レーザー光を用いた植物プランクトン 鉛直分布観測手法*

浅沼 市男**, 松本 和彦***, 河野 健***

Monitoring Method of Vertical Distribution of Phytoplankton by Laser

Ichio ASANUMA, Kazuhiko MATSUMOTO and Takeshi KAWANO

1. 緒 論

1970年代から、レーザー光を用いた海洋観測装置の開発が進められてきた。海洋観測として、パルスレーザー光の海底からの反射光の戻り時間を計測し水深を求める装置、海水中の植物プランクトンからのレーザー光励起の蛍光強度を計測し植物プランクトン濃度を求める装置、海水中の植物プランクトンなどの懸濁物によるレーザー光の散乱光を計測し懸濁物の鉛直分布を計測する装置、海水の温度変化によるレーザー光のラマン光を計測し水温を求める装置などの開発が進められてきた。この内、水温観測は実験室レベルの報告にとどまっている。

植物プランクトン観測のためのレーザー観測として、Mumola et al.¹⁾, Browell²⁾, Yentsch and Yentsch³⁾, Bristow et al.⁴⁾, Poole et al.⁵⁾, Measures⁶⁾らが、レーザーによる植物プランクトン観測の基礎を論じ、レーザー励起蛍光を求めるレーザー方程式を提案した。

実際の海水中の植物プランクトンの現存量を求めることを目的としたレーザー観測装置は、Hoge et al.^{7), 8), 9), 10)}, Bristow et al.^{11), 12), 13)}, Bertolini et al.¹⁴⁾らにより開発が進められてきた。また、レーザー観測装置による植物プランクトン観測の応用例が、Hoge¹⁵⁾, Hoge¹⁶⁾などにより報告された。ここでは、船舶搭載型海洋レーザー観測装置の概要と、検証実験を通して確認された散乱光及び蛍光観測能力について報告する。

2. 植物プランクトン観測のためのレーザー光

これまで、植物プランクトンを観測するための装置として、キセノンランプを発光させ、この光により植物プランクトンから励起される蛍光を観測する蛍光光度計があった。この蛍光光度計は、装置本体を海水中に投入するか、あるいは、海水を連続的に汲み上げセンサー部へ導入する必要があった。

これに対して、レーザー光を光源として利用し、離れたところからの植物プランクトン観測の可能性が探られた。

レーザーを光源として選択したとき、従来からの光源に比べて、次のような特長が挙げられる。

- ①単一波長の光を照射できる。
- ②光が拡散せず、離れた所の物体に対して強度を維持したまま照射できる。
- ③強い強度の光を照射できる。

現在利用可能なレーザー装置として、Nd:YAGレーザー、窒素色素レーザー、半導体レーザー、半導体励起Nd:YAGレーザーなどが考えられる。

Nd:YAGレーザーは基本波として1,024 nmの光を発振し、KDP結晶を通し532 nmの第2高調波を発振する。このNd:YAGレーザーの第2高調波である532 nmの波長は、クロロフィル-aの吸光分光波長のピークから外れ、直接励起に適した波長ではない。しかし、カロチノイド、フィコシアニン、フィコエリスリン等の補助色素の吸光波長を刺激するものであり、間接的ながら蛍光励起の可能性を持つ。さらに、Nd:YAGレーザーに関して、レーザーパルスの先鋭化と、ジャイアント・パルスと称されるようにパルスへのエネルギーの集約が可能となっており、リモートセンサーの光源としての可能性を持つ。

窒素色素レーザーなどの色素レーザーは、430から440 nmの波長を選択することにより、植物プランクトンのクロロフィル-a色素を直接刺激することができる。しかし、高出力を持つ色素レーザーは大型となり、また、色素の媒体として有機溶媒を利用し発火の危険性を持つため、リモートセンサーの光源として若干の問題を残す。

半導体レーザーは、緑色から青色の短波長側のレーザー光を発振可能であり、今後の応用が待たれる。現在は、半導体レーザーの冷却の問題などが解決され、高エネルギーを発振するものが開発された。しかし、非常に高価であり、海洋観測への応用へは至っていない。

