

レーザ励起蛍光強度の観測について

浅沼 市男^{*1} 宗山 敬^{*1}

これまで当センターでは、緑色のパルスレーザを光源とし、レーザ光の海水中の懸濁物による散乱光及び植物プランクトン中のクロロフィル-a色素からレーザにより励起される蛍光を検出し、海水中の植物プランクトンを効率よく観測するための船舶搭載型海洋レーザ観測装置の開発を進めてきた。この船舶搭載型海洋レーザ観測装置による基礎実験を通して、海水中の植物プランクトンに含まれるクロロフィル-a色素からのレーザ励起の蛍光値と、採水した海水から求めたクロロフィル-a色素濃度について比較検討を加えた。この結果、海洋表層から観測されるレーザ励起の蛍光値と、クロロフィル-a色素との間に強い相関が認められ、植物プランクトン観測のひとつの観測手段として実用の域に達したことが認められた。

キーワード：レーザ，蛍光，散乱光，植物プランクトン，クロロフィル

Observation of Laser Excited Fluorescence

Ichio ASANUMA^{*2} Kei MUNAYAMA^{*2}

JAMSTEC has developed a ship-board ocean LIDAR which is dedicated to detect light scattered within the water and fluorescence from phytoplankton in the water. Through experiments over the ocean, boundary conditions of the water surface to reflect or pass laser pulses and light from the water is discussed. Laser excited fluorescence showed a good correlation with chlorophyll-a determined from the water sampled.

Key words : Laser, Fluorescence, Light scattering, Phytoplankton, Chlorophyll

*1 海洋研究部

*2 Ocean Research Department

1 はじめに

炭素ガスの継続的な観測から、大気温室効果の一因とされる炭素ガスは、人類による化石燃料の消費あるいは森林の伐採と焼き畑農業などの活動からの発生が重要な部分を占める。この炭酸ガスは、大気中に保存されるとともにその一部は陸上の植物、海洋中の植物プランクトン、あるいは海水そのものに取り込まれ、自然の生産活動の重要な要素となり、地球表面近傍の物質循環の一役を担っている。しかし、炭酸ガスの海洋との関わりに付いての研究は着手されたものの、広大な海洋を対象としたとき、また、海洋物理から化学・生物と研究範囲は広く、観測研究について多くの困難が待ちかまえている。この地表近傍の物質循環のうち、海洋の植物プランクトンが大気中の炭酸ガスの60から70%を取り込むとの説もあるものの、広大な海洋における植物プランクトンの現在量の把握もままならないのが現状である。研究のための観測手段は従来から展開されてきた船舶による観測が主たる観測手段であり、その時空間における同時性広域性に限界がある。これに対して、時空間における同時性広域性の観測要求を満たす手段として、人工衛星搭載の海色センサーによる植物プランクトンの観測方法がある。船舶による採水を含む植物プランクトンの種の判別、含有される色素の濃度分析など、研究の基礎となる項目を精度良く観測することが可能である。一方、人工衛星搭載の海色センサーによる観測項目及びその精度は、船舶観測に較べて十分なものではないが、船舶による観測データと組み合わせることにより、全球規模の観測研究に貢献する可能性を持つ。

これら船舶と人工衛星とによる観測時空間を補完する手段として、航空機などの地表面近くの飛翔体による観測手段が必要であるが、植物プランクトン観測のための測器の開発はいまだに未開発である。

当センターでは、広域にわたる海洋表層の植物プランクトンの迅速な観測を目的として、航空機搭載型海洋レーザ観測装置の開発のための基礎技術の蓄積を含め、船舶搭載型海洋レーザ観測装置の研究開発を進めてきた。これは、緑色のパルスレーザを海洋に向け照射し、海水中の植物プラン

クトンに含まれるクロロフィル-a色素からレーザにより励起される蛍光の強度を計測し、その色素濃度を推定する観測技術である。

これまでに製作の終了した船舶搭載型海洋レーザ観測装置により、実際に海洋上においてクロロフィル-a色素を推定するための経験式の開発を目的に、基礎実験を重ね基礎データの蓄積を進めてきた。この報告では、平成4年1月及び6月に行なった海域実験において得られたレーザ励起蛍光強度の観測結果と、採水した海水から求められたクロロフィル-a色素濃度の分析結果との比較を行う。

2 クロロフィル色素と蛍光

観測対象となる海水中の植物プランクトンには種々の色素が含まれる。各種のプランクトンに共通に含まれる色素として、Mg-異形ポルフィリン色素であるクロロフィル-aがある。このクロロフィル-aに対して補助色素と称される色素として、Mg-異形ポルフィリン色素のクロロフィル-b, -c, フィコビルン色素であるフィコエリスリン, フィコシアニン, アロフィコシアニン, カロチノイド色素であるカロチン-a, - β , キサントフィル等の色素があり、植物プランクトンの種により含有の組み合わせが異なる。植物プランクトンの中において、クロロフィル-aを中心にこれらの補助色素と共に光合成が行われる。補助色素は外部からの光を吸収し高い効率でクロロフィル-aへエネルギーを伝達し、またクロロフィル-a自身も外部からの光を吸収し、それらのエネルギーを光化学反応中心である特別な存在状態のクロロフィル-aへ送り、光合成が行われると考えられている。このとき、クロロフィル-aから外部に対して蛍光が発せられる。

植物プランクトン中の光合成に関するこれらの色素の吸光分光波長特性は異なり、可視波長帯域に広く分布する。また、クロロフィル-aへのエネルギー伝達経路は色素により異なる。

この他に海水中には、クロロフィル-aからMgをとった形のフェオフィチン-a色素が存在し、外部からの光に応答し蛍光を発する。フェオフィチン-aを含むフェオ色素は、植物プランクトンが動物プランクトンにより捕食・消化・排出され

たもの、あるいは植物プランクトン自体の劣化したものと考えられている。蛍光を発生するフェオフィチン-aの吸光分光波長特性は、クロロフィル-aと類似するが短波長側にずれ、クロロフィル-aと同じ波長の励起光を照射したときの蛍光励起効率は劣る。

3 植物プランクトンとレーザー光

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。

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測器は、ハロゲンランプ、キセノンランプなどを光源とし、430nmの光を透過するフィルターを組み合わせ、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。

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、次のような特徴が考えられる。

- ① 単一波長の光を照射できる。
- ② 光が拡散せず、離れた場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。

現在利用可能あるいは開発中の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1024nmの光を発振し、KDP結晶を通し532nm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532nm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、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。Hogeら(1980)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及び散乱光観測の海洋レーザー観測装置を開発した。

色素レーザーは、窒素ガスレーザーの紫外線や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430nmのレーザー光により蛍光を励起することが可能である。このレーザー装置の問題点として、発振エネルギー量が小さく、また、色素の媒体として有機溶剤を用いるため、リモートセンサーの光源としては運用がむずかしい点があげられる。Bristow(1980)らは、フラッシュランプ励起の色素レーザー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。

半導体レーザーに関しては、緑色から青色の短波長側のレーザー光の発振が可能となってきたが、発振エネルギー量が小さく、リモートセンサーの光源としてはまだ不適である。また、半導体励起のNd・YAGレーザーの開発が進められており、装置の小型化、出力強度の増加・長寿命化などの点で期待がかかり、キセノンランプ励起のこれまでのNd・YAGレーザーにとって変わる可能性を持つが、半導体の冷却機構の開発など普及化までさらに時間がかかると考えられる。

われわれは、HogeらがNd・YAGレーザーを光源として使用していること、Nd・YAGレーザーの高出力、安定性、操作性、可搬性などに着目し、Nd・YAGレーザーの第2高調波である532nmの植物プランクトンからの蛍光励起のための有効性を確認することを目的に実験を行った(中川ら, 1990)。この実験では、窒素色素レーザーを光源とし、400nmから550nmまでのレーザー波長を発振させ、海水から植物プランクトンをフィルターにより濾過し、そのアセトン溶液について蛍光強度を計測した。この結果、実際の海水について、430nm近辺のレーザー波長について蛍光励起のピークが見られるとともに、500nmから550nmの長波長側のレーザー波長においても蛍光が励起され、430nm近辺の波長と同程度の強度の蛍光が励起されることを確認した。この実験結果をもとに、Nd・YAGレーザーの第2

高調波である532nmを、海水中の植物プランクトンの色素からの蛍光励起のための光源とした。

4 海洋レーザ観測装置

平成2年度から平成3年度にかけて、船舶搭載型の海洋レーザ観測装置を製作した。平成2年度の製作後、実海域における性能試験を行い、その結果を踏まえ、平成3年度に光学系の追加及び信号処理系の改良を行った。

図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み合わせ、1064nmの基本波と532nmの第2高調波を独立に送信光学系へ送る配置とした。

1064nmのレーザ光は、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。1064nm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150mm径の望遠鏡、波長を選択するための金属干渉フィルター、入射強度を調整するためのNDフィルター、光を検出し電気信号へ変換するための光電子倍增管から構成される。

532nmのレーザ光は、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250mm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

