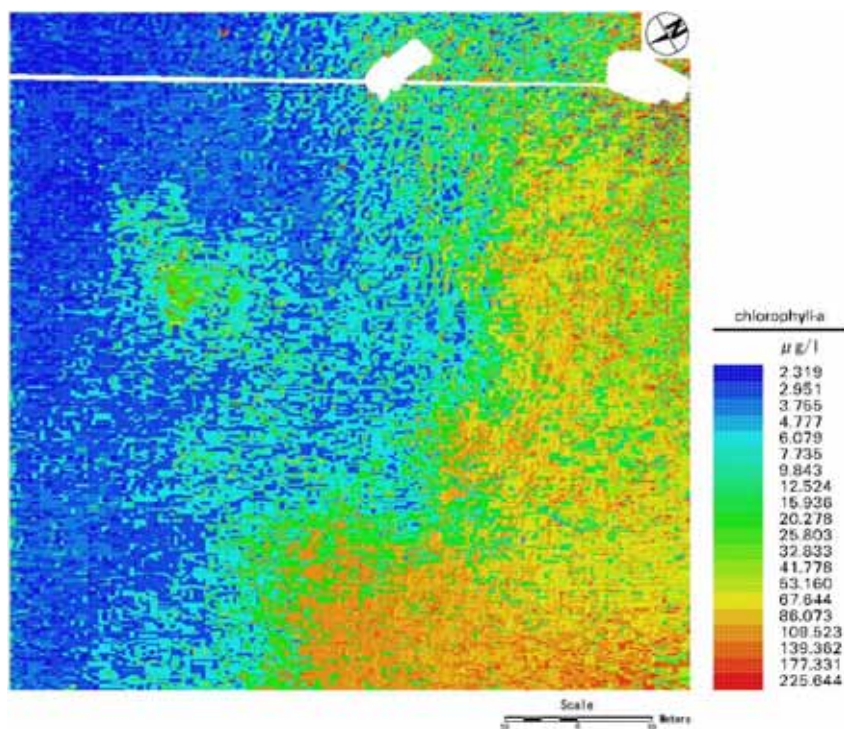
3.2.3 独立変数による水質分布画像

三色係数法と同様に独立変数とクロロフィル-a 濃度を代入して回帰分析を行い、モデル式を算出した。結果、 $(R+B)/G$ の独立変数パターンが最も良い結果となり式のようなモデル式となった。

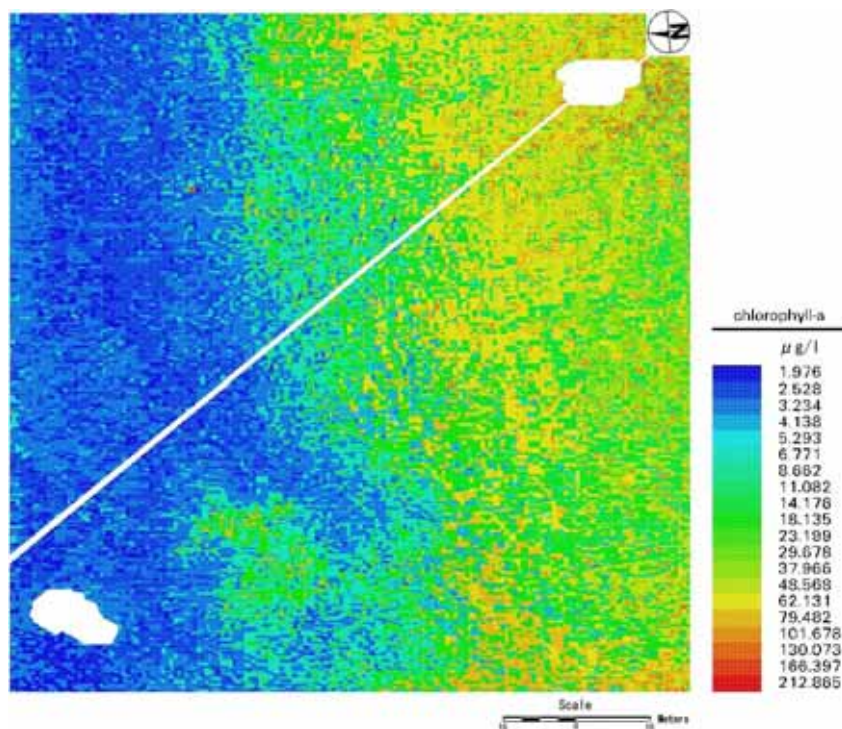
$$\log(Chl) = 3.38164 \times \frac{(R+B)}{G} - 5.59952$$

決定係数 $R^2=0.733146$

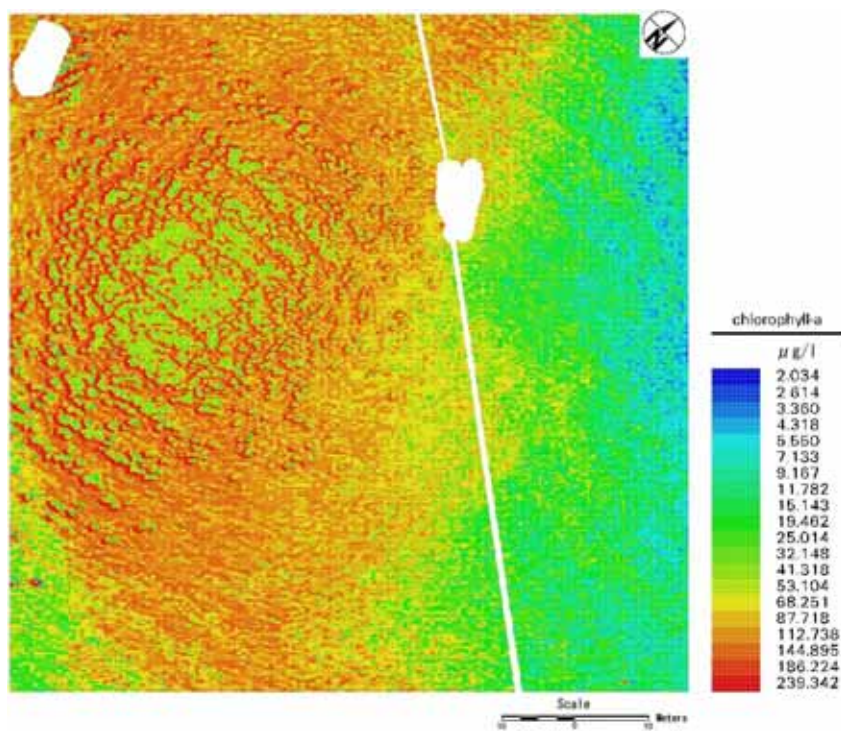
A-1 分布画像



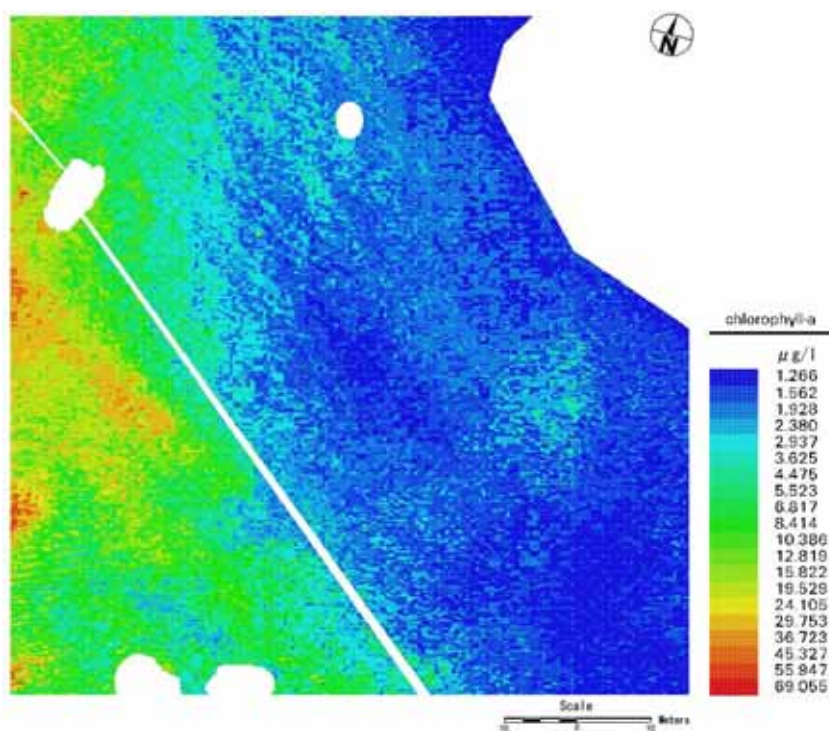
A-2 分布画像



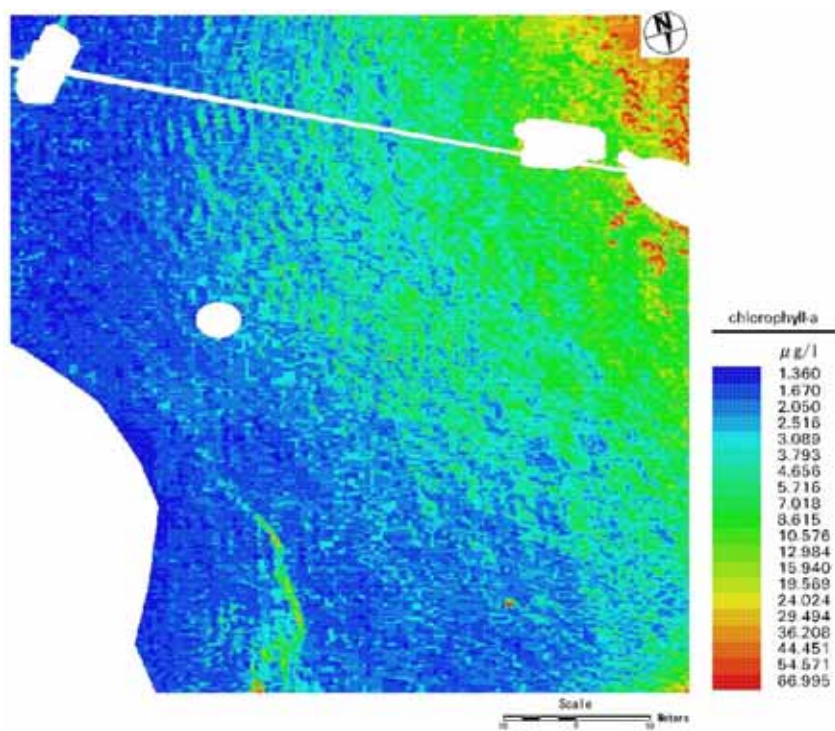
A-3 分布画像



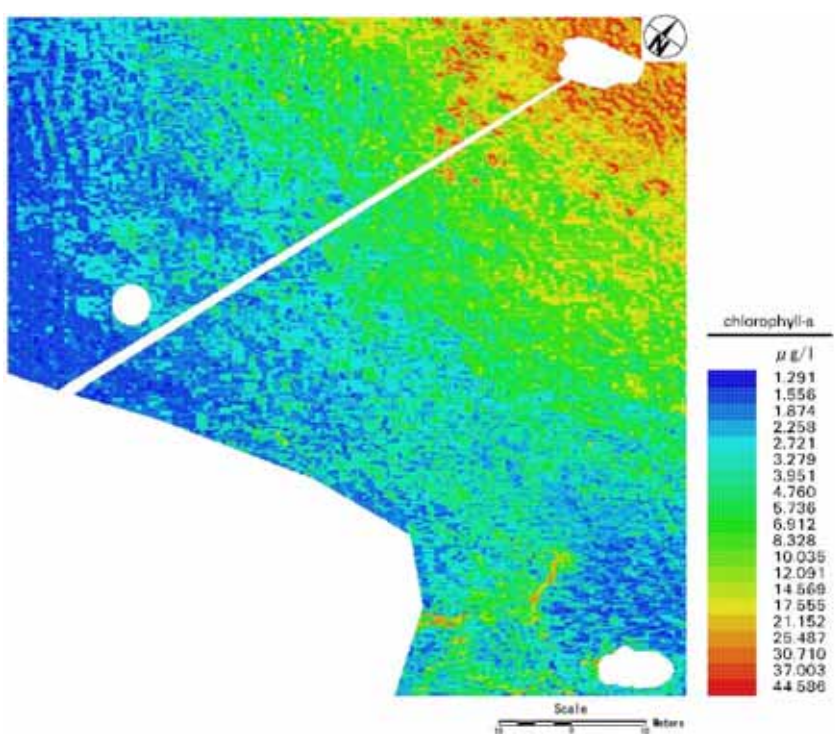
A-6 分布画像



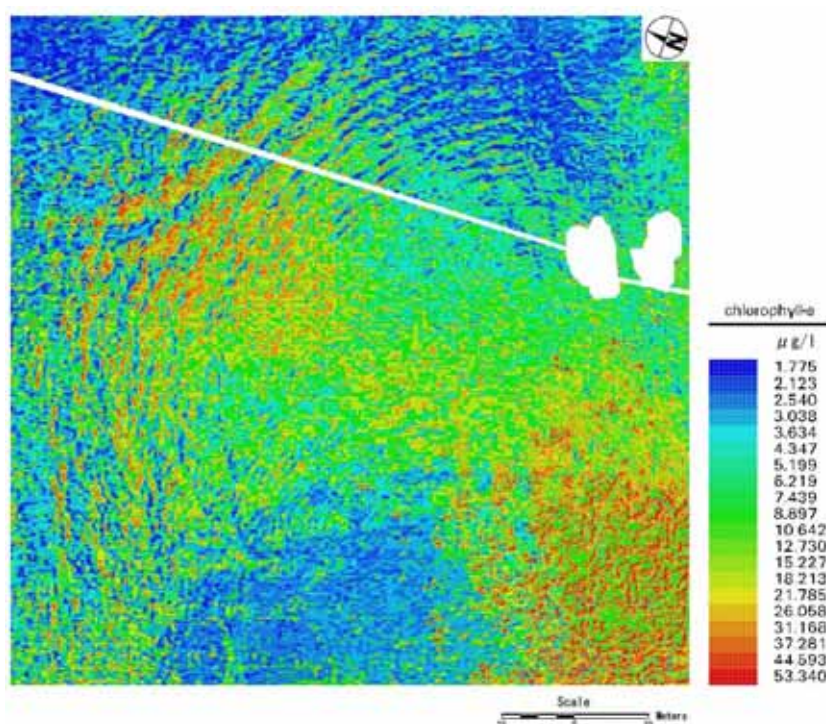
A-7 分布画像



A-8 分布画像



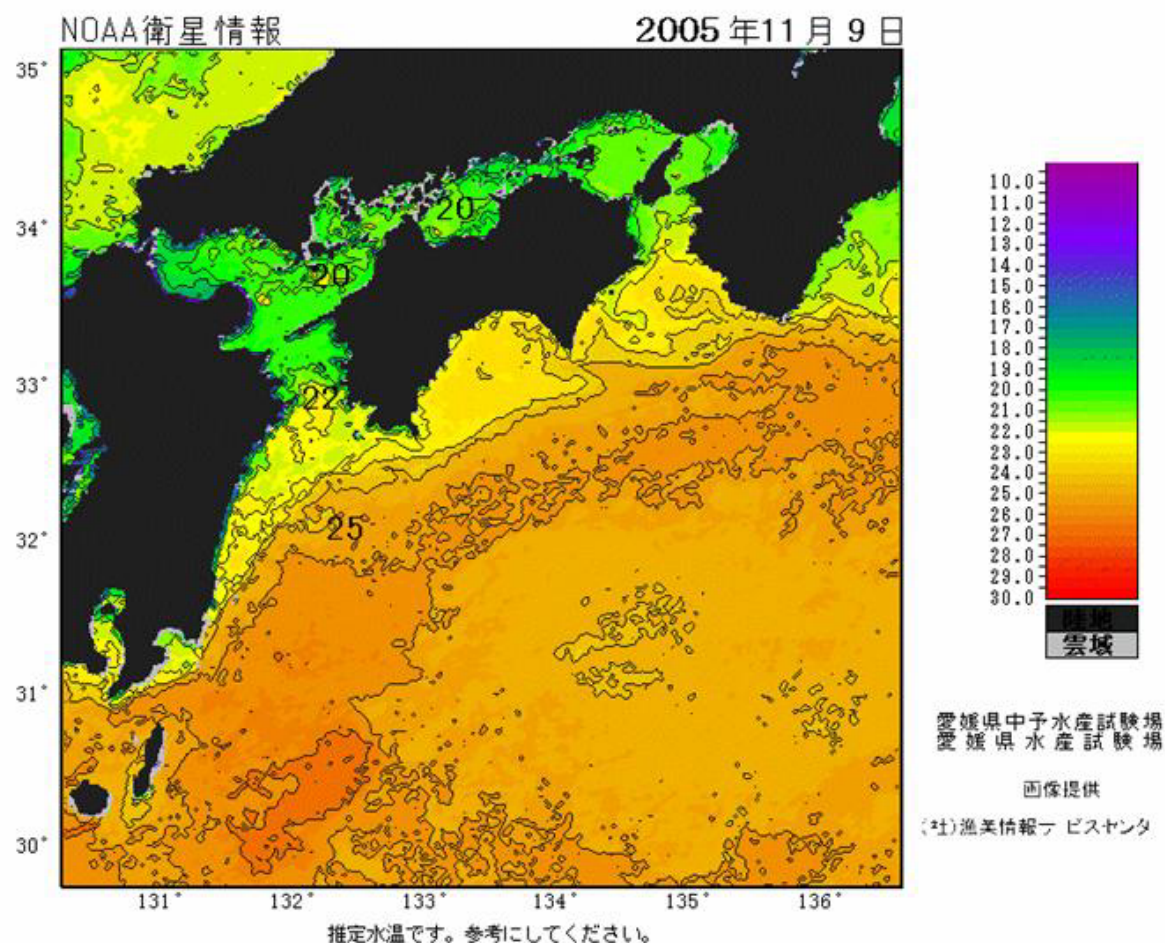
A-10 分布画像



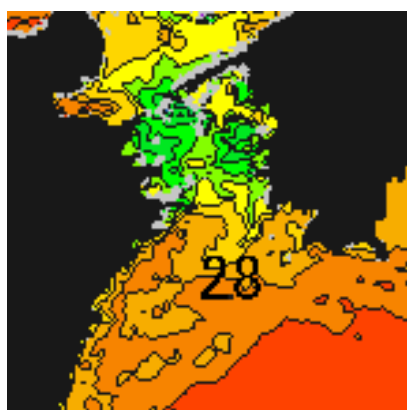
三色係数法を用いたモデル式と独立変数を用いたモデル式による分布画像は共に急激なクロロフィル-a 濃度変化を表現しているところや、濃度段階の幅も近い値を示しているためにモデル式による大きな違いが存在しなかった。どちらのモデル式を使ってもホワイトキャップによる影響が分布画像に映し出されてしまい高濃度域が存在しているようになっている。特に、三色係数法を用いた画像では極端に値が高い部分が集中していることが見受けられる画像があった。また、ある程度の高さがある波の部分では低い濃度と高い濃度が交互になっているように表現されてしまっている。画像内に極端な高濃度域が存在すると濃度段階の幅が大きくなってしまい低濃度の僅かな違いがわかりづらいという箇所が多く存在していた。

3.3 NOAA画像から見た宇和島湾

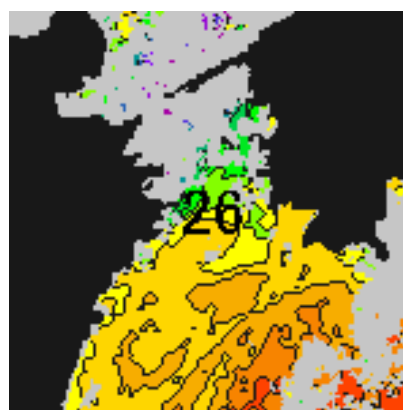
デジタルカメラでの撮影周波数はNOAAではバンド1に相当しているが、分解能が低く、数十メートルの大きさのパッチ状の水質変化は捉えることが出来ない。しかし、海流の動きは把握することができ、大きな循環、気温の変化傾向を知ることが出来る。



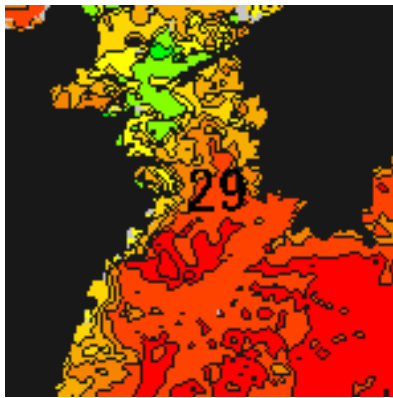
この画像は広域での水温分布を示したものである。観測日前後の宇和島湾に着目した水温分布を示したが、湾奥にまで高温水塊が入っている様子は確認できない。しかし、観測日直前には湾奥水温は30に達し、赤潮が発生した時期であった。この様にNOAA画像では大局的環境変化は捉えることが出来るが、情報としての限界がある。



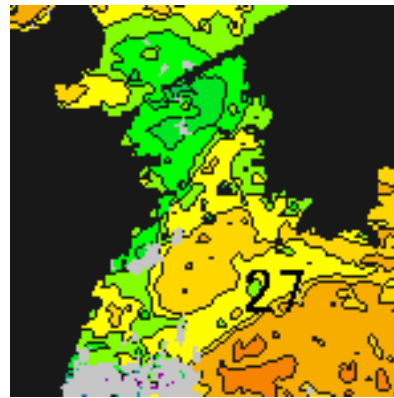
2005年7月29日



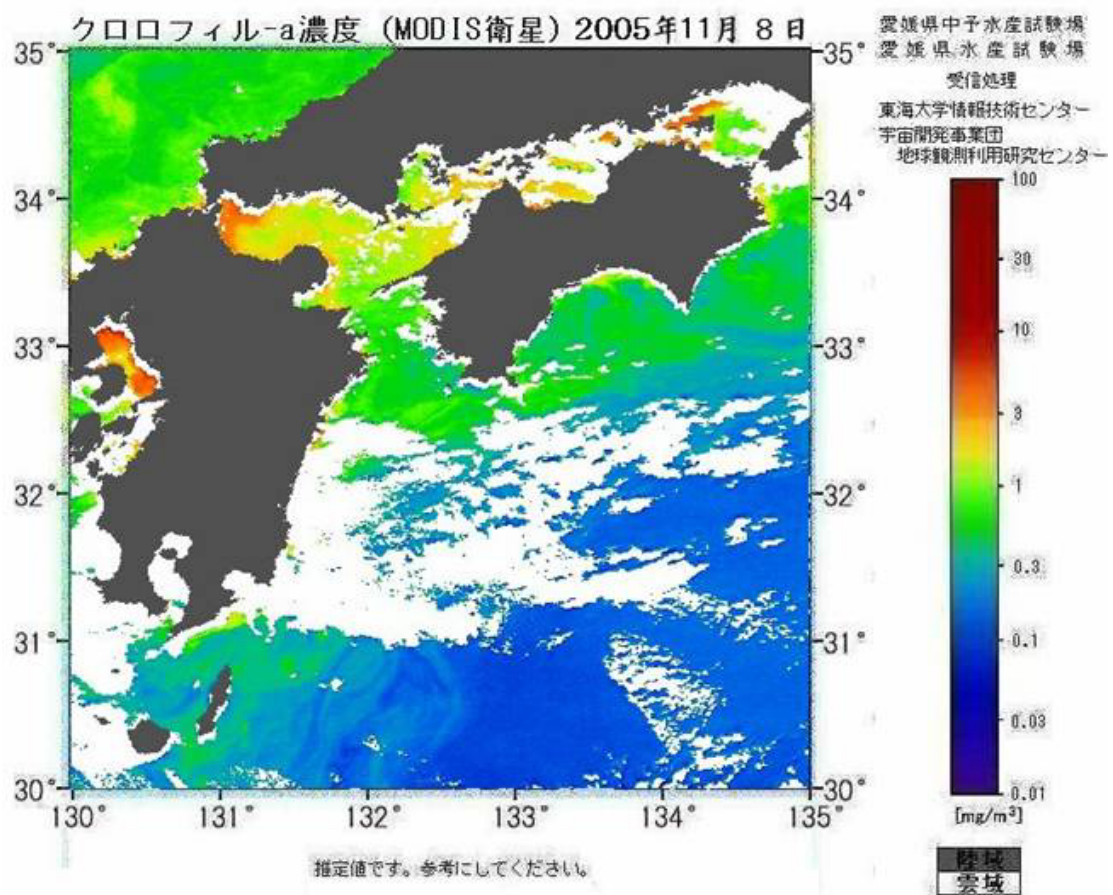
30日



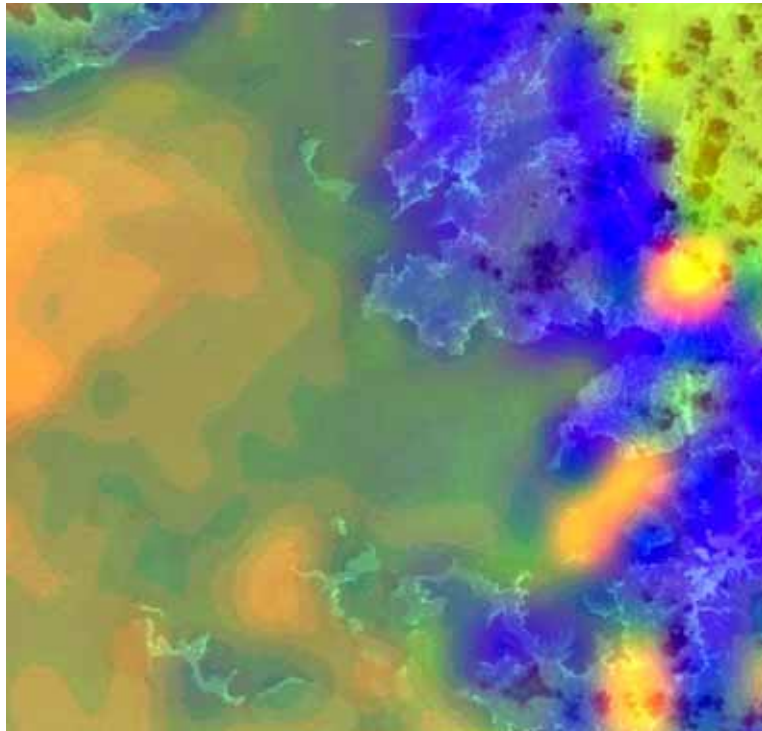
2005年8月1日



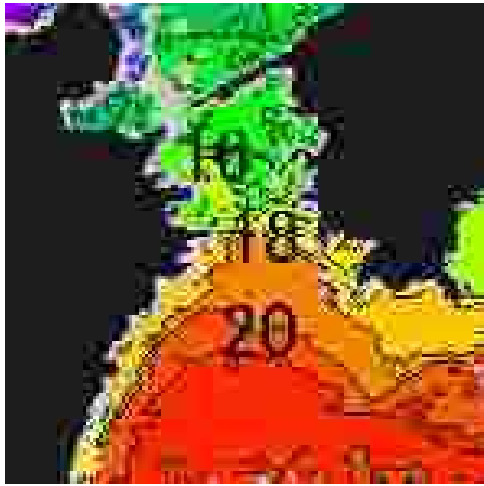
11日



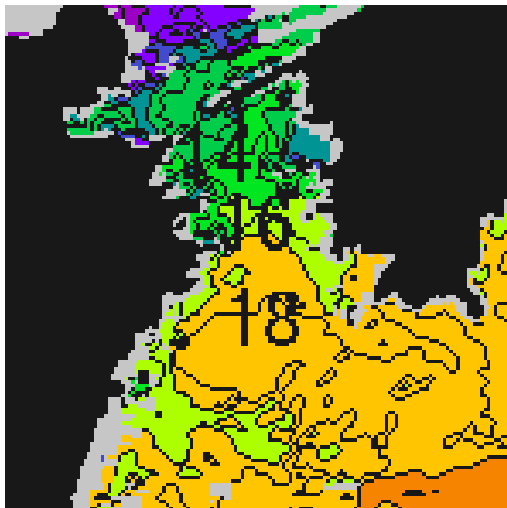
この画像はNOAA画像から推定したクロロフィル-a濃度の分布を示している。



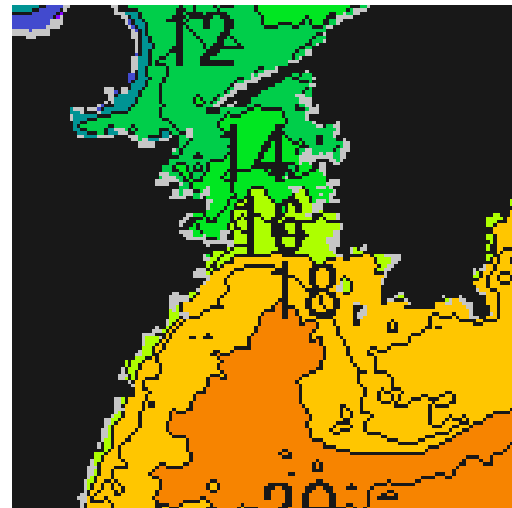
この画像はNOAA画像を高分解能化した画像であるが、何らかの変化は表しているが、何を反映しているのかの分析が出来ない分解能である。



