

II-19

網走湖における分光反射率を用いたクロロフィル a 濃度の推定

北見工業大学大学院 ○ 学生員 塩見 秀之
北見工業大学工学部 フェロー 佐渡 公明

1. はじめに

研究調査の対象である網走湖は、潮の干満により海水と河川水が混ざり合う汽水湖であり、近年富栄養化現象に悩まされている。この原因としては、塩水層から拡散される窒素・燐による内部負荷と工業・畜産などからの排水による外部負荷が挙げられる。その結果、湖水中は植物プランクトンの異常発生であるアオコを引き起こし、漁業や自然環境に大きな影響を与えている。

本研究は、アオコの指標としてクロロフィル a 濃度を使用し、昨年度実施した分光放射計を用いた現地観測データから分光反射率とクロロフィル a 濃度との回帰直線式を導きだし、その回帰直線式と今年度の現地観測データより、網走湖におけるクロロフィル a 濃度の推定値を算出して、実測値との比較検討を行った。

2. 現地観測の概要

現地観測は、網走湖全域より7地点を選び出し、1997年6月12日から9月11日までの14日間と1998年5月28日から10月29日までの10日間、合計24日間の測定を行った。船上調査（北海道開発局網走開発建設部所有あおさぎ）による測定項目は、水面における分光反射率と水中のクロロフィル a 濃度である。次に、これらの測定原理と測定方法を説明する。

2.1 水面分光反射率の測定

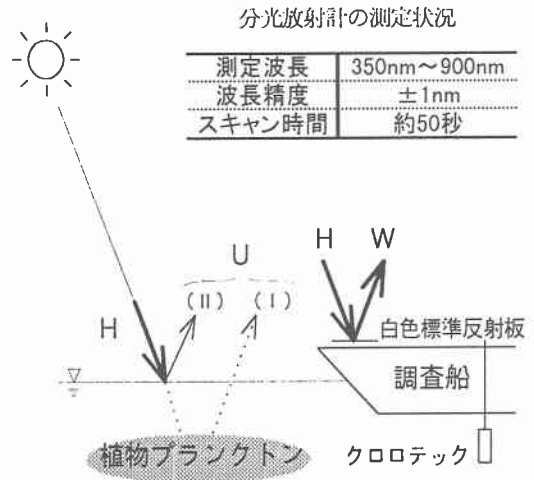
水面における分光反射率の測定は、多目的分光放射計（(株)オプトリサーチ製、MSR-7000）を用いて行った。水面直上の受光部で検出される太陽光には、(I)水面から透明度までの深さにおける水中物質により散乱された光、(II)水面における直接反射光、これら2つの成分で構成されている。このうち、水中の情報が含まれているのが(I)の成分であり、(II)はデータ解析に大きな影響を与える余分な成分である。よって、この(II)成分の除去が必要である。

図-1 は水面における測定の概要を示したものである。分光反射率 R (sr^{-1}) は、水面直上の上向分光放射輝度 U ($\mu\text{W cm}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$) と白色標準反射板を用いた水面下向分光照度 H ($\mu\text{W cm}^{-2} \text{nm}^{-1}$) より、

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

と表される。ここで、上向分光放射輝度 U は図-1 における(I)と(II)の成分の和である。また、水面下向分光照度 H は直接求めることが出来ないために、白色標準反射板の分光放射輝度 W で次式により補正した。

$$H = \frac{\pi W}{\rho} \quad (2)$$



分光放射計の測定状況

測定波長	350nm~900nm
波長精度	±1nm
スキャン時間	約50秒

図-1 現地観測の概要図

Estimation of chlorophyll-a concentration using spectral reflectance in Lake Abashiri.

By Hiroyuki Shiomi and Kimiteru Sado.

