

三陸沖における蛍光の鉛直微細分布と 水平連続分布の観測例

辻 義人^{*1} 高橋 雅彦^{*2} 江村 富男^{*1}

夏季の三陸沖において暖水塊とその周辺で水温、塩分、クロロフィル蛍光（以後、蛍光と略記）の鉛直微細分布および水平連続分布を得た。鉛直観測は13ステーションについて約160 m深度まで行われた。暖水塊域では表層混合層（35～50 m）内に均一な蛍光分布が見られた。混乱水域では深度20～30 mの密度躍層（ σ_t : 25.6付近）に蛍光ピーク（ピーク幅：4～18 m）が認められた。このピーク幅は同時期の相模湾のものと比較してかなり狭く、蛍光ピークの成因が両者で異なることが示唆された。水平観測は表層水（約3 m深度）をポンプ採水することによって約100 mにわたって行われた。水温と塩分から暖水塊域、親潮域、両者の中間域が明瞭に区別できた。中間域のほぼ中央にM字形の高い蛍光水域が存在した。これは湧昇によることが示唆された。今回の成果は観測に使用したシステムが高い空間分解能で多要素を同時に測定できたことにより得られた。

Small-scale Vertical and Horizontal Profiles of in vivo Chlorophyll Fluorescence in the Sanriku Waters off North Japan

Yoshito Tsuji^{*3} Masahiko Takahashi^{*4} Tomio Emura^{*3}

Small-scale vertical profiles (involving 13 stations with a max. depth of 160 m) and horizontal profiles (with a depth of 3 m, and length of 100 km) focusing on in vivo chlorophyll fluorescence and CTD of the Sanriku warm-core eddy and surrounding waters were observed in the summer 1983. Through differences in temperature-salinity properties the areas of stations could be divided into three groups: the warm-core area, the perturbed area and the Oyashio area.

Fluorescence in the warm-core area was distributed homogeneously in the mixed layer (35 - 50m) and disappeared in the thermocline. Vertical profiles of fluorescence in the perturbed area showed sharp peaks (depth: 20 - 30 m, max. width: 4 - 18 m, σ_t : ca. 25.6) in the thermocline where the fluorescence peaks were found in the upper layer of the salinity maximum if shallow salinity maximum existed. Although

*1 海洋保全技術部

*2 深海開発技術部

*3 Marine Environment Department

*4 Deepsea Technology Department

chlorophyll-a concentrations were more than $1 \mu\text{g/l}$, fluorescence values in the Oyashio area were low. Horizontal profiles of temperature and salinity showed two distinct fronts (interval: 44 km): north of the warm-core area and south of the Oyashio area. High fluorescence value were not observed at the fronts, but were found in the intermediate zone of the fronts, and a M-shaped fluorescence peak (max. width: 14 km) was observed near the center of the zone. The formations of the sharp peak and the M-shaped peak are discussed.

1. はじめに

黒潮と親潮は三陸沖（より広い海域を考えれば東北海区）でぶつかり合う。川合（1972）は黒潮前線と親潮前線によって分けられるこの海域を黒潮水域、混乱水域、親潮水域に区分した。また彼は、混乱水域では数多くの渦と水温前線が不規則に分布し複雑をきわめていること、そしてその特色の一つとして、黒潮海流系の他の海域では決して見られないような直径100海里以上におよぶ大型暖水塊が分離生成されることを挙げた。

一方、三陸沖は海霧や冷害の発生に見られるようにその海況が気象に大きく影響を与えるばかりではなく、世界的に有数の漁場として重要である。そして暖水塊はカツオやサンマの漁場形成に大きな役割を果たしている（木村，1970）。

三陸沖の海況について物理的な知識の蓄積が始まっている（川合，1972；Cheny，1977；Tomosada，1978；石川ほか，1983；永田，吉田，1984；Vastano and Bernstfin，1984）が、生物学的なアプローチは少ない。とくに生物生産の基礎をなす植物プランクトンの微細な空間分布と環境要因について観測した例は、Yamamoto et al（1981）を除いてほとんど報告されていない。

われわれは、暖水塊とその周辺海域において、水温、塩分および植物プランクトン濃度の目安であるクロロフィル蛍光（以後、蛍光と略す）について、高い空間分解能で鉛直方向と水平方向の観測を行った。本報告では、蛍光の空間分布に焦点

を当て、得られたデータの紹介と結果の解釈を行う。

2. 観 測

三陸沖において1983年7月2日～7月12日に鉛直方向および水平方向のC, T, D および蛍光の観測を行った。調査船として東海大学所有の望星丸Ⅱ（約1,200トン）を使用し、観測装置としてCTDセンサーと蛍光・散乱・透過率センサーを結合したシステム（辻ほか，1982；辻ほか，1983）を用いた。

鉛直観測は表1の日時・場所で行った。13ステーションで観測し、往復の連続プロファイル（最大観測深度：約160m）を得た。センサー移動速度は約0.5 m/sであった。

水平観測は1983年7月11日，19:10（ $41^{\circ}13'N$ ， $144^{\circ}34'E$ ）から23:50（ $42^{\circ}00'N$ ， $144^{\circ}17'E$ ）にかけて約100kmの表層水について行った。船速は10ノットで、甲板上に設置したコンテナ（L: 90cm, W: 60cm, D: 50cm）内にセンサーを水没させ、雑用海水（採水深度：約3m）をオーバーフローさせた。また外部光を遮断するためにコンテナをキャンバスシートで覆った。船底のポンプからコンテナまでの海水通過時間（実測値）は約50秒であった。

3. データ処理

船上でデータはFSK信号としてアナログデータレコーダ（TEAC R-81）に1秒間に8組の

表1 観測場所
Stations

St. ステーション	Date 日	Time 時刻	Location 位置	
			N	E
S-2	7/2	18:40	39°01.4'	143°59.3'
S-3	7/3	13:45	39°30.3'	144°03.2'
S-4	7/3	18:25	40°01.4'	143°59.5'
S-5	7/3	23:00	40°32.1'	143°58.2'
S-7	7/4	08:35	40°56.4'	144°17.3'
S-8	7/4	16:10	40°41.5'	144°49.2'
S-9	7/4	21:30	40°20.4'	144°54.2'
S-12	7/7	08:40	40°49.6'	145°39.0'
S-11	7/7	11:30	40°43.3'	144°15.9'
N-1	7/9	09:20	41°40.3'	144°28.9'
E	7/10	15:15	40°58.7'	144°55.9'
S-13	7/11	13:20	41°20.5'	144°33.0'
N-2	7/12	06:40	42°00.6'	144°18.3'

割合で記録されている。後日これを研究室に持ち帰り、FSK信号を復調しオープンMTに記録した。データ処理はデスクトップコンピュータ(HP社 SYS 45)で行った。

CTDセンサーの精度は、水温が±0.05℃、塩分が±0.03‰、深度が±0.2mであるが、デジタル分解能はこれより2～3倍高い。なお五つのステーションで観測中にCTDのまわりの表層水を採水し塩分の較正を行った。蛍光センサーはフルスケールの1/4000の分解(12ビット)を有する。

鉛直観測では下降時のデータを使用し、4秒間

の移動平均を行って鉛直プロファイルを得た。このとき①機械的なエラーの除去、②サリニティスパイクを防止するための水温センサーの応答遅れの補正、③蛍光センサーの温度変化による出力変化の補正、④船の動揺などによって深度が重複したデータの除去、および孤立して突出した蛍光データの補正(移動平均から除外し、データを $\frac{1}{3}$ に縮小して×印で示す)を行った。なお詳細なデータ処理手法は高橋(1984)に記載されている。

水平観測ではデータ量が多かったのでこれを圧縮したのちに移動平均を行った。すなわち8.5秒間のデータ(MTの1ブロックに相当)のほぼ

前半（4秒間）を算術平崎しブロックの代表値とする。この代表値について5データの移動平均を行った。これは約200 mの空間移動平均に相当する。また、水平方向のデータ処理では、深度の変動を考える必要がなく、かつ、時間当りの水温

