

網走湖における NOAA、日射量データを用いた 分光反射率とクロロフィル a 濃度推定

ESTIMATION OF SPECTRAL REFLECTANCE AND CHLOROPHYLL-A CONCENTRATION
OF LAKE ABASHIRI USING NOAA/AVHRR AND SOLAR RADIATION DATA

佐渡公明¹・吉川泰弘²・中尾隆志³

Kimiteru SADO, Yasuhiro YOSHIKAWA and Takashi NAKAO

¹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番地)

²学生会員 北見工業大学大学院 土木開発工学専攻 (〒090-8507 北海道北見市公園町165番地)

³正会員 北見工業大学助手 土木開発工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町165番地)

Lake Abashiri is a brackish lake under the stability of upper oligohaline water and lower polyhaline water. The boundary of two layers has gradually decreased with time. At the same time, this has led to an increase in salinity and eutrophication in the upper layer and to an acceleration of deoxygenation of the lower layer, attributed to occurrence of algal bloom and upwelling of bluish water.

In this paper spectral reflectance of water surface was formulated by using NOAA/AVHRR data received in Kitami Institute of Technology, horizontal global and scattered solar radiation. In order to correlate the spectral radiance of NOAA/AVHRR Ch.1 with the spectral radiance emitted from water surface, transmittance and path radiance were calculated approximately by using the horizontal global and the scattered solar radiation. Finally, the chlorophyll-a concentration in the center of Lake Abashiri was estimated by the regression line of the chlorophyll-a concentration on the difference of spectral reflectance between fluorescence and absorption zone of phytoplankton.

Key Words: Lake Abashiri, NOAA/AVHRR data, global solar radiation, chlorophyll-a concentration, spectral reflectance

1. はじめに

北海道東部に位置する網走湖は、水深約5mの塩淡水境界層を境に上部淡水層と下部塩水層に分かれ、安定な密度成層を形成し上下混合が全くない。長年の人工・自然汚濁負荷が塩水層に流入貯留され、漸減トレンドを示す年降水量は水質の悪化を助長している。その結果富栄養化となり、湖底にヘドロが溜まり、塩水層が無酸素状態を呈し、CODは淡水層でも年平均 7mg l^{-1} と環境基準の 3mg l^{-1} を達成していない¹⁾。このような状況のもと、青潮、アオコの水質事故が近年多発し、わかさぎ、シジミを大量に死滅させ甚大な損害を与えており、地域社会からは水質改善のための抜本的対策が求められている。この対策をたてるためには、植物プランクトンに含まれるクロロフィル a 濃度の現状を正確に把握することが重要である。

他方、湖沼の水質に関して、リモートセンシングによる湖沼水質推定の研究^{2),3)}、水面分光反射率と水質の相関解析による研究^{4),5)}など多くの研究が行われている。しかし、衛星データと日射量成分データ（全天日射量、散乱日射量、直達日射量をさす）から水面の分光反射率を推定する研究は殆どなされていない。また、水面分光反射率を用いた説明変数の式、クロロフィル a 濃度の測定深さにも議論の余地がある。

本論文では、最初に、網走湖と石狩川下流・茨戸川において、植物プランクトンの蛍光放射帯と吸収帯における水面分光反射率の差と透明度までの水深に対する平均クロロフィル a 濃度の相関が最も良いことを示す。次に、本学で受信している NOAA/AVHRR データ、全天日射量・散乱日射量データを用いて水面分光反射率を推定する。このとき、水面上向分光放射輝度と NOAA/AVHRR Ch. 1 の分光放射輝度を関係づける大気補正は、全天日射量と散乱

日射量から近似的に得られる透過率とパスラジアンズを用いて行った。最後に、網走湖における1997～2000年に実施した現地観測データをもとにして、分光反射率の差とクロロフィルa濃度の回帰直線式を求め、クロロフィルa濃度の推定を行う。