ここで、白色標準反射板は完全拡散面と仮定してその反射率は $\rho = 1$ で近似した。実際の観測では、波の影響などが十分考えられるので、水面輝度と白色板反射輝度を交互に2回測定して、その平均値より分光反射率を求めた。図-1に分光放射計の測定状況を示す。

水中物質はそれぞれ異なる分光特性を有している。特に、今回の研究対象であるクロロフィルaは440nm、670nm付近での選択的な強い吸収、700nm付近での蛍光放射が特徴的であると言われている(図-2参照)。

昨年度の研究結果より、網走湖におけるクロロフィルaは、吸収帯を430nm~450nm(短波長側)と660nm~680nm(長波長側)に、蛍光放射帯を690nm~710nmに定義して、これらの範囲における U と H の積算値より反射率 R を算出した。しかし、先に述べた(II)の成分がデータ解析に大きな影響を与えているために、これらの波長帯における反射率を直接使用することは、とても難しくなった。よって、(II)の成分を除去する必要があるため、そのために蛍光放射帯と吸収帯(長波長側)の反射率の差、比、そしてNDVI方式を用いた解析を行い、おおよそ解決した。

2.2 クロロフィルa濃度の測定

クロロフィルa濃度の測定は、クロロテック(アレック電子(株)製、ACL-1180-DK)を用いて行った。測定原理は、クロロフィルa色素の励起波長光(410nm~470nm)を発光部より照射させ、電子の励起作用を起こさせる。その後、電子は安定な状態に戻ろうとするためにエネルギーを外部に放出する。その放出されたエネルギーを蛍光波長光(640nm~700nm)として受光し、濃度が得られる仕組みになっている。その他に本装置では、濁度・塩分などを同時に測定することができる。測定データは、水面から湖底まで10cmおきに取得し、水深毎の濃度変化の状況を把握した。

次に、網走湖におけるクロロフィルa濃度の鉛直分布を図-3に示す。この図より、クロロフィルa濃度は水深によって異なり、この例では2m~4mの範囲でピークを迎え、その後徐々に減少していく様子が分かる。また、7m付近に存在する塩淡水界面を過ぎてから濃度は、急激に低下している様子も分かる。よって、クロロフィルa濃度の平均値を求める場合、どの水深までの平均値を考えればよいのかか問題になってくる。

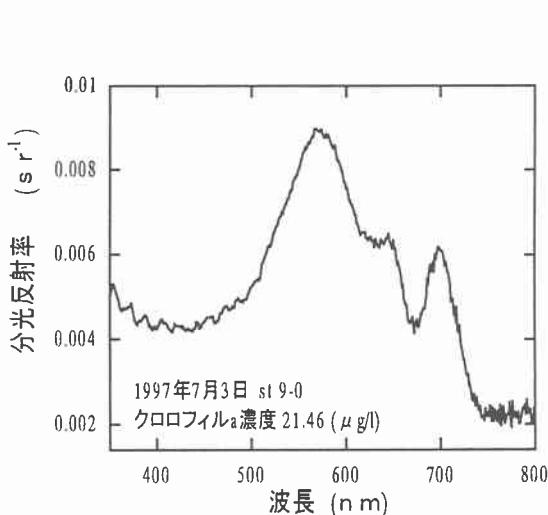


図-2 クロロフィルaの分光特性

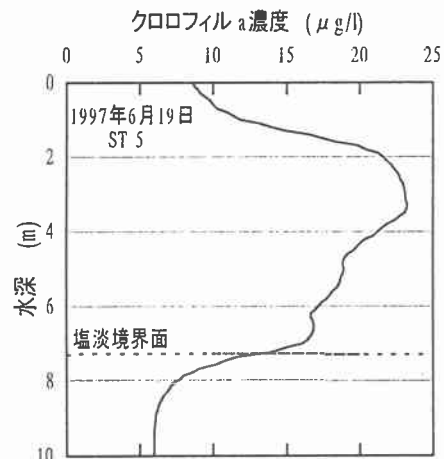


図-3 クロロフィルa濃度の鉛直分布

3. 平均クロロフィルa濃度の推定値と実測値との誤差評価

3.1 平均クロロフィルa濃度を推定するための回帰直線式

平均クロロフィルa濃度の推定を行う回帰直線式は、水深の対象範囲を水面から5mまで0.5m刻みとした各水深域における平均クロロフィルa濃度と、2.1で述べた(II)の水面における直接反射光の成分を除去するために考えた、3つの方法(蛍光放射帯と吸収帯(長波長側)におけるそれぞれの分光反射率の差、比、NDVI方式)により回帰分析を行い算出した。