2005 年 2 月 7 日



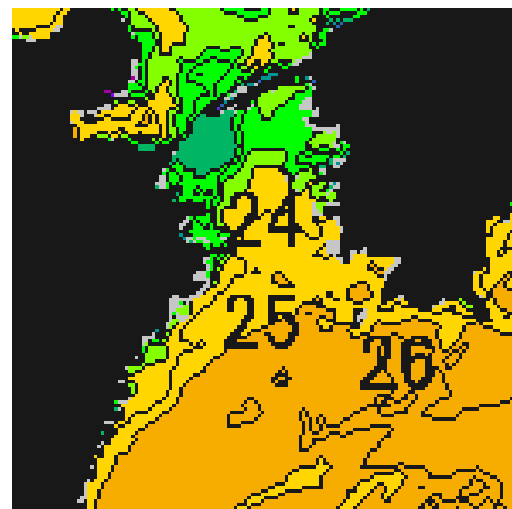
2005 年 3 月 10 日



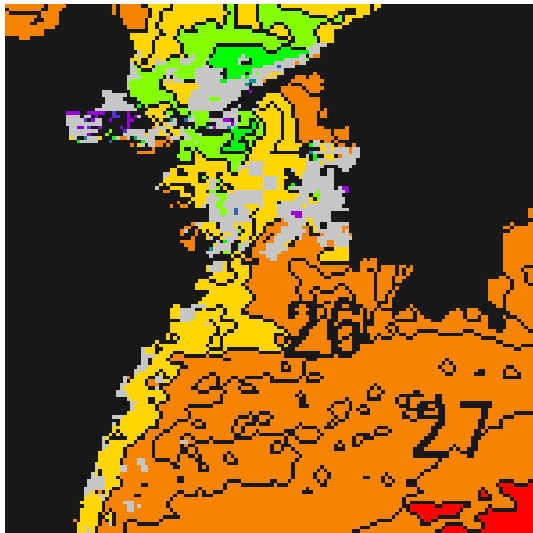
2005 年 3 月 20 日



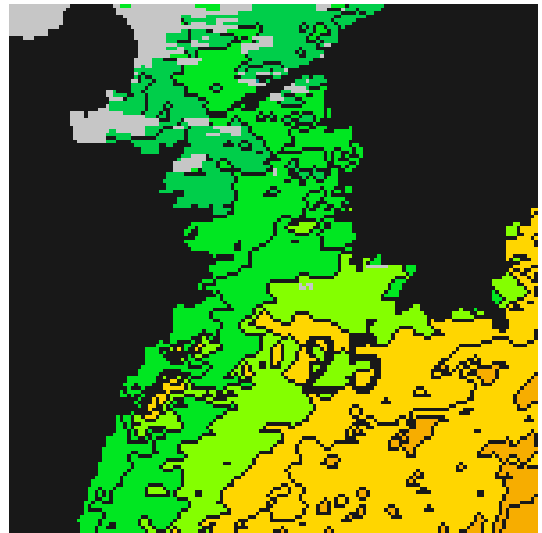
2005 年 5 月 17 日



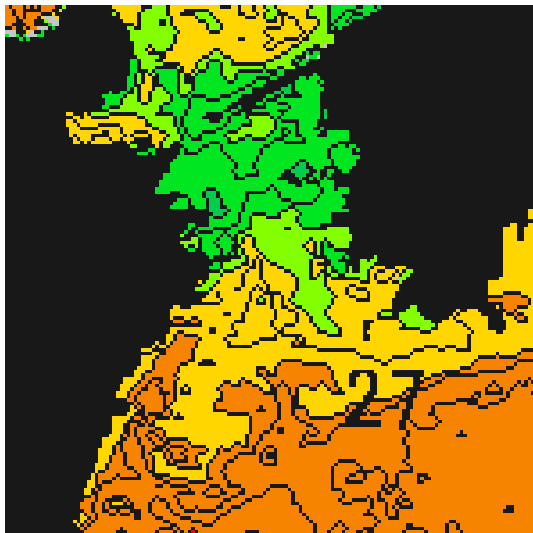
2005 年 6 月 14 日



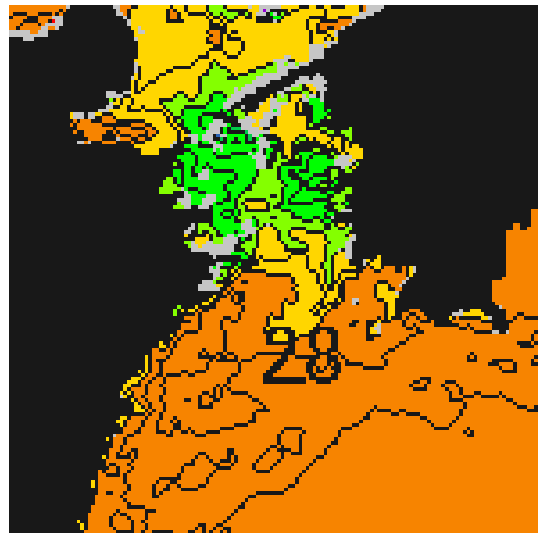
2005 年 6 月 29 日



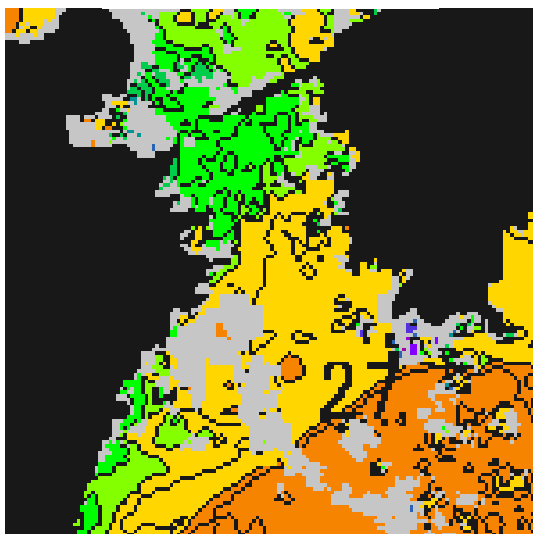
2005 年 7 月 14 日



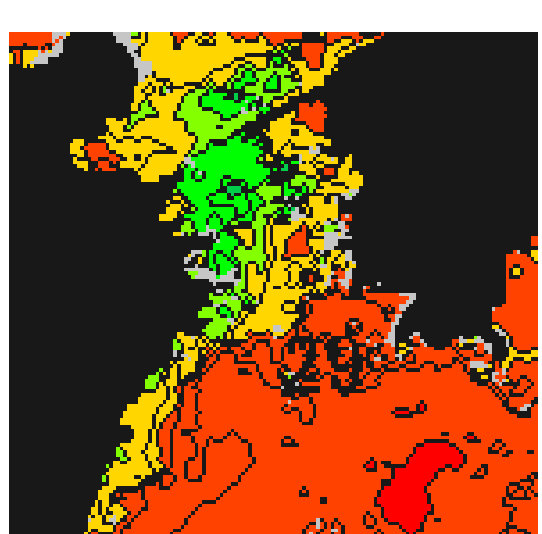
2005 年 7 月 27 日



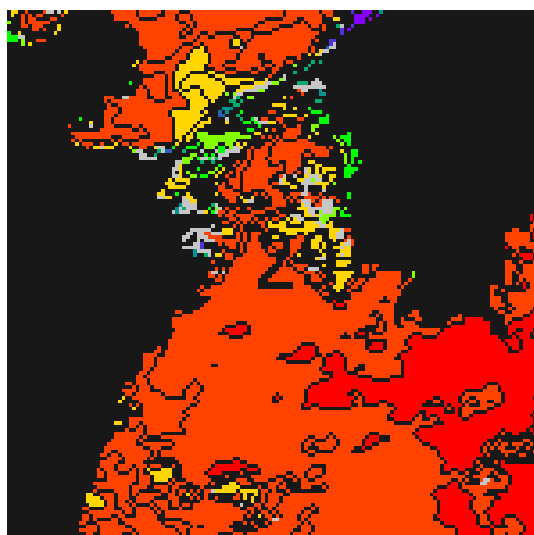
2005 年 7 月 29 日



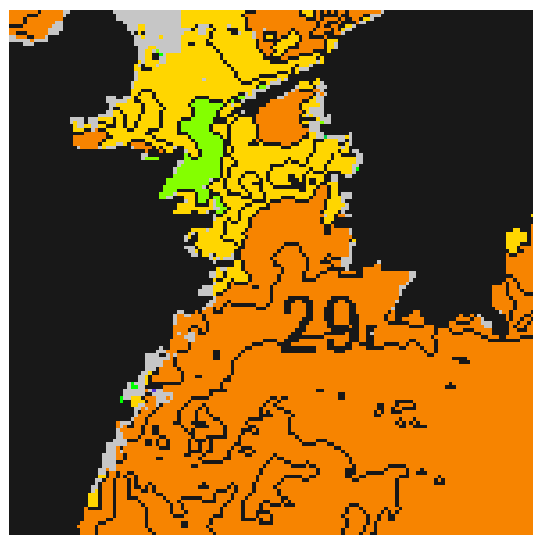
2005 年 8 月 2 日



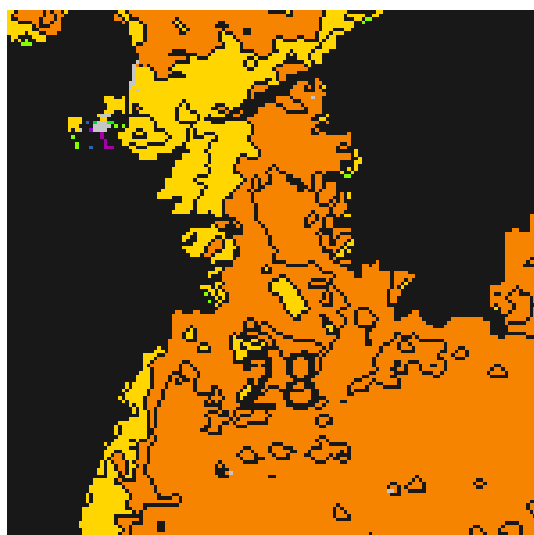
2005 年 8 月 10 日



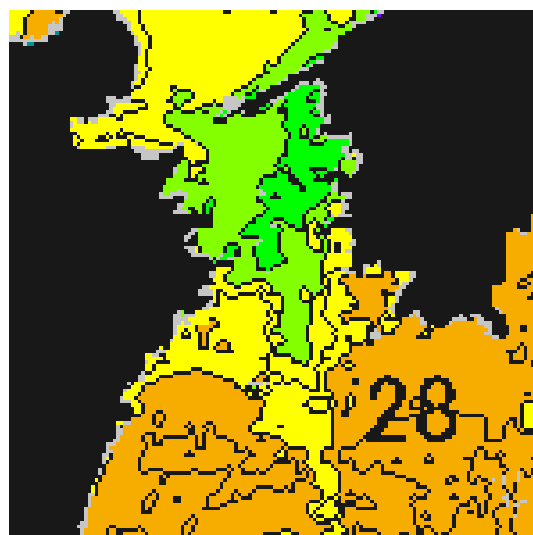
2005 年 8 月 13 日



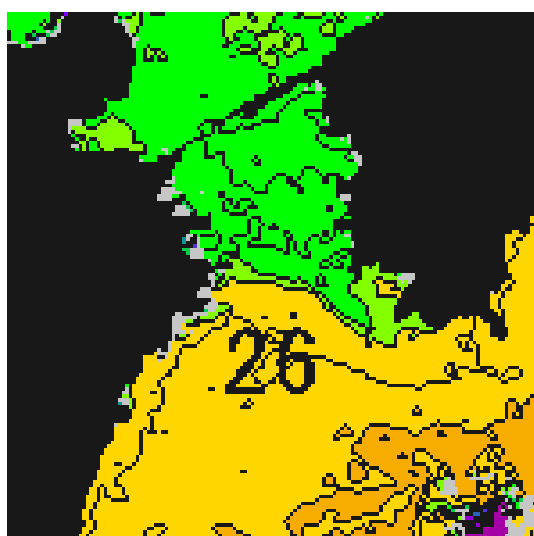
2005 年 8 月 28 日



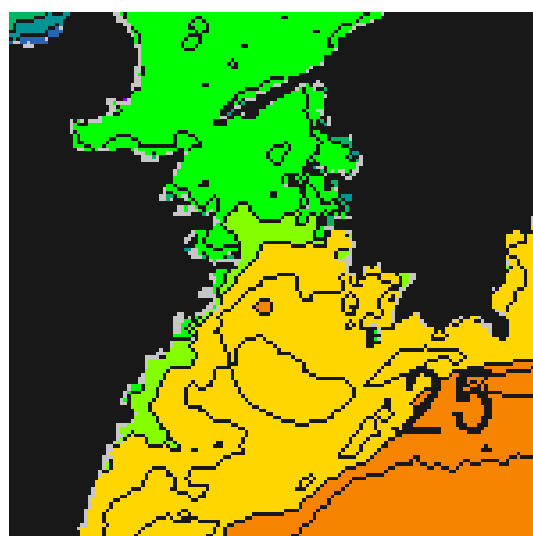
2005 年 9 月 13 日



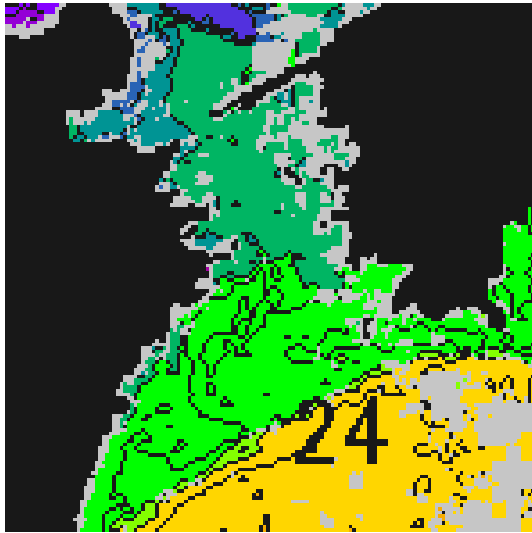
2005 年 9 月 26 日



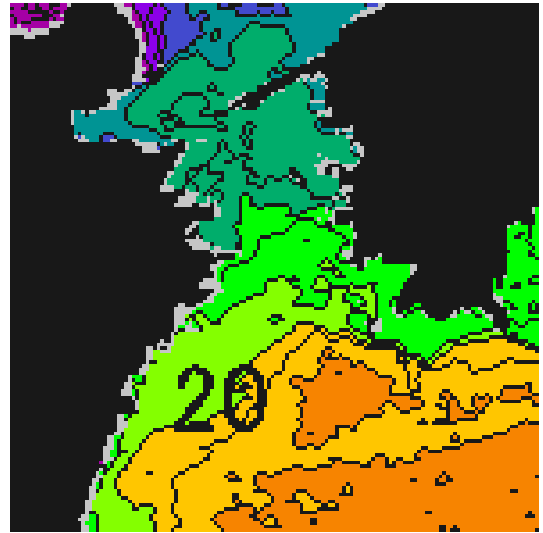
2005 年 10 月 19 日



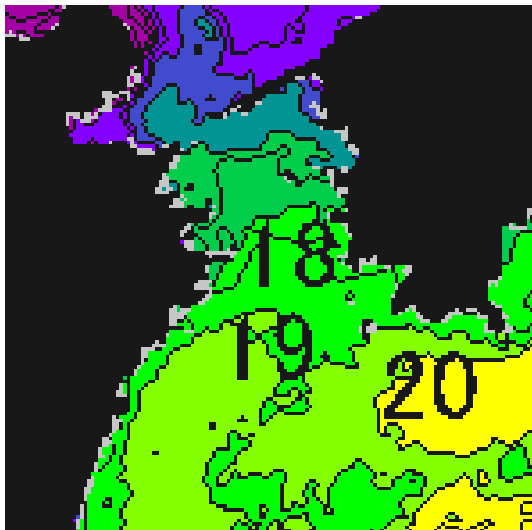
2005 年 11 月 8 日



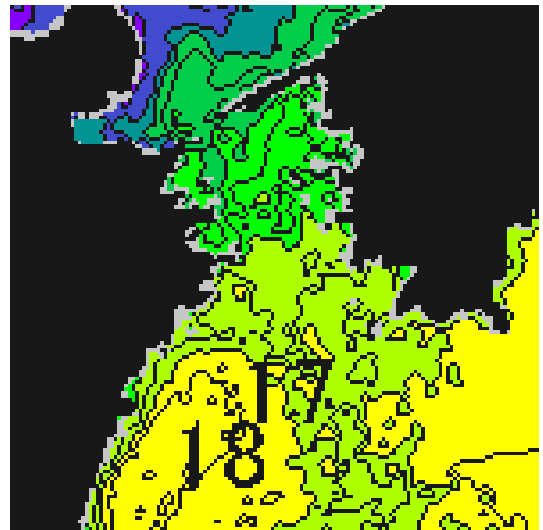
2005 年 12 月 1 日



2005 年 12 月 30 日



2006 年 2 月 14 日



2005 年 3 月 21 日

4．デジタル画像のRGB値とスペクトルについて

物質に太陽光が放射されると物質の特性に応じて色々な波長の電磁波が放射される。この電磁化の各波長が有するエネルギー密度がスペクトルである。デジタルカメラはこの波長のうち可視域でのスペクトル密度を輝度値に変換したものである。

図-5 に示すように Landsat 衛星画像でのバンド 1,2,3、NOAA 画像のバンド 1 に相当している。

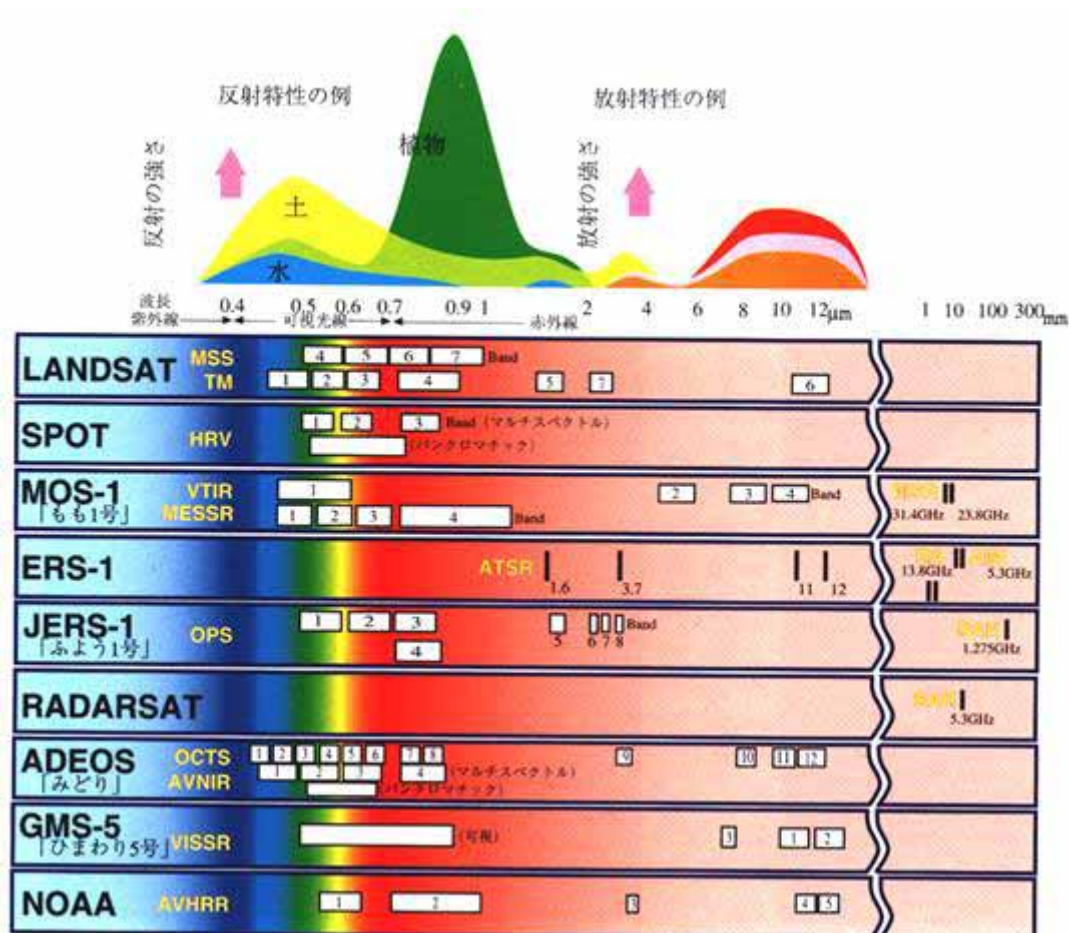


図-5 衛星画像の観測センサーとデジタルカメラの観測波長域

デジタルカメラはRGBのデジタルナンバー（DN）としてそれぞれは1～255の数値として各ピクセルに格納されている。格納されているRGBのDNはRGBそれぞれの等色関数と反射電磁波のスペクトル関数 $S(\lambda)$ の積を積分した値である。水面の条件によって反射電磁波のスペクトルが異なるので、このスペクトルの解析で水質を推定でき、デジタルナンバーは間接的にこの水質の条件が反映されている。DNは式（4）で計算できる。

$$DN_i = a \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} f_i(\lambda) S(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

$f(\lambda)$ は図-6 で示す RGB それぞれの等色関数、 $S(\lambda)$ はスペクトル関数である。

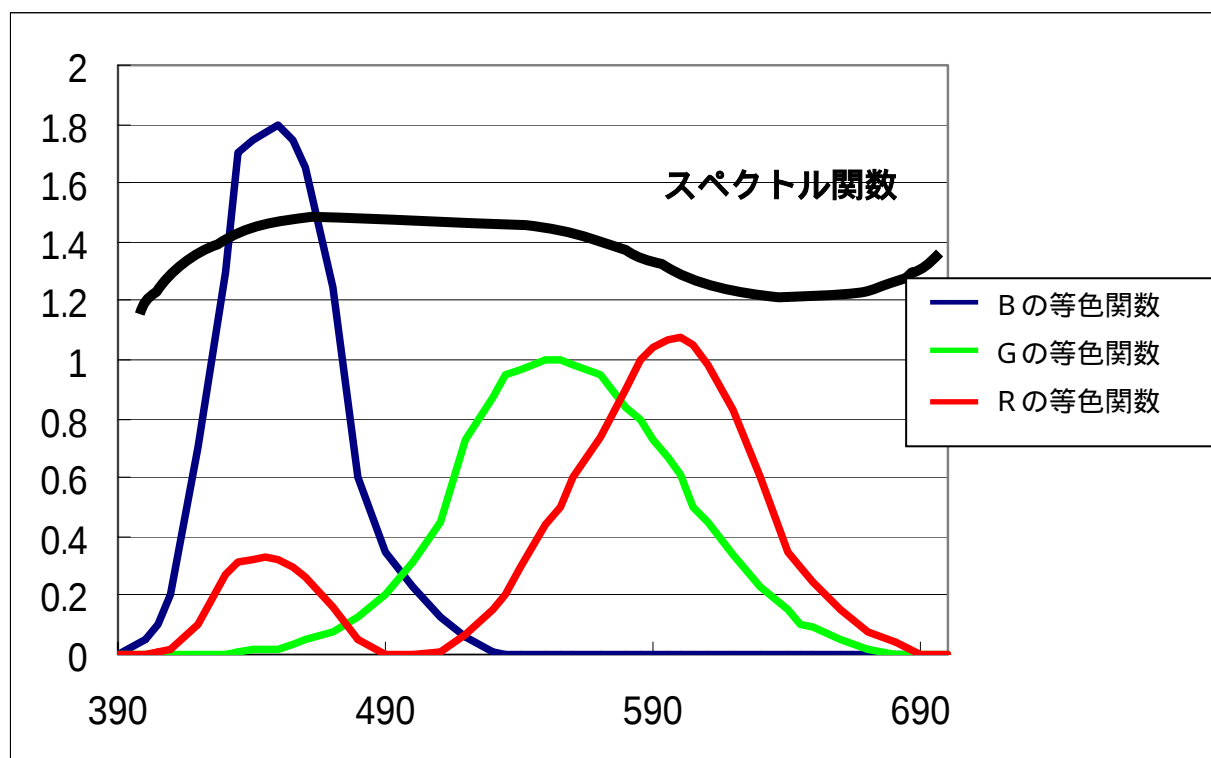


図-6 等色関数とスペクトル密度関数との関連

各クロロフィル-a 濃度の水を水槽に入れ、反射スペクトルを測定した実験結果のうち、可視域についてのスペクトルを図示したのが図-7 である。全体のスペクトル図からこの部分だけ切り出したために多少精度が落ちるが、クロロフィル濃度の変化と共に、スペクトルの形が変化していることがこの図からわかる。したがって、クロロフィル濃度の変化に伴って変化するスペクトル密度関数と等色関数との積の積分であるデジタルナンバー（DN）とクロロフィル濃度との相関が存在すると考えることが出来る。