2. 網走湖と石狩川下流・茨戸川におけるクロロフィルa濃度の特性

図-1は海水のクロロフィル濃度と分光反射率の変化を示している⁶⁾。光合成のための光の吸収帯660-680nmにおける分光反射率を R_{670} とし、蛍光放射帯690-710nmにおける分光反射率を R_{700} とする。クロロフィル濃度が増加すると R_{670} の増加割合は小さく、逆に R_{700} の一部690-700nmにおける分光反射率の増加割合が大きいため、すなわち、クロロフィル濃度と $R_{700}-R_{670}$ または R_{700}/R_{670} の間には正の相関が予想される。なお、クロロフィル濃度の分布は水深方向に一定でないため、どの深さのクロロフィル濃度を使うのかも問題である。

網走湖と茨戸川における実測データをもとに得られた水深方向の平均クロロフィルa濃度と分光反射率の差($R_{700}-R_{670}$)、比(R_{700}/R_{670})および差/和($(R_{700}-R_{670})/(R_{700}+R_{670})$)との相関係数を表-1(a)、(b)に示す。現地観測は、網走湖で1998年5月28日～10月29日の期間の9日間、茨戸川では2000年9月12,13日の2日間行い、多目的分光放射計(株)オプティサチ製MSR-7000)と白色標準反射板を用いて水面下向分光放射

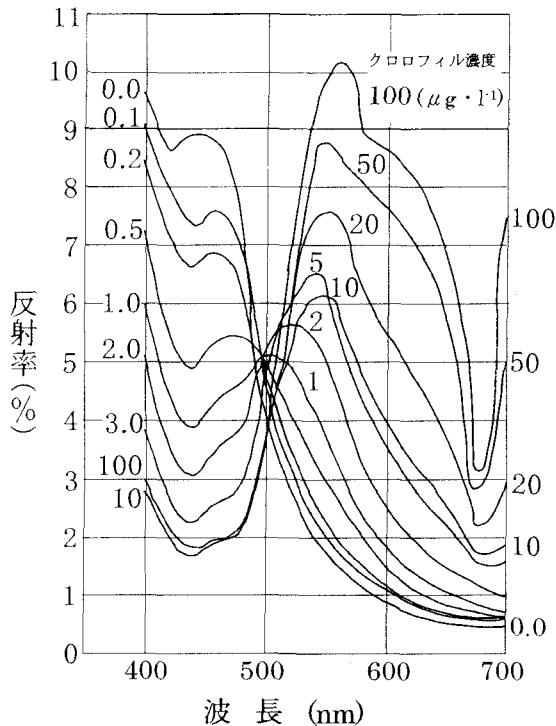


図-1 クロロフィル濃度(μg/L)による海水の分光反射率の変化(参考文献6)より引用)

照度を測定し、また多目的分光放射計を用いて水面上向分光放射輝度を測定することにより、分光反射率を計算で求めた。クロロフィルa濃度の測定にはクロロテック(株)7レック電子製、ACL1180-DK)を用い、網走湖のクロロフィルa濃度の範囲は3～30(μg/L)、茨戸川では23～144(μg/L)と得られた。

表-1(a)、(b)から、網走湖・茨戸川ともに分光反射率の差と平均クロロフィルa濃度との相関が良い。このときの網走湖の回帰直線式は平均して回帰係数が約7600、定数項が約9.5であり、茨戸川の場合は、回帰係数が網走湖の約2倍、定数項が約5倍である。この回帰直線式の相違は上記のようにクロロフィルa濃度の範囲が異なるためによると思われる。また、平均クロロフィルa濃度を求める水深範囲は、網走湖で0-2m、茨戸川で0-1.5mのとき相関が良くなっている。ここで、平均透明度は網走湖2m、茨戸川1mであった。以上より、透明度までの水深にわたる平均クロロフィルa濃度と分光反射率の差は、相関が最も良いことが分かる。

表-1 分光反射率による説明変数と平均クロロフィルa濃度との相関係数

(a) 網走湖

説明変数	平均クロロフィルa濃度の水深範囲						
	0-0.5m	0-1m	0-1.5m	0-2m	0-2.5m	0-3m	0-3.5m
$R_{700}-R_{670}$	0.835	0.867	0.889	0.911	0.879	0.846	0.845
R_{700}/R_{670}	0.755	0.800	0.829	0.853	0.771	0.781	0.796
$R_{700}-R_{670}/R_{700}+R_{670}$	0.760	0.804	0.833	0.960	0.790	0.788	0.805

