

航空機搭載海洋レーザ観測装置を用いた海洋表層におけるレーザ光励起クロロフィル蛍光のプロファイリングについて

浅沼 市男*¹ 宗山 敬*¹

Frank E. HOGE*²

航空機レベルからの海洋レーザ観測装置によるレーザ光励起の植物プランクトン含有クロロフィル色素からの蛍光の、海洋表層における鉛直分布計測を行った。NASA/AOL搭載のNd-YAGレーザの第2高調波である532nmのパルス・レーザ光を蛍光励起の光源とし、AOL測深モードの光学系とゲート付きマイクロチャンネルプレート内蔵光電子倍增管とを組み合わせ、蛍光計測及び散乱光強度計測を行った。この結果、深度10m前後の懸濁物層に対応した深度に距離方向に間欠的に極大を持つ蛍光の計測に成功した。

キーワード：航空機搭載ライダー、クロロフィル蛍光、リモートセンシング

Airborne Laser Induced chlorophyll Fluorescence Profiling in the Upper Ocean Layer

Ichio ASANUMA*³

Key MUNAYAMA*³

Frank E. HOGE*⁴

Fluorescence depth profiles from Phytoplankton were measured by the Airborne Ocean Lidar (AOL) system of NASA with the gated microchannel plate photomultiplier (MCP-PMT) of JAMSTEC. The 532nm second harmonic of the Nd:YAG laser was used as a laser source. Fluorescence from phytoplankton in sea water was measured to a depth of 13 meters as a depth profile with presenting a peak of phytoplankton at the depth of 10 meters, which corresponds to the peak of light scattered by suspended matters.

Key words: Airborne LIDAR, Chlorophyll Fluorescence, Remote Sensing

*1 海洋研究部

*2 NASAゴダード宇宙航空研究所ワロップ飛行施設

*3 Marine Research Development

*4 NASA/Goddard Space Flight Center Wallops Flight Facility

1 はじめに

地球温暖化問題が取り上げられ、炭酸ガスの発生に関する問題と炭酸ガスの吸収をも含む大気海洋循環の問題が、人類にかけられた大きな問題となってきた。JGOFS (Joint Global Ocean Flux Study) に見られるように、大気海洋間の物質循環過程の解明に取り組む観測計画が立てられ、植物プランクトンの海洋表層における深度分布と炭酸ガス同化作用の解明が一つの課題となっている。

従来の観測手法によると、船舶を用い、海水を採水分析するか、蛍光光度計を深度方向に展開し、植物プランクトンの鉛直分布が求められてきた。このような観測手法は時間がかかり、広域を同時観測することが困難であった。これに対して、航空機からのレーザ光を光源とする観測装置の開発が進められてきた。

航空機搭載海洋レーザ観測装置の開発は、1970年代から行なわれた。Bristow¹⁾らによる窒素色素レーザを用いた海洋表層の植物プランクトン観測のための計測装置が開発された。また、Hoge²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾らによるNd:YAGレーザを用いた測深・懸濁物層・海洋表層の植物プランクトン観測のための装置も開発された。これらの海洋レーザ観測装置は、海洋表層を1層とする層に存在する植物プランクトンに含まれるクロロフィル色素からのレーザ光励起の蛍光強度分布を計測するための装置であった。

米国NASA (National Aeronautics and Space Administration) と海洋科学技術センターは、深度方向の植物プランクトンからのレーザ励起の蛍光の新しいセンサーによる計測の可能性を探ることを目的に、NASAのAOL (Airborne Ocean Lidar) にゲート付きマイクロチャンネル・プレート内蔵光電子増倍管 (MCP-PMT) を搭載し、評価のための陸上実験と共同飛行実験を行った。このMCP-PMTは、従来の光電子増倍管に比べ高速の応答性及び高速のゲート機能を有するため、これまでのライダー技術において問題であった深度方向の距離分解能及び任意の深度でのゲート機能と感度などの向上が期待された。この実験において、MCP-PMTの機能を確認するとともに、深度約10mにある懸濁物層に対応する深度において、懸濁物層とは異なった距離方向に間欠的にピークをもつ蛍光

強度の計測に成功した。

2 蛍光励起波長

植物プランクトンは種別により光の吸収特性が異なり、外部からの光の刺激に対して異なった応答を示すことが知られている。これは植物プランクトンに含まれる色素が異なり、異なる応答を示すためであり、色素構成の異なる植物プランクトンについて一定の蛍光応答を示すレーザ励起波長あるいは励起波長の組み合わせを求めることの困難なことをYentsch⁸⁾が報告している。しかし、植物プランクトンに対して可能な限り蛍光励起効率の良い波長帯域のレーザ波長を選択できれば、蛍光計測が容易となる。