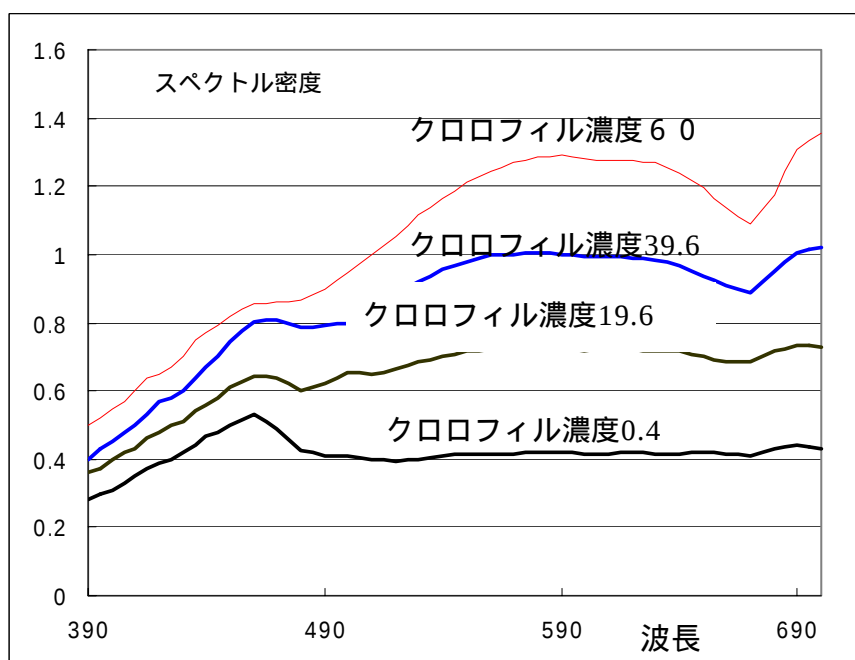


図-7 クロロフィル濃度とスペクトル密度関数

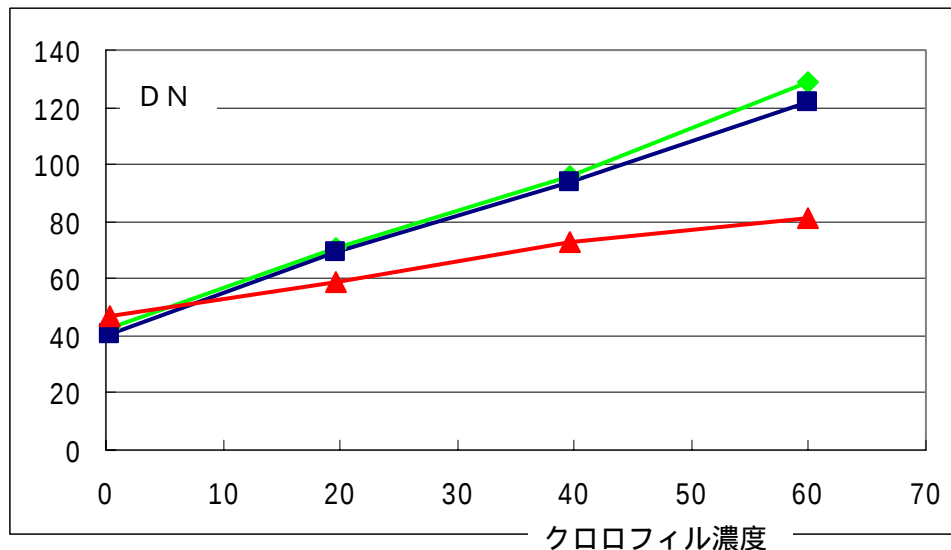


図-8 クロロフィル濃度とDN

5. 吸光度と分光反射率との関係

図-7 の分光反射率の測定とデジタル写真の撮影を同時に行ない、スペクトル密度関数から計算したデジタルナンバーとデジタル写真から読み取ったDNとの整合性について実験室で検討を行った。この際に分光反射率の測定機器を有していないために、代用として吸光度計での測定からスペクトル密度関数を間接的に求めることを試みた。図-7 の測定結果は高知工科大学の村上雅博教授らのクロロフィル濃度と分光反射率についての研究データのグラフから可視域のみを読み出したものである。

5.1 吸光度と分光反射率の関係を検討する室内実験

実験装置作成にあたり、可能な限り外部の光を遮断し、水そのものの色を撮影した。外部の光を遮断することにより、外部の光の強弱が撮影の際に影響を及ぼすデジタル画像のデジタルナンバーのばらつきを防止することが出来る。このため、周囲を遮光カーテンで覆い、内部の光源には、長寿命で、寿命末期まで光量が維持されるハロゲンランプを用いた。また、ハロゲンランプは光にムラがなくサンプルごとのDNのばらつきも最小限にすることができる。

水そのものの色の撮影については、室内実験では現地でのデータに比べ水深が浅いため、水槽の底の色がDNに影響を与えることが考えられるので、それを軽減させるために大容量の水槽を使用した。

実験装置の規模により生じる、光源直下からの距離の違いや、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を読み取るために、光源、カメラを固定した。

実験装置外観



実験装置骨組 全体詳細

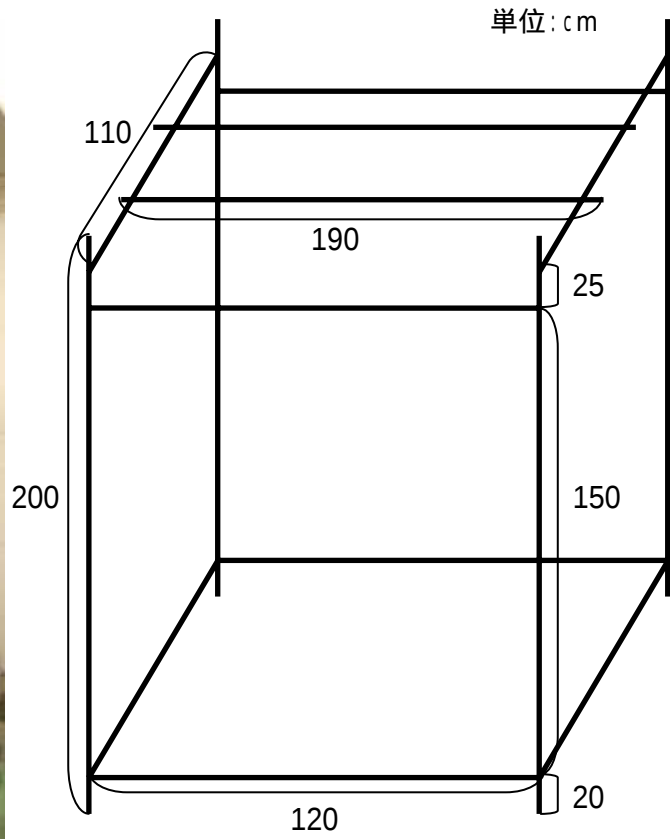


図-9 実験水槽の外観

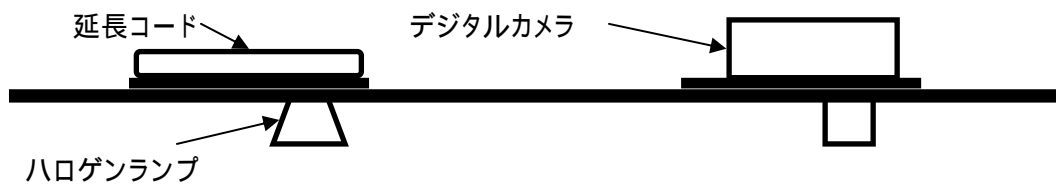
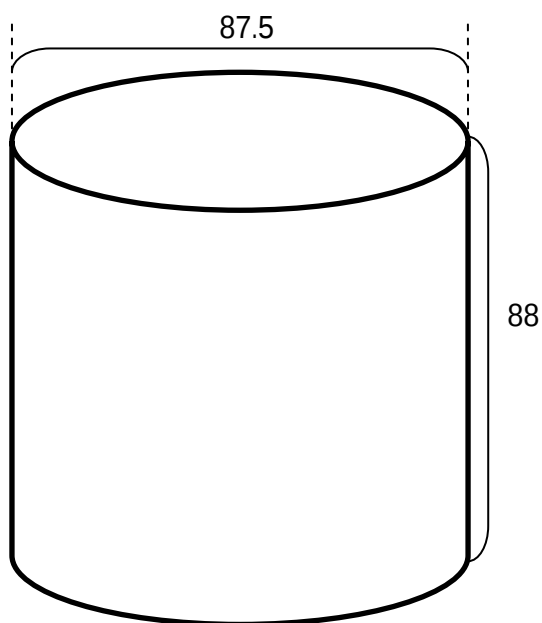


図-10 カメラの固定と光源
59

水槽詳細



水槽容積

$$0.43 \times 0.43 \times 3.14 \times 0.8 \quad 0.465 \longrightarrow 465 \ell$$

水槽内部半径86cm、水深80cm

撮影環境



- ・水面～レンズ間の距離 約110cm
- ・水面～光源間の距離 約110cm
- (水深80cm時)

図-11 水槽と撮影風景

5.1.1 使用機器の概要

(1) デジタルカメラ(撮影機材)

品名 Canon EOS20D

・型式

ストロボ内蔵、デジタル一眼レフ
クラスAF・AEカメラ

・記録媒体 CFカード

・撮影画面サイズ

22.5 × 15.0mm

・使用レンズ

キヤノンEFレンズ群

・レンズマウント キヤノンEFマウン
ト



■撮像素子

・形式

高感度・高解像度大型単板CMOSセンサー

・画素数

カメラ部有効画素:約820万画素

総画素:約850万画素

・アスペクト比

3:2

・カラーフィルター方式

RGB原色フィルター

・ローパスフィルター

固定式、撮像素子前面に配置

■シャッター

・形式

電子制御式、フォーカルプレーンシャッター

・シャッター速度

1/8000 ~ 30秒(1/3、1/2段ステップ)、バルブX = 1/250秒

(2) ハロゲンランプ(光源)

品名 PHOENIX HALOPIKA JDR(70Φ)省電力タイプ

・形式 ダイクロハロゲン球

・照射角 中角20°

・消費電力 130W形



5.1.2 実験手順

実験ではクロロフィルと濁度の混濁した状態での実験を行なった。実験 1 としてクロロフィルのみ、実験 2 として混濁での実験を行なった。それぞれの実験手順を表 5、表 6 に示した。なお、実験 1 ではクロロフィル濃度の範囲を $60 \mu\text{g}/\ell \sim 0$ の範囲に設定した。なお、実験 2 ではSSを $15\text{mg}/\ell$ 付加して実験を行なった。

表 5 実験 1 の実験手順

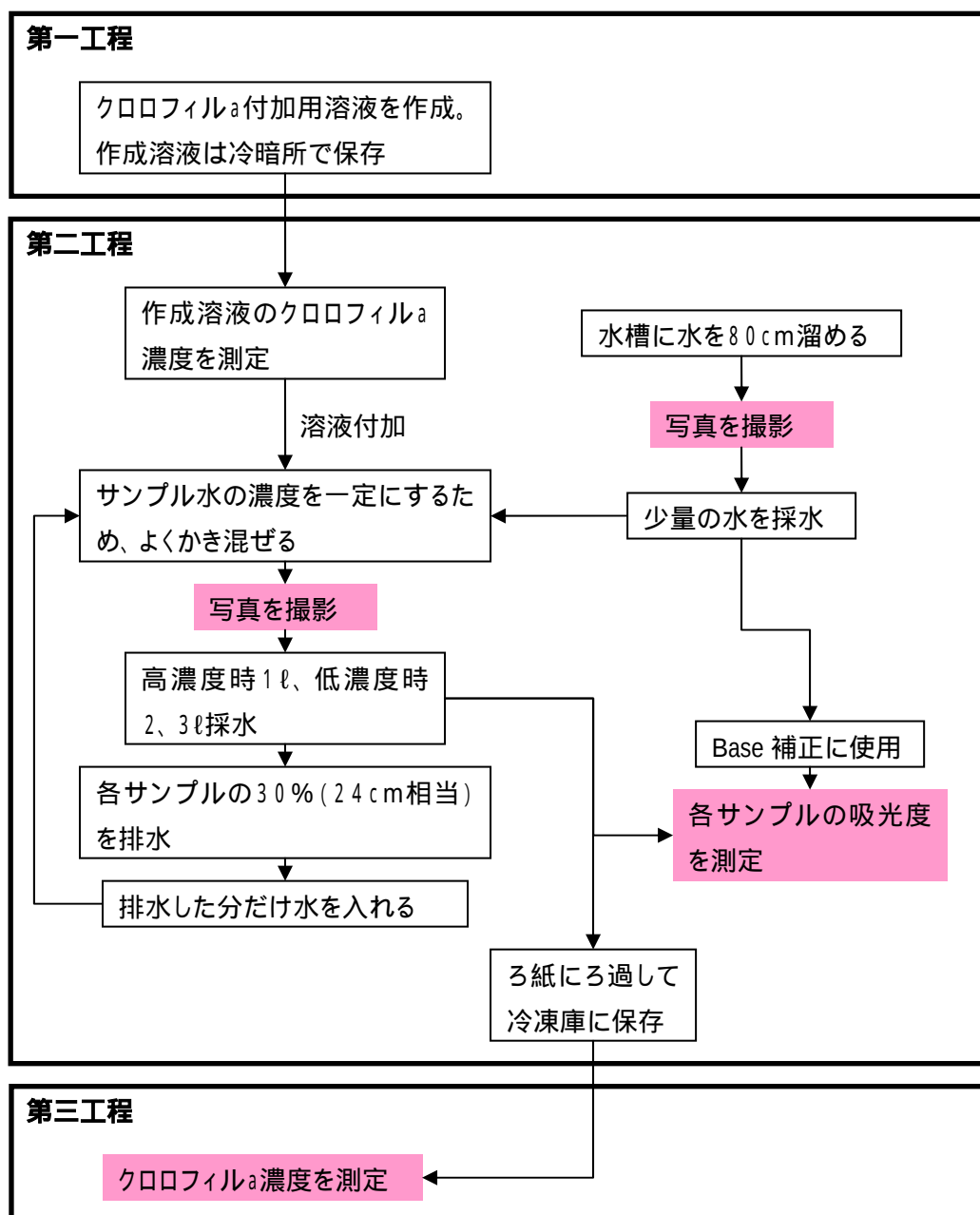
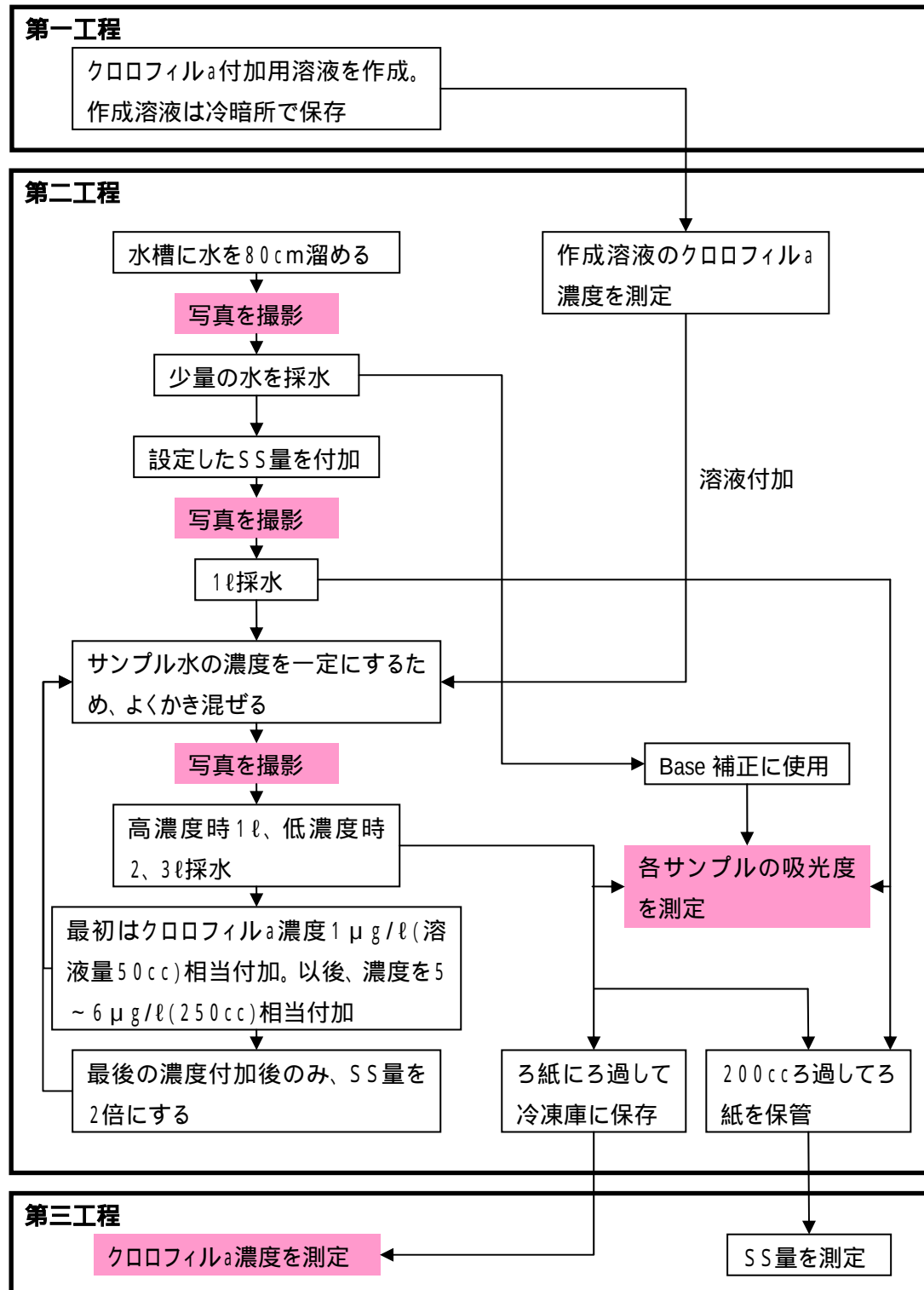


表 6 実験 2 の実験手順



5.1.3 クロロフィルa付加用溶液の作成

本実験では大量の溶液を使用するため、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撹り潰し易いこと、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。現地データに基づき、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、上記3点の条件を満たす代用品としてハウレンソウを使用することとした。クロロフィルaの測定時に遠沈管内部の液が分離してしまうため、測定には確実に

上澄みのみを採取するよう、細心の注意を払う必要があるが、その点を除いては特に問題はないことが理由である。試験の際に測定したハウレンソウのクロロフィルa濃度を参考とし、付加用溶液の作成を行う。

作成材料・機材

- ・ハウレンソウ 3袋
- ・ガーゼ
- ・すり鉢
- ・すり棒
- ・ビーカー
- ・容量3ℓ以上の容器
- ・採水ピン(1ℓ) 3本
- ・蒸留水
- ・はかり

作成フロー

事前濃度測定による既知事項

事前測定により120ℓ時、約60gで
濃度60 $\mu\text{g}/\ell$ 相当と判明

溶液作成工程

ハウレンソウの茎を切り、葉
のみの重さを測定

細かく搗り潰す

蒸留水を加え、ガーゼを使
って濾す

ガーゼの厚さを倍にして、
大容器に濾す

溶液が3ℓになるよう、足りな
い分だけ水を加える

採水ピンに作成溶液を移して、
冷暗所で保存



付加用溶液の原液

155倍希釈時の濃度を想
定しているため

クロロフィルaの減退を防止するため

翌日作業工程

溶液の濃度を測定



155倍希釈後の溶液

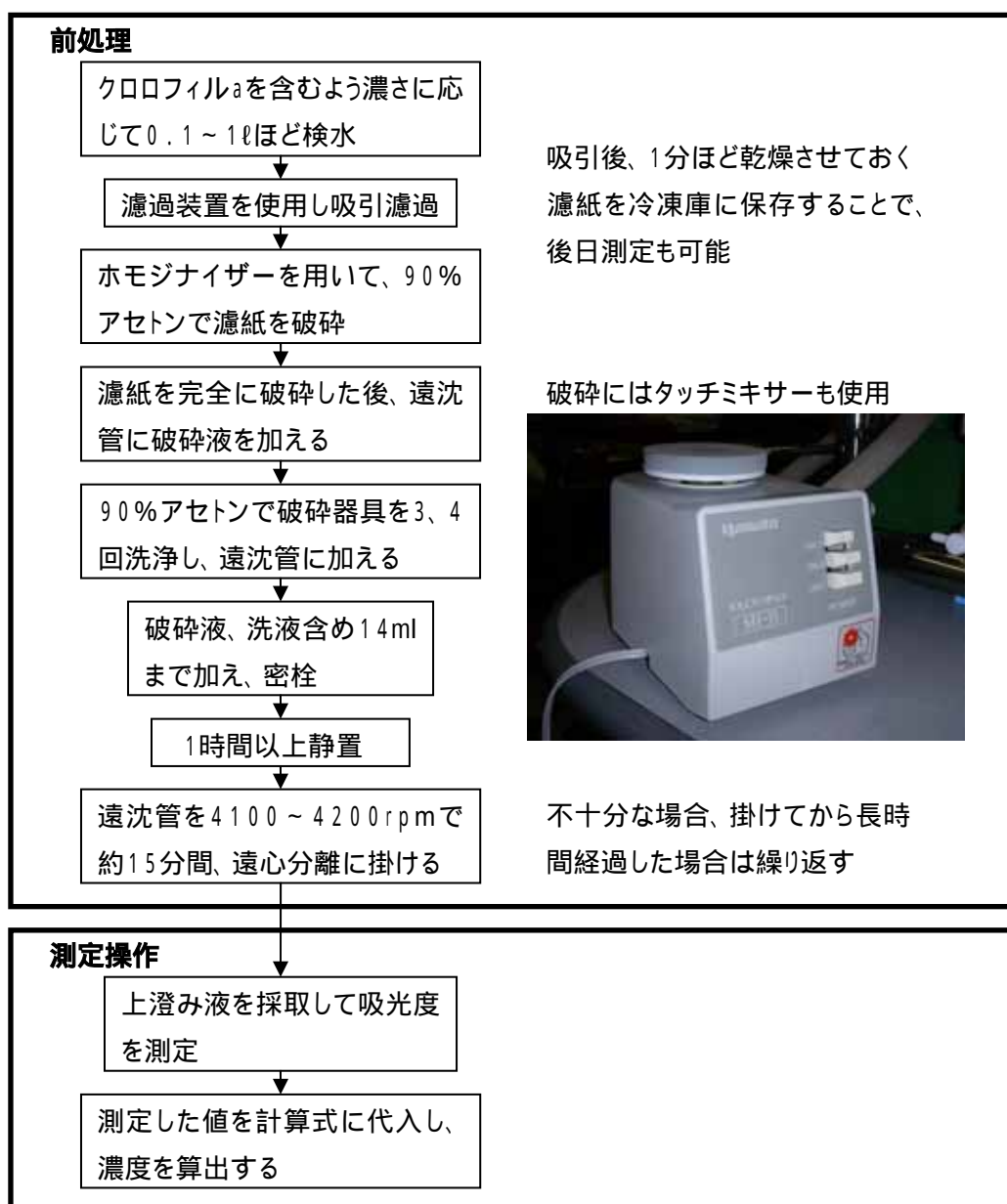
5.1.4 クロロフィルa測定方法(三波長吸光光度法)

クロロフィルは、可視領域において強い吸光特性をもっていて、その吸収極大波長や吸光係数はクロロフィルの種類(a、b、c等)によって異なる。そこで、前処理によって得た検液中のクロロフィルを吸光光度法により波長750nm、663nm、645nm、630nmの各吸光度を測定することによって、試料中のクロロフィル濃度を求めることができる。

作成材料・機材

・検水用サンプル ・吸引濾過装置一式 ・ホモジナイザー ・90%アセトン
・遠沈管 ・遠心分離機 ・吸光光度計 ・ピンセット

試験操作フロー



クロロフィルa計算式

クロロフィルa ($\mu\text{g}/\ell$) =

$$((11.64 \times (b - a) - 2.16 \times (c - a) + 0.10 (d - a)) \times \text{検液量} / \text{検水量}) / \text{セル長}$$

単位: 検液量(ml) 検水量(ml) セル長(cm)

a	750nm吸光度	b	663nm吸光度
c	645nm吸光度	d	630nm吸光度

濾過装置一式



濾過の様子



濾過後の濾紙



破碎中の様子



タッチミキサー使用



遠沈管に試料を入れた直後



使用する遠心分離機



遠心分離後の試料



測定前に石英セルに採取



5.1.5 吸光度の測定方法

吸光度とは、光が物質を通過するときの光の吸収量を示す値である。これを可視領域において測定することで、試料中に含まれる色素の強弱を見ることができる。今回は、各サンプルの吸光度、クロロフィルa濃度の測定のために吸光度の測定を行う。吸光度の測定には分光光度計



(島津製作所製UVmini-1240V)を使用した。機器の仕様、および測定手順は下記の通りである。

測定機器詳細

品名 UVmini-1240V

ハードウェア仕様(可視モデル)

- ・測定波長範囲 325nm～1100nm
- ・スペクトルバンド幅 5nm
- ・波長表示 0.1nm単位
- ・測光レンジ 吸光度:-0.3～3.0Abs 透過率:0～200%
- ・記録レンジ 吸光度:-3.99～3.99Abs 透過率:-399～399%
- ・ベースライン安定性 0.001Abs/h以内
- ・ベースライン平坦度 ± 0.010 Abs以内
- ・光源 20Wハロゲンランプ
- ・大きさ 幅416×奥行379×高さ274mm
- ・重さ 11kg