(b) 茨戸川

説明変数	平均クロロフィルa濃度の水深範囲				
	0-0.5m	0-1m	0-1.5m	0-2m	0-2.5m
$R_{700}-R_{670}$	0.809	0.844	0.853	0.849	0.847
R_{700}/R_{670}	0.295	0.224	0.412	0.430	0.438
$R_{700}-R_{670}/R_{700}+R_{670}$	0.593	0.662	0.679	0.681	0.681

3. 全天日射量、散乱日射量による大気補正

(1) 太陽、観測地点、衛星センサーと日射量経路

図-2は、地上で測定される日射量の経路と衛星センサーが受ける可視域放射輝度の経路を示す⁷⁾。

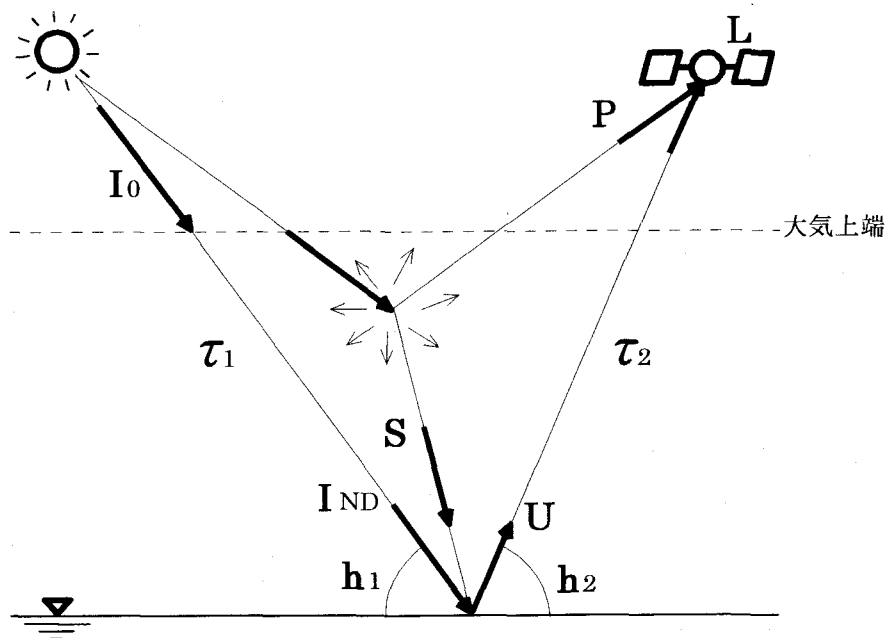
地上の観測地点で測定される水平面全天日射量には、直達日射量、散乱日射量が含まれ、次式が成立する。

$$I_{HT} = I_{ND} \sinh_1 + S \tag{1}$$

ここに、 I_{HT} : 水平面全天日射量、 I_{ND} : 法線面直達日射量、 h_1 : 太陽高度、 S : 水平面散乱日射量。図-2に示す記号を使用して、法線面直達日射量 I_{ND} は大気圏外日射量 I_0 と透過率 τ_1 を用いて、

$$I_{ND}(\lambda) = I_0(\lambda) \cdot \tau_1(\lambda) \tag{2}$$

$$\tau_1(\lambda) = \exp(-s_1(\lambda)/\sinh_1) \tag{3}$$



I_0 : 大気圏外日射量、 τ_1 : 太陽から観測地点までの大気に対する透過率、
 I_{ND} : 法線面直達日射量、 S : 散乱日射量、 h_1 : 太陽高度、
 U : 水面直上の上向放射輝度、 h_2 : 衛星の仰角、
 τ_2 : 観測地点から衛星センサーまでの大気に対する透過率、 P : パスラジアン、
 L : 衛星センサーが検知する放射輝度 (波長 λ は省略する)