実際には、Hoge et al.^{7), 8), 9), 16)}は、Nd:YAGレーザーを光源とし、航空機搭載型の植物プランクトン観測および散乱光観測の海洋レーザー観測装置を開発した。これは、フラッシュランプ励起のNd:YAGレーザーの第2高調波である532 nmのパルスレーザーを光源として利用する装置である。300 mJ/pulse (at 532 nm), 30 Hzのジャイ

* 原稿受付 2002年4月1日

** 宇宙開発事業団 地球観測利用研究センター

*** 海洋科学技術センター

アント・パルスを発振する Nd:YAG レーザを P3C 対潜哨戒機に搭載した。太平洋のハワイからクリスマス島までの 9 時間に渡る観測では、海面の植物プランクトンブルームを捕らえた。

Bristow et al.^{(11), (12), (13)} は、フラッシュランプ励起の色素レーザをヘリコプタに搭載し、河川における植物プランクトン観測のための装置を開発した。色素レーザは、窒素ガスレーザの紫外線キセノンランプを光源とし、各種の色素に照射し色素の蛍光を励起させ、任意の波長のレーザー光を発振させる装置である。従って、クロロフィル-a の吸光分光波長のピークである 430 nm のレーザー光により直接蛍光を励起することが可能である。しかし、色素の媒体として有機溶剤を用い発火の危険性があるため、リモートセンサーの光源としては利用されていない。

3. 多層ライダー方程式

Kim⁽¹⁷⁾ 及び Browell⁽⁹⁾ により提案されたライダー方程式をもとに、深度方向の多層からの蛍光及び散乱光を記述するための多層ライダー方程式を提案した。

3.1 消散係数

海洋レーザー観測装置により計測されるある深度 (z) (m) におけるレーザー光束通過単位体積 (レーザー光束面積 $\times$ 単位距離 (=1 m)) からの散乱光強度 $Ps(z)$ (w) を、次式が多層ライダー方程式に消散係数の関数として示す。これまでの、深度方向の消散係数を一定と考えてきたが、この研究では、深度方向の消散係数を多層的に与えた。

$$Ps(z) = Pl(1-\rho_l)^2 \exp(-2\beta_l H) \exp(-2 \int \gamma_l(z) dz) \xi Ar / \{4\pi(Z+mH)^2\} \quad (1)$$

ここで、 Pl はレーザー波長 l (nm) におけるレーザー光の強度 (W),

ρ_l はレーザー波長 l における海面の反射率,

β_l はレーザー波長 l における大気消散係数 (m^{-1}),

H はレーザー観測装置から海面までの距離 (m),

γ_l はレーザー波長 l における深度 z の消散係数 (m^{-1}),

ξ は受信光学系の光学効率,

Ar は受信望遠鏡の受光面積 (m^2),

m は海水の屈折率である。

このライダー方程式をもとに、測定されたレーザー散乱光から、深度 z の消散係数 γ_l を与えることが目的である。そこで、この問題の解を求めるため、計測値の自然対数の差をとる方法 (Logarithm decrement) の導入を提案した。深度 z からの散乱光強度 $Pl(z)$ と連続する深度 z' からの散乱光強度 $Pl(z')$ の自然対数の差を求める。

$$\ln(Ps(z')) - \ln(Ps(z)) = -2 \left\{ \int \gamma_l(z) dz \right\} - \ln\{(Z+mH)/(Z'+mH)\} \quad (2)$$

さらに、 $z'-z$ を 1 m の単位距離にとると、次式により $z+0.5$ m における消散係数が与えられる。

$$\gamma_l(z+0.5) = -0.5 \{ \ln(Ps(z')) - \ln(Ps(z)) \} + \ln\{(Z+mH)/(Z'+mH)\} \quad (3)$$

3.2 クロロフィル-a 濃度と消散係数

植物プランクトンには光合成を行うクロロフィル-a 色素と、その他にクロロフィル-b, -c, カロチノイド, フコキサンチンなどの色素が含まれる。それぞれの色素が異なる吸光分光特性を持つ。クロロフィル-a は、440 nm と 680 nm に吸収を持ち、その他の色素はそれぞれの特異の波長に感度を持つ。クロロフィル-a 以外の色素は、補助色素と呼ばれ、それぞれ受光した太陽光のエネルギーをクロロフィル-a へ伝達する。

