

水面分光反射率比を用いた湖沼のクロロフィル a 濃度 及び濁度推定のための最適波長帯

THE OPTIMAL WAVELENGTH BAND FOR ESTIMATION OF CHLOROPHYLL-A
CONCENTRATION AND TURBIDITY IN A LAKE USING WATER SURFACE SPECTRAL
REFLECTANCE RATIO

宮田佳明¹・佐渡公明²・Md.Monirul Islam³
Yoshiaki Miyata, Kimiteru Sado and Md.Monirul Islam

¹ 学生員 工修 北見工業大学 大学院工学研究科 (〒090-8507 北海道北見市公園町 165)

² フェロー 工博 北見工業大学教授 土木開発工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町 165)

³ 正会員 博士 (工学) 北見工業大学外国人研究者 土木開発工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町 165)

The purpose of this research is finding out the optimal wavelength band for estimating inland water qualities with high precision using water surface spectral reflectance ratio for use in ocean color remote sensing. When the water surface spectral reflectance is observed in an inland water, it is generally recognized that an absorption band of light is in a red wavelength band (660~680nm), and a fluorescence radiation band is in a longer wavelength band than red band. The proposed optimal wavelengths for the estimation of the inland water qualities are different among the observation points in the range of red and near infrared. This paper showed the difference of water surface reflectance ratio by two wavelengths of the absorption and the fluorescence radiation band has a correlation with chlorophyll-a concentration. The optimal wavelengths which are required for the estimation of chlorophyll-a concentration and turbidity were found out using correlation analysis.

Key Word: water surface reflectance ratio, optimal wavelength, chlorophyll- a concentration, Turbidity, water transparency, remote sensing

1. はじめに

石狩川水系の茨戸川は、昭和 8 年に石狩川本川から切り離された、延長約 20.2km、流域面積 145.1km²、湖容積 1,750 万 m³ の三日月湖である。ボート・釣りに利用されるなど、地域住民の憩いの場となっているほか、全域が漁業利用されているが、都市域からの生活排水などの影響により、水質目標を超過している状況である。また、平成 6 年 8 月 29 日にアオコの発生が見られており、毎年 100 µg/L を超える高濃度のクロロフィル a が観測されている。このような水域のアオコ発生対策を効果的に行うためには、植物プランクトンの葉緑素であるクロロフィル a 濃度の現状を湖沼全体で把握する必要がある、広域かつ短時間に測定できるリモートセンシング技術が有効と考えられる。

ところで、水面分光反射率比を用いた外洋水のクロロフィル a 濃度推定は多くの研究がされており、490、555nm の水面分光反射率比を用いる OC2-V2 アルゴリズムや 443、490、510nm の内の最大値と 555nm の水面分光反射率比を用いる OC4-V4 アルゴリズムが用いられてきた^{1),2)}。しか

し、上記の水面分光反射率比を内陸水に適用すると、内陸水は陸域由来の濁質の影響を受けやすいので、クロロフィル a 濃度推定の精度が悪い²⁾。網走湖、霞ヶ浦、塘路湖における水面分光反射率の観測結果によると、赤の波長帯 (660~680nm) に光の吸収帯があり、それよりも長波長側に蛍光放射帯を有する特性が認められる^{2),3),4),5)}。また、最適波長帯は、赤~近赤外の範囲で観測地点によって、多少ずれを生じている。以上のように、リモートセンシングを用いた内陸水のクロロフィル a 濃度推定のために用いる最適波長帯を明らかにする必要がある。

本研究は、茨戸川全域及びその周辺水域の水面分光反射率、クロロフィル a 濃度、濁度を測定し、それぞれの観測項目についての特性を把握した。次にクロロフィル a については、2 波長を用いた水面分光反射率比とクロロフィル a 濃度の相関係数を算出し、濁度については、1 波長における水面分光反射率と濁度、及び 2 波長を用いた水面分光反射率比と濁度の相関係数をそれぞれ算出した。算出した相関係数に基づき、クロロフィル a 濃度及び濁度推定に最適となる波長、波長帯幅、平均濃度水深

(深さ方向の平均濃度を求める範囲の水深)を選定した。

2. 現地観測

(1) 現地観測概要

茨戸川での現地観測は、2004年8月10日～2004年8月11日までの2日間において、図-1に示したとおり、茨戸川の上部湖盆、中部湖盆、下部湖盆の26地点で38回実施した。観測内容は、(株)オプトリサーチ製の多目的分光放射計(MSR-7000)を用いて分光放射輝度(本研究では350～900nmの波長範囲を使った)、(株)アレック電子製のクロロテック(ACL1180-DK)を使って、湖水のクロロフィルa濃度及び濁度を測定した。また、セッキー円板を用いて透明度を測定した。図-2に現地観測内容を示す。