変化が小さかったので鉛直観測時のデータ補正②と④を省いた。

4. 結 果

鉛直観測結果を図1～図13に示す。昼間に観

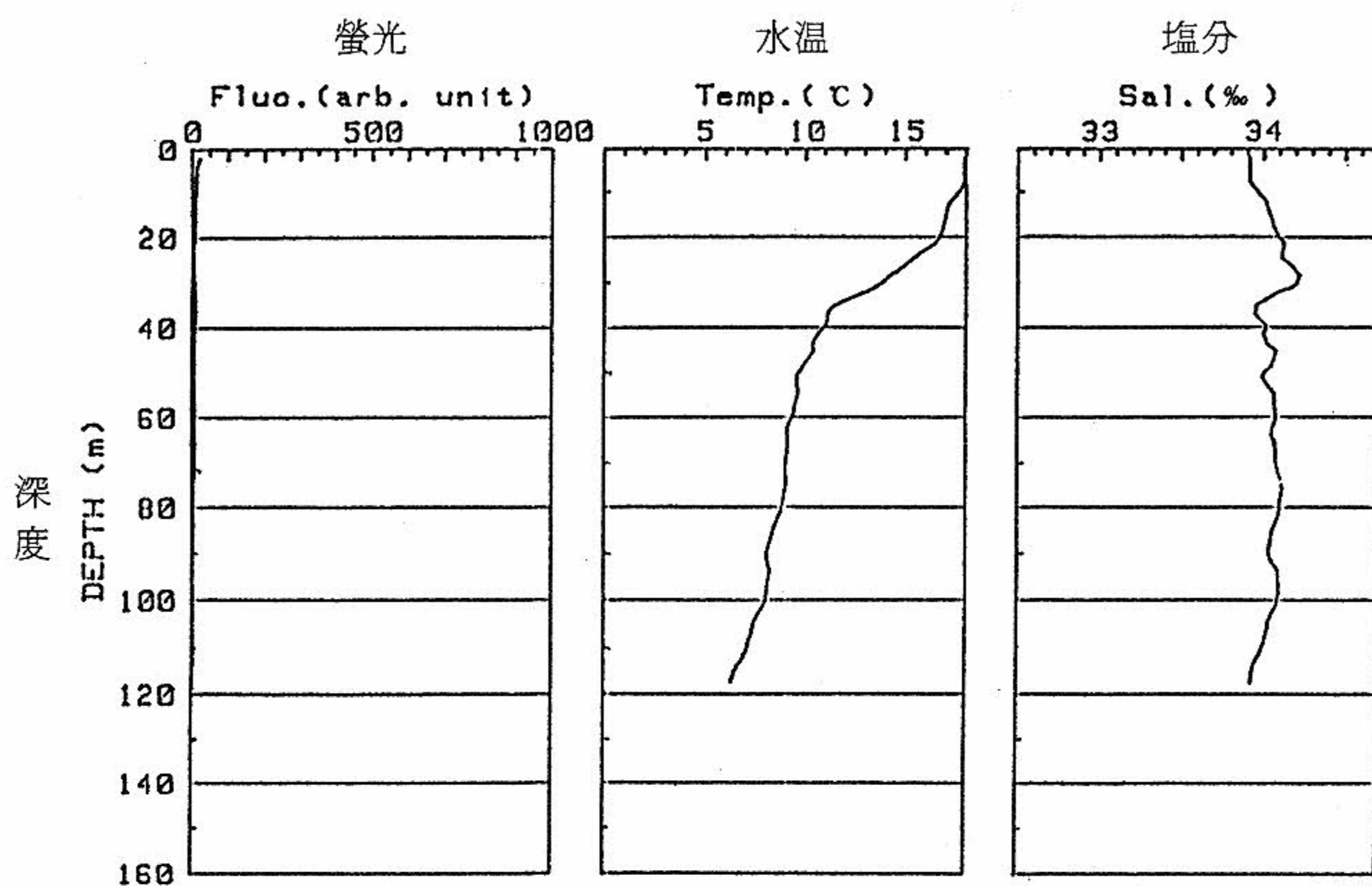


図1 ステーション S-2
Station : S-2

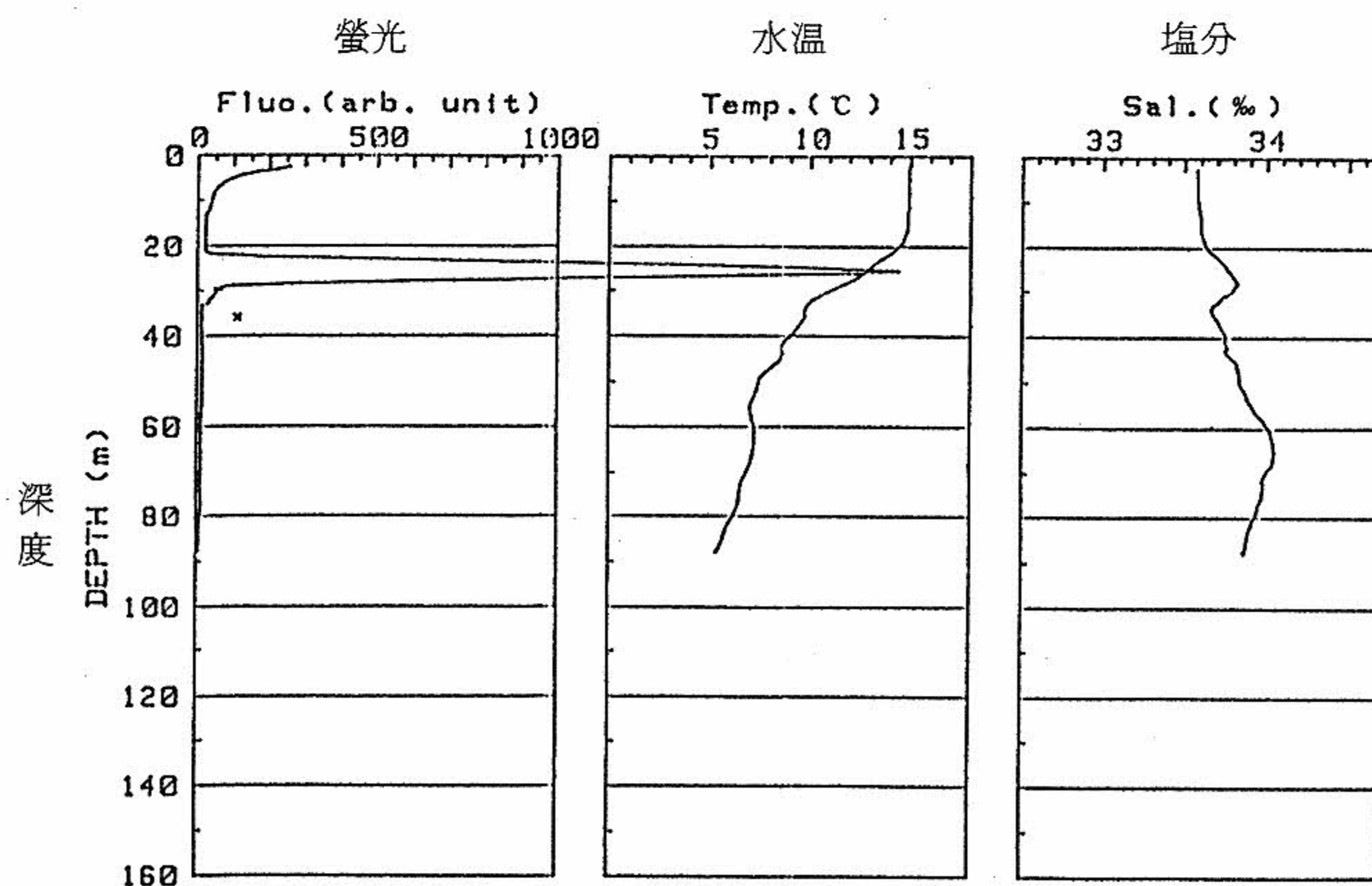


図2 ステーション S-3
Station : S-3

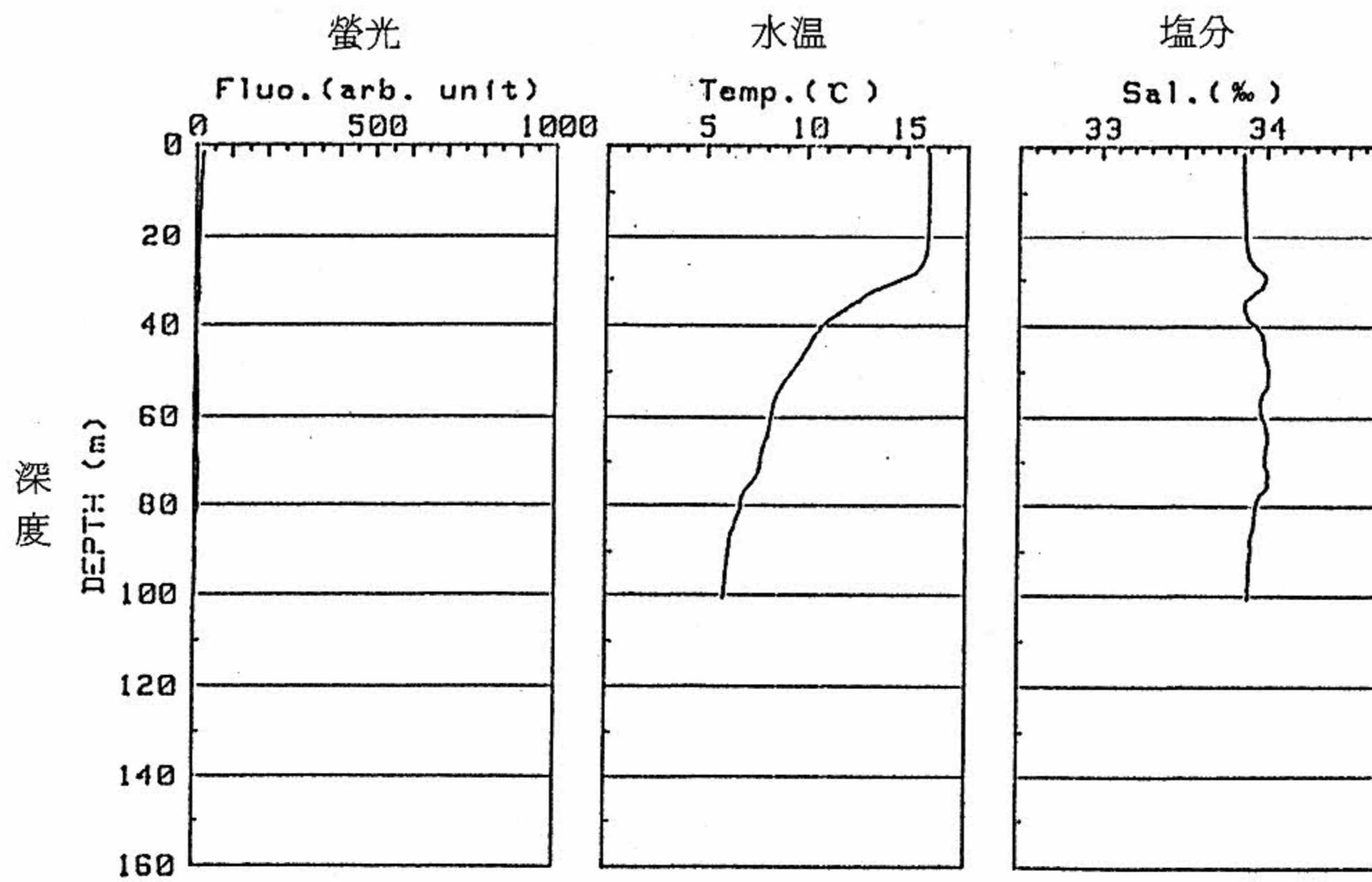


図3 ステーション S-4
Station : S-4

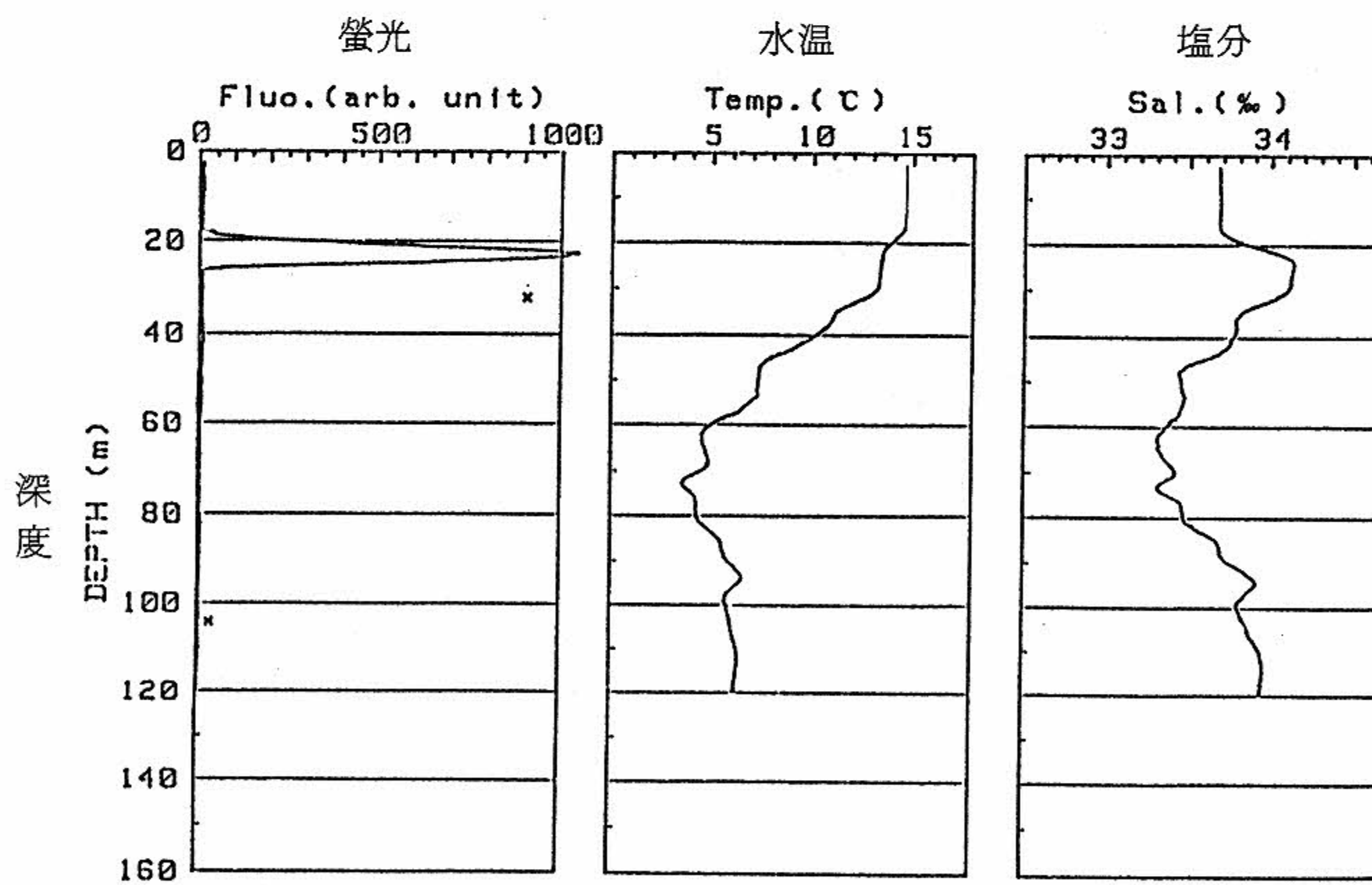


図4 ステーション S-5
Station : S-5

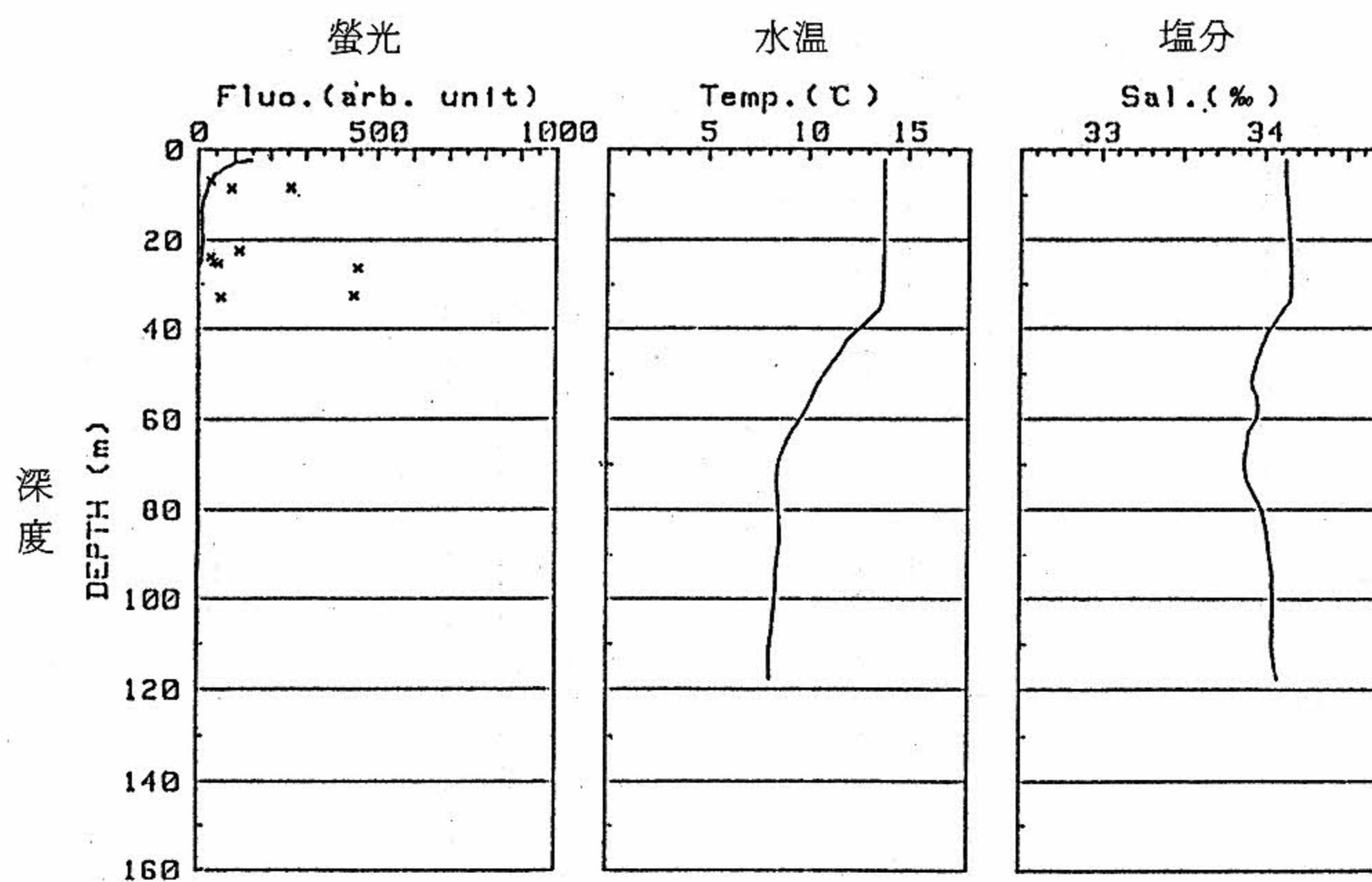


図5 ステーション S-7
Station : S-7

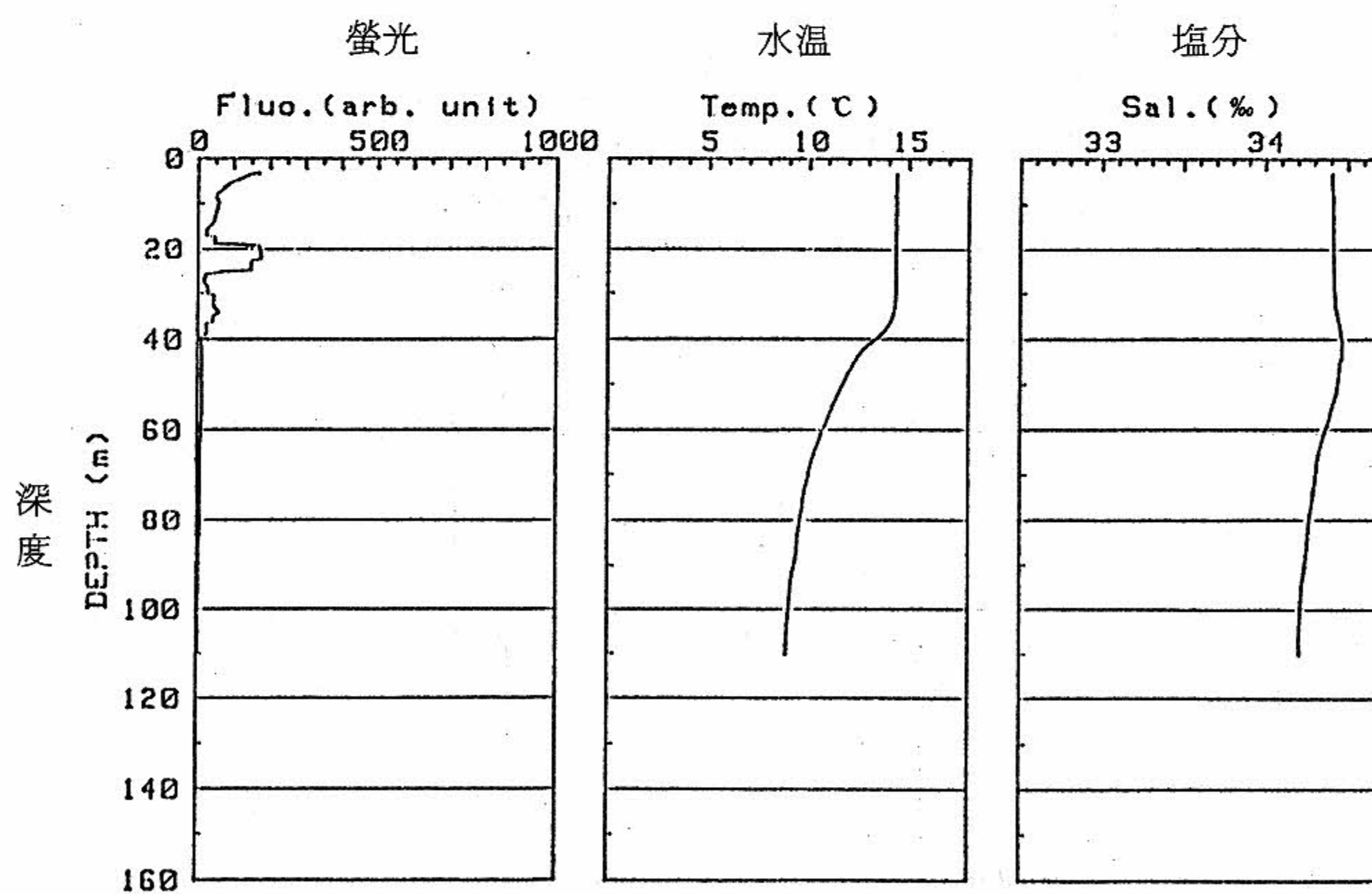


図6 ステーション S-8
Station : S-8

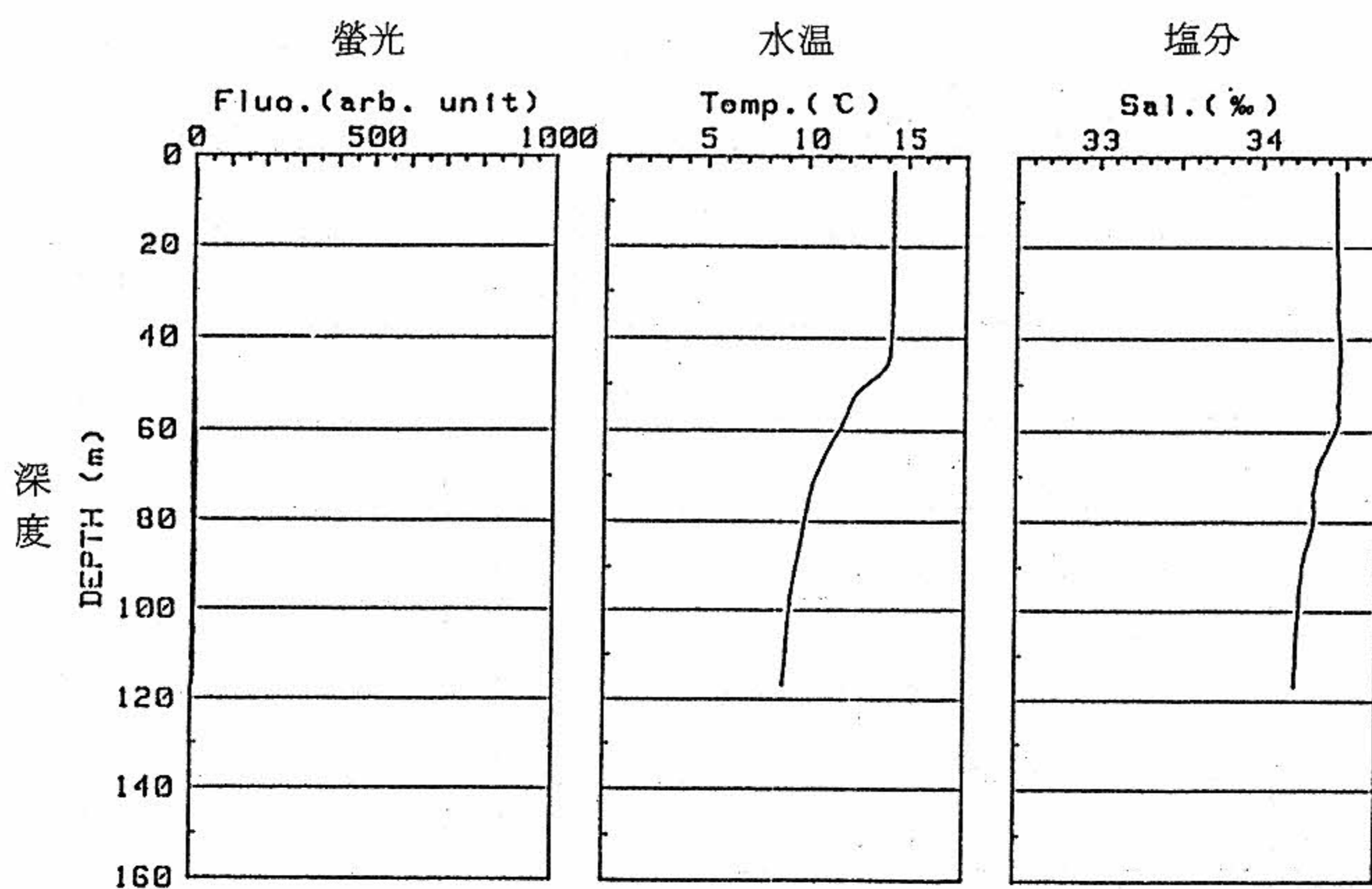


図7 ステーション S-9
Station : S-9

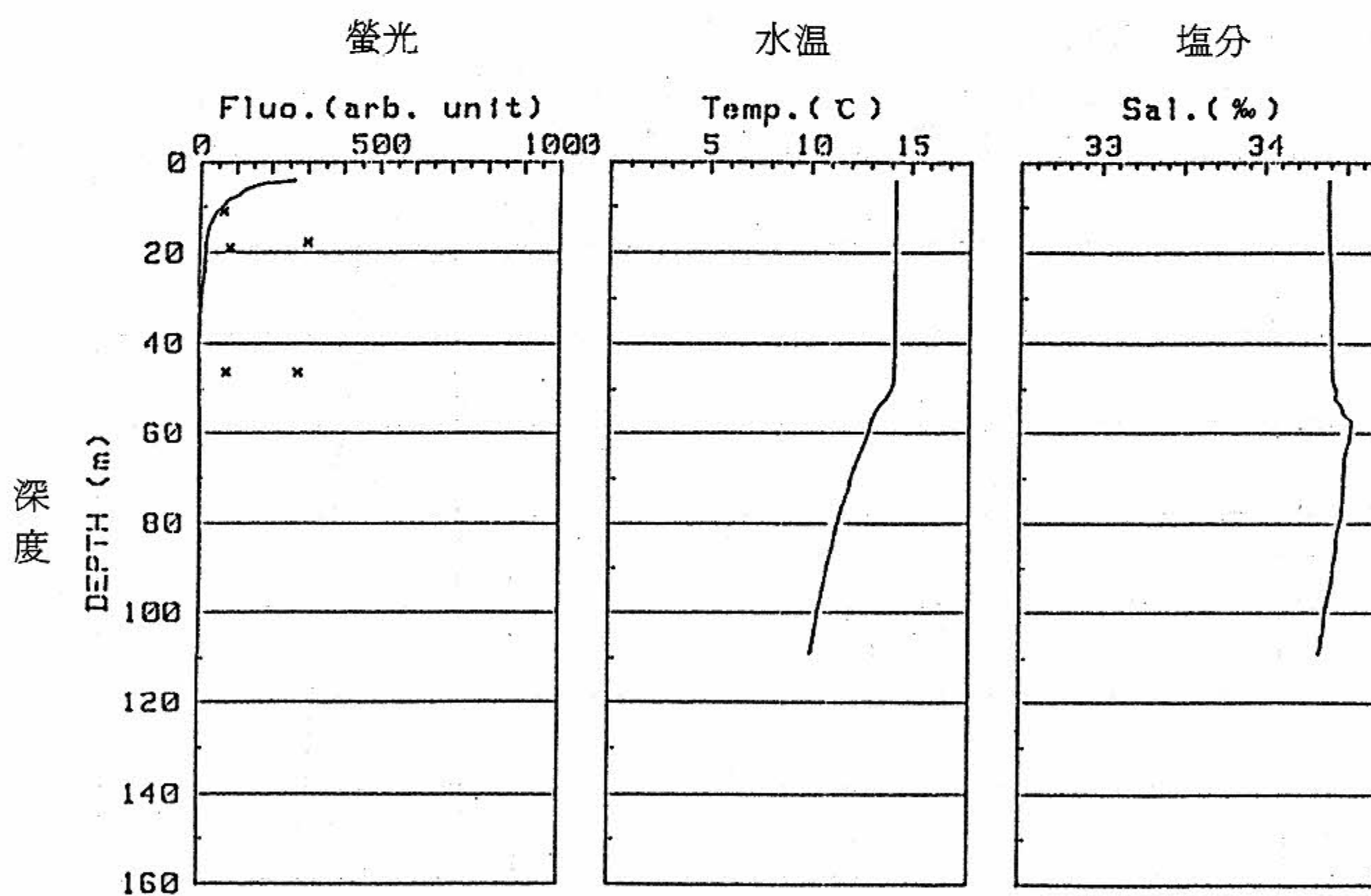


図8 ステーション S-12
Station : S-12

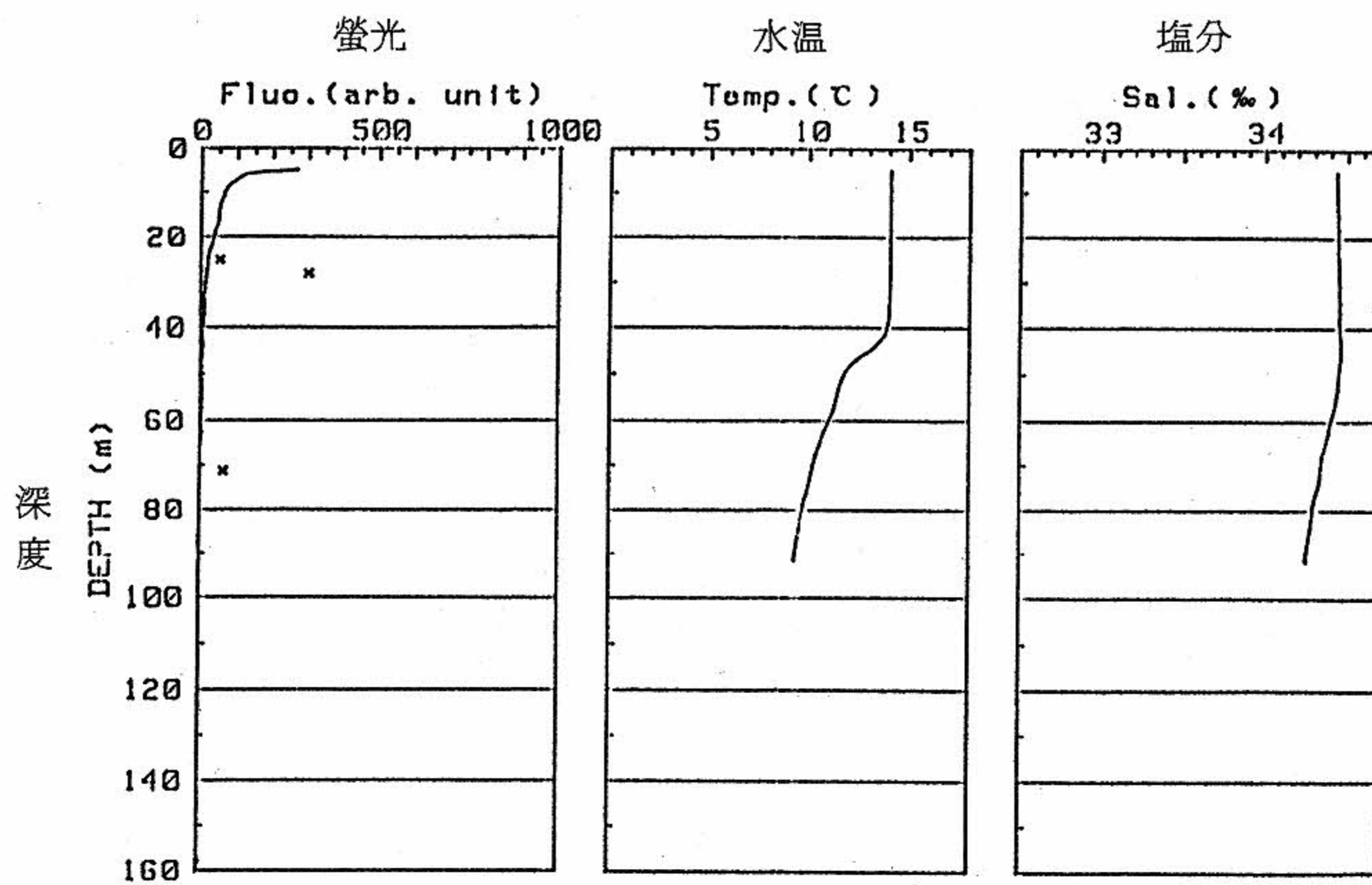


図9 ステーション S-11
Station : S-11

