

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

Estimation of chlorophyll-a concentration in Lake Abashiri using water surface reflectance

北見工業大学大学院	○学生員	丹田善和 (Yoshikazu Tanda)
北見工業大学工学部	フェロー	佐渡公明 (Kimiteru Sado)
北見工業大学工学部	正員	モハマド モニール イスラム (Md Monirul Islam)
北見工業大学工学部	正員	中尾隆志 (Takashi Nakao)

1. はじめに

網走湖は面積 32.3km²、周囲 42km で水深約 5~6m の塩淡水境界層を境に上部淡水層、下部塩水層があり、海水と河川水が混ざり合う汽水湖である。網走湖では植物プランクトンが水温 18℃以上・クロロフィル a 濃度が 30 μg/l 以上のときに「アオコ」が発生し、長時間の強風により底層にあった塩水層が岸近くの表面に出現し硫黄のにおいを漂わせる「青潮」現象が起きている。

これらは、わかさぎ・シジミを大量に死滅させ、漁業や環境に大きなダメージを与えている。これらの対策を行うには、まず植物プランクトンの葉緑素であるクロロフィル a が、どれくらいの濃度であるかを把握し、それに基づいていろいろなことを検討する必要がある。

本研究では、まず 1997~2000 年までの網走湖の現地観測データを用いクロロフィル a 濃度の特性を調べる。次に水面における分光反射率の比を用いた外洋 (case1 水)、沿岸・内湾域 (case2 水) におけるクロロフィル a 推定アルゴリズムを使って¹⁾、クロロフィル a 濃度を推定し、計算値と実測値との比較を行う。

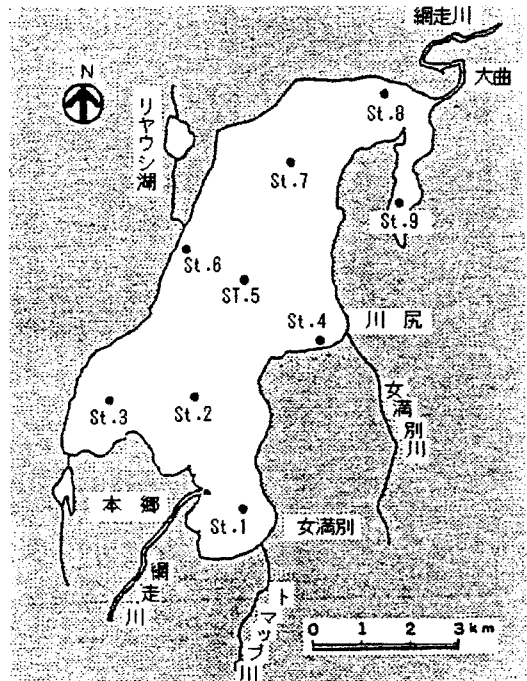


図1 網走湖における観測地点

2. 網走湖における現地観測

2.1 現地観測の概要

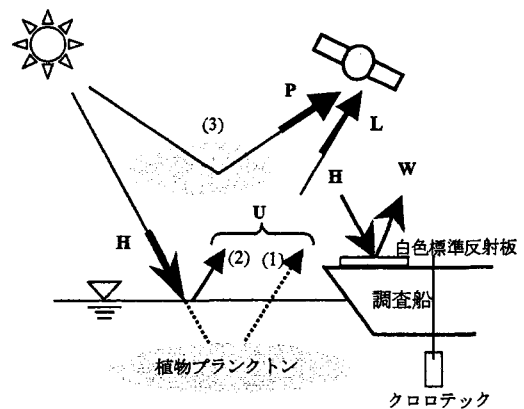
網走湖での現地観測は、1997年6月12日~2000年10月23日までの5~10月に含まれる34日間観測した。(株)オプトリサーチ製の多目的分光放射計 (MSR-7000) と (株)アレック電子製のクロロテック (ACL1180-DK) を使って、水面分光反射率 (本研究では 350~900nm の波長範囲を使った) と湖水のクロロフィル a 濃度をそれぞれ観測した。観測地点を図1に示す。