2004年8月10日の天候は晴れ一時曇りで雲量は1～8、気温は24.5～30.6℃であった。2004年8月11日の天候は、曇りで雲量は3～9、気温は25.0～30.1℃であった。

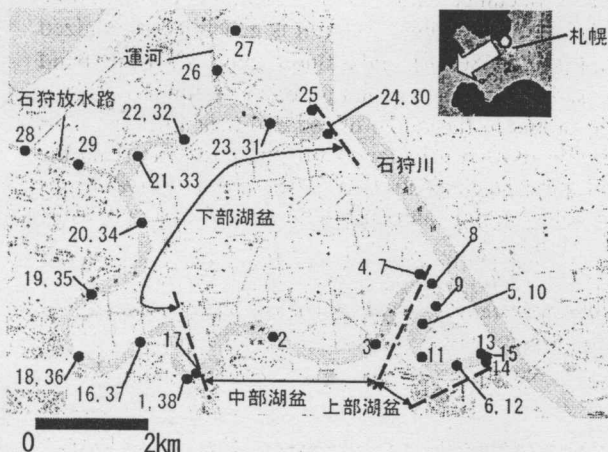
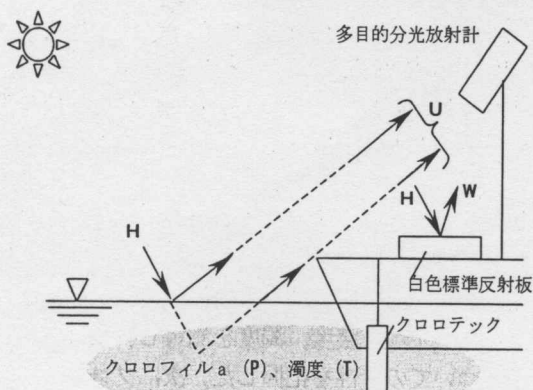


図-1 茨戸川(上部湖盆～下部湖盆)及び周辺水域の観測No.一覧



H (= πW): 水面向下分光放射照度 ($\text{Wm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$)
W: 白色標準反射板の分光放射輝度 ($\text{Wm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$)
U: 水面上の水面上向き分光放射輝度 ($\text{Wm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$)
P: クロロフィルa濃度 ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$), T: 濁度 (ppm)

図-2 現地観測内容

(2) 水面分光反射率の測定方法

図-2で示されているように、多目的分光放射計により、白色標準反射板を用いて太陽光の分光放射輝度Wを測定し、次に水面に対して水面直上の水面上向き分光放射輝度Uを測定した後、次式により水面分光反射率を算出する。なお、1回の測定時間は約1分と短いので、UとWの2回測定中の太陽からの日射量は一定と仮定し、白色標準反射板に影が入った場合は再計測しなければならない。

$$R_s = \frac{U}{W} \quad (1)$$

ここに、 R_s : 水面分光反射率, U: 水面直上の水面上向き分光放射輝度 ($\text{Wm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$), W: 白色標準反射板の分光放射輝度 ($\text{Wm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$)である。

(3) クロロフィルa濃度、濁度の測定方法

各地点において、クロロテックのセンサーを鉛直方向に0.1mピッチで水面から湖底まで下降させて、クロロフィルa濃度(ウラン基準のクロロフィルa濃度)、濁度を測定した。

3. 現地観測結果

(1) 水面分光反射率

現地観測で得られた水面分光反射率に基づき、図-3に水面分光反射率の波長ごとのスペクトルを示す。なお、水面分光反射率は、太陽高度の影響により変化するため^{6), 7), 8)}、太陽高度 θ の値も記入した。図中の平均クロロフィルa濃度及び平均濁度は、各観測地点における水面から透明度水深までのクロロフィルa濃度及び濁度の平均値である。この平均濁度の最大値(最大値を示す地点)、平均値(平均値に最も近い地点)、最小値(最小値を示す地点)はそれぞれ48ppm(No. 15), 16ppm(No. 2), 9ppm(No. 19)であり図中に記載している。最大値48ppmを持つ地点の水面分光反射率は、16, 9ppmの地点より大きく、また16と9ppmの地点については、450nm以下の波長を除いて、16ppmの地点の方が概ね大きくなっている。太陽高度による影響があるものの濁度上昇に応じて水面分光反射率が増加する傾向があると考えられる⁹⁾。

