

東京湾における蛍光，散乱およびCTDの水平方向の連続測定

辻 義人*¹ 原俊 明*¹ 佐竹 博*¹ 佐々木 建*¹

1978年9月8日，東京湾の金沢沖から観音崎方面へ1 m/sの速度で，CTD とバリオセンスⅢを移動させ，約5 kmにわたって表層水中の塩分，水温，蛍光および散乱のアナログ出力の記録を行った。後日，1秒ごとにA/D変換し，各項目について約5,000個のデータを得た。主成分分析の結果を参考として，測定区間を5海域に区分し，それぞれの海域について水温，蛍光および散乱のスペクトルを求めた。

海域によって，各スペクトルは，多少の相違を示したが，全般的には水温のスペクトルは乱流理論に従い，蛍光と散乱のスペクトルはDenman, et al. (1977)の仮説と一致することが認められた。また，Critical Wavelengthは約10 mであり，今までに発表された最小値（約100 m）よりも，かなり小さかった。

Spatial Variability of Fluorescence, Scattering and CTD in the Surface Waters of Tokyo Bay

Yoshito Tsuji*², Toshiaki Hara*²,
Hiroshi Satake*², Ken Sasaki*²

Horizontal variability of conductivity, temperature, fluorescence (an indicator of phytoplankton) and scattering was recorded using CTD and VARIOSENS which were moved at a speed of 1 m/s in the surface water along a 5 km transect from off Kanazawa to Kannonzaki of Tokyo Bay on 8 September 1978. The analog record of each variable was digitized at a constant interval of 1 s, producing about 5,000 data for each record. Principal component analysis indicates the presence of five distinct water types. Power spectral functions were calculated for temperature, fluorescence and scattering in each water type.

The slopes of spectra for these three variables were about $-5/3$ at the wavelengths from 2 to about 10 m. The change of spectrum slope from $-5/3$ to much smaller negative values ($-0.5 - 0$) is consistent with theoretical results of Denman, et al. (1977). Spectra of fluorescence and scattering are flatter than the spectrum for the temperature at wavelengths longer than about 10 m. In the present measurement, critical wavelength is about 10 m which is the shortest of the values which have been reported.

*1 海洋保全技術部

*2 Marine Environment Department

1. 序 論

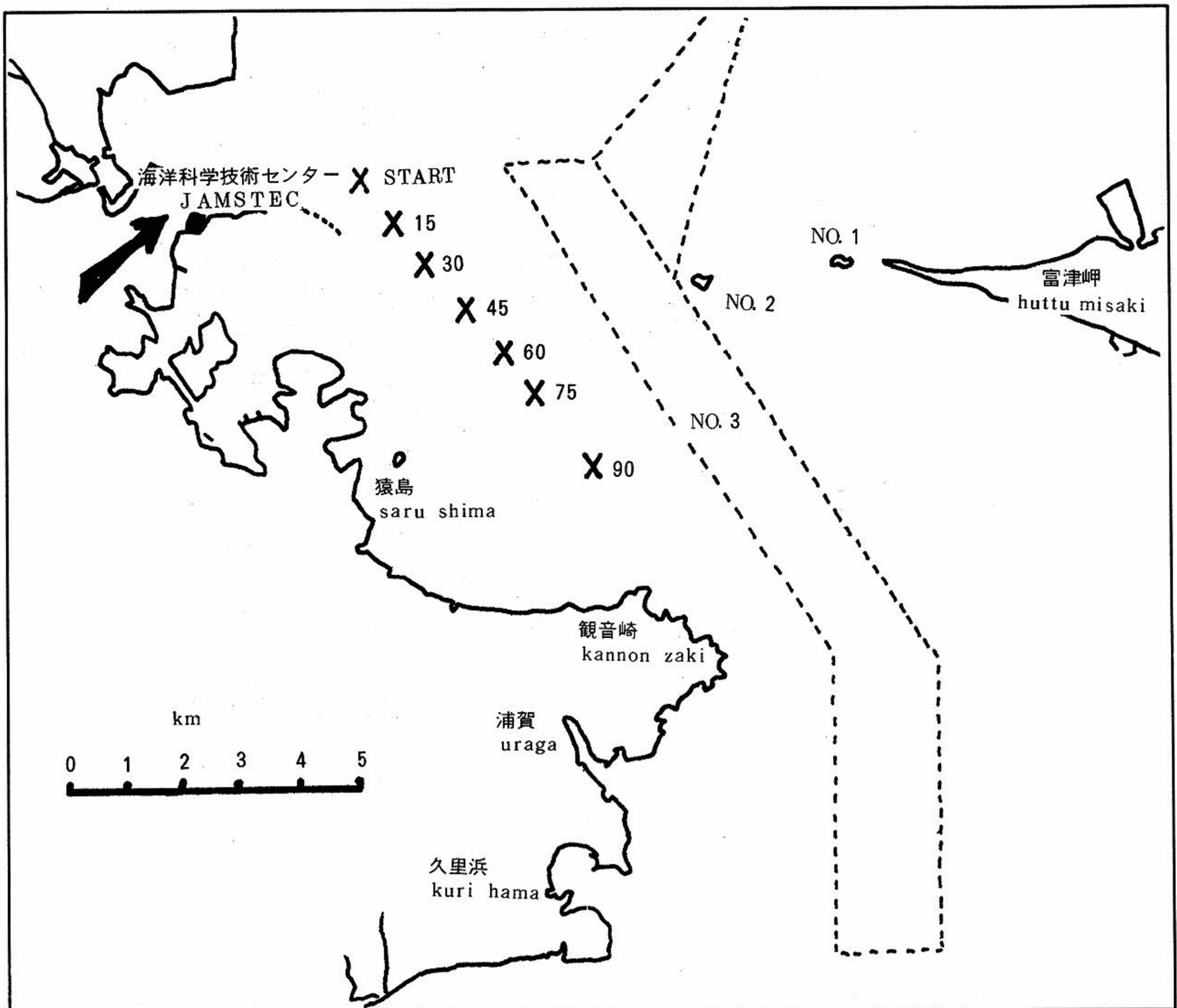
海域の生産力や生物資源量を正確に推定しようとすれば、生物の空間的な分布を詳細に知らなければならぬ。植物プランクトン量の目安と考えられる蛍光などの生物的諸量が、水温などの物理的諸量とともに、連続的に測定されている。特にプランクトンのパッチ構造の解明を目的として、水平方向の連続測定が多数報告されており、論文集も出版されている¹⁾。

しかし、従来、行われていた水平方向の連続測定では、サンプリング間隔が長かったり¹⁰⁾、特性

の異なる海域がひとまとめに解析されたり⁹⁾して、得られた情報が必ずしも十分な空間密度と正確さを持っているとは言えない。

ここでは、空間的に、より詳細で、より正確な多要素の情報を蓄積するための第1段階として、東京湾表層水中の電気伝導度、水温、蛍光および散乱の連続測定を行い、電気伝導度を除く、3者についてスペクトル解析を行ったので報告する。

なお、この測定は、当センターで開発中の曳航型海洋観測システムのセンサー試験を兼ねて行った。



×印とその右側の数字はそれぞれ船位と出発後の時間 (min) を示す。

The symbol × and the figure in the right of the ×, show the measuring point and time(min) after start, respectively.

図 1 測定海域
Location of the measured track.

2. 方 法

2.1 海域測定

測定海域を図1に示す。

1978年9月8日の13時30分に東京湾の金沢沖(図中のSTART点; N 35° 19' 22", E 139° 41' 15")から観音崎方向へ測定を開始し、15時に終了した(終点; N 35° 16' 50", E 139° 43' 56")。測定区間は約5 kmである。

図2に示すように、CTD(沖電気工業(株)製)とバリオセンスⅢを実験船の舷側の水深1 mに固定した。

CTDの精度は仕様によると、それぞれ±0.03 m σ /cm, ±0.05°C, ±0.03 kg/cm³である。バリオセンスⅢ(IMPULSPHYSIK社製)は、蛍光と散乱を同時に測定することができる²⁾。本来、バリオセンスⅢの出力は対数変換されているが、今回の入力範囲は小さかったので、出力は入力に比例していたとみなせる。したがって、本報告書中の蛍光と散乱の値(単位; V)は、海中の蛍光、または散乱物質濃度の相対値と考えてよい。