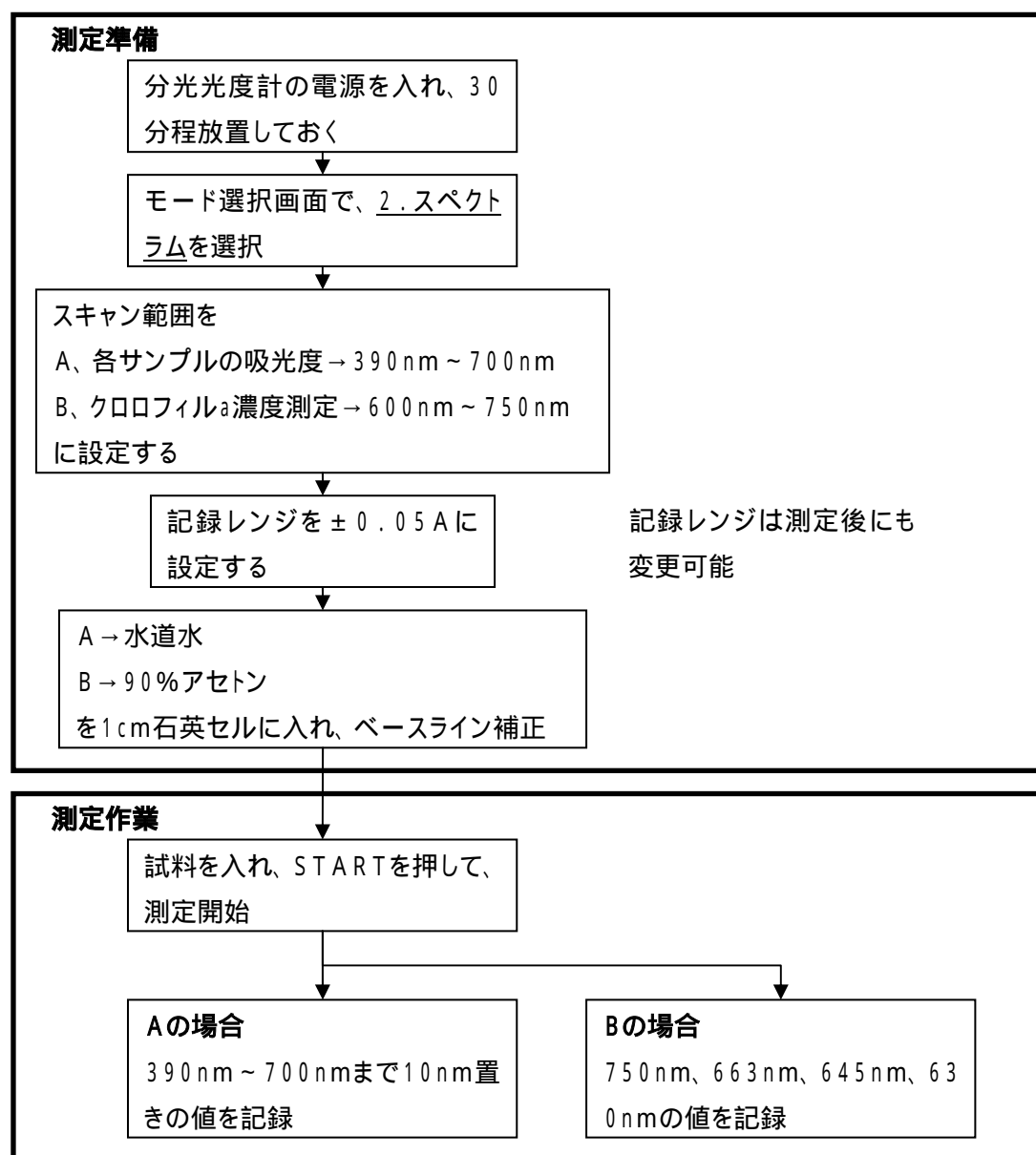
ソフトウェア仕様(スペクトラム)

- ・スペクトル測定
 - 測光モード : ABS、T%、E
 - スキャン速度 : 超高速、高速、中速、低速、超低速
 - スキャン繰り返し回数 : 1～99
 - 記録方式 : 重ね書き/更新書き選択可能
- ・スペクトルのデータ処理機能
 - ピーク/バレイの検出 (ともに20個まで可能)
 - 拡大縮小 (縮小については縦軸のみ)
 - カーソルキーによるデータの読み出し
 - データの保存/呼び出し機能 (本体:6、データパック:21)

作成材料・機材

- ・測定試料 水道水 90%アセトン
- ・分光光度計 1cm石英セル (プリンター)

測定手順フロー



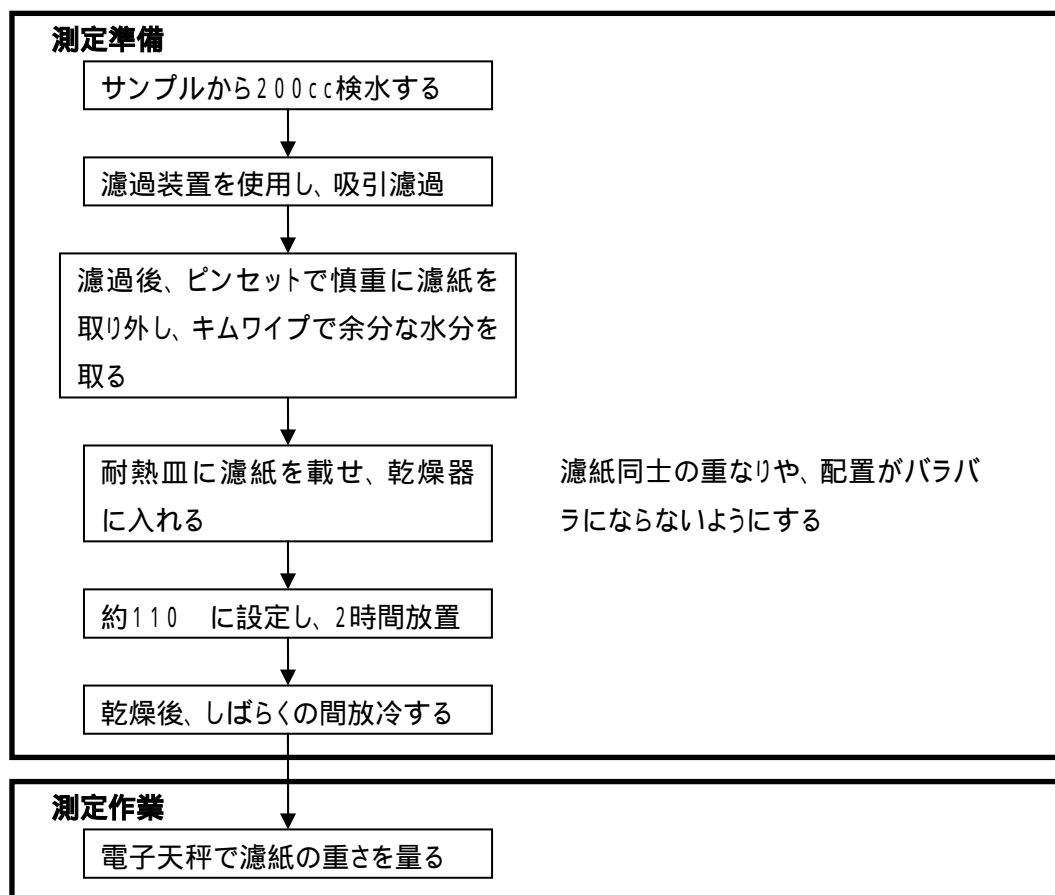
5.1.6 濁度測定方法

濁度は浮遊物質（SS）として、ガラス繊維濾紙を濾材として使用するGFP法（GFP, glass fiber filter paper）で測定した。使用する機材、手順を以下に示す。

作成材料・機材

- ・濾紙 ・濾過装置一式 ・メスシリンダー ・乾燥器 ・電子天秤
- ・耐熱皿 ・ピンセット ・キムワイプ

測定手順フロー



SS量計算式

$$SS(mg/l) = (a - b) \times \frac{1000}{V}$$

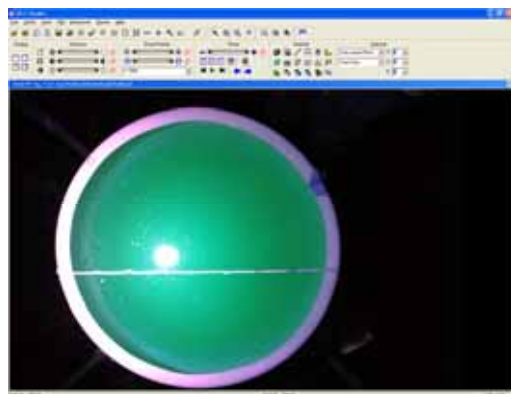
a: 検水濾過後のSSを含んだGFPの質量(mg)

b: 検水濾過前のGFPの質量(mg)

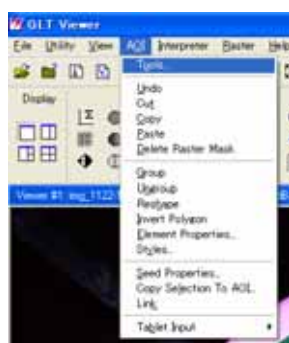
V: 検水量(ml)

5.1.7 画像解析方法

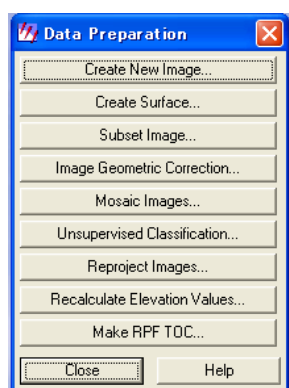
取得したデジタル画像のDNを読み取る手法として、ERDAS IMAGINEという画像解析ソフトを使用し、以下の手順で行った。



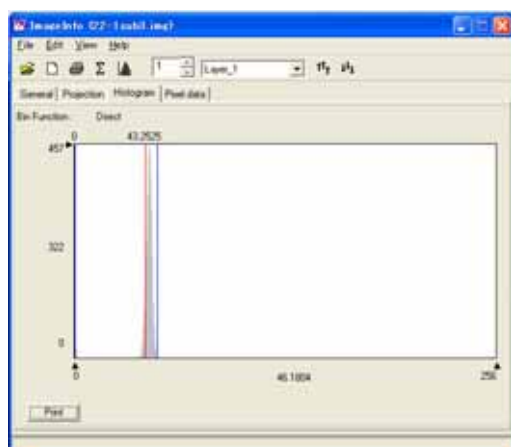
1、取得したjpgデータをERDAS IMAGINE上でimportすることで、imgデータに変換する。左図は実験1のサンプル1のimgデータである。尚、jpgデータと色が変わっているのは、フォールスカラーで表示されているためである。



2、メニュー上でAOI→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、Data Drop→Subset Imageをクリックする。必要事項を入力後、選択した部分のみの画像が作成される。



4、フォールスカラーをナチュラルカラーに変換後、メニュー上でヒストグラムを呼び出し、各RGBの画素のピークのDNを読み取る。

6. 吸光度と分光反射率との関係

吸光度と分光反射率の関係の検証には、図-7と測定した吸光度との相関によって検討した。各サンプルの吸光度測定では、水道水の吸光度をベースライン補正で0とした。

分光反射率については、既存研究のグラフデータより数値を読み取った値を採用している。また、吸光度の波長については390nm～700nmまでの全ての可視領域の読み取りを行っているが、分光反射率のデータには、下限の波長が450nmとなっているため、比較をする際には450nm～700nmまでの範囲で行うこととした。

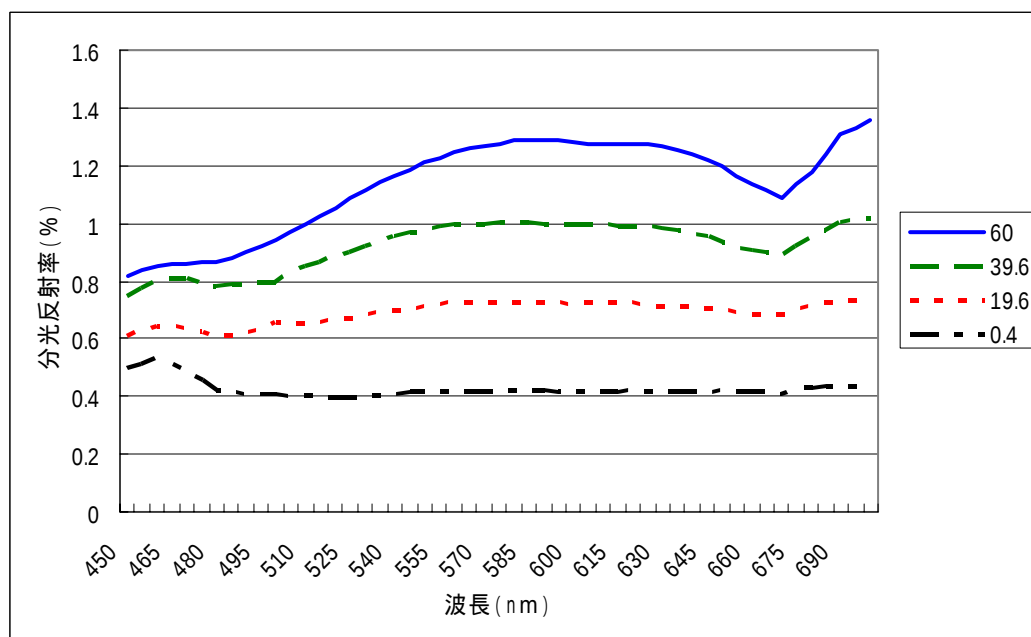


図-12 可視領域における分光反射率

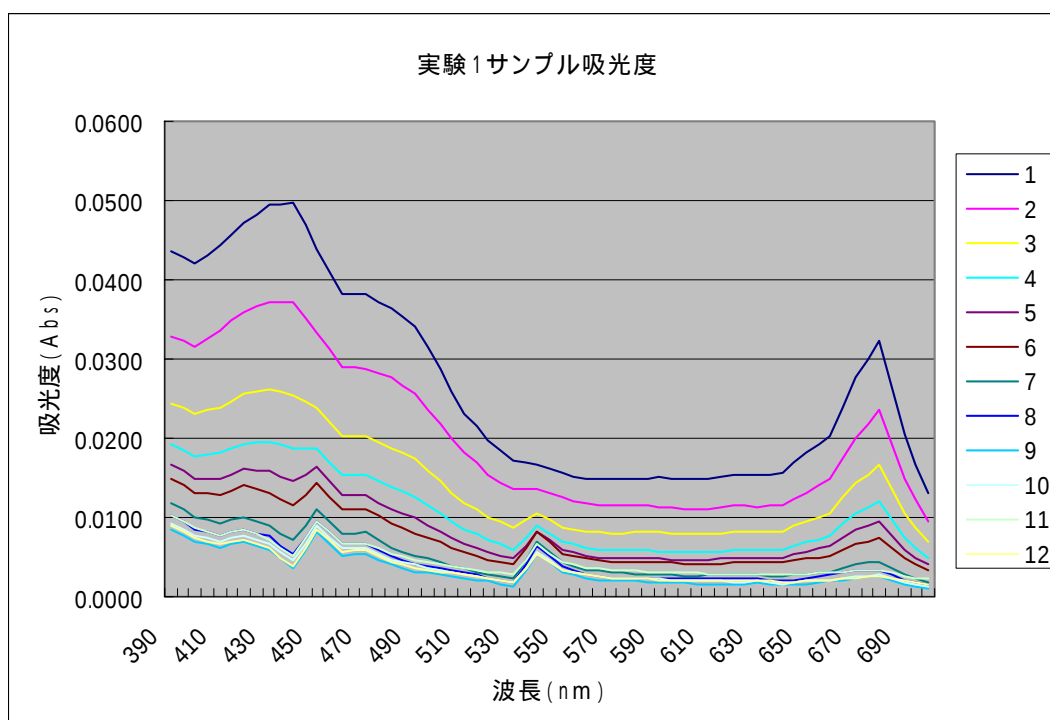


図-13 可視領域での吸光度

各クロロフィル濃度での分光反射と吸光度を示したのが図-12,13 である。

図-12 の濃度と同程度での吸光度だけを図示したのが図-14 である。同程度の濃度での双方のデータの相関を見ると、60 $\mu\text{g}/\ell$ 程度のサンプルで相関係数が (-0.90)、39 $\mu\text{g}/\ell$ 程度のサンプルで相関係数が (-0.91)、19 $\mu\text{g}/\ell$ 程度のサンプルで相関係数が (-0.83)と、濃度の比較的高いサンプルでは、各濃度の

分光反射率と吸光度は (-1) に近く、強い負の相関が見られた。これは、反射、吸収の関係を示していると考えられる。他方、吸光度は低濃度と高濃度の場合で相似な分布形をしているが、分光反射率の分布形が低濃度では高

表7 サンプル番号とクロロフィル濃度

サンプルNo	クロロフィルa濃度 ($\mu\text{g}/\ell$)
1	60.6914
2	37.7342
3	21.8453
4	13.3224
5	7.475
6	3.56586
7	1.34361
8	0.3977
9	0.1136

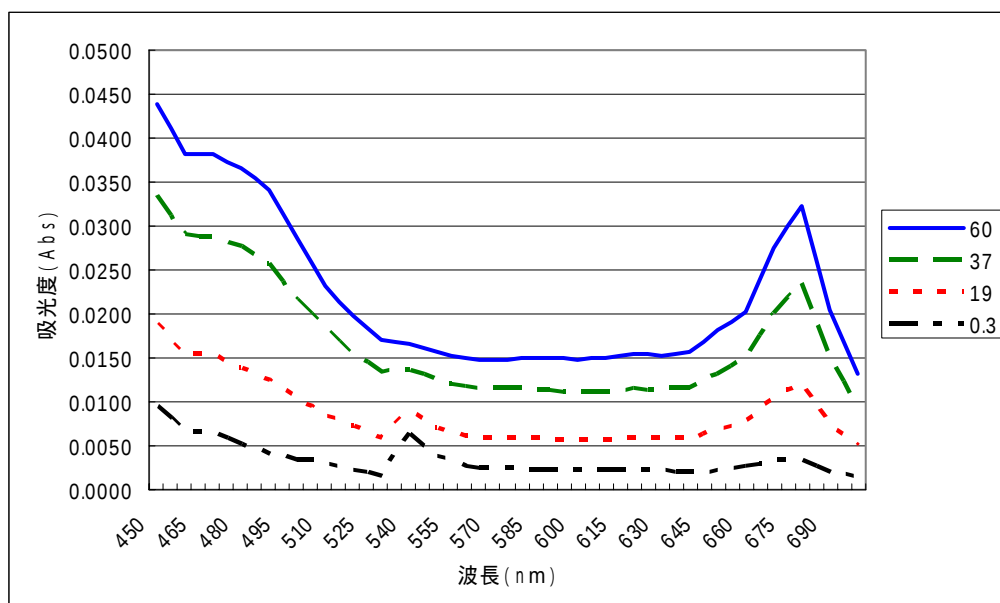


図-14 図-12 と同程度での吸光度

濃度と異なるため、0.4 $\mu\text{g}/\ell$ 程度のサンプルでは、吸光度との相関が (0.73) と正の相関になった。これは、低濃度になると反射と吸収の測定結果が異なることを示しており、吸光度測定から分光反射スペクトルの形を推定する際には、注意が必要なことを示唆している。しかし、図-12 ではクロロフィル濃度 19 $\mu\text{g}/\ell \sim 0.4 \mu\text{g}/\ell$ の間のデータが無いので、どの濃度で分布形が変化するかはさらに検討が必要である。

図-12、14 を比較すると反射、吸収の負の相関を示しており、吸光度からスペクトル密度関数を推定できる可能性を示唆しているが、各波長での吸光度、分光反射率のレベルは濃度が高いほど高く、単純に差では表現できない。吸光度と分光反射との関数関係の決定のためには、吸光度と分光反射率との同時の測定データを用いての詳細な検討が必要である。

濁度を付加した場合での吸光度の変化を示したのが図-15 である。濁度を付加することで、試料中の吸光度を測定して濃度を算出するという測定機器の特性上、濁度付加による色素が濃度測定に影響を与えてしまうことが考えられる。そのため、作成溶液の濃度測定の際、付加なしの実験に比べ、測定サンプルを多く取り、濃度測定を行った。実際に測定をすると、クロロフィルa濃度測定が難しいハウレンソウ製の付加用溶液に、絵の具によるSSを付加したことで、吸光度にばらつきが生じてしまい濃度が非常に不安定なものとなった。よって、事前に想定したように、実験前に行う付加用溶液の原液の濃度測定を複数のサンプルで行い、付加用溶液3 ℓ 付加したとき、64.503 $\mu\text{g}/\ell$ となるクロロフィルa濃度を

基準とした。但し、サンプルごとの濃度の幅を考慮し、実験では 2ℓ使用した。

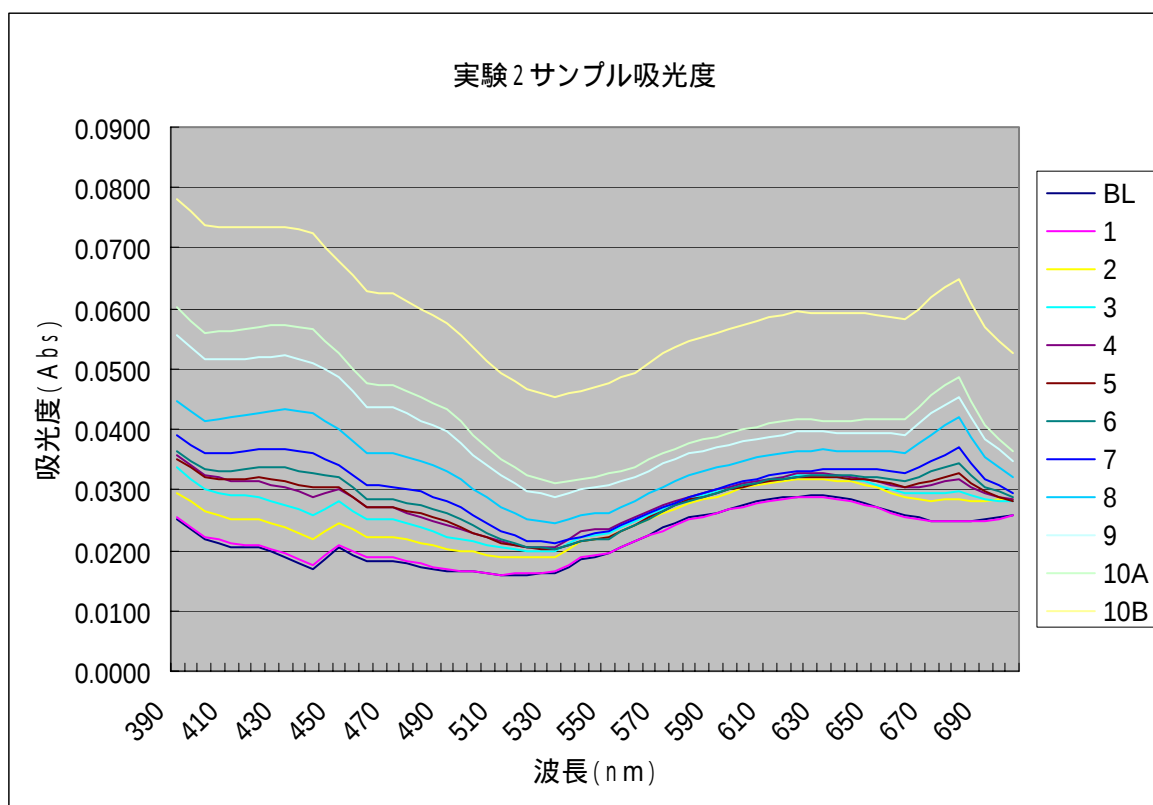


図-15 濁度混濁での吸光度

BL……SS付加のみの状態

10B……10AサンプルのSSを2倍にしたもの

図-15のサンプル8と図-13のサンプル2はクロロフィル濃度がほぼ同程度の値でのケースである。この2ケースを比較すると吸光度の分布形に差があり、クロロフィルと濁度とを分離して評価できる可能性をこの図は示唆している。しかし、スペクトル密度関数への変換が現時点では出来ないために、デジタルカメラでのDNを用いての分離した評価式にまで至っていない。

実験2でのサンプル番号とクロロフィルa濃度

サンプルNo	クロロフィルa濃度 (μg/ℓ)
1	1.0757
2	5.3785
3	10.757
4	16.1355
5	21.514
6	26.8925
7	32.271
8	37.6495
9	43.028
10-A	48.4065
10-B	48.4065

6.1 クロロフィルa濃度とRGB値との関係

クロロフィルa濃度とRGBの値の関係の検証には、濁度付加なしの実験での各サンプルのデジタル画像、およびクロロフィルa濃度の実測値を用いた。

デジタル画像に関しては、1サンプルにつき4～8枚の撮影を行い、その中から1枚を選定し、画像解析をすることとした。クロロフィルa濃度は、前出の実験1の採用データを用いて分析を行った。