植物プランクトンに含まれるクロロフィルaについては、一般に、赤(660～680nm)、青(480～500nm)の光が吸収され、緑(550nm付近)と近赤外(700nm付近)が蛍光放射帯である。外洋水においては、陸域由来の無機懸濁物質や溶存有機物が少なく、植物プランクトンの割合が高いため、青と緑の波長をクロロフィルa濃度の推定に用いることが多い^{1), 2)}。一方、内陸水では、著者ら²⁾が網走湖で、沖ら³⁾が霞ヶ浦で、加藤ら⁴⁾が塘路湖で行った水面分光反射率の測定結果によると、光合成を行うための吸収帯(赤: 660～680nm)と余分な光を放射する蛍

光放射帯（690～710nm）が明瞭に示される結果となっている。今回の茨戸川の測定結果（図-3）でも同様の傾向が認められ、吸収帯と蛍光放射帯の差はクロロフィルa濃度に比例して拡大する傾向を示している。

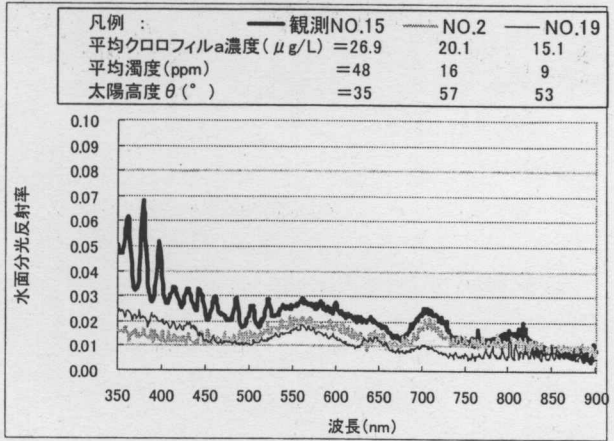


図-3 水面分光反射率のスペクトルと平均濁度、平均クロロフィルa濃度

(2) 濁度及び透明度、水温

図-4 は、各地点における透明度水深までの平均濁度を示しており、1 地点に対して 2 回観測を行っている場合は、2 回の平均値を表示した。上部湖盆の濁度は、中部、下部湖盆と比べて高い数値を示し、特に上部湖盆最上流端で 48ppm と最大値を示している。中部、下部湖盆と下流にいくにつれて値が低下し、下部湖盆の NO. 19&NO. 35 の地点では、最低の 10ppm まで低下する。NO. 1&NO. 38～NO. 22 &NO. 32 の区間は、伏古川流入による希釈により、茨戸川の濁度が低下していると考えられる。透明度については、濁度と負の相関で推移しており、濁度が最も高い上部湖盆の NO. 15 で 0.25m と最小になっている。なお、NO. 27 を除いて、透明度水深が観測地点の水深と以上の観測 NO. はなく、底面による影響は小さいと考えられる。

図-5 の濁度の鉛直分布は、全観測地点において、最大、最小、平均的な値を図示したものである。最小値と平均的な値については、ほぼ、鉛直方向に一定の値を示して

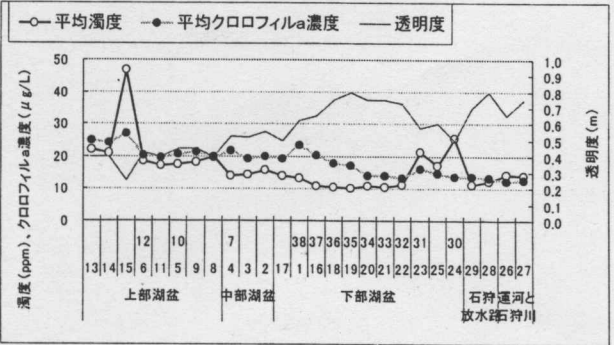


図-4 平均濁度、透明度及び平均クロロフィルa濃度の測定結果（数字は観測 NO.）

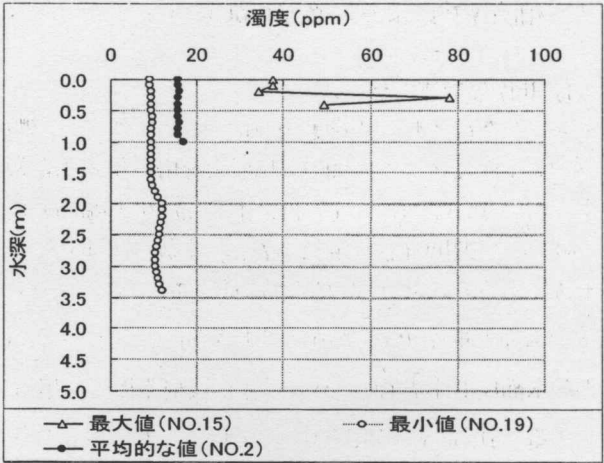


図-5 濁度の鉛直分布

いるが、水深の浅い上部湖盆 NO. 15 においては下層で 70ppm を超えており、流入水による希釈効果が乏しく、風波や観測時の擾乱による巻上げの影響が大きいと考えられる。