できるだけ正確に2 kt(1 m/s)でセンサーを移動させるため、つぎのような工夫を行った。

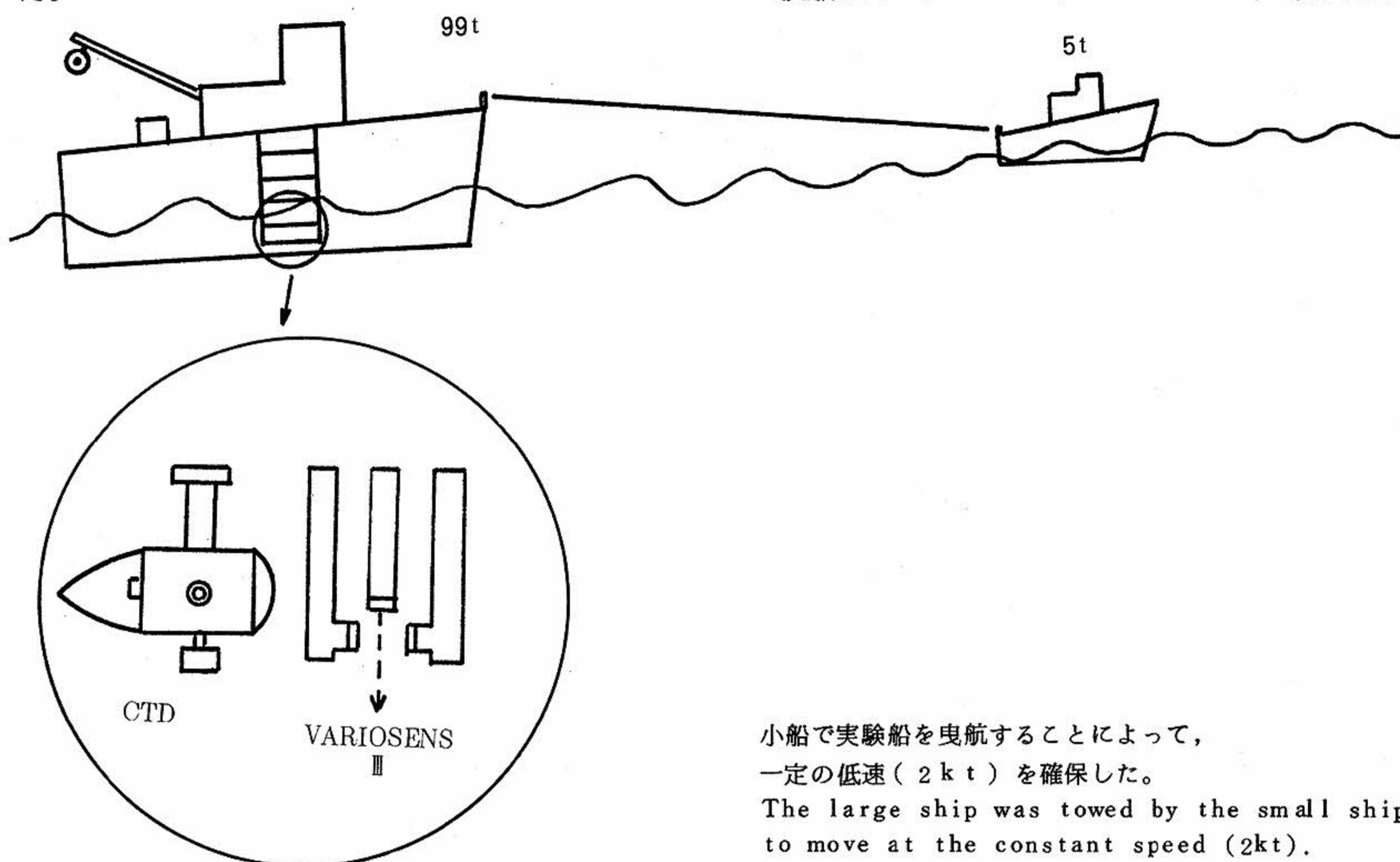


図2に示すように、推進器を停止した99 tの実験船を5 tの小船で曳航することによって、実験船を低速に保持し、かつ直進させようとした。一般的に、船舶を低速で直進させることは困難とされているからである。流木テストで船速を確認し、小船を2 ktで移動させた。図1中の×印は15 minごとにプロットした船位を示している。少くとも出発後、75 minまでは×印が一定間隔に並んでいることから、この方法は有効であったといえる。

測定時は全測定海域にわたって、一面に赤潮が認められた。湾内水域(後述)では、数度、水くらの群を横切って測定を行った。

当日は、晴天で、東の風に伴う、やや強い波浪(シーステート3)の海況であった。出発点付近と終点付近で測定した塩分、水温、蛍光および散乱の鉛直分布は、表層水が強く混合されていたことを示す。したがって、実験船の動揺によって生じるセンサーの上下動は、各測定値に影響を与えなかったといえる(付記1参照)。

2.2 データの記録と処理

データの流れを図3に示す。

CTDとバリオセンスⅢのアナログ出力を実験船上のアナログカセットデータレコーダ(TEAC,

小船で実験船を曳航することによって、一定の低速(2 kt)を確保した。

The large ship was towed by the small ship to move at the constant speed (2kt).

図 2 測 定 方 法

Measuring method.

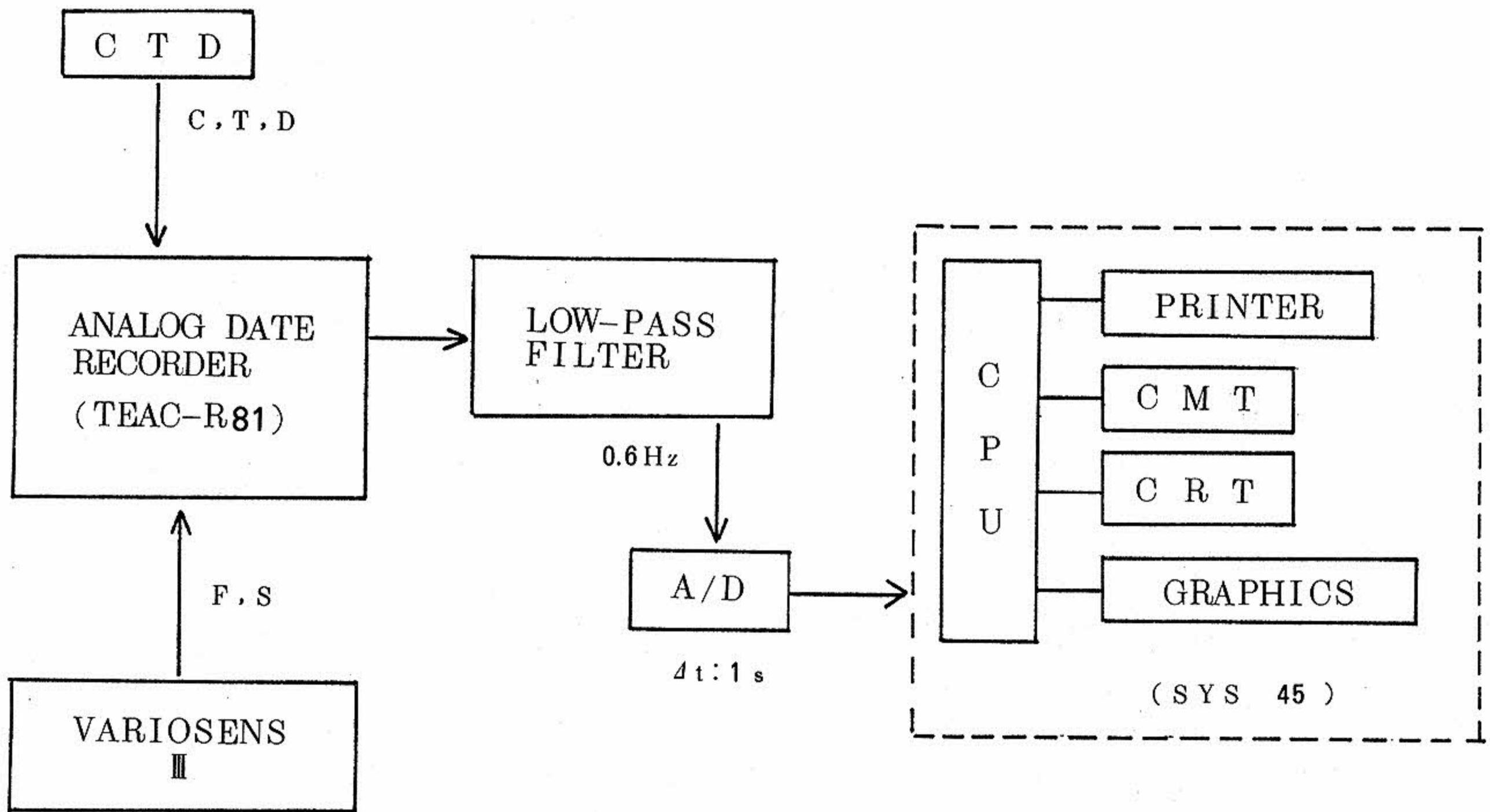


図 3 データの流れ
Flow chart of data

R 81) に記録した。後日、陸上でアナログデータを再生し、0.6 Hz のローパスフィルターを通したのち、10 ビットで A/D 変換 (サンプリングタイム; 1 sec) し、卓上コンピュータ (YHP, SYS 45) で処理した。

センサーの移動速度が 1 m/s なので、サンプリングタイムが 1 sec だとすると、各データは 1 m ごとにサンプリングされたことになり、本測定時の空間的な分解能は 1 m といえる。なお、使用した CTD の水温センサーの時定数は 0.3 sec であり³⁾、1 sec のサンプリングタイムは妥当なものである。また、水温センサーよりも、応答が早い、他のセンサーについても、同様である。

2.3 データの解析

水塊の特性を考慮して、測定区間を区分した。この方法を以下に述べる。

まず、出発点から終点まで 50 m ごとに平均した約 100 組のデータを主成分分析する。つぎに第 1 主成分得点と第 2 主成分得点からなる平面上に、これらのデータを出発点から順次プロットする。最後に、その平面上で同じ傾向を示す連続したデータ群を同一の水塊と仮定し、デ

ータ群、すなわち、測定区間を区分する。なお、主成分分析を行うための変数の選択は、辻ら (1979)⁴⁾ が底質の解析に使用した手法に準じた。

区分された海域ごとに水温、蛍光および散乱のスペクトル解析を行った。このとき、日野 (1978)⁵⁾ の著書に従って、作成したプログラムを使用し、スペクトルウィンドーをハミングとした Blackman—Tukey 法によってスペクトル解析を行った。

3. 結果と考察

3.1 データの概要

得られたデータの概要を図 4 に示す。

これは 5 m ごと (5 個中 1 個) のデータをプロットしたもので、横軸は出発点からの水平距離を示す。3, 100 m あたりでアナログデータレコーダの記録テープを交換したので、実際には約 5 min の無記録部分がある。それは約 300 m の水平距離に相当するが、その前後の記録をつなぎ合わせて示してある。この影響は塩分のデータの段差となって現われている。