Bristow¹⁾は、青色から緑色にかけての波長帯域における蛍光励起のためのレーザ光について議論した。これによると、クロロフィル-aを蛍光励起するためには、430nm近辺の短波長側の青色のレーザ光を選択すべきであるが、沿岸水において緑から青にかけて波長が短くなると海水の消散係数が大きくなる弊害がある。これに対して波長の長い470nmから520nm近辺の青色から緑色のレーザ光を選択できれば海水の消散係数が小さいところで蛍光励起が可能となるが、クロロフィル-aの蛍光効率が低下する。一方、波長を長めにするるとO-H振動に伴う 3418cm^{-1} のラマン光が発生し蛍光スペクトルと重複する危険性があるとした。また、色素レーザの効率の点からBristowは470nmのレーザ光を蛍光励起光として選択した。Hoge²⁾は、Nd:YAGレーザの第2高調波である532nmのレーザ光を励起光として利用した。これは従来の色素レーザに比べて出力強度が大きいことから、また532nmの励起光によるラマン光の波長が645nmであり蛍光の波長である685nmと判別可能であるため選択した。Hogeはこれを利用し、海面表層についての植物プランクトンからの532nm励起の蛍光による観測の有効性を示し²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾、また氷海域の植物プランクトン分布観測に応用した⁷⁾。

植物プランクトンの深度方向の鉛直分布の計測の可能性も議論されてきたが、685nmにおける海中での消散が大きいこと、検出器が深度分解能を達成するに十分な応答速度を持たないことなどから、計測例がなかった。また、Poole⁹⁾らは、植物

プランクトン濃度とレーザ励起の蛍光の積算深度を計算により推定し、海水の透明度の大きい海域においても4m程度の計測限界を示した。この実験においてはNd:YAGレーザの第2高調波である532nmを植物プランクトン含有クロロフィル色素の蛍光励起光とした。

3 航空機レーザ・プロファイル・システム

Hoge⁶⁾等により紹介されたP-3Aオライオン搭載の航空機搭載型海洋ライダー観測装置(AOL)及び海色観測系(POCS)のうち、測深系として利用されるAOLの光学系とゲート付きマイクロチャネルプレート内蔵光電子増倍管(MCP-PMT)とを組み合わせ、飛行中にフィルタを532nmと685nmとを交換することにより散乱光計測と蛍光計測を行った。

レーザ光は、Nd:YAGレーザの第2高調波である532nmを利用し、パルス繰り返し数は20パルス/秒、532nmにおけるパルスエネルギーは300mj/パルスである。レーザ光はプリズムにより鉛直下へ向けて照射される。同時にその一部はレーザ装置のレーザ射出窓に設置された光学ファイバーによりAOLの信号処理部に導かれ、レーザパルス出力強度モニター及びレーザパルス発振のタイミング信号として検出される。

海面からの反射光、海中からの散乱光及び蛍光はカセグレイン望遠鏡により集光される。集光された光は、検出器に至る前に、その一部が焦点面の手前に設置された光学導管によりAOLの信号処理系に導かれ、海面からの反射信号の強度及びタイミング信号として検出される。また、焦点面には、視野角選択のための絞り、また海面からの強い反射光を避けるための空間フィルタが設置される。

集光された光は、コリメートレンズにより平行化された上、通常であるとビームスプリックによりPOCS系と測深系とに分割されるが、この実験ではMCPの受光面径と集光レンズの焦点距離との都合によりビームスプリックを撤去し、測深系のための計測とした。これに従い、コリメートレンズの直後に散乱光計測のための532nm及び蛍光計測のための685nmのフィルタを設置した。

この実験に使用したMCP-PMTは、マイクロチャネルプレートを使用した光電子増倍管である。

光学系により集光された微弱光は、陰極の光電面において光電子に変換され、ゲートを通じたのち収束電極により収束され、内壁に電導性の物質を塗布したガラス毛细管を束ねたマイクロチャネルプレートにより増倍され、陽極に電子として届く。このMCP-PMTの特色は立ち上がり速度が0.25nsから0.30nsとこれまでの光電子増倍管と比べると1桁ほど向上している。このMCP-PMTの光電面における放射感度は532nmで約35mA/W、685nmで約15mA/W、陽極における電流増倍率は最大で 1.0×10^6 である。また5nsから5 μ sまでのゲート幅を設定可能である。このMCP-PMTのゲート操作は、レーザ射出窓に設置された光学ファイバーからの信号をタイミングの基準とし、遅延回路とパルスジェネレータとにより作成された深度方向に時間幅を持つゲート信号を利用した。