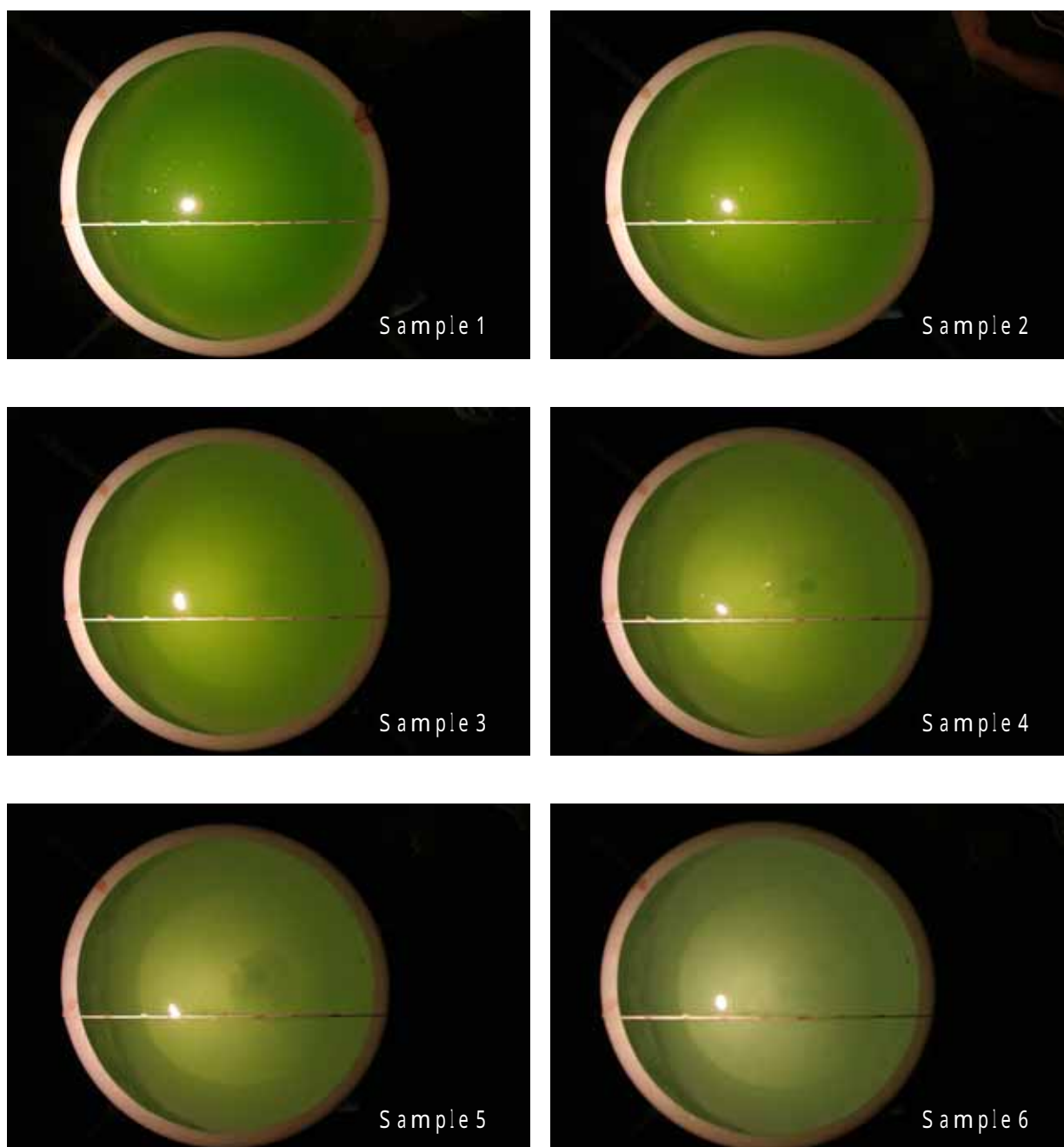


図-16 実験水槽での画像の様子

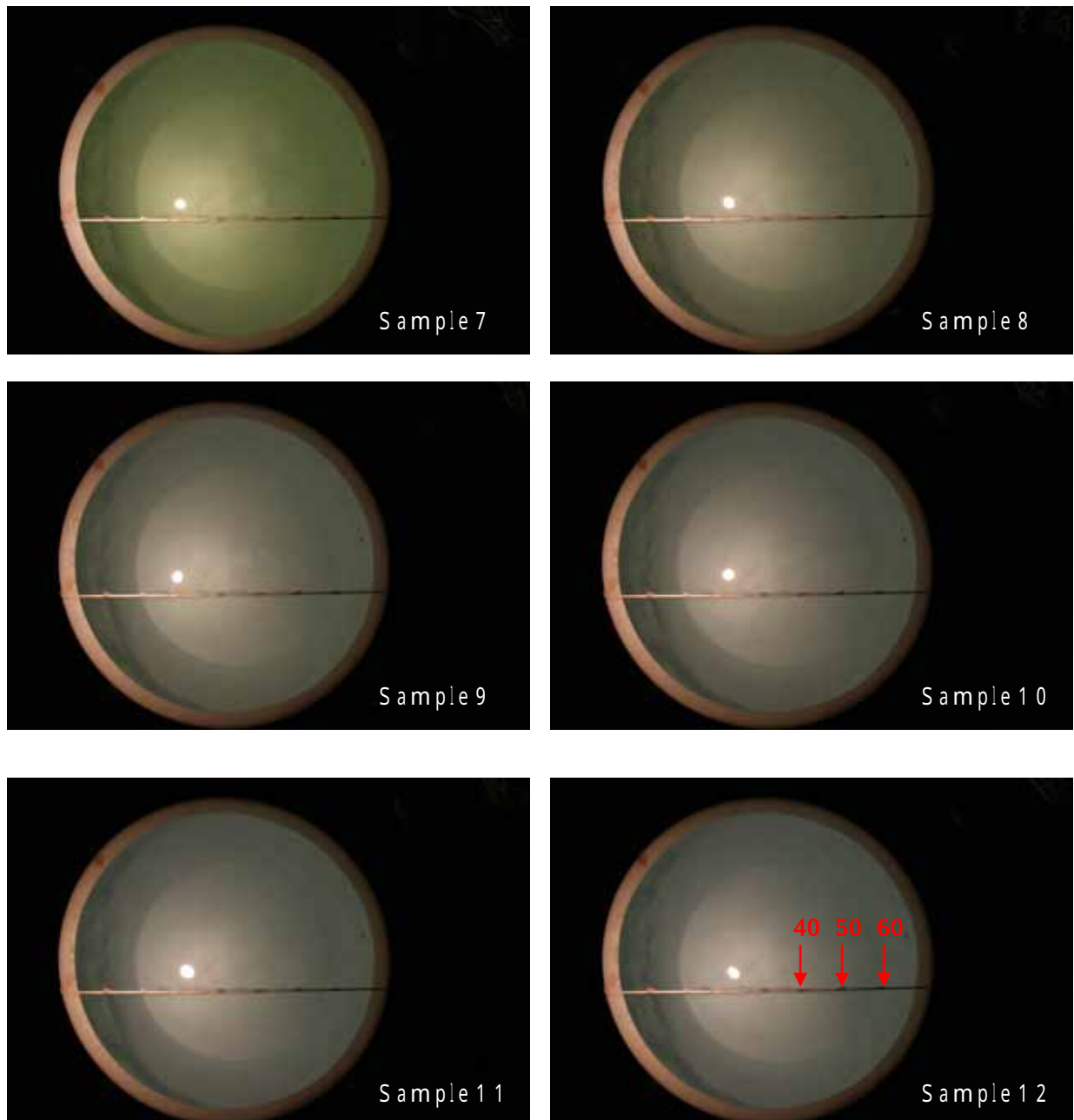


図-17 実験水槽での画像の様子

実験1では、最初のサンプルから濃度を30%ずつ減少させる方法で行っているため、徐々に色素が薄くなっていく様子を見て取ることができる。尚、水槽中央付近のラインは、光源直下からの距離を示すものである。実際には光源とカメラの位置関係により、水面に映る光は光源直下より20cm程右に移動しているが、分析には、この距離を基準として行った。また、サンプル内の濃度を一定にするためよくかき混ぜ、かつ、水面からの乱反射の影響を防ぐため、できる限り水面の変動が収まった状態のときに撮影を行った。

6.1.1 光源からの距離とDN値

実験室では光源の影響が強く出るので、光源のDNに及ぼす影響について検証した。ERDAS IMAGINEを使い、デジタル画像からDNを読み取る。読み取りの際に、光源からの距離ごとに微小範囲を取り、その範囲内での各RGBのDNのピーク値を分析に使用した。光源直下からの距離ごとにクロ

ルフィル濃度とDN値を示したのが図-18である。

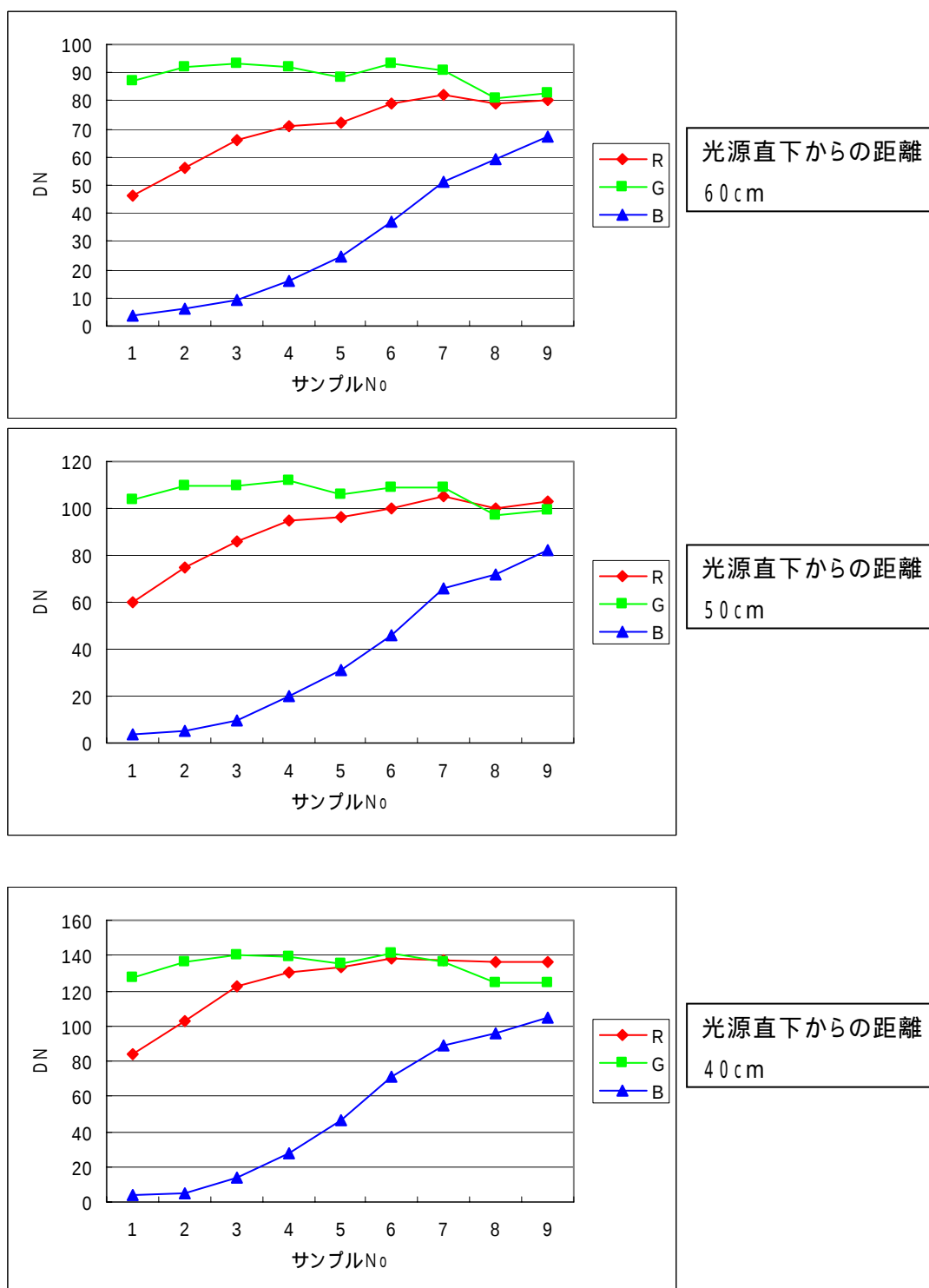


図-18 光源からの距離の影響

次に、このデータをもとにサンプルごとのRGBのDNとクロロフィルa濃度の関係を見るため、DNをX軸、クロロフィルa濃度をY軸にとり、散布図を作成した。これをRGBの画素、光源直下からの距離ごとに分類すると図-19となる。

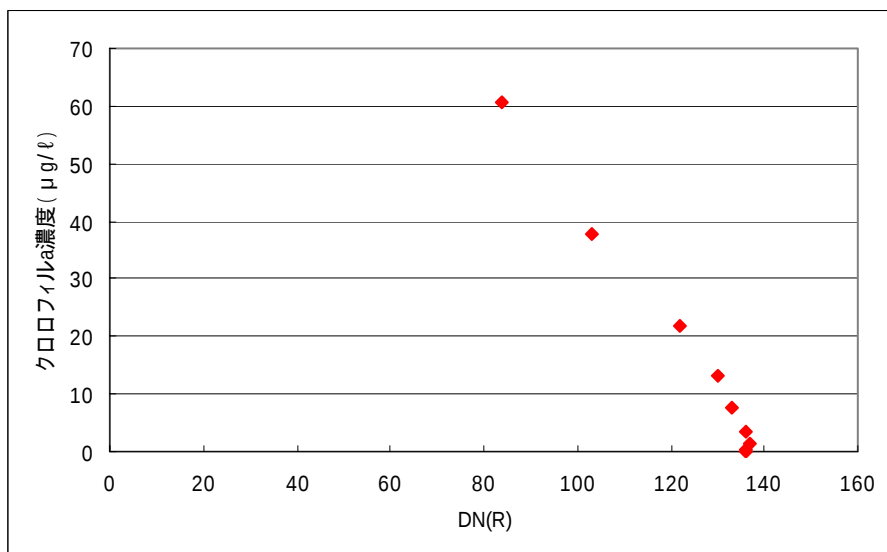
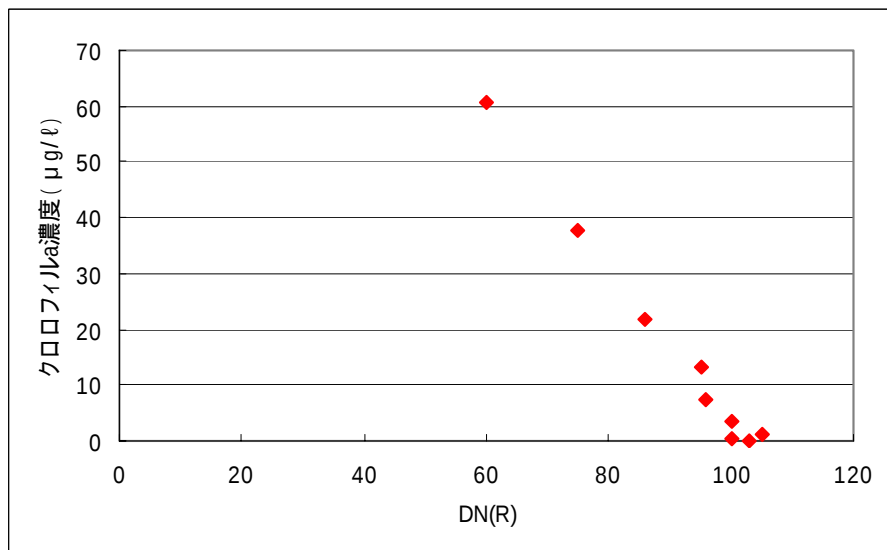
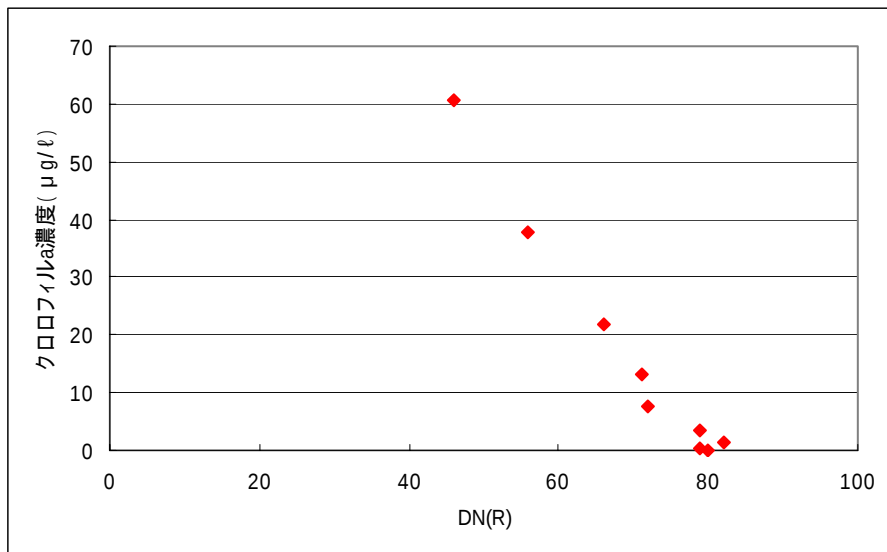
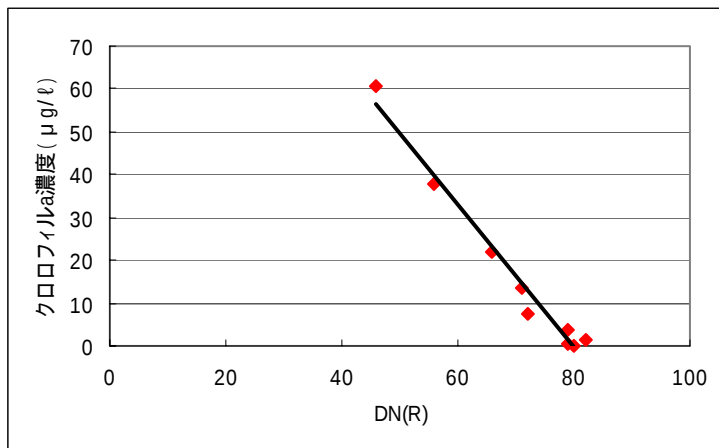


図-19 DN (RED) とクロロフィルa濃度の関係

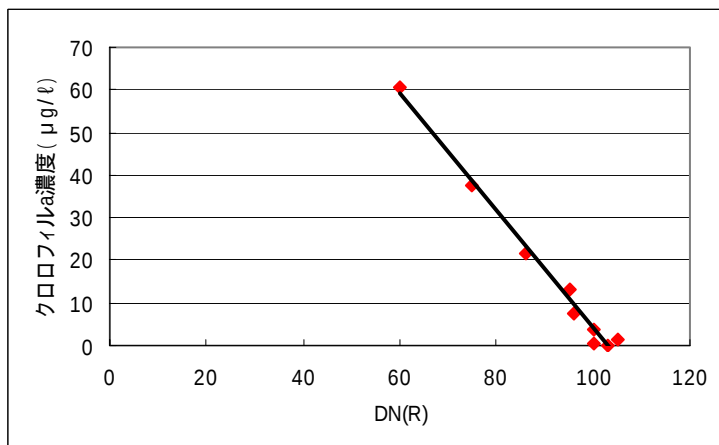
Rの傾向として、光源に近づくにつれ、全サンプルでDNが20～30上昇している。クロロフィルa濃度、DNの変化の傾向としては、全ての距離において、DNが上昇することで、クロロフィルa濃度が減少していることを見て取ることができる。また、光源からの距離ごとにDNとクロロフィル濃度との相関関係は線形近似求めることが出来る。しかし、近似式に距離の変数を入れるまでに至らなかった。

光源直下距離ごとの近似曲線と近似式



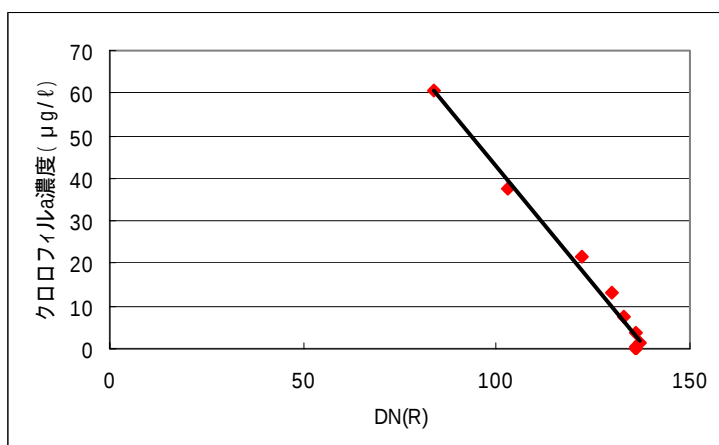
$$Y_{R60} = -1.6743X + 133.67$$

$$R^2 = 0.9747$$



$$Y_{R50} = -1.3806X + 142.06$$

$$R^2 = 0.9866$$



$$Y_{R40} = -1.1099X + 154.02$$

$$R^2 = 0.987$$

同様にG, Bについても整理したのが図 20、21 である。

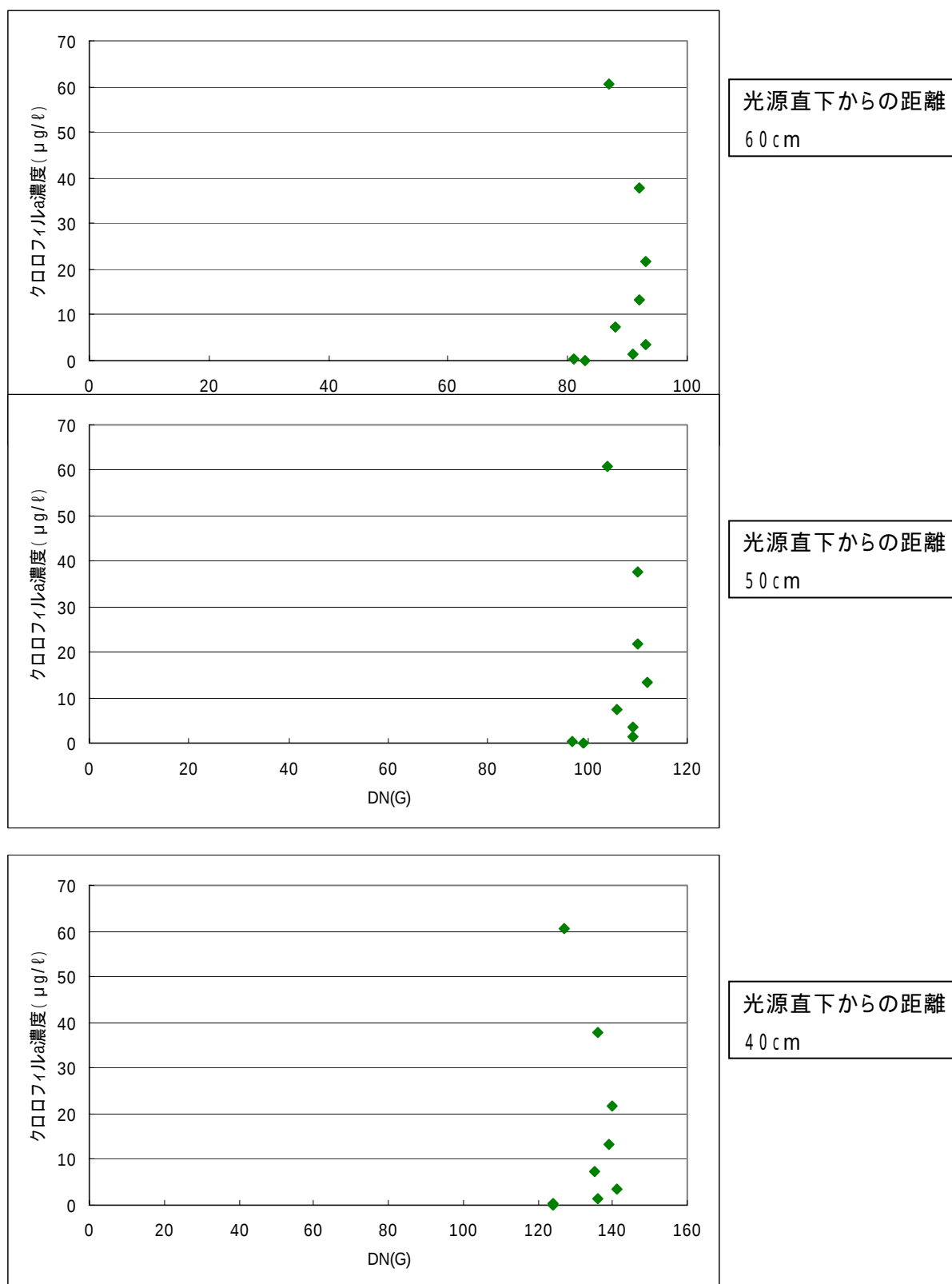


図-20 DN (GREEN) とクロロフィル a 濃度の関係

Gの傾向は、光源が近づくにつれ全サンプルでDNが20～30上昇している点はRと同様である。しかし、DNとクロロフィルa濃度の関係は、散布状態を見ただけでは傾向がつかめないものとなっている。これは、

少なくとも本実験においては、GのDNは濃度による影響を受けていないと思われる。

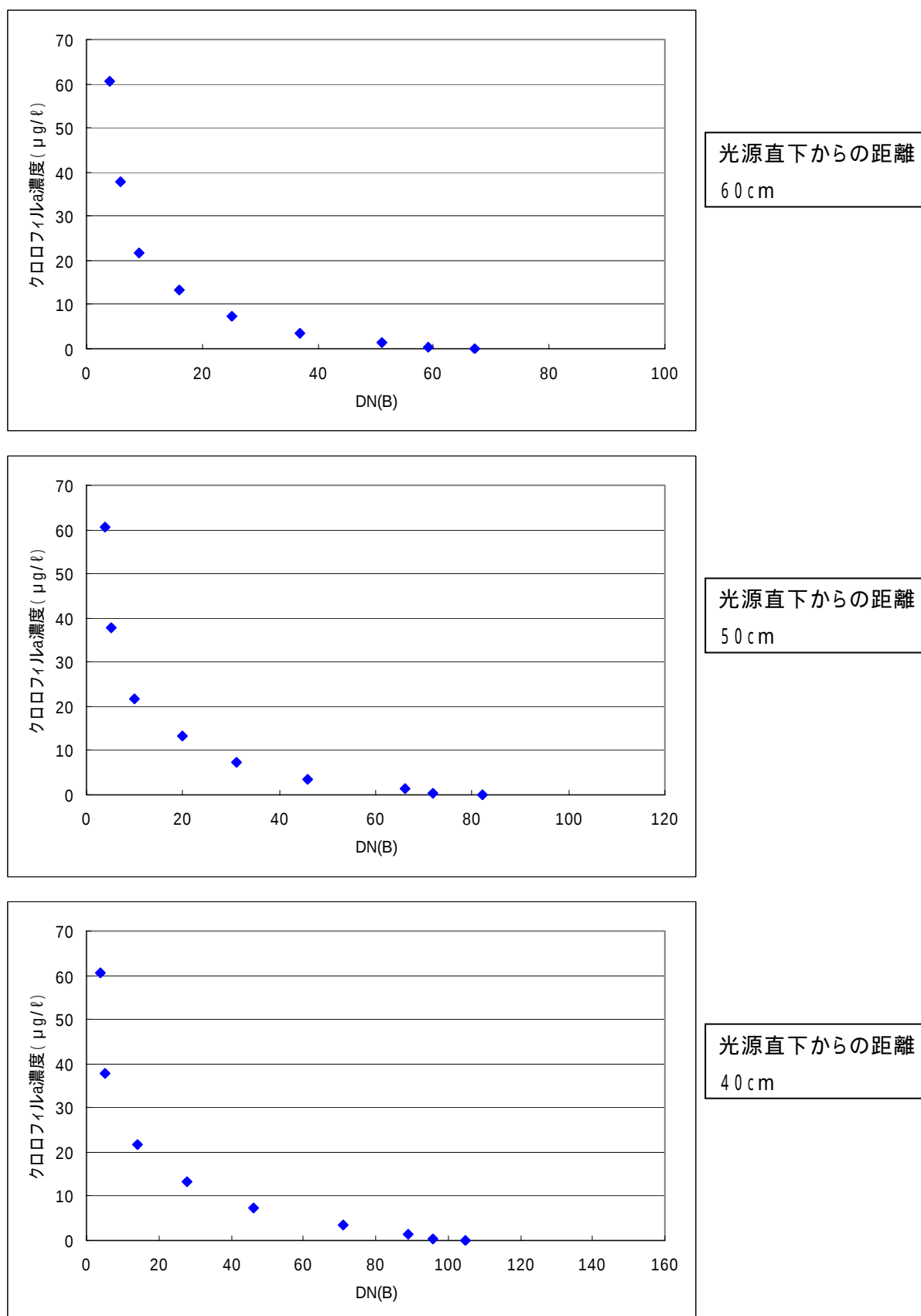
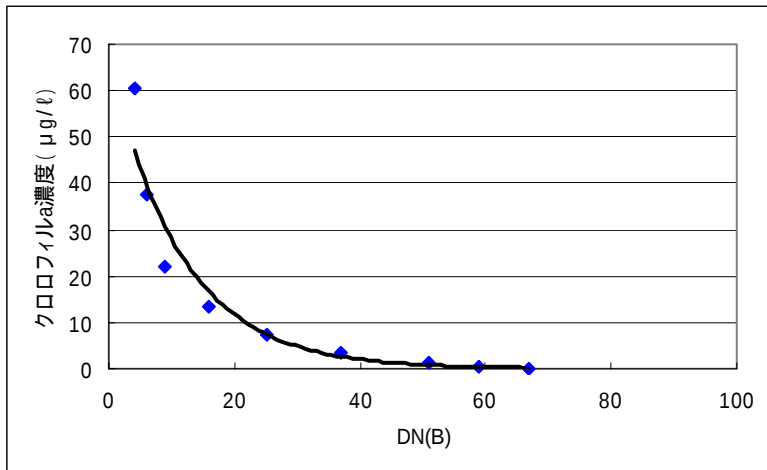