図 4 では水塊の差異を明瞭に示す。1, 000 ~

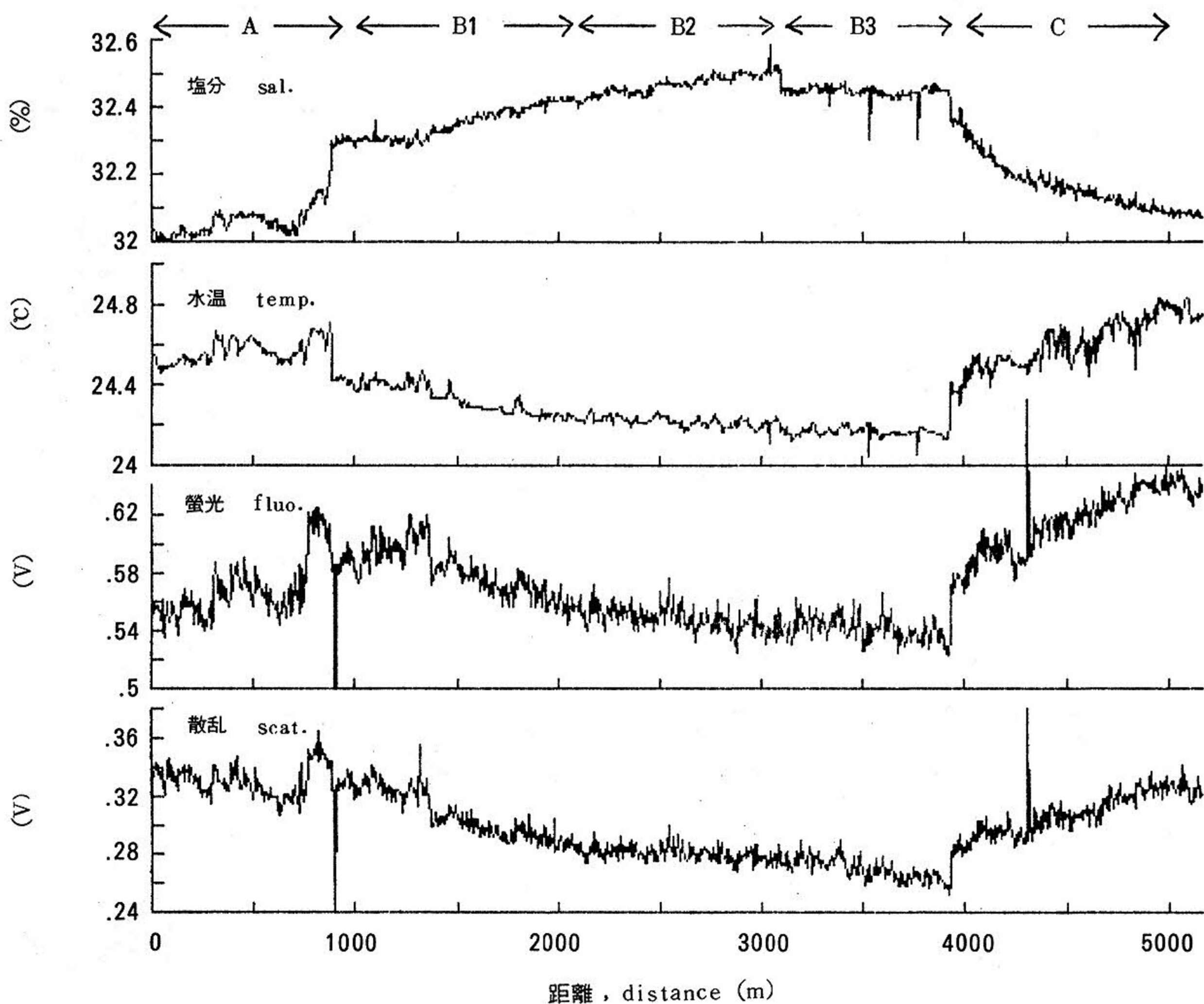


図4 表層水中の塩分, 水温, 蛍光および散乱の水平方向の変動
Horizontal variability of salinity, temperature, fluorescence and scattering in the surface waters of Tokyo Bay.

4,000 mでは, 高塩分, 低水温, 低蛍光および低散乱を示す。これは, 図1の出発後15~50 minの区間に相当し, 東京湾の中央部に存在する湾外水の影響を受けている水塊の特徴を示している。一方, その両端のデータは低塩分, 高水温, 高蛍光および高散乱を示す。これは神奈川県側の岸に近い湾内水の特徴を示している。

3.2 主成分分析による海域の区分

図4で見られる水塊の相違を明確に理解するため, 全測定区間について主成分分析を行った。

50 mごとに平均した103組のデータの相関行列を表1に示す。塩分と水温の相関は著しく高く, -0.92 を示している。各測定項目の度数分布は2峰性の分布を示し, それらのピーク

表1 相関行列
Correlation matrix

	塩分 sal.	水温 temp.	蛍光 fluo.	散乱 scat.
塩分 sal.	1	-0.92	-0.59	-0.86
水温 temp.		1	0.82	0.83
蛍光 fluo.			1	0.64
散乱 scat.				1

表 2 主成分分析の結果
Results of principal component analysis

変数 variables	第 1 主成分 1st component		第 2 主成分 2nd component		第 3 主成分 3rd component	
	固有ベクトル eigenvectors	因子負荷量 factor loading	固有ベクトル eigenvectors	因子負荷量 factor loading	固有ベクトル eigenvectors	因子負荷量 factor loading
水温 temp.	0.61	0.96	-0.02	-0.01	0.79	0.27
蛍光 flou.	0.56	0.89	0.72	0.38	-0.37	-0.13
散乱 scat.	0.56	0.90	-0.69	-0.36	-0.48	-0.16
固有値 eigenvalues	2.53		0.28		0.11	
寄与率 variance (%)	85		10		4	
累積寄与率 variance % cumulative	85		95		99	

位置と波形の相違から主成分分析を行う変数の組として水温、蛍光および散乱を選択した⁴⁾。

主成分分析の結果を表 2 に示す。

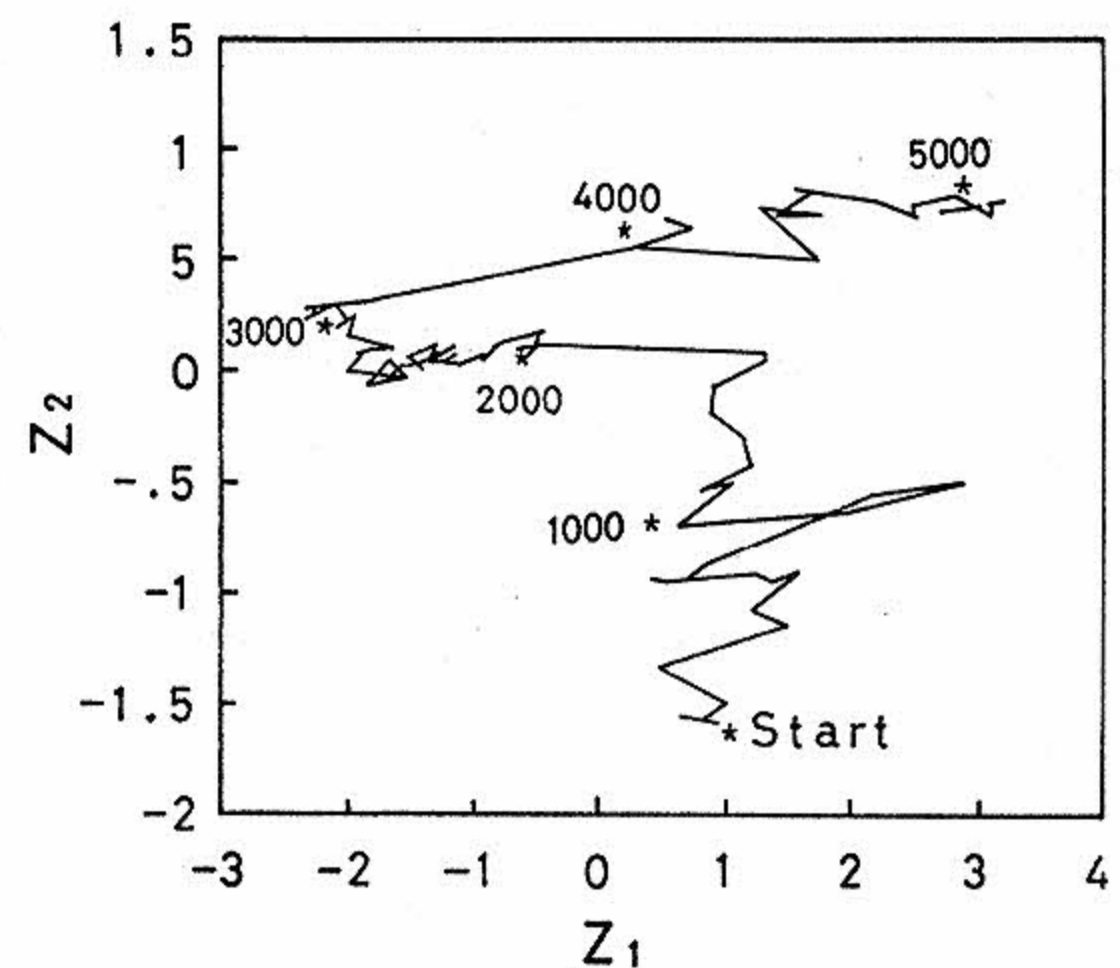
第 1 主成分は水温、蛍光および散乱と強い正の相関を有し、全データの分散の 85% を占める。

図 5 は第 1 および第 2 主成分得点をそれぞれ横軸および縦軸とした散布図である。図中の数字は出発点からの水平距離 (図 4 の横軸) を表わす。

この図から 2 方向のデータの流が読取れる。一つは、出発点から 1,000 m 点を経て 5,000 m 点に至るデータ群で、図中では急な勾配を示す。他の一つは 2,000 m 点から 3,000 m 点に至るデータ群と 3,000 m 点から 4,000 m 点を経て 5,000 m 点に至るデータ群で、図中では緩やかな勾配を示す。急な勾配のデータ群は前述の湾内水に対応し、緩やかな勾配のデータ群は湾外水の影響を受けている水塊に対応する。

その結果、5,000 m (観音崎の北部) 付近で二つの方向のデータが合流することから、この付近で両水塊が混合していることが示唆される。

この図 5 に示すデータ群のパターンから判断して、測定区間を 5 区間に分けた。図 4 に表示



数字は出発点からの水平距離 (m) を示す。
Figures show the distance (m) from the start point.

図 5 第 1 および第 2 主成分による散布図
Surface data plotted by 1st and 2nd principal component.