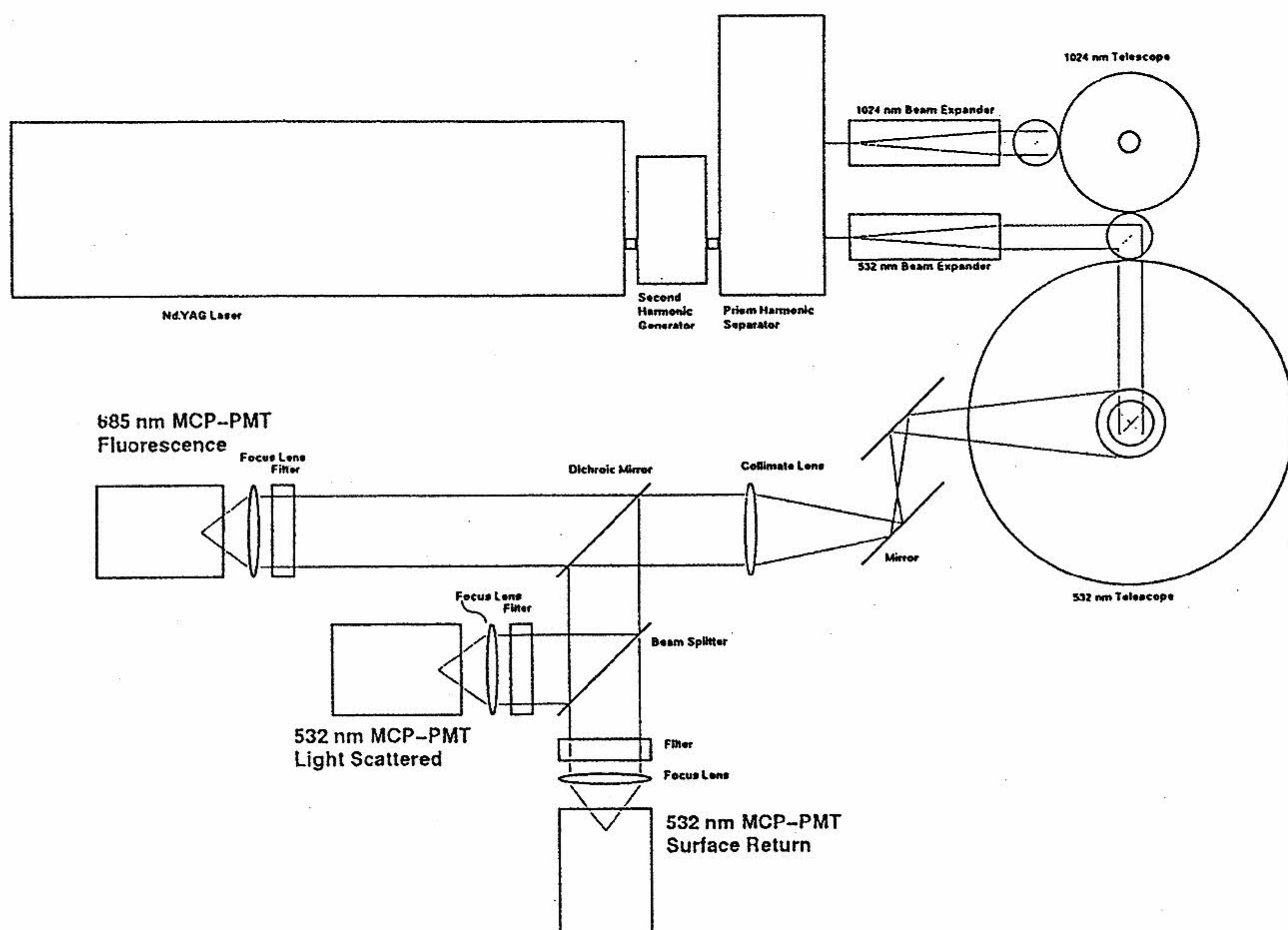


図1 海洋レーザ観測装置の光学系構成図

Fig. 1 Block diagram of optics of shipboard ocean LIDAR

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ー、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倍增管(MCP)から構成される。ゲート付きMCPはマイクロチャネルと称される距離の短い電子の増幅のための素子を有し、従来の光電子倍增管に比べて高速の応答性を示す光電子倍增管である。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うえ、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ド・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、アドバンスド・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、アドバンスド・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。このアドバンスド・トリガーの信号を基準とし、1064nm及び532nmの海面反射光、散乱光、蛍光のそれぞ

れの光電子倍增管のゲートの開閉を行った。

本装置では、深度方向の散乱光及び蛍光を計測するため、また深度方向での散乱光並びに蛍光の指数関数的減少に対応し光電子倍增管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光電子倍增管のゲート開放のタイミングを変化させ、光電子倍增管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50mまで、また蛍光については15mから20mまでの計測が可能となった。

5 境界層である海面形状の問題

この船舶搭載型海洋レーザ観測装置の製作に先立つ基礎実験を通して、海面反射光の強度が計測の都度大きく変化し、海中への入射光の強度、海中からの散乱光及び蛍光の強度変化が海面形状に依存することが考えられたため、これらの変数を同時に計測してその関連を評価することをひとつの目的として、この装置を製作した。

Kim (1977) 及びBrowell (1977) のレーザ方程式をもとに、多層からの散乱光並びに蛍光を記述するためのレーザ方程式を次のようにおく。

$$P_s(z) = \frac{P_1 (1 - \rho_1)^2 \exp \{-2(c_{a1}H)\} \exp \{-2 \int c_1(z) dz\} b_1(z) \Delta_z \xi A_r}{2\pi (Z + m_1 H)^2} \dots\dots\dots (1)$$

$$P_f(z) = \frac{P_1 (1 - \rho_1) (1 - \rho_f) \exp \{-(c_{a1} + c_{af})H\} \exp [- \int \{c_1(z) + c_f(z)\} dz] b_f(z) \Delta_z \xi A_r}{2\pi (Z + m_f H)^2} \dots\dots\dots (2)$$

ここで

- $P_s(z)$ は深度 z からの散乱光の強度 (w)
- $P_f(z)$ は深度 z からの蛍光の強度 (w)
- P_1 はレーザ波長 1 におけるレーザの出力強度 (w)
- ρ_1 はレーザ波長 1 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
- c_{a1} はレーザ波長 1 における大気の消散係数 (m^{-1})
- c_{af} は蛍光波長 f における大気の消散係数 (m^{-1})

- H はレーザ観測装置から海面までの距離 (m)
- $c_1(z)$ はレーザ波長 1, 深度 z における海水の消散係数 (m^{-1})
- $c_f(z)$ は蛍光波長 f , 深度 z における海水の消散係数 (m^{-1})
- $b_1(z)$ はレーザ波長 1, 深度 z における海水の後方散乱係数 (m^{-1})
- $b_f(z)$ は蛍光波長 f , 深度 z における海水の後方散乱係数 (m^{-1})
- Δ_z 散乱光発生に寄与する単位応答深度

(m)

ξ はシステムの応答効率

A_r は受光器の受光面積 (m^2)

m_1 はレーザ波長 1 における海水の屈折率

m_f はレーザ波長 f における海水の屈折率である。

このレーザ方程式と実際の計測を考慮すると、海面からの反射光、海中からの散乱光、蛍光信号の強度変化は、同じ特性の海水を対象とする同じ条件での連続した計測の場合、海面の反射率の変化がこの強度変化をもたらすと考えられる。すなわち、海面からの反射光、海中からの散乱光、蛍光を同時に計測した場合、海中からの散乱光及び蛍光は、海面からの反射光の関数として何らかの関係を示すことが期待される。

この装置を用いた海域実験により得られたデータについて、海面反射光と海中からの散乱光及び蛍光との関係について検討した。図2.1に海面反射光と散乱光との関係、図2.2に海面反射と蛍光との関係をプロットした図を示す。図2.1におい

て、X軸に海面反射光の強度をとり、Y軸に散乱光の強度をとり、図2.2において、Y軸に蛍光の強度をとった。これらの図のプロットは、24時間にわたり20分おきに計測したデータについて両者の関係を求めたものであり、船舶の移動も含まれるが、外洋の海水の均質な海域についてのデータである。また、これらのデータは、レーザパルスが完全に海面下に入ったときのゲートのタイミングにおいて得られたデータである。これらの図から、海面反射光の強度変化が30mWから70,000mWまで変動している様子が分かる。これに対して散乱光は4mWから100mWまでの変動、蛍光は0.015mWから0.04mWまでの変動を示し、海面反射光の4桁にわたる変動に比べて2桁以下の小さい変動である。また、これらの海面反射光、散乱光及び蛍光の強度に対するヒストグラムを図3に示す。図3.1の海面反射光のヒストグラムによると、100mW付近に極大を持つ分布になっているが、4桁に及ぶ強度分布が存在する。これに対して、図3.2の散乱は70mW付近にピークを持ち2桁以内の強度分布を示した。また、図3.3の蛍光は0.008mW