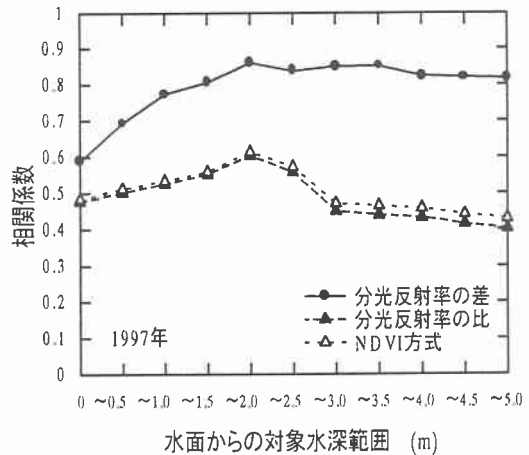
図-4は、上記3つの方法より得られた昨年度の分析結果を、それぞれの場合について、対象水深毎に相関係数で示したものである。その結果、分光反射率の差を用いた場合が、どの対象水深に対しても他の2つの方法より、高い相関係数を示した。中でも対象水深を0m~2mにした場合に相関係数が0.859と最も良い結果を示した。また、今年度の現地観測データを上記の方法と同様に回帰分析した結果、やはり分光反射率の差を用いた場合が他の2つの方法より、良い相関係数を示した。この2年間における分析結果より、説明変数として分光反射率の差を用いることにより、(II)の成分である水面における直接反射光の影響をほぼ除去することが可能と思われる。すなわち、蛍光放射帯と吸収帯(長波長側)の波長帯では、分光放射計で受光される(II)の成分の入射量は、ほぼ等しいと思われ、分光反射率の比やNDVI方式を用いた場合では、この成分を完全に除去しきれない可能性があると思われる。

また、3つの方法のいずれにおいても平均クロロフィルa濃度の対象水深を0m~2mとした時の相関係数が最も良い結果を示した。このはっきりとした理由は分からないが、透明度に起因している可能性があると思われる。なぜなら、分光放射計は水面から透明度までの水深における水中物質の散乱光を受光するからである。また網走湖の透明度も2m前後と言われている。

以上の結果より、平均クロロフィルa濃度の推定を行う回帰直線式は、説明変数として蛍光放射帯と吸収帯(長波長側)におけるそれぞれの分光反射率の差を用いた場合が最も有効だと思われる。また、図-5は最も相関係数が良かった場合の分布状況を示したものである。

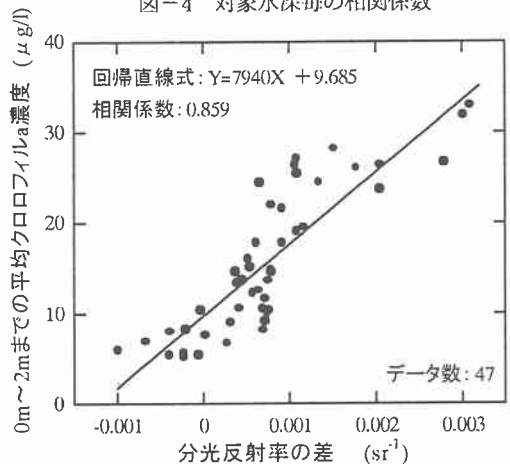
3.2 誤差の評価方法とその結果

本研究の目的は、昨年度の観測データより、各対象水深における平均クロロフィルa濃度を推定するための回帰直線式を求め、この式を用いて今年度の現地観測で得られた分光反射率のデータにより、平均クロロフィルa濃度の推定値を対象水深毎に算出し、クロロテックより得られたクロロフィルa濃度(実測値)との誤差の評価を行うことである。