してあるように、出発点から始まって A, B₁, B₂, B₃, C 区間と名付ける。各区間に含まれるデータ数はそれぞれ 880, 1,000, 1,000, 600, 1,000 である。このうち、A と C 区間が

湾内水域で、 B_1 、 B_2 および B_3 が湾外水の影響を受けている水域である。

3.3 スペクトル解析

A、 B_1 、 B_2 、 B_3 および C 区間で、最大ラグ数を 100 として区間ごとに行った水温、蛍光および散乱のスペクトル解析結果をそれぞれ図 6 に示す。

これらの図ではスペクトル相互の重なりを防ぐため、各スペクトルを上下方向に少しずらせて見やすくしてある。

水温の変動のスペクトルは全測定区間にわたってほぼ $-5/3$ 乗のスロープを示した。これは、表層水の水温の変動が乱流拡散に従っていることを示す⁶⁾。特に A、 B_1 および B_2 区間では、2~100 m の空間スケールでは明瞭である。

B_3 と C 区間では、数 10 m 以下の空間スケールで $-5/3$ 乗よりも緩やかなスロープを示した。この原因は不明であるが以下に多少の検討を試みた。

B_3 区間は図 5 中の位置から見て、他区間に比べて湾外水の影響を最も強く受けていると考えられる。算出した水温の標準偏差は 0.02°C であり、他区間に比べて水温の変動が最も小さい。したがって、今回使用した水温計の精度 ($\pm 0.05^\circ\text{C}$) が問題となる。水温計の測定誤差が白色雑音に類似し、そのスペクトルは周波数に関係なく一定であるとする。空間スケールが小さくなればなるほど、水温の変動振は小さくなるので、ある空間スケールでは水温のスペクトルと水温計の測定誤差のスペクトルが一致する。これよりも小さい空間スケールでは、水温計の測定誤差のスペクトル(定数)が水温のスペクトル($-5/3$ 乗のスロープ)を上回る。したがって、測定した水温のスペクトルは、両スペクトルの和となるので、両スペクトルの一致点あたりで $-5/3$ 乗よりも緩やかなスロープとなり、さらに小さい空間スケールではほとんど傾きがなくなる。この両スペクトルの一致点を B_3 区間について算出すると約 13 m となり(付記 2 参照)、 B_3 区間の水温スペクトルが変曲を始める空間スケールとほぼ一致する。一方、バリオセンス III の感度は水温計と比較して、かなり高いので、10 m 以下の空間スケールで蛍光と散乱のスペクトルが $-5/3$ 乗のスロープを示して

いることは、上記の推論を支持する。

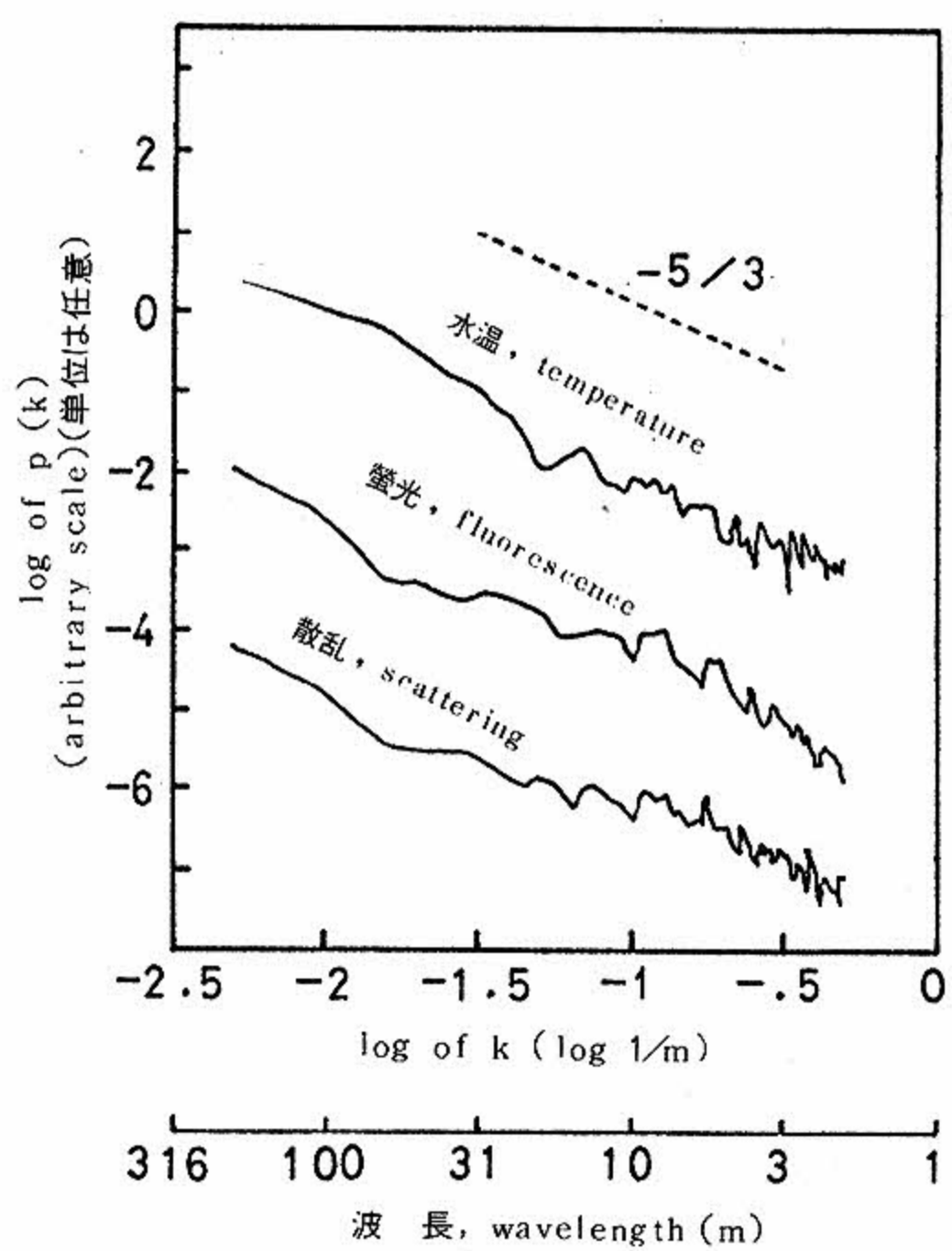
C 区間では、前述のごとく、湾外水の影響を受けている水塊と湾内水が混合していると考えられる。3~10 m の空間スケールに生じた緩やかなピークの原因の一つとして、この両水塊の混合による空間的な水塊の不均一性を考慮する必要がある。

蛍光と散乱のスペクトル形は、ほぼ一致し、区間によって変化しなかった。すなわち、このスペクトル形は、約 10 m 以下の空間スケールでは $-5/3$ 乗のスロープを示し、約 10 m 以上の空間スケールでは $-5/3$ 乗よりも緩やかである。

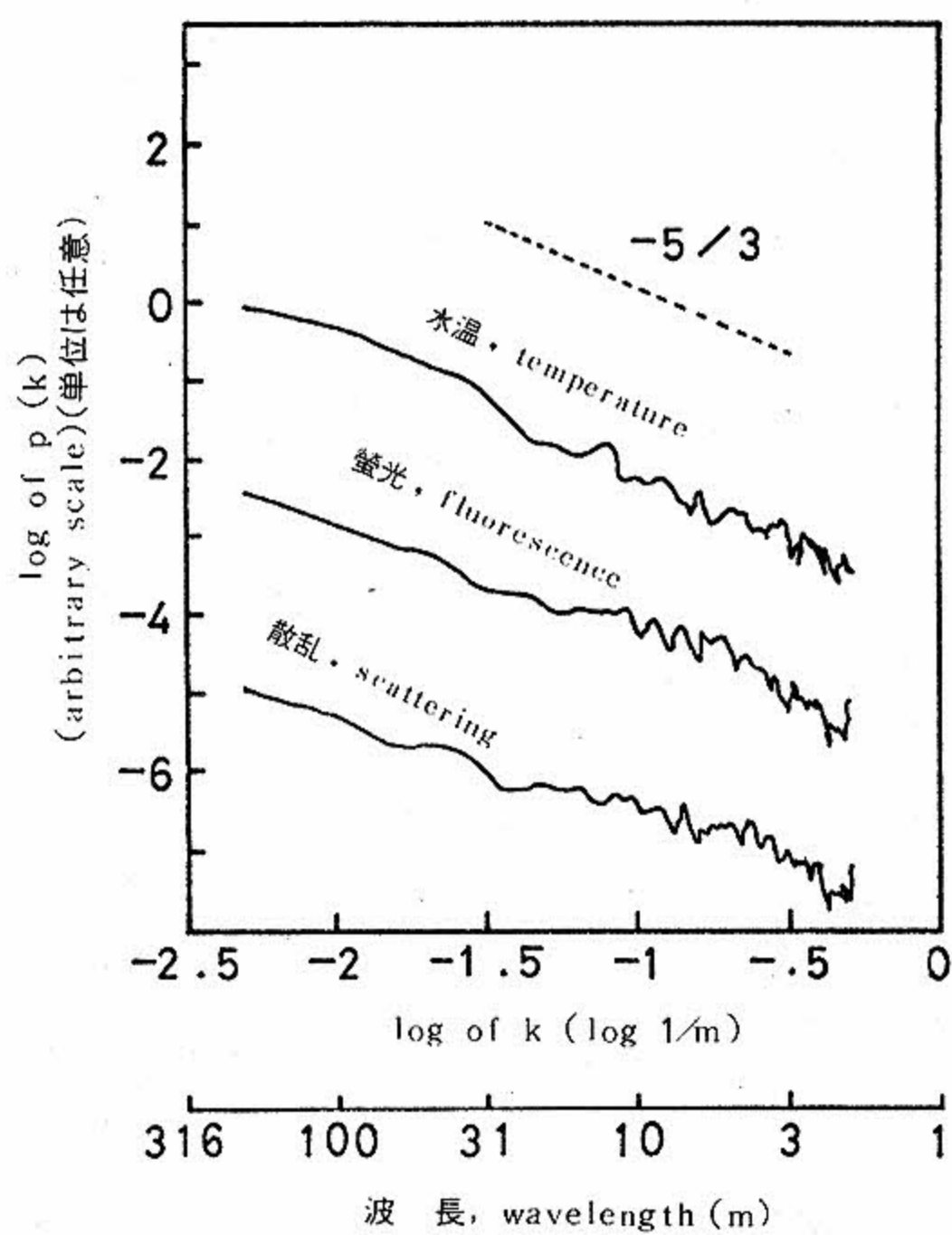
Denman, et al. (1977)⁷⁾ は、植物プランクトンの空間的変動のスペクトルを、つぎのように仮定した。すなわち、小さい空間スケールでは、海の乱流のうずの寿命が生物活動の特性時間に比べて短かく、植物プランクトンの濃度分布は、主として環境流体の動きによって決まり、そのスペクトルは海の乱流と同じ $-5/3$ 乗のスロープを持つ。大きい空間スケールでは寿命の長い、大きいスケールのうずが関与するので、プランクトンの増殖の影響が効いてきてスペクトルのスロープは $-5/3$ 乗よりも緩やかとなる⁶⁾。スロープの傾きが -1 となるときの波数を Critical Wavenumber(これに対応する空間スケールを Critical Wavelength)とした。したがって、Critical Wavelength は、生物的要因が物理的な要因に卓越する空間スケールの目安と考えられる。