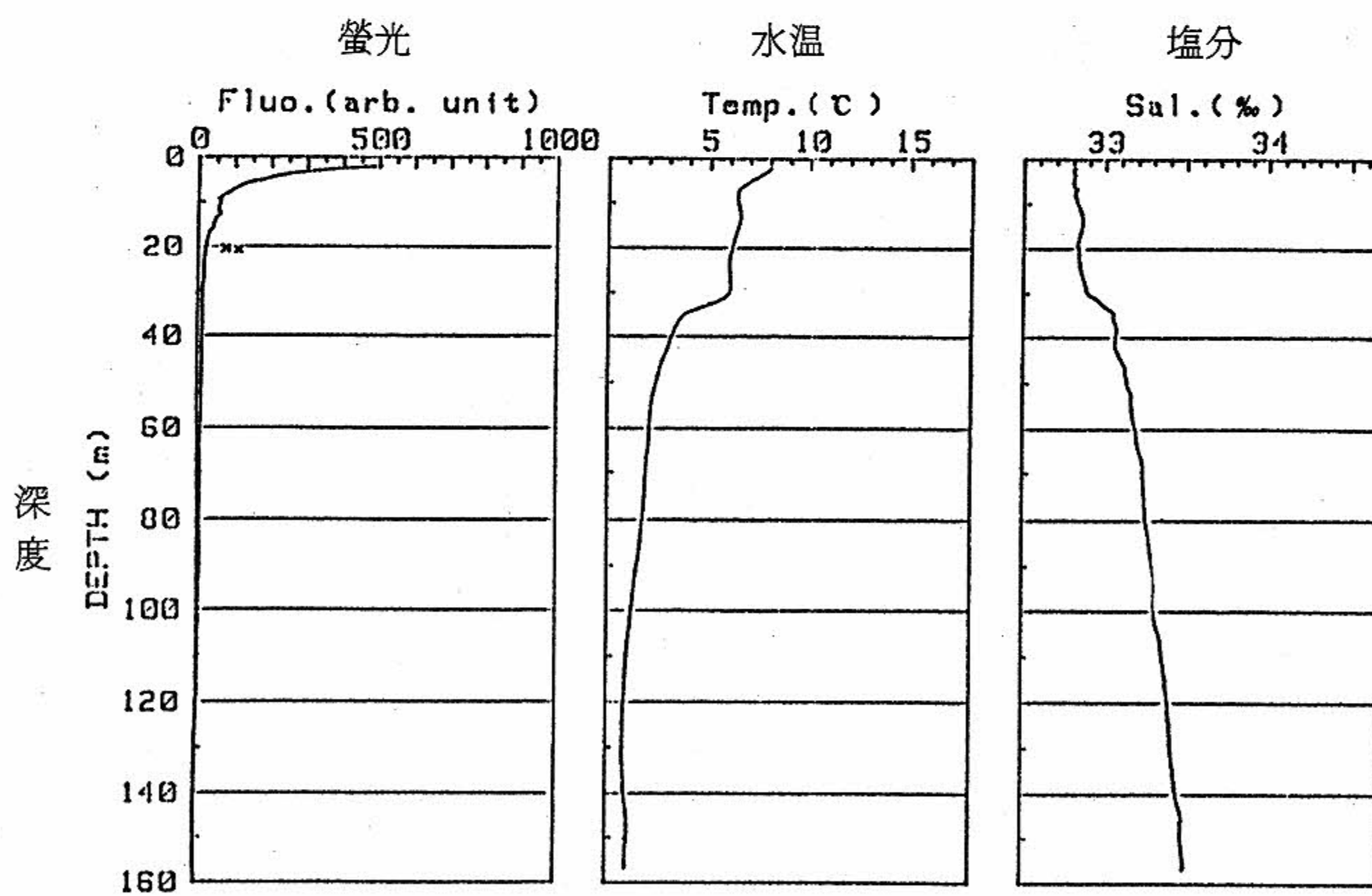


図10 ステーション N-1
Station : N-1

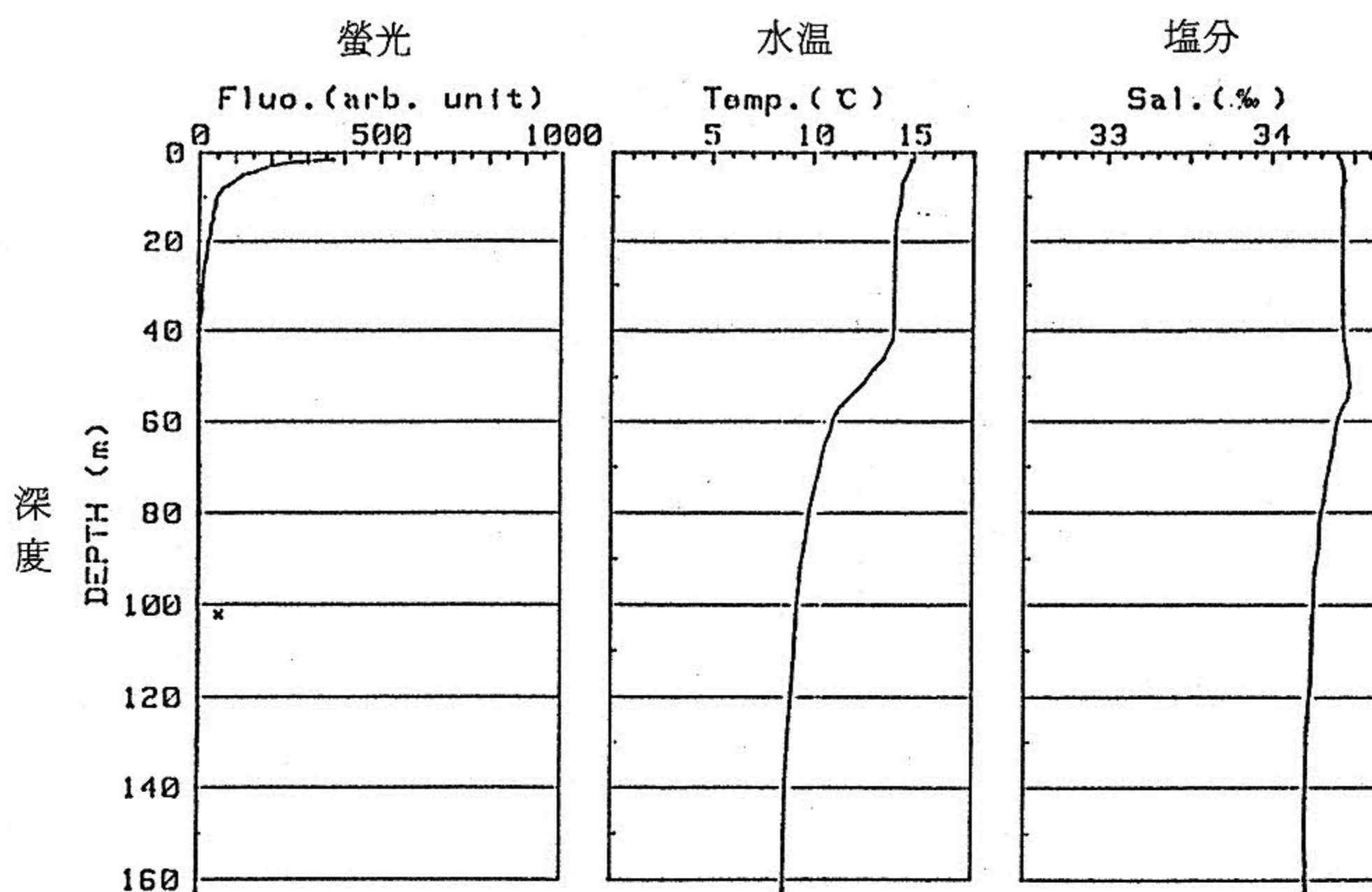


図11 ステーション E
Station : E

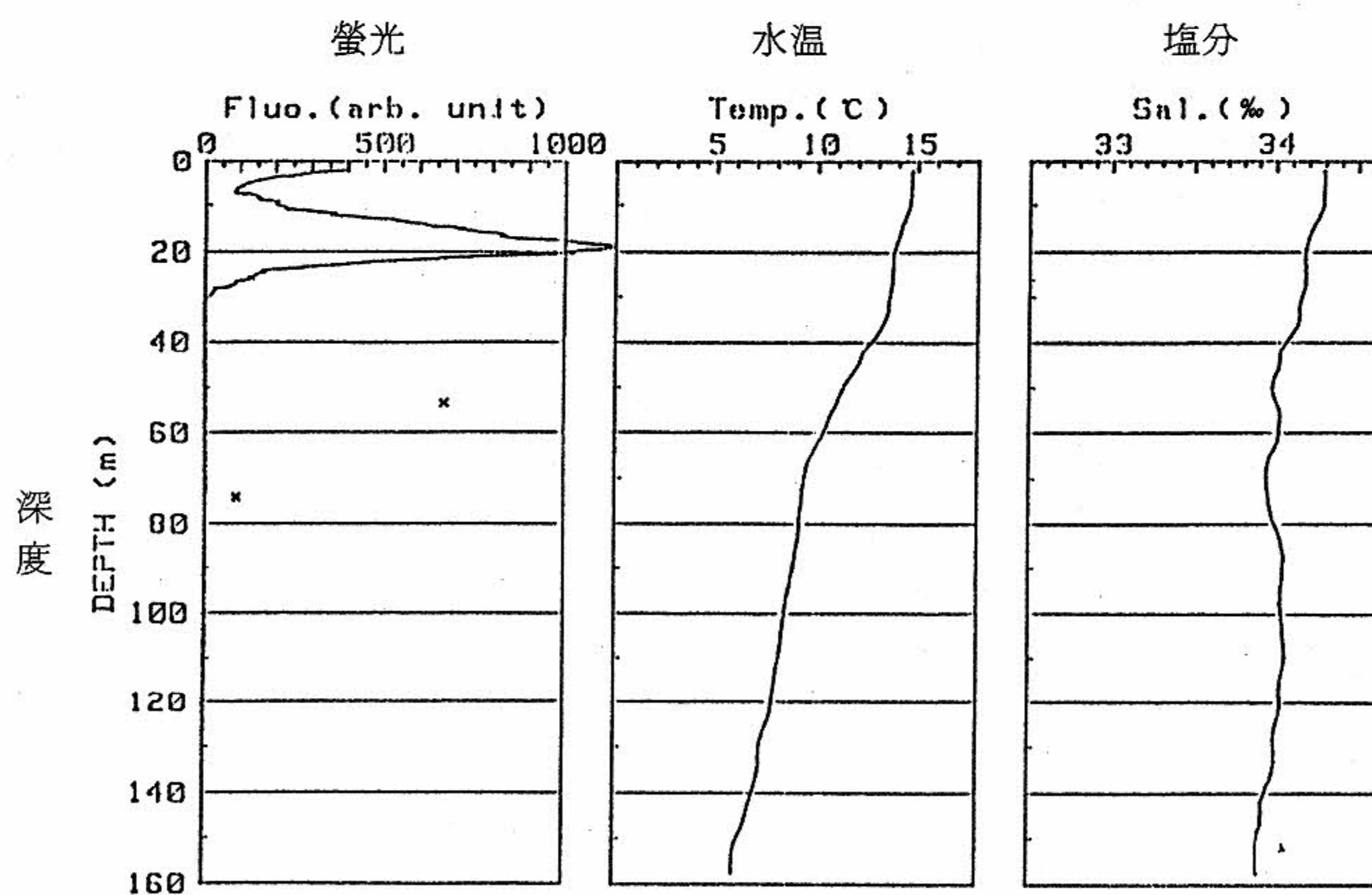


図12 ステーション S-13
Station : S-13

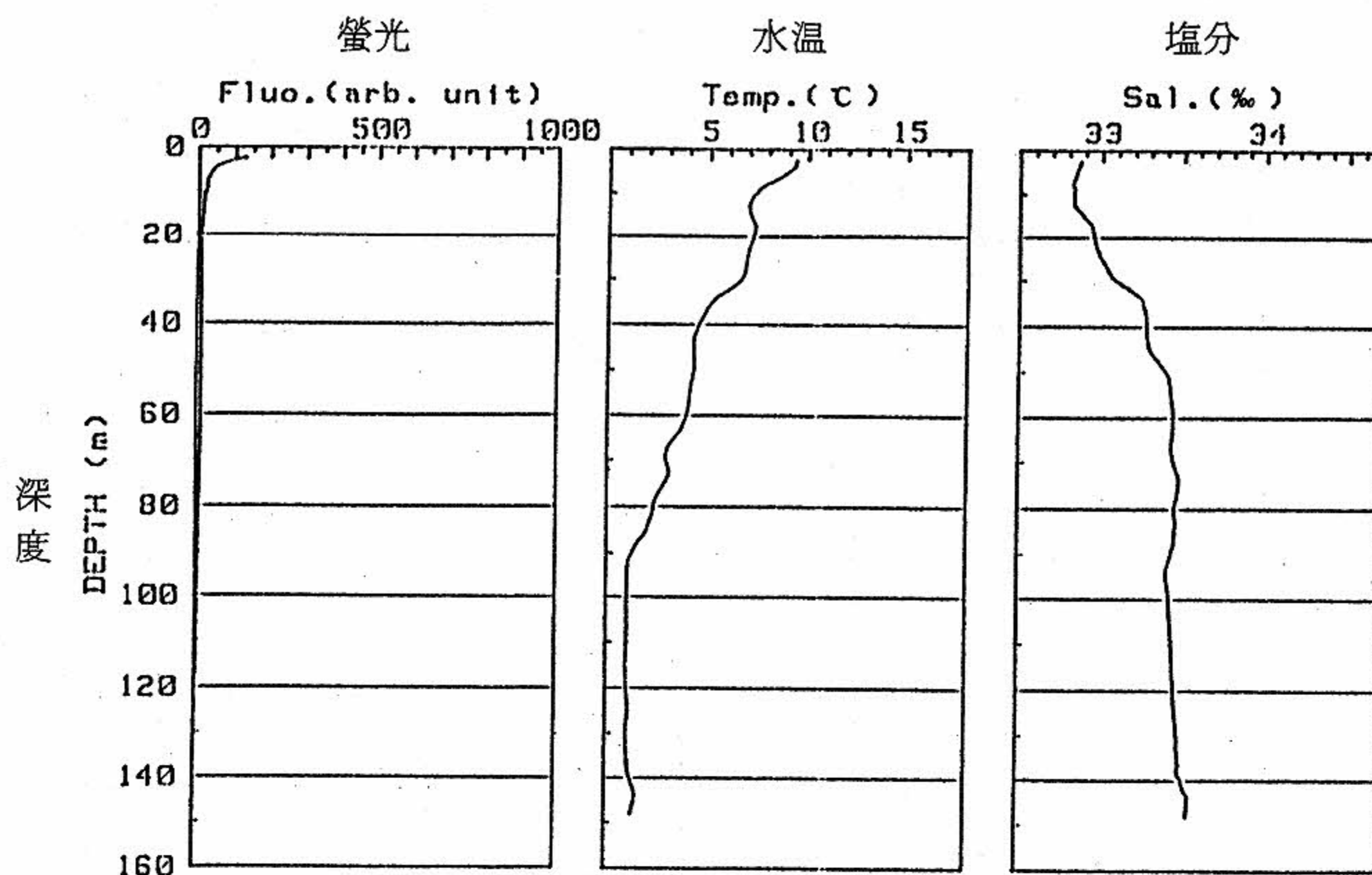


図13 ステーション N-2
Station : N-2

測した測点の蛍光値で海表面に近づくに従って増加しているものは外部光の影響である。また、図中の×印は孤立した高い蛍光値(生データの $\frac{1}{3}$ に圧縮)を示す。

蛍光の鉛直分布パターンを分類すると四つのグループに分けられる。第1のグループは全深度にわたってはほとんど蛍光の認められない測点(S-2, S-9)である。ただし、S-4は図3を見る限りほとんど蛍光を認めることはできないが、移動平均前のデータを注意深く観察すると約30 m深度にほぼ連続した突出データが存在するので、この深度にごく幅の狭い蛍光ピークが存在したと考えた。第2のグループは20~30 m深度に蛍光のピークを持つ測点(S-3, S-4, S-5, S-13)である。第3のグループは表層混合層(35~50 m)内で蛍光値が高くそれ以深ではほとんど蛍光出力の認められない測定(S-7, S-8, S-12, S-11, E)である。第4の