水面からの対象水深範囲 (m)

図-4 対象水深毎の相関係数



(690nm~710nm積算値)-(660nm~680nm積算値)

図-5 分光反射率の差と0m~2m平均クロロフィルa濃度との相関図

誤差の評価は、次の2通りの方法で行った。

誤差 (E_i) = (回帰直線式より得られた推定値) - (クロロテックより得られた実測値)

$$\textcircled{1} \quad \overline{|E_i|} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |E_i| \quad (\text{誤差の絶対値の平均値}) \quad (3)$$

$$\textcircled{2} \quad \sqrt{\overline{E_i^2}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i^2} \quad (\text{root mean square}) \quad (4)$$

図-6は、3.1で得られた回帰直線式を用いて、今年度の現地観測データより得られた平均クロロフィル a 濃度の推定値と、クロロテックにより得られた平均クロロフィル a 濃度(実測値)との誤差の評価をそれぞれの対象水深毎に上記に示した2通りの方法で行った結果である。この図より、対象水深に対して①を用いた誤差の評価では 2.3~3.5 ($\mu\text{g/l}$) の範囲に、②を用いた誤差の評価では 3.0~4.3 ($\mu\text{g/l}$) の範囲となり、対象水深 0m~2m の場合に最も小さな誤差となった。

以上のことから、網走湖における平均クロロフィル a 濃度を推定するためには、目的変数を 0m~2m までの対象水深における平均クロロフィル a 濃度を使用し、説明変数を蛍光放射帯と吸収帯(長波長側)の分光反射率の差を使用した場合の回帰直線式を用いることが、最も信頼性があると思われる。

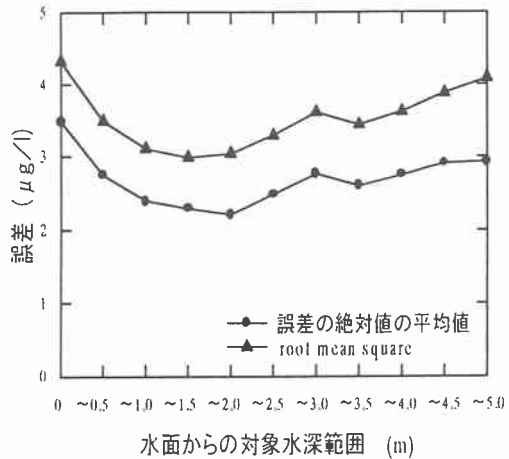


図-6 対象水深毎の誤差変動

4. まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す

- (1) 蛍光放射帯 (690nm~710nm) と長波長側の吸収帯 (660nm~680nm) の分光反射率の差を用いた解析が、どの対象水深に対しても比・NDVI方式を用いた解析より、高い相関係数を示した。
- (2) 網走湖における対象水深毎の平均クロロフィル a 濃度の推定は、対象水深 0m~2m の平均クロロフィル a 濃度の場合に最も誤差が小さく、①の方法で 2.3 ($\mu\text{g/l}$)、②の方法で 3.0 ($\mu\text{g/l}$) の誤差となった。

今後、人工衛星 (OrbView-2) による観測データと、現地観測で得られた水面反射率と大気の補正式を見出すことが出来れば、アオコの発生状況を現地観測を行わずに OrbView-2 データから面的に推定することが可能と思われ、この方面に研究を進めたい。また、今回の観測では北海道開発局網走開発建設部、(株)北開水工コンサルタントにご協力をいただいた。ここに深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 岡見 登岸野 元彰 宮崎 忠国: 霞ヶ浦湖水の分光反射率と水質、日本リモートセンシング学会誌、VOL.2 No.1、pp.21~31、1982。
- 2) 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
- 3) 佐渡 公明 塩見 秀之: 網走湖における分光反射率とクロロフィル a 濃度、濁度との相関、土木学会北海道支部論文報告集第 54 号(B)、 pp.126~129、1998