図-21 DN (B L U E) とクロロフィル a 濃度の関係

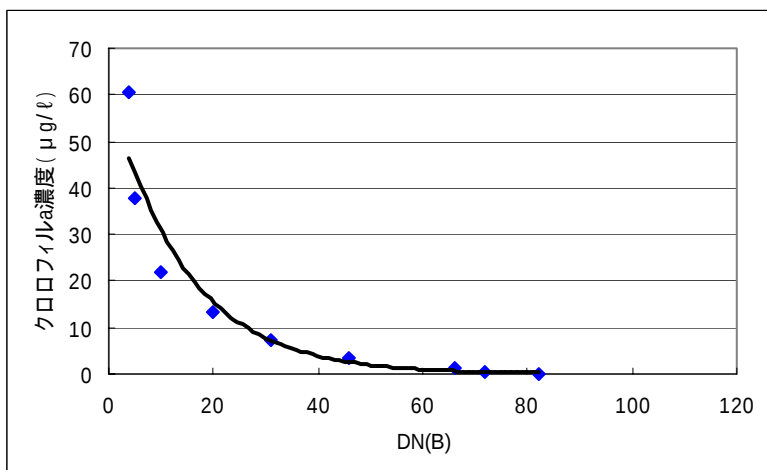
B に関しても、R、G と同様の DN の上昇が見られる。クロロフィル a 濃度、DN の変化の傾向としては、DN が上昇するにつれ、クロロフィル a 濃度が減少している。また、DN の上昇幅が大きくなるにつれ、濃度の減少幅が小さくなっていることから、反比例関係が成り立っているといえる。そのため、B では指数近似を用いることでモデル式の作成を行った。

光源直下距離ごとの近似曲線と近似式



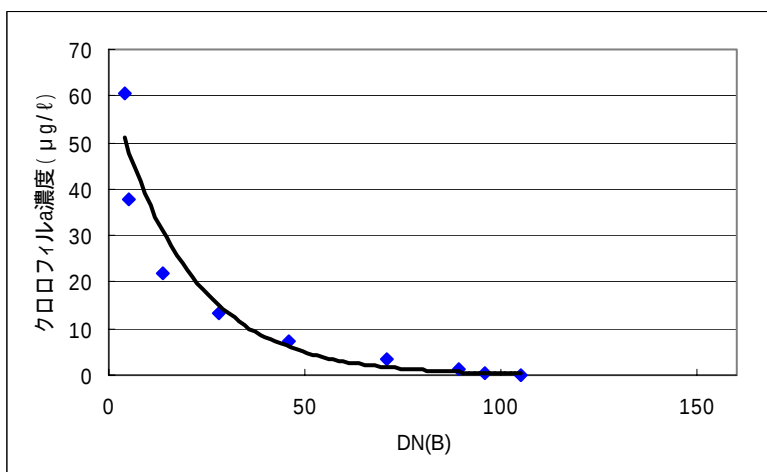
$$Y_{B60} = 67.034e^{-0.0874X}$$

$$R^2 = 0.9754$$



$$Y_{B50} = 61.362e^{-0.0689X}$$

$$R^2 = 0.9645$$



$$Y_{B40} = 62.671e^{-0.051X}$$

$$R^2 = 0.9372$$

単色ごとのモデル式は、近似式であるため、各単色の誤差の大きい部分をカバーすることができないと共に、水面の色が単色で構成されることはほとんどなので、推定式の単純な平均を採って推定式の方が実用的では有る。

サンプルNo	R	G	B	推定値	実測値
1	56.6522	102.3872	47.25696	68.76546	60.6914
2	39.9092	47.82041	39.67812	42.46924	37.7342
3	23.1662	22.33474	30.52665	25.34253	21.8453
4	14.7947	10.43154	16.55685	13.9277	13.3224
5	13.1204	4.872098	7.539832	8.510777	7.475
6	1.4003	2.275536	2.64164	2.105825	3.56586
7	0	1.062799	0.777089	0.613296	1.34361
8	0	0.496385	0.3862	0.294195	0.3977
9	0	0.231839	0.191935	0.141258	0.1136

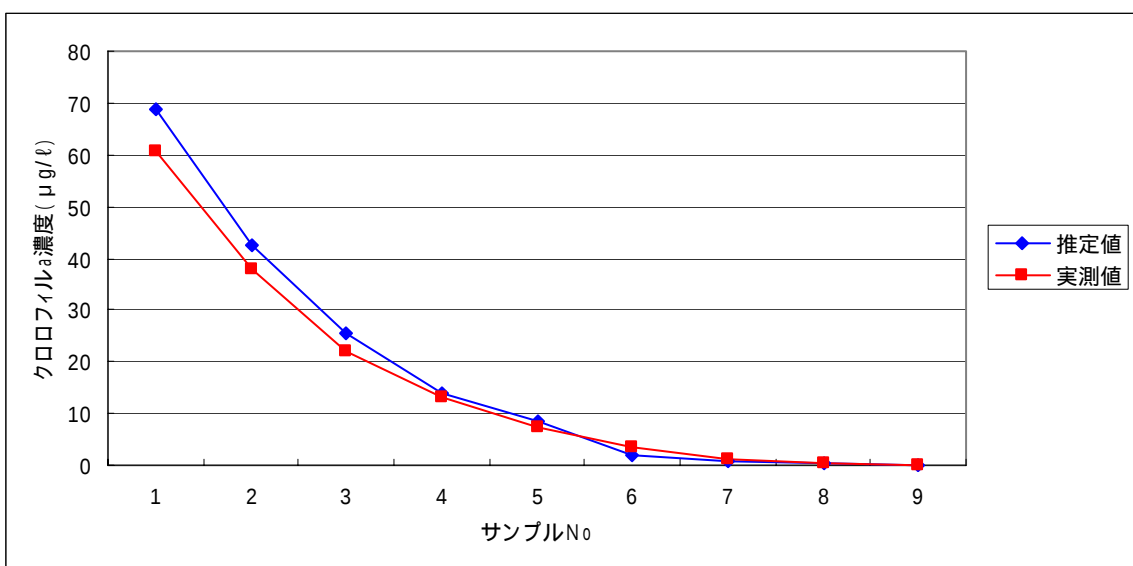


図-22 各推定式の単純平均の精度（光源から 60 c m のケース）

平均化することで、単色モデル式で生じた極端な誤差が打ち消され、すべての光源直下距離において、推定値は良好な結果を示している。また、光源直下距離によって光量の違いはあるが、それに伴ってモデル式が変わってくるため、どの光源直下距離でも推定濃度に大きな差は見られない。しかし、高濃度域では実測値よりも推定値の濃度が高いこと、低濃度域でも、推定濃度が安定しないという問題点も見えて取ることができる。これは、DNの最小の位が1であること、デジタル画像が光の影響を受けやすくなることから、正確なDNが反映されていないこと、単色でのモデル式の誤差を完全にはカバーできていないためと考えられる。

6.2 クロロフィル a 濃度と濁度付加時の DN の関係

S S の付加には絵の具を使用し、芝浦運河の DN (R : 1 6、G : 2 5、B : 3 6) を参考として、青 : 緑を 1 : 1 の割合で配合し、さらに少量の黒を加えたものを S S 付加に使用する。付加量は海における S S 量の基準データがないこと、今回の実験が、閉鎖性の湾の観測を目的にしていることから、湖沼における水質環境基準を参考とし、類型 B にあたる 15 mg/l を採用することとする。この量は本実験では青 3 g、緑 3 g、黒少量の 6 g 強の付加となる。

デジタル画像に関しては、濁度付加なしの実験と同様の方法で行い、クロロフィル a 濃度は、前出の実験 2 の採用データを用いて、分析を行う。

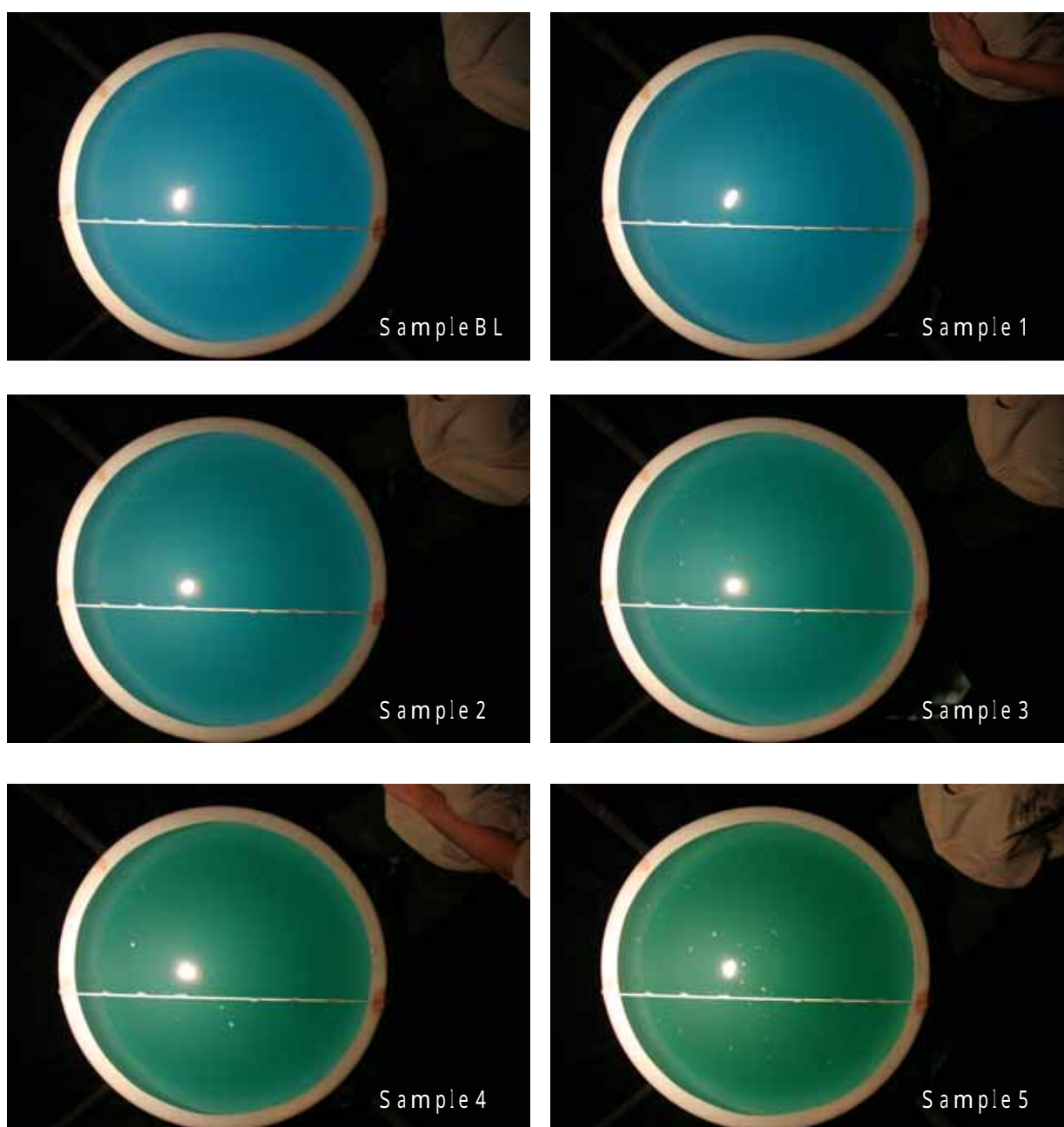


図-23 実験水槽の画像の様子（濁度付加有り）

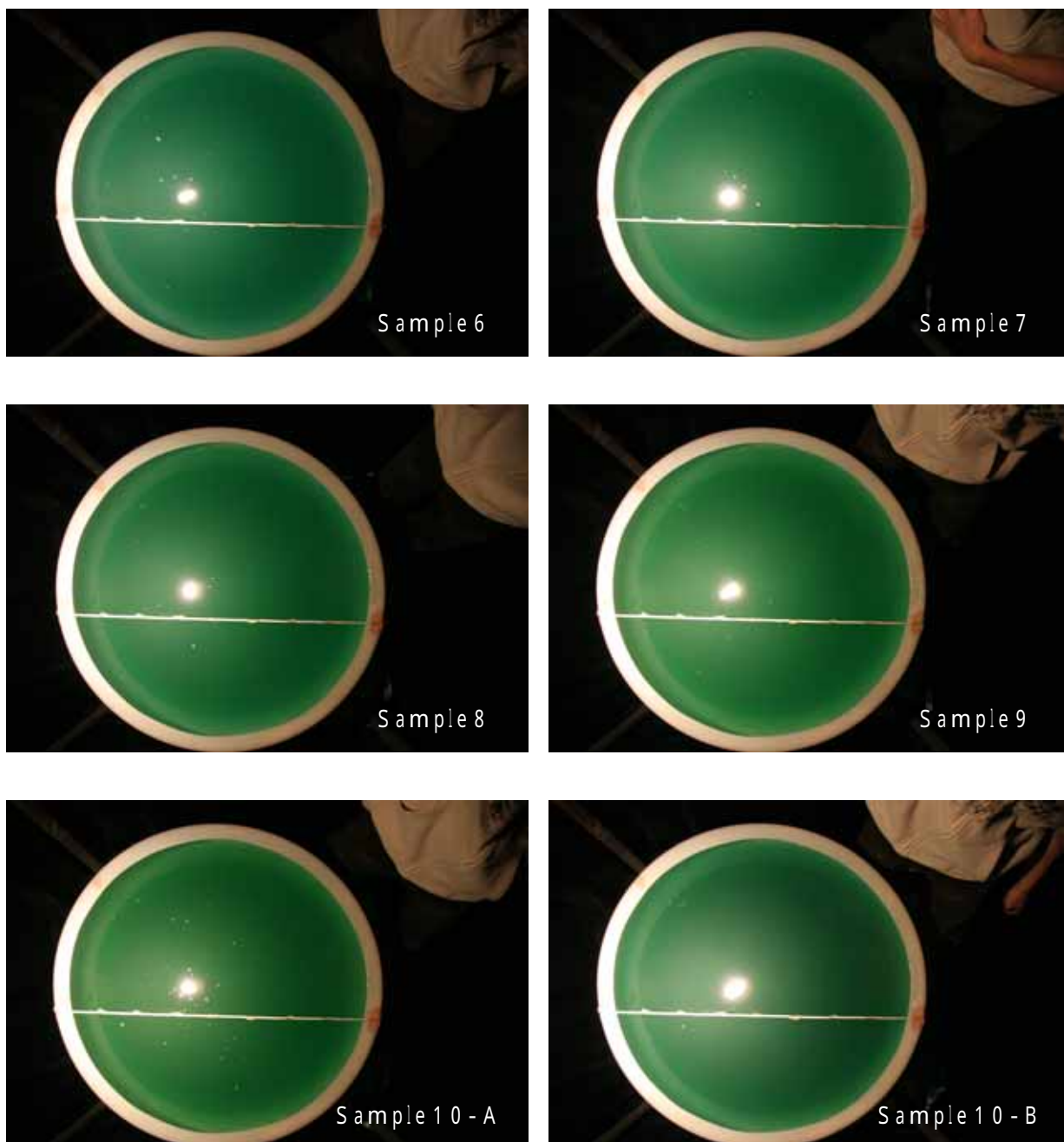


図-24 実験水槽の画像の様子（濁度付加有り）

実験 2 では、濁度付加によって濃度測定が不安定になることから、一定量ずつ濃度を付加していく方法を採用している。そのため、実験 1 とは逆に色素が濃くなっていく様子が見て取れる。撮影条件に関しては、実験 1 と同様の方法で行った。

6.2.1 光源からの距離とDN値

分析手順に関しては濁度なしの実験 1 と同様である。

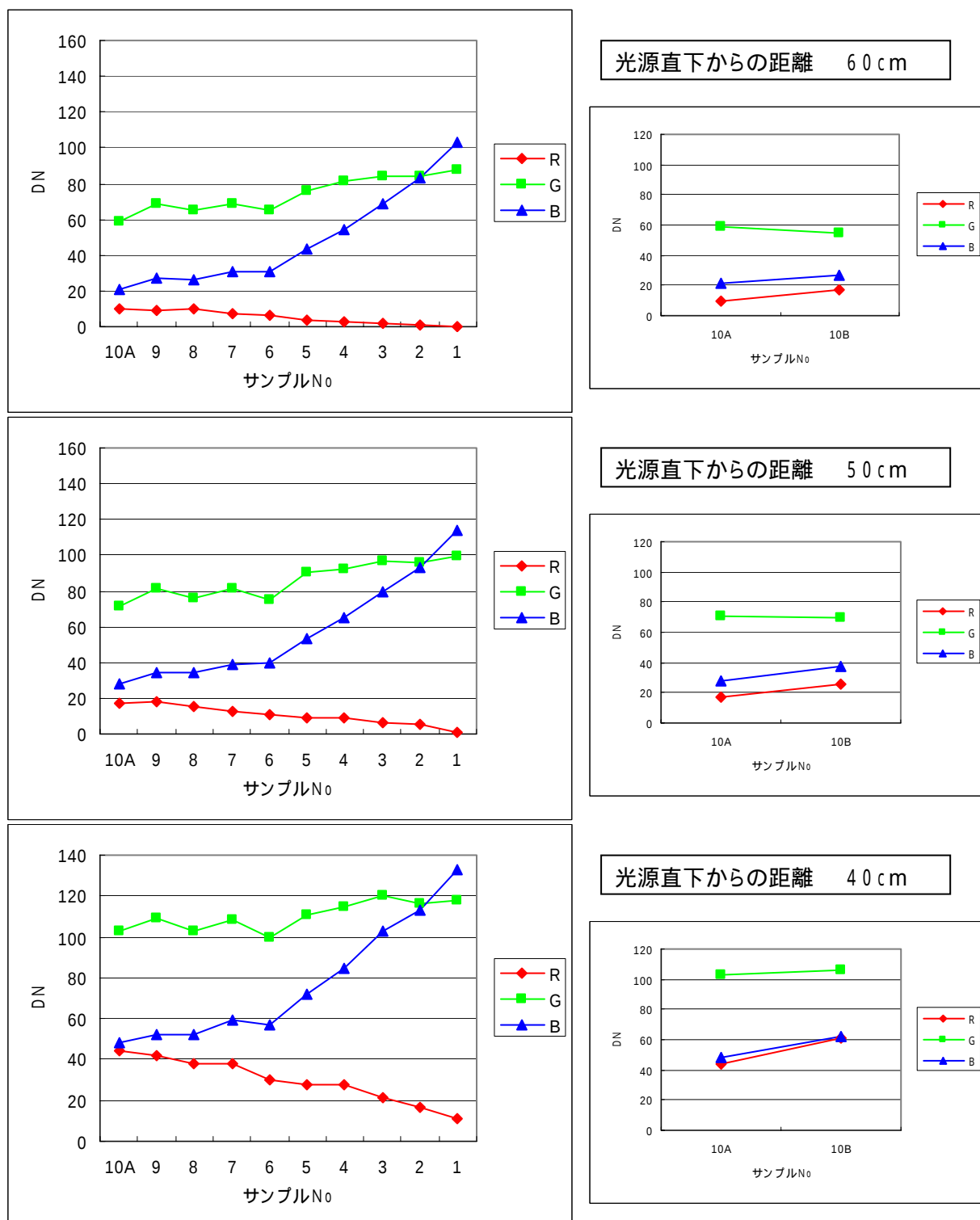
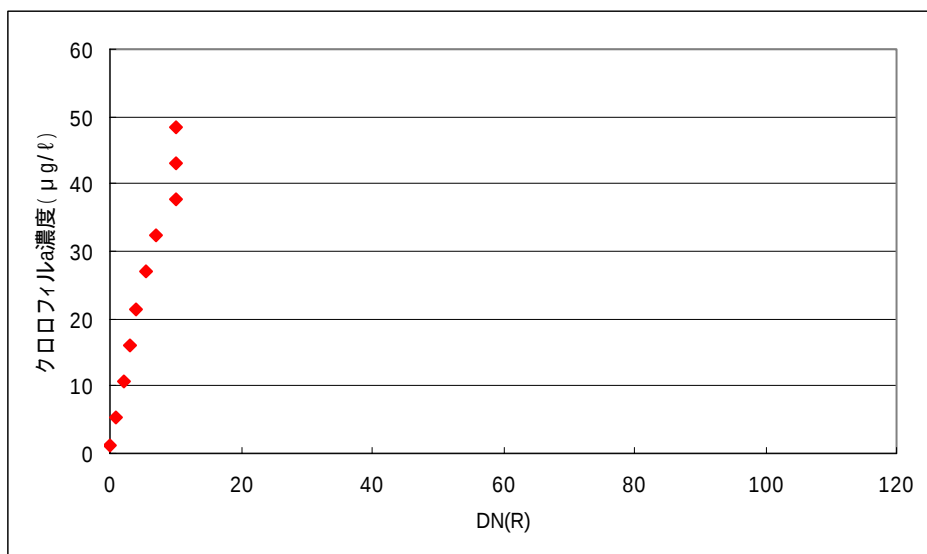


図-25 光源からの距離の影響（濁度付加有り）

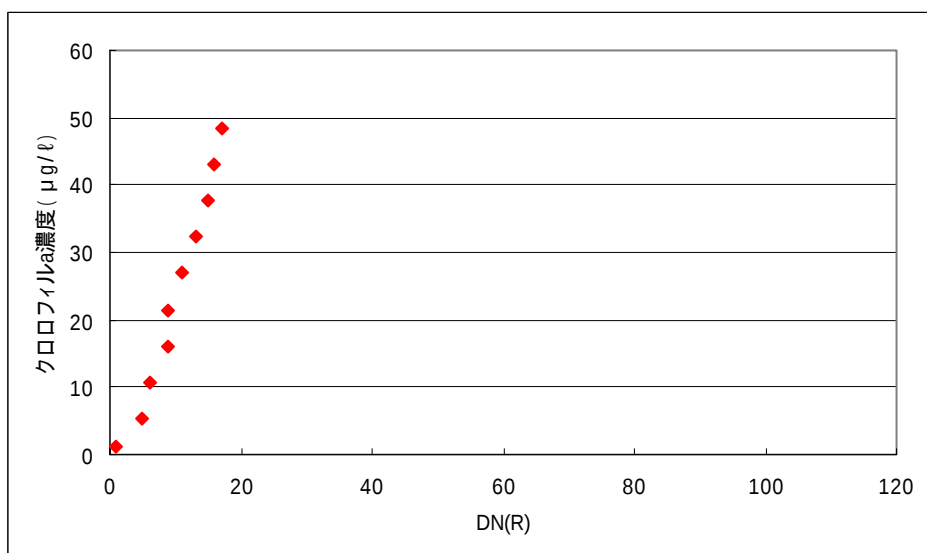
濁度を付加したことで、付加なしのときと比較してDNに著しい違いが見られた。濁度の色素の設定上、GとBのDNが高くなっているため、付加なしでは横ばいであったGは、濃度が薄くなるにつれ、DNが緩やかに上昇する傾向を示している。Bに関しては、サンプル6を境

にDNが急激に上昇する傾向となった。対して、Rは濃度が薄くなるにつれ、DNが緩やかに減少する傾向を示している。また、サンプル10で濁度を2倍にした10Bとの比較では、デジタル画像が可視領域で構成されている性質上、同じクロロフィルa濃度であっても、DNは変化している。この後の分析については、付加なしの実験と同様の方法で行うが、同じ濁度でのクロロフィルa濃度とDNの推移を見るため、サンプル10Bは使用しないので、以後サンプル10と表記してあるものは10Aのものである。なお、各サンプルの濁度測定は、記載した測定方法通り行ったが、採水量が少なかったため、以下に示すように、ほぼ濾紙の重量分しか測定できていなかったため、明確なSS量を測定することはできなかった。また、濾紙にはクロロフィルも付着していることから、SS量のみを判別することは難しいものと思われる。よって、実験2での濁度は、分析データの確認で述べたように15mg/lを基準とし、10Bに関しては30mg/lを付加したものとしている。

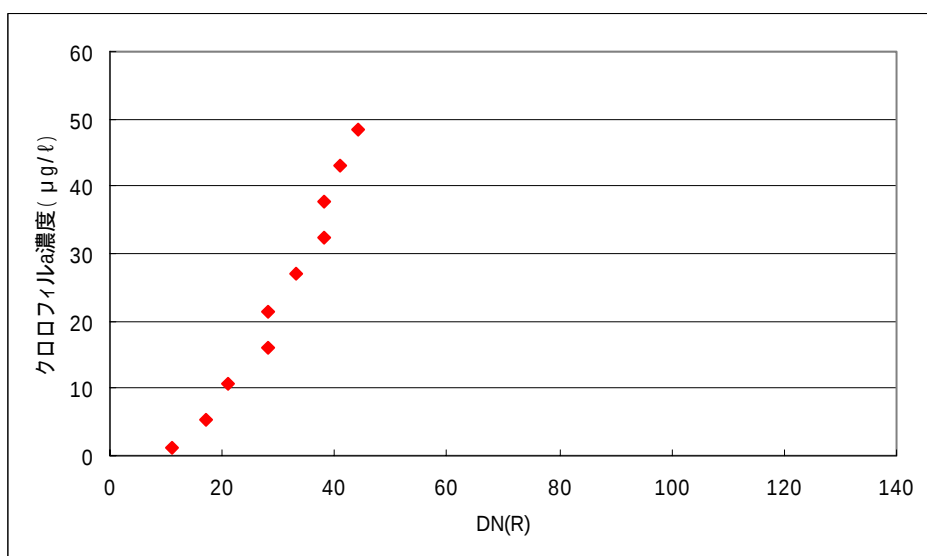
次に、このデータをもとにサンプルごとのRGBのDNとクロロフィルa濃度の関係を見るため、DNをX軸、クロロフィルa濃度をY軸にとり、散布図を作成した。これをRGBの画素、光源直下からの距離ごとに分類すると図-26となる



光源直下からの距離
60 cm



光源直下からの距離
50 cm

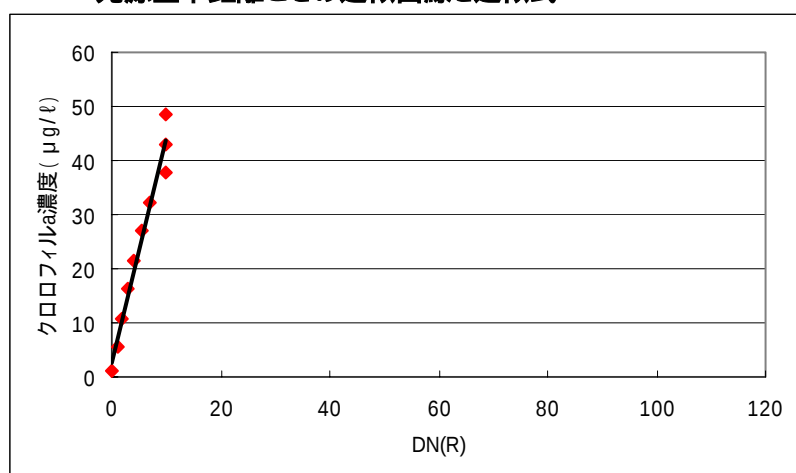


光源直下からの距離
40 cm

図-26 DN (RED) とクロロフィル a 濃度の関係

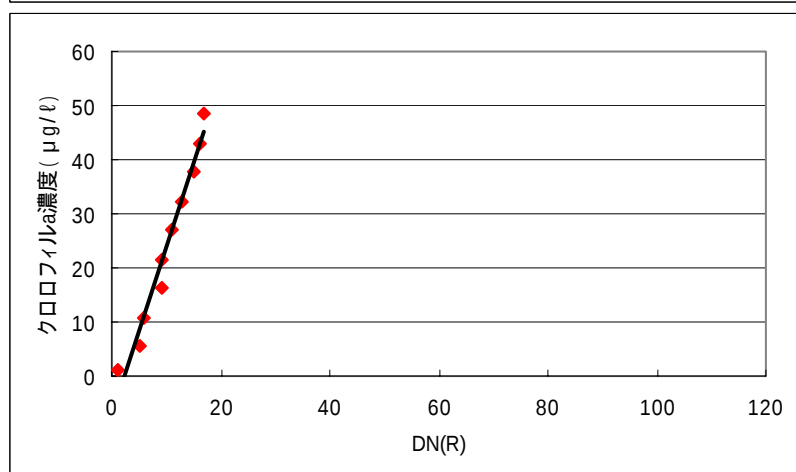
Rに関しては、濁度を付加することで、付加なしのサンプルと比べ大きな変化が表れた。光源に近いほどDNが上昇するのは変わらないが、上昇幅は小さくなっている。DNの値は全サンプルで著しく減少していることが見受けられる。また、DNとクロロフィルa濃度の推移の傾向としては、濁度の付加により、DNが上昇することでクロロフィルa濃度も増加するという比例関係に変化している。Xの係数が正負逆になった詳しい理由は不明だが、濁度の影響を強く受けたためであると考えられる。モデル式は比例関係を示していることから、線形近似を利用して近似式を作成した。

