

携帯型蛍光測定装置の試作と予備実験*¹島津 裕樹*²・杉原 滋彦*³Hiroki Shimazu*², Shigehiko Sugihara*³

Portable radiance meter for retrieving the chlorophyll concentration in the surface water

Hiroki Shimazu and Shigehiko Sugihara

In order to estimate the chlorophyll concentration from remotely sensed radiance of the sea, a fluorescence technique, which utilizes intensity of chlorophyll fluorescence appearing at 685nm in upward radiance spectrum, has an advantage of minimizing noise generated by other materials such as suspended materials and yellow substance. An algorithm, however, for estimating the chlorophyll concentration is not yet established, since the relationship between fluorescence intensity and chlorophyll concentration is not linear and also varies with geographical location and season. For investigating the relationship in the case of a rather high chlorophyll concentration, a simple radiance meter was designed. The meter detects the radiance from the boat at 6 wavelengths including 685nm. In this case, radiances at wavelengths other than 685nm are used for improving the accuracy of estimation. Preliminary measurement was made in Hiroshima Bay on September 1, 1995. The observed radiance was largely affected by radiance generated by the sky light reflected at the sea surface. The ratio of radiance at 685nm to that at 480nm was selected as an indicator of chlorophyll concentration and was compared with chlorophyll concentration determined directly by Hiroshima Fisheries Experimental Station.

1. はじめに

海中から空中に向かう光、すなわち、上向きの輝度を遠隔計測して海水中の物質濃度を抽出する試みが、観測用衛星の打ち上げや観測用航空機の普及に伴い、多くの研究者によってなされている。現在までの研究によって遠隔計測した輝度（あるいは照度）から、海水中のクロロフィル濃度や懸濁物量の推定が可能な事を示唆している。

海水中のクロロフィル濃度の増大に伴って、上向き輝度（照度）の波長分布が短波長域で減少、長波長域で増大することに着目して、短波長と長波長における輝度の比をクロロフィル濃度の指標とすることが一般的に行われてきた。この比と実測したクロロフィル濃度の回帰直線を求め、クロロフィル濃度の実測値のない地点にも、この回帰直線を適用してクロロフィル濃度を決定しようとするものである。これは相関解析法と呼ばれ、例えば、Gordon and Clark¹⁾、

水産大学校研究業績 第1535号, 1995年12月22日受付.

Contribution from National Fisheries University, No.1535. Received Dec. 22, 1995.

*¹ Portable radiance meter for retrieving chlorophyll concentration

*² 水産大学校研究科 (Graduate School, National Fisheries University)

*³ 水産大学校漁業学科漁場学講座 (Laboratory of Fisheries Biology and Oceanography, National Fisheries University)

Clark²⁾, Gordon et al.³⁾, Sugihara et al.⁴⁾はこの比と実測したクロロフィル濃度との関係を検討した。その結果両者には相関が認められる場合が多いが、得られた回帰直線が研究者間によって異なることがわかった。これは回帰直線が季節と場所によって変動していることに起因する。そのため、クロロフィル濃度を相関解析法を使って衛星資料から見積もるためには、衛星飛来時と同期して、現場採水によりクロロフィル濃度を測定の上、回帰直線の係数を決定する必要がある。したがって常に現場観測が必要で、遠隔計測資料のみからクロロフィル濃度が推定できず遠隔計測法の特徴を十分に生かしていない。

一方、Morel⁵⁾とSugihara et al.⁶⁾は実測した上向き照度の波長分布と計算した波長分布を比較することにより、クロロフィル濃度を推定する方法、すなわち光学模式法を提案している。この方法は、使用するモードの正当性が一度検証できれば、あらゆる地点や季節にも適用できるという利点を持っている。しかも遠隔計測資料のみからクロロフィル濃度が推定でき、現場観測を必要としない優れた特徴を持っている。しかし、この方法は光の伝播の模式化、及び光と物質の模式化が必須で、かなり高度の専門的知識と複雑な計算を必要とする。そのため、この方法については、一部の研究者によってのみ研究が進められているのが現状で、普遍的な方法が未だに確立されていない。