植物プランクトンからの蛍光励起を効率よく行うためには、各植物プランクトンに共通に含まれるクロロフィル-a の吸光分光波長特性に合わせ、レーザーの波長を選択する必要がある。あるいは、観測対象となる植物プランクトンの種に含有されるクロロフィル-a 以外の密度の高い色素の吸光分光波長特性に合わせ、レーザーの波長を選択する必要がある。しかし、植物プランクトンの種の構成は海域あるいは季節により大きく異なるため、観測海域の植物プランクトンの種の構成に適したレーザー波長の選択と設定は現実的な解答ではない。

これまでの植物プランクトン中のクロロフィル-a 色素濃度を測定するための装置は、430 nm から 440 nm の光を発光し、植物プランクトンからの蛍光強度を計測する装置である。これらの装置は、キセノンランプあるいはハロゲンランプを光源とし、440 nm 透過するフィルターを組み合わせて、クロロフィル-a の吸光分光波長の最大となる波長の光を照射し、蛍光を励起する。

海洋レーザー観測装置により計測されるある深度 (z) (m) におけるレーザー光束通過単位体積 (レーザー光束面積 $\times$ 単位距離 (=1 m)) からの蛍光強度 $Pf(z)$ (w) を、次式が多層ライダー方程式に消散係数とクロロフィル-a 濃度の関数として示す。

$$Pf(z) = Pl(1-\rho_l)(1-\rho_f) \exp\{-(\beta_l + \beta_f)H\} \exp\left\{-\int (\gamma_l(z) + \gamma_f(z)) dz\right\} \sigma n(z) \xi Ar \delta f \delta z / \{4\pi\delta f(Z+mH)^2\} \quad (4)$$

ここで、 Pl はレーザー波長 l (nm) におけるレーザー光の強度 (W),

ρ_l はレーザー波長 l における海面の反射率,

ρ_f は蛍光波長 f における海面の反射率,

β_l はレーザー波長 l における大気消散係数 (m^{-1}),

β_f は蛍光波長 f における大気消散係数 (m^{-1}),

H はレーザー観測装置から海面までの距離 (m),

γ_l はレーザー波長 l における深度 z の消散係数 (m^{-1}),

γ_f は蛍光波長 f における深度 z の消散係数 (m^{-1}),

σ はクロロフィル-a 単位濃度当たりのレーザー励起蛍光の散乱断面積 (m^2/mg),

$n(z)$ は深度 z におけるクロロフィル- a 濃度 (mg/m^3),
 ξ は受信光学系の光学効率,
 A_r は受信望遠鏡の受光面積 (m^2),
 δfd は検出器の蛍光フィルタの波長幅 (nm),
 δf はレーザ励起蛍光の波長幅 (nm),
 m は海水の屈折率である.

蛍光についても同様に, 深度 z からの蛍光強度 $Pf(z)$ と連続する深度 z' からの蛍光強度 $Pf(z')$ の自然対数の差を求める.

$$\ln(Pf(z')) - \ln(Pf(z)) = -(\gamma l(z+0.5) + \gamma f(z+0.5)) + \ln\{n(z)/n(z')\} - 2\ln\{(Z+mH)/(Z'+mH)\} \quad (5)$$

ここで, $\gamma l(z+0.5)$ のレーザ波長 l 及び深度 $z+0.5$ における消散係数は, (4-3) 式に与えられる. 未知数として, $\gamma f(z+0.5)$ の蛍光波長 f 及び深度 $z+0.5$ における消散係数, $n(z)$ 及び $n(z')$ の深度 z 及び z' におけるクロロフィル- a 濃度が残る. 蛍光波長における消散係数は, 海水中の懸濁物に対して, レーザ波長に対して波長の関数と与えられたため, (3)式の消散係数から次式が経験的に与えられる.

$$\gamma f(z) = f(\gamma l(z)) \quad (6)$$

ここで, f はレーザ波長の消散係数から蛍光波長の消散係数を与える関数である.