MCP-PMTから出力信号は、高速アンプを通してAOL信号処理系に送られる。信号のディジタル化のためのタイミングは、受光望遠鏡の焦点面に設置された光学導管からの信号を基準とした。ディジタルの時間区間は、遅延回路の調整により海面反射光の到達する直前から有効深度までとし、その時間区間内に前述のゲート開放の信号が含まれる。

MCP-PMTからの信号はAOLの信号処理系により処理され、リアルタイムにCRTに表示されると同時に、磁気テープに位置情報とともに記録される。

4 飛行実験

飛行実験に先立ち、陸上においてMCP-PMTの機能を確認するための実験を行った。陸上実験では、航空機内部のAOLシステムからのレーザ光を、航空機底面の開口部の直下に設置したミラーを利用し、飛行高度に相当する150m先に設置した反射板まで導き、その反射板からの反射光を同じミラーを利用しAOLの受光光学系に導き実験を行った。実験では、MCP-PMTのAOLの光学系における532nmの散乱光及び685nmの蛍光検出能力の確認を行い、印加電圧、ゲートタイミング、空間フィルタの立体角、絞りの立体角、NDフィルタなどの設定値を求めた。

陸上実験終了後、計測可能な気象条件の到来を

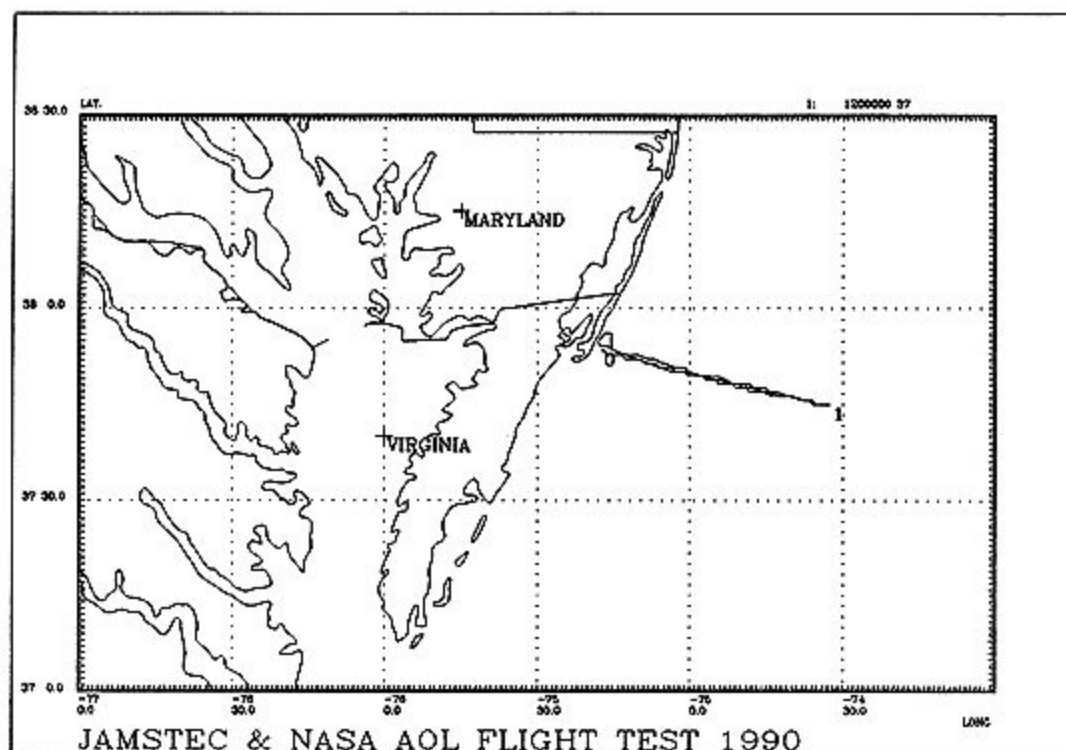


図1 航空機実験航跡図

Fig. 1 Flight Line in this experiment.

待ち 8 月 8 日 10 時 30 分から 1 時間の飛行実験を行った。図 1 に示すように、ワロップ島から東南東の大西洋上の約 100km 沖合まで飛行実験を行った。

飛行実験では、532nm の散乱光計測モードにおいて MCP-PMT のゲート開放のタイミングを深度方向にずらしながら 1 往復の計測を行ったが、信号全体にノイズが乗り望ましい結果ではなかった。原因として考えられることに、MCP-PMT の光電面の直前に ND フィルタを置き光を減衰していたことが考えられる。

次に 685nm における蛍光計測のため、532nm のフィルタを 685nm に変更し、685nm での天空光の入射を避けるため 7 mrad の視野絞りを置き計測を行い、深度方向の蛍光の鉛直分布の検出を確認した。さらに、ゲート開放のタイミングを鉛直方向の深い方向にずらし、MCP-PMT の印加電圧を上げ計測を継続したところ、引き続き深度方向の蛍光の鉛直分布を求めることができた。そこで、532nm に