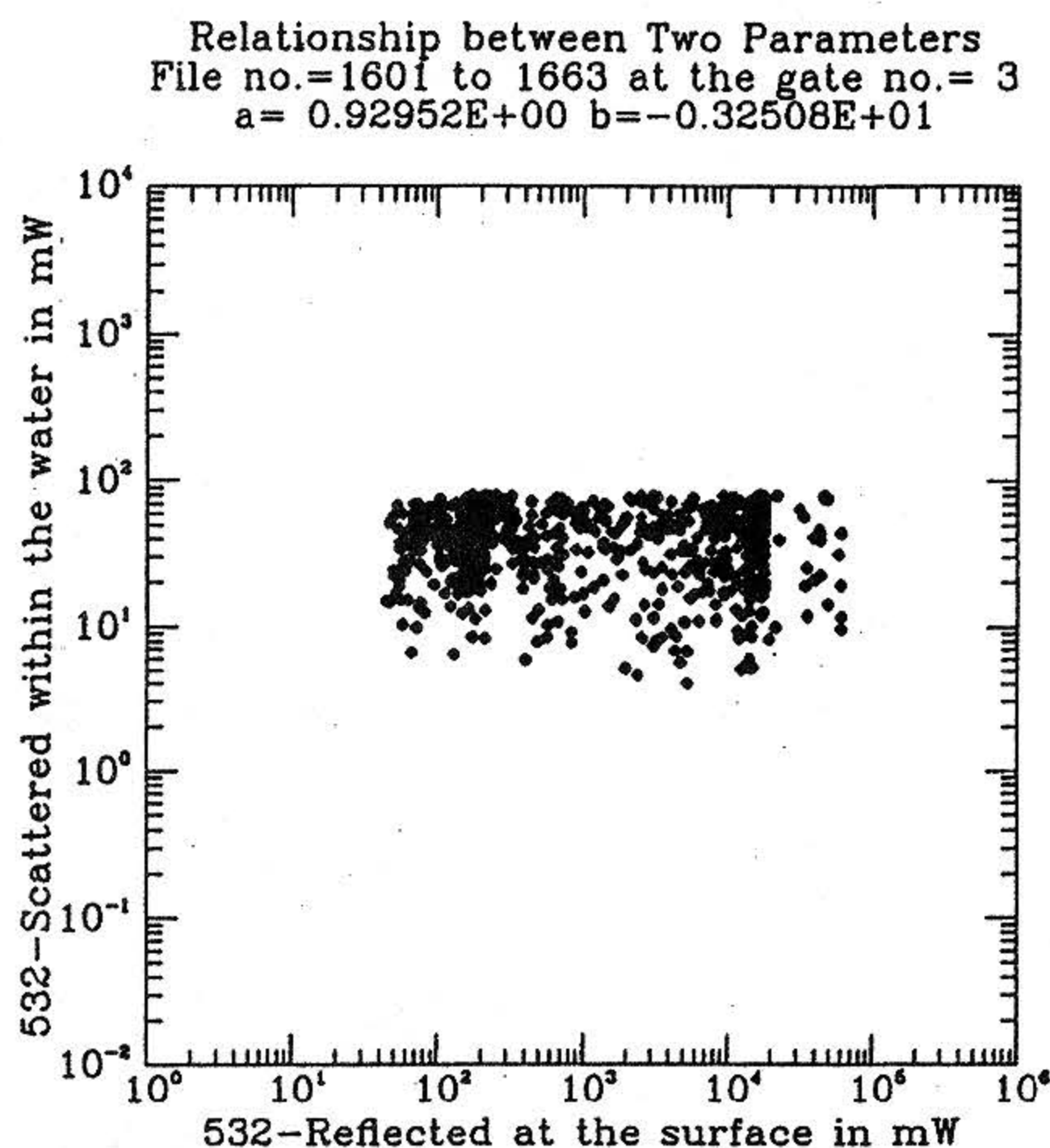


図2.1 海面反射光と海中からの散乱光の関係
Fig. 2.1 Relationship between light reflected at the surface of the water and light scattered from the water at 532nm

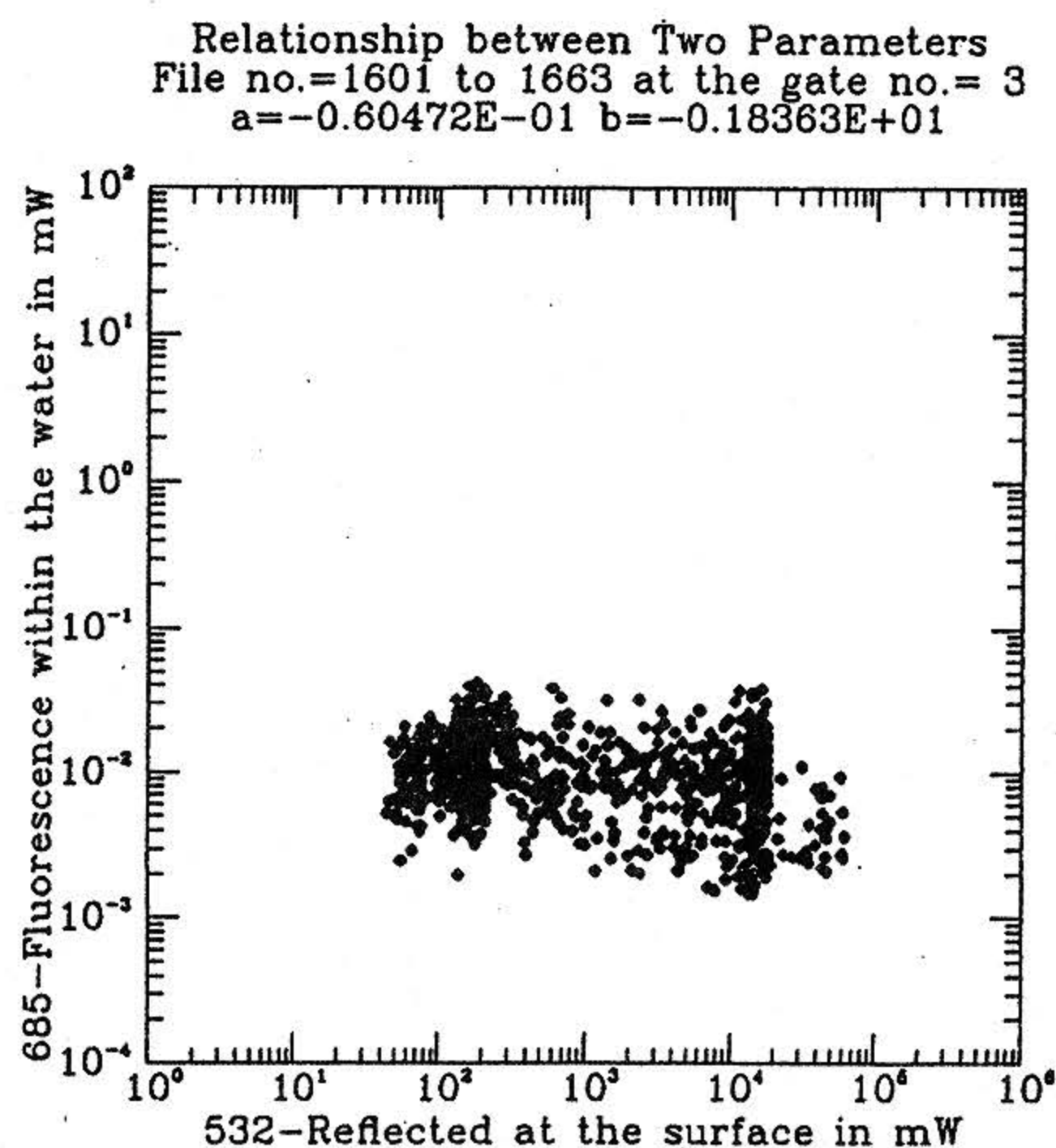
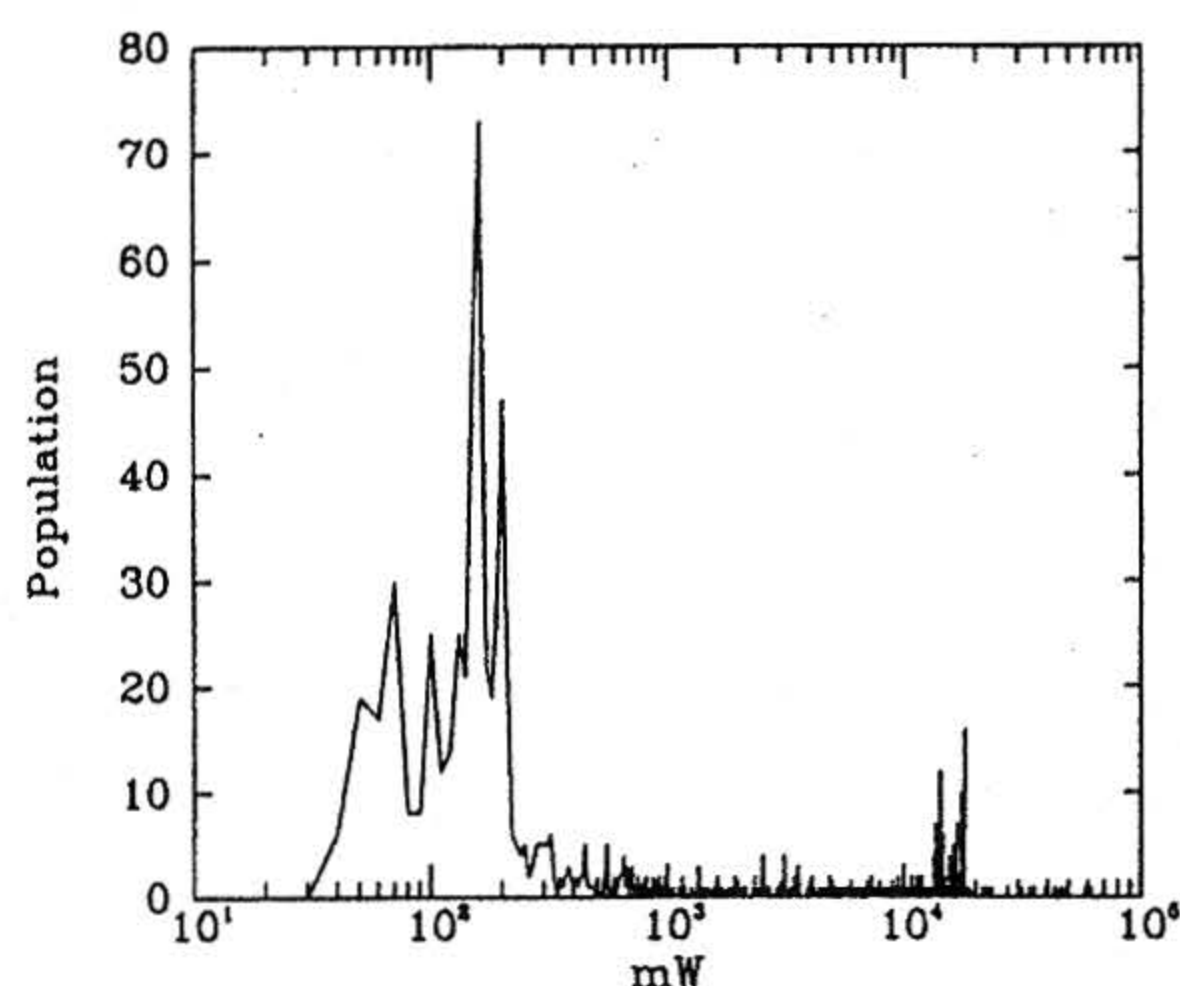