さらに, 表層のクロロフィル- a 濃度 $n(0)$ が与えられれば, 深度 z から z' へとクロロフィル- a 濃度は連続的に次式に与えられる.

$$n(z') = n(z) \exp \{ \ln(Pf(z)) - \ln(Pf(z')) - \gamma l(z+0.5) + f(\gamma l(z+0.5)) - 2\ln\{(Z+mH)/(Z'+mH)\} \} \quad (7)$$

4. 船舶搭載型海洋レーザ観測装置の製作と検証実験

4.1 船舶搭載型海洋レーザ観測装置

Fig. 1 に海洋レーザ観測装置の光学系のブロック図を示す. 光源に Nd:YAG レーザを配置し, 本体, 第 2 高調波発生装置, プリズム高調波分離装置を組合せ, 1,064

nm の基本波と 532 nm の第 2 高調波を独立に送信光学系へ送る配置とした.

1,064 nm のレーザ光 (300 mJ/pulse, 10 Hz) は, 海面からの反射光を計測し海面形状を評価することを目的とした. 1,064 nm のレーザ光は, ビームエキスパンダを通してビーム径が拡大され, 受光のための望遠鏡の光軸と平行に海面へ向け照射される. 受光検出系は, 海面からの反射光を集光するための 150 mm 径の望遠鏡, 波長を選択するための金属干渉フィルタ, 入射強度を調整するための ND フィルタ, 光を検出し電気信号へ変換するための光電子増倍管から構成される.

532 nm のレーザ光 (150 mJ/pulse, 10 Hz) は, 海面からの反射光を計測し海面形状を評価するため, 海中からの散乱光を計測し海水中的の懸濁物濃度を推定するため, また, 海中からの蛍光を計測し海水中的のクロロフィル- a 濃度を推定することを目的とした. レーザ光は, ビームエキスパンダを通してビーム径が拡大され, 受光のための望遠鏡の光軸と同じ軸上を海面へ向け照射される. 受信光学系は, 海面からの光を集光するための 250 mm 径の望遠鏡, 集光された光を平行にするためのコリメータ, 各検出系に分光するためのダイクロイックミラ, ビームスプリッタから構成される. 検出系は, 海面反射光, 散乱光, 蛍光に分かれ, 計測対象の波長選択のための金属干渉フィルタ, 入射強度調整のための ND フィルター, 集光のためのレンズ, 光を検出し電気信号へ変換するための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) から構成される.

これらの装置の構成要素については, 基礎実験を通し, それぞれの有効性を確認の上, 本装置の構成要素として採用した.

信号検出は, レーザ発振装置から出力されるアドバンスト・トリガーを信号検出系の基準信号とし, 海面からの反射光が検出可能なように, アドバンスト・トリガーのタイミングを調整した. 「かいよう」の甲板上に設置したレーザ観測装置搭載コンテナから海面までの距離は, バラスト水の容量により変化するが, 大きな変化はなく, アドバンスト・トリガーのタイミングをその都度変化させることなく計測が可能である. このアドバンスト・トリガーの信号を基準とし, 1,064 nm および 532 nm の海面反射光, 散乱光, 蛍光のそれぞれの MCP-PMT のゲートの開閉を行った.

本装置では, 深度方向の散乱光および蛍光を計測するため, また深度方向での散乱光および蛍光の指数関数的減少に対応し MCP-PMT の感度を上げるため, 深度方向に対応する時間軸における MCP-PMT のゲート開放のタイミングを変化させ, MCP-PMT の感度を変化させ光を検出するゲート手法を開発した. これにより, 散乱光については深度 50 m まで, また蛍光については 15 m から 20 m 深度までの計測が可能となった¹⁸⁾.

Block Diagram of Ocean LIDAR JAMSTEC

Fig. 1 Block diagram of shipboard ocean LIDAR.

Light Scattered observed by Ocean LIDAR

Fig. 2 Vertical distribution of light scattered at 532 nm (November of 1992).