一方、クロロフィルは短波長の光で照射されると、685nm付近に蛍光を発する事が知られている。そのため、海中においても植物プランクトンが存在すると、入射光によって励起されクロロフィルが蛍光を発し、空中にも出てくる。そこで、この蛍光を利用して、表面水中の植物プランクトン濃度を推定する方法がNeville and Gower⁷⁾, Gower⁸⁾, Gower and Borstad⁹⁾, Doerffer¹⁰⁾などにより検討されてきた。この蛍光法では蛍光の高さ、すなわち685nmにおける上向き輝度から、弾性散乱によって(クロロフィル濃度が0の時)生じた輝度を差し引いたものをクロロフィル濃度の指標とするのが普通である。なお、この場合685nmにおいて弾性散乱によって生じた輝度を知るためには、蛍光の影響を受けない二つの波長帯(例えば660nmと720nm)における輝度から内挿する必要がある。

クロロフィルが蛍光を発する685nmでは、他の物質が弾性散乱以外の光をほとんど発しないことから、クロロフィル濃度の推定には蛍光法が適している。しかし、蛍光の強度が低いのが欠点で、上記の研究者達も比較的クロロフィル濃度の高い海域を対象としている。しかし、日本沿岸海域で取得した照度の資料をもとに、Sugihara et al.¹¹⁾

によってこの方法が検討された結果、黒潮域のようにクロロフィル濃度の低い海域においても、少なくとも船上から蛍光を検出できることを示した。さらに、クロロフィル濃度を推定するとき、蛍光の高さを利用するよりも、むしろ685nmでの全強度(蛍光+弾性散乱光)を利用すれば、強度の弱い欠点を除くことができること、また短波長光(480nm付近)の強度を使って濁度などの影響を除くことができることを明らかにした。そのため、検出器の感度の向上など技術進歩が著しい現在では、人工衛星から蛍光法によってクロロフィル濃度が抽出できる可能性がある。

このような事態を踏まえて、ESA(欧州宇宙局)は1998年に宇宙周回プラットフォームを打ち上げ、クロロフィル濃度を推定する目的の検出器も搭載させる予定であるが、この検出器の波長帯の一つに682.5nmを選択した(ESA¹²⁾)。685nmを選択しなかったのは、685nmにおける大気吸収効果を避けるためである。

ESAがプラットフォームの検出器に蛍光測定用の波長帯を採用したことや、前に述べたように、蛍光法によるクロロフィル濃度の推定は、比較的雑音に影響されないことから、最近にわかに注目をあびてきた。しかし、上記の研究者が蛍光とクロロフィル濃度との関係を調査した海域は限られていること、また照度の資料(衛星から測定する光は輝度の単位)に基づいていること、海面直上での測定値を利用していることなど、一般的でなく、そのため、実際にクロロフィル濃度を精度良く測定できるかどうかは未だに明確でない。現在のところ、海上で測定した資料からクロロフィル濃度を推定する場合ですら、海面反射光の除去法の確立をはじめ未解決の問題が多い。ましてや、大気効果の影響を受ける宇宙から、クロロフィル濃度が測定できるかどうかは未だ明確ではない。ESAの極軌道プラットフォームが打ち上げられる前に、これらの諸問題を解決して、貴重な資料を活用することが望まれる。そこでまず、大気効果を含まない海面直下で測定した蛍光資料から、どの程度の精度でクロロフィル濃度が推定できるかを明確にしておく必要がある。そのためには、大気効果の影響を受けない海上より蛍光強度を測定し、それと実測したクロロフィル濃度との関係を、多くの海域と季節において調べておくことが先決である。そこで、船上から蛍光を測定する簡単な装置を制作し、クロロフィル濃度の遠隔計測のための基礎資料を収集することにした。試作した装置の予備的試験を1995年9月1日広島湾において行った。広島湾を実験対象域としたのは、赤潮が頻繁に発生する海域で将来赤潮の研究に貢献できないものかと考えたこと、また、広島