グループは表層混合層(10 m以内)およびそれ以深20 mあたりまで蛍光値の認められる測点(N-1, N-2)である。

水平観測結果を図14に示す。水平方向の水温と塩分の分布は明瞭な二つのフロント(14マイルと36マイル)によって区切られ、三つの水塊を示した。これらは、高温・高塩水域(14.5°C, 34.2‰)、低温・低塩水域(10°C以下, 32.9‰以下)および両者の中間水域(13°C, 33.6‰付近)であり、後述するT-Sダイアグラムの検討から暖水塊域、親潮域および両者の中間域に対応した。一方、蛍光の水平分布は水温と塩分のそれとは異なるパターンを示した。フロント域(とくに暖水塊側)では蛍光の増加が認められた。しかし最も大きい蛍光値は中間域のほぼ中央に出現した。これは暖水塊側のフロントから約19 Km, 親潮側のフロントから約25 Kmに中心を持ち、幅約14 KmのM字形のピークを示した。

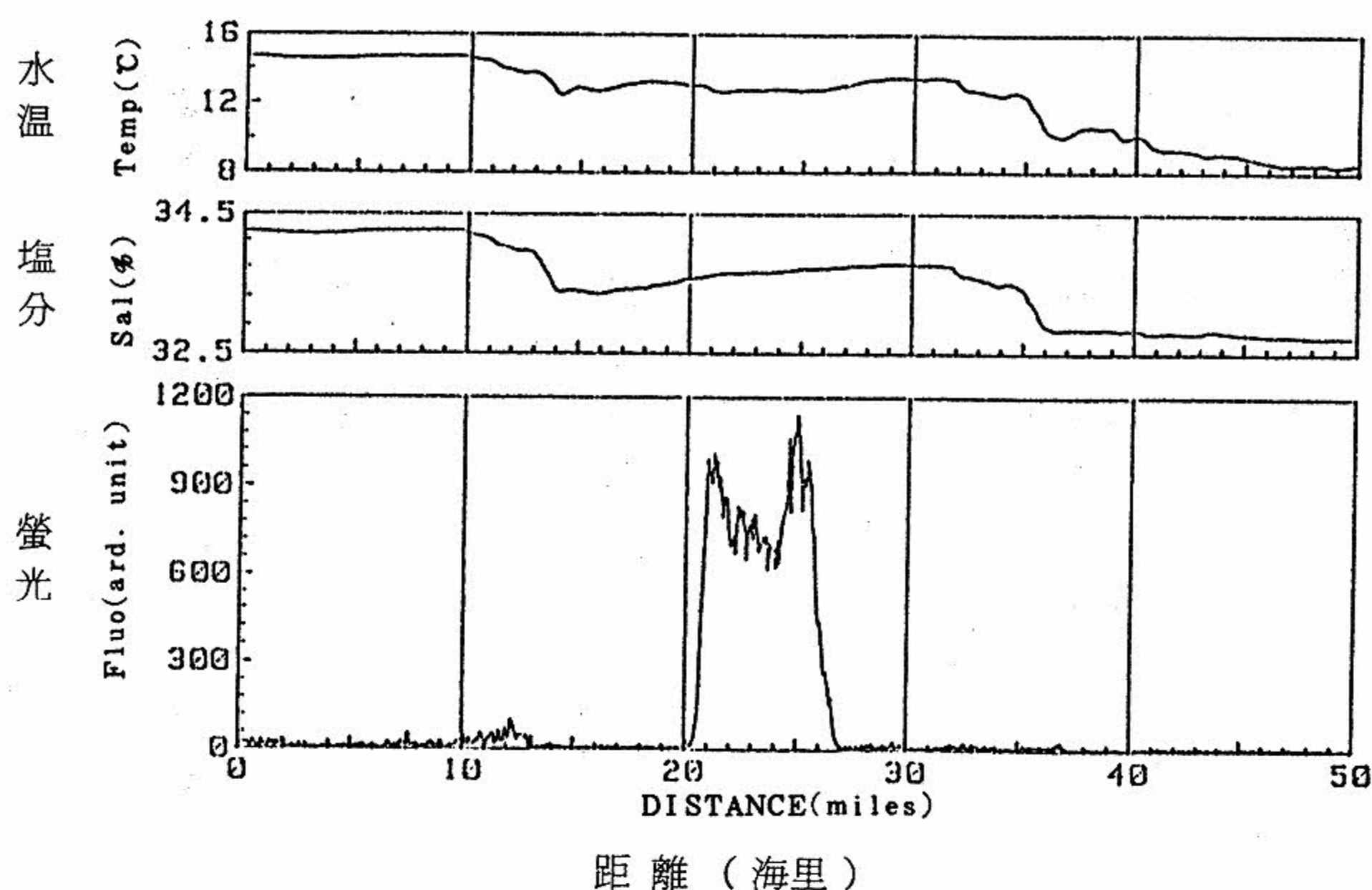


図14 蛍光、水温、塩分の水平分布

Horizontal profiles of Fluorescence,
Temperature and Salinity

5. 考 察

5.1 蛍光出力と分析したクロロフィル値 の関係

今回の海洋観測では東海大学夏目研究室と筑波大学高橋研究室が鉛直観測時に採水を行いクロロフィルaとフェオフィチンの分析を行った。前者は吸光法、後者は蛍光法によった。