4.2 散乱光による植物プランクトンの鉛直分布

ここで開発した海洋レーザ観測装置は、深度方向からの微弱な信号を検出する能力を持ち、レーザ光励起の植物プランクトンからの蛍光及びレーザ波長における植物プランクトンの散乱光から、植物プランクトンの鉛直分布の計測を可能とするものである。これまでの検証実験から、650 nm の蛍光波長では 15 m 深度までの信号検出が確認されたが、685 nm における海水中の透過率が低く、この深度以上の計測が困難である。これに対して、レーザ光の散乱光による計測では、50 m 深度までの計測を確認した。

ここで開発した手法^{19), 20)}は、各深度からの散乱光及び蛍光の強度の対数値を求め、連続する深度間の強度差を光学過程を説明するモデル式に適用し、散乱光波長及び蛍光波長における消散係数を求め、消散係数から植物プランクトンの濃度を推定する手法である。しかし、この消散光は、植物プランクトンを直接説明するものではなく、海水中の懸濁物として、植物プランクトン、動物プランクトン及び無機有機の浮遊物を含むものである。従って、深度方向の消散係数から与えられる懸濁物の深度分布の判読は、観測海域の現象を考慮した慎重な判読が必要である。

Fig. 2 に、1992 年マジュロから赤道を東進し西経 160 度へ至る海域の、レーザ散乱光の鉛直断面図を示す。縦

軸に 0 m から 50 m までの深度をとり、横軸にマジュロから西経 165 度までの観測日を示した。図は、散乱光強度に応じ、低濃度の寒色（青色）から高濃度の暖色（赤色）まで配色した。散乱光強度を植物プランクトン濃度に対応させると、散乱光強度の強い部分は、植物プランクトンの極大層の上端に対応する。この図の海域は、赤道湧昇の西端に位置する海域であり、図の左側の海域において植物プランクトンの極大層の上端が 40 m 以上の深い部分に観察され、右側の海域において 30 m 前後の左側の海域に比較すると浅いところに観察された。これは、植物プランクトンの極大層の上部に相当し、レーザ散乱光から推定される植物プランクトンの極大層の上端と一致する。

この植物プランクトンに加え、動物プランクトン及びその他の懸濁物が存在するため、散乱光を計測するとき、散乱光の発生原因となる全ての懸濁物を評価する必要がある。

動物プランクトンを観察するプランクトンネットではネットのメッシュを小さくしても微小動物プランクトンを捕捉することが困難であり、十分な教師データとはならない。また、プランクトンネットの鉛直引きでは、動物プランクトンの水柱全体の動物プランクトン量が与えられ、細かい深度分布を与えることが困難である。また、海水の採水と、微小動物プランクトンの沈殿濃縮、染色

と顕微鏡観察手法は、ひとつの教師データとなる可能性を持つ。しかし、ニスキンボトルなどによる海水採水のため、大型の動物プランクトンは捕捉されず、散乱光を評価するための十分な教師データとはならない。

懸濁物として海水を濾過しフィルタにトラップされた懸濁物の乾燥重量を求める手法があるが、外洋は沿岸域に比べ懸濁物濃度が低く、赤道域では十分な精度で懸濁物濃度を求めることが困難である。

植物プランクトン、動物プランクトン、その他の懸濁物など全ての懸濁物を含めて評価するときは、水中透過度計の様な光学的センサーを展開する必要がある。

4.3 植物プランクトンの空間分布とレーザ励起蛍光値

Fig. 3a に、1997 年 1 月の赤道直下海域における海洋調査船「かいよう」を用いた海洋観測の航路及び測点を示す。マジュロを出港し、東経 175 度から西経 167 度までの赤道線を東進し、マジュロへ戻る一連の観測を実施した。この時期の海水の分布は、1996 年度末までのラ・ニーニャ傾向から、エル・ニーニョ傾向にあり、暖水プールが日付変更線を越え東進しつつある状態であった。赤道湧昇系の栄養塩を多く含む水塊が、キリバス諸島近海まで西進した。このため、日付変更線付近まで 0.2 mg/m^3 以下のクロロフィル-a 濃度が観測され、それより以东の海域において 0.2 mg/m^3 を越えるクロロフィル-a が観測された。

Fig. 3b に、この観測時のレーザ励起蛍光強度と、採水海水から求めたクロロフィル-a 濃度 (◆印) の分布を示す。9 日がマジュロ出港後の海域に対応し、11 日から 18 日がマジュロ以东の赤道上の海域である。レーザ励起蛍光の強度分布を見ると、観測期間の全海域を通して、蛍光強度の昼夜変動が観測された。13 日までの海