県水産試験場の親切的な協力が得られるためである。

2. 蛍光輝度測定装置

試作した携帯型蛍光測定装置は、6波長帯における輝度を測定するために、6個の検出器をもっている。円筒形の筒をそれぞれの検出器（シリコンフォトダイオード）の手前にとりつけ、開き角を限定した。この場合開き角は3°である。測定は透過波長幅の狭い金属フィルター（日本真空光学K.K.製）によって分光した。測定波長帯は440nm, 480nm, 560nm, 660nm, 685nm, 720nmの計6波長である。各フィルターの半値幅は、440nmで2.5nm, 480nmで2.2nm, 560nmで3.7nm, 660nmで6nm, 685nmで1.3nm, 720nmで3.2nmである。植物プランクトンのクロロフィルaが発する蛍光を測定するための波長帯である685nm以外の波長帯を使ったのは、まず第一に、雑音として作用する海面反射光の除去に必要なため（720nm）、また、685nm付近における蛍光以外の弾性散乱光の強度（660nmと720nm）も補助的資料として必要と考えたためである。さらに、従来から行われてきた光学模式法や、相関解析法による結果と比較したいことによる。

それぞれの干渉フィルターで分光された光をシリコンフォトダイオード（浜松ホトニクスK.K.製）によって光電流に変換したのち、低バイアスオペアンプで増幅して、マルチプレキサーを通しADコンバーターによりノート型パソコンにデータを取り込むようにした（Fig.1）。データをパソコンに取り込むにあたり、太陽直射光の変動などの観測条件や、海域によって輝度値が広範囲にわたって変化するため、これに対処するため×1、×10、×100の3つの倍率を、船上で自由に選択できるようにした。6波長におけるデータは1秒間に約2個記録できる。本研究では感度の高いシリコンフォトダイオードを選択し、基板においては表面電流のリークを減少するように回路を組み、さらに、電気的ノイズを抑える目的でノイズフィルターを使用している。これらはステンレス製の容器に納められている。なお、装置本体は外径約150mm、高さ約250mmであり、小型で取扱いが容易である。装置の外観をFig.2に示す。

本装置を用いて上向き輝度を測定する際、本装置からの信号は電圧 [V] で記録される。その電圧値を光強度の単位である輝度 [Watts/cm²/sr] に変換する必要がある。そこで、標準光源は分光放射エネルギー量（照度 [Watts/cm²]）のわかっているハロゲン標準電球

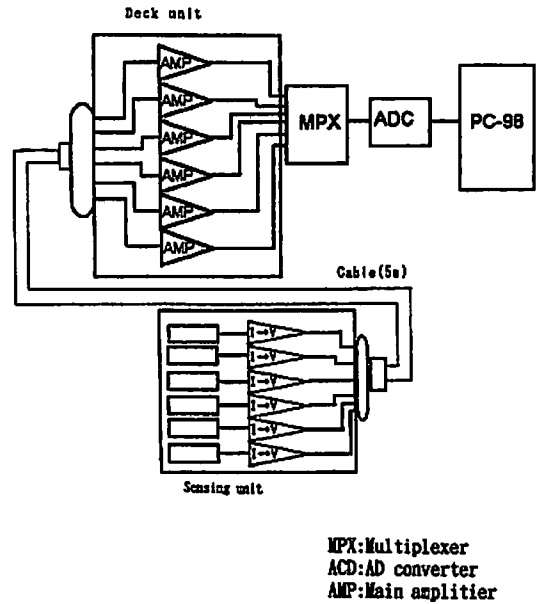


Fig. 1. Block diagram of electric circuit of radiance meter.

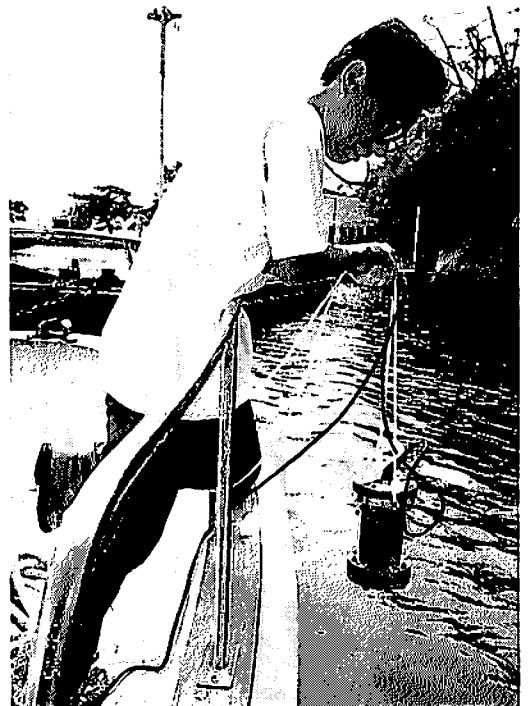


Fig. 2. Radiance meter with 6 measuring heads mounted in a watertight case.