2.2 水面分光反射率の測定法

水面分光反射率の測定法を図2示す²⁾。水面分光反射率 $R (sr^{-1})$ は次式で得られる。

$$R = \frac{U}{H} \quad (sr^{-1}) \quad (1)$$

ここに、U: 水面直上の水面上向き分光放射輝度 ($Wm^{-2} \mu m^{-1} sr^{-1}$)、H: 水面下向き分光放射照度 ($Wm^{-2} \mu m^{-1}$)。なお、水面下向き分光放射照度 H は、直接測定できないので白色標準反射板を使って分光放射輝度 W を測定して、照度を輝度に変換することにより



- (1) 水中物質により散乱され受光部に入射する光
- (2) 水面で直接反射して受光部に入射する光
- (3) 大気の散乱光

H: 水面下向き分光放射照度 ($Wm^{-2} \mu m^{-1}$)
 W: 白色標準反射板の分光放射輝度 ($Wm^{-2} \mu m^{-1} sr^{-1}$)
 U: 水面上向き分光放射輝度 ($Wm^{-2} \mu m^{-1} sr^{-1}$)
 P: 衛星センサーに入射する大気散乱放射輝度 ($Wm^{-2} \mu m^{-1} sr^{-1}$)
 L: 衛星センサーが検知する U の非吸収放射輝度 ($Wm^{-2} \mu m^{-1} sr^{-1}$)

図2 衛星同期観測における放射輝度の経路

$$H = \pi W \quad (2)$$

と表される。したがって分光放射計を用いて U, W を測定することにより R が求まる。海色リモートセンシングの分野では、次式のリモートセンシング反射率 Rrs が良く使われている¹⁾。

$$Rrs = \frac{U}{\pi W \cos \theta_0} \quad (sr^{-1}) \quad (3)$$

ここに、 θ_0 : 太陽天頂角

3. クロロフィル a 濃度の特性

3.1 水面分光反射率に対するクロロフィル a の影響

クロロフィル a は植物プランクトンに含まれる葉緑体中に存在する主光合成色素で、一般に可視領域の赤と青の光が吸収され、逆に緑と 700nm 付近が蛍光放射帯である。図 3 は、網走湖で観測した水面分光反射率と波長の関係を示す一例である。

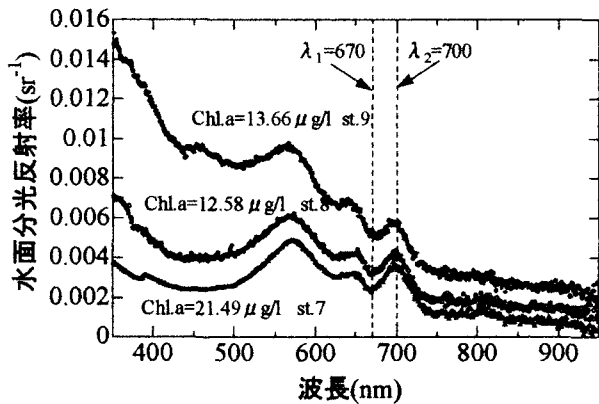


図 3 水面分光反射率に対するクロロフィル a の吸収と蛍光放射を示す一例 (1997. 8. 21)

植物プランクトンが光合成を行うために使う光を吸収する波長帯(赤: 660~680nm)と余分の光を発する蛍光放射帯(690~710nm)が明瞭に示されている。したがってこれらの波長帯におけるリモートセンシング反射率 $Rrs(670), Rrs(700)$ を網走湖のような汽水湖、内湾域・沿岸等の case2 水のクロロフィル a 濃度推定に用いるべきことを示唆している。一方、外洋域の case1 水では陸域由来の無機懸濁物や溶存有機物を除く植物プランクトンが、ほとんどなので波長 480~500nm(青)と 540~560nm(緑)におけるリモートセンシング反射率 $Rrs(490)$ と $Rrs(555)$ の比が良く使われている。網走湖は case2 水に分類され、図 3 において青の光の吸収が見られない。