光源直下距離ごとの近似曲線と近似式



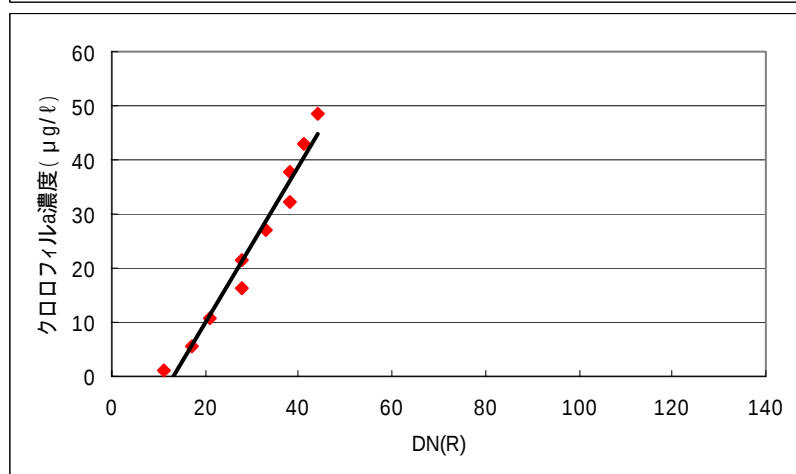
$$Y_{R60} = 4.1136X + 2.7143$$

$$R^2 = 0.9682$$



$$Y_{R50} = 3.0505X - 6.8039$$

$$R^2 = 0.9706$$



$$Y_{R40} = 1.4474X - 18.965$$

$$R^2 = 0.9623$$

単色モデルでクロロフィル濃度を推定した結果を図 27 に示すが、と作成したモデル式の X に D N を代入することで、推定値は以下ようになる。濁度混入の影響もありデータのばらつきが見られる。

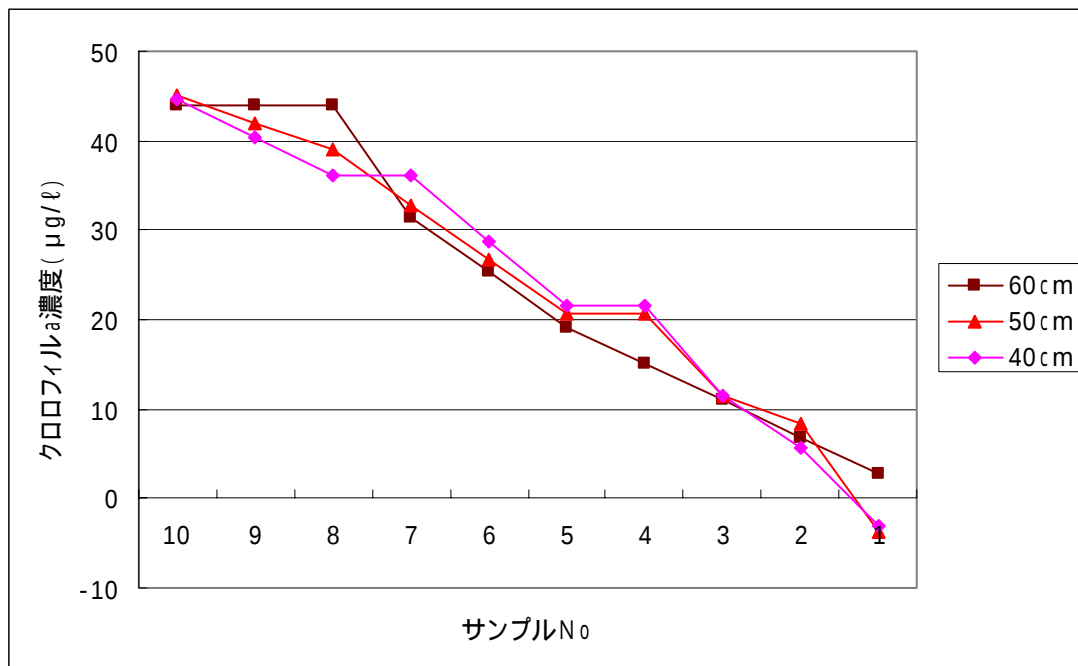


図-27 単色モデルでの推定の精度

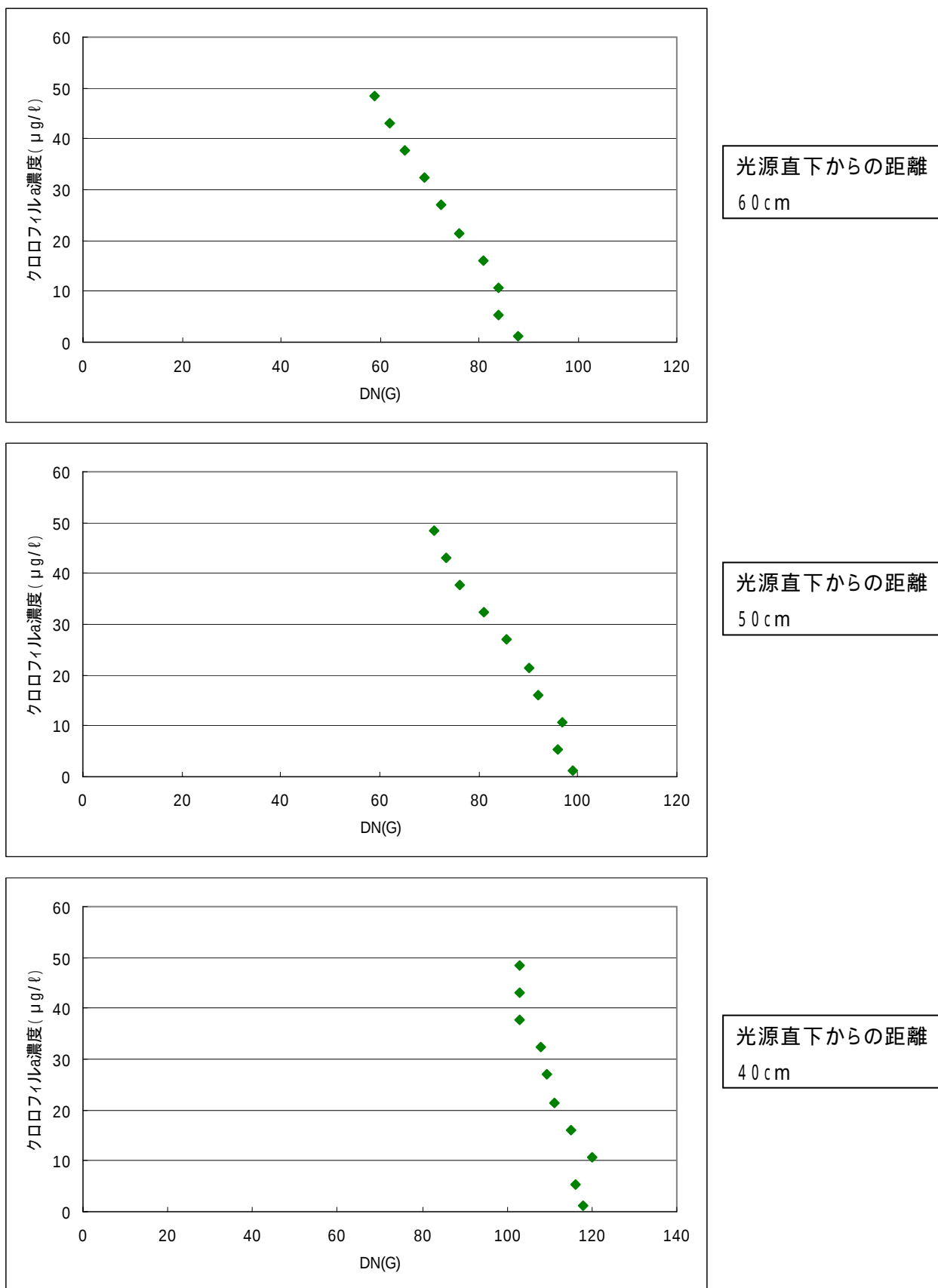
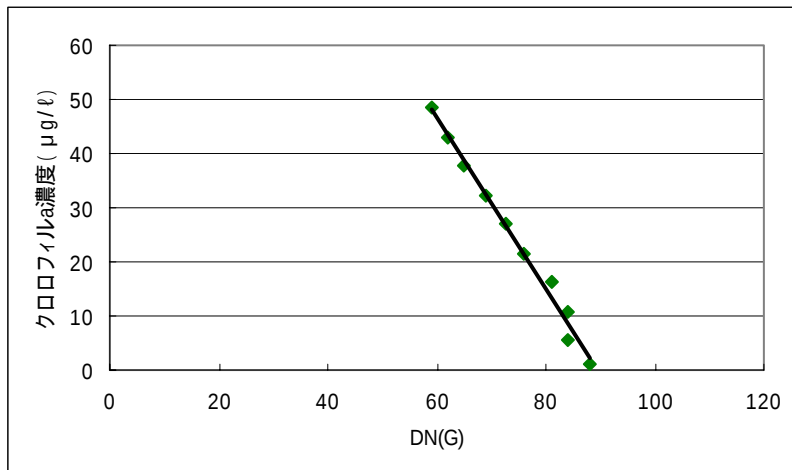


図-28 DN (GREEN) とクロロフィル a 濃度の関係

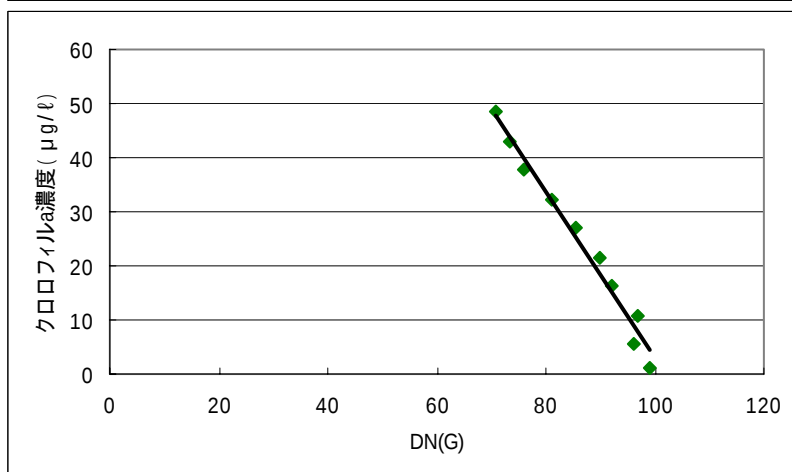
濁度の付加によりGは、付加なしのときと比べ、DNとクロロフィルa濃度の関係が著しく変化している。具体的には、濁度を付加していないときには散布の傾向が明確でなかったのに対し、濁度を付加したときは、付加なしのRと同様、DNの上昇により、クロロフィルa濃度が減少する比例関係に変化している。これは、濁度を付加することで水の色が変化すると、DNとクロロフィルa濃度の関係が大きく変化する可能性があることを示唆している。

光源直下距離ごとの近似曲線と近似式



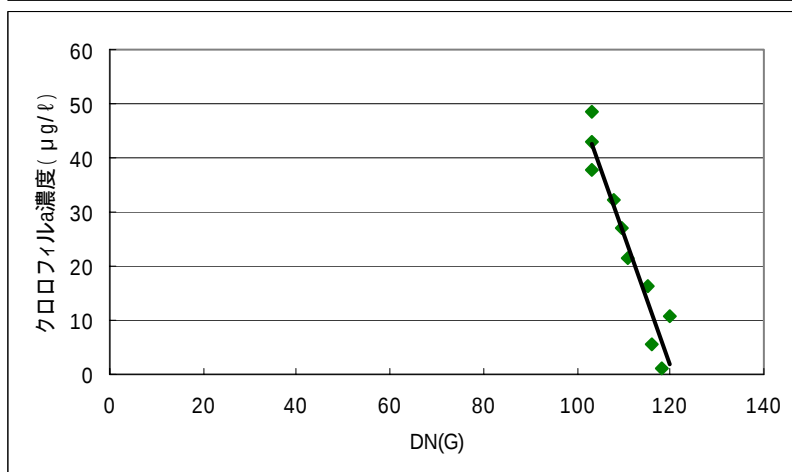
$$Y_{G60} = -1.5792X + 141.25$$

$$R^2 = 0.9891$$



$$Y_{G50} = -1.5506X + 157.82$$

$$R^2 = 0.9763$$



$$Y_{G40} = -2.3831X + 288$$

$$R^2 = 0.9071$$

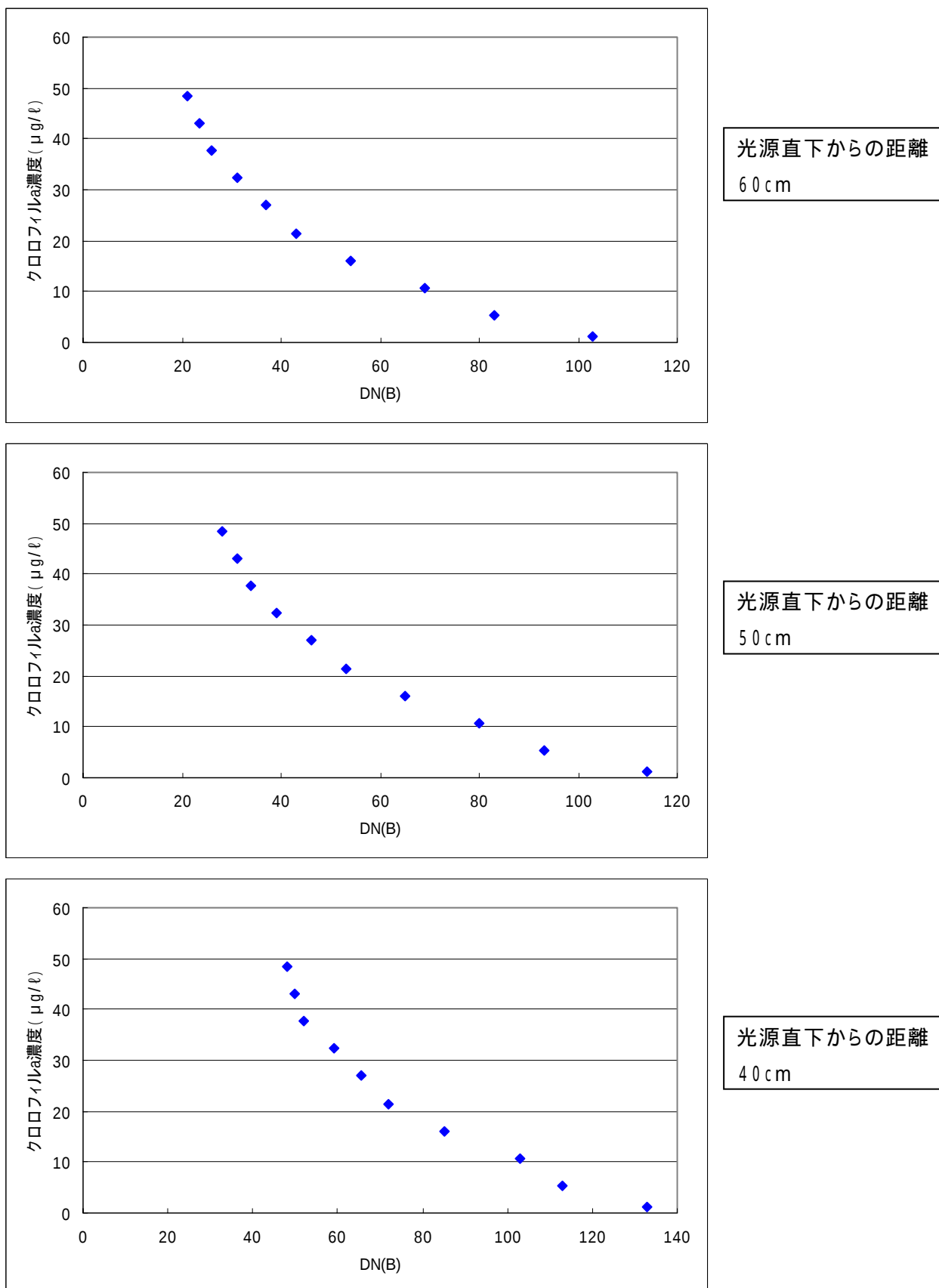
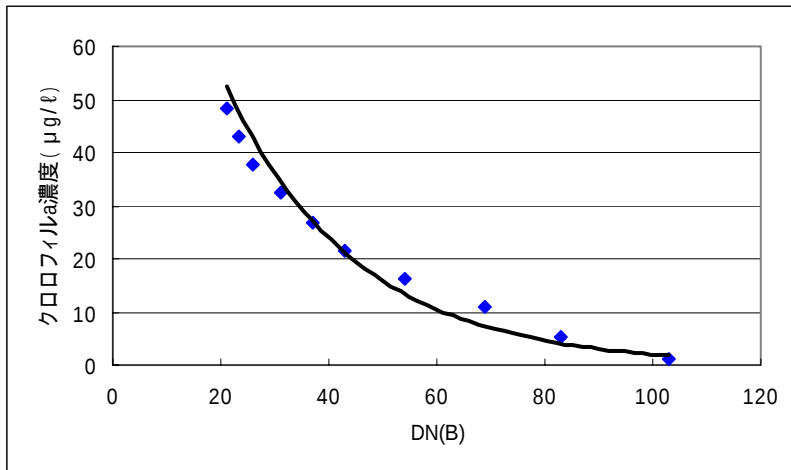


図-29 DN (B L U E) とクロロフィル a 濃度の関係

R、Gと違い、濁度を付加したものであっても、Bの散布の形状に大きな変化は見られない。形状が緩やかになったようにも見えるが、これは、付加なしの実験のときと違い、高濃度域と

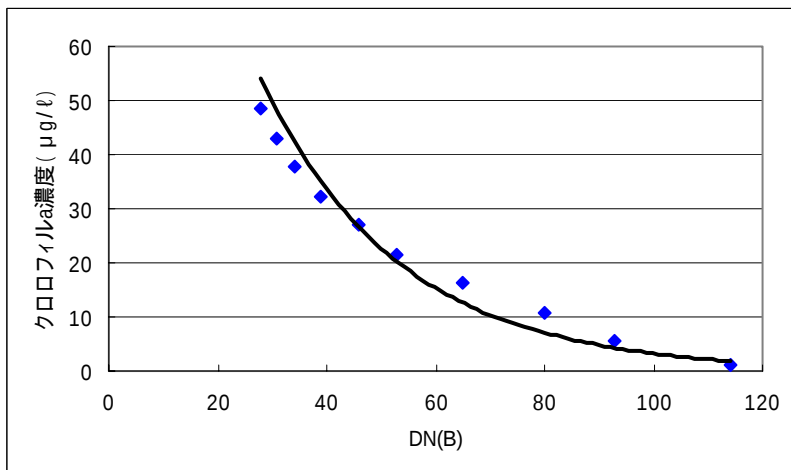
低濃度域が狭いためである。違いが見られる点として、クロロフィルa濃度が同程度の双方の実験サンプルを比較すると、DNが濁度付加により、20程度上昇していることが挙げられる。モデル式は、散布の形状に著しい変化が見られないことから、濁度付加なしのときと同様、指数近似を利用して作成した。

光源直下距離ごとの近似曲線と近似式



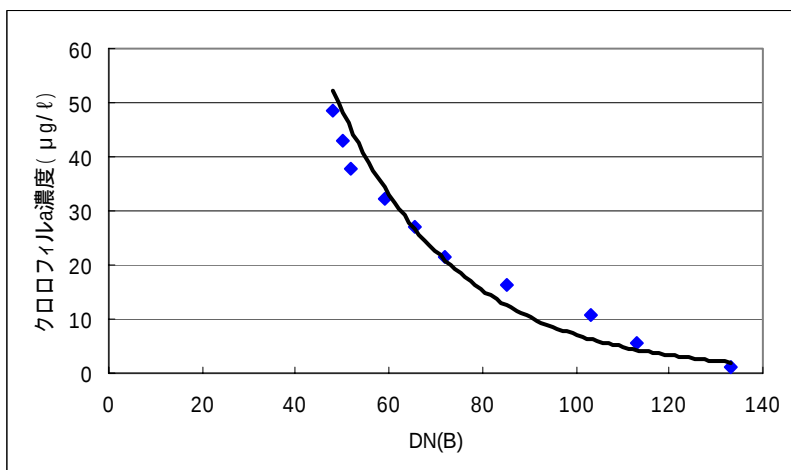
$$Y_{B60} = 124.6e^{-0.0413X}$$

$$R^2 = 0.9549$$



$$Y_{B50} = 162.62e^{-0.0393X}$$

$$R^2 = 0.9481$$



$$Y_{B40} = 330.96e^{-0.0384X}$$

$$R^2 = 0.9331$$

単色ごとのモデル式は、近似式であるため、各単色の誤差の大きい部分をカバーすることができないと共に、水面の色が単色で構成されることはほとんどなので、推定式の単純な平均を採って推定式の方が実用的では有る。濁度付加ありのケースでも付加なしのときと同様に処理した。

光源直下距離 60cm

サンプルNo	R	G	B	推定値	実測値
10	43.8503	48.0772	52.3425	48.09	48.4065
9	43.8503	43.3396	47.20778	44.79923	43.028
8	43.8503	38.602	42.57676	41.67635	37.6495
7	31.5095	32.2852	34.63306	32.80925	32.271
6	25.3391	26.758	27.03166	26.37625	26.8925
5	19.1687	21.2308	21.09864	20.49938	21.514
4	15.0551	13.3348	13.39536	13.92842	16.1355
3	10.9415	8.5972	7.209565	8.916088	10.757
2	6.8279	8.5972	4.043896	6.489665	5.3785
1	2.7143	2.2804	1.770405	2.255035	1.0757

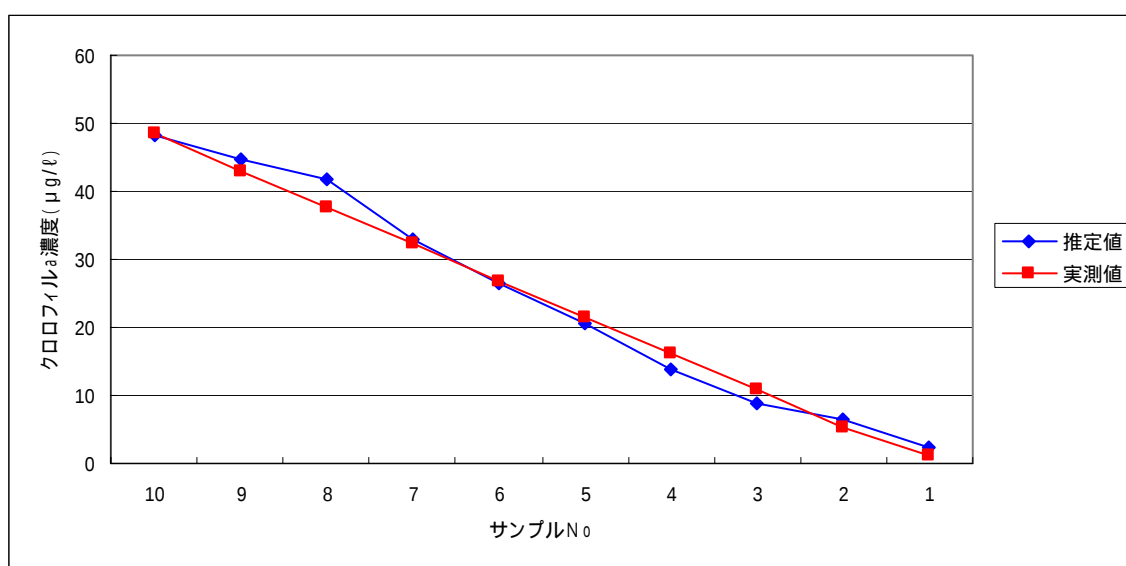


図-30 各推定式の単純平均の精度（光源から 60 c m のケース）

濁度付加なしのときと同様、単色では近似式の性質によって誤差が生じていたが、平均することで得られた推定値は、すべての距離において良好な結果となった。特にサンプル 5 ～ 7 については、すべての距離で非常に精度が高いものとなっている。これは、濁度が付加されていても同じ濁度であれば、クロロフィル a 濃度を推定することが十分に可能であることを示している。但し、各光源直下距離で比較すると、光源に近づくにつれ、推定精度が落ちている。特にサンプル 3、8 で顕著になっている。原因として、水面の光の反射の影響を受けていること、モデル式の精度により誤差を完全に修正できていない点が考えられる。

クロロフィル a 濃度が同じであっても、濁度が付加されていると DN が変化することを利用すると濁度の影響を分離量化することが出来る。

7. まとめ

本研究により、比較的水質のクロロフィル a 濃度が大きい場合には、デジタル画像による水質解析が可能であることが判明した。特に、 $5\text{ }\mu\text{g/l} \sim 50\text{ }\mu\text{g/l}$ の範囲の濃度測定の精度が高いことは、閉鎖性海域では良好な水質から、汚濁が進んでいく過程を把握することができる範囲であるため、実際の観測においても有効であるといえる。また、広範囲の濃度にわたって精度の良い推定式が得られたことより、水質分析にDNが使用できる可能性を示すことが出来た。

