

多層レーザ方程式を適用した 基礎実験について

浅沼 市男^{*1} 宗山 敬^{*1}

レーザ光を用い海洋中の植物プランクトン及び懸濁物の分布を求めることを目的とする海洋レーザ観測装置の開発の一環として、1989年8月に三陸沖において基礎実験を実施した。この基礎実験により得られた計測結果について新しく開発した多層レーザ方程式の解法手法を適用した解析結果について論ずる。

この解法手法は、海面近傍における植物プランクトン濃度の値を光学モデルに与える必要があるが、散乱光の減衰の度合から海水の各深度における消散係数を求めることができ、各深度における植物プランクトン濃度を求めることができた。

キーワード：レーザ、植物プランクトン、懸濁物、蛍光、散乱光

Onboard Experiment with Multi-layered Laser Radar Equation

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

Ocean Laser Radar is now under development at JAMSTEC, which is dedicated to measure concentrations of phytoplanktons and suspended solids using a laser pulse. In August, 1989, an onboard experiment was conducted off San-Riku near Japan with a research vessel "Kaiyo". A developed multi-layered laser radar equation was applied on laser measurements and was compared with seatruth.

Attenuation coefficients were obtained from data and obtained by laser measurements as a function of depth using a multi-layered laser radar equation. Although this multi-layered laser radar equation is requested to know a concentration of chlorophyll-a at a surface layer of ocean, concentrations of chlorophyll-a were also obtained.

Key word : Laser, Phytoplankton, Suspended Solid, Fluorescence, Scattering Light

*1 海洋開発研究部

*2 Marine Research and Development Department

1 はじめに

海洋科学技術センターでは、広域にわたる植物プランクトンの分布あるいは動物プランクトンなどを含む懸濁物の分布を迅速に計測するための手段として、船舶搭載型および航空機搭載型の海洋レーザ観測装置を開発中である。

この装置は、Hoge^{1), 2)}, Bristow^{3), 4)}らの開発した海洋レーザ観測装置と同様のものであるが、受光部の光電変換素子に従来の光電子増倍管よりも高速のゲートつきマイクロ・チャンネル・プレート光電子増倍管を採用し、Hoge²⁾らの実証した深度方向の懸濁物計測に加え、深度方向のクロロフィル濃度の計測をも同時に行う機能を持つことを特徴とする装置である。

1989年2月には、海洋レーザ観測装置の計測手法とその可能性を検証するために、東京湾から大島沖において実験を行った。(浅沼⁵⁾)これに引き続き、1989年8月に銚子沖から三陸沖にかけての海域において、深度方向からの散乱光強度および蛍光強度の計測手法を検証するために、基礎実験を行った。この実験により得られたレーザ計測データを多層レーザ方程式に適用しデータ解析を行った。

2 多層レーザ方程式

ここでは、Kim⁶⁾及びBrowell⁷⁾のレーザ方程式をもとに開発した多層からの散乱光及び蛍光について記述するための多層レーザ方程式(浅沼⁵⁾)を、さらに改良したレーザ方程式を用いた。

海洋レーザ観測装置により捕捉されるある深度におけるレーザ光束通過体積(レーザ光束面積×単位距離1m)からの散乱光強度を(1)式に示す。ここで、 P_s は受信システムにより捕捉されるある深度からの散乱光強度(W),

Z は海面からある深度までの距離(m),

P_l はレーザ波長 l における照射レーザ光ピーク強度(W),

ρ_l はレーザ波長 l における海面の反射率,

β_l はレーザ波長 l における大気の消散係数(m^{-1}),

H は受信システムから海面までの距離(m),

γ_l はレーザ波長におけるある深度の消散係数(m^{-1}),

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),

m は海水の屈折率

である。

そこで、消散係数を推定するためある深度 Z からの散乱光強度と、他の深度 Z' からの散乱光強度の自然対数値($S_l(Z) = \ln(P_s(Z))$)の差を求めると、

$$S_l(Z') - S_l(Z) = -2 \left\{ \int_Z^{Z'} \gamma_l(Z) dZ \right\} - \ln \left(\frac{Z + mH}{Z' + mH} \right) \dots (2)$$

となる。

(2)式において、 $Z' - Z$ を1mにとると、(3)に示すように深度 $Z + 0.5m$ における消散係数が求められる。

$$\gamma_l(Z + 0.5) = -\frac{1}{2} [S_l(Z') - S_l(Z)] + \ln \left(\frac{Z + mH}{Z' + mH} \right) \dots (3)$$

一方、海洋レーザ観測装置により捕捉されるある深度におけるレーザ光束通過体積(レーザ光束面積×単位距離1m)からの蛍光強度を(4)式に示す。

ここで、

P_f はある深度からの蛍光強度(W),

Z は海面からある深度までの距離(m),

P_l は蛍光励起のためのレーザ波長 l における照射レーザ光ピーク強度(W),

ρ_l はレーザ波長 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,

$$P_s(Z) = \frac{P_l(1 - \rho_l)^2 \exp[-2(\beta_l H)] \exp[-2 \int_0^Z \gamma_l(Z) dZ] \xi A_r}{4 \pi (Z + mH)^2} \dots (1)$$

$$P_f(Z) = \frac{P_l(1-\rho_l)(1-\rho_f) \exp[\beta_l + \beta_f) H] \exp[-\int_0^Z [r_l(Z) + r_f(Z)] dZ] \sigma n \xi A_r \Delta \lambda_d \Delta Z}{4 \pi \Delta \lambda_f (Z + mH)^2} \dots\dots\dots (4)$$

- β_l はレーザ波長 l における大気の消散係数 (m^{-1}),
 - β_f は蛍光波長 f における大気の消散係数 (m^{-1}),
 - H は受信システムから海面までの距離 (m),
 - γ_l はレーザ波長 l におけるある深度の消散係数 (m^{-1}),
 - γ_f は蛍光波長 f におけるある深度の消散係数 (m^{-1}),
 - σ はレーザ波長 l により励起された時の植物プランクトン中に含まれるクロロフィル-aの発生する蛍光の蛍光波長 f における散乱断面積 (m^2/mg),
 - n は植物プランクトン中に含まれるクロロフィル-aの濃度 (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),
 - $\Delta \lambda_d$ は検出器の蛍光選択のための全誘電体干渉フィルタの波長帯域幅 (nm),
 - ΔZ は蛍光反応の単位距離 (1m),
 - $\Delta \lambda_f$ は蛍光波長 f の蛍光の波長帯域幅 (nm),
 - m は海水の屈折率
- である。

この蛍光強度についても、散乱光と同様に自然対数値の差をとる。

$$S_f(Z') - S_f(Z) = -[r_l(L) + r_f(L)] + \ln \frac{n}{n'} \dots\dots\dots (5)$$

散乱光計測のデータを用いて(3)式から深度 L におけるレーザ波長の消散係数 $\gamma_l(L)$ が与えられるため、未知数として深度 L における蛍光波長の消散係数 $\gamma_f(L)$ ならびに深度 L および L' におけるクロロフィル-a濃度 n および n' が残る。

蛍光波長の消散係数 $\gamma_f(L)$ は懸濁物濃度と波長に依存することから、同様の特性を持つレーザ波長の消散係数 $\gamma_l(L)$ の関数として表され($\gamma_f(L) = f[\gamma_l(L)]$), n と n' については、

表層のレーザ方程式の単位深度に相当する第1層のクロロフィル-a濃度 n_0 があたえられれば、各層は連続することから n と n' が次式により順次与えられる。

$$n' = n \cdot \exp \left\{ S_f(Z') - S_f(Z) + r_l(Z) + f[r_l(Z)] - 2 \ln \frac{Z + mH}{Z' + mH} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

3 実験装置

実験装置は、平成元年2月の実験とほぼ同等の装置であった(浅沼⁹⁾)。レーザ光源は、Nd-YAGレーザの第2高調波を利用し、波長532nmを海水の散乱光計測に用いると同時に植物プランクトン中のクロロフィル色素の蛍光励起光とした。レーザパルスの半値幅は6~7ns、パルス強度は150mj/pulseである。

Hoge²⁾らは海面からのレーザ光の反射をさけるため、海面へのレーザ光の照射軸と受光望遠鏡の光軸とを同軸にした上、さらに全体を傾斜させた光学系を用いた。ここでは、海面からの反射光を計測パラメータとして評価することを計画しているため、同軸の光学系を鉛直下に向け、反射光をも計測する光学系とした。光を検出するための光電変換素子は、立ち上がり時間0.3nsの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)を採用し、従来の海洋レーザ観測装置に採用されていた光電子増倍管に対して約1桁ほど速い応答速度を持つ。ここでは、MCP-PMT専用の検出器本体を製作し、全誘電体干渉フィルタ、NDフィルタを差し込み式とし、波長の選択及び強度の調整を行った。

深度方向のある時間帯以降を計測するためのゲート開放信号は、これまでレーザパルス幅をゲート信号としてきたが、本実験ではパルスジェネレータおよび遅延回路を導入し、任意のゲート信号の作成を可能とした。この結果、遅延回路により計

測開始深度を任意に選択可能となり、パルスジェネレータと組み合わせることにより任意の深度区間についての戻り光の計測が可能となった。また、任意の深度区間のレーザ散乱光あるいは蛍光の強度に合わせて、検出器の光電子増倍率を調整することが可能となり、ダイナミックレンジを容易に広くとることが可能となった。

図1に実験装置の信号系統図を示す。海面および海水中からのレーザ反射光あるいはレーザ散乱光は減衰及び波長選択のための光学系を通してMCP-PMTにより検出され、オシロスコープに表示される。このオシロスコープ表示を専用のデジタル化・カメラを通してパーソナルコンピュータに取り込み、50回の計測信号の平均値を求めた。

4 海域実験

1989年8月4日から8月6日にかけて図2に示す銚子沖から、三陸沖、津軽海峡にかけての航路において、海中作業実験船「かいよう」に試作した海洋レーザ観測装置を設置し、基礎実験を実施した。海況の概要を気象衛星NOAAにより捕らえることを試みたが、1989年7月18日の観測から1989年8月22日の観測まで雲の少ない観測データを得ることができなかった。しかし、NOAAの海面温度分布図から、三陸沖暖水渦が金華山南東にこの期間を通して安定に存在していたことが判読できた。図3の海面温度分布図の示すように東経143度30分、北緯37度30分を中心とする位置に暖水渦が存在した。計測を行った海域の内、測点1, 2, 3は暖水渦の北西側に位置し、親潮の第一貫入に相当する海域であるが、暖水系の海水と混合を呈する複雑な海域である。また、測点4は日本海から津軽海峡をへて太平洋へ流入する津軽暖流の存在する海峡である。

この実験において海洋レーザ観測装置の照合データを得るために、採水バケツにより海面の海水を、ニスキン採水器により10mから50m深度まで10mおきに海水を取得し、クロロフィル色素濃度及び懸濁物濃度の計量を行った。また、合わせてXBT計測を行い水温の鉛直分布を求めた。

4.1 クロロフィル色素濃度

クロロフィル色素濃度は西篠⁸⁾の吸光光度法に従い、取得した海水をグラスファイバー濾紙によ

り濾過し、植物プランクトン細胞を分解し、クロロフィル色素をアセトンにより抽出し、指定波長の吸光値を求め、クロロフィル-a, -b, -c濃度を求めた。

4.2 懸濁物濃度

懸濁物濃度は取得した海水を、孔径0.4 μmのヌクレオポア・フィルタにより濾過し、フィルタにトラップされた懸濁物の乾燥重量から懸濁物濃度を求めた。これにより、Drake⁹⁾の懸濁物濃度に対する透過率の計測結果から、海水の消散係数の算出を試みた。