図-2 地上で測定される日射量の経路と衛星センサーに入射する可視域放射輝度の経路⁷⁾

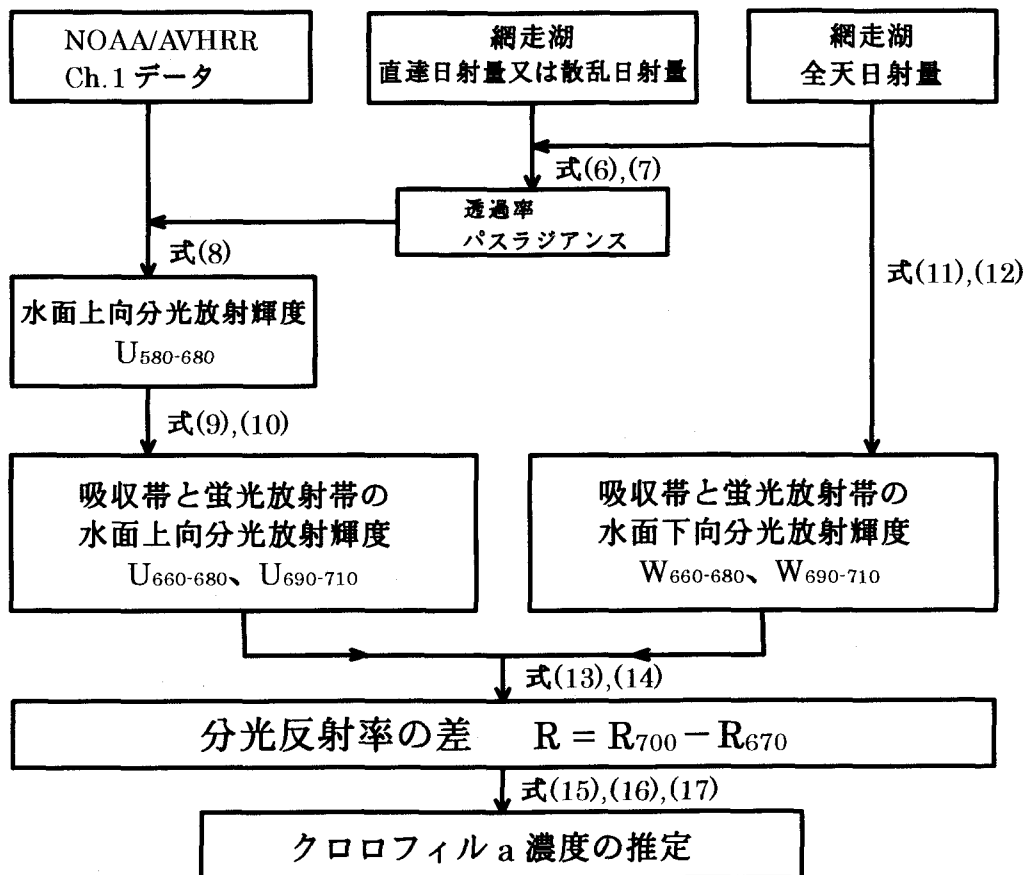


図-3 分光反射率とクロロフィル a 濃度推定のフローチャート

と表される。ここで、 $s_1(\lambda)$ は太陽から観測地点までの大気の光学的厚さで、大気光路上の全成分による減衰効果を表し、直達日射計の測定波長範囲、太陽位置の関数である^{7), 8)}。

一方、衛星センサーが受ける放射輝度 $L(\lambda)$ は、 $U(\lambda), \tau_2(\lambda), P(\lambda)$ を用いて次式で表される。

$$L(\lambda) = U(\lambda) \cdot \tau_2(\lambda) + P(\lambda) \quad (4)$$

$$\tau_2(\lambda) = \exp(-s_2(\lambda) / \sinh_2) \quad (5)$$

式(5)における観測地点から衛星センターまでの光学的厚さ $s_2(\lambda)$ は、衛星センサーに含まれる可視域チャンネルの測定波長範囲、衛星位置の関数である。

(2) 全天日射量、散乱日射量による透過率、パスラジアンズの推定

従来、著者らは NOAA 衛星と同期して網走湖において船上から測定した $U(\lambda)$ と、北見工業大学地域共同研究センターで受信している NOAA/AVHRR Ch.1 分光放射輝度 $L(\lambda)$ との回帰分析を行い、式(4)の透過率とパスラジアンズを推定してきた⁹⁾。しかし、波の影響を受ける船上から衛星センサーに向かう、ある瞬間の $U(\lambda)$ を正確に測定することは非常に難しい。そこで、日射量成分の観測値を用いて、 $\tau_2(\lambda), P(\lambda)$ を推定する方法、いわゆる大気補正を以下に述べる。