(3) クロロフィルa濃度

透明度水深までの平均クロロフィルa濃度の地点変化については、図-4 中に示した。濁度と同様に上部、中部、下部湖盆の順に濃度が低下しており、上部湖盆の NO. 15 で最大値の 27 μg/L を示すが、中部、下部湖盆と下流にいくにつれて値が低下し、下部湖盆の NO. 22 &NO. 32 では、最低の 13 μg/L まで低下している。なお、石狩放水路では曝気を実施し、運河では、伏古川からの流入水により、流動が生じているため、植物プランクトンの発生が抑制されて、低濃度となっていると考えられる。

図-5 と同様にクロロフィルa濃度の鉛直分布を図-6 に図示する。特に明確な鉛直分布は認められず、水表面と同程度の濃度となっている。全観測地点の中で、水温と塩分濃度の水深方向の最大変動幅はそれぞれ、No. 7 の 24.2～27.6℃、No. 29 の 0.7～1.0PSU と少なく、密度の鉛直分布についてもほぼ同様と考えられる。

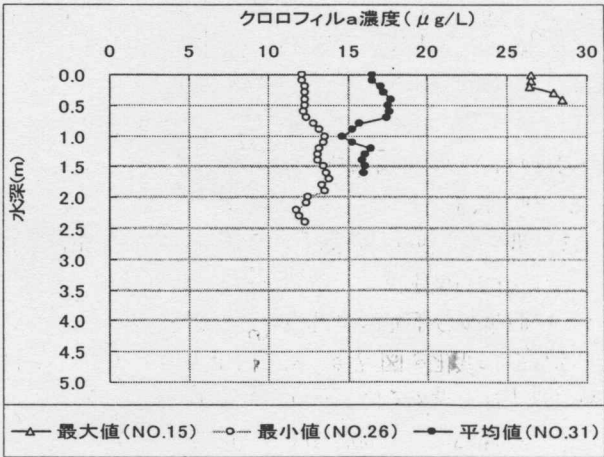


図-6 クロロフィルa濃度の鉛直分布

4. 相関係数による最適波長選定

(1) 相関係数算出ケース

ここでCを水質（濁度（ppm）、クロロフィルa濃度（μg/L））として、水面分光反射率を用いた水質濃度推定式を(2)式に示す。 \bar{C} は、水深nh（h：透明度水深（m）、n：透明度水深のn倍を表わす定数）に対する平均水質である。式(3)のRは、波長範囲 $\lambda_1-\delta\sim\lambda_1+\delta$ の平均水面反射率 $\overline{R_s}(\lambda_1\pm\delta)$ と波長範囲 $\lambda_2-\delta\sim\lambda_2+\delta$ の平均水面反射率 $\overline{R_s}(\lambda_2\pm\delta)$ との水面反射率比の常用対数である。 a_1, a_2 は定数である。 $\text{Log}\bar{C}$ とRとの最も良い相関を正とするために(3)式の右辺に負号を付ける。現地観測における全観測地点の結果を回帰分析し、その回帰直線式、相関係数rを算出した。また、算出した相関係数rが最大値となる λ_1, λ_2 の中心波長（nm）、波長帯幅 δ （nm）及びnを求めた。なお、 λ_1 及び λ_2 は、350～900nmの範囲を1nm刻み、 δ は0～10nmの範囲を1nm刻み、nは0.5～2.0の範囲を0.5刻みとして全ての組み合わせについて相関係数rを算出した。

$$\bar{C}(nh) = 10^{a_1 \cdot R + a_2} \tag{2}$$

$$R = -\text{Log} \frac{\overline{R_s}(\lambda_1 \pm \delta)}{\overline{R_s}(\lambda_2 \pm \delta)} \tag{3}$$

または、

$$R = \text{Log} \overline{R_s}(\lambda_1 \pm \delta) \tag{4}$$

クロロフィルaの場合は、前述の通り、光の吸収と蛍光放射の特性を持つことから、Rについては、(3)式のみについて計算し、濁度の場合のRについては、(3)式及び(4)式について計算を行った。下表に相関係数算出ケースを示し、以下に結果を示す。