4.3 XBT計測

XBTによりレーザ照射海域の水温の鉛直分布を計測した。これにより、計測海域の黒潮系の暖水海域であるか親潮系の冷水海域であるか概況を知るとともに、海水の鉛直構造を知るために利用した。

5 信号処理

オシロスコープにより観測されるMCP-PMTの電圧信号から計測系により受光される散乱光あるいは蛍光の強度を知るためには、次式に示す処理が必要となる。

$$P_s = \frac{(V_s - V_0)}{R \cdot G \cdot T_f \cdot 10^{-D} \cdot S} \dots\dots\dots (7)$$

ここで、

- P_s は、受光信号の強度 (W),
- V_s は、オシロスコープ計測電圧 (V),
- V_0 は、オシロスコープ計測電圧範囲内における信号のゼロレベル (V),
- T_f は、観測波長選択のための全誘電体干渉フィルタの透過率,
- D は、減光のためのNDフィルタの濃度,
- S は、MCP-PMTの分光感度 (A/W),
- R は、電圧電流変換抵抗値 (Ω),
- G は、MCP-PMTの電流増倍率

である。

さらに、船舶の運航上の都合からバラスト水の調整が行われレーザ観測システムと海面との距離が変動するために、時間軸における海面相当時刻点の決定が必要となる。

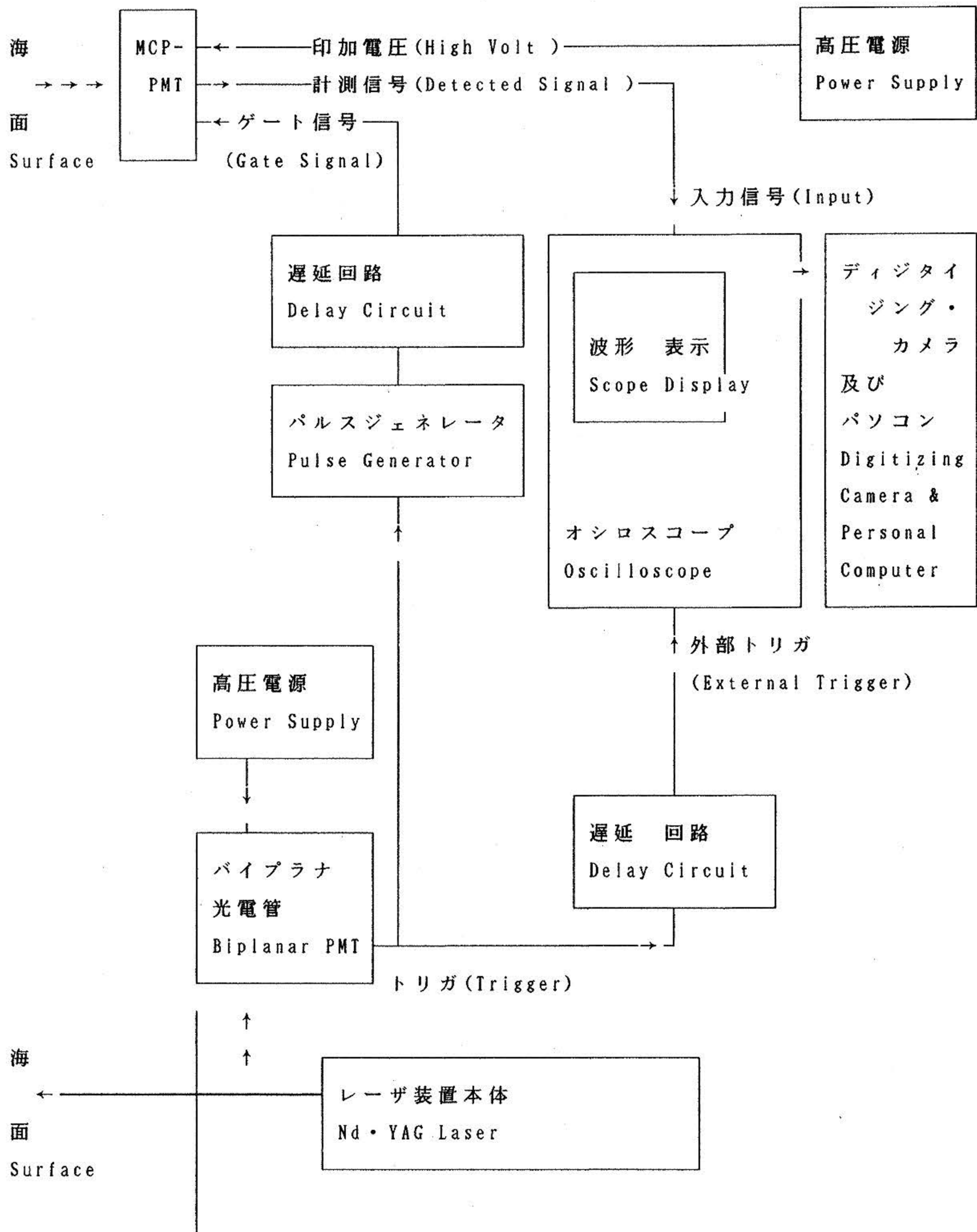


図 1 海洋レーザー観測装置系統図

Fig. 1 Block Diagram of Ocean Laser Equipment

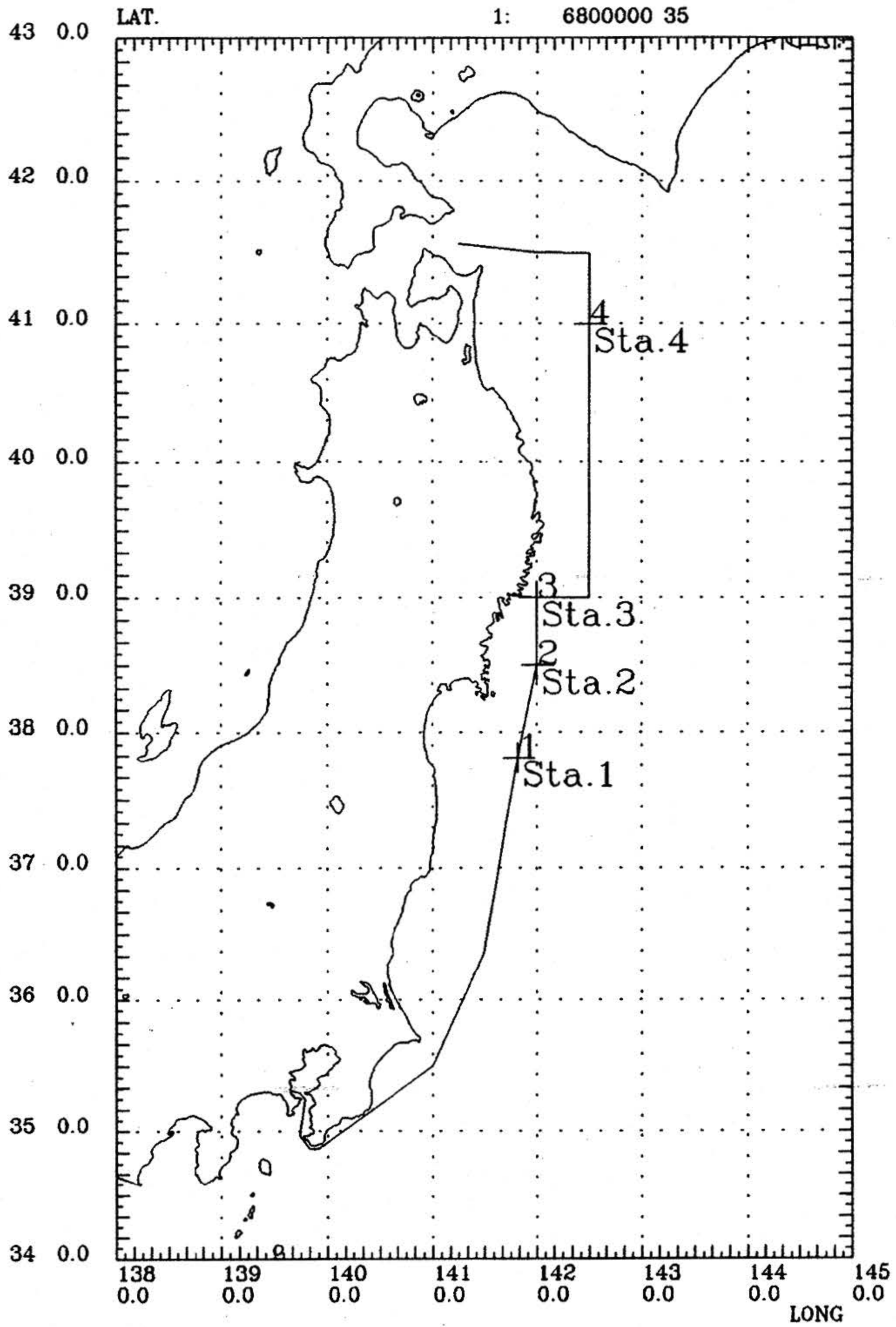


図 2 海洋レーザ実験海域

Fig. 2 Locations of Laser Experiment

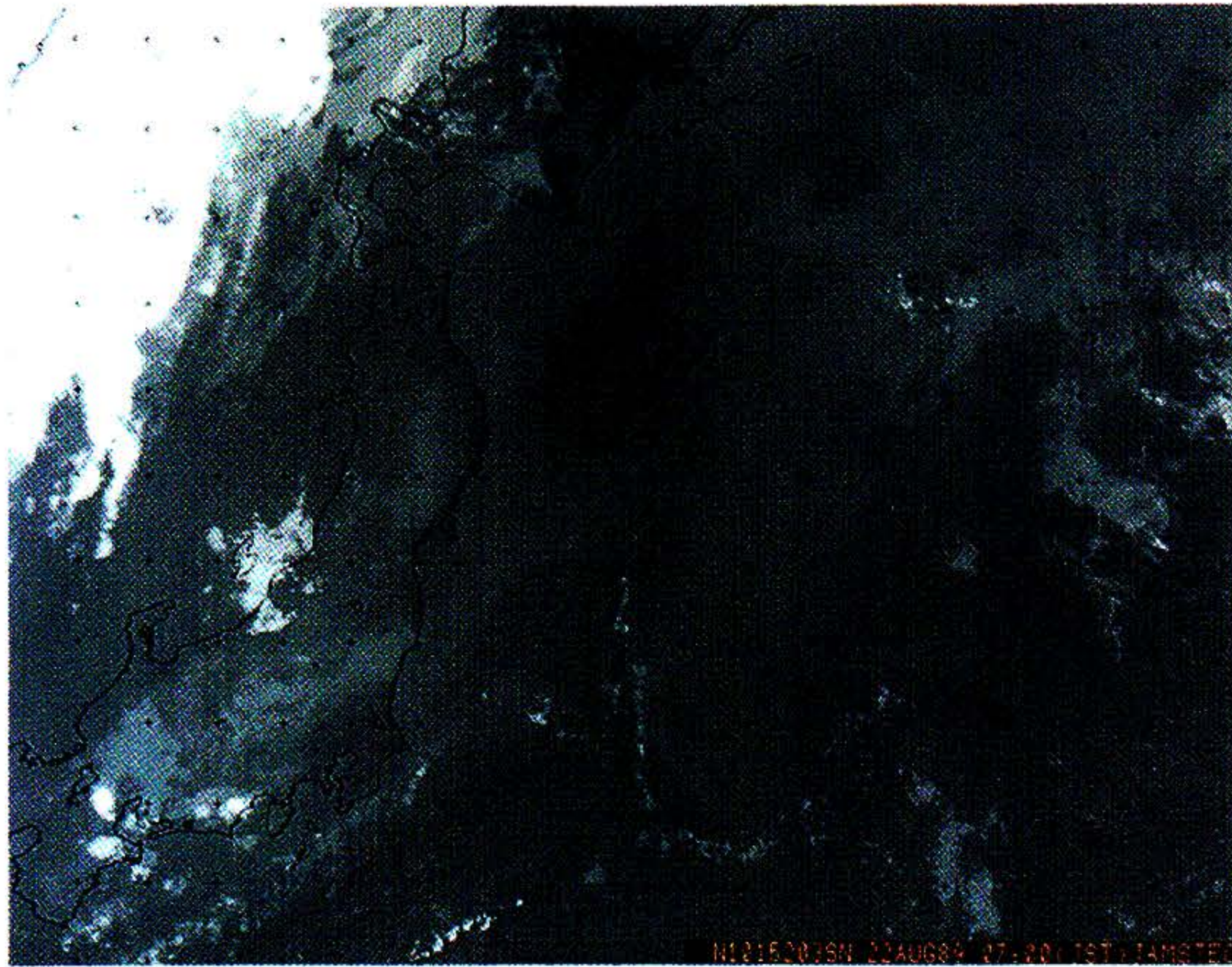


図 3 海面温度分布図

Fig. 3 Sea Surface Temperature by NOAA,
Data was observed at 07:00 JST on
Aug. 22, 1989.