蛍光の変動は植物プランクトン量の変動に、ほぼ等しいと考えられるので、蛍光スペクトルのスロープの変化から、Critical Wavelength は約 10 m であるといえる。今までに測定された Critical Wavelength の最小値⁸⁾ は、米国の Tahoe 湖で 9 月に得られた約 100 m である。今回の測定で得られた Critical Wavelength はこれに比べてかなり小さい。このことは、測定海域の条件から判断して、妥当な結果といえる。

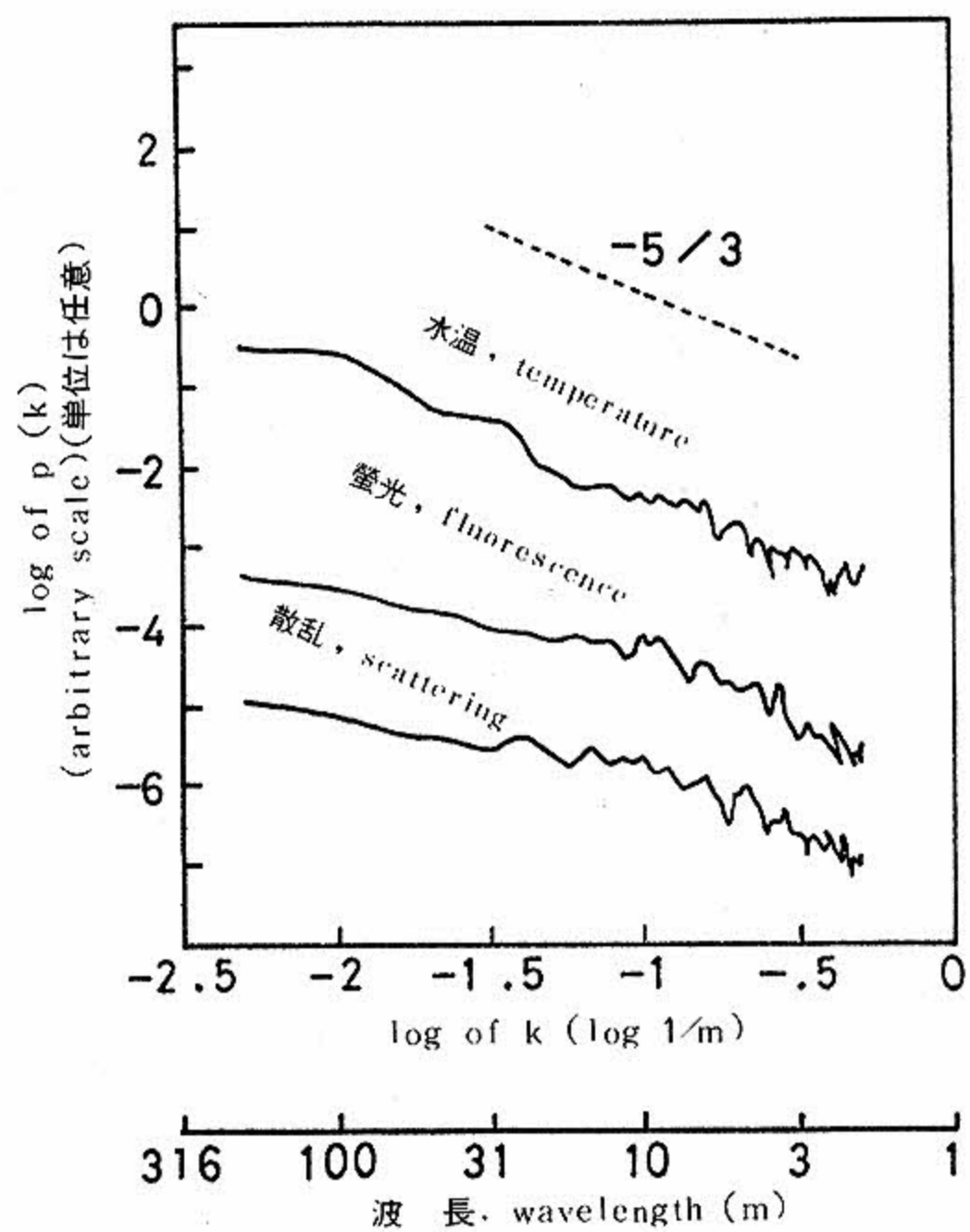
大久保(1979)⁶⁾によると、植物プランクトンによって構成されるパッチの限界サイズ(Critical Wavelength に相当する)は、乱流の強さが減少するとき、植物プランクトンの増殖活動が増加するとき、動物プランクトン