直達日射計と衛星可視域チャンネルの測定波長範囲がほぼ等しく、太陽と衛星センサーの天頂角と方位角がほぼ等しい場合、光学的厚さ $s_1(\lambda)$ と $s_2(\lambda)$ は近似的に等しくなる。 $s_1(\lambda) \approx s_2(\lambda)$ の場合、式(2)~(5)から τ_2 は次のように得られる。以後、波長 λ は混乱のない限り省略する。

$$\tau_2 = \left(\frac{I_{ND}}{I_0} \right)^{\sinh_1 / \sinh_2} \quad (6)$$

太陽が地上の日射量観測地点と衛星を結ぶ延長線上にはほぼ位置している場合を仮定して式(6)は導かれているが、 h_1 と h_2 が異なる場合にも第一近似値として式(6)を用いることにする。図-2において散乱日射量 S は太陽光の下向散乱光による観測点の放射照度である。これを放射輝度に変換した S/π と、太陽光の上向散乱光が衛星センサーに入射する放射輝度 P が近似的に等しいと仮定すれば、

$$P \approx \frac{S}{\pi} = \frac{1}{\pi} (I_{HT} - I_{ND} \sinh_1) \quad (7)$$

と表される。全天日射量、直達日射量、散乱日射量の3個の内いずれか2個、および I_0, h_1, h_2 が既知であれば、式(6), (7)から透過率とパスラジアンズが求まり、式(4)を用いて NOAA/AVHRR Ch.1 データ $L(\lambda)$ を与えて水面上向放射輝度 $U(\lambda)$ を推定できる。

4. 分光反射率、クロロフィル a 濃度の推定法

(1) 分光反射率の推定

分光反射率とクロロフィル a 濃度推定のフローチャートを図-3に示す。このフローチャートに従って、分光反射率の推定を行うのに必要な関係式(8)~(14)を次の①~④で求める。

① NOAA/AVHRR Ch.1 の波長範囲は 580~680nm の可視域であり、この放射輝度 $L_{580-680} (Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1})$ から、同じ波長範囲の水面上向分光放射輝度 $U_{580-680} (Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1})$ を求める推定式は、式(4)から次式となる。

$$U_{580-680} = \frac{L_{580-680}}{\tau_2} - \frac{P}{\tau_2} \quad (8)$$

② 1997~2000 年に網走湖で多目的分光放射計により測定した水面上向分光放射輝度データを用いて求められた、 $U_{580-680}$ と吸収帯の水面上向分光放射輝度 $U_{660-680}$ の相関図を図-4に示す。同様に $U_{580-680}$ と蛍光放射帯の水面上向分光放射輝度 $U_{690-710}$ の相関図を図-5に示す。図-4, 5 の回帰直線式は、それぞれ次のように得られる。

$$U_{660-680} = 0.7127 U_{580-680} + 0.05486 \quad (9)$$

$$U_{690-710} = 0.6154 U_{580-680} + 0.2720 \quad (10)$$

③ 2001 年 9 月 19~21 日に全天日射計 (株英弘精機製 MS-43F) で測定した波長範囲 300~2800nm の全天日射量 $I_{HT} (kWm^{-2})$ と、多目的分光放射計と白色標準反射板を用いて測定した吸収帯と蛍光放射帯の地表面における下向分光放射輝度 $W_{660-680}, W_{690-710} (Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1})$ の相関図をそれぞれ図-6, 7 に示す。図-6, 7 の回帰直線式は、それぞれ次のように得られる。

$$W_{660-680} = 376.1 I_{HT} - 19.15 \quad (11)$$

$$W_{690-710} = 327.3 I_{HT} - 15.13 \quad (12)$$

④ 吸収帯と蛍光放射帯の分光反射率 R_{670}, R_{700} は式(9)~(12)より、それぞれ次式で表される。

$$R_{670} = U_{660-680} / W_{660-680} \quad (13)$$

$$R_{700} = U_{690-710} / W_{690-710} \quad (14)$$

以上の分光反射率の推定法は、水面以外の他の地表面にも適用できる。図-4~7 の相関図において、回帰直線式から最も離れている点の最大相対誤差 $\delta U_{660-680} / U_{660-680}$ 等を求め、これらを分光反射率の差 ($R = R_{700} - R_{670}$) を全微分した式に代入することにより、4 本の回帰直線式に含まれる誤差が R の誤差に及ぼす影響を検討できる。これについては今後の課題としたい。