5.1 計測信号の抽出

MCP-PMTからの信号は、オシロスコープに波形表示され、ディジタル化・カメラにより読み取られ、パーソナル・コンピュータにおいてディジタルデータとしてフロッピー・ディスクに記録され、以後信号処理のためのコンピュータにおいて利用可能となる。図4に示すようなオシロスコープの時間軸をX軸とし電圧をY軸とする波形データから、MCP-PMTの有意な信号変化を求めめるためのプログラムを開発した。

このプログラムは、まずMCP-PMTからの信号のゼロレベルを決定する。ゼロレベルの決定にあたっては、全信号の最大値のある割合以下での変動を示すある時間以上の区間をいくつか選択し、それらの区間の中の最小のものをゼロレベルとした。次に、解析対象の信号区間を決定するために、信号がほぼ単調な減少関数であることに注目して、全信号の最大値のある割合以上の値を示す変極点の内、最も最後に出現する変極点の時間を解析対象の信号区間の始まりとし、それ以降最大値のある割合以下になる最初の時間を解析対象の信号区間の終わりとした。さらに、海面からの反射光がMCP-PMTのゲートを突き破り、エネルギー量とし

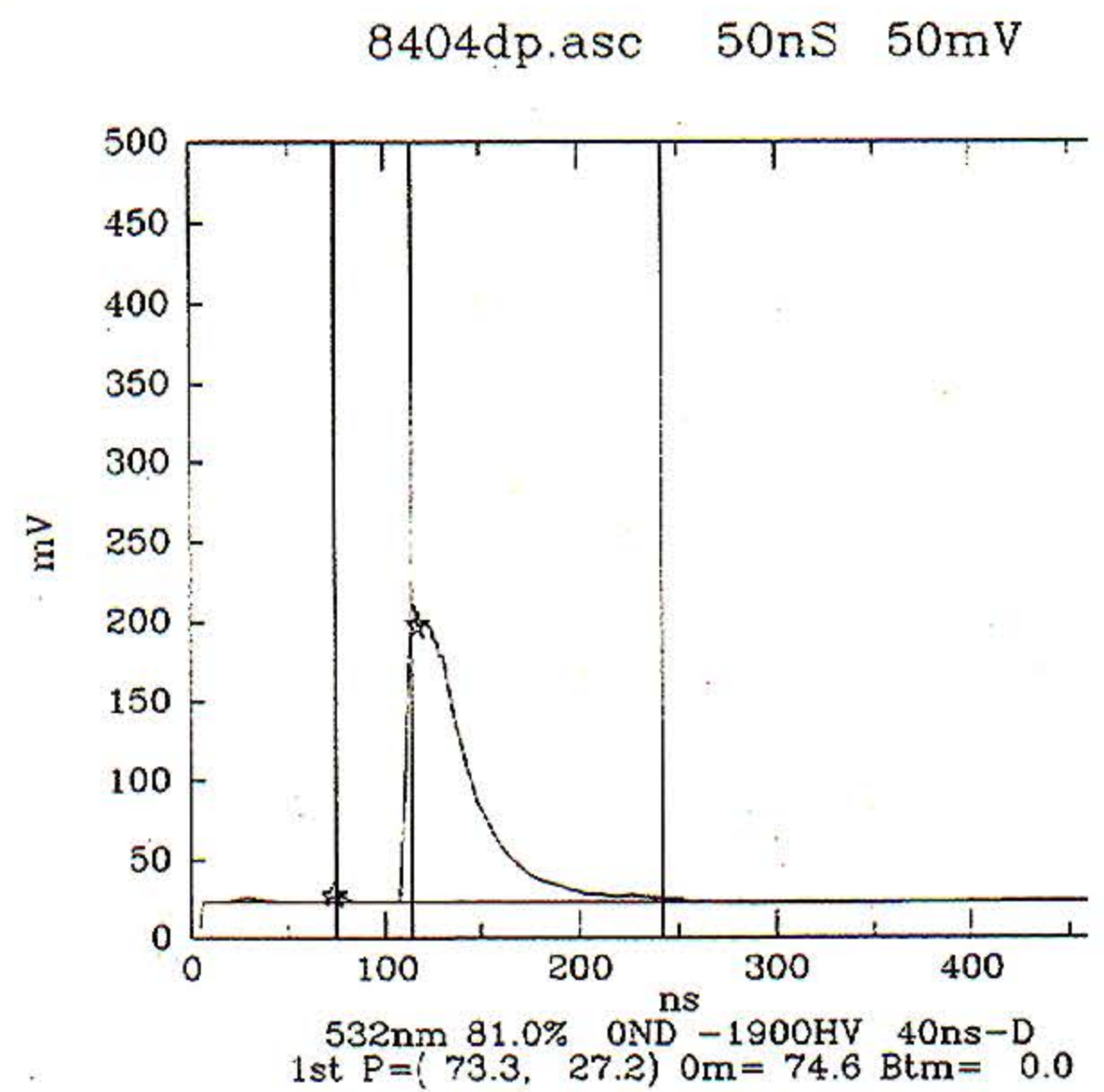


図 4 計測信号Aスコープ表示

Fig. 4 A-scope display of signal

ては読み取ることができないが、波形に現れるクの時間を海面とし、1連の計測に対して0m準時間とした。

5.2 増倍率補正

MCP-PMTは 10^2 から 10^6 増倍率を持ち、51

度のダイナミックレンジを持つが、MCP-PMTによる検出記号は対数アンプなどのアンプを通さずにオシロスコープに入力するため、ある印加電圧に対してのダイナミックレンジはオシロスコープの読み取り限界に制限され2桁以下となる。このようにある計測条件のもとでの計測系のダイナミックレンジが小さいため、深度方向に印加電圧を変化させながら、またゲート開放時間を変化させながら計測した信号データについて、深度方向における散乱光あるいは蛍光を連続的に比較するためには、増倍率を見込んだ信号処理が必要となる。この増倍率を計測時の記録から信号解析のコンピュータへ入力し、前項において得られた信号に対して(7)式の処理を施し、受光信号の強度を求めた。

6 多層レーザ方程式の適用

6.1 散乱強度測定と散乱係数

前述の信号処理を施し、レーザ光の532nmでの散乱光を計測した一連の計測により得られた信号をプロットしたものを図5に示す。図中のK及びLの波形は表面から深度5mまでの計測信号、それに続くM, N, O, P, Q及びRの波形は深度5m近辺から15mまでの計測信号、そしてSの波形は深度15m近辺から25mまでの計測信号である。計測信号が断続的にプロットされているのは、信号計測のための深度方向のゲート開放時間を信号の減衰に合わせ設定する必要があるものの、船上における計測時に適切に設定できなかったためである。

この信号処理により得られた一連の計測信号に対して深度方向の散乱光の減衰度合いを表現するため、4次のB-スプライン補間のための係数を求めることにより、深度方向に対する散光強度の近似関数を求めた。B-スプラインの関数の決定にあたっては、断続的な計測による欠測点からのB-スプライン関数への影響を避けるため、人間の判断を入れサンプリング間隔を適宜設定した。図6に図5の一連の計測について求めたB-スプラインの近似関数を合わせて示した。この図によると、海面近傍から深度25mまでの散乱光の減衰の様子がB-スプライン関数により近似されているが、5mまでの表層において実際の波形とのずれが大きく、また深度5m及び15mの断続点において実際の波形とのずれが見られる。