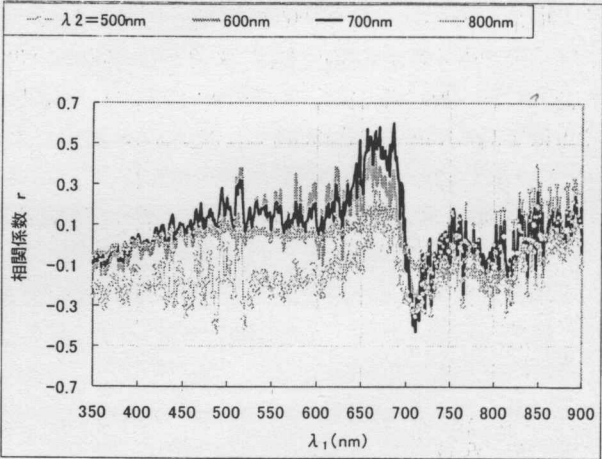
表-1 相関係数算出ケース

水質項目	水面分光反射率によるR(4式)	水面分光反射率比によるR(3式)
クロロフィルa濃度	—	ケース1
濁度	ケース2	ケース3

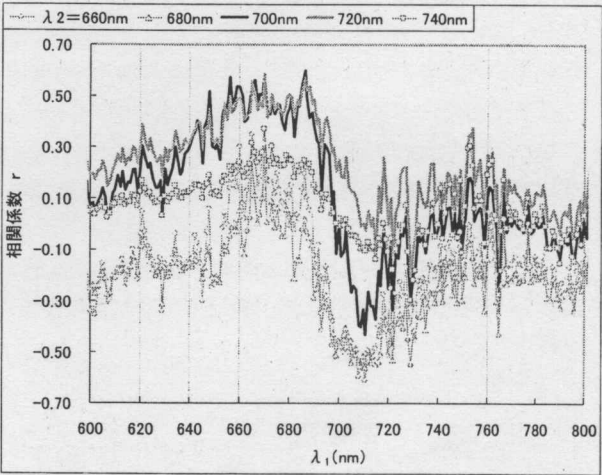
(2) クロロフィルa濃度

a) ケース1

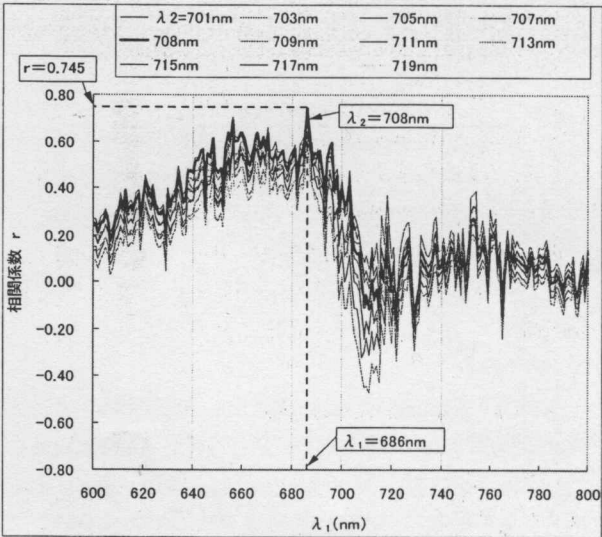
波長帯幅 $\delta=0\text{nm}$ 、クロロフィルa濃度の平均値を求める水深を透明度水深まで（ $n=1$ ）とし、光合成のための光の吸収帯及び蛍光放射帯の中心波長 λ_1, λ_2 に対する相関係数rの変化を図-7(a)～(c)に示す。これらの図は最適中心波長を求めるにあたり、 λ_1 を横軸にとりパラメータ λ_2 の間隔 $\Delta\lambda_2$ を100, 20, 1～2nmと段々小さくしていく探索課程を示している。図-7(a)を見ると、外洋水のク



(a) λ2=500～800nm (Δλ2=100nm)



(b) λ2=660～740nm (Δλ2=20nm)



(c) λ2=701～719nm (Δλ2=1, 2nm)

図-7 クロロフィルa濃度推定のための最適中心波長（δ=0nm、n=1の場合）

ロロフィルa濃度推定に用いられる $\lambda_1=440\sim510\text{nm}$ 及び $\lambda_2=500\sim600\text{nm}$ の波長において、相関係数の絶対値