(EPLAB 社製)を使用した。この標準電球では、電球から50cm離れた垂直面での照度が検定されている。しかし、本装置は輝度の単位で測定している。そこで、Fig.3で示すように、標準白色板を光源から50cm離れた場所においた。この標準白色板は、コダック白色反射塗料を板紙上に塗装したもので、波長200nm から2,500nm までの放射エネルギーに対して、すぐれた反射特性（完全拡散板に近い）を持ち、しかも、波長依存性の少ないことが Grum and Wightman¹³⁾によって述べられている。完全拡散面であれば、すべての方向に対して輝度は一定であるので、測定装置の光軸と拡散面となす角は問題にならない。しかし、常に一定の光学的配置にて較正を行った方が良くと考え、以下のようにした。白色板を標準電球の光軸に対して22.5°傾け、さらに本装置の光軸が白色板より22.5°傾くように本装置を置いた。したがって電球と装置の光軸は45°の角度を有することになる。このような配置によって、白色板が完全拡散面であるかぎり、装置は輝度値（入射照度/ π ）のわかった白色板を測定することができる。なお、光学的配置を正確にするためレーザー光を利用して光軸の調節を行った。

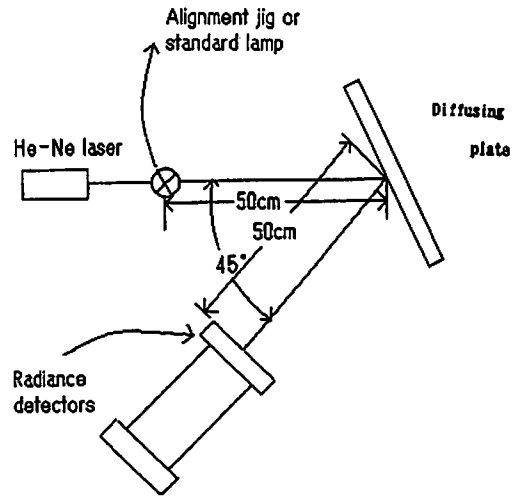


Fig. 3. Alignment of radiance meter relative to standard lamp and diffusing plate for absolute calibration.

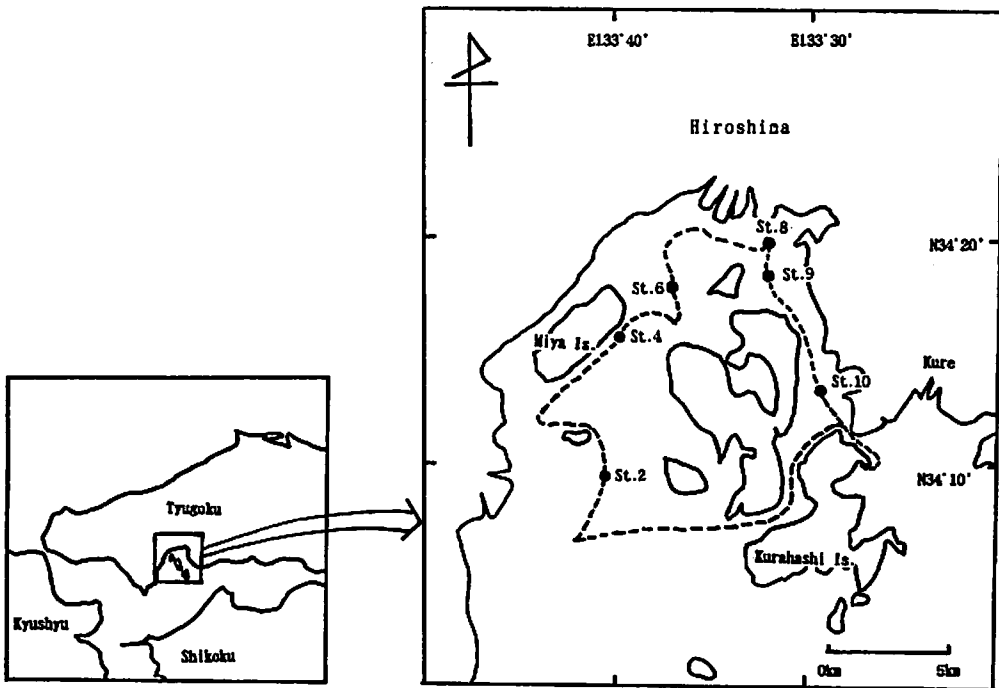


Fig. 4. Station locations in Hiroshima Bay on Sep.1, 1995.