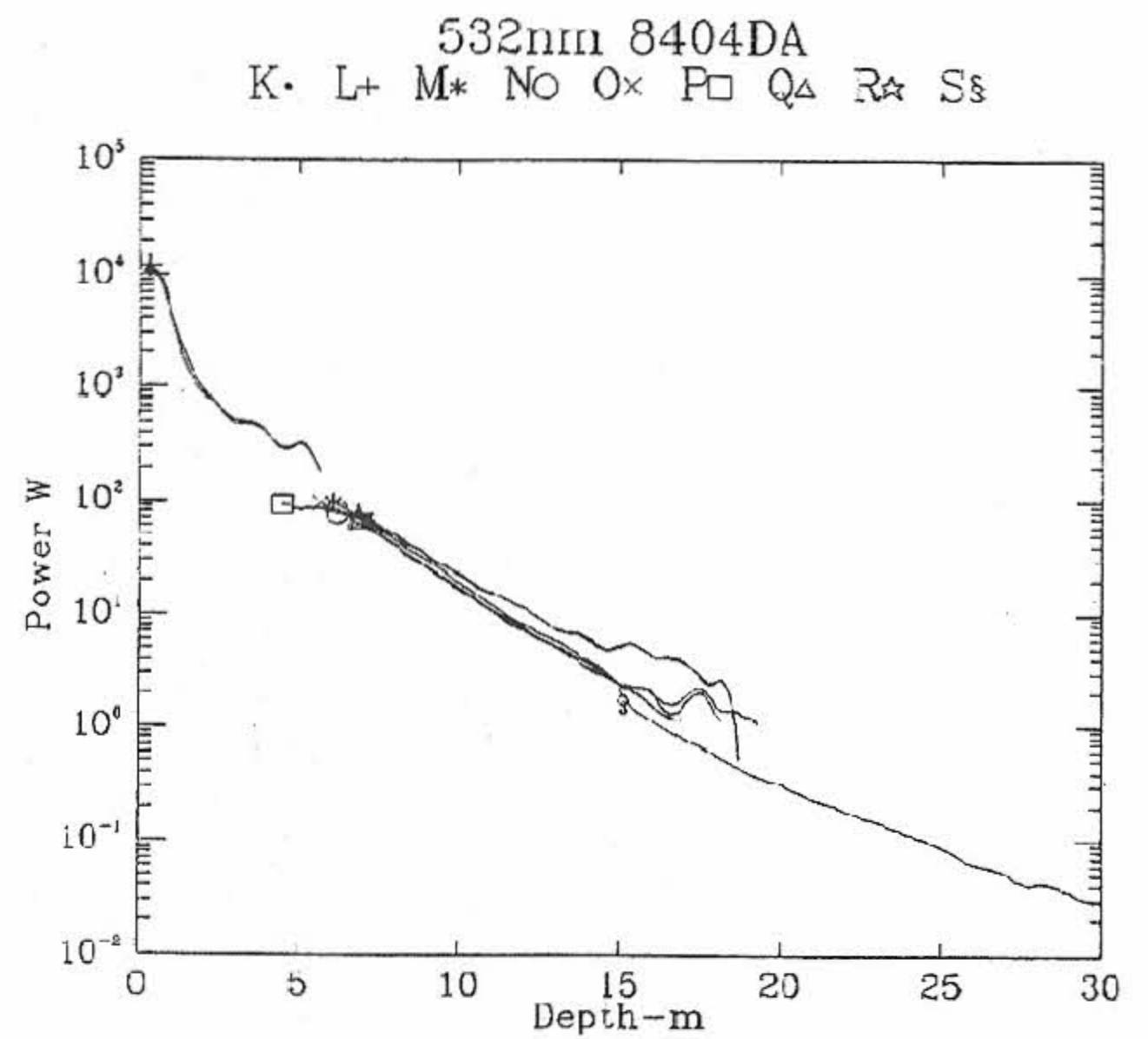


図5 散乱光計測結果例

Fig. 5 Sample of scattering light measurement

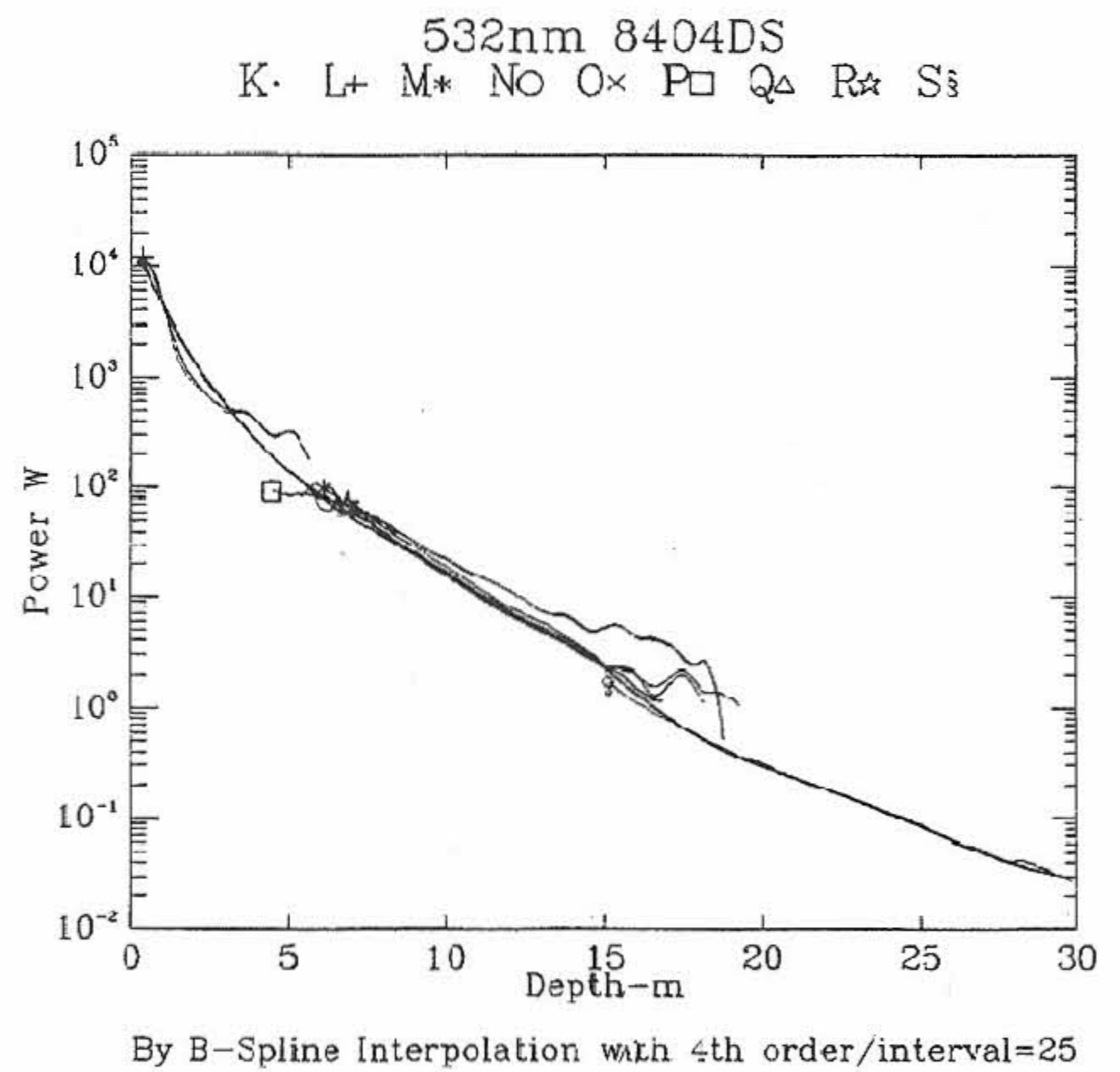


図6 B-スプライン関数による減衰過程の近似

Fig. 6 Sample of B-Spline interpolation for attenuating scattering light

この深度方向の散乱光強度の関数について、多層レーザ方程式において定義した深度 z における消散係数を(3)式により求めた。図10-1に多層レーザ方程式を適用して求めた消散係数と、採水した海水から得られた懸濁物濃度をもとにDrake⁹⁾の実験データから推定した消散係数を示す。

6.2 蛍光強度測定とクロロフィル濃度

6.1に示した計測例とほぼ同時に求められた一連の蛍光計測の信号について、同様に信号処理を施した信号をプロットしたものを図7に示す。図中のAからFの波形はMCP-PMTへの印加電圧を一定に保ちながらゲート開放時間をずらして計測し、GからJの波形は印加電圧及びゲート開放時間を変更しながら計測した。深度10m以上における波形の振動は検出信号系のノイズと考えられ、深度方向の蛍光信号ではない。

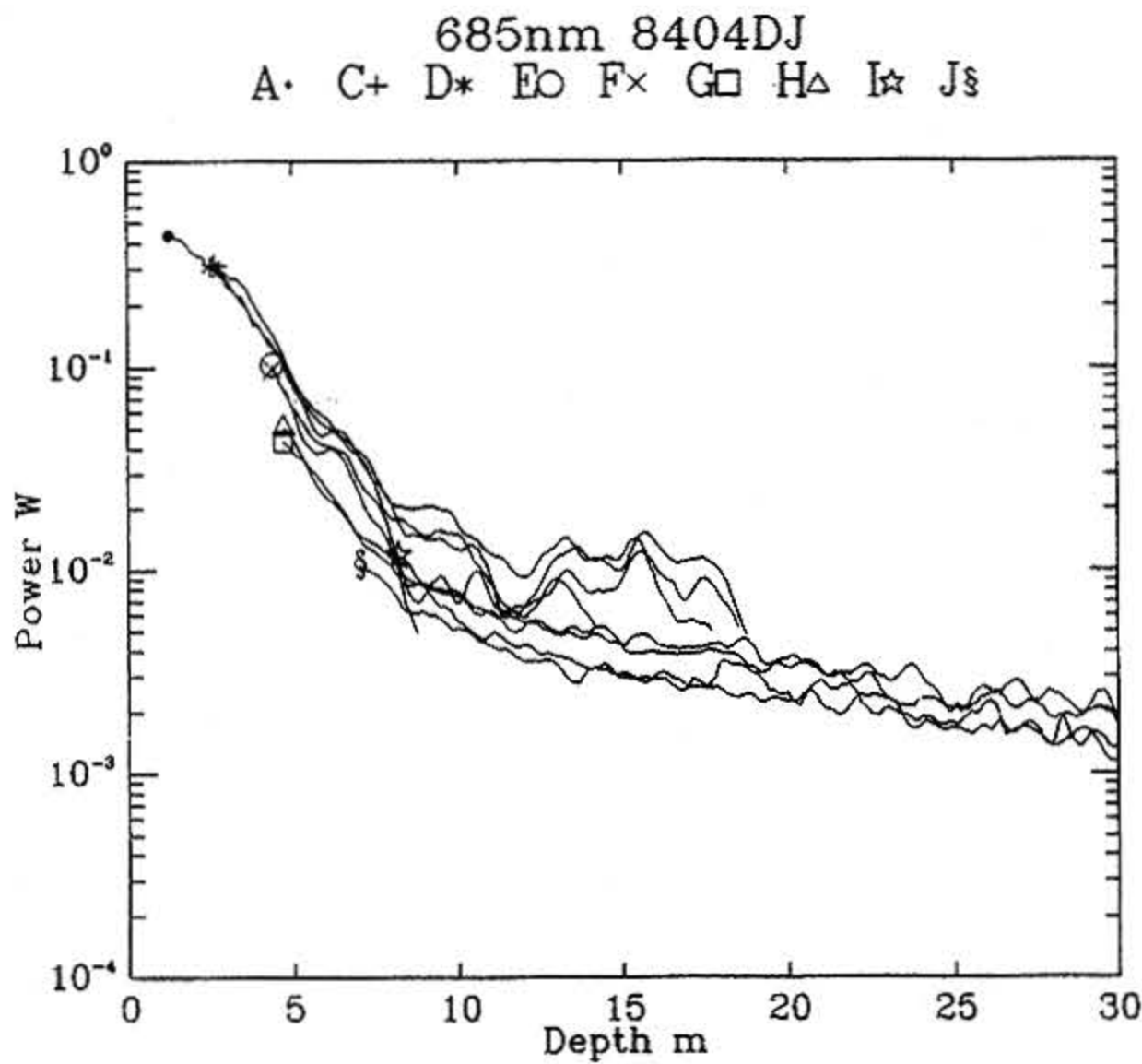
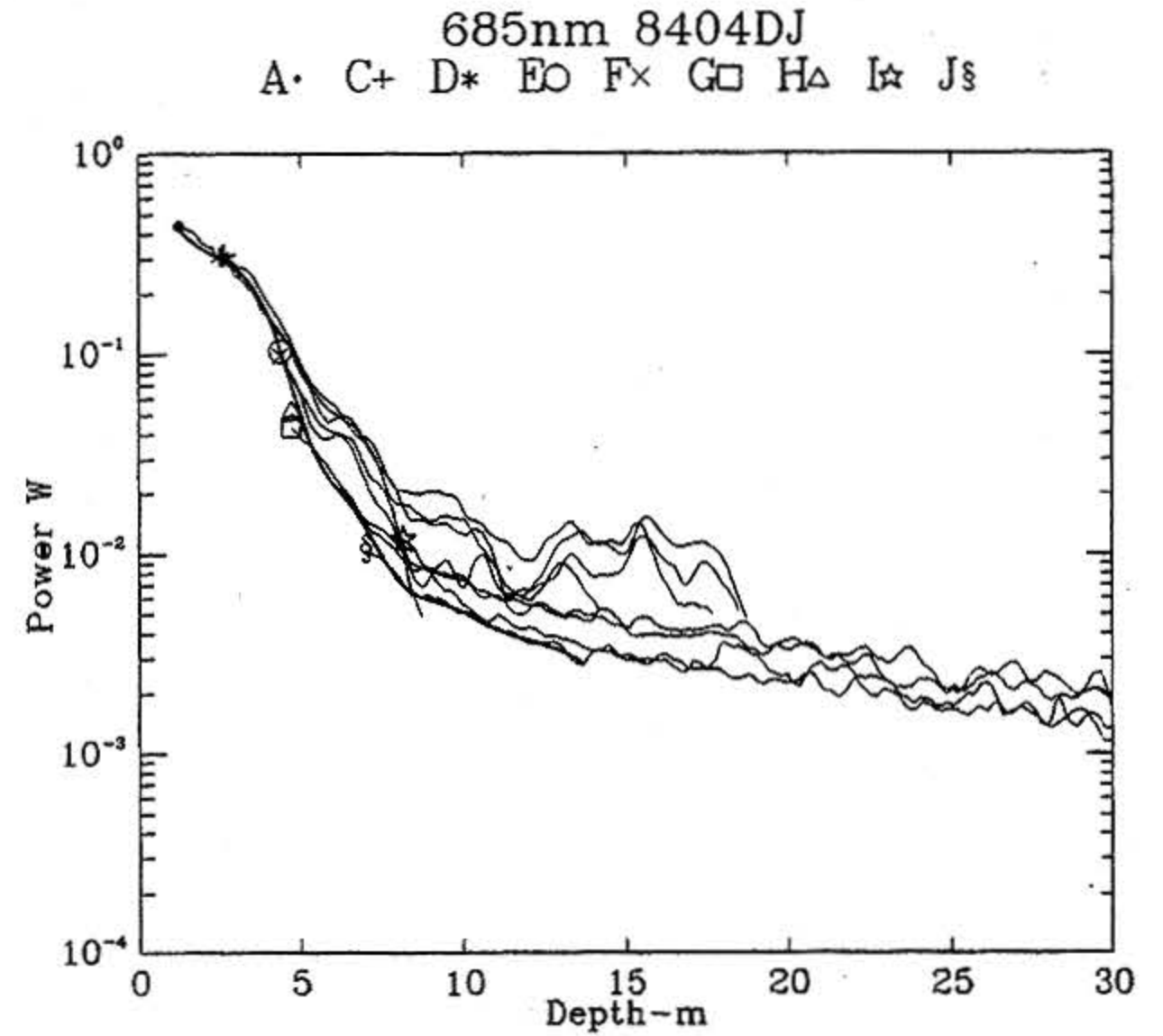