が 0.5 以下と低くなっており、内陸水である茨戸川のクロロフィル a 推定には、上記波長帯が適さないことを示している。図-7(a)では、 λ_1 が 650~690nm、 λ_2 が 700nm の場合にピークを示しており、図-7(b)において λ_2 の 700nm を中心とし、20nm 毎にプロットしたところ、 λ_1 が 655~690nm、 λ_2 が 700nm 及び 720nm において相関係数 r が 0.57 以上の最大値を示した。さらに、 λ_2 を 700~720nm の範囲で 1~2nm 毎に確認したところ、図-7(c)に示したとおり、 λ_1 が 686nm、 λ_2 が 708nm の場合に 0.745 の相関係数の最大値が得られた。また、吸収帯が近赤外域 ($\lambda_1 > 700\text{nm}$) に入ると相関係数が急に低下することが示されている。

次に、平均クロロフィル a 濃度を求める水深及び波長帯幅 δ と相関係数 r との関係を図-8 に示す。この図は各 δ 、 n 値に対し最適中心波長を用いたときの相関係数を示している。 δ が 0nm に比べ、その他の場合は相関係数の低下する傾向が見られる。 δ が 0nm で、 $n=1.0$ の場合について、最大の相関係数 0.745 となっている。結局クロロフィル a 濃度推定には $\lambda_1=686\text{nm}$ 、 $\lambda_2=708\text{nm}$ 、 $\delta=0\text{nm}$ 、 $n=1.0$ の場合が最適である。この最適条件のときの式(2)によるクロロフィル a 濃度推定値と実測値との比較の図は紙数の関係で省略するが、両者の相関係数は 0.697 と得られた。

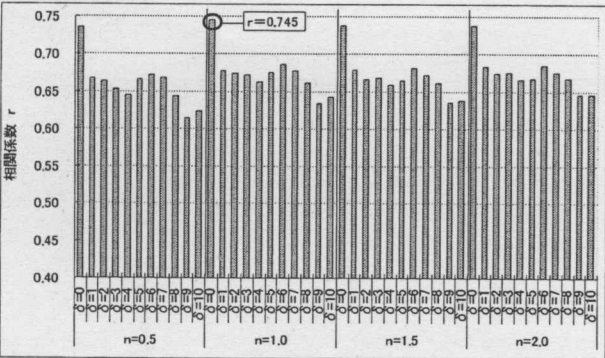


図-8 クロロフィル a 濃度推定のための最適な δ (nm) 値、 n 値 (λ_1 、 λ_2 は最適中心波長)

(3) 濁度

a) ケース 2

$n=0.5$ の場合について、波長 λ_1 、波長帯幅 δ と相関係数との関係を図-9 に示す。 δ が 0nm で、 λ_1 が 825nm のとき、相関係数は最大値 0.429 を示し、相関が悪い。また、 $n \neq 0.5$ の場合は、相関係数が 0.429 以下の値を示した。従って、水面分光反射率を用いた (4) 式による濁度推定は不適切と考えられる。

b) ケース 3

$\delta=0\text{nm}$ 、 $n=0.5$ の場合、図-10(a)では、 $\lambda_2=600\text{nm}$ 、 $\lambda_1=511\text{nm}$ でピークを示した。図-10(b)において λ_2 の 560~640nm について、20nm 毎にプロットしたところ、 $\lambda_1=511\text{nm}$ 、 $\lambda_2=600\text{nm}$ において、相関係数がピークを示した。さらに、

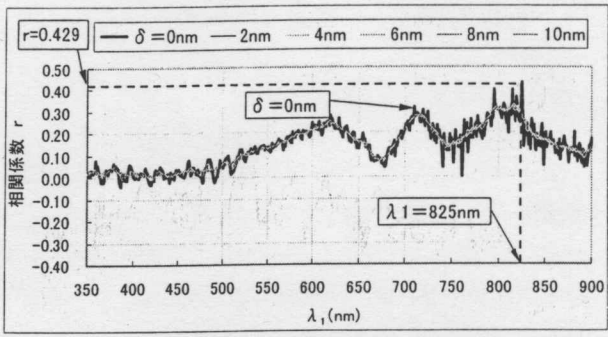
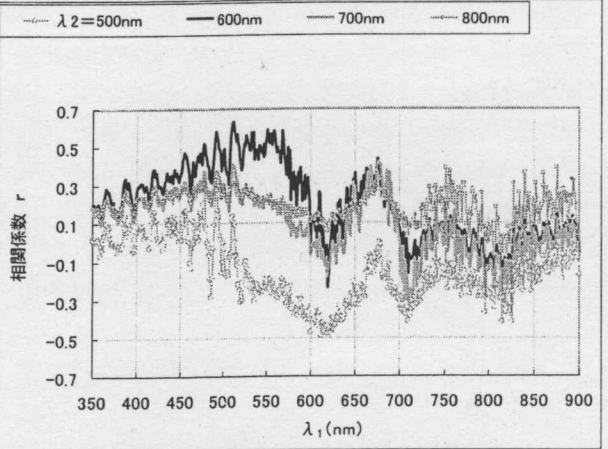
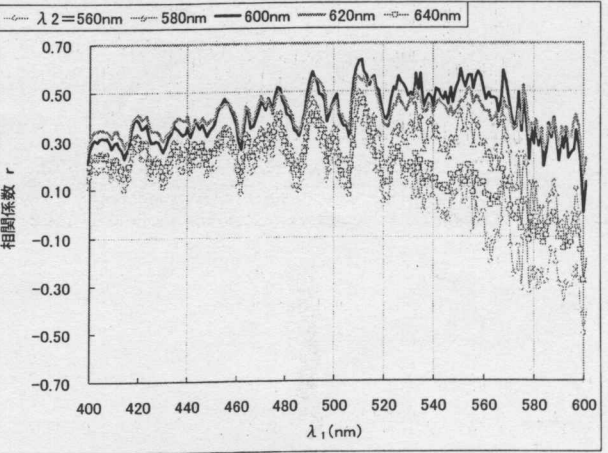