3.2 クロロフィル a 濃度の鉛直分布

図 4 は網走湖湖心 st. 5 におけるクロロフィル a 濃度の鉛直分布の典型的な一例を示す。

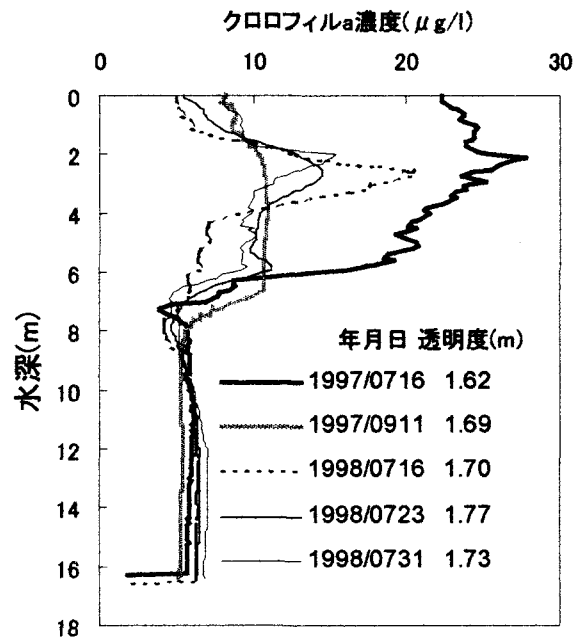


図 4 クロロフィル a 濃度の鉛直分布 (st. 5)

図 4 より水深 2~3m 付近にクロロフィル a 濃度のピークがあり、水面からピークまではクロロフィル a 濃度が上がっていき、水深 3~7m で急激な減少が見られる。これは塩淡水境界層の影響と思われる。1998 年 10 月~2001 年 9 月までの 82 ヶのデータをもとに平均透明度を求めると 1.63m であった。このときの濁度と透明度の回帰直線式を用いて推定した透明度を図 4 中に記す。クロロフィル a 濃度のピークとなる水深が透明度よりも深いことは、植物プランクトンの光合成にとって注目すべきことである。

4. 汽水湖におけるクロロフィル a 濃度の推定式

最初にさまざまなクロロフィル a 濃度の推定式を説明する。OrbView2/SeaWiFS で使われている case2 水用クロロフィル a 濃度の推定式として、TeraScan ソフトウェアでは OC2-v2 が使われているが検証されていない。他方、NASA は OC4-v4 という新しい推定式を提案した。OC2-v2 と OC4-v4 の推定式は、それぞれ式 (4), (5) である^{1), 3)}。

OC2-v2:

$$chl.a = 10^{(a_0 + a_1 R + a_2 R^2 + a_3 R^3)} + a_4 \quad (4)$$

$$R = \text{Log} \left[\frac{Rrs(490)}{Rrs(555)} \right]$$

$$a = [0.2974, -2.2429, 0.08358, -0.0077, -0.0929]$$

OC4-v4:

$$chl.a = 10^{(a_0 + a_1 R + a_2 R^2 + a_3 R^3 + a_4 R^4)} \quad (5)$$

$$R = \text{Log} \left\{ \frac{\max[Rrs(443), Rrs(490), Rrs(510)]}{Rrs(555)} \right\}$$

$$a = [0.366, -3.067, 1.93, 0.649, -1.532]$$

4.1 670nm, 700nm のリモートセンシング反射率比を用いた n 次単回帰式

次の式(6), (7)に示すように、波長 670, 700nm のリモートセンシング反射率比の常用対数を R とし、クロロフィル a 濃度の常用対数が R の n 次単回帰式で表されると仮定する。

$$R = \text{Log} \left[\frac{Rrs(670)}{Rrs(700)} \right] \quad (6)$$

$$\log_{10} chl.a = a_0 + a_1 R + a_2 R^2 + \dots + a_n R^n \quad (7)$$

クロロフィル a 濃度の推定式として式(7)を使う場合に、次数 n が問題となる。またクロロフィル a 濃度は図 4 に示すように鉛直分布があるので、式(7)のクロロフィル a 濃度は、どの深さまでの平均クロロフィル a 濃度を表わすかが問題となる。

図 5 は網走湖における 1997~2000 年までの 50 ヶの観測値を用いて求めたもので、単回帰式の相関係数に対する次数と平均クロロフィル a 濃度を求める水深の影響を表している。各単回帰式の F 検定を行ったところすべて 1% 有意であった。図 5 により、0~2m 平均クロロフィル a 濃度の相関が良いことがわかる。また 3 本の単回帰式を見ると全て 2 次, 4 次, 6 次で相関係数が上がっている。ここでは、平均クロロフィル a 濃度を求める水深を 0~2m とし、次に 4 次式と 6 次式の相違を検討する。図 6, 7 は 1997~2000 年の 50 ヶのデータに対して得られた 4 次, 6 次の単回帰式である。