図7 蛍光計測結果例

Fig. 7 Sample of fluorescent light measurement

この信号処理により得られた一連の計測信号に対して、深度方向の蛍光の減衰度合いを表現するため、散乱光と同様にB-スプライン補間のため係数を求め、深度方向に対する蛍光強度の近似関数を求めた。図8に図7の一連の計測について求めたB-スプラインの近似関数を合わせて示した。この図によると、海面近傍から深度15mまでの蛍光の減衰の様子がB-スプライン関数により近似されているが、一部に計測波形の不連続点におけるB-スプライン関数の飛躍が見られる。

この深度方向の蛍光強度の関数について、多層レーザ方程式において定義した深度Zにおけるクロロフィル-a濃度を、表層の採水海水から求められたクロロフィル-a濃度を第1層の値として代入することにより、(6)式により求めた。図10-2に



By B-Spline Interpolation with 4th order/interval=12

図8 B-スプライン関数による蛍光減衰過程の近似

Fig. 8 Sample of B-Spline interpolation for attenuating fluorescent light

多層レーザ方程式を適用して求めたクロロフィル-a濃度と、採水した海水から得られたクロロフィル-a濃度とを示す。

6.3 適用結果

計測点を可能な限り多く設定したが、計測データの収集を手動により行ったため、ゲート時間制御の不完全なデータがあり、多層レーザ方程式を適用するのに不適なデータがあった。これらの中で、多層レーザ方程式を適用した計測例を示す。

本実験の計測点は、花輪ら¹⁰⁾の報告するように金華山沖を南下する親潮系の冷水、津軽暖流系の暖水、そして黒潮系の暖水との混合する複雑な構造を示す海域にある。塩分濃度計測を行っていないため海水の属性を判断することは困難であるが、XBTにより各測点における水温の鉛直構造を調べた。測点1及び3では、図9-1、9-3のXBT計測に示されるように、表層から深度50mの層は太陽により暖められた不安定な海水が存在し、深度50mから100mの層に水温約10°Cの安定した海水が存在する。測点2では、図9-2のXBTの計測に示されるように、測点1、3と同様に表層から深度50mの層に不安定な海水が存在し、それ以降の層においては測点1あるいは3と異なり不安定な海水の存在が認められる。一方、測点4では、図9-4に

示されるように、深度80mを境に表層に津軽暖流系の暖水と、それ以深に親潮系の冷水とが存在し混合していると考えられる。

イ. 計測点1

図10-1の計測点1の多層レーザ方程式を適用した消散係数と、採水海水の消散係数とを比較すると、採水間隔が10mであることから、多層レーザ方程式により求められた消散係数の深度方向の分布を詳細に比較することは困難であるが、海面から深度10m近傍までの消散係数の減衰傾向、またそれ以深の消散係数の一部増大を含む減少傾向の類似した傾向が読み取れる。

図10-2の多層レーザ方程式を適用したクロロフィル-a濃度と、採水海水のクロロフィル-a濃度とを比較すると、深度5m以浅において、採水海水の分析結果と交差し大きくずれているが、深度5m以深では減少したのち増加しており類似した傾向を示す。

ロ. 計測点2

図11-1の計測点2の多層レーザ方程式を適用した消散係数と、採水海水の消散係数とを比較す

ると、海面から深度10m近傍までの消散係数の減衰傾向はともに類似するが、それ以深の20mにかけて相反する傾向を示した。

図11-2の多層レーザ方程式を適用したクロロフィル-a濃度と、採水海水のクロロフィル-a濃度とを比較すると、深度5m以浅において、採水海水の分析結果と接近する。深度5m以深からの分析結果からは離れるものの、減少したのち増加しており類似した傾向を示す。

ハ. 計測点3

図12-1の計測点3の多層レーザ方程式を適用した消散係数と、採水海水の消散係数とを比較すると、両者の関連性は認めがたいが、採水結果と近い消散係数を示す。

図12-2の多層レーザ方程式を適用したクロロフィル-a濃度と、採水海水のクロロフィル-a濃度とを比較すると、深度方向への濃度の上昇傾向に類似性が認められる。また、濃度値も非常に近い値を示した。

ニ. 計測点4

図13-1の計測点4の多層レーザ方程式を適用し

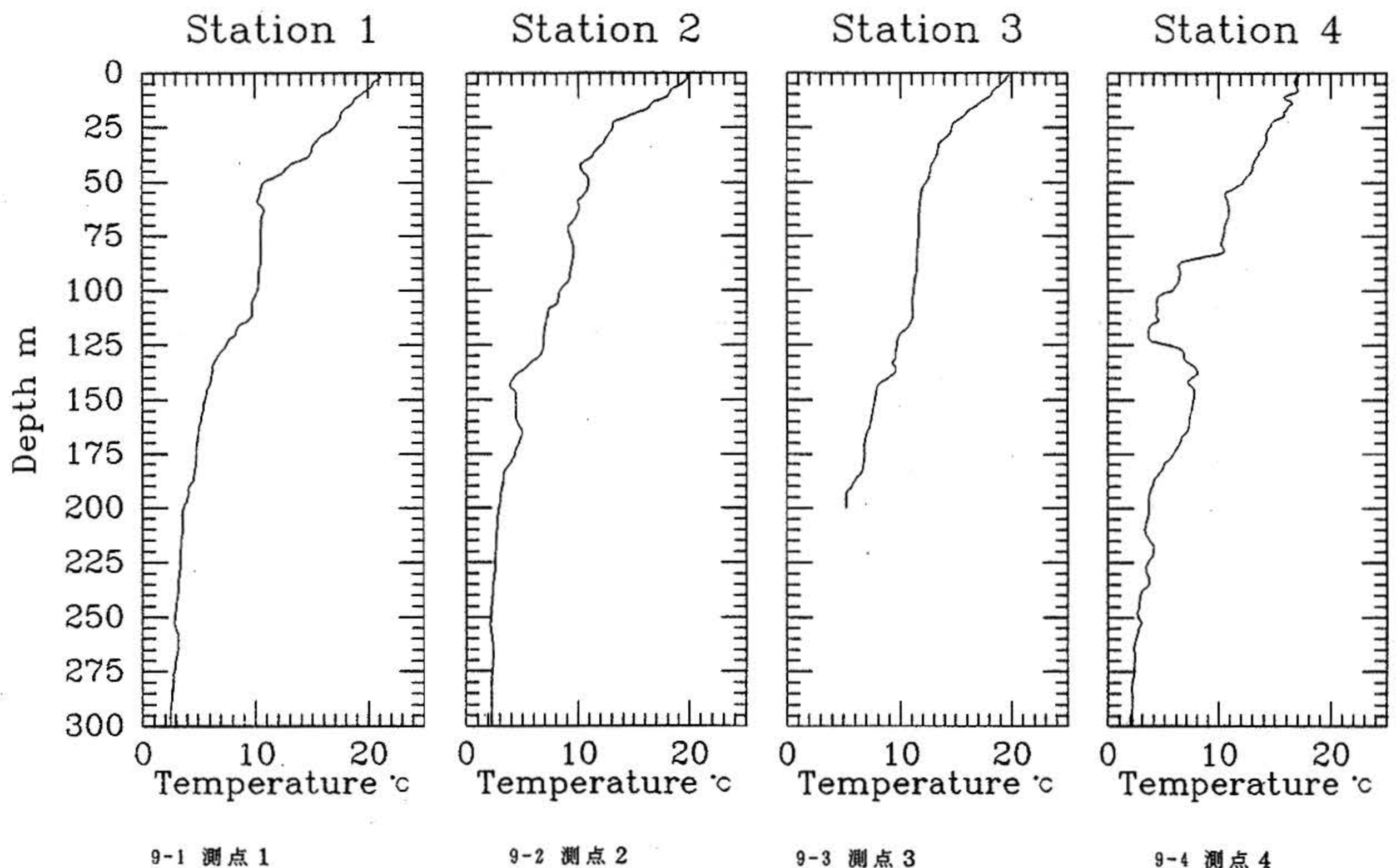


図9 XBTによる水温鉛直分布図

Fig. 9 Vertical profile of temperature by XBT

た消散係数と、採水海水の消散係数とを比較すると、海面近傍での誤差があるものの、それ以深では非常に近い値を示すと同時に、減少する類似した傾向を示した。

図 13-2 の多層レーザ方程式を適用したクロロフィル-a 濃度と、採水海水のクロロフィル-a 濃度とを比較すると、両者の関連性は認めがたい。

今回の実験においては、採水海水から懸濁物濃度を求め消散係数を推定し、吸光光度法によりクロロフィル-a 濃度を求め、レーザ計測データに多層レーザ方程式を適用し求めた消散係数及びクロロフィル-a 濃度と比較した。採水間隔を 10m に設定したため、両者の結果を詳細に比較することは困難であった。しかし、消散係数については、測点 3 を除き、採水とレーザ計測が類似した傾向を示し、さらに測点 4 においては非常に近い値を示した。一方、クロロフィル-a 濃度については、測点 3 において採水とレーザ計測が類似した傾向と近い濃度値を示した。他の測点については、一部の深度区間において類似した傾向が認められたが、さらに検討を要する結果となった。

7 まとめ

計測手法が確立しておらず、また計測系の設定が手動による設定方法ととったため、多層レーザ方程式を適用可能なデータの件数が非常に少ない結果となった。また、海水を 10m 間隔で採水しその分析結果と、レーザ計測データに多層レーザ方程式を適用した結果とを比較したが、十分な評価を行うことができなかった。しかし、一部のデー

タについて多層レーザ方程式の消散係数とクロロフィル-a 濃度が、採水海水の分析結果と非常に近い鉛直分布を示したことから、今後引き続き検討を要するものの、本研究の多層レーザ方程式による解析手法が実証されたと言える。