域は、東進する暖水プールに相当し、表層では 0.2 mg/m^3 以下のクロロフィル-a 濃度であった。この海域は、昨年からの赤道湧昇水にともなう栄養塩が消費されつつあり、若干の栄養塩が残っていた。西経 175 度から以东の海域は、暖水プールが成長しつつある状況であったが、赤道湧昇の栄養塩濃度の高い水塊が存在していた。このため、クロロフィル-a 濃度は高く、 0.3 mg/m^3 程度の濃度を示した。

5. まとめ

海洋レーザ観測装置を製作し、1992 年から 1997 年まで、海洋レーザ観測装置の検証実験、植物プランクトン現存量観測、及び基礎生産力観測を実施した。

海洋レーザ観測装置の基本的な光学系は、NASA の Hoge らによる航空機搭載型の海洋レーザ観測装置と同じである。異なる点は、海面反射光の強い光を除去するために、Hoge らは空間フィルタを焦点面に置いたのに対し、本研究の海洋レーザ観測装置はゲート付きマイクロチャンネル・プレート内蔵の光電子増倍管によるゲート機能を活用した点である。ゲート機能により、海面反射光を遮断するとともに、海面近傍からの蛍光及び散乱光の精度の高い計測が可能となった。Hoge らは空間フィルタを用いているため、海面近傍からの蛍光及び散乱光の一部をカットし、精確な計測を困難としていた。また、ゲート付きマイクロチャンネル・プレート内蔵の光電子増倍管は、距離の短いマイクロチャンネル・プレートによる光電子の増幅を行うため、走行時間が非常に短く、高速な光の計測を可能とした。通常の光電子増倍管に比べ、光増幅距離が短いため、一桁以上高速の現象を捉えることができた。

この結果、計測目的の内、植物プランクトンを含む海水中的懸濁物による散乱光の深度分布を計測することができた。これは、多層ライダー方程式を立て、ログリズム・ディクリメントによる信号解析手法により、懸濁物の深度分布を求めることができた。しかし、30 m から 50 m に植物プランクトン極大層などの散乱媒体が存在するときに限られた。また、外洋のように植物プランクトンの深層極大 (80 m 以深) が形成される場合、懸濁物濃度も低く、十分な検証データを得ることができなかった。

赤道域における検証実験期間に、エル・ニーニョ及びラ・ニーニャ現象が現れ、暖水プールと赤道湧昇水の勢力分布が変化した。海洋観測は中部太平洋から西部太平洋に限定されたが、暖水プールの植物プランクトン鉛直分布及び空間分布、さらに、赤道湧昇水の植物プランクトン鉛直分布及び空間分布を観測することができた。一連の海洋観測では、レーザ励起蛍光の昼夜変動が見られた。この現象を解明すべく、同一の測点において 24 時間連続観測を繰り返したが、残念ながらレーザ励起蛍光の時間変動を把握するまでには至らなかった。その後、

Fig. 3a Observation stations in January, 1997 (K97-01).

Fig. 3b Laser excited fluorescence from phytoplankton (red line) and chlorophyll-a concentration in the surface layer (◆) during the cruise K97-01.

同一の測点において60時間連続観測を実施した。レーザー励起蛍光を説明するためには、ある程度以上のクロロフィル-a濃度が必要であることが分かった^{21), 22)}。