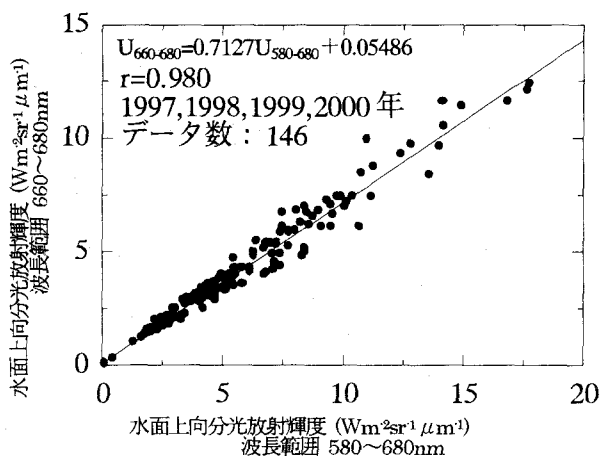


図-4 水面上向分光放射輝度 $U_{580-680}$ と $U_{660-680}$ の相関図

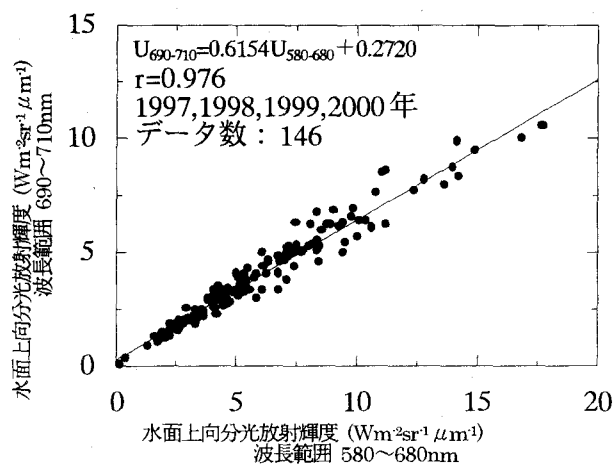


図-5 水面上向分光放射輝度 $U_{580-680}$ と $U_{690-710}$ の相関図

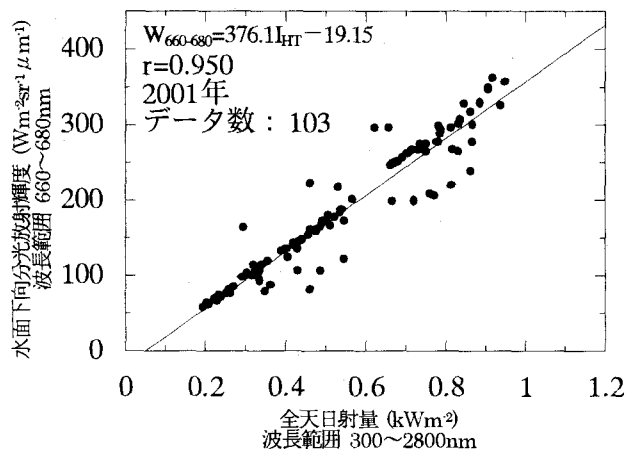


図-6 全天日射量と水面下向分光放射輝度 $W_{660-680}$ の相関図

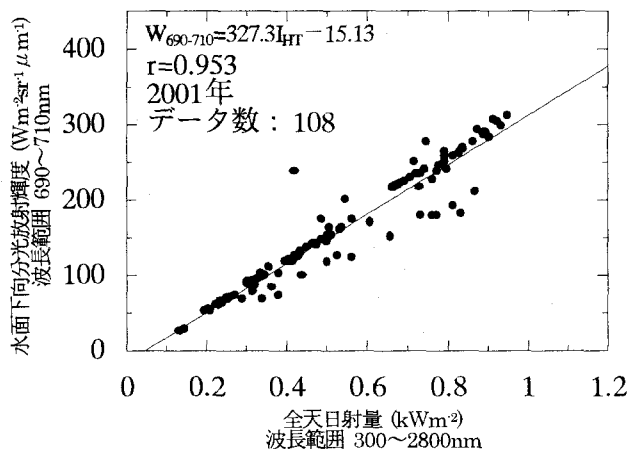


図-7 全天日射量と水面下向分光放射輝度 $W_{690-710}$ の相関図

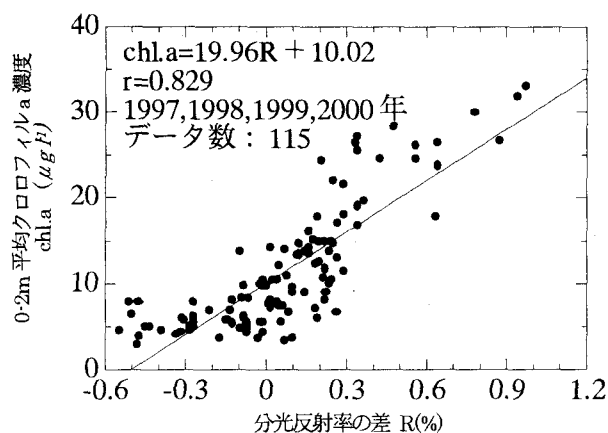


図-8 分光反射率の差と0-2m平均クロロフィルa濃度の相関図

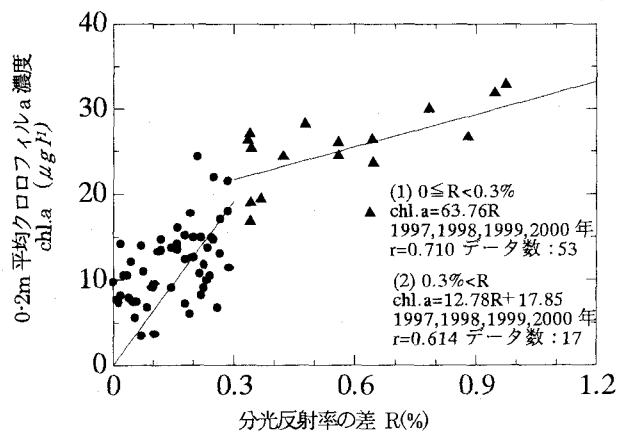


図-9 $R \geq 0$ の場合の分光反射率の差と0-2m平均クロロフィルa濃度の相関図

(2) 分光反射率の差によるクロロフィルa濃度の推定

第2章において、網走湖と茨戸川の実測データをもとに、透明度までの平均クロロフィルa濃度と蛍光放射帯と吸収帯の分光反射率の差は、相関が最も良いことが示された。網走湖における1997~2000年の現地観測データを用いて、0-2m 平均クロロフィルa濃度 $chl.a$ ($\mu g l^{-1}$) と分光反射率の差 $R(\%)$ の相関図を図-8に示す。回帰直線式は次の通りである。

$$chl.a = 19.96R + 10.02 \quad (15)$$