図2.2 海面反射光と海中からの蛍光との関係
Fig. 2.2 Relationship between light reflected at the surface of the water at 532nm and fluorescence from the water at

Histogram of Light Reflected at the Surface at 532 nm
OCL data set from 1601 to 1663 at gate no. 3

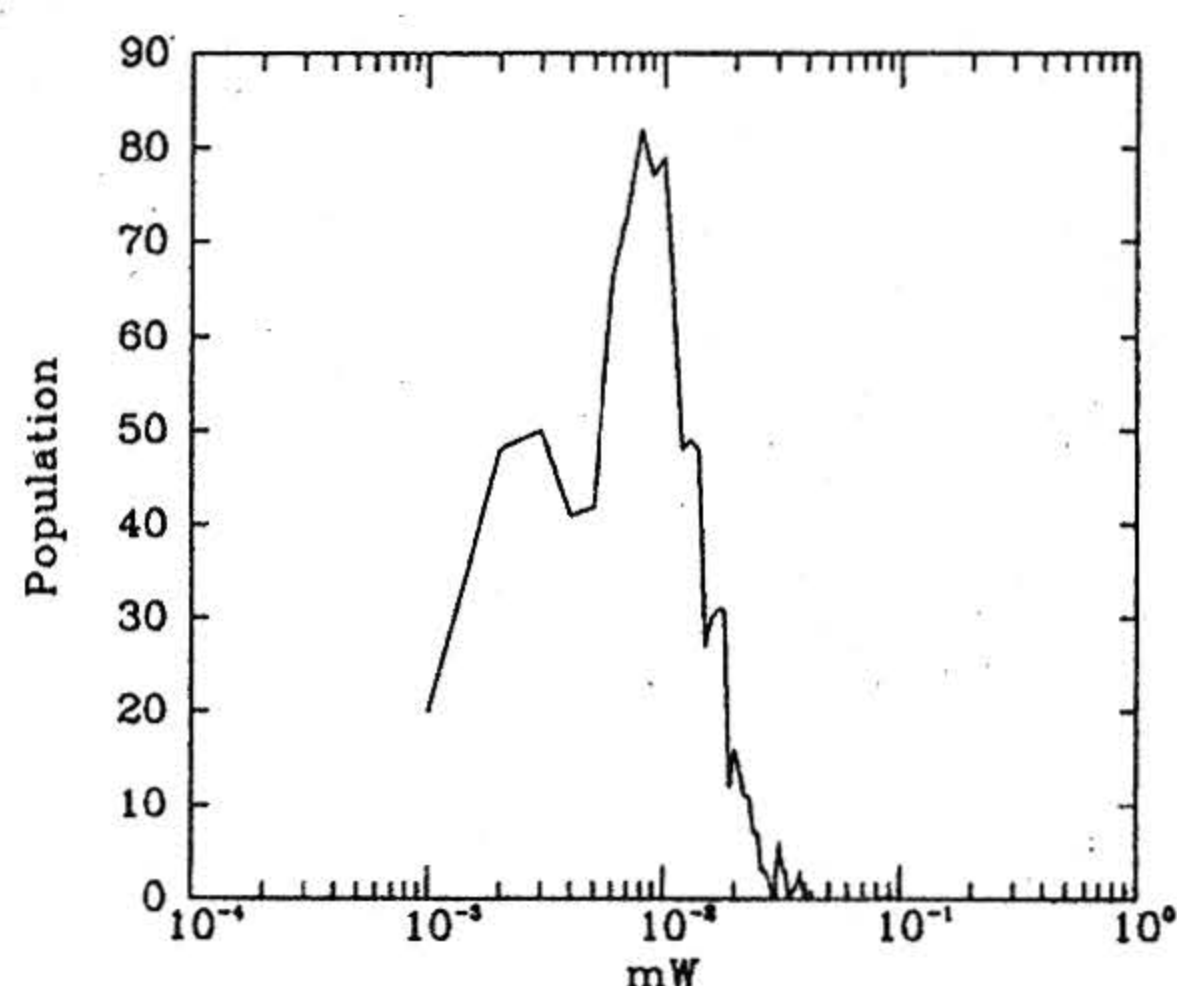


Light Reflected at the Surface at 532 nm

図 3.1 海面反射光のヒストグラム

Fig. 3.1 Histogram of light reflected at the surface of the water at 532 nm

Histogram of Fluorescence in the Water at 685 nm
OCL data set from 1601 to 1663 at gate no. 3

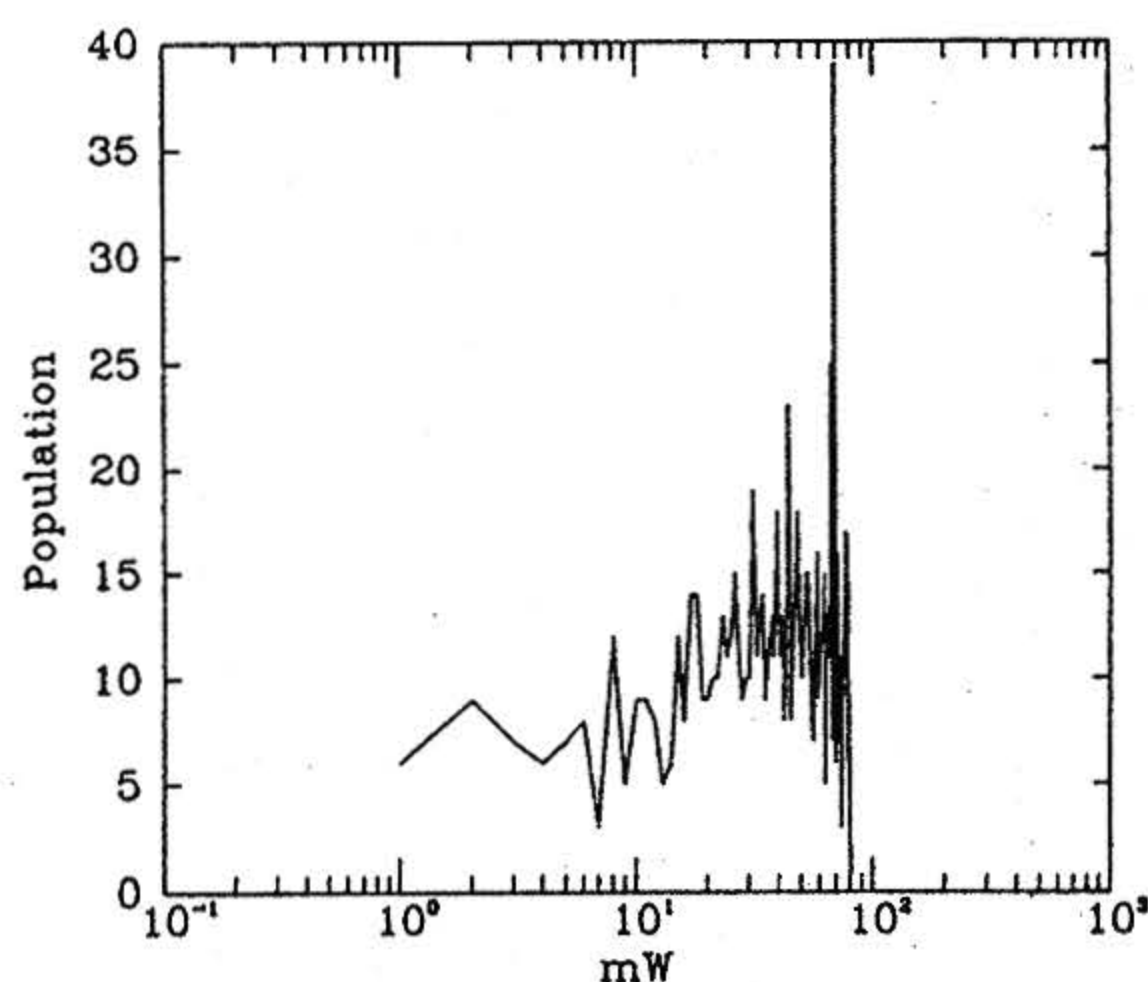


Fluorescence in the water at 685 nm

図 3.3 海中からの蛍光のヒストグラム

Fig. 3.3 Histogram of fluorescence within the water at 685 nm

Histogram of Light Scattered in the Water at 532 nm
OCL data set from 1601 to 1663 at gate no. 3



Light Scattered in the Water at 532 nm

図 3.2 海中からの散乱光のヒストグラム

Fig. 3.2 Histogram of light scattered within the water at 532 nm

付近にピークを持ち 2 桁以内の強度分布を示した。このような関係が、一連の計測において海水の質の変化が認められないデータについて、常に観察された。

海面反射光の強度変動に対する散乱光及び蛍光の強度変動を説明しようとしたとき、海面反射光の強度変動が余りにも大きすぎ、 $(1 - \rho)^2$ の変

数により説明することが困難である。そして、海面反射光の強度変動は統計的に有効な分布関数を持ちながら 4 桁に及ぶ変動を示すのに対して、散乱光並びに蛍光の強度変動は 2 桁以内の統計的に有効な分布関数を示すことから、海面反射光の強度変動に関わらず一定の散乱と蛍光強度を示すと考えることができる。

実際の海洋は $(1 - \rho)^2$ の物理則が適用される平面を示すことが無いものの、この物理則に類似した海面反射に対する何等かの規則性を見いだせないのは、海洋レーザ観測装置の光学系の限界によると考えられる。すなわち、海洋レーザ観測装置の受光望遠鏡は、海面から約 9 m の距離に位置し、その口径は 250 mm であり、レーザビームの海面における反射光のすべてを捉えることが困難であるため、不規則な海面に対して規則性を見いだすことができないと考えられる。