おける散乱光を再度計測するため、532nm のフィルタとし、532nm における海面反射光のブロッキングのための 7 mrad の空間フィルタを置き、また光減衰のための ND フィルタを用いずに計測を行った。この結果、深度方向の散乱光の鉛直分布の検出を確認できた。さらに、ゲート開放のタイミングを鉛直方向の深い方向にずらし、MCP-PMT の印加電圧を上げ計測を継続したところ、同様に深度方向の散乱光分布を計測できた。

4.1 散乱光及び蛍光鉛直断面

532nm の散乱光と 685nm の蛍光とを相互に比較可能な部分が限定され、図 1 の測線に沿って得られた比較可能な解析結果を図 2 に示す。上半分がレーザ光励起の植物プランクトンからの蛍光の鉛直分布を示し、下半分がレーザ光と同じ波長での懸濁物による散乱光の鉛直分布を示す。カラーの表示は AOL システムの出力電圧 1 V を 40mV ごとに

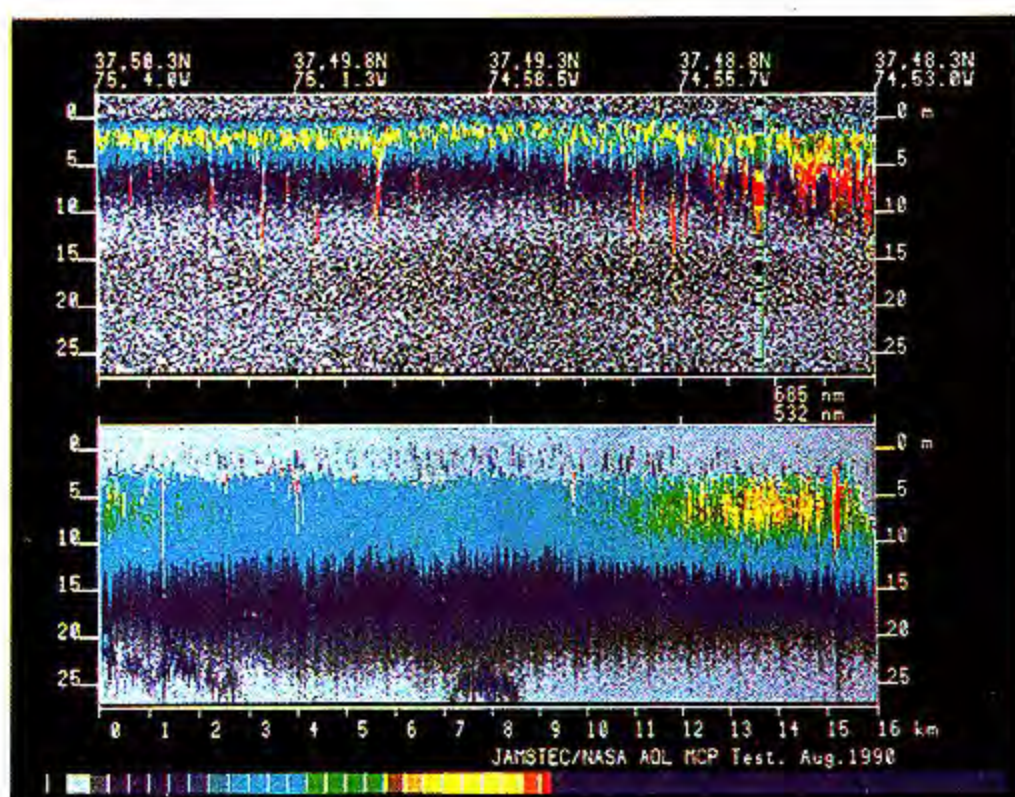


図2 蛍光強度深度方向の断面図（上側）及び散乱光強度深度方向の断面図（下側）

Fig. 2 Cross Section of Fluorescence from Phytoplankton (upper portion) and Cross Section of Scattered Light by Suspended Matters (lower portion)

配色した相対値を示し、寒色系から暖色系へ出力電圧の昇順に配色した。それぞれ、横軸に16kmまでの距離をとり、縦軸に25mまでの深度をとった。

実験前の1990年8月6日のNOAA/NOSの海況分析によると、測線は水温26℃の沿岸水の中に位置し、特定の海洋構造の存在する海域ではない。飛行測線の水深は、20mから40mの海域である。