クロロフィルaとフェオフィチンの濃度の和（以後、色素和と記す）と蛍光出力は必ずしもよい一致を示さなかった。高い蛍光ピークの認められた海域（S-3, S-5, S-13）では、色素和は $0.7 \sim 1.3 \mu\text{g}/\text{l}$ の範囲であった。一方ほとんど蛍光の認められなかった海域（S-2, S-4, S-9）でも色素和は $0.4 \sim 1.1 \mu\text{g}/\text{l}$ を示した。また最高の色素和（ $1.9 \mu\text{g}/\text{l}$ ）を示したステーションN-2の表層（0, 10, 20 m）においても蛍光値は小さかった。

蛍光出力と色素和の一致しない理由としてつぎの要因が考えられる。

蛍光測定水塊と採水水塊の不一致

今回の観測では蛍光の鉛直観測後30分以内に

クロロフィル分析のための採水を行った。海域によっては海況変動が短時間で著しかった。たとえばN-1ステーションでは、透明度の観測中に値が10 mから16 mまで変化したと言われている。
採水深度の不確定

今回使用したセンサーシステムでは0.2 mの精度で測深できるのに対して、採水の場合は傾角の補正を行っても深度が数m狂うことがある。したがって幅が10 m以下の狭い植物プランクトン層（蛍光のピーク層）を採水した場合層の中央とその数m上・下では色素和が大きく異なる。

クロロフィル分析の精度

同一ステーションの同一深度の色素和の値が、東海大学と筑波大学で、 $0.5 \mu\text{g}/\text{l}$ 以上異なる場合が少なからず認められた。両者は同一の試水を使用したが生分析方法は異なっていた。すなわち分析の仕方によって現場海水中的真のクロロフィル濃度の推定値にある程度の不確定がありうる。