この結果、(1) 及び (2) 式のレーザ方程式から、 $(1 - \rho_1)^2$ 並びに $(1 - \rho_1)(1 - \rho_2)$ の項が定数として与えられ、レーザ方程式の簡略化が図られることが判明した。また、散乱光及び蛍光は統計的に有効な分布関数を示すことから、複数回の計測を繰り返すことによる空間分解能の低下が避けられないが、計測値の平均化処理を施すことにより安定な代表的計測値が与えられるこ

とが判明した。

このレーザ方程式については、深度方向のプロファイルを求めるための検討を加える予定である。

6 蛍光値と採水データ

海洋レーザ観測装置の製作終了を待ち、平成4年1月にパラオから赤道を経て、東経147度線に沿って横須賀まで北上する航路において、また、平成4年6月に横須賀から東シナ海を経てパラオにいたる航路において、本装置の検証のための海域実験を実施した。

海域実験では、レーザ照射計測を持続するとともに、間欠的に海水を採水し海水中の植物プランクトンに含まれるクロロフィル-a量を求めた。図4に平成4年1月の計測結果を、図5に平成4年6月の計測結果を示す。横軸にレーザ計測の測点番号をとり、縦軸にレーザ励起の蛍光強度（折れ線）について相対強度を、採水した海水から求めた植物プランクトン中のクロロフィル-a濃度（○印）について単位容積当たりの重量を示した。レーザ励起の植物プランクトンからの蛍光値については、各測点毎の平均化処理を施し計測値を求めた上で、採水によるクロロフィル-a量との残差が最小になるように係数掛けを行い折れ線とした。図5については、図4において得られた係数をレーザ励起の植物プランクトンからの蛍光値に掛け合わせた。植物プランクトン中のクロロフィル-a濃度については、1月の実験では吸光法によりクロロフィル-a, -b, -c及びカロチノイド色素濃度を求めた。6月の実験では植物プランクトン濃度の低い外洋における計測の信頼性を向上させるため、蛍光法によりクロロフィル-a濃度を合わせて求めた。また、図4及び5に、「かいよう」の船底に搭載されたADCP（音響ドップラ流向流速計）による表層20mの流向流速のプロットを示し、計測海域の概況判読に利用した。

6.1 平成4年1月の赤道直下

図4のレーザ励起の蛍光強度を見ると、パラオから東経130度までの西北西向きの北赤道海流において、また東経130度に沿って南下する航路上の東向きの北赤道反流においては、レーザ励起の植物プランクトンからの蛍光値によるクロロフィル-a量は $0.2\text{mg}/\text{m}^3$ を示した。この航路上の採水

によるクロロフィル-a量は $0.2\text{mg}/\text{m}^3$ 以下となった。その後、赤道上を東経147度まで至る海域において、レーザ励起の蛍光値から推定されるクロロフィル-a濃度は $0.2\text{mg}/\text{m}^3$ を越える観測値が計測された。また採水によるクロロフィル-a濃度は $0.8\text{mg}/\text{m}^3$ を示した。東経147度から北上し八丈島付近に至る航路においては、レーザ励起の蛍光値からクロロフィル-a量は小さな値を示し、採水によるクロロフィル-a量も同時に小さな値を示した。その後、伊豆諸島と黒潮との干渉する海域において大きなクロロフィル-a量が観察された。これらのレーザ励起の蛍光値と採水から求めたクロロフィル-a量との関係を図6.1に示すが、ばらつきが多いものの、その観測値の間の相関係数は0.09であり、非常に強い相関が認められた。

クロロフィル-a量と海域との関係を分かりやすくするため、図7にレーザ励起の蛍光値から推定されるクロロフィル-a量を同心円を用いて表した。クロロフィル-aの濃度の高い赤道直下の海域はニューギニアの北部に位置し、通常であると北西向きのニューギニア沿岸流の存在する海域である。この年の冬期の赤道直下の海域はエルニーニョ時の温度配置となり、同時に計測したADCPによっても、平年と異なり東南東向きの3ノット以上の強い流れが観測された。このクロロフィル-a量は東経138度付近ににおいて若干低くなり、さらに高くなった後、再度東経142度付近において低くなり、145度付近で高くなる振動を示した。

表面のバケツ採水温度を見ると、測点3から6までそれぞれ 28.1°C , 28.1°C , 28.5°C , 28.6°C と徐々に温度が高くなっている。また、採水海水のオートサルによる塩分濃度を見ると、測点3から6まで 34.645PSU , 34.779PSU , 34.679PSU , 34.560PSU と変化し、東経138度近辺において高い塩分濃度を示した。温度分布と流向流速分布からみると、ニューギニア北東において、沿岸湧昇的な海水の分布を示し、東方への暖水の移動が考えられる。

この航路上の採水した海水中の植物プランクトンの種の同定結果と比較すると、測点3, 4及び5において、ハプト藻綱のCoccolithophoridsが最も多く、それぞれ8960, 12800, 19840細胞数/ ℓ と大きい値を示した。また、測点3及び4では、

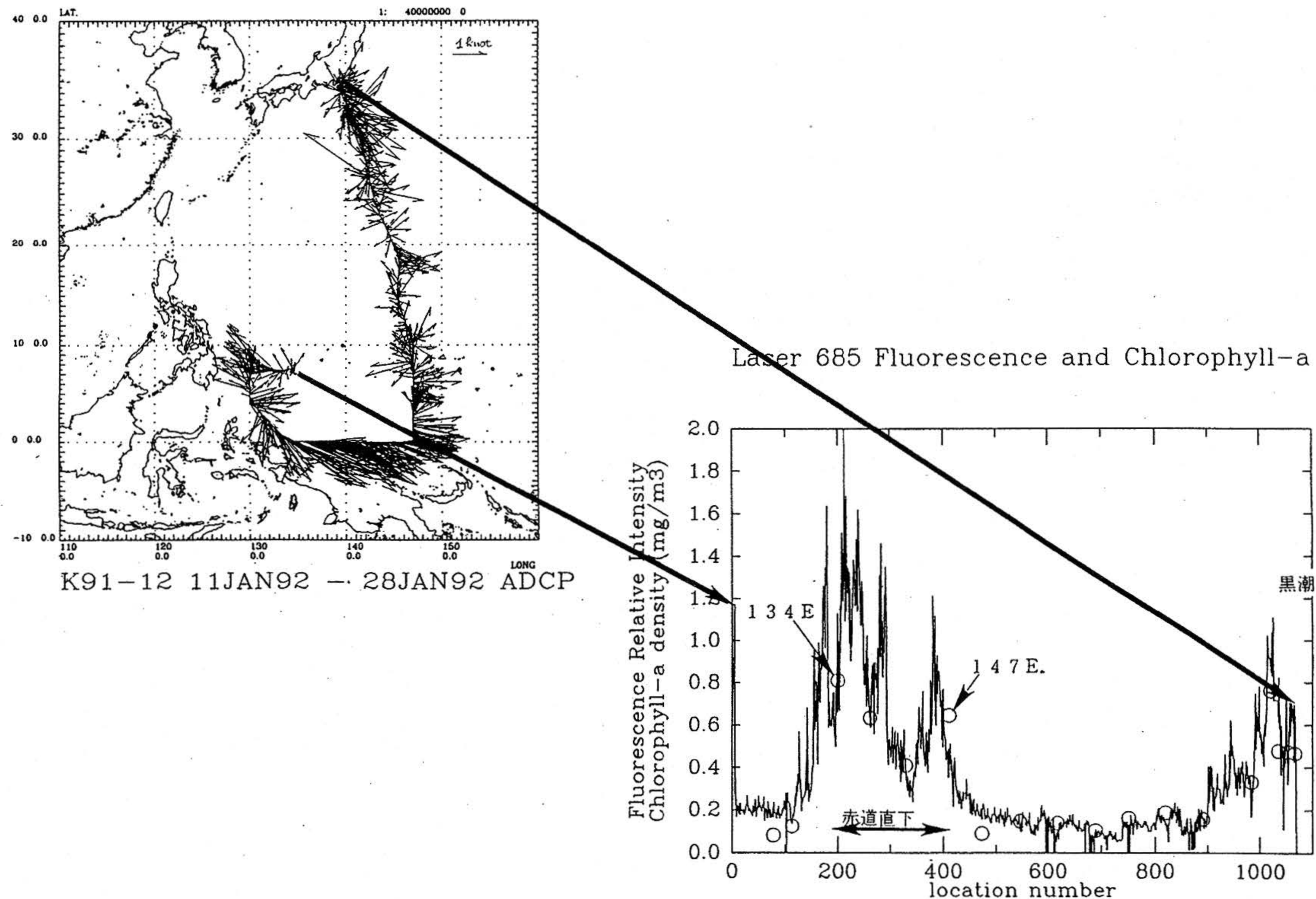
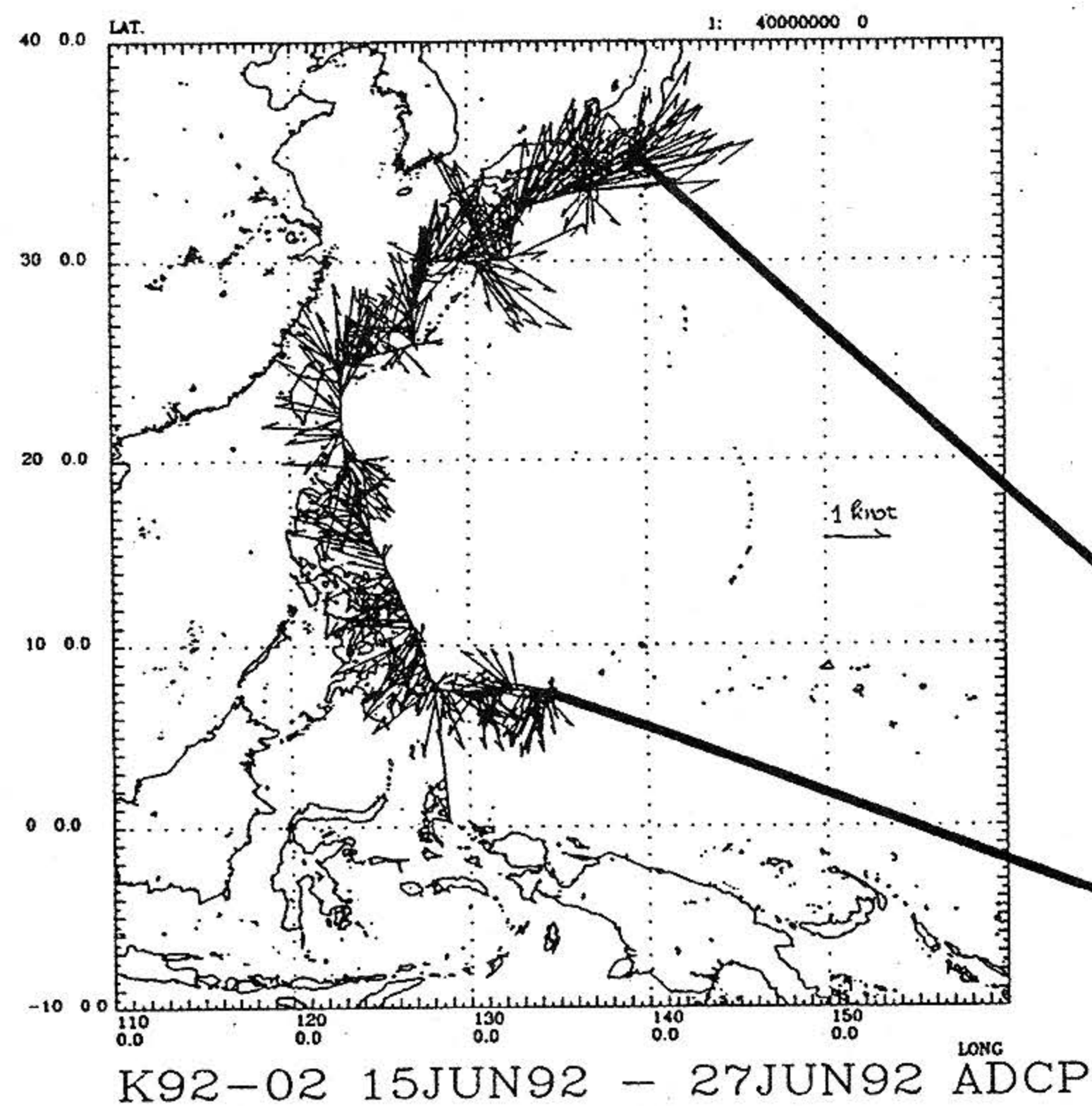