まず、散乱光の分布を見ると、図2の下の部分に深度4mから10m強のパッチ状の散乱光強度の強い水塊が鮮明に捕えられている。これは、懸濁物濃度の高い海水に相当し、散乱光の強度が強く現れたと考えられる。パッチ状に懸濁物等が存在すると言われるものの、従来の計測手法では観測が困難な現象であるが、約4kmにわたるパッチ状の海水塊の存在がこのライダー観測により確かめられた。

この懸濁物層に対応する海域における蛍光を見

ると、図2の下の部分と同様に右側の海域の深度3mから5mまでに若干強い蛍光が観察され、さらに5mから10mまでの飽和気味の蛍光が観測される。この蛍光強度の強い海水は、懸濁物と同様に植物プランクトン濃度の高い海水と考えられる。これから判断すると、パッチ状の懸濁物層と強い相関をもって、植物プランクトンの存在することが推定される。しかし、蛍光強度の分布は、飛行方向に対して断続的に存在しており、懸濁物よりもさらに小さなパッチ状の存在が推定される。これらの中の飽和気味の代表的なプロファイルを図3に示す。

図3は、横軸に計測の時間を取り縦軸にMCP-PMTの出力強度をとった。海面に相当する時間は、時間軸方向に広がったレーザパルスの先端が海面に侵入し、レーザ励起の蛍光強度が検出に有効な強度になった時点から、その蛍光が検出系に届い

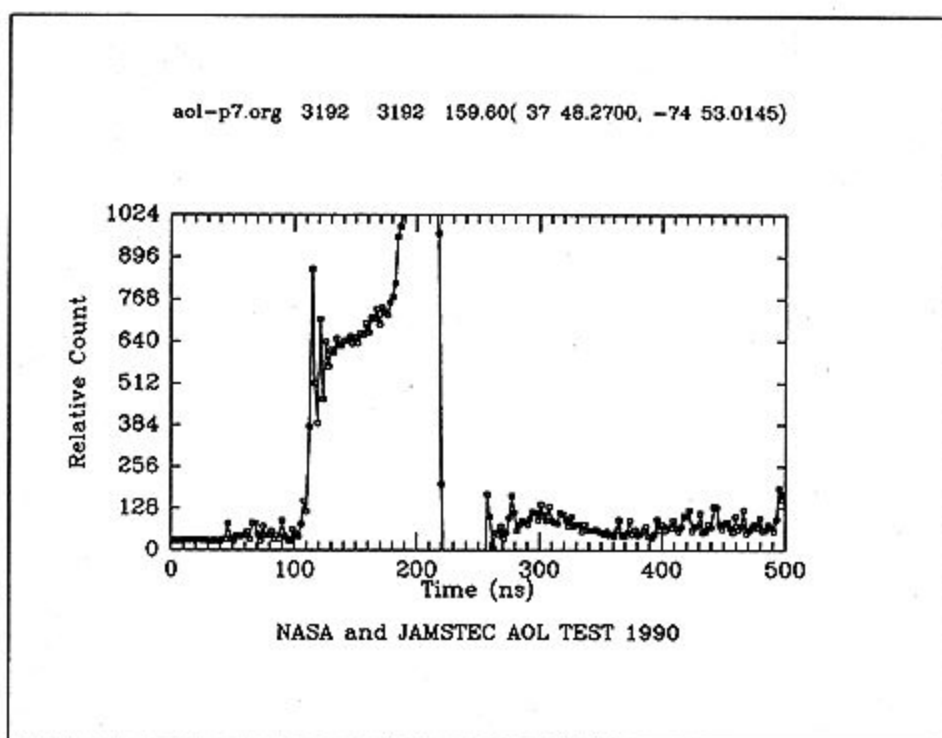


図3 蛍光強度計測プロファイル

(横軸：時間、深度に相当する。縦軸：相対的検出強度。)

Fig. 3 Fluorescence Profile

(x-axis: Time, corresponds to depth, Y-axis: Relative count of received power)

た時間である。ここでは、信号の立ち上がり部分のピークの10%のレベルの時点海面とした。図3によると110ns近辺において海面直下の強い蛍光が捕らえられており、それに引き続き徐々に蛍光強度が上昇し、180nsから220nsにかけて飽和し、飽和後にマイナスの出力が得られた。海面は107nsの時点に相当し、ピークは203nsであるから、その時間差から植物プランクトンの層のピークが約11mの深度に存在することが推定される。このプロファイルの飽和後マイナスの出力の原因は、飽和した信号の反射信号が影響していると考えられる。

4.2 計測システムの変動

この信号処理を通して、深度方向のプロファイルの立ち上がり時間に変動が見られたため、海面からのレーザパルスの戻り時間から飛行高度を計測した高度データと、深度方向のプロファイルの立ち上がり時間により示される海面高度の変動データ