このときの相関係数0.829が表-1(a)に示す同じ条件下の相関係数0.911より小さいのは、図-8ではデータ数が多く回帰直線式からのばらつきが大きいためである。

(3) 2001年9月3日の網走湖湖心に対する適用

2001年9月3日に網走湖の湖心において、NOAA衛星との同期観測を3回行った。1, 2回目の同期時刻に網走湖湖心が雲で覆われていたため、AVHRRセンサーCh.1の10ビットデータが得られなかった。3回目はNOAA-14が網走湖に最も接近した同期時刻が16時28分50秒で、このとき、 $I_{HT} = 0.2291 kW m^{-2}$, $S = 0.07861 kW m^{-2}$, $h_1 = 14.89^\circ$, $h_2 = 52.81^\circ$, $I_0 = 1.344 kW m^{-2}$ と得られたので式(6), (7)から、 $\tau_2 = 0.7651$, $P = 10.01 W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$ となる。

次に、NOAA-14/AVHRR Ch.1の10ビットデータからパーセントアルベドを求め、放射輝度は $L_{580-680} = 16.49 W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$ と得られ、式(8)~(14)を用いて分光反射率の差が $R = 9.161 - 9.087 = 0.074\%$ となり、式(15)からクロロフィルa濃度の予測値が $11.5 \mu g l^{-1}$ と求まった。この予測値は実測値 $4.8 \mu g l^{-1}$ と比べかなり高い値である。