図4 平成4年1月海域実験において得られたレーザ励起の蛍光強度, 採水分析から求められたクロロフィル-a濃度及びADCPによる流向・流速

Fig. 4 Laser excited fluorescence, chlorophyll-a concentration determined from the water sample, and current vectors by ADCP from the experiment conducted in January 1992



Laser 685 Fluorescence and Chlorophyll-a

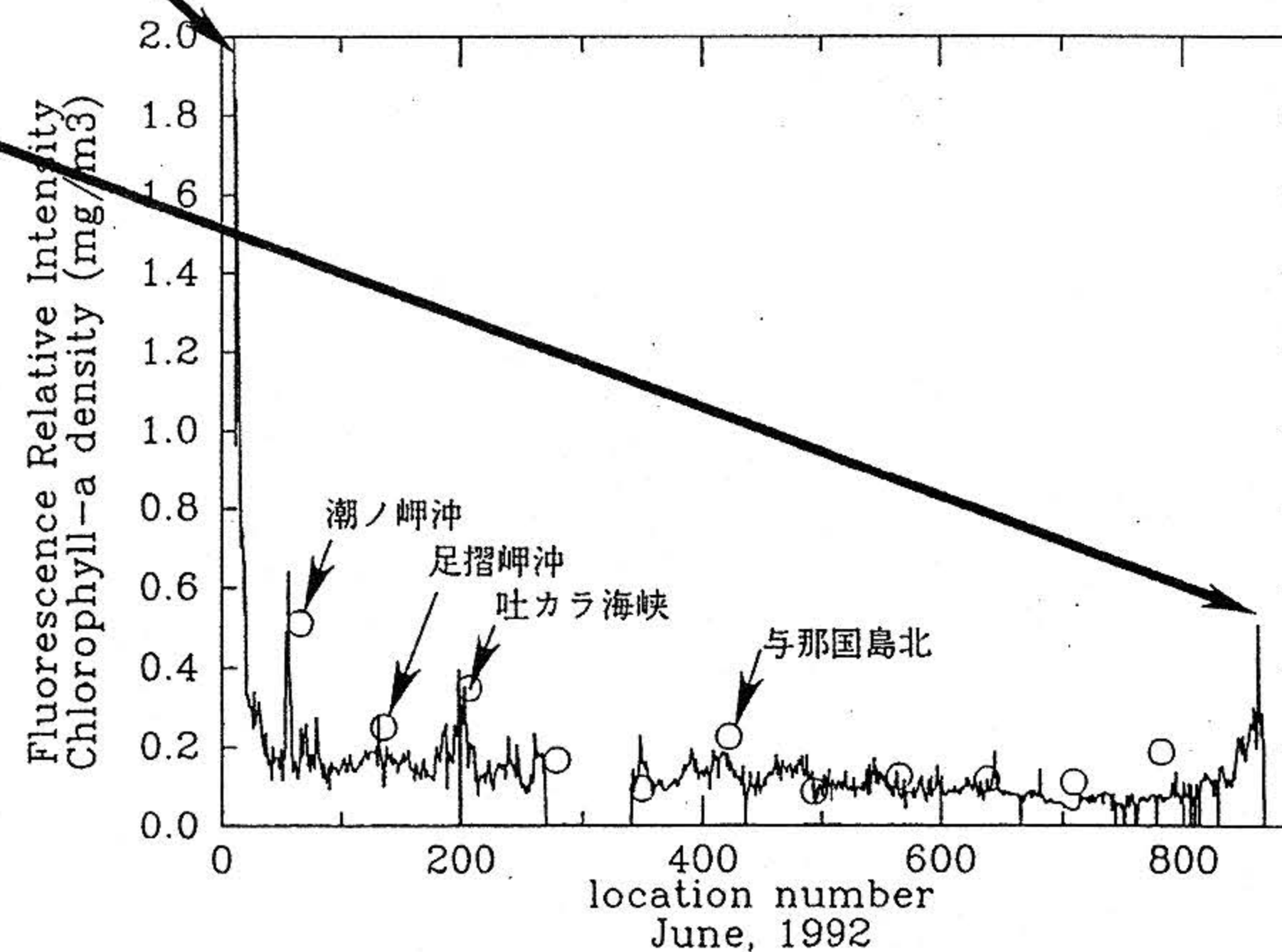


図5 平成4年6月海域実験において得られたレーザ励起の蛍光強度、採水分析から求められたクロロフィル-a濃度及びADCPによる流向・流速

Fig. 5 Laser excited fluorescence, chlorophyll-a concentration determined from the water