この実験を通して、レーザ計測の手順と計測機器の組み合わせについて貴重な情報が得られ、海洋レーザ観測装置の製作に有効に反映させることができた。

今後、海洋レーザ観測装置の製作後の評価実験等を通して、採水の方法の変更あるいは沈降型の計測機器の導入などにより深度分解能の大きな教師データを取得し、多層レーザ方程式を用いたより精度の高い解析手法の開発を行う。また、岸壁における実験を継続し、計測データの蓄積を図り、レーザ方程式の検討を継続する。

8 謝辞

この研究を進めるにあたり、光電子増倍管などの技術的な指導を仰いだ千葉大学工学部の江森康文先生、安田嘉純先生、木更津高専の高橋邦夫先生、実験に終始協力いただいた関東学院大学工学部の直井純君、小西欣也君、船上での海水分析を担当いただいた日本海洋事業の高尾宏一氏に、また「かいよう」の運航及び機材設置作業に協力いただいた乗組員の方々に、ここに謝意を表します。

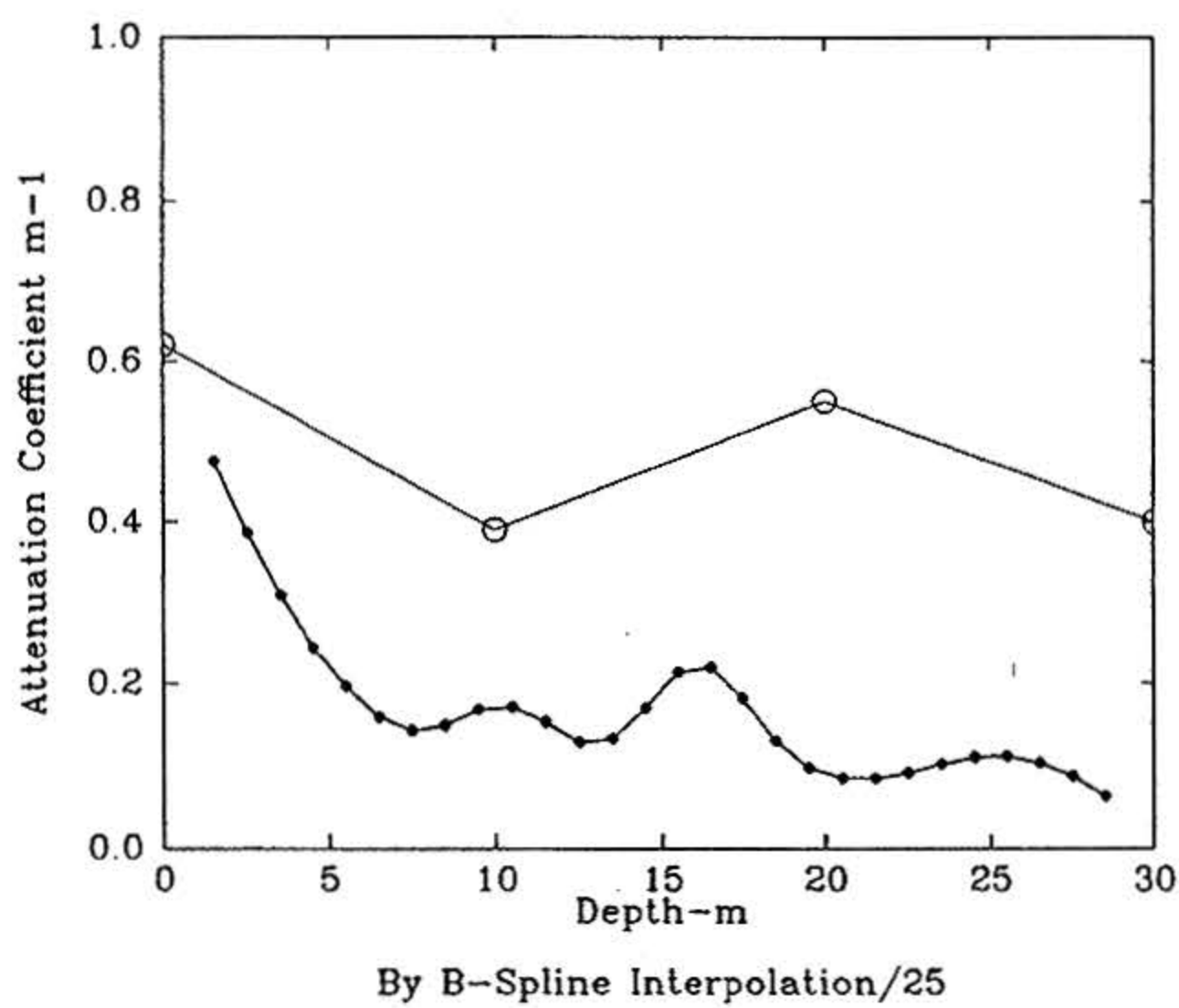


図 10-1 計測点1における多層レーザ方程式による消散係数 (•) と採水海水から求められた消散係数 (○)

Fig. 10-1 Attenuation coefficients by laser radar equation (•) and water analysis (○) at station 1.

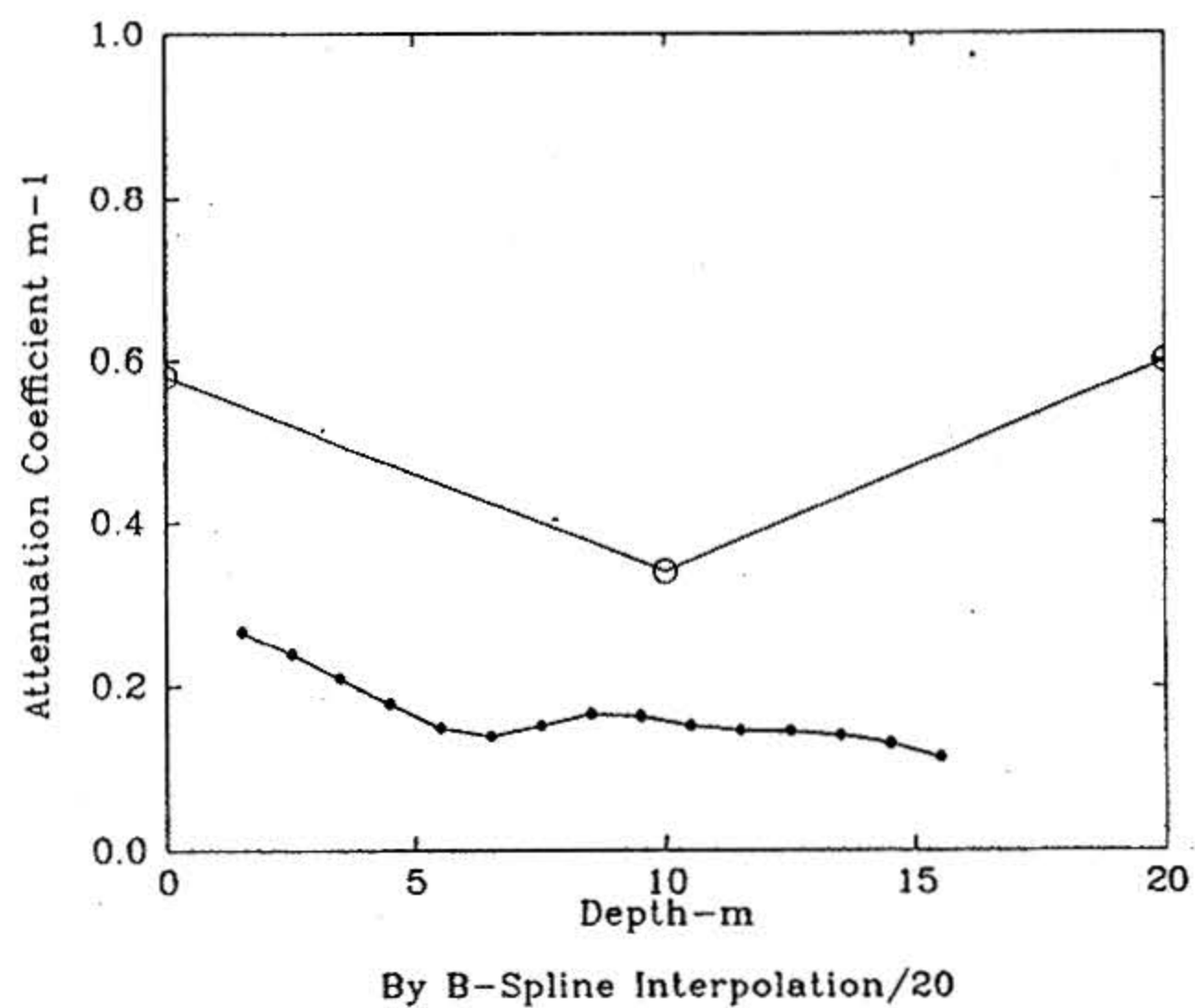


図 11-1 計測点2における多層レーザ方程式による消散係数 (•) と採水海水から求められた消散係数 (○)

Fig. 11-1 Attenuation coefficients by laser radar equation (•) and water analysis (○) at station 2.

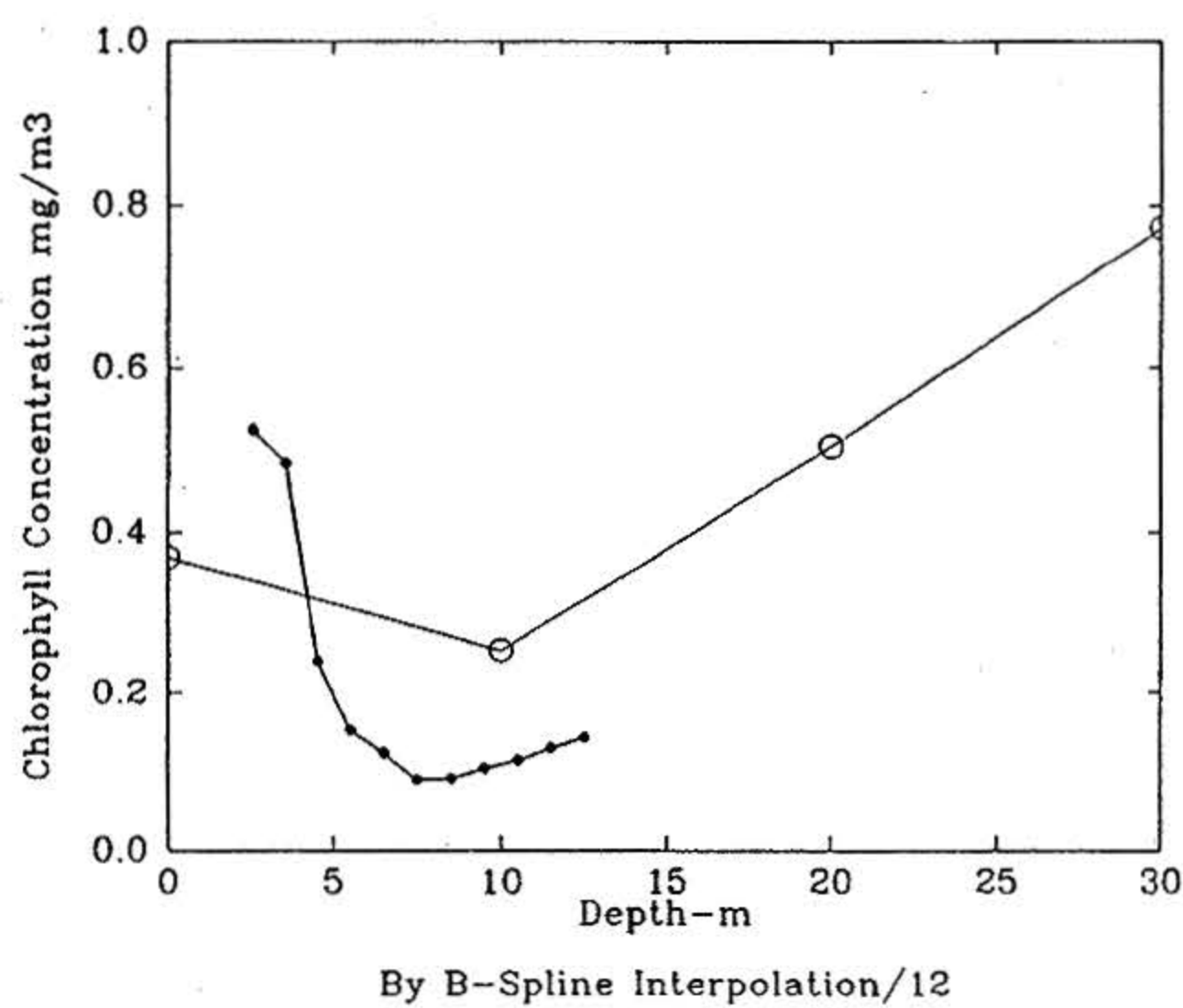


図 10-2 計測点1におけるレーザ方程式によるクロロフィル-a濃度 (•) と採水海水から求められたクロロフィル-a濃度 (○)

Fig. 10-2 Concentrations of chlorophyll-a by laser radar equation (•) and water analysis (○) at station 1.