R は定義上、正かゼロになるが、クロロフィルa濃度が小さいときには、波や濁度の影響を大きく受けて、図-1.8に示されているように $R < 0$ が生じると思われる。したがって、波や濁度の影響を除去してクロロフィルa濃度を推定するために $R < 0$ を除いて新たな相関図、図-9を作成した。図-9では、 $R = 0.3\%$ を境に分光反射率の差とクロロフィルa濃度の相関関係が異なっている。また、図-1からクロロフィル濃度が0のとき分光反射率の差は0と推定できる。そこで、 $0 \leq R < 0.3\%$ と $0.3\% < R$ の場合に対する次の2本の回帰直線式を求めた。

$$0 \leq R < 0.3\% \dots \dots \dots chl.a = 63.76R \quad (16)$$

$$0.3\% < R \dots \dots \dots chl.a = 12.78R + 17.85 \quad (17)$$

上記2001年9月3日の R の推定値0.074%を式(16)に代入して、クロロフィルa濃度の予測値は $4.7 \mu g l^{-1}$ と得られ、実測値 $4.8 \mu g l^{-1}$ とほぼ等しく、回帰直線式(15)による予測値 $11.5 \mu g l^{-1}$ よりはかなり改善された。

5. 結論

- (1) 網走湖・茨戸川における実測結果から、分光反射率の差 ($R_{700} - R_{670}$) と透明度までの水深にわたる平均クロロフィルa濃度の相関が最も良い。
- (2) 全天日射量、直達日射量、散乱日射量の内いずれか2個および大気圏外日射量、太陽高度、衛星仰角が既知のもとに、観測地点から衛星センサーに至る光路の透過率とパスラジアンスを近似的に推定する方法を示した。
- (3) NOAA/AVHRR Ch.1 放射輝度、全天日射量、直達日射量が散乱日射量、以上3個の観測データから、地表面の分光反射率を求める推定法を示した。
- (4) 蛍光放射帯と吸収帯の分光反射率の差 R とクロロフィルa濃度との回帰直線式を、 R を全て考慮する場合および $R \geq 0$ だけを考慮する場合の2通り求めた。2001年9月3日の適用例では、 $R \geq 0$ だけを考慮する場合の方から良い結果が得られた。

分光反射率の差からクロロフィルa濃度を推定する2種類の回帰直線式については、今後予測値と実測値データを増すことや、水面上向分光放射輝度から水面反射率を除くことも検討し、どちらの回帰直線式が信頼できるかを検証する予定である。

参考文献

- 1) 網走湖水質保全対策検討委員会編：網走湖の水環境回復に関する調査報告書、pp.293, 1996.
- 2) 安岡善文、宮崎忠国：リモートセンシングによる湖水域の水質分布計測一回帰分析を用いた大気補正と水質推定一、日本リモートセンシング学会誌、Vol.2, No.3, pp.51-62, 1982.
- 3) 作野祐司、松永恒雄、中山大介、六川修一、高安克己、國井秀伸、中村幹雄、山室真澄：SPOT/HRV データによるアオコ発生時の糸道湖表層クロロフィルa濃度分布の推定、日本リモートセンシング学会誌、Vol.19, No.2, pp.20-36, 1999.
- 4) 岡見 登、岸野元彰、宮崎忠国：霞ヶ浦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.
- 5) 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.
- 6) 和達清夫、土屋 清、安田嘉純、江森康文、飯坂譲二、長尾 真：リモートセンシング、pp.115-117, 朝倉書店、1977.
- 7) 日本リモートセンシング研究会：リモートセンシング通論、pp.89-98, 日本リモートセンシング研究会、2000.
- 8) 近藤純正：水環境の気象学—地表面の水収支・熱収支—、pp.58-62, 朝倉書店、1996.
- 9) 佐渡公明、吉川泰弘、佐々木好隆：NOAA データを用いた網走湖におけるクロロフィルa濃度と表面水温の推定、土木学会北海道支部論文報告集、第56号(B), pp.206-209, 2000.

(2001. 10. 1受付)