携帯蛍光測定装置を用いて、1995年9月1日に広島湾にて予備観測を行った。測点位置を Fig.4に示す。測点の位置は船上にてGPSを使って測定した。観測日の天候は晴れであった。しかし、観測日前日まで雨が降っていたためか、海水の濁りがみられた。また、観測点によって雲が多い場合もあった。

観測方法は、広島県水産試験場の観測船に便乗して各測点において船上より上向き分光輝度を計測した。観測点では、機器を船首の舷側から2本のロープで吊りさげて、機器本体が可能な限り傾かないようにした。装置が天底方向を見るようにしたのは、装置に入る海面反射光ができる限り少なくなるようにしたためである。なお、同試験場は同じ測点にて海水を採水して、アセトン抽出によるクロロフィルa濃度、及び透明度の計測を行った。

3. 観測結果

測定した輝度の一例として、St.6の波長685nmにおける輝度の0.5秒毎の時間変化を Fig.5に示す。波による海面傾斜の影響のため大きな変動を示している。これは海中起源の光に加え、海面で反射された空光が検出器に入り、波の傾斜角によって反射光が大きく変動するためである。特に波の傾斜部が大きくなると、海面での反射率が增大す

るため、輝度の最大値が最小値の5倍を記録している場合もある。

Fig.6は St.4と St.8における測定輝度の波長分布を平均値で示す。なお、St.4においては快晴で、St.8においては晴れてはいたが雲が多かった。輝度の波長分布を見ると、St.4においては、440nmの短波長側に輝度の極大値が見られる。St.8においては、波長560nmに輝度の極大が見

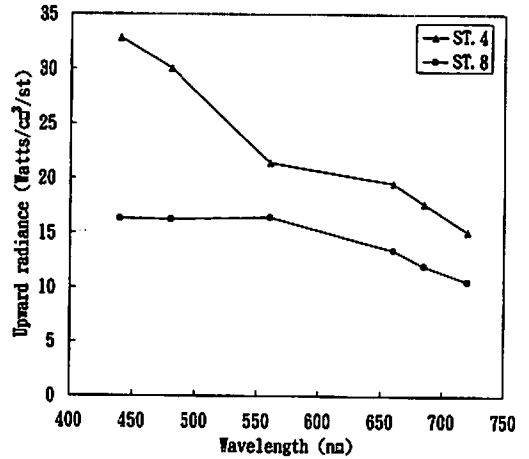


Fig. 6. Spectral upward radiance observed just above the surface at Sts.4 (triangle) and 8 (solid angle).

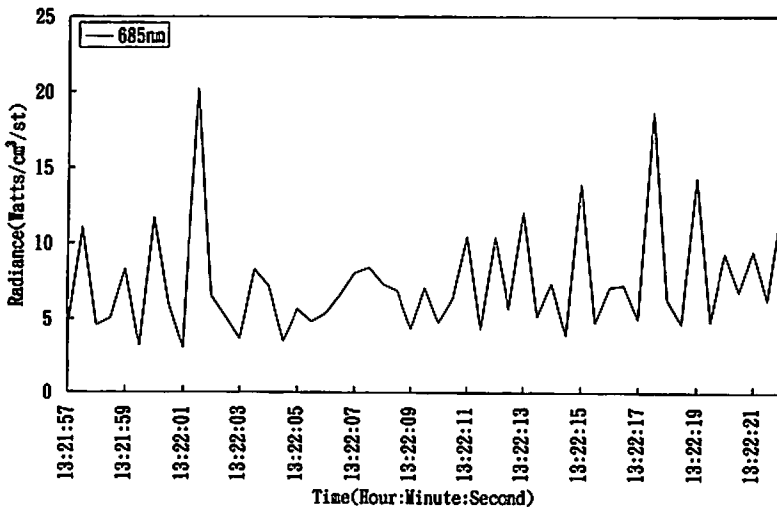


Fig. 5. Temporal variation of upward radiance at 685nm observed just above the sea surface.