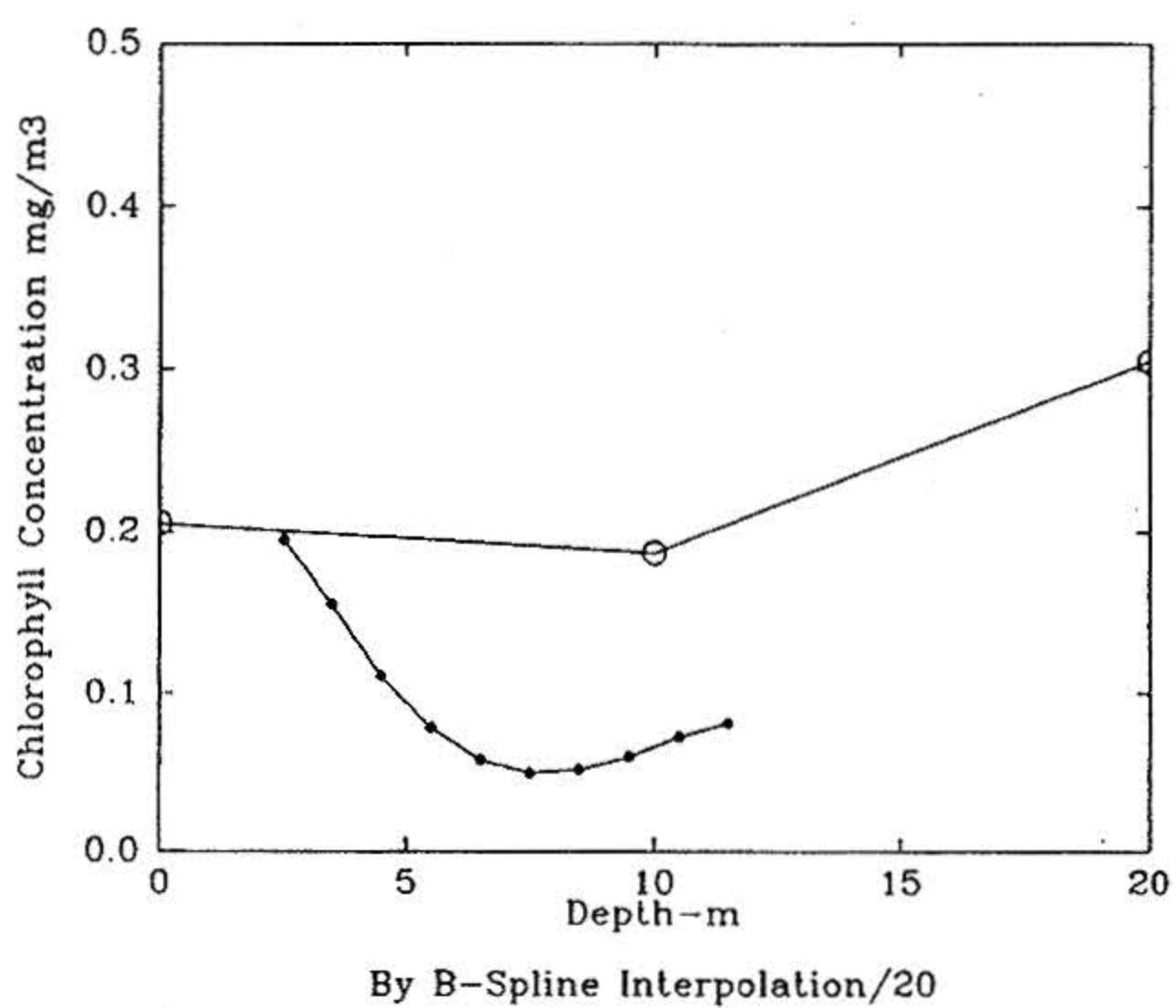


図 11-2 計測点2におけるレーザ方程式によるクロロフィル-a濃度 (•) と採水海水から求められたクロロフィル-a濃度 (○)

Fig. 11-2 Concentrations of chlorophyll-a by laser radar equation (•) and water analysis (○) at station 2.

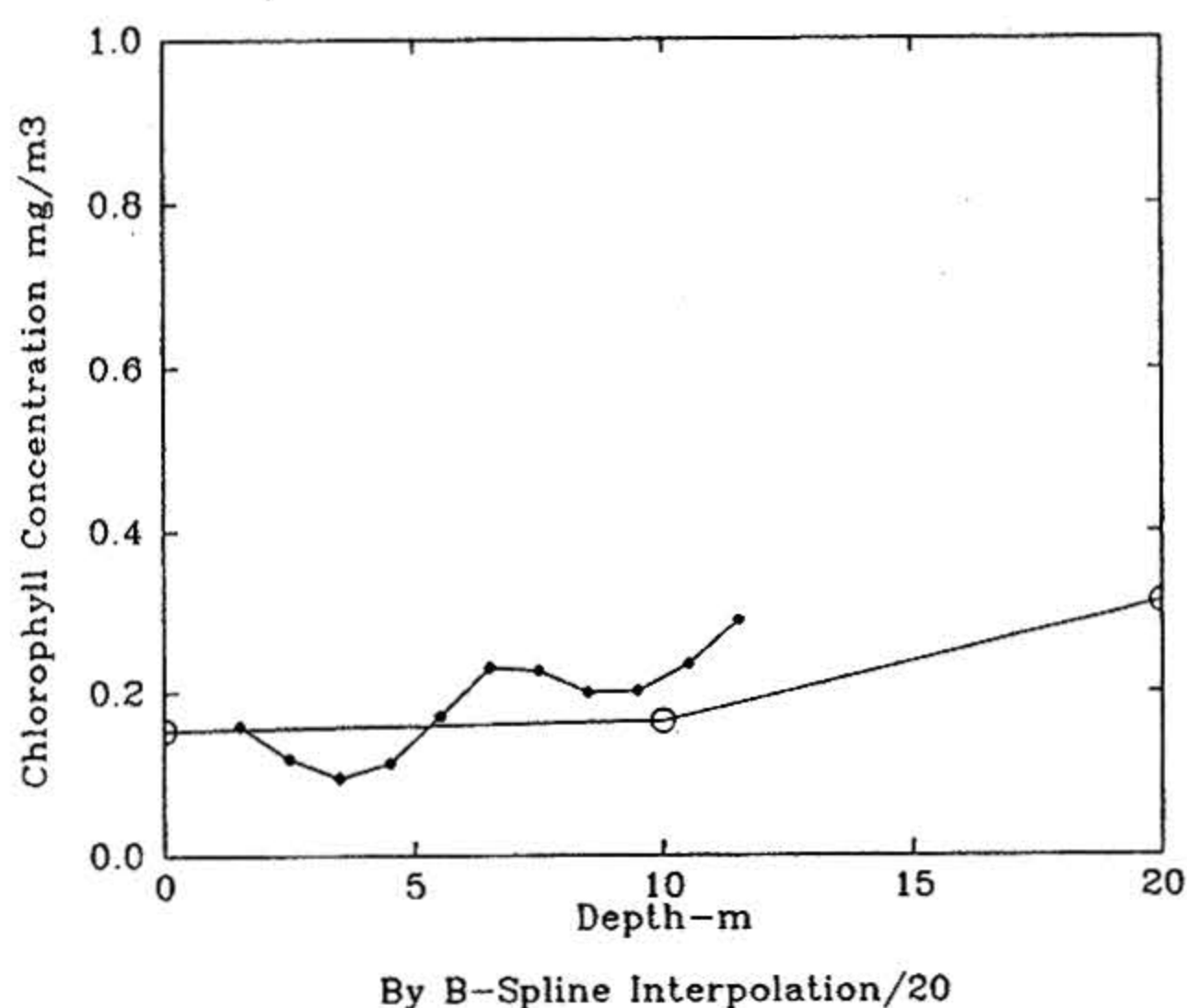


図 12-1 計測点3における多層レーザ方程式による消散係数 (•) と採水海水から求められた消散係数 (○)

Fig. 12-1 Attenuation coefficients by laser radar equation (•) and water analysis (○) at station 3.

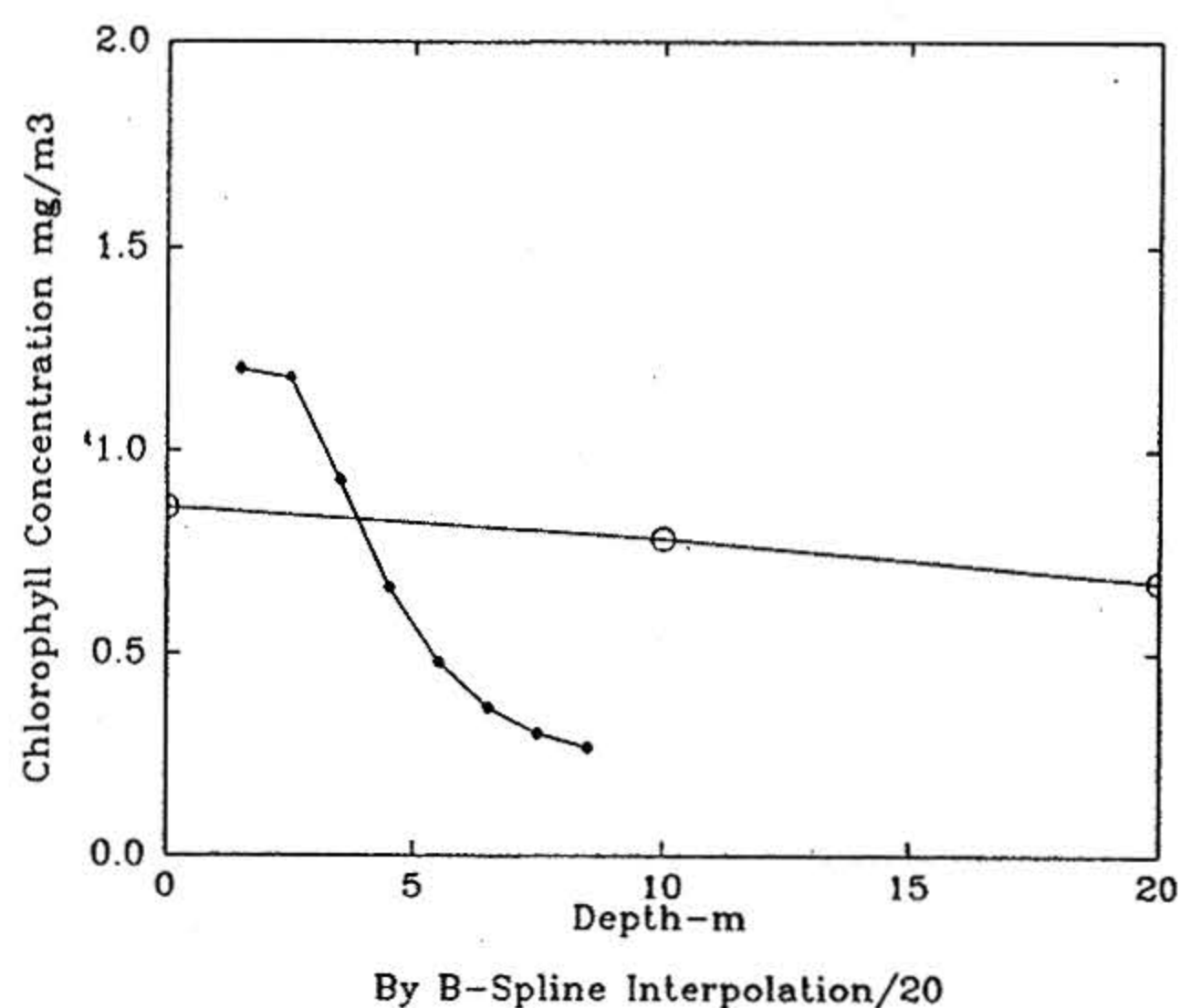


図 13-1 計測点4における多層レーザ方程式による消散係数 (•) と採水海水から求められた消散係数 (○)

Fig. 13-1 Attenuation coefficients by laser radar equation (•) and water analysis (○) at station 4.