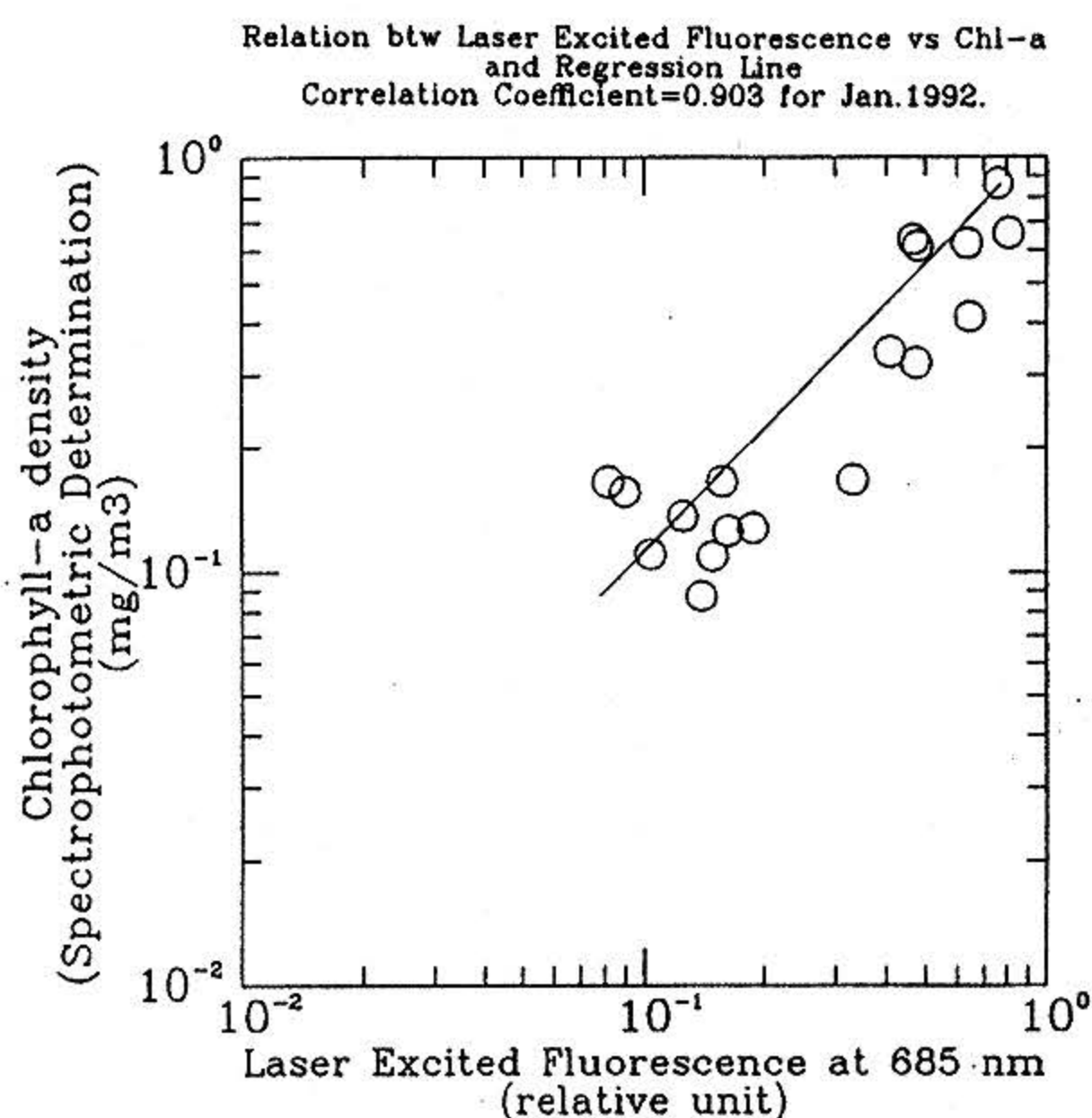


図 6.1 レーザ励起の蛍光と採水分析から求められたクロロフィル-a濃度との関係
(平成4年1月海域実験)

Fig. 6.1 Relationship between laser excited fluorescence and density of chlorophyll-a concentration determined from the water sampled (January 1992)

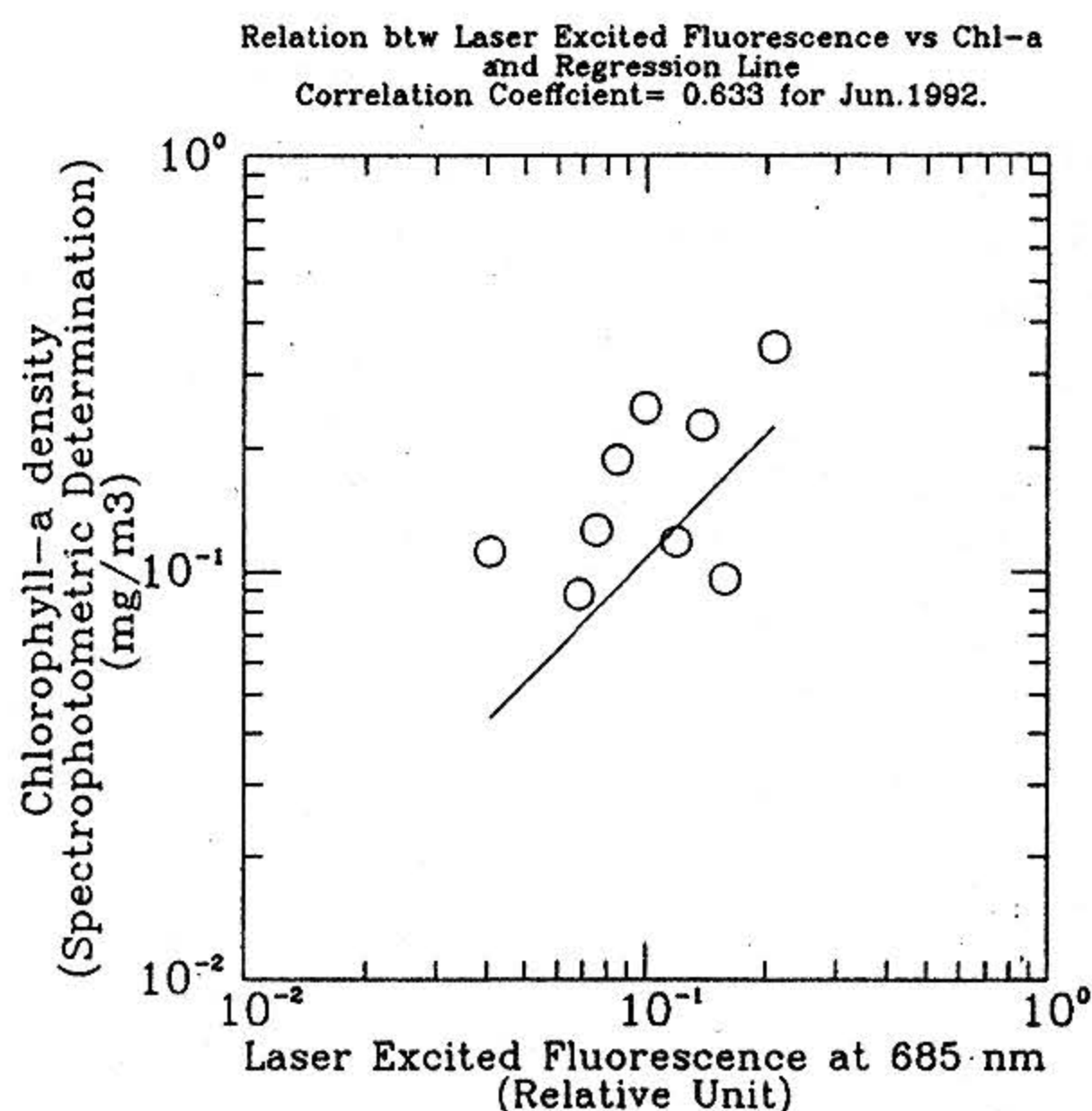


図 6.2 レーザ励起の蛍光と採水分析から求められたクロロフィル-a濃度との関係
(平成4年6月海域実験)

Fig. 6.2 Relationship between laser excited fluorescence and density of chlorophyll-a concentration determined from the water sampled (June 1992)

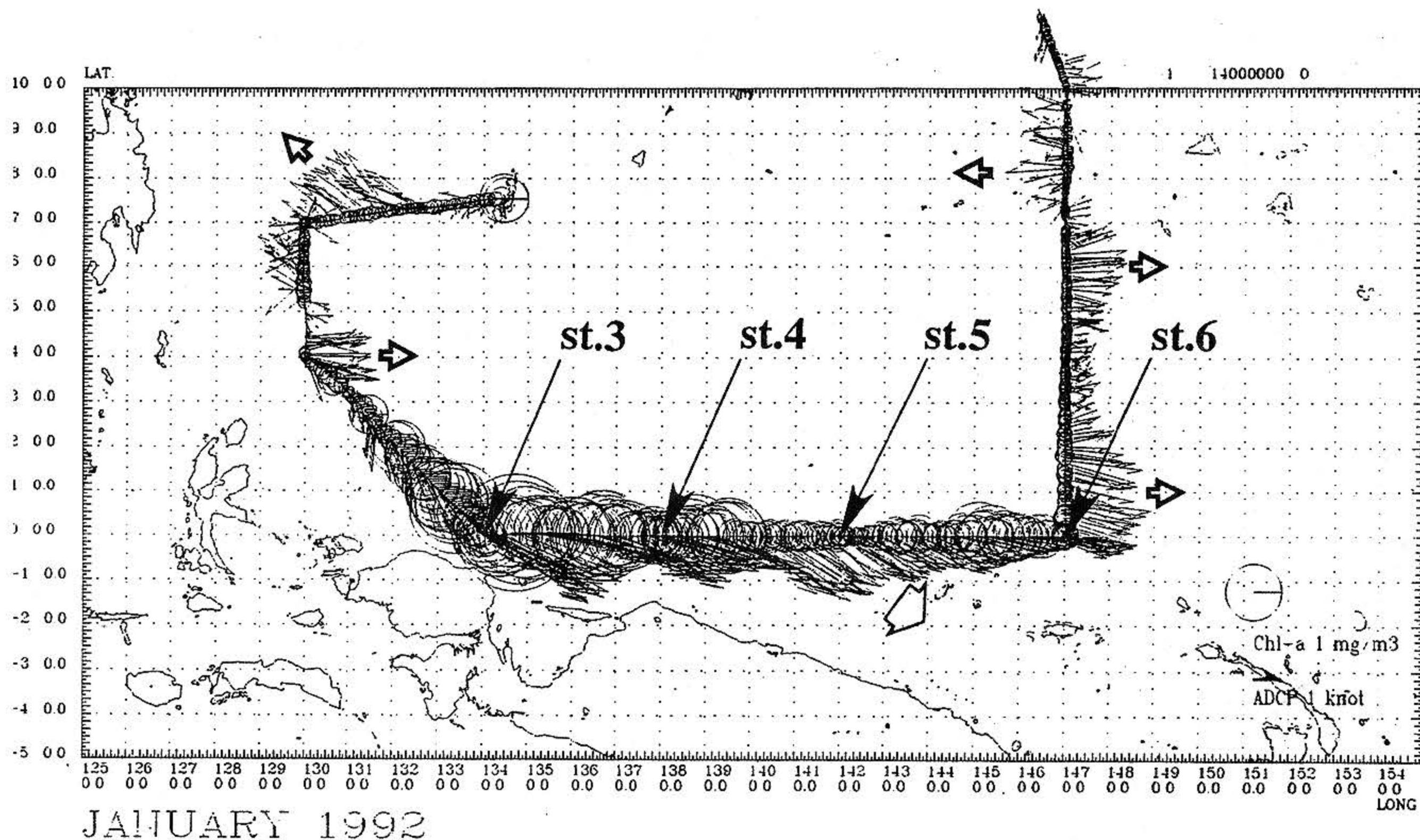


図 7 レーザ励起の蛍光から推定されるクロロフィル-a濃度(同心円)とADCPによる流向・流速(ベクトル)
Fig. 7 Chlorophyll-a concentration estimated from fluorescence excited by laser (circle) and current vector by ADCP (vector)