- 1) 宇和島湾における海水面のデジタル画像撮影と水質測定を用いて作成した三色係数法及び独立変数によるモデル式により、クロロフィル-a 濃度の分布状況を大まかにではあるが視覚化することができた。
- 2) 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 9.5 cm であった。
- 3) 夏の赤潮発生後の観測だったために通常の宇和島湾のクロロフィル-a 濃度と比べるとかなり高い値を示し、分布画像のクロロフィル-a 濃度段階の幅がかなり大きくなってしまった。
- 4) 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、係留気球が流されて目標の高度まで上がらないか、または撮影時に動いてしまいきれいな画像を取得できないということがあった。
- 5) 他方、スペクトル密度と吸光度との関係式、スペクトルから算定したデジタルナンバーとデジタル画像から読んだデジタルナンバーとの整合性についての課題が残った。光源からの影響、濁度の影響についても定式化までには至らなかった。
- 6) 今後の課題として、分光反射率も測定できる環境を用意し、同じサンプルでの吸光度と分光反射率の比較を行うことや、光量と濁度を変数とする検証を行い、変数の推移によるモデル式の変化を把握し、傾向を掴むことで、より明確な実用性の検証を行うことができると思われる。
- 7) 光量、濁度が同条件の場所があれば、現地観測によるデータとの比較を行うのもよいと思われる。また、256段階のDNの読み取りは、DNの変化が小さいときに読み取りにくく、モデル式の精度も粗いものになってしまうため、分析の際には、より細かい値を読み取る必要がある。このような点を解決することで、デジタル画像を用いた水質解析手法を実用することが可能になるものと思われる。
- 8) また、今回は夏のクロロフィル-a 濃度が高い地域の観測だけであったが、他の季節や他の地域での観測をすることで数多くのデータを蓄積していき時間、場所による変化などについての検証が必要である。
- 9) 太陽光によるホワイトキャップの影響を減らすために、偏光フィルターなどを使用し影響を減らしていくことも精度向上のために必要不可欠である。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がある。一時的な被雲による光量の違いは、画像のデジタル値に影響を与えるので撮影と同時にアルベドなどを測定しその数値によって光量ごとのモデル式を作成し使い分けるということも良い方法の一つと言える。
- 10) 光量補正は船舶のデジタル値の違いより行ったが、船舶上に白色板を置き、その違いによって補正するなどの工夫が必要であるが、実用面では船舶などの既知の情報が含まれ

ないので、画像比較からのみ補正できる手法の開発が必要である。

- 11) 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も必要である。

付録

実験1 各サンプル吸光度

波長 (nm)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
390	0.0436	0.0328	0.0244	0.0192	0.0166	0.0150	0.0118	0.0103	0.0084	0.0092	0.0103	0.0090
395	0.0429	0.0322	0.0238	0.0185	0.0158	0.0141	0.0109	0.0094	0.0077	0.0085	0.0095	0.0082
400	0.0421	0.0316	0.0232	0.0177	0.0150	0.0132	0.0100	0.0085	0.0070	0.0078	0.0087	0.0074
405	0.0432	0.0327	0.0235	0.0180	0.0150	0.0131	0.0097	0.0081	0.0066	0.0074	0.0083	0.0071
410	0.0443	0.0337	0.0238	0.0182	0.0149	0.0129	0.0093	0.0077	0.0062	0.0070	0.0078	0.0067
415	0.0458	0.0349	0.0247	0.0188	0.0155	0.0135	0.0097	0.0081	0.0066	0.0074	0.0082	0.0070
420	0.0472	0.0360	0.0256	0.0193	0.0161	0.0140	0.0101	0.0085	0.0070	0.0077	0.0085	0.0073
425	0.0483	0.0366	0.0259	0.0194	0.0160	0.0136	0.0096	0.0081	0.0065	0.0072	0.0079	0.0067
430	0.0494	0.0371	0.0261	0.0195	0.0159	0.0132	0.0090	0.0076	0.0059	0.0066	0.0072	0.0061
435	0.0496	0.0372	0.0258	0.0192	0.0153	0.0124	0.0081	0.0065	0.0048	0.0056	0.0062	0.0050
440	0.0498	0.0372	0.0255	0.0188	0.0146	0.0115	0.0071	0.0054	0.0037	0.0046	0.0052	0.0039
445	0.0469	0.0353	0.0247	0.0188	0.0155	0.0129	0.0091	0.0075	0.0059	0.0068	0.0074	0.0062
450	0.0439	0.0333	0.0238	0.0188	0.0164	0.0143	0.0111	0.0096	0.0081	0.0089	0.0096	0.0085
455	0.0411	0.0312	0.0221	0.0171	0.0146	0.0126	0.0095	0.0082	0.0067	0.0075	0.0082	0.0071
460	0.0382	0.0291	0.0203	0.0153	0.0127	0.0109	0.0079	0.0067	0.0052	0.0061	0.0067	0.0057
465	0.0382	0.0290	0.0203	0.0154	0.0128	0.0110	0.0080	0.0067	0.0053	0.0062	0.0067	0.0058
470	0.0381	0.0288	0.0203	0.0154	0.0128	0.0110	0.0081	0.0066	0.0054	0.0062	0.0067	0.0059
475	0.0373	0.0283	0.0196	0.0147	0.0119	0.0102	0.0071	0.0059	0.0047	0.0054	0.0061	0.0052
480	0.0365	0.0277	0.0188	0.0139	0.0110	0.0093	0.0061	0.0052	0.0040	0.0046	0.0055	0.0044
485	0.0354	0.0267	0.0182	0.0133	0.0105	0.0086	0.0056	0.0047	0.0036	0.0043	0.0051	0.0041
490	0.0342	0.0256	0.0175	0.0126	0.0099	0.0079	0.0051	0.0042	0.0032	0.0040	0.0046	0.0037
495	0.0315	0.0237	0.0160	0.0116	0.0091	0.0074	0.0048	0.0039	0.0030	0.0037	0.0044	0.0035
500	0.0287	0.0217	0.0145	0.0105	0.0083	0.0068	0.0044	0.0035	0.0027	0.0033	0.0042	0.0032
505	0.0260	0.0200	0.0132	0.0095	0.0075	0.0063	0.0040	0.0034	0.0025	0.0031	0.0040	0.0030
510	0.0232	0.0182	0.0118	0.0085	0.0066	0.0057	0.0035	0.0032	0.0023	0.0028	0.0037	0.0027
515	0.0215	0.0168	0.0109	0.0079	0.0061	0.0052	0.0032	0.0028	0.0022	0.0026	0.0035	0.0025
520	0.0197	0.0154	0.0100	0.0072	0.0056	0.0046	0.0029	0.0023	0.0020	0.0023	0.0032	0.0022
525	0.0184	0.0145	0.0094	0.0066	0.0052	0.0043	0.0026	0.0020	0.0017	0.0020	0.0030	0.0020
530	0.0171	0.0135	0.0088	0.0060	0.0048	0.0040	0.0022	0.0017	0.0013	0.0017	0.0028	0.0017
535	0.0169	0.0136	0.0097	0.0075	0.0065	0.0061	0.0045	0.0040	0.0034	0.0037	0.0047	0.0036
540	0.0167	0.0137	0.0106	0.0090	0.0082	0.0082	0.0068	0.0063	0.0054	0.0056	0.0066	0.0055
545	0.0162	0.0131	0.0097	0.0080	0.0071	0.0069	0.0056	0.0051	0.0043	0.0045	0.0055	0.0045
550	0.0156	0.0125	0.0087	0.0070	0.0060	0.0055	0.0043	0.0038	0.0032	0.0034	0.0044	0.0034
555	0.0153	0.0122	0.0085	0.0066	0.0056	0.0052	0.0039	0.0033	0.0028	0.0031	0.0041	0.0031
560	0.0149	0.0118	0.0083	0.0061	0.0051	0.0048	0.0034	0.0028	0.0023	0.0028	0.0037	0.0028
565	0.0149	0.0117	0.0081	0.0060	0.0050	0.0046	0.0033	0.0026	0.0022	0.0026	0.0036	0.0026
570	0.0148	0.0115	0.0079	0.0059	0.0048	0.0044	0.0031	0.0024	0.0020	0.0023	0.0034	0.0024
575	0.0149	0.0115	0.0081	0.0059	0.0049	0.0044	0.0030	0.0024	0.0020	0.0023	0.0034	0.0024
580	0.0149	0.0115	0.0082	0.0059	0.0049	0.0044	0.0029	0.0024	0.0020	0.0022	0.0033	0.0024
585	0.0150	0.0115	0.0082	0.0058	0.0049	0.0044	0.0029	0.0024	0.0019	0.0022	0.0032	0.0023
590	0.0151	0.0114	0.0081	0.0057	0.0048	0.0044	0.0028	0.0023	0.0017	0.0022	0.0031	0.0021
595	0.0150	0.0113	0.0080	0.0057	0.0047	0.0043	0.0027	0.0023	0.0017	0.0022	0.0031	0.0021
600	0.0148	0.0111	0.0079	0.0057	0.0045	0.0042	0.0026	0.0023	0.0017	0.0021	0.0031	0.0021
605	0.0149	0.0111	0.0079	0.0057	0.0046	0.0041	0.0027	0.0023	0.0017	0.0021	0.0030	0.0021
610	0.0150	0.0111	0.0079	0.0056	0.0046	0.0040	0.0027	0.0022	0.0016	0.0021	0.0029	0.0020
615	0.0152	0.0113	0.0081	0.0058	0.0048	0.0042	0.0027	0.0022	0.0016	0.0020	0.0029	0.0021
620	0.0154	0.0115	0.0082	0.0059	0.0049	0.0043	0.0027	0.0022	0.0016	0.0018	0.0028	0.0021
625	0.0154	0.0115	0.0083	0.0060	0.0049	0.0043	0.0027	0.0022	0.0017	0.0019	0.0028	0.0021
630	0.0153	0.0114	0.0083	0.0060	0.0049	0.0043	0.0027	0.0022	0.0017	0.0020	0.0028	0.0021
635	0.0155	0.0115	0.0083	0.0060	0.0049	0.0043	0.0027	0.0021	0.0016	0.0018	0.0028	0.0020
640	0.0157	0.0116	0.0083	0.0060	0.0049	0.0043	0.0026	0.0020	0.0015	0.0016	0.0027	0.0018
645	0.0169	0.0124	0.0090	0.0064	0.0053	0.0046	0.0028	0.0022	0.0016	0.0018	0.0028	0.0019
650	0.0181	0.0132	0.0096	0.0068	0.0057	0.0048	0.0029	0.0023	0.0016	0.0020	0.0029	0.0020
655	0.0192	0.0141	0.0101	0.0073	0.0061	0.0050	0.0031	0.0025	0.0018	0.0021	0.0030	0.0021
660	0.0203	0.0149	0.0106	0.0078	0.0065	0.0051	0.0032	0.0027	0.0020	0.0021	0.0031	0.0021
665	0.0240	0.0175	0.0125	0.0092	0.0075	0.0059	0.0037	0.0030	0.0022	0.0024	0.0032	0.0023
670	0.0276	0.0200	0.0143	0.0105	0.0085	0.0067	0.0042	0.0033	0.0023	0.0026	0.0033	0.0024
675	0.0300	0.0218	0.0155	0.0113	0.0091	0.0071	0.0043	0.0033	0.0025	0.0027	0.0033	0.0025
680	0.0323	0.0236	0.0167	0.0121	0.0096	0.0074	0.0044	0.0033	0.0026	0.0027	0.0033	0.0026
685	0.0264	0.0193	0.0137	0.0098	0.0078	0.0062	0.0036	0.0027	0.0021	0.0022	0.0030	0.0023
690	0.0204	0.0149	0.0106	0.0074	0.0060	0.0049	0.0028	0.0021	0.0016	0.0017	0.0026	0.0020
695	0.0168	0.0123	0.0087	0.0062	0.0050	0.0042	0.0023	0.0018	0.0013	0.0015	0.0024	0.0018
700	0.0131	0.0096	0.0068	0.0049	0.0040	0.0034	0.0018	0.0015	0.0010	0.0012	0.0022	0.0016

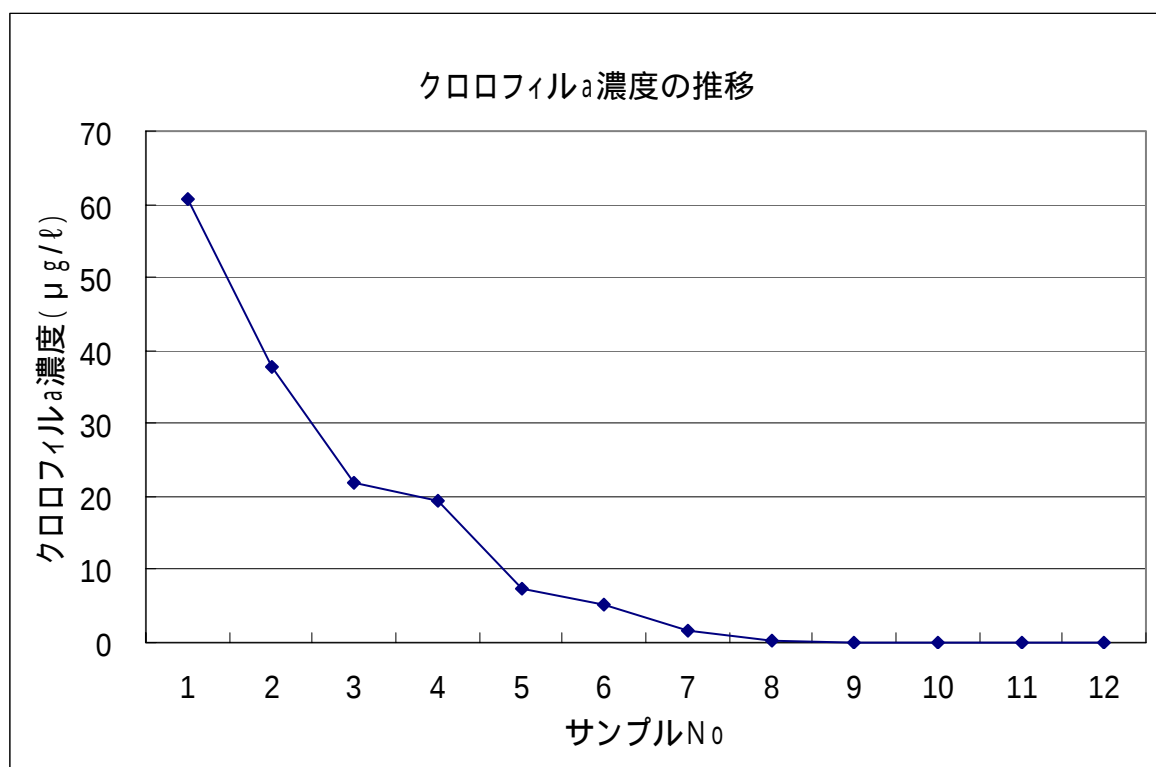
実験2 各サンプル吸光度

波長 (nm)	BL	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10A	10B
390	0.0250	0.0255	0.0295	0.0336	0.0359	0.0350	0.0363	0.0391	0.0447	0.0555	0.0601	0.0782
395	0.0235	0.0239	0.0280	0.0318	0.0342	0.0336	0.0348	0.0376	0.0431	0.0536	0.0581	0.0760
400	0.0219	0.0223	0.0265	0.0300	0.0325	0.0322	0.0333	0.0360	0.0415	0.0516	0.0560	0.0737
405	0.0213	0.0217	0.0259	0.0296	0.0320	0.0319	0.0332	0.0360	0.0417	0.0516	0.0561	0.0736
410	0.0206	0.0211	0.0253	0.0291	0.0315	0.0316	0.0331	0.0360	0.0419	0.0516	0.0562	0.0735
415	0.0206	0.0210	0.0252	0.0290	0.0314	0.0318	0.0335	0.0364	0.0423	0.0518	0.0566	0.0736
420	0.0205	0.0209	0.0250	0.0289	0.0313	0.0320	0.0338	0.0367	0.0427	0.0519	0.0570	0.0736
425	0.0197	0.0202	0.0245	0.0282	0.0309	0.0317	0.0337	0.0367	0.0430	0.0521	0.0572	0.0736
430	0.0189	0.0194	0.0239	0.0275	0.0305	0.0314	0.0336	0.0366	0.0432	0.0522	0.0573	0.0736
435	0.0179	0.0185	0.0230	0.0267	0.0297	0.0309	0.0331	0.0363	0.0429	0.0516	0.0569	0.0731
440	0.0168	0.0176	0.0220	0.0258	0.0288	0.0303	0.0326	0.0360	0.0426	0.0510	0.0565	0.0726
445	0.0186	0.0192	0.0233	0.0270	0.0295	0.0303	0.0323	0.0351	0.0413	0.0499	0.0546	0.0703
450	0.0204	0.0208	0.0245	0.0281	0.0302	0.0303	0.0320	0.0342	0.0400	0.0487	0.0526	0.0679
455	0.0194	0.0198	0.0234	0.0266	0.0287	0.0288	0.0303	0.0325	0.0381	0.0463	0.0501	0.0655
460	0.0183	0.0188	0.0223	0.0251	0.0271	0.0272	0.0286	0.0308	0.0361	0.0438	0.0476	0.0630
465	0.0183	0.0188	0.0223	0.0251	0.0271	0.0271	0.0285	0.0307	0.0361	0.0438	0.0474	0.0627
470	0.0183	0.0188	0.0223	0.0251	0.0271	0.0270	0.0283	0.0306	0.0360	0.0437	0.0472	0.0624
475	0.0178	0.0183	0.0218	0.0244	0.0263	0.0266	0.0280	0.0302	0.0355	0.0426	0.0462	0.0612
480	0.0172	0.0178	0.0212	0.0237	0.0255	0.0262	0.0276	0.0297	0.0349	0.0415	0.0452	0.0599
485	0.0168	0.0173	0.0208	0.0230	0.0248	0.0255	0.0268	0.0290	0.0340	0.0406	0.0443	0.0588
490	0.0164	0.0168	0.0203	0.0223	0.0240	0.0248	0.0260	0.0282	0.0330	0.0397	0.0433	0.0577
495	0.0164	0.0167	0.0200	0.0219	0.0234	0.0239	0.0250	0.0270	0.0316	0.0378	0.0413	0.0556
500	0.0164	0.0166	0.0197	0.0215	0.0227	0.0229	0.0240	0.0258	0.0302	0.0359	0.0392	0.0535
505	0.0162	0.0163	0.0194	0.0210	0.0221	0.0221	0.0230	0.0245	0.0287	0.0341	0.0372	0.0514
510	0.0159	0.0160	0.0190	0.0204	0.0214	0.0212	0.0219	0.0232	0.0272	0.0323	0.0352	0.0492
515	0.0160	0.0161	0.0189	0.0201	0.0210	0.0208	0.0213	0.0224	0.0263	0.0311	0.0338	0.0479
520	0.0160	0.0161	0.0188	0.0198	0.0205	0.0204	0.0206	0.0216	0.0253	0.0299	0.0323	0.0466
525	0.0161	0.0163	0.0189	0.0198	0.0205	0.0203	0.0204	0.0214	0.0249	0.0294	0.0317	0.0460
530	0.0162	0.0164	0.0189	0.0198	0.0204	0.0201	0.0201	0.0211	0.0245	0.0288	0.0311	0.0454
535	0.0173	0.0176	0.0202	0.0211	0.0218	0.0209	0.0208	0.0217	0.0252	0.0294	0.0315	0.0459
540	0.0184	0.0187	0.0214	0.0223	0.0232	0.0216	0.0214	0.0223	0.0258	0.0300	0.0319	0.0464
545	0.0189	0.0191	0.0218	0.0226	0.0234	0.0220	0.0217	0.0227	0.0260	0.0304	0.0323	0.0470
550	0.0194	0.0194	0.0222	0.0229	0.0236	0.0223	0.0220	0.0231	0.0262	0.0308	0.0326	0.0476
555	0.0205	0.0204	0.0232	0.0239	0.0245	0.0233	0.0231	0.0241	0.0272	0.0314	0.0333	0.0485
560	0.0215	0.0214	0.0242	0.0248	0.0254	0.0243	0.0242	0.0250	0.0282	0.0320	0.0339	0.0494
565	0.0226	0.0224	0.0252	0.0259	0.0264	0.0255	0.0253	0.0261	0.0294	0.0332	0.0350	0.0510
570	0.0237	0.0233	0.0261	0.0269	0.0273	0.0266	0.0264	0.0271	0.0305	0.0343	0.0360	0.0525
575	0.0246	0.0242	0.0270	0.0278	0.0281	0.0275	0.0273	0.0280	0.0314	0.0352	0.0369	0.0536
580	0.0254	0.0251	0.0278	0.0286	0.0289	0.0284	0.0282	0.0288	0.0323	0.0360	0.0377	0.0547
585	0.0258	0.0256	0.0284	0.0292	0.0295	0.0290	0.0288	0.0294	0.0330	0.0365	0.0383	0.0554
590	0.0262	0.0261	0.0289	0.0298	0.0300	0.0295	0.0293	0.0300	0.0336	0.0369	0.0388	0.0560
595	0.0269	0.0267	0.0296	0.0304	0.0306	0.0301	0.0301	0.0307	0.0342	0.0375	0.0394	0.0567
600	0.0276	0.0272	0.0303	0.0309	0.0311	0.0306	0.0308	0.0314	0.0348	0.0380	0.0400	0.0574
605	0.0280	0.0277	0.0307	0.0313	0.0315	0.0311	0.0312	0.0319	0.0353	0.0384	0.0405	0.0581
610	0.0284	0.0281	0.0310	0.0317	0.0319	0.0315	0.0316	0.0323	0.0358	0.0388	0.0409	0.0587
615	0.0287	0.0284	0.0313	0.0320	0.0323	0.0318	0.0319	0.0327	0.0362	0.0392	0.0413	0.0591
620	0.0289	0.0287	0.0316	0.0323	0.0326	0.0321	0.0322	0.0331	0.0365	0.0396	0.0416	0.0594
625	0.0290	0.0288	0.0317	0.0323	0.0326	0.0322	0.0324	0.0333	0.0366	0.0396	0.0416	0.0594
630	0.0291	0.0288	0.0317	0.0323	0.0326	0.0322	0.0325	0.0334	0.0366	0.0396	0.0415	0.0593
635	0.0288	0.0285	0.0315	0.0321	0.0323	0.0321	0.0324	0.0334	0.0366	0.0395	0.0415	0.0593
640	0.0284	0.0282	0.0313	0.0319	0.0320	0.0319	0.0323	0.0333	0.0365	0.0394	0.0415	0.0592
645	0.0278	0.0276	0.0309	0.0314	0.0317	0.0317	0.0323	0.0333	0.0365	0.0394	0.0416	0.0591
650	0.0272	0.0270	0.0304	0.0309	0.0314	0.0314	0.0322	0.0333	0.0365	0.0394	0.0417	0.0590
655	0.0266	0.0263	0.0296	0.0302	0.0309	0.0310	0.0318	0.0330	0.0363	0.0393	0.0417	0.0586
660	0.0259	0.0255	0.0288	0.0295	0.0303	0.0305	0.0313	0.0327	0.0361	0.0392	0.0417	0.0582
665	0.0254	0.0251	0.0285	0.0295	0.0306	0.0310	0.0322	0.0338	0.0377	0.0410	0.0437	0.0601
670	0.0249	0.0247	0.0282	0.0294	0.0309	0.0315	0.0330	0.0349	0.0392	0.0427	0.0457	0.0619
675	0.0248	0.0247	0.0283	0.0296	0.0313	0.0321	0.0338	0.0359	0.0406	0.0440	0.0473	0.0634
680	0.0247	0.0247	0.0284	0.0297	0.0317	0.0327	0.0345	0.0369	0.0419	0.0453	0.0488	0.0649
685	0.0249	0.0248	0.0283	0.0290	0.0305	0.0312	0.0325	0.0344	0.0387	0.0419	0.0447	0.0609
690	0.0250	0.0248	0.0281	0.0283	0.0293	0.0297	0.0305	0.0319	0.0354	0.0385	0.0406	0.0569
695	0.0254	0.0253	0.0284	0.0282	0.0290	0.0290	0.0297	0.0307	0.0338	0.0366	0.0385	0.0548
700	0.0258	0.0258	0.0286	0.0281	0.0286	0.0282	0.0288	0.0294	0.0321	0.0347	0.0363	0.0526

実験1 クロロフィル濃度

クロロフィル濃度測定1回目

サンプルNo			測定値								三波長		
	V	ml	750 ₁	665 ₁	663	645	630	750 ₂	665 ₂	補正	a	b	c
1	0.1	14	0.0001		0.0406	0.0181	0.0098				60.6914	25.5343	4.9545
2	0.1	14	0.0001		0.0253	0.0114	0.0062				37.7342	16.1486	3.3646
3	0.1	14	0.0000		0.0146	0.0066	0.0035				21.8453	9.5295	1.5800
4	0.1	14	0.0001		0.0131	0.0061	0.0037				19.4208	8.5994	4.8219
5	0.1	14	0.0001		0.0050	0.0026	0.0016				7.2500	3.8681	2.4091
6	0.2	14	0.0007		0.0076	0.0042	0.0026				5.1062	2.7479	0.9118
7	0.3	14	0.0004		0.0039	0.0024	0.0018				1.7061	1.0745	1.2569
8	0.4	14	0.0002		0.0013	0.0009	0.0009				0.3977	0.2724	0.7526
9	0.5	14	0.0006		0.0010	0.0009	0.0011				0.1136	0.0808	0.5727
10	0.6	14	0.0007		0.0012	0.0012	0.0015				0.1125	0.1304	0.7748
11	0.7	14	0.0000		0.0004	0.0004	0.0006				0.0770	0.0923	0.4879
12	0.7	14	0.0001		0.0005	0.0002	0.0004				0.0894	-0.0115	0.2515



クロロフィル濃度測定2回目

サンプルNo	V	ml	測定値							補正	三波長		
			750 ₁	665 ₁	663	645	630	750 ₂	665 ₂		a	b	c
1	0.1	14	0.0000		0.0374	0.0160	0.0089				56.2332	21.7826	5.4286
2	0.1	14	0.0000		0.0281	0.0121	0.0067				42.2265	16.5901	4.0152
3	0.1	14	0.0000		0.0062	0.0029	0.0022				9.2574	3.9666	5.8869
4	0.1	14	-0.0005		0.0044	0.0021	0.0013				7.2240	4.0079	4.4790
5	0.1	14	-0.0001		0.0052	0.0031	0.0021				7.7000	5.3438	5.9616
6	0.2	14	0.0000		0.0027	0.0012	0.0010				2.0255	0.7606	1.5062
7	0.3	14	-0.0002		0.0018	0.0009	0.0010				0.9811	0.5038	1.7599
8	0.4	14	0.0000		0.0000	0.0000	0.0005				0.0018	-0.0641	0.9489



実験2 クロロフィル濃度

サンプルNo	V	ml	測定値								三波長		
			750 ₁	665 ₁	663	645	630	750 ₂	665 ₂	補正	a	b	c
1	0.8	14	0.0021		0.0052	0.0066	0.0081				0.4719	1.0533	4.2268
2	0.3	14	0.0035		0.0289	0.0233	0.0227				11.8910	11.4267	28.3418
3	0.2	14	0.0032		0.0182	0.0126	0.0115				10.8588	7.5348	15.9503
4	0.1	14	0.0018		0.0100	0.0072	0.0067				11.7984	8.8194	19.6501
5	0.1	14	0.0022		0.0078	0.0051	0.0050				8.2880	3.9901	10.9059
6	0.1	14	0.0024		0.0245	0.0142	0.0115				32.5732	17.7892	27.5003
7	0.1	14	0.0005		0.0171	0.0088	0.0063				24.6226	12.2387	13.9657
8	0.1	14	0.0011		0.0250	0.0134	0.0103				35.3567	18.2130	25.8292
9	0.1	14	0.0044		0.1053	0.0570	0.0421				149.0482	79.4492	98.9955
10-A	0.1	14	0.0013		0.0436	0.0223	0.0157				62.7833	30.9406	33.0175
10-B	0.1	14	0.0035		0.1178	0.0632	0.0474				168.8246	89.7250	120.9631