との関係を調べた。図4に海面直下の蛍光反応を捕らえたゲート設定時の計測プロファイルの例を示す。これらの海面直下の蛍光反応を捕らえた一連の蛍光計測プロファイルの立ち上がり時間が一定ではなく変動しており、図4-aの前後合わせて5秒間に得られた100組のプロファイルの10%の信号立ち上がり時間の統計量を求めた。信号の10%の立ち上がり時間の平均値は97.2ns、標準偏差値は7.0nsであった。この立ち上がり時間の標準偏差値は、海面高度の変動の標準偏差値であり、距離に変換すると1.05mとなる。

一方、AOLシステムはレーザパルスの発振時間と、そのパルスが海面へ達し反射した戻りパルスの検出時間との時間差から、海面までの距離を計測しており、同じ5秒間の区間の計測距離の平均値は160.22mであり、標準偏差値は1.18mであった。

これらの立ち上がり時間の変動と計測距離の変動

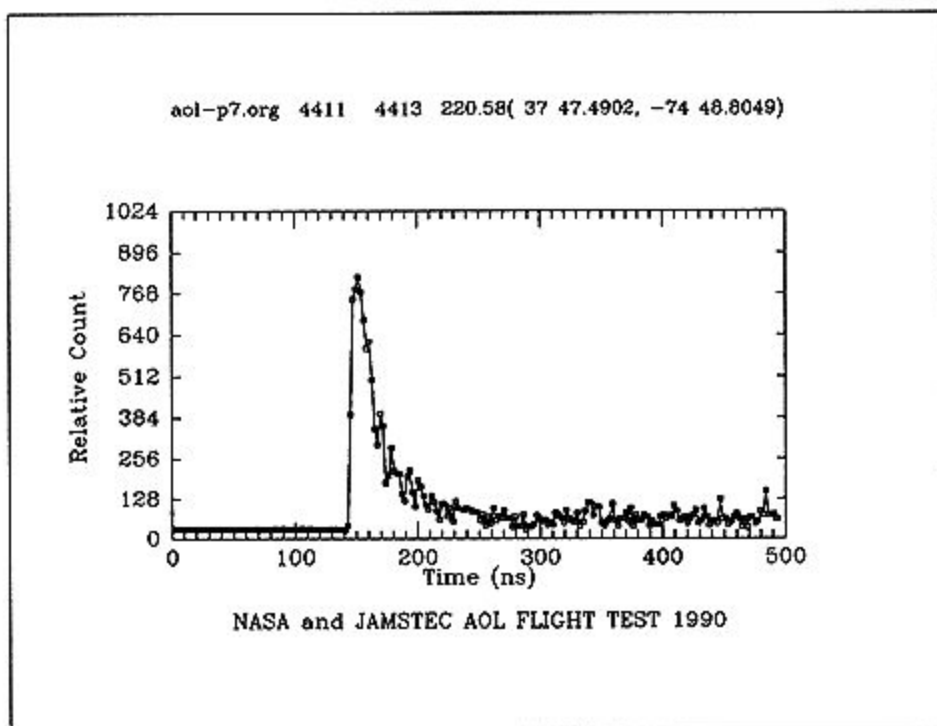
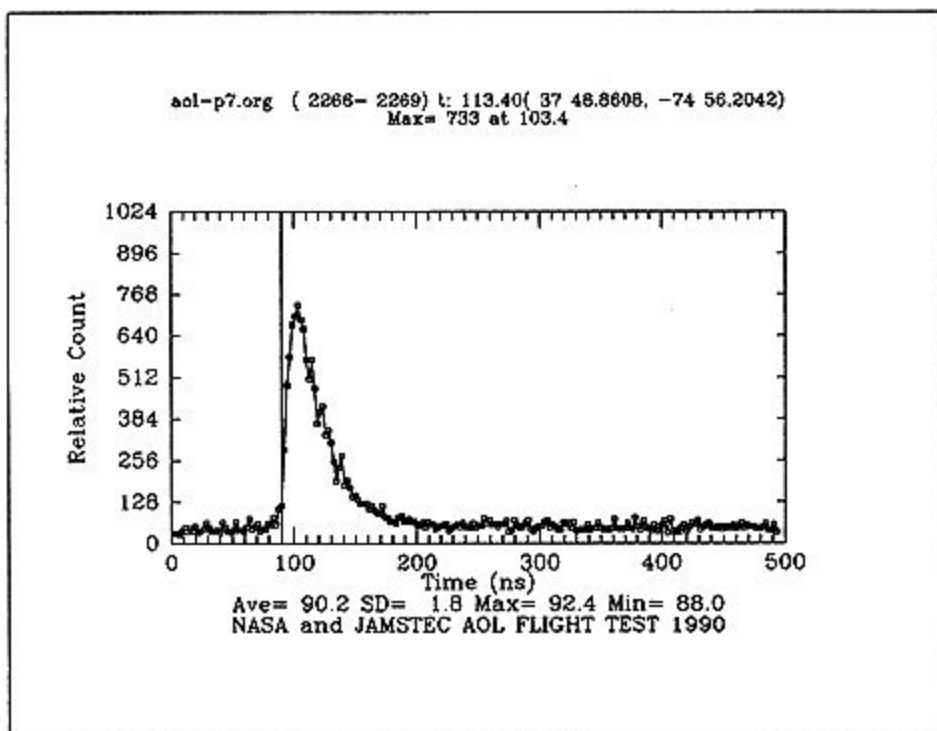