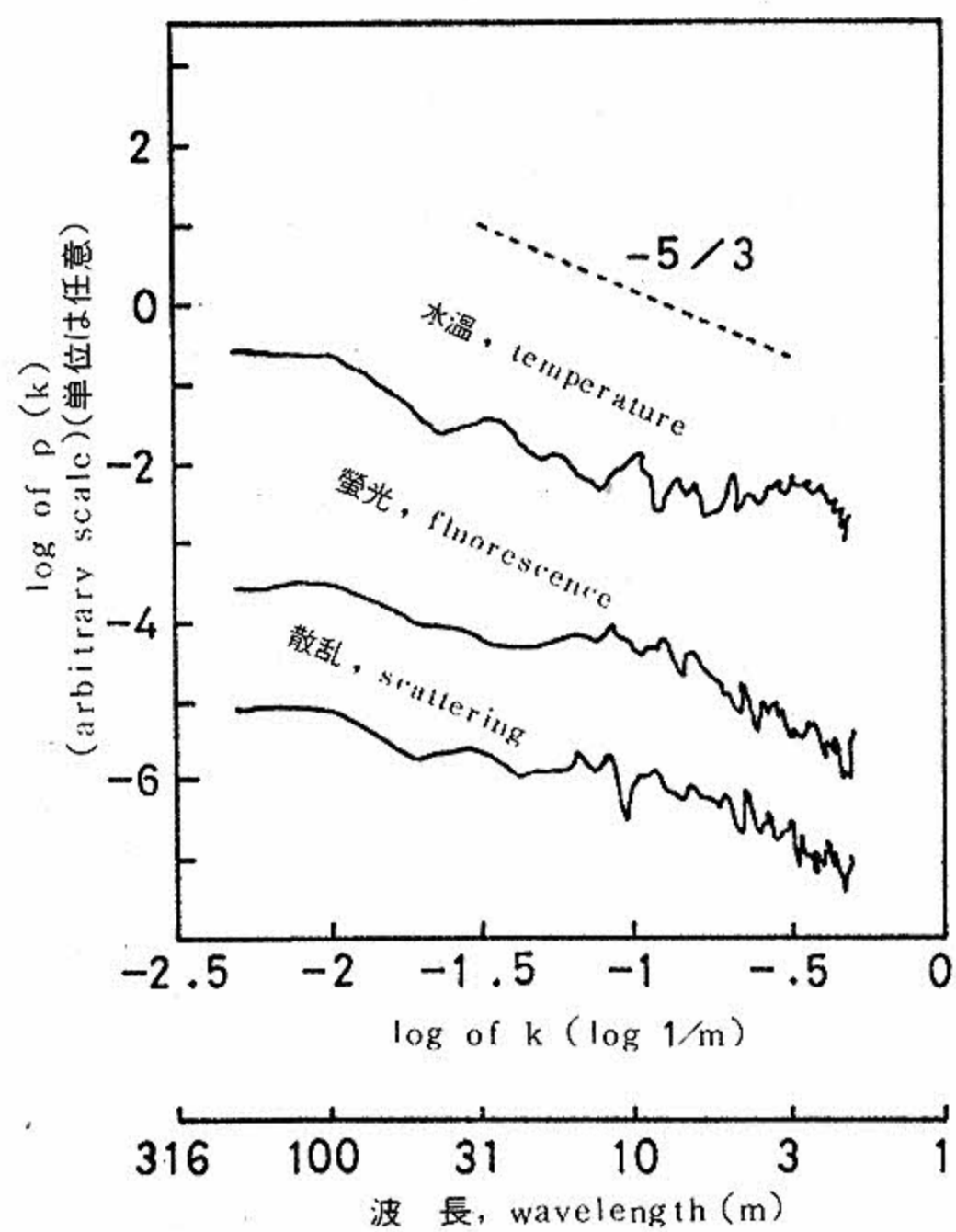
(1) A区間, tract A



(2) B₁区間, tract B₁



(3) B₂区間, tract B₂



(4) B₃区間, tract B₃

各スペクトルを上下方向にずらせてある。 Each spectrum

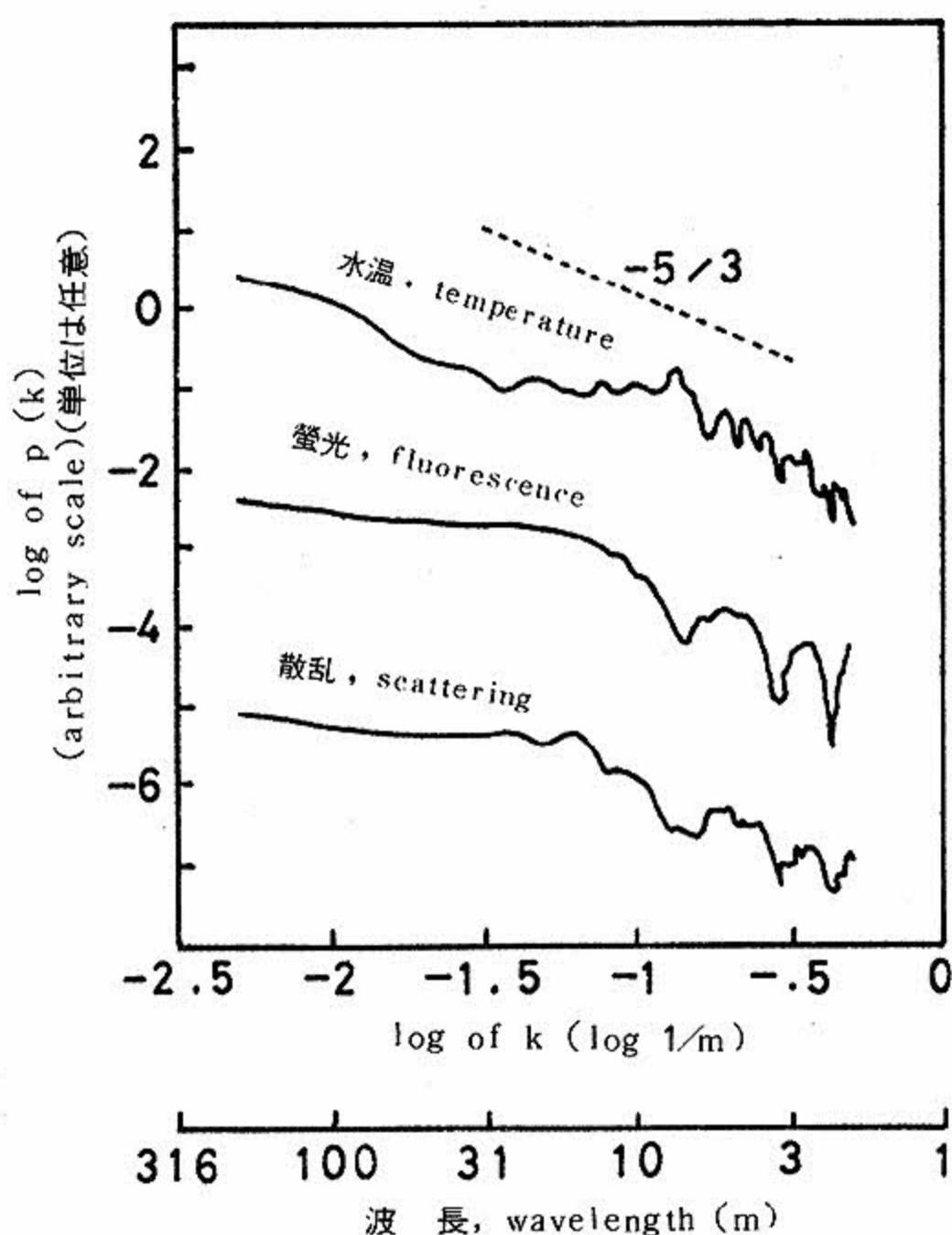
図6 水温, 蛍光および散乱のスペクトル
Spectral density function of temperature, fluorescence

の捕食圧が低下するときに減少すると述べている。

今回の測定を行った東京湾では、内湾であること、赤潮が発生していたことなど、植物プランクトンのパッチサイズを減少させる要因が強く働いていたと考えられる。なお、赤潮の発生は捕食圧の減少と関係のあることが、西沢(1977)¹¹⁾によって論議されている。

C区間の蛍光と散乱のスペクトルは、他の区間と比べて二つの点で異なっていた。第1は蛍光と散乱のスペクトル形の不一致、第2は、10 m以下の空間スケールでのスペクトル形についてである。すなわち、C区間の蛍光と散乱のスペクトル形が緩やかな数個のピークを示すのに対して、他の区間のそれらは微細な多数のピークを含む直線状を示すことである。これらの相違の原因は明らかではないが、水温のスペクトルのときと同様に、C区間が湾外水よりの水塊と湾内水との混合域であることを考慮する必要がある。

従来行われていた水平方向の変動の解析では、水塊の特性をさほど考慮せずに、得られた連続



(5) C区間, track C
was shifted, vertically
and scattering

データの全区間について、機械的にスペクトル解析を行っていた。たとえば、Lekan and Wilson (1978)⁹⁾は、Long Island Soundとその周辺の海域で得られた192 kmの連続したデータをまとめてスペクトル解析を行っている。このような粗い解析手法では、空間的な変動の特徴を十分に理解し得ないのではないかと考えられる。

C区間のスペクトルに顕著な相違の見られたことは、水塊の影響に十分な注意を払ったために得られた今回の解析手法の成果である。海域の特性に合わせた丁寧な測定および解析手法の開発が、これからの課題とならなければならない。

4. 結 び

夏季の東京湾の表層水のデータを約1,000 mずつの5区間に分け、各区間の水温、蛍光および散乱のスペクトル解析を行い、以下の知見を得た。

- (1) 水温、蛍光および散乱のスペクトルは、区間によらず、それぞれ、ほぼ同様の傾向を示した。
- (2) 水温のスペクトルは、測定した空間スケールのすべてにわたって、乱流理論から予測される $-5/3$ 乗のスロープを示した。
- (3) 蛍光と散乱のスペクトルは、ほぼ同様なスペクトル形を示した。小さい空間スケールでは $-5/3$ 乗のスロープを示し、大きい空間スケールではスロープの傾きがより緩やかとなった。これはDenman, et al. (1977)の仮説と一致する。
- (4) 上記の仮説を容認するとすれば、蛍光と散乱のスペクトルのCritical Wavelengthは約10 mであった。これは今までの報告(約100 m)と比較してかなり小さい。
- (5) 本測定では1 m間隔で水平方向のサンプリングを行った。また、水塊の特性に注意を払って海域の区分を行ったのち、各海域について、それぞれスペクトル解析を行った。このような解析手法によって、従来得られなかった知見を得ることができた。測定時の密なサンプリングとデータ解析時における対象海域の分類は、水平方向の変動解析を行う上で、重要である。

文 献

- 1) Steele J.H., "Spatial pattern in plankton communities" (1978), 470 pp., Plenum Press.
- 2) Frungel F., Koch C., 1974, "Practical experience with the 'VARIOSENS' equipment in measuring chlorophyll concentrations and fluorescent tracer substances, like rhodamine, fluorescein and some new substances", Ocean' 74 (2) 241 - 247
- 3) 原俊明, 辻義人, 佐竹博, : 1979, "水温センサーの時定数測定" JAMSTECTR (3) 89 - 93
- 4) 辻義人, 江村富男, : 1979, "多変量解析手法による底質データの解析" JAMSTECTR (3) 94 - 103
- 5) 日野幹雄, : "スペクトル解析" (1978), 300 pp., 朝倉書店
- 6) 大久保明, 1979, "パッチネスのスペクトル" 海洋と生物 1(2), 48 - 52
- 7) Denman K., Okubo A., Platt T., 1977, "The chlorophyll fluctuation spectrum in the sea" Limnology and Oceanography 22(6), 1033 - 1038
- 8) Powell T.M., Richerson P.J., Dillon T.M., et al., 1975, "Spatial scales of current speed and phytoplankton biomass fluctuation in lake Tahoe", Science 189 (4208), 1088 - 1090.
- 9) Lekan J.F., Wilson R.E., 1978, "Spatial variability of phytoplankton biomass in the surface waters of Long Island" Estuarine and Coastal Marine Science 6, 239 - 251
- 10) Estrada M., Wagensberg M. 1977, "Spectral analysis of spatial series of oceanographic variables" J. exp. mar. Biol. Ecol. (30) 147 - 164
- 11) 西沢敏, "海洋低次生産試論—海の生物郡集と生産—", 西沢敏, 石田力一, 川崎健, 編 (1977), P. 69 - 161, 恒星社厚生閣.

付記(1) センサーの上下動の影響

舷側に固定したセンサーは、実験船の動揺によって上下動を行う。今回測定した水温、蛍光、散乱の水平方向の変動は、はたして、この影響を受けたかどうか、を以下に検討する。

付図A-1は水温、蛍光、散乱およびセンサー深度の変動の一例を示す。

センサーは深度0.7~0.9mの間で上下の変動を行っている。他の測定項目にも顕著な変動が認められる。ところが、変動の一周期が水平距離で10m以内のものに注目すると、これらはセンサーの深度データ中でよく見られるのに対して水温、蛍光および散乱のデータ中ではほとんど認められない。

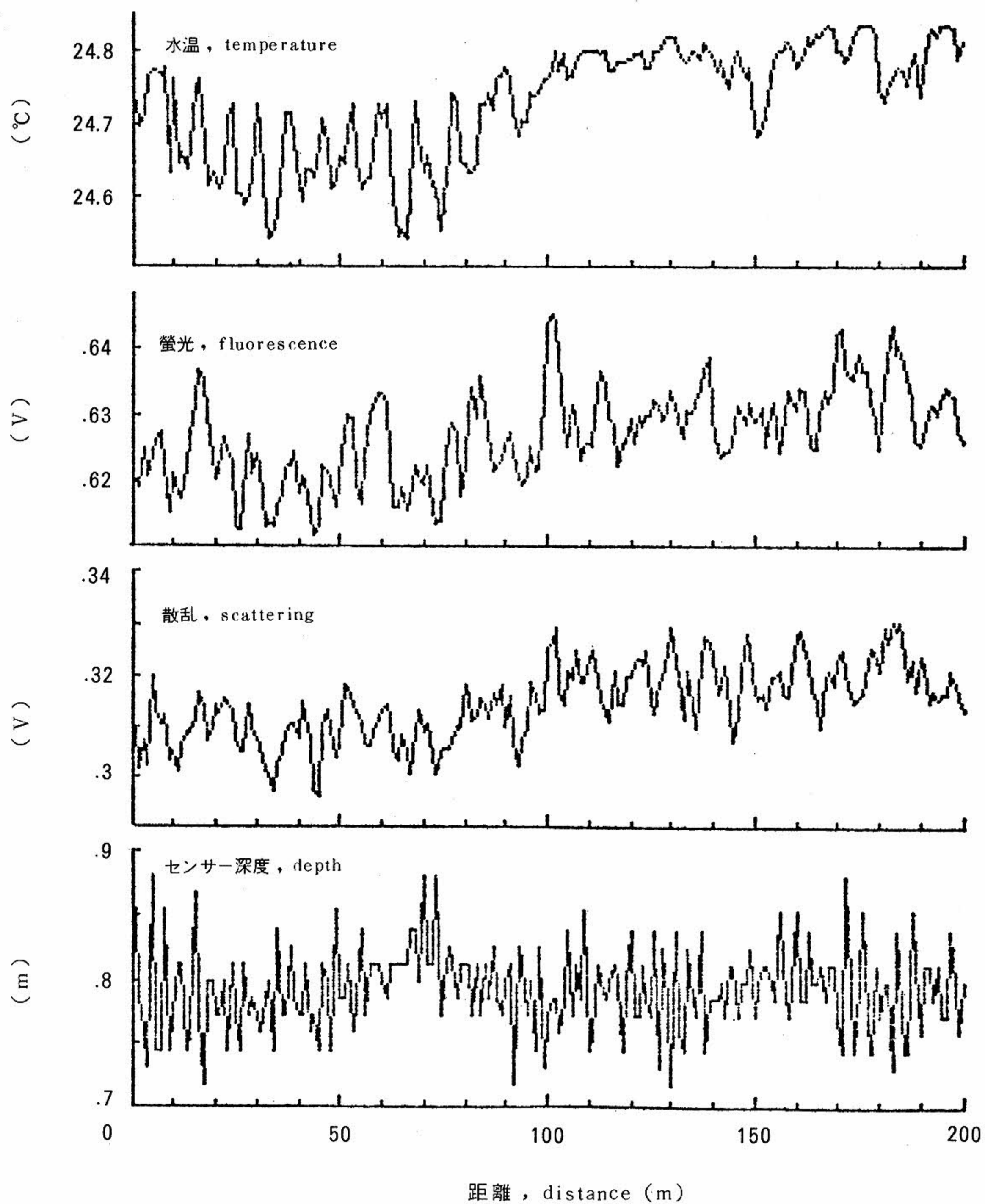
付図A-2は付図A-1のセンサー深度と蛍光についてそれぞれスペクトル解析を行った結果を示す。