蛍光センサーのサンプリングボリューム

蛍光センサーのサンプリングボリュームは0.4 ml（辻ほか, 1982）でありクロロフィル分析に

使用する試水量（数100ml～数ℓ）と比較してかなり小さい。海水中の粒子密度が低ければ、小さいサンプリングボリューム内に含まれる粒子数は大きく変動する。極端に粒子密度が小さい場合、サンプリングボリューム内に粒子が少なくとも1個存在する確率は小さくなるので、このようなときのセンサー出力は大部分が0であり、時々大きい値を示す。しかし時々出現する大きい出力は異常値とみなされて除外されることが多く、データ処理後の出力はほとんど0となる。したがってサンプリングボリュームの小さい蛍光センサーの出力は、粒子密度の小さい海域では、サンプリングボリュームの大きいクロロフィル分析値よりも相対的に小さくなる。沿岸域（親潮域）は外洋域（黒潮域）と比較して微小植物プランクトンの比率が小さい（Malone, 1980; 菊池, 1984）とすれば親潮域ではクロロフィル濃度当りの粒子密度が小さいことになる。これが、親潮域（N-2）で蛍光値と色素和を比較してとくに前者が小

さかった理由かもしれない。

5.2 物理特性による海域の分類

各ステーションのT-Sダイアグラムを図15～図17に示す。図中の数字は σ_t を表わす。

T-Sダイアグラムから今回の観測海域は3グループに分けられる。第1のグループは図15の5ステーション（S-8, S-9, S-11, S-12, E）で水温9～14.5℃、塩分34.2～34.5‰の範囲にあり、逆C字形のT-S曲線を示す。第2のグループは図17の2ステーション（N-1, N-2）で水温10℃以下、塩分33.5‰以下のものである。第3のグループは図16の6ステーション（S-2, S-3, S-4, S-5, S-7, S-13）で上記の第1グループと比較してより低温、低塩側の領域を増やし複雑なT-S曲線を示している。

今回の海洋観測とほぼ同一時期に、函館海洋気象台の観測船 高風丸が三陸沖を調査している。この報告書（函館海洋気象台, 1983）によれば、

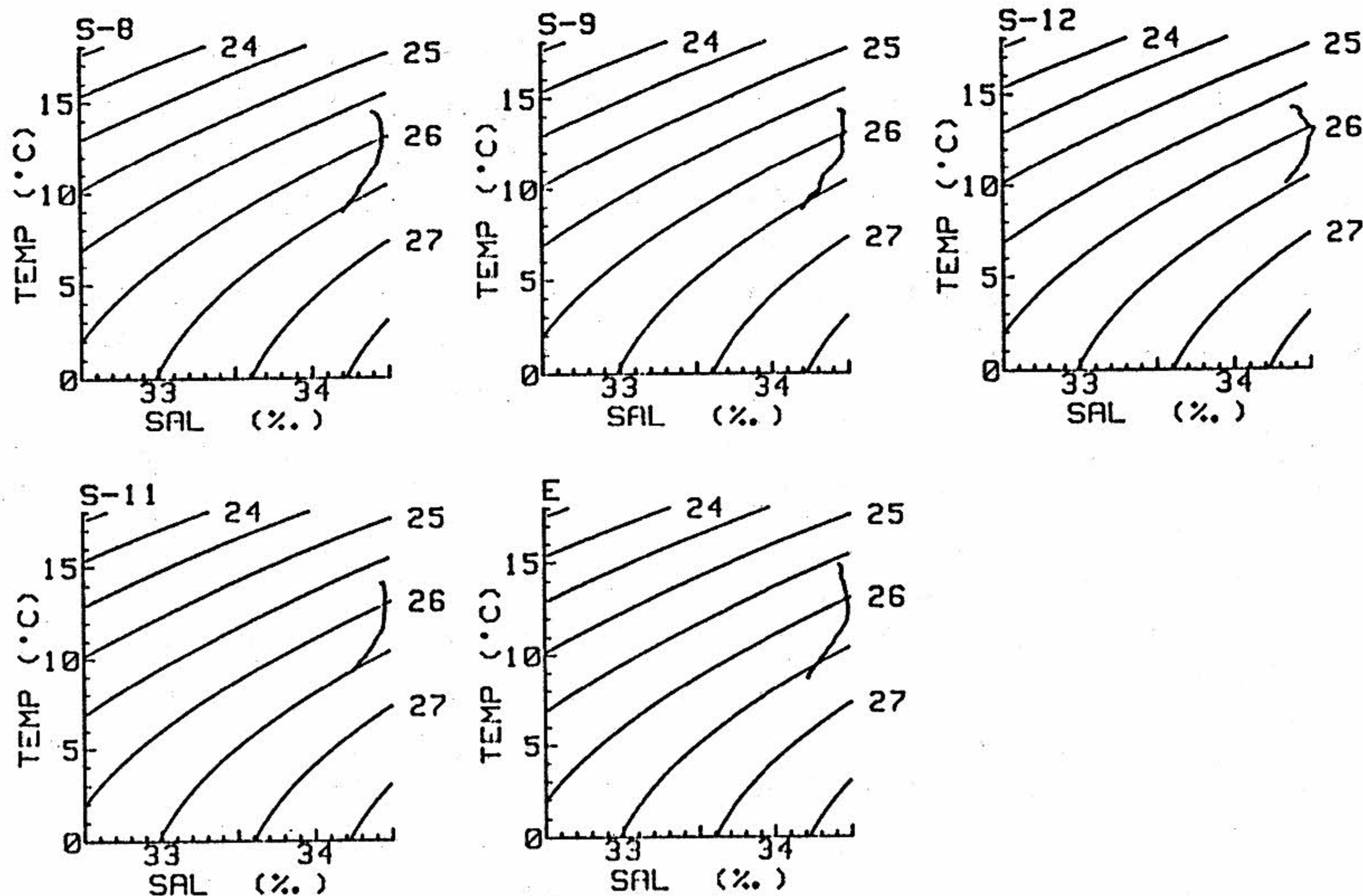


図15 T-S ダイアグラム. 数字は密度(σ_t)を示す。

T-S Diagram. Numbers indicate sigma-t values.

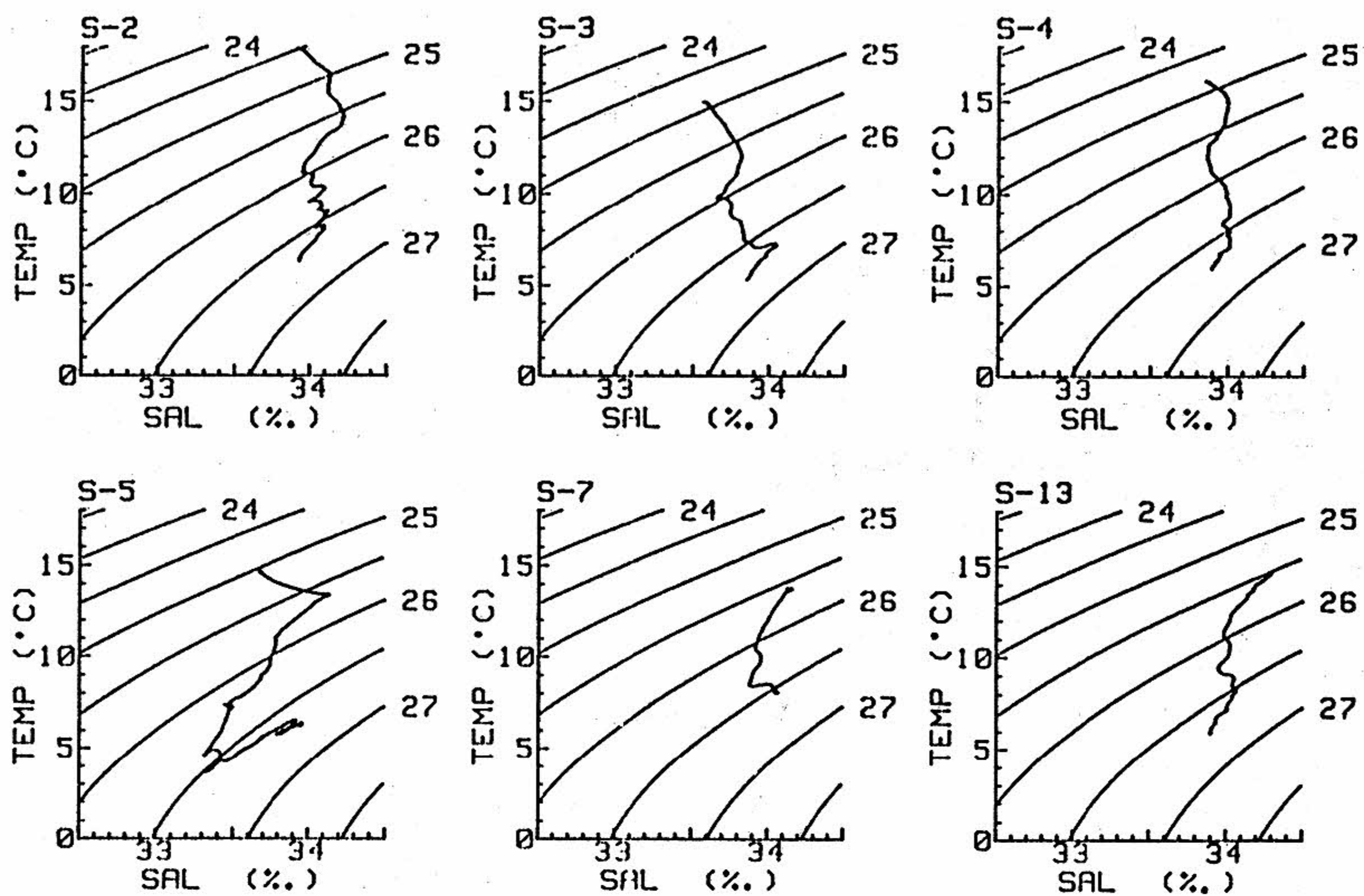


図16 T-S ダイアグラム. 数字は密度(σ_t)を示す。

T-S Diagram. Numbers indicate sigma-t values.

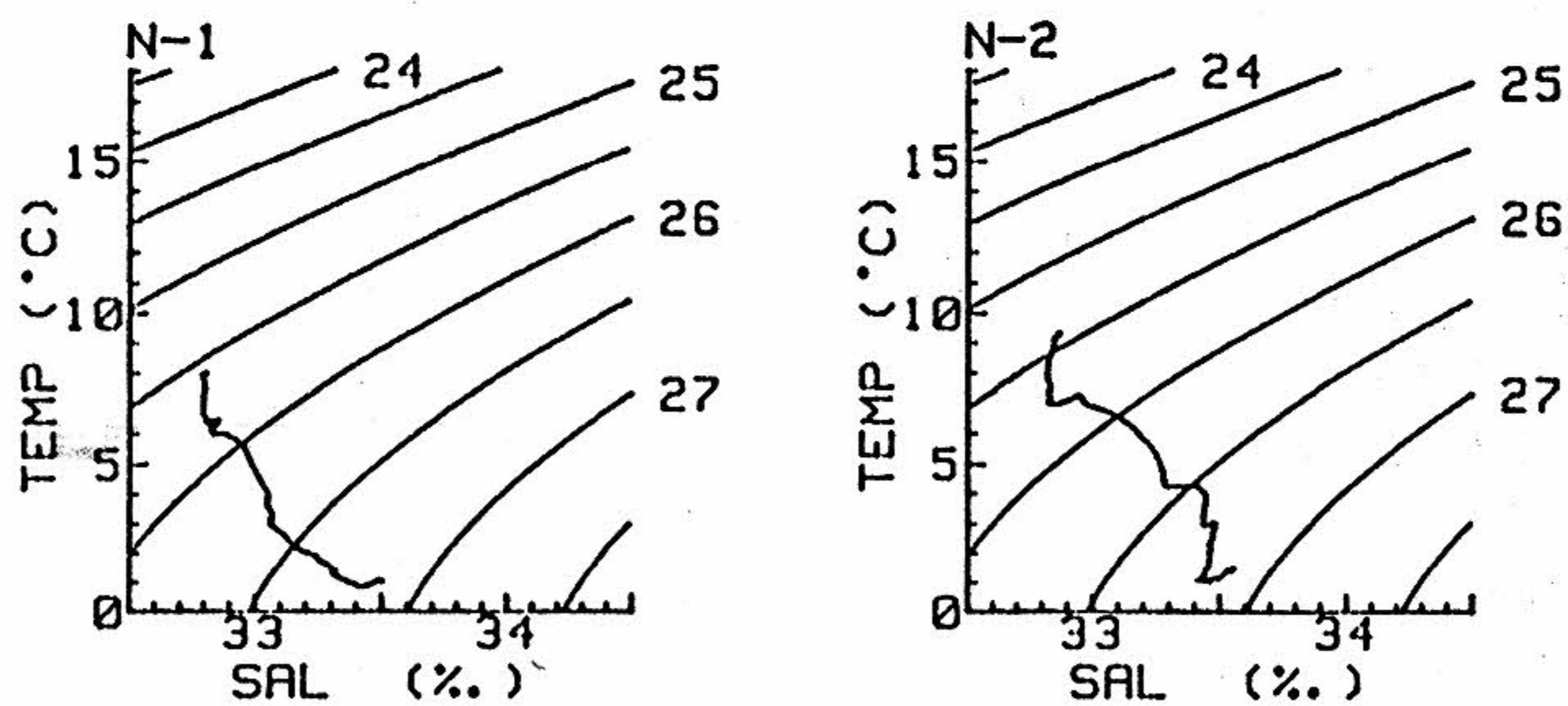


図17 T-S ダイアグラム. 数字は密度(σ_t)を示す。

T-S Diagram. Numbers indicate sigma-t values.