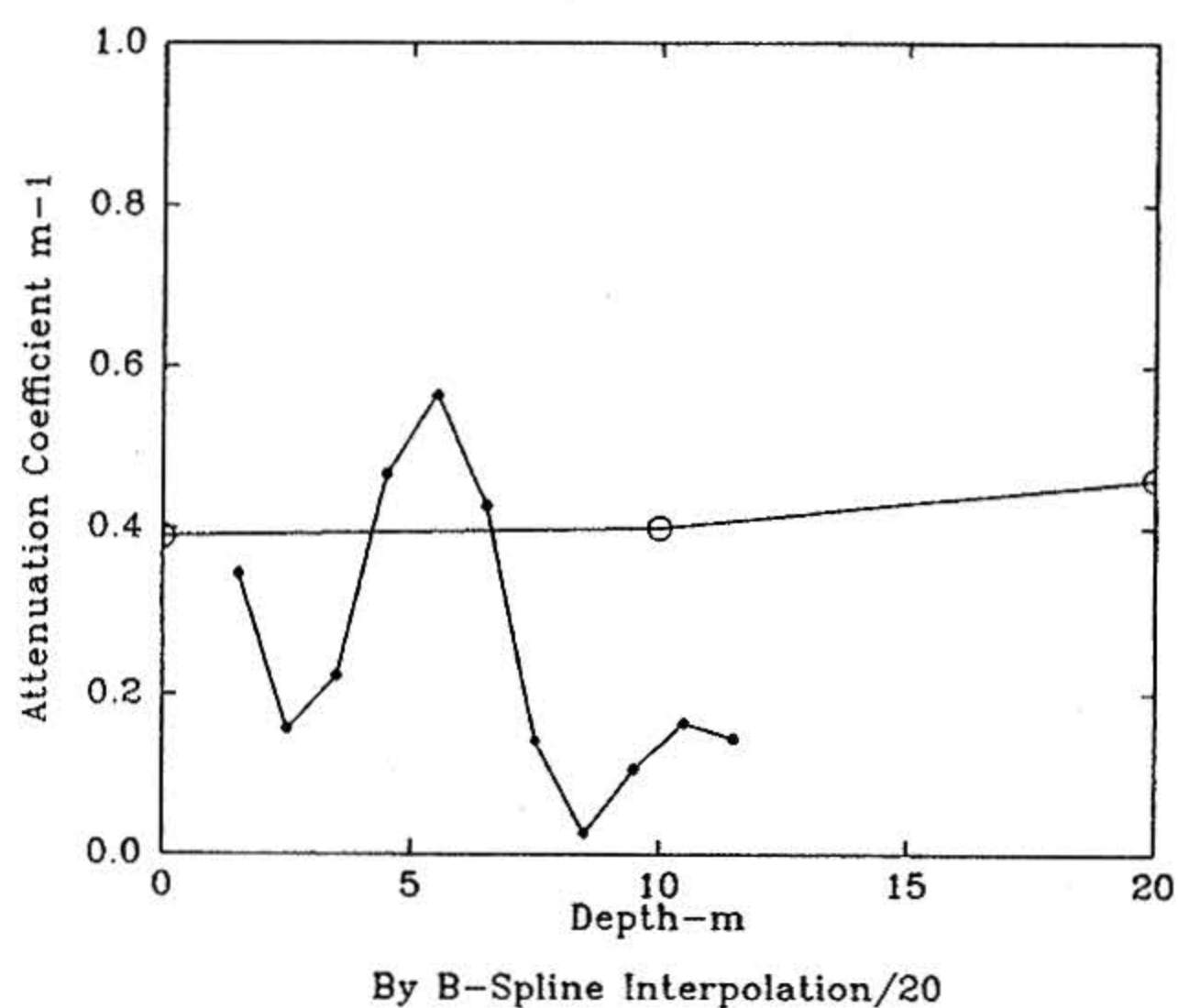


図 12-2 計測点3におけるレーザ方程式によるクロロフィル-a濃度 (•) と採水海水から求められたクロロフィル-a濃度 (○)

Fig. 12-2 Concentrations of chlorophyll-a by laser radar equation (•) and water analysis (○) at station 3.

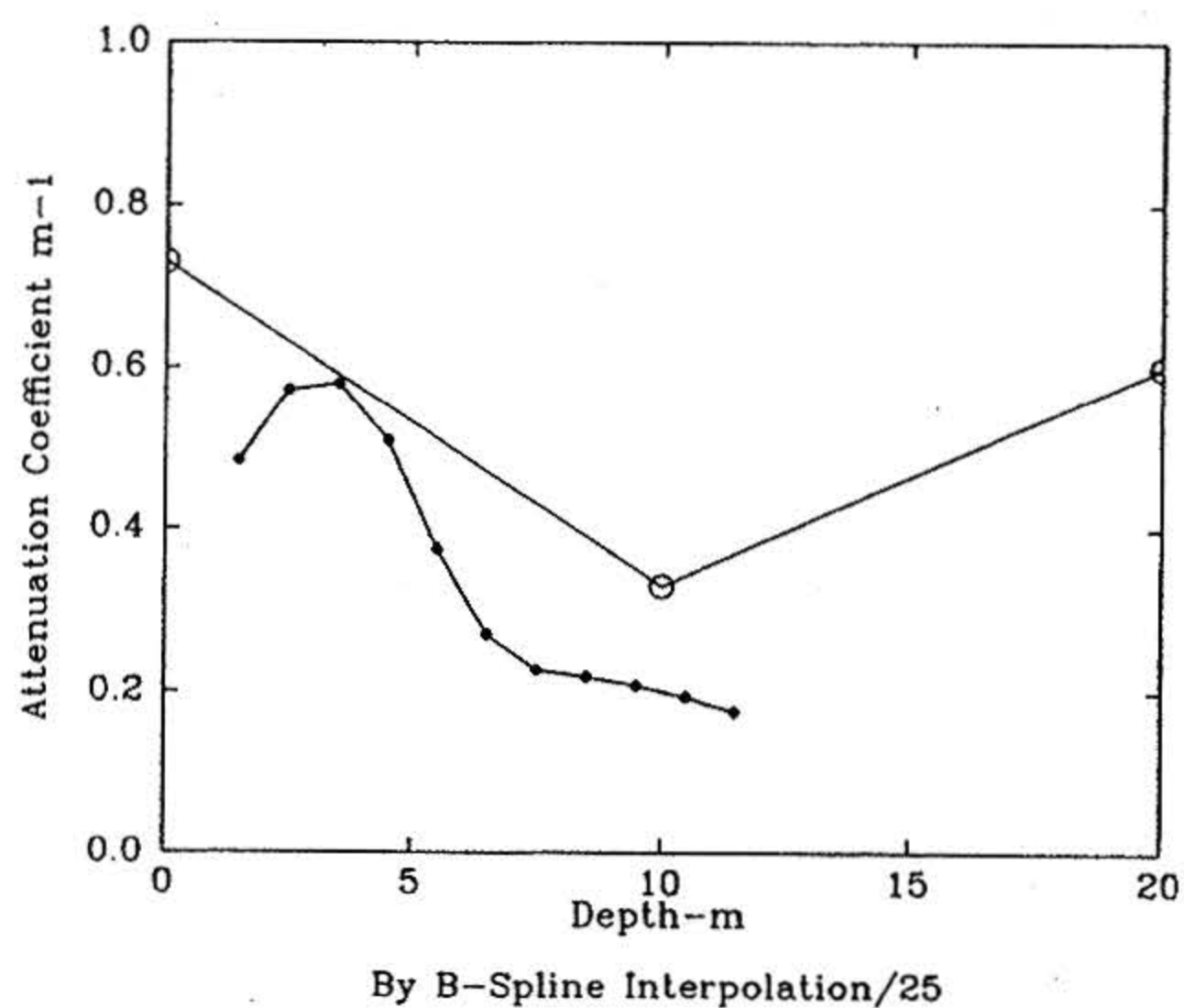


図 13-2 計測点4におけるレーザ方程式によるクロロフィル-a濃度 (•) と採水海水から求められたクロロフィル-a濃度 (○)

Fig. 13-2 Concentrations of chlorophyll-a by laser radar equation (•) and water analysis (○) at station 4.

参考文献

- 1) Hoge, F. E. and R. N. Swift, Airborne dual laser excitation and mapping of Phytoplankton in a Gulf Stream Warm Core Ring, *Applied Optics*, V. 22, No. 15, p. 2272-2281, (1983)
- 2) 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)
- 3) Bristow, M. P. F., 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*, V20, No. 17, p. 2889-2906, (1981)
- 4) Bristow, M. P. F., D. H. Bundy, C. M. Edmonds, and P. E. Ponto: Airborne laser fluorosensor survey of the Columbia and Snake rivers: simultaneous measurements of chlorophyll, dissolved organics and optical attenuation, *Int. J. Remote Sens.*, V6, No. 11, p. 1707-1734, (1985)
- 5) 浅沼市男, 宗山敬: 海洋レーザー観測装置の基礎実験について, 海科技センター試験研究報告, JAMSTECR23, p. 125-140, (1990)
- 6) Kim, H. H., Airborne bathymetric charting using pulsed blue-green lasers, *Applied Optics*, V16, No. 1, p. 46-56, (1977)
- 7) Browell, E. V., Analysis of Laser Fluorosensor Systems for Remote Algae Detection and Quantification, NASA, Technical Report, TN D-8447, 39pp, (1977)
- 8) 西条八束: クロロフィルの測定法, 陸水学会誌, 36巻3号, p. 103-109, (1975)
- 9) Drake, D. E., Distribution and Transport of Suspended Particulate Matter in Submarine Canyons Off Southern California, in *Suspended Solids in Water*, ed. by R. J. Gibbs, Plenum Press, New York and London, p. 137-153, (1974)
- 10) 花輪公雄, 三寺史夫: 三陸沿岸海域における水系の分布とその変動, 日本海洋学会誌, V42, No. 6, p. 335-446, (1987)

(原稿受理: 1990年5月24日)