図-9 分光反射率を用いた濁度推定のための最適な λ_1 、 δ ($n=0.5$ の場合)



(a) $\lambda_2=500\sim 800\text{nm}$ ($\Delta \lambda_2=100\text{nm}$)

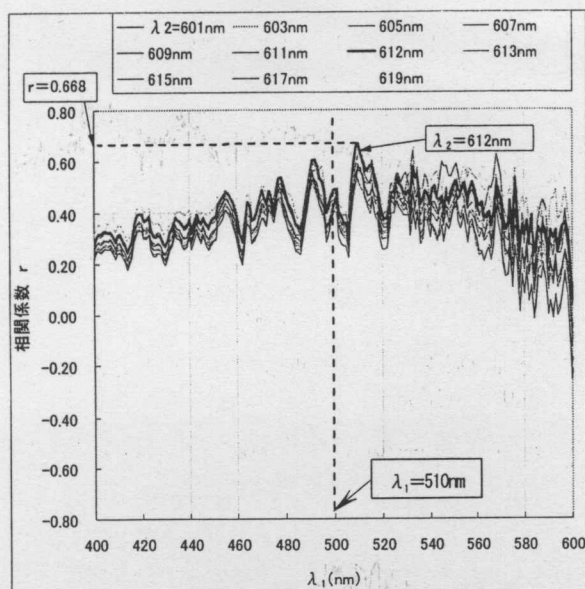


(b) $\lambda_2=720\sim 800\text{nm}$ ($\Delta \lambda_2=20\text{nm}$)

図-10 濁度推定のための最適中心波長 (その 1) ($\delta=0\text{nm}$ 、 $n=0.5$ の場合)

図-10(c)に示したように、 λ_2 を 601~619nm の範囲で 1~2nm 毎に確認すると、図に示すとおり、 λ_1 が 510nm、 λ_2 が 612nm の場合に相関係数の最大値 0.668 が得られた。

次に、 λ_1 、 λ_2 を各 δ 、 n に対する最適値に選定した場合について、 n 及び δ と相関係数との関係を図-11 に示す。 $\delta=0\text{nm}$ 、 $n=0.5$ の場合に相関係数が最大の 0.668 となっている。従って、濁度推定は、水面分光反射率比 (3) 式を用いて $\lambda_1=510\text{nm}$ 、 $\lambda_2=612\text{nm}$ 、 $\delta=0\text{nm}$ 、 $n=0.5$ の場合が最適と考えられる。この最適条件のとき式(2)による濁度の推定値と実測値との相関係数は 0.550 と得られた。



(c) $\lambda_2 = 781 \sim 799 \text{ nm}$ ($\Delta \lambda_2 = 1, 2 \text{ nm}$)
 図-10 濁度推定のための最適中心波長 (その2)
 ($\delta = 0 \text{ nm}$, $n = 0.5$ の場合)