144°E線上の40°~41°30'Nにかけて暖水塊が認められる。そして第1グループに属するステーションのプロファイルは高温・高塩分の深い表層混合層(35~50m)を持つ。これらから、第1グループは暖水塊内部のものといえる。第2グループは、N-1, N-2がそれぞれ65m, 85m深度以下で、純親潮水の定義(川合, 1982)である「水温2℃以下, 塩分33.5‰以下」を満たしているので、親潮水域のものと考えられる。第3グループは暖水塊の周辺部または混乱水域のものに相当する。とくにS-13は親潮寄りの、S-2は黒潮寄りの海域といえる。一方、S-7は高温・高塩の厚い表層混合層(35m)を示すので暖水塊中心に近い縁辺部といえる。したがって、T-Sダイアグラムから判断してS-7を第3グループとしたが、水温と塩分のプロファイルを考慮すれば第1グループに入れるのが妥当である。

5.3 海域の物理特性と蛍光の鉛直分布パターン

物理特性によって分けられた海域の分類と蛍光の鉛直分布パターンはよく一致した。

暖水塊の内部(第1グループ海域:S-7, S-8, S-9, S-11, S-12, E)では高温, 高塩の厚い表層混合層(35~50m)を有し, S-9を除くと, その混合層内で均一な蛍光分布を示した。

親潮水域(第2グループ海域:N-1, N-2)では低温, 低塩で薄い表層混合層を形成しており, 蛍光はその混合層およびそれ以深までほぼ均一に分布している。しかし蛍光値はさほど高くなく顕著なピークも認められない。

混乱水域または暖水塊の周辺部(第3グループ海域:S-2, S-3, S-4, S-5, S-13)では深度20~30mに顕著な蛍光ピークを有する海域(S-3, S-5, S-13), ごく幅が狭く高さの小さい蛍光ピークを示す海域(S-4)および全深度にわたって蛍光が見られない海域(S-2)があった。

海域の特性と蛍光の鉛直分布パターンをまとめるとつぎのようになる(図18参照)。

暖水塊域: 表層混合層内で均一な分布を行う。

混乱水域(暖水塊縁辺域): 深度20~30m

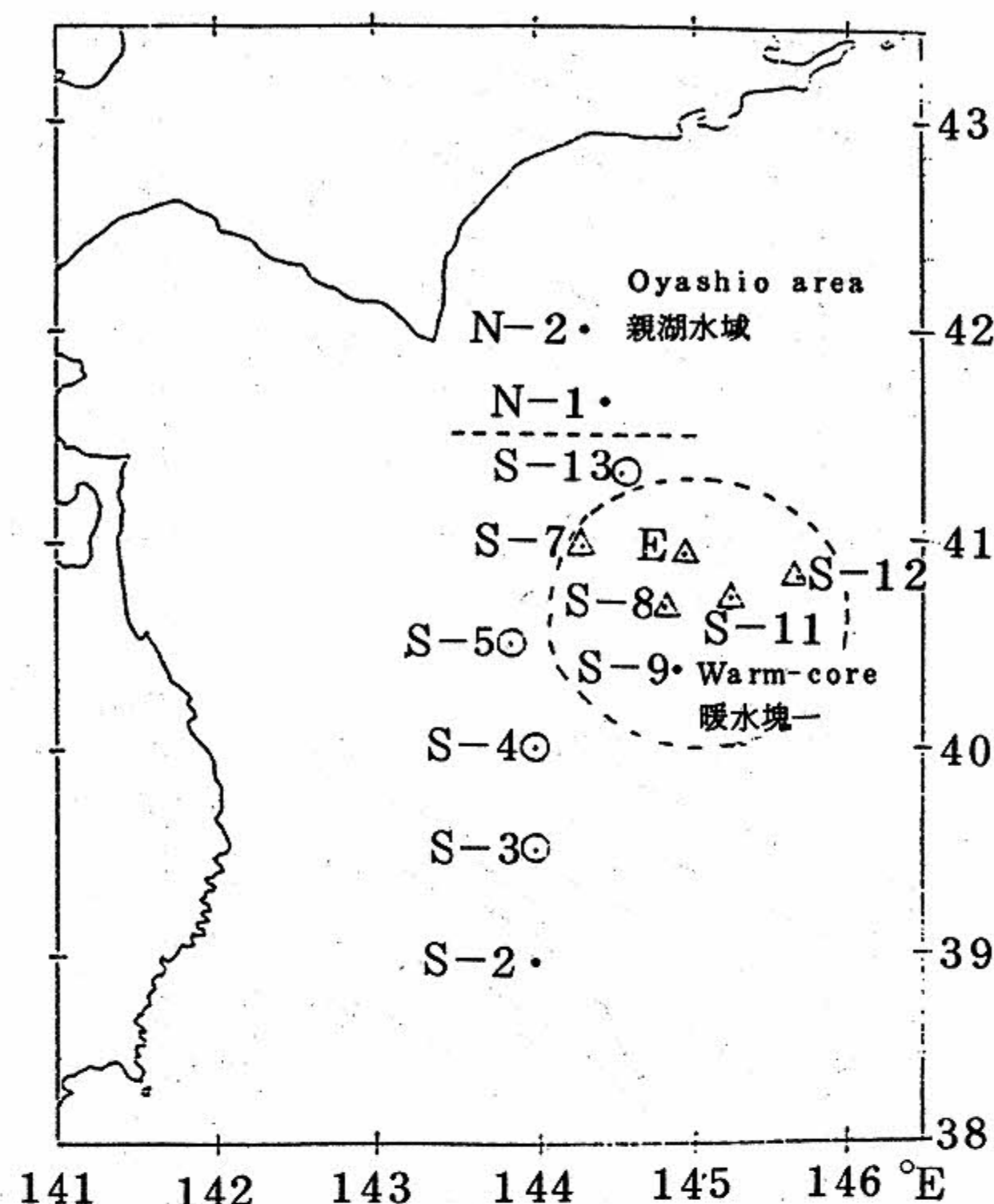


図18 海域の特性と蛍光の鉛直分布パターン

Water types and fluorescence profiles

○: 躍層内に蛍光ピークあり

Station with a fluorescence peak in the thermocline

△: 主に表層混合層内で高い蛍光値を示す

Station with a high fluorescence value only in the mixed layer

にピークを有する。

親潮水域: 表層混合層以深まで分布する。

5.4 蛍光の鉛直微細分布

今回の観測では暖水塊の周辺に相当する3ステーション(S-3, S-5, S-13)で顕著な蛍光のピークが見られた。このうちS-3とS-5は幅のかなり狭いピークを示した。移動平均前のデータによるとS-3のピークは23~28m間に、S-5のピークは21~25m間に存在した。また両ピークの中心は塩分極大層の上層に位置し、ピークの大部分はこの塩分極大に含まれた。一方、S-13はやや幅の広いピーク(10~28m間)を示した。ピーク中心は表層混合層直下の躍層の下端に位置し、ピークの上半分はこの躍層内に、下半分はこの躍層直下の均一層内に含まれた。

これらのピークに対応する密度(σ_t)がほぼ等しい(S-3: 25.5, S-5: 25.65, S-13:

25.6)ことは注目すべきである。

今回観測された蛍光のピークは、相模湾で観測されたものと比較して幅がかなり狭い。Yamawaki (1983)は夏季相模湾の10ステーションで蛍光の鉛直微細分布を観測し、蛍光のピークを上層と下層に分けた。彼によると、下層の幅は15~47 mであった。一方、今回のS-3とS-5では下層は3 m以下であり、S-15でも10 m以下であった。夏季相模湾の蛍光ピークが、深度の増加とともに減少する上方からの光と、逆に増える下方からの栄養塩の供給のバランスで形成されたとすれば、相模湾で見られた長い下層は、長時間の定常状態を仮定しはじめて説明できる。一方、夏季三陸沖で得られた幅の狭いピークは、相模湾とは異った成因を示唆する。

一方、Tomosada (1978)は古い暖水塊に水温の逆転層が多いことから、暖水塊の消滅機構として、暖水塊縁辺で暖水塊水がパッチ状となって外部にpeeling offしているとした。今回観測した暖水塊は、1982年6月頃に38°N, 144°Eを中心として発生した、かなり大きな暖水塊(石川ほか, 1983)が越冬し古くなったものと考えられる。したがって今回の暖水塊がpeeling offを行っている可能性は十分にある。

われわれは、暖水塊周辺部の蛍光ピークで見られた塩分極大層の存在、ピーク位置の密度が複数の海域で一致したこと、およびpeeling offを関連づけて、上記蛍光ピークの成因をつぎのように考察する。

暖水塊の深層水(高塩分, 高栄養塩)がpeeling offを行い、等密度面に沿って浅層に輸送される。この上昇水が有光層(たとえば50 m以浅)に達すると、植物プランクトンの活発な増殖を引起す。植物プランクトンの分布は、当初、この上昇水層内に限られ、幅の狭いピークを示す(S-3, S-5の場合)。一方、この上昇水は、まわりの低塩分水と混合しながら等密度面上昇するであろうが、有光層に達した後でも十分に高い塩分を有すると考えられる。すなわち、塩分極大を形成する。時間経過とともに植物プランクトンは沈降し、ピーク幅を拡大する。同時に、高塩分層は拡散し、塩分の極大層は消失する。ただしS-13の場合には上記の説明を少々修正する必要がある。

すなわち、ほぼ表層まで押し上げられた深層水によって、表層混合層内では植物プランクトンの活発な増殖が行われる。その後、大部分の植物プランクトンは沈降し、躍層の下端に集積するとともに一部は躍層直下の、より均一な層に達する。

5.5 暖水塊の内・外海域における蛍光の鉛直分布(諸外国との比較)

ここでは暖水塊内部とその周辺域の蛍光またはクロロフィルなどについて、われわれの観測結果と諸外国のものを比較検討する。

今回の三陸沖観測

暖水塊内部では表層混合層にのみ高い蛍光値が見られ、それは均一に分布していた。暖水塊の周辺部では、浅層(深度20~30 m)に蛍光ピークが見られた。また、同時に行ったクロロフィルaとフェオフィチンの測定(東海大, 筑波大)から、浅層(~深度20 m)の色素和は暖水塊内部と周辺域で両者に差のないことが示された。

Gulf Stream

Gordon et al. (1982)はCZCSによって暖水塊中央部の表層水のクロロフィル濃度が周辺とくらべて少ないことを観察した。一方, Joyce et al (1984)は1981年6月に発生した暖水塊(81-D)について、中央部では同年の9月に低い色素和を示したが10月には10倍以上に増え、2.0 $\mu\text{g}/\text{l}$ を示したと報告している。Joyce and Wiebe (1983)は1982年の2月に発生した暖水塊(82-B)について、つぎのように報告している。中央部では3~4月までは外側のSlope Waterよりも生物量が少なかった。4月に両水域で生物が増殖を始め、6月には植物プランクトンが中央で増え、Slope Waterでは減少を始めた。動物プランクトンについては、中央の方がSlope Waterよりも多くなった。しかし秋になり暖水塊の消滅時には、逆にSlope Waterの方で動物プランクトンが多くなった。

California Current System

暖水塊は沿岸水(冷水)を巻き込んで独特の2層構造(上層:冷水塊, 下層:暖水塊)を示す(Simpson, 1984)。色素和は暖水塊の縁辺のフロント部および中央部の両海域でほぼ同一濃度(約0.3 mg/m^3)のピークを示し、その深度は中央の約80 mから縁辺に向って上昇している。

(Haury, 1984)。

East Australian Current

Jeffrey and Hallegraeff (1980) によると、1978年の夏季の暖水塊(Eddy F)の中央および縁辺の両方にクロロフィルaのピークが認められ、前者は $0.5 \sim 0.9 \mu\text{g}/\text{l}$ で約100m深度にあり、後者は $0.3 \sim 0.4 \mu\text{g}/\text{l}$ で約50m深度にあった。一方、Tranter et al. (1980a, 1980b)は、上記と同時期に同じ暖水塊について蛍光の鉛直分布を測定し、暖水塊中央および縁辺の水溫躍層内の約50m深度に蛍光ピークを認め、前者のピーク値が後者のものより約2倍高いと報告した。なお、この報告書にある蛍光のピーク幅は最も狭いもので約50mであった。

今回の三陸沖観測で得られた蛍光の鉛直分布はつぎの点で諸外国の例と異なる。

- (1) 三陸沖では暖水塊中央に蛍光のピークが認められなかった。
- (2) 三陸沖の暖水塊の周辺に見られる蛍光のピーク幅はかなり狭い。

上記(1)の理由は今回の観測が異常に強い冷夏に行われたために暖水塊内部に夏季の温度躍層が十分に発達してなかったためと考えられる。そうだとすれば(1)は三陸沖に関して本質的な特徴ではない。上記(2)は新らしい知見である。これが暖水塊の周辺で起こりうる一般的な蛍光分布なのか、偶然今回だけ観測されたものかを今後確認する必要がある。

5.6 水平観測で見られた蛍光のピークの成因

今回の水平観測(図14)では暖水塊域、親潮水域および両者の中間域が、水溫と塩分から明瞭に区別できた。そして、中間域のほぼ中央にM字型の大きい蛍光ピークが見られた。ここでは、この蛍光ピークの成因について考察する。

M字形ピーク付近の水溫と塩分のスケールを拡大して図19に示す。蛍光がM字形のプロファイルを示すのに対して、水溫はW字形のそれを示す。そして蛍光の二つのピークに対応する水溫が約 0.5°C 低下している。また、それらの場所で塩分が微増している。この海域では深度の増加とともに水溫が低下し塩分が増加していた(函館海洋気象台, 1983)。したがって図19のM字形ピーク