図4 蛍光強度計測例

4-a ゲートのない時の計測例

4-b ゲート設定時の計測例

Fig. 4 Profiles of Fluorescence Measurements

4-a Measurements without Gate Operation

4-b Measurements with Gate Operation

は、航空機の飛行高度変動とレーザ発振装置のジッターなど計測システムの時間軸での変動とが考えられる。飛行高度及び海面相当の反射板の位置変化のなかった陸上実験を通して、これらの変動は認められなかったことから、計測システムの変動ではなく、飛行高度の変動が計測プロファイルの時間軸方向の変動に表れていると推定される。そこで、二つの変動成分の相関係数を求めると、図5に示す様に、相関係数が-0.964となり、強い負の相関が認められる。これは明らかに、飛行高度が上昇した時、海面高度に相当する時間が遅れて観測されたと説明でき、さらにこの飛行実験時の海況は穏やかであり海面高度の変動は少なかったことから、計測信号の時間変動は飛行高度のデータにより修復可能である。

4.3 蛍光深度分布の計測限界

蛍光の深度分布の計測限界は、常に一定ではなく、植物プランクトン濃度とその濃度での蛍光強度、及び蛍光励起波長と蛍光波長における海水の

消散係数に依存する。ここでは、得られた計測データから、蛍光深度分布の計測限界について検討した。

図4-bに、図2の上の部分の計測に引き続き行ったゲート時間変更後の、蛍光計測プロファイルの例を示す。この立ち上り時間は、海面に相当するものではなく、ゲートの開放時間に相当する。

図4-aにおいて、ピークの後の信号レベルが10%まで減衰した時間までを有効な信号とすると、160nsまで計測されたことになり、海水の屈折率を考慮すると計測深度は8.03mに相当する。このときのMCPへの印可電圧は-2421 Vであり、その増倍率は12000倍に相当する。さらに、図4-bでは、ゲート時間を深度方向に移動し、印可電圧を-2589 Vとし40000倍の増倍率を設定し、深度の深いところからのより微弱な蛍光をゲート機能を利用し計測した例である。図4-bにおいて、ピーク後の信号レベルが10%まで減衰した時間までを有効な信号とすると、その深度は13.7mとなる。

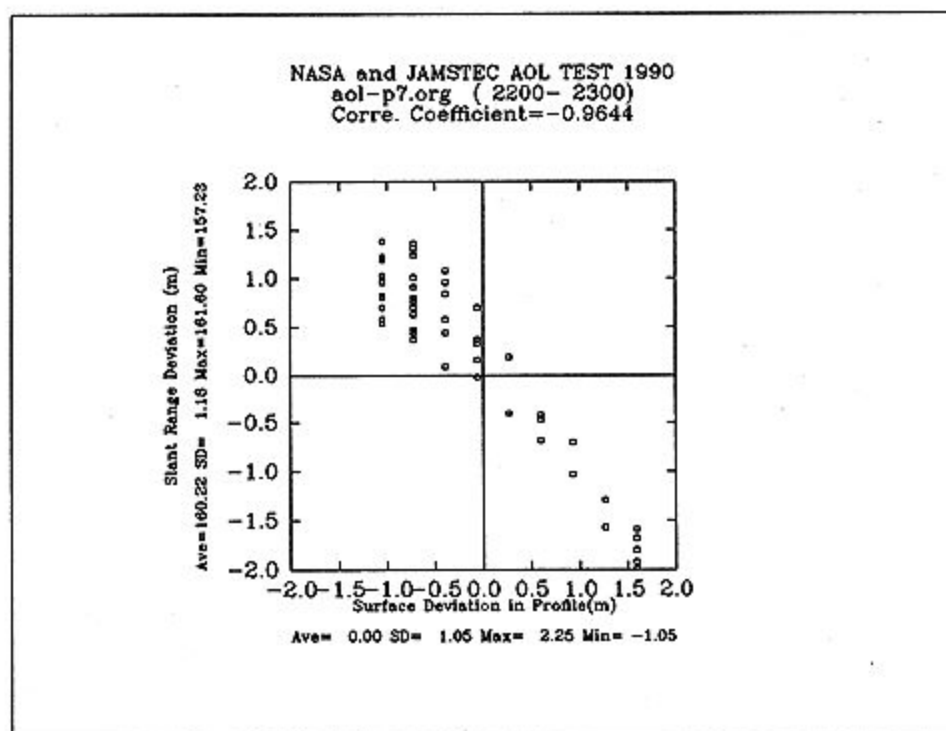


図5 飛行高度変更と海面高度変更の相関図

(横軸：海面高度変動値 (m)，縦軸：飛行高度変動値 (m))