られる。このように、St.4よりも長波長よりに輝度の極大がみられるのは、曇天のために反射光として入射する空光が白色であること、及び海中起源の光が植物プランクトン、懸濁物、溶解有機物などにより短波長光を強く吸収するためと考えられる。今回の観測において、広島県水産試験場が透明度を測定した結果から判断しても、St.8の透明度(1.8m)は、他の測点の透明度(約4.5m)と比べると著しく低く、St.8の海水がSt.4と比べ非常に濁っていることがわかる。この高濁度はクロロフィル濃度が約23 $\mu\text{g/l}$ と高い値を示すことから判断して、植物プランクトンが多量に繁殖した結果と推定できる。このように、波長分布の測点による相違が説明できる。また、今回得られた輝度の波長分布を、現在までの既存の照度波長分布の資料、例えば、Okami et al.¹⁴⁾による東京湾内水の上向き照度分布と照合したところ、波長分布に大きな相異はなく、装置が正常に作動していることがわかった。

次に、広島水試の計測したクロロフィルa量と植物プランクトンの発する蛍光の波長である685nmの輝度との関係を調べた。一般に、クロロフィル濃度が高いと685nmにおける輝度が大きくなることが予想される。しかし、Sugihara et al.⁴⁾によって述べられたように、海水が濁ると海水中の短波長光が減少し、いわゆる励起光が減少する。そのため、海水の濁度が高いとき、685nmにおける蛍光強度が見かけ上減少する。そこで、この影響を補正するた

めに、685nmにおける輝度を480nmの輝度値で割り、その値をクロロフィル濃度の指標とした。これは濁りの増大によって480nmの輝度が減少することを利用している。Fig.7にこの輝度比とクロロフィルa濃度との関係を示す。St.8を除けば、直線に回帰できる可能性はあるが、両者の相関は良くない。これは測定輝度が雑音として作用する海面反射光を含むからである。そのため、今後、この測定値よりクロロフィル濃度を推定するためには、海面反射光を除去する必要がある。

4. おわりに

クロロフィルa濃度の見積り方法として、現場で採水した海水を濾過して、フィルター上の植物プランクトン色素をアセトン抽出する方法が一般に用いられるが、測定に時間がかかるとの欠点がある。そこで、クロロフィル濃度の推定にかかる時間・労力を減少させるために、海中から空に向かう光、つまり、上向き輝度の中で植物プランクトンが発する波長685nm付近の蛍光を船上から測定し、表層水中のクロロフィルa濃度を推定する手法を検討することにした。そこで、本研究では、まず蛍光を測定するための小型で軽量な携帯型蛍光測定装置を試作した。この装置は、蛍光を測定するために、685nmに感度を有する検出器に

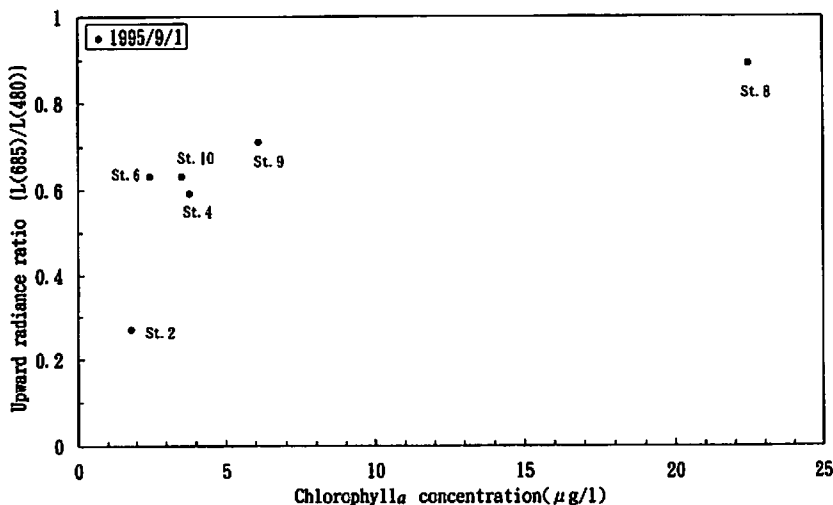


Fig. 7. Ratio of radiance at 685nm to that at 480nm is plotted against directly determined chlorophyll a concentration (supplied by Hiroshima Fisheries Experimental Station)