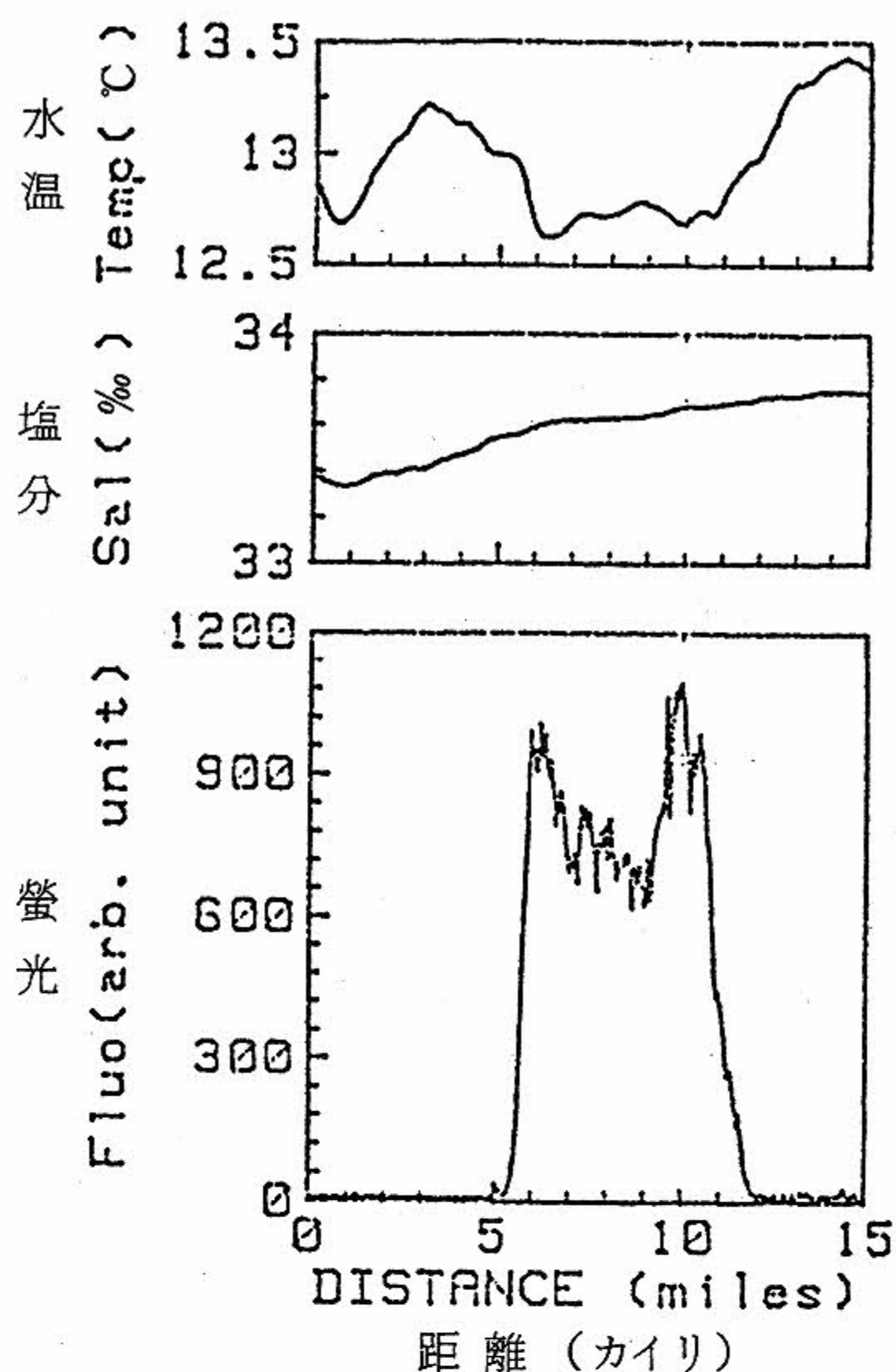


図19 蛍光、水溫、塩分の水平分布(図14の拡大)

Horizontal profiles of Fluorescence, Temperature and salinity (enlarged Fig. 14)

は湧昇と関係している。

それでは湧昇の原因は何か、とくに中間域のほぼ中央、暖水塊側のフロントから10Km以上離れた海域で起こりうる湧昇について検討を行ってみる。

暖水塊の縁辺では時計回りの強い流れが間欠的に生じると言われている(Fitzgerald and Chamberlin, 1979; Kirwan et al, 1984; Joyce and Stalcup, 1984)。今回の観測期間中も暖水塊の北縁で $0.3 \sim 1.2 \text{ Kt}$ の東流が観測された(函館海洋気象台, 1983)。このような強い流れによって、暖水塊よりのフロント(図14)の北側に直径10~30Kmの反時計回りの小規模な渦(Cyclonic Spin-Off eddies — Lee and Mayer, 1977)が発生してもおかしくはない。このような反時計回りの渦の中央では湧昇を生じ、表層に数Km~数10Kmの冷水域を発生させる、と報告されている(Pingree et

al, 1979; Yode et al, 1981; Walsh et al, 1981, Paluszkiwicz and Atkinson, 1983)。上記の説明によって、暖水塊の縁辺（中間域とのフロント部）から15～25 Km北方に湧昇の生じうる条件のあったことが明らかとなった。

湧昇現象によって表層の蛍光（植物プランクトン）が増加する理由として、つぎの2例が挙げられる。1つは、より深層のより多くの栄養塩を含んだ海水が表層に運ばれ、そこで活発な植物プランクトンの増殖を引き起こす例（Takahashi et al, 1980）である。他の一つは亜表層で増殖していた植物プランクトン（これは蛍光ピークに対応する）を表層水中に輸送する例（Pingree et al, 1979）である。今回の観測データからM字形の蛍光ピークの成因が上記のどちらの例に該当するかを判断することはできない。しかし暖水塊の周辺の浅層に存在する大きい蛍光ピークは後者の可能性を検討する場合、注目に値する。

6. おわりに

夏季の三陸沖で水温、塩分および蛍光によって鉛直方向の微細分布および水平方向の連続分布を観測した。鉛直方向の観測点は暖水塊域、混乱水域および親潮域に分けられ各海域に特有な蛍光の鉛直分布が得られた。暖水塊域では、表層混合層（35～50 m）内で均一な蛍光の分布が見られた。混乱水域では、深度20～30 mの密度躍層内に幅の狭い蛍光ピークが認められた。親潮域では、蛍光値は低かった。水平方向の観測では、暖水塊域、親潮域および両者の中間域が明確に区別でき、中間域のほぼ中央にM字形の高い蛍光水域を記録した。このM字形の高蛍光域と湧昇の関係、および鉛直方向の幅の狭い蛍光ピークと暖水塊内部水のPeeling off の関係を考察した。

本観測では、高い空間分解能で水温、塩分および蛍光を同時に測定し、海域の特性と蛍光の分布様式に関する基礎的なデータを得た。三陸沖における幅の狭い蛍光ピークの存在、およびM字形の高い蛍光水域の存在は、今回の観測によって初めて明らかにされた。

三陸沖の重要性が高いわりには、それに関する知見が不足している。今後は鉛直および水平の両

方向（鉛直断面）について空間分解能の高い観測とデータの蓄積が望まれる。このとき、できるだけ多くの有効な要素（生物、物理、化学的）を同時に観測することが、得られたデータの総合的な価値を向上させる意味で肝要である。

文 献

- 1) Cheney, R.E., 1977, "Synoptic Observations of the Oceanic Frontal System East of Japan", J. Geophys. Res. 82 5459–5467.
- 2) Fitzgerald J.L., Chamberlin J.L., 1979, "Anticyclonic Warm-core Gulf Stream Eddies off the Northeastern United States in 1979", Conseil Int. pour L'exploration de la Mer, Annales Biologiques, 36 44–51
- 3) Gordon, H.R. et al., 1982, "Satellite Measurement of the Phytoplankton Pigment Concentration in the Surface Waters of a Warm Core Gulf Stream Ring", J. Mar. Res. 40 491–502
- 4) 函館海洋気象台, 1983, "海洋速報" 21 (3), 39
- 5) Haury, L.R., 1984, "An Offshore Eddy in the California Current System, Part IV; Plankton Distributions", Prog. Oceanog. 13 95–111
- 6) 石川孝一ほか, 1983, "144° E線における黒潮と親潮", 黒潮の開発利用の調査研究成果報告書(その6), 科学技術庁/海洋科学技術センター, 63–72
- 7) Jeffrey, S.W., Hallegraeff G.M., 1980, "Studies of Phytoplankton Species and Photosynthetic Pigments in a Warm Core Eddy of the East Australia Current, I, Summer Populations", Mar. Ecol. Prog. Ser. 3 285–294
- 8) Joyce, T. et al, 1984, "Rapid Evolution of a Gulf Stream Warm-core Ring", Nature, 308 837–840
- 9) Joyce, T.M. Stalcup, M.C., 1984, "An Upper Ocean Current Jet and Internal Waves in a Gulf Stream Warm Core Ring",

- J. Geophys. Res. 89 1997–2003
- 10) Joyce, T. Wiebe, P., 1983, "Warm-Core Rings of the Gulf Stream", *Oceanus* 26 34–44
 - 11) 川合英夫, "黒潮と親潮の海況学", 海洋物理Ⅱ, 海洋科学基礎講座2, 増沢護太郎編, 東海大学出版会, 129–321
 - 12) 菊池京子, 高橋正征, 1984, "日本近海における超微小植物プランクトン cyanobacteria の分布", 1984 年度日本海洋学会春季大会講演要旨集, 202–203
 - 13) 木村喜之助, 1970, "黒潮前線から分離する暖水塊の漁場形成機構" 海洋科学 2 562–567
 - 14) Kirwan, A.D. et al., 1984, "Lagrangian Observations of an Anticyclonic Ring in the Western Gulf of Mexico", J. Geophys. Res. 89 3417–3424
 - 15) Lee, T.N., Mayer, D.A., 1977, "Low-frequency Current Variability and Spin-off Eddies along the Shelf off Southeast Florida", J. Mar. Res. 35 193–220
 - 16) Malone, T.C. 1980, Algal Size, In: Morris I. (ed.), The Physiological Ecology of Phytoplankton, Blackwell Scientific Publication, 433–463
 - 17) 永田豊, 吉田次郎, 1984, "暖水塊・黒潮フロントの微細構造", 海洋科学 1 6 431–436
 - 18) Paluszkiwicz, T, Atkinson, L.P., 1983, "Observations of a Loop Current Frontal Eddy Intrusion onto the West Florida Shelf", J. Geophys. Res. 88 9639–9651
 - 19) Pingree, R.D. et al., 1979, "Phytoplankton Growth and Cyclonic Eddies", Nature, 278 245–247
 - 20) Simpson, J.J., 1984, "An Offshore Eddy in the California Current System, Part III: Chemical Structure", Prog. Oceanog. 13 71–93
 - 21) 高橋雅彦, "三陸沖における植物プランクトンが発するけい光の連続観測について", 東海大学海洋学部, 1984, 卒業研究論文,
 - 22) Takahashi M. et al., 1980, "Upwelling Plumes in Sagami Bay and Adjacent Water around the Izu Islands, Japan", J. Oceanogr. Soc. Jap. 36 209–216
 - 23) Tomosada, A., 1978, "A Large Warm Eddy detached from the Kuroshio East of Japan", Bull. Tokai Reg. Fish. Res. Lab., (94) 59–103
 - 24) Tranter, D.J. et al., 1980a, "In vivo Chlorophyll a Fluorescence in the Vicinity of Warm-Core Eddies off the Coast of New South Wales", 4, December 1978, CSIRO Aust. Div. Fish. Oceanogr. Rep. 113 1–32
 - 25) Tranter, D.J. et al., 1980b, "Are Warm-Core Eddies Unproductive?", Nature, 284 540–542
 - 26) 辻義人ほか, 1982, "蛍光・散乱・透過率センサー I 型の試作", JAMSTECTR(8), 43–64
 - 27) 辻義人ほか, 1983, "CTD・蛍光・散乱・透過率センサー用データ伝送・記録処理システム", JAMSTECTR(10), 147–160
 - 28) Vastano, A.C., Bernstein, R.L., 1984, "Mesoscale Features along the First Oyashio Intrusion", J. Geophys. Res. 89 587–596
 - 29) Walsh, J.J. et al., "Fate of Nutrient Enrichment on Continental Shelves as indicated by the C/N Content of Bottom Sediment", In: Nihoul, J.C.J. (ed.), Ecohydrodynamics, Elsevier, 1981, 13–49
 - 30) Yamamoto, I. et al., 1981, "Microplankton Distribution at an Oceanic Front formed in the Sanriku Waters off Northeast Japan", Bull. Pla. Soc. Jap. 28 111–120
 - 31) Yamawaki, R., "The Small Scale Vertical Distribution of Chlorophyll within the Subsurface Chlorophyll Maximum Layer", Univ. Tsukuba, 1983, M. Art Thesis
 - 32) Yoder, J.A. et al., 1981, "Role of Gulf Stream Frontal Eddies in forming Phyto-

plankton Patches on the Outer South-
eastern Shelf", Limnol. Oceanogr. 26

1103-1110

(原稿受理: 1984年10月12日)