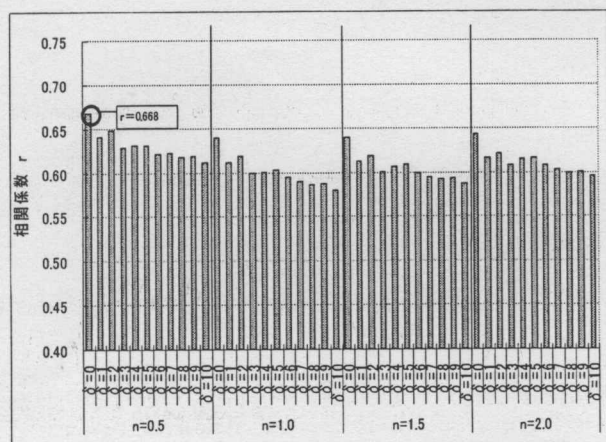


図-11 濁度推定のための最適な δ (nm) 値、 n 値
 (λ_1, λ_2 は最適中心波長)

5. おわりに

以上、水面分光反射率比を用いた湖沼のクロロフィル a 濃度及び濁度の推定に関して、以下の知見が得られた。

- (1) 茨戸川の現地観測で得られた水面分光反射率のスペクトルをみると、網走湖で著者が測定したスペクトルと同様に光合成を行うための吸収帯 (赤: 660 ~ 690 nm) と余分な光を放射する蛍光放射帯 (690 ~ 710 nm) が明瞭に認められる。
- (2) 水面分光反射率比を用いるときのクロロフィル a 濃度推定の最適波長は、吸収帯で $686 \pm 0 \text{ nm}$ の可視域、蛍光放射帯で $708 \pm 0 \text{ nm}$ の近赤外域である。
- (3) 水面分光反射率と濁度との相関は、水面分光反射率比と濁度との相関に比べ、非常に悪い。
- (4) 水面分光反射率比を用いるときの濁度推定のための最適波長帯は、 $510 \pm 0 \text{ nm}$ 、 $612 \pm 0 \text{ nm}$ である。

- (5) 水深方向の平均値については、クロロフィル a 濃度では、透明度水深までの範囲 ($n=1$)、濁度では透明度水深の 1/2 の水深範囲 ($n=0.5$)、で求めるのが最適と得られた。

植物プランクトンの種類や濁質成分が異なれば、光の吸収・散乱特性が異なり最適波長にも影響する。従って本論文で夏季の茨戸川に対し得られた結論が、一般的な結果となるか否かを判定するには、今後多くの湖沼・貯水池における幅広い濃度範囲の観測データを検討しなければならない。

本研究では、水面分光反射率比と水質濃度との相関を 1 nm ごとに評価することで最適な波長帯を把握できた。クロロフィル a 濃度のための最適中心波長の差は 22 nm しか離れていない。現在は 20 nm の波長帯を持つ海面リモートセンシングセンサーが主流であるが、今後は分解能 1 nm のハイパースペクトル衛星データを利用するにあたり、本研究の成果が活用できると考える。

謝辞：本研究は文部科学省の科研費(14・02334)の助成を受けた。また、茨戸川現地調査では、北海道開発局石狩川開発建設部札幌河川事務所、北開水工コンサルタントの多大なるご協力を頂き、ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 岸野元彰、福島 甫、虎谷充浩、陳 文忠、田中昭彦：海洋リモートセンシング第 3 回海面リモートセンシング、日本リモートセンシング学会誌, Vol.22 No.3, pp.336-354, 2002.
- 2) 丹田善和、佐渡公明、Md. Monirul Islam、中尾隆志：水面分光反射率を用いた網走湖のクロロフィル a 濃度推定、平成 15 年度土木学会北海道支部論文報告集、第 60 号, pp.468-471, 2004.
- 3) 沖 一雄、安岡善文：高濃度水域における近赤外波長帯を含む二波長によるクロロフィル a 推定モデルの作成、日本リモートセンシング学会誌, Vol.16 No.4, pp.1-9, 1996.
- 4) 加藤晃司、渋谷直生、中津川誠、新庄 興：リモートセンシングによる釧路 3 湖沼の富栄養化状態の把握、水文学資源学会 2004 年研究発表会要旨集, pp.142-143, 2004.
- 5) 佐渡公明：衛星画像を用いた湖沼のアオコおよび水温モニタリングシステムの開発、平成 12~13 年度科学研究費補助金(基礎研究(B)(2)) 研究成果報告書, pp.11-20, 2002.
- 6) 近藤純正：水環境の気象学、朝倉書店, pp.161-163, 1996.
- 7) 新井 正：水温論、共立出版, pp.28-45, 1974.
- 8) Tennessee Valley Authority: Heat and Mass Transfer between a water surface and the atmosphere, Water Resources Research Laboratory Report No.14, pp.2.1-2.36, 1972.
- 9) 日本リモートセンシング研究会：図解リモートセンシング、日本測量協会, pp.18-21, 1998.

(2004. 9. 30 受付)