加え440nm, 480nm, 560nm, 660nm, 720nmの波長帯にも感度を有する検出器を備えている。この装置を用いて、1995年9月1日に広島湾において予備観測を行った。予備観測は広島県水産試験場の観測船に便乗して各測点において分光輝度値を観測した。波による海面傾斜により海面反射光が変動するため、観測輝度もそれに伴って変動したが、平均値を使って、波長分布を既存の資料と比較したところ、大きな相異はなく、装置が正常に作動していることがわかった。480nmと685nmでの平均輝度比をクロロフィル濃度の指標として、広島県水産試験場が実測したクロロフィル濃度と比較したが、余り良い相関が得られなかった。この原因は、測定した輝度には水中からの光ばかりでなく、クロロフィル濃度に関して何ら情報を持たない海面反射光を含むためである。そこで、今後は海面反射光を測定輝度から除去する方法を検討して、クロロフィル濃度の推定を行う予定である。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、終始、暖かい御指導ならびに御鞭撻を頂きました、理化学研究所ミュオン研究室の米田晃先生に厚く御礼申し上げます。また、観測ならびに観測データの収集に御協力頂きました広島県水産試験場の大内展博士に心から感謝します。また、クロロフィル濃度のデータを快く提供していただいた同試験場の高山晴義氏、西井祥則氏、橋本俊将氏に厚く御礼申し上げます。さらに、船上での作業では同試験場調査船“あき”の帯刀俊彦氏と安部孝至氏に御協力いただきました。機器を製作するにあたり御指導頂きました、中国工業技術研究所の川名吉一郎先生に厚く謝礼を申し上げます。さらに、御指導頂きました水産大学の千手智晴先生に心から感謝しております。また、観測を御手伝い下さった研究員の吉永聡氏に深く感謝いたします。

「参考文献」

- 1) H. R. Gordon and D. K. Clark: *Boundary Layer Meteorol.*, 18, 299-313 (1980).
- 2) D. K. Clark: in "Oceanography from Space" (ed. by J. F. R. Gower), Plenum Press, New York and London, 1981, PP. 227-238.
- 3) H. R. Gordon, D. K. Clark, J. W. Brown, O. B. Brown, R. H. Evans and W. W. Broenkow: *Appl. Opt.*, 22, 20-36 (1983).
- 4) S. Sugihara, M. Kishino and N. Okami: *J. Oceanogr. Soc. Jpn.*, 41, 113-122 (1985).
- 5) A. Morel: *Boundary Layer Meteorol.*, 18, 177-201 (1980).
- 6) S. Sugihara, and M. Kishino, *J. Geophys. Res.*, 93, 10, 857-10, 862 (1988).
- 7) R. A., Neville and J. F. R. Gower: *J. Geophys. Res.*, 82, 3487-3493 (1977).
- 8) J. F. R., Gower: *Boundary Layer Meteorol.*, 18, 235-245 (1980).
- 9) J. F. R., Gower and G. Borstad: in "Oceanography from Space" (ed. by J. F. R. Gower), Plenum Press, New York and London, 1981, PP. 329-338.
- 10) R., Doerffer: in "Oceanography from Space" (ed. by J. F. R. Gower), Plenum Press, New York and London, 1981, PP. 339-345
- 11) S. Sugihara, M. Kishino and N. Okami: *J. Oceanogr. Soc. Jpn.*, 42, 99-105 (1986).
- 12) ESA MERIS Scientific Advisory Group: "The medium resolution imaging spectrometer (MERIS)", ESA, PP. 1-61 (1991).
- 13) F., Grum and T. E. Wightman: *Appl. Opt.*, 16, 2775-2776 (1977).
- 14) N. Okami, M. Kishino and S. Sugihara: *Tech. Rep. Phys. Oceanogr. Lab., RIKEN Inst.*, 2, PP. 1-131 (1978).