センサー深度では波数0.3~0.4つまり変動の

一周期に要する水平距離が2~3mあたりにスペクトルのピークを示す。しかし、蛍光はセンサー深度に比べて、特に顕著なピークを示さず、全体的な傾向として波数の増加に伴って高さが減少している。これらの関係は、センサーの深度の変動と水平方向の蛍光の変動が無関係であることを示す。また水温と散乱についても同様に考えられる。

付図A-3は別の観点から検討を行うため、出発点付近と終点付近の塩分、水温、蛍光および散乱の鉛直分布を示す。

出発点付近では13m以浅、終点付近では3m以浅が強く混合されていたことがわかる。したがって、たとえセンサーの深度が20cmの変動を行ったとしても、各測定値の鉛直勾配は無視できるので、センサーの深度の変動はその測定値の変動に影響を与えないと言える。

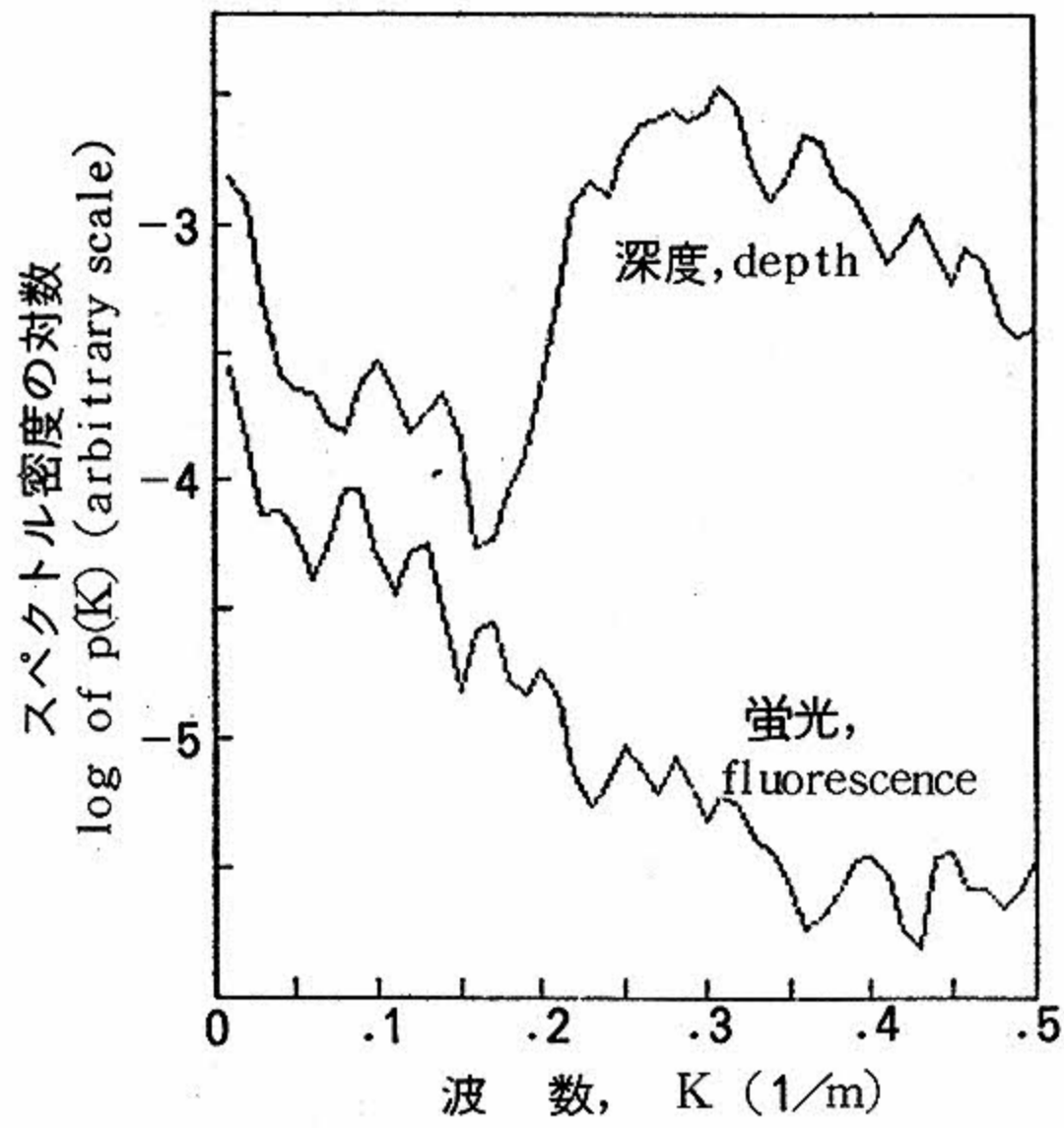


付図A-1 水温, 蛍光, 散乱, センサー深度の水平方向の変動例

An example of horizontal variability of temperature, fluorescence, scattering and sensor's depth.

以上, 今回の測定では, 実験船の動揺に伴うセンサーの上下動は, それによって測定された

水平方向の変動値に影響を与えなかったと考えられる。



付図A-2 センサー深度と蛍光の変動のスペクトル

Spectral density function of sensor's depth and fluorescence.

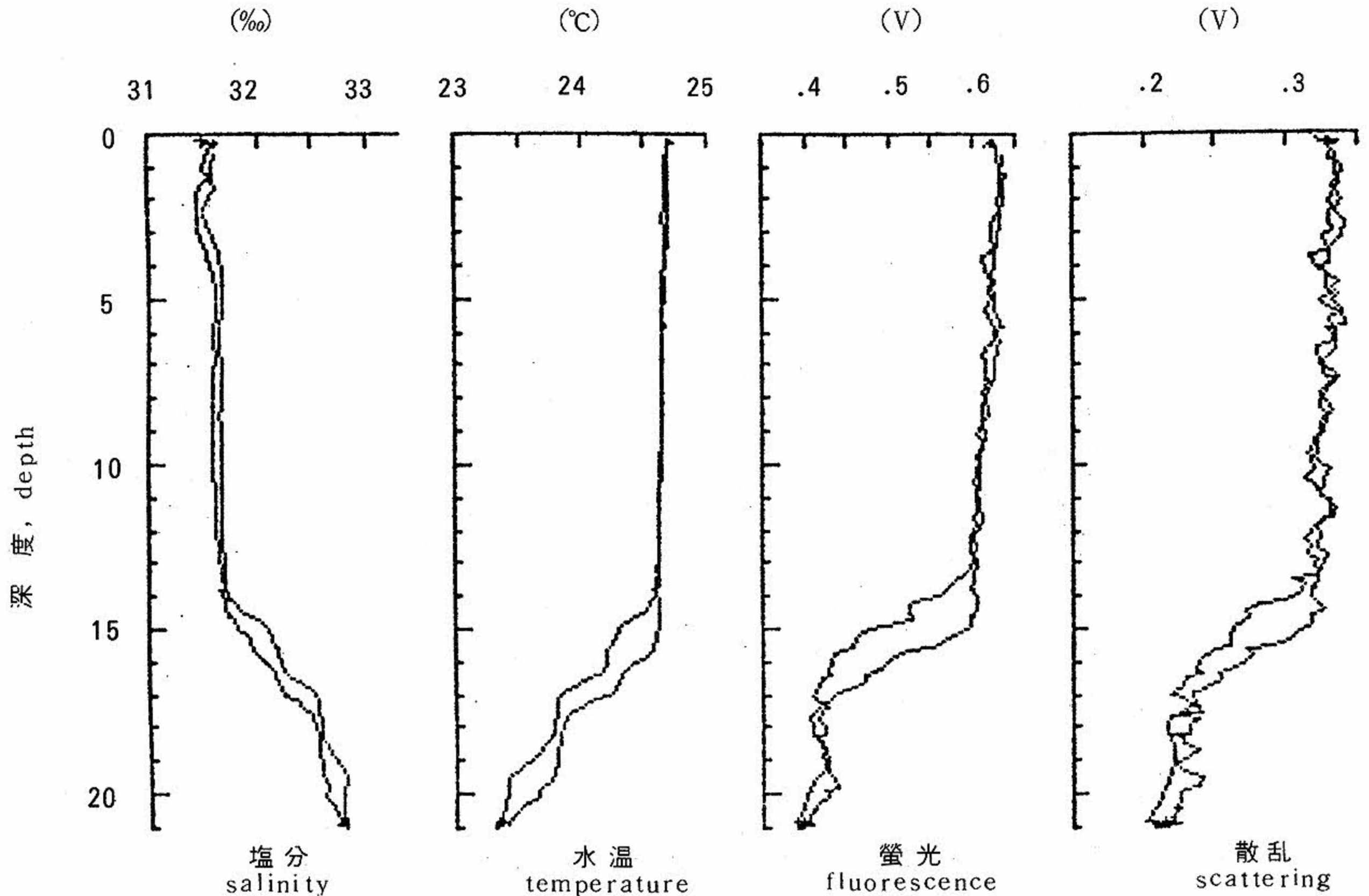
付記(2) 水温のスペクトルと水温センサーの誤差のスペクトル

表層水温の変動が $-5/3$ 乗則に従うとすると、周波数の大きいところでは水温の変動の振幅が小さくなり、水温センサーの測定誤差に近づく。ここでは、水温のスペクトルと水温センサーの測定誤差のスペクトルが一致するときの周波数を求める。