Fig. 5 Correlation Plots of Deviation of Slant Range and Deviation of Surface Height
(x-axis: Deviation of Surface Height (m), y-axis: Deviation of Slant Range (m))

4.4 散乱光の深度分布の計測限界

散乱光による測深について注目すると、図2の下の部分の右側に、10m近傍までの懸濁物による散乱光が明確に示されており、その深度までの計測能力が確認される。さらに、図の左側に水深20mから25mまでの海底が、そして中央部に水深23mを頂上とするバンク状の海底が捕えられており、飛行海域の海図の示す深度と近い値を示した。これは、懸濁物ではないが、25mまでの反射光の計測の可能性を示した。

5 ま と め

以上のことから、当センターにおいて採用したMCP-PMTが散乱光計測モードにおいてNASAのPMTと同等の機能をもつことが示されると同時に、高速の応答を示すことからノイズに強いことが確認された。また、蛍光観測モードでは、はじめて鉛直方向の蛍光強度分布観測に成功し、懸濁物と相関をもって存在することが確認された。

532nmの散乱光計測系を利用し、蛍光の鉛直分布を計測することができ、海上調査データはないものの夏季の植物プランクトン濃度の比較的低い時期においても蛍光を計測できたことから、MCP-PMTは蛍光計測についても十分な感度を持つと言える。さらに、13mまでの蛍光深度分布の計測を示し、深い深度までの蛍光深度分布計測の可能性を残した。

従来の海洋観測技術では、懸濁物あるいは植物プランクトンのパッチ状の存在を計測することは困難であったが、航空機搭載型の海洋ライダー観測技術は新しい観測技術としての有用性を示し、今後計画される物質循環観測計画や衛星搭載の海色観測センサーの支援に有効なデータを提供すると考えられる。

参考文献

- 1) Bristow, M., D. Nielsen, D. Bundy, and R. Furtek, Use of water Raman emission to correct airborne laser fluorosensor data for effects of water optical attenuation, *Applied Optics*, V. 20, N. 17, p. 2889-2906, (1981)
- 2) Hoge, F. E. and R. N. Swift, Application of the NASA Airborne Oceanographic LIDAR

to the Mapping of Chlorophyll and Other Organic Pigments, *Chesapeake Bay Plume Study*, ed. by J. W. Campbell and J. P. Thomas, p349-374, (1980)

- 3) Hoge, F. E. and R. N. Swift, Airborne dual laser excitation and mapping of Phytoplankton photopigments in a Gulf Stream Warm Core Ring, *Applied Optics*, V. 22, No. 15, p. 2272-2281, (1983)
- 4) Hoge, F. E., R. E. Berry, and R. N. Swift, Active-passive airborne ocean color measurement. 1:Instrumentation, *Applied Optics*, V. 25, No. 1,39-47, (1986)
- 5) Hoge, F. E., R. N. Swift, and J. K. Yungel, Active-passive airborne ocean color measurement. 2:Application, *Applied Optics*, V. 25, No. 1,48-57, (1986)
- 6) Hoge, F. E., C. W. Wright, W. B. Krabill, R. R. Buntzen, G. D. Gilbert, R. N. Swift, J. K. Yungel, and R. E. Berry, Airborne lidar detection of subsurface oceanic scattering layers, *Applied Optics*, V. 27, No. 19, p.3969-3977, (1988)
- 7) Hoge, F. E., C. W. Wright, R. N. Swift, and J. K. Yungel, Airborne Discrimination Between Ice and Water: Application to the Laser Measurement of Chlorophyll-inwater in a Marginal Ice Zone, *Remote Sens. Environ.* 30:67-76, (1989)
- 8) Yentsch, C. S. and C. M. Yentsch, Fluorescence Spectral Signatures:The characterization of phytoplankton populations by the use of excitation and emission spectra, *J. Marine Research*, V37, No. 3, p471-483, (1979)
- 9) Poole, L. R. and W. E. Esaias, Water Raman normalization of airborne laser fluorosensor measurements:a computer model study, *Applied Optics*, Vol. 21, No. 20, P3756-3761, (1982).

(原稿受理:1991年5月13日)