ここで得られた 4 次, 6 次のクロロフィル a 濃度推定式は次の通りである。

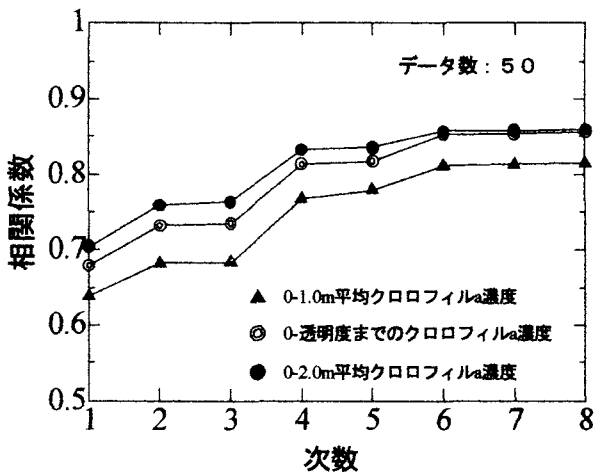


図 5 単回帰式の次数と相関係数の関係

KIT-4 次式:

$$\log chl.a = 0.9776 - 9.134R - 61.67R^2 + 940.7R^3 + 7702R^4 \quad (8)$$

KIT-6 次式:

$$\log chl.a = 0.9620 - 12.78R - 36.52R^2 + 3.62 \cdot 10^3 R^3 + 1.553 \cdot 10^4 R^4 - 3.154 \cdot 10^5 R^5 - 1.827 \cdot 10^6 R^6 \quad (9)$$