水温センサーの測定誤差と水温の標準偏差をそれぞれ σ_S と σ_T とする。

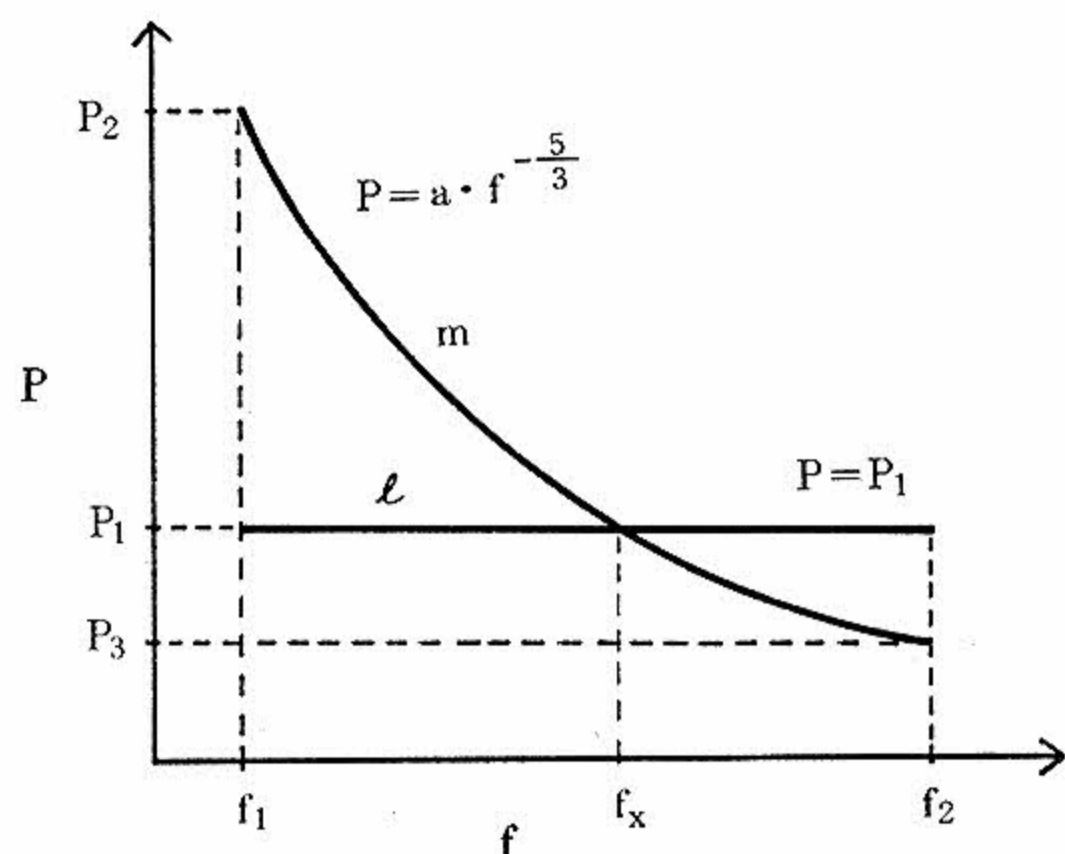
付図A-4に示すように、水温のスペクトル m は周波数 f_1, f_2 で、それぞれ p_2, p_3 であるとする。また、センサーの測定誤差が白色雑音に類似しているとすれば、そのスペクトル l は一定値を示し、それを p_1 とする。 l と m の交点の周波数を f_x とする。

水温センサーの測定誤差のスペクトルと水温のスペクトルとは、 a を定数として、それぞれ以下のように示される。



(1) 出発点付近, near start point

付図A-3 塩分, 水温, 蛍光および散乱 Profiles (descending and ascending) of salinity,



ℓ ; 水温センサーの測定誤差スペクトル, spectral density function of the temperature sensor's error.
 m ; 水温のスペクトル, spectral density function of the water temperature

付図A-4 水温のスペクトルと水温センサーの測定誤差スペクトルの関係

Relation between spectral density functions of the water temperature and the temperature sensor's error.

ℓ ; $p = p_1$
 m ; $p = a \cdot f^{-5/3}$

水温センサーの測定誤差と水温の分散は、それぞれ近似的に、つぎのように表わされる。ただし、kは比例定数である。

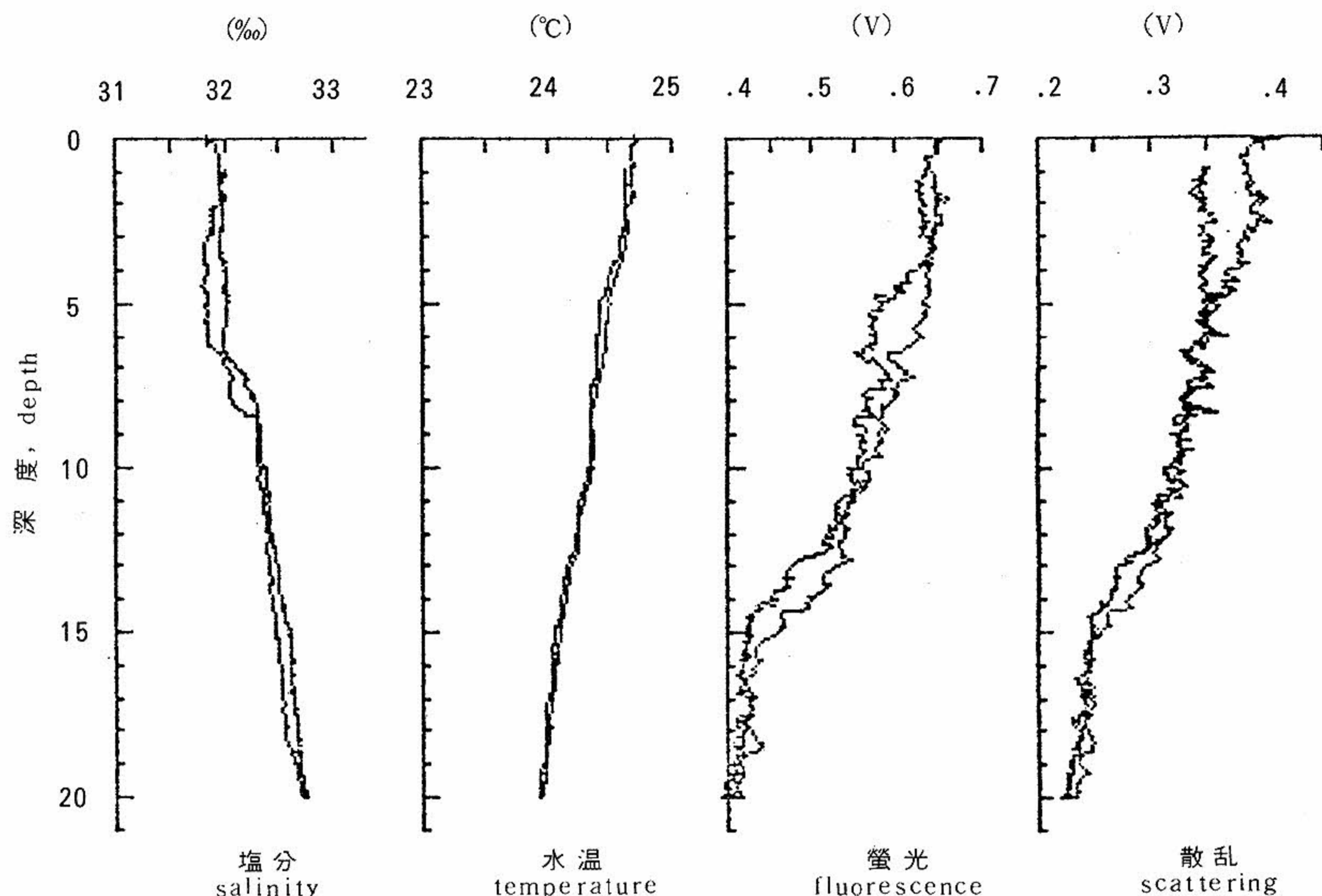
$$p_1 (f_2 - f_1) = k \cdot \sigma_S^2 \dots\dots (3)$$

$$\int_{f_1}^{f_2} a \cdot f^{-5/3} df = k \cdot \sigma_T^2 \dots\dots (4)$$

(1)式および(3)式によって、水温センサーの測定誤差のスペクトルは、つぎのようになる。

$$p = \frac{k \cdot \sigma_S^2}{f_2 - f_1} \dots\dots\dots (5)$$

(4)式から、定数aはつぎのようになる。



(2) 終点付近, near end point

乱の鉛直分布 (下降・上昇時)
 temperature, fluorescence and scattering

$$a = \frac{2k \cdot \sigma_T^2}{3(f_1^{-2/3} - f_2^{-2/3})} \dots\dots\dots(6)$$

これを(2)式に代入して、水温のスペクトルを得る。

$$p = \frac{2k \cdot \sigma_T^2}{3(f_1^{-2/3} - f_2^{-2/3})} \cdot f^{-5/3} \dots\dots\dots(7)$$

(5)式および(7)式から p を消去して、水温のスペクトルと水温センサーの測定誤差スペクトルとの交点周波数 f_x を求める。

$$f_x = \left\{ \frac{2(f_2 - f_1)}{3(f_1^{-2/3} - f_2^{-2/3})} \right\}^{3/5} \times \left(\frac{\sigma_T}{\sigma_S} \right)^{6/5} \dots\dots\dots(8)$$

(8)式は f_1 , f_2 が与えられれば、交点周波数 f_x は σ_T と σ_S の比によって変化することを示す。すなわち、センサーの精度に比べて水温の変動幅が大きくなれば、 f_x は大きくなり、水温のスペクトルがセンサーの精度によって影響を受けはじめる周波数は、それだけ大きくなる。

今回の測定では、船速が 1 m/s なので、周波数と波数(空間スケールの逆数)が一致する。算出したスペクトルの空間スケールは 200 m から 2 m までで、 f_1 および f_2 はそれぞれ 0.005 および 0.5 となる。

一般に標準偏差の 3 倍が測定精度とされているので、精度が $\pm 0.05^\circ\text{C}$ の水温センサーの標準偏差は 0.017°C となる。また、B₃ 区間の水温の標準偏差は 0.02°C であったので、(8)式から f_x を算出し、0.076 を得る。今回、これは約 13 m の空間スケールに相当する。