珪藻綱の *Leptocylindrus mediterraneus*, *Rhizosolenia alata* などが出現したのに対して、測点5において出現した珪藻綱は *Nitzschia spp.* のみであった。測点6では、ハプト藻綱及び珪藻綱の細胞数が激減し、代わって藍藻綱の *Trichodesmium sp.* が39680細胞数/ℓの大きな値を示した。これらのことから、赤道直下のこの海域において、生産性の高くなる条件が整っているものの、条件の変化している様子が伺われる。また、東経147度の赤道上では、栄養塩分・海水温度などの藍藻の繁殖する環境が整い、非常に生産性の高い海域であったと考えられる。

これらの植物プランクトンの種の同定結果とレーザ励起の蛍光値とを直接関連付けることは困難であるが、生産性の高い海域の検出が可能であり、他の観測項目と組み合わせることにより基礎生産性の判断材料に利用可能である。

6.2 平成4年6月

図5の平成4年6月の計測結果のレーザ励起の蛍光値から推定されるクロロフィル-a量をみると、潮岬沖、足摺岬沖、吐カラ海峡沖など黒潮との境界付近においてクロロフィル-a量が高く観測され、採水によるクロロフィル-a量も高く観測された。東シナ海において一部欠測があり、十分なデータではないが、ブルーミングのような植物プランクトンの増殖海域は含まれなかった。このレーザ励起の植物プランクトンからの蛍光値と、採水によるクロロフィル-a量との相関は低く0.63となり、図6-2に示すようにばらつきも多かった。これは、海域のクロロフィル-a濃度が全体に低く、採水によるクロロフィル-a量とレーザ励起の蛍光値ともに精度が上がらなかったと考えられる。

図8にレーザ励起の蛍光から推定されるクロロフィル-a濃度の同心円によるプロットと、ADCP

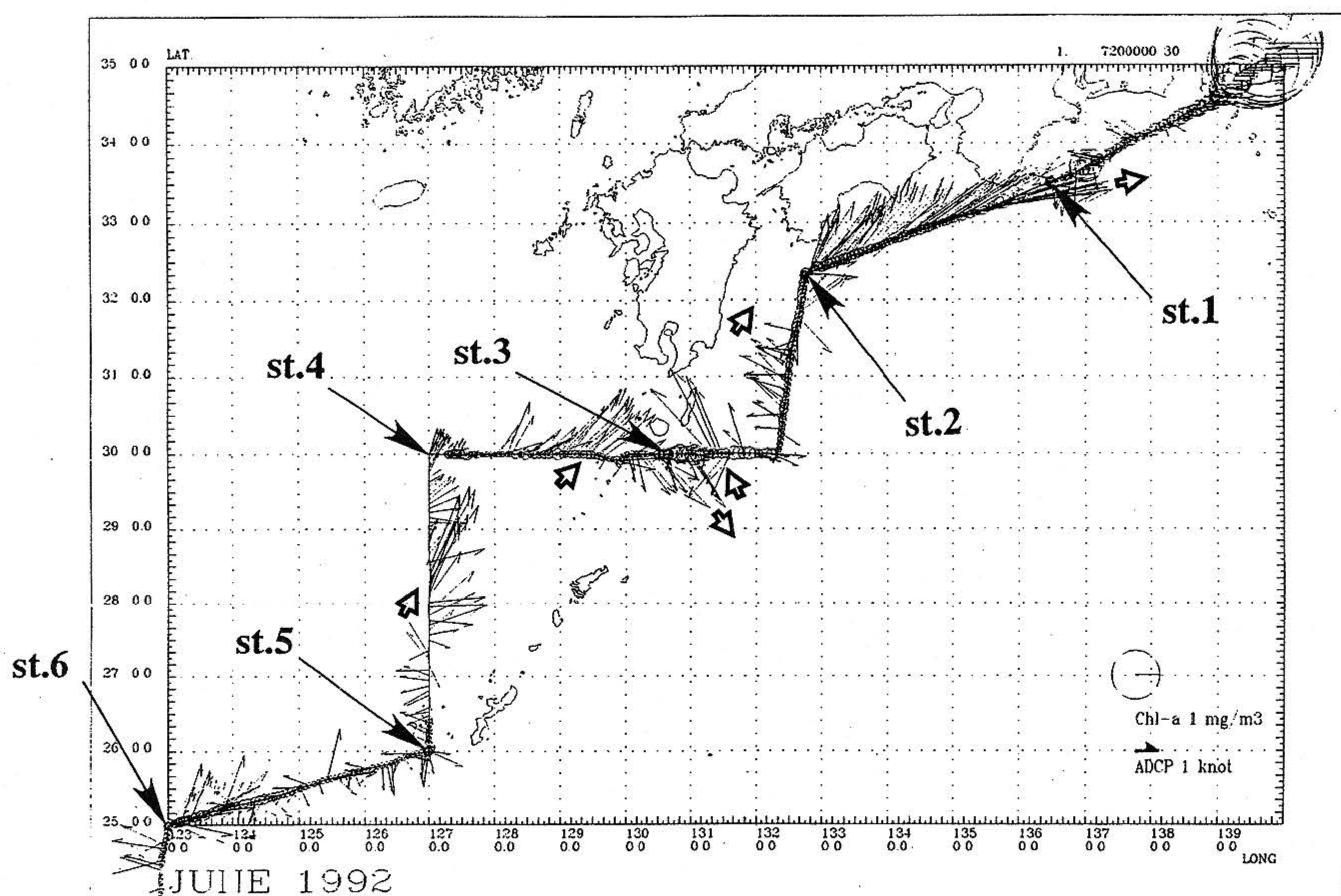


図8 レーザ励起の蛍光から推定されるクロロフィル-a濃度(同心円)とADCPによる流向・流速(ベクトル)

Fig. 8 Chlorophyll-a concentration estimated from fluorescence excited by laser (circle) and current vector by ADCP (vector)

による流向流速のベクトルのプロット図を示す。この図によると、東シナ海を北東に北上し、屋久島南方を南東に南下する黒潮が鮮明に表れている。さらに、九州東岸に沿った黒潮が四国南方において検出され、潮岬沖において東方へ進行する黒潮が判読可能である。これに対して、クロロフィル-a濃度の変化をみると、全体に低い濃度が観測されたが、相模湾において 3 mg/m^3 程度の高い濃度が検出された。潮岬東方の沖合いにおいて、黒潮の内側に存在する冷水帯に伴うものと推定されるが、若干、クロロフィル-a濃度の高い海域が存在した。屋久島南東の海域におけるクロロフィル-a濃度の高い海域は、黒潮帯の東側と屋久島とによる湧昇に伴う生産性の高い海域と考えられる。また、北緯30度、東経129度から東経128度において観察されるクロロフィル-a濃度の高い点は、黒潮と東シナ海の海水との混合に伴うものと推定され、点在している様子が伺われる。残念ながら、東シナ海においてレーザデータが欠測しており、黒潮との関連性を読み取ることが困難であった。

バケツ採水による海面温度を見ると、測点1では 23.3°C と低く、その東北東の冷水帯の存在が推定される。測点2からは温度が高くなり 25.5°C 、測点3において 26.2°C となり、黒潮の本流である。測点4では 23.5°C と低くなり、東シナ海の海水と考えられる。さらに、測点6は 28.0°C 、測点7は 29.5°C と昇温している。採水海水のオートサルによる塩分濃度を見ると、測点1、2、3とそれぞれ 34.248PSU 、 34.359PSU 、 34.386PSU を示したのに対して、測点4が 33.461PSU と低い値を示した。測点5及び6は 34.221PSU 、 34.453PSU の値を示した。黒潮系の海水と沿岸水との境界を観測したが、北緯30度線に関する限りクロロフィル-a量に大きな変化はなかった。

今後、東シナ海における生産性の高い時期の観測機会を見つけ、沿岸水における植物プランクトンとレーザ励起の蛍光との関連を追跡したい。

7 まとめ

リモートセンサーの宿命である境界層の海面について、海洋レーザ観測装置の光学系の限界があるものの、海面形状に依存せず散乱光あるいは蛍光が統計的な方法により決定可能であることが判明した。

さらに、実際の海域において海洋レーザ観測装置を運用し、海洋レーザ観測装置のレーザ励起の蛍光強度は、連続的なクロロフィル-aの分布を与えるとともに、採水分析によるクロロフィル-a値との強い相関が認められた。これにより、従来からの間欠的な採水を伴うクロロフィル-aの観測手法に較べると、より効率的な基礎生産力の推定手段を与えることが期待される。

今後、基礎実験を重ね、汎用的なクロロフィル-a濃度推定のための経験式を開発するとともに、深度方向の植物プランクトン分布を求めるためのモデル式の開発を進める。

参考文献

- 1) Hoge, F. E., and R. N. Swift : Application of the NASA Airborne Oceanographic LIDAR to the Mapping of Chlorophyll and Other Organic Pigments. p 349-374. / Chesapeake Bay Plume Study. Edited by J. W. Campbell and J. P. Thomas. (1980)
- 2) Bristow, M., D. Nielsen, D. Bundy, R. Furtek and J. Baker : Airborne Laser-Fluorosensing of Surface-Water Chlorophyll-a, p 97-174. / Ocean Remote Sensing Using Lasers. Edited by Howard R. Gordon, NOAA Technical Memorandum ERL PMEL-18. (1980)
- 3) Browell, E. V. : Analysis of Laser Fluorometer Systems for Remote Algae Detection and Quantification. NASA Technical Report, TN D-8447, 39pp. (1977)
- 4) Kim, H. H. : Airborne Bathymetric Charting Using Pulsed Blue-Green Lasers. Applied Optics, 16 (1), 46-56. (1977)

(原稿受理：1992年10月27日)