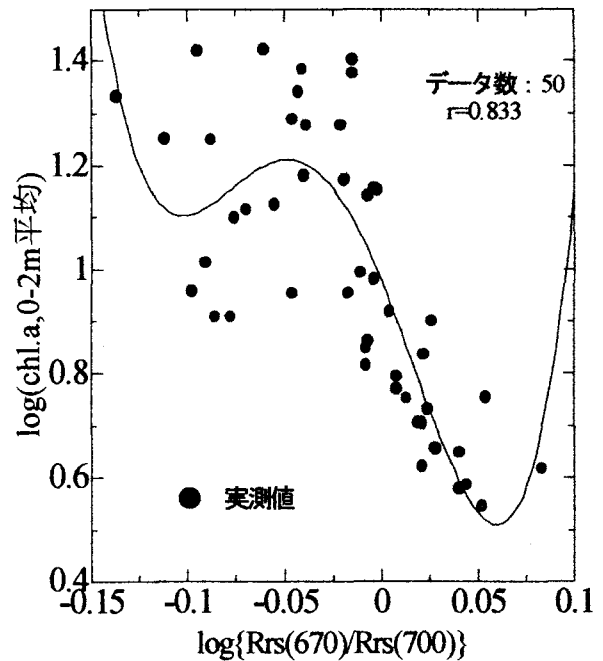


図 6 1997~2000 年のクロロフィル a 濃度実測値に対する 4 次単回帰式

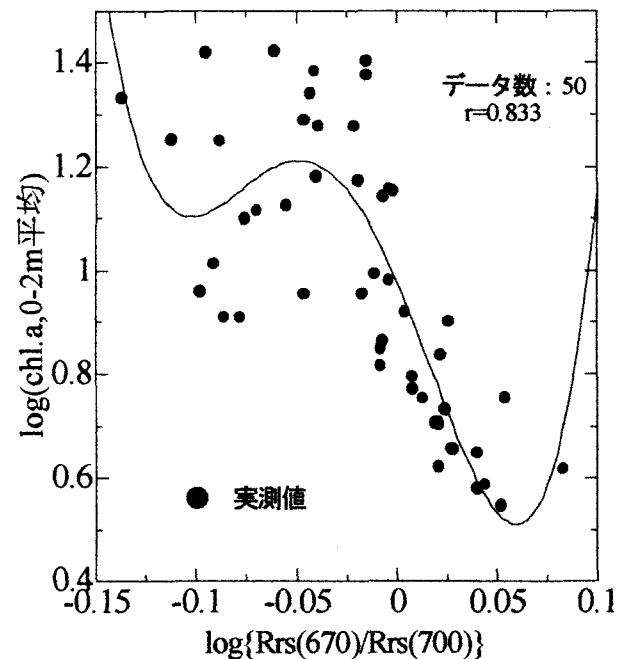


図 7 1997~2000 年のクロロフィル a 濃度実測値に対する 6 次単回帰式

ここで式(8)の偏回帰係数は、すべて1%有意であり、式(9)の偏回帰係数は、1次~3次までの係数は1%有意、4次~6次までの係数は5%有意であった。以下、式(8)、(9)をそれぞれKIT-4次式、KIT-6次式と呼ぶ。両者の相関係数は図6,7に示すように、 $r=0.833, 0.856$ と大きな差はない。

4.2 クロロフィル a 濃度の推定式

OC2-v2, OC4-v4, KIT-4次式, KIT-6次式を用いて、1997~2000年までの網走湖現地観測データ50ヶについてクロロフィル a 濃度を推定した。結果を図8に示す。クロロフィル a 濃度の実測値が小さい場合は、OC2-v2, OC4-v4の計算値とKIT-4次式, KIT-6次式の計算値は差がない。

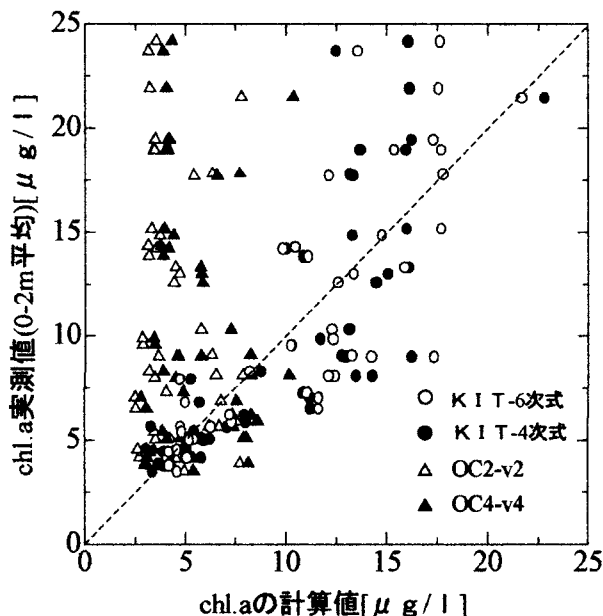


図8 1997~2000年のクロロフィル a 濃度実測値と計算値の比較

しかしクロロフィル a 濃度の実測値が大きい場合はOC2-v2とOC4-v4の計算値は過小に評価されているが、KIT-4次式, KIT-6次式は実測値により近いことがわかる。また、クロロフィル a 濃度の実測値が大きい場合、OC4-v4の計算値はOC2-v2より少し改善していることが示されている。

5. 結論

本研究で得られた結果を以下に要約する。

- (1) 網走湖における水面分光反射率の測定結果より、植物プランクトンの光合成に必要な吸収帯の中心は670nmにあり、蛍光放射帯の中心は700nmにあることが明らかとなった。
- (2) 外洋域のクロロフィル a 濃度推定に使われているOC2-v2, OC4-v4の式は、網走湖ではクロロフィル a 濃度が大きいときに過小評価され適用できない。

- (3) 網走湖のクロロフィル a 濃度の推定式として、670と700nmのリモートセンシング反射率比を用いたn次単回帰式を検討した。
- (4) KIT-4次式, KIT-6次式を比較した結果、相関係数とクロロフィル a 濃度の計算値には大差がないので、式形の簡単なKIT-4次式を網走湖のクロロフィル a 濃度の推定式として提案する。

謝辞

網走湖の現地観測において網走開発建設部所有の調査船おおさぎ号を使用させていただき、ここに感謝の意を示します。また本研究は、平成15年度科学研究費補助金(特別研究員奨励費 02334)の助成をうけ、ここに感謝の意を示します。

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回海色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) 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年~平成13年度科学研究費補助金(基盤研究(B)(2))研究成果報告書, pp. 11-20, 2002.
- 3) KAHRU, M, and MITCHELL, B. G., 1999. Empirical chlorophyll algorithm and preliminary SeaWiFS validation for the California current, Int. J. Remote Sensing, 20(17), pp. 3423-3429.