参考文献

- 1) Mumola, P. B., O. Jarrett, Jr., and C. A. Brown, Jr.: Multi-wavelength LIDAR for remote sensing of chlorophyll-a in algae and phytoplankton, The use of lasers for hydrographic studies (1973) pp.137-145.
- 2) Browell, E. V.: Analysis of Laser Fluoresensor Systems for Remote Algae Detection and Quantification, NASA, Technical Report, TND-8447 (1977) p.39
- 3) Yentsch, C. M. and Yentsch, C. S.: Emergence of optical instrumentation for measuring biological properties, Oceanogr. Mar. Ann. Rev., 22 (1984) pp.55-98.
- 4) Bristow, M. P. F., D. Nielsen, D. Bundy, and R. Furtek: Use of water Raman emission to correct airborne laser fluorescence data for effects of water optical attenuation, Applied Optics, 20 (1981) pp.2889-2906.
- 5) Poole, L. R. and W. E. Esaias: Water Raman normalization of airborne laser fluorescence measurements: a computer mode study, Applied Optics, 21 (1982) pp.3756-3761.
- 6) Measures, R. M.: Laser Remote Sensing Fundamentals and Applications, John Wiley and Sons, Inc. (1984) p.277
- 7) 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, Edited by J. W. Campbell and J. P. Thomas (1980) pp.349-374.
- 8) 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, 22 (1983) pp.2272-2281.
- 9) Hoge, F. E., R. E. Berry, and R. N. Swift: Active passive airborne ocean color measurement, 1: Instrumentation, Applied Optics, 25 (1986) pp.39-47.
- 10) 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, 27 (1988) pp.3969-3977.
- 11) Bristow, M. P. F., D. Nielsen, and R. Furtek: A Laser-Fluoresensor Technique for Water Quality Assessment, in Proceeding of Thirteenth International Symposium on Remote Sensing of Environment (1979) pp.397-417.
- 12) Bristow, M., D. Nielsen, D. Bundy, R. Furtek, and J. Baker: Airborne Laser Fluoresensing of Surface-Water Chlorophyll-a, Ocean Remote Sensing Using Lasers, Howard R. Gordon, Editor, NOAA Technical Memorandum ERL PMEL-18 (1980) pp.97-174.
- 13) Bristow, M. P. F., D. H. Bundy, C. M. Edmonds, and P. E. Ponto: Airborne laser fluorescence survey of the Columbia and Snake rivers: simultaneous measurements of chlorophyll, dissolved organic and optical attenuation, Int. J. Remote Sensing, 6 (1985) pp.1707-1734.
- 14) Bertolini, G., P. Camagni, C. Koechler, N. Omentto, A. Pedrini, G. Rossi, and J. Verdebout: Problems related to time resolved fluorescence of an extended aquatic medium, 8th EARSEeL Symposium on Alpine and Mediterranean Areas: a challenge for Remote Sensing, Capri Italy (1988) p.15.
- 15) Hoge, F. E., R. N. Swift, and J. K. Yungel: Active passive airborne ocean color measurement, 2: Application, Applied Optics, 25 (1986) pp.48-57.
- 16) 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 in water in a Marginal Ice Zone, Remote Sensing Environment, 30 (1989) pp.67-76.
- 17) Kim, H. H.: Airborne bathymetric charting using pulse blue green lasers, Applied Optics, 16 (1977) pp.46-56.
- 18) Asanuma, I., K. Muneyama, and M. Kishino: Development of Shipboard Ocean LIDAR, Proceedings of the conference for Pacific Ocean Environments and Probing (1992) p.413
- 19) Asanuma, I., K. Muneyama, F. E. Hoge, R. E. Berry: Lidar Volumetric Signals Through Random Surface of Ocean, Ocean Optics XI, SPIE Vol.1750 (1992) pp.465-472.
- 20) Asanuma, I. and K. Muneyama: Development of Airborne Ocean Lidar, J. Adv. Mar. Tech. Conf., 6 (1992) pp.31-35.
- 21) Asanuma, I.: Diurnal Variation of Phytoplankton Detected by Ocean Lidar over the Equatorial Upwelling, The Technical Proceedings of the Second Pacific Ocean Remote Sensing Conference, Melbourne (1994) pp.231-236.
- 22) 浅沼市男, 青山道夫: 海洋レーザー観測装置による植物プランクトン観測, 海と空, 70 (1994) pp.109-121.

Block Diagram of Ocean LIDAR JAMSTEC

口絵 7 船舶搭載型海洋レーザー観測装置光学系ブロック図

Light Scattered observed by Ocean LIDAR

口絵 8 レーザー散乱光の深度分布 (November of 1992)

(口絵 7, 8 宇宙開発事業団 浅沼 市男, 海洋科学技術センター 松本 和彦, 河野 健)
(本文 154 頁参照)