

1985年9月三陸・常磐沖の流速および 水温構造の観測

黒田 芳史^{*1} 原 俊明^{*1} 辻 義人^{*2}
美澄 篤信^{*1} 甲斐源太郎^{*1}

三陸・常磐沖の黒潮や暖水塊の構造を把握する目的で1985年9月に海洋観測を行った。その観測でドップラー測流計による100m深まで3層の流速測定およびXBTによる水温測定を行ったので、それらの結果について報告する。

黒潮は常磐沖にあり最大流速2 m/secをもち半径80~100 kmで半弧を描き蛇行していた。0-100 m深の流量は $13\sim 15 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{sec}$ であり、海面高度差は約1 dynamic meter と推定された。黒潮北上分派は黒潮前線北縁から分流したと考えられ東西に100 km 程度の幅をもち、20m深で北流最大1 m/sec, 南流最大1.5 m/secであった。100 m深の流速は20m深の1/2程度であり、深くなるとともに急激に小さくなった。また0-100m深の流量は北流域で $3.9 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{sec}$, 南流域で $3.4 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{sec}$ と見積られ、北流, 南流の流量はほぼ平衡していた。

Velocity and Temperature Structure off the East Coast of Japan: An Observation Using Acoustic Doppler Current Profiler in September 1985

Yoshifumi KURODA^{*3}, Toshiaki HARA^{*3}, Yoshito TSUJI^{*4}
Atsunobu MISUMI^{*3}, Gentaro KAI^{*3}

We observed the velocity and temperature structure of the Kuroshio front and other temperature fronts off the east coast of Japan using an acoustic Doppler current profiler and expendable bathythermographs (XBT).

The Kuroshio meandered with radius 80-100 km; maximum velocity was 2 m/sec. The volume transport through the 0-100 m layer of the Kuroshio was $13\sim 15 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{sec}$. The sea surface height was estimated to differ by about 1 dynamic meter between the center of the meander and the point with the maximum velocity. The Kuroshio branch, which was defined in this paper as the area whose temperature at 200 m depth was greater than 10°C , was about 100 km in width. The maximum northward velocity of the Kuroshio branch was 1 m/sec; the

*1 海洋開発研究部

*2 企画室

*3 Marine Research and Development Department

*4 Planning Department

maximum southward velocity was 1.5 m/sec. Velocities at 100 m depth were half those at 20 m depth. The observed volume transport through the 0-100 m layer of the Kuroshio branch was $3.9 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{sec}$ northward and $3.4 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{sec}$ southward across one section, therefore, it could be said the net northward transport was very little.

1. はじめに

本州東岸の黒潮続流域は、北太平洋における亜熱帯循環の西岸境界流としての黒潮が離岸すると同時に亜寒帯循環と接しながら蛇行を繰り返す、黒潮自身の運動エネルギーを消費する海域であるとともに亜熱帯循環から亜寒帯循環へ熱エネルギーを輸送する海域でもある。この黒潮続流域の海況変動は南北の熱輸送を支配し、海洋のみならず、短期、長期の気象変動にも影響を及ぼしているものと考えられる。他方、漁業の面から見ても、黒潮系の暖水と豊富な栄養塩をもつ親潮系の冷水が接する三陸・常磐沖の海洋前線域では生物生産が盛んであり、好漁場を形成することが知られている。

このようにこの海域は気象や漁業に密接に係わっていることから、従来から積極的に観測されてきている。しかしながらエネルギー輸送や、塩分や魚の卵稚子などの物質輸送を考える場合、あるいは海洋前線の詳細な構造を調べようとする場合、従来からの海洋観測手法では十分なデータが得られないと考えられる。従来、流速計については、CTD観測や採水から得た密度場から流速を推定する地衝流計算や、GEKによる表層流の測定が行われてきた。しかし地衝流計算においては無流面の仮定に妥当性があるかどうかの疑問がある上、流れの空間変化の激しい海域では詳細な水平流速シアを計測することはできない。また、GEKにおいてはごく表層の測流に限られ鉛直シアが大きいと考えられる前線域の鉛直流速構造を測ることはできない。両者とも流れのパターンを把握するに限られ、前線域の比較的小スケールの水平、鉛直の流速構造を計測することはできない。

そこで筆者らは、近年船舶からの測流の方法として内外で利用され始めた超音波ドップラー測流計（今回用いたものは20m, 50m, 100 m層の3層に限られる）によりこの海域の流速分布の把握を試みた。今回行った観測において特に、黒潮が本州を離岸してからあらわれる第1の蛇行の峰の流速構造、およびそれから分流したと考えられる黒潮北上分派に付随する前線域の流速構造を把握することができた。そこでXBTによる水温観測の結果ともあわせて検討し、以下に報告する。

2. 観測の概要

海洋科学技術センターでは、1985年9月11～21日にかけ海中作業実験船“かいよう”（2840 t）を使用し、三陸・常磐沖で観測を行った。その期間内の9月12～16日にかけて行ったドップラー測流計（日本無線社製JLN610）による100m深まで3層（20m, 50m, 100m深）の流速測定、およびXBTによる水温測定の結果について報告する。図1に測線Ⅰ～Ⅶ、XBTの測点1～75の位置を示した。

航送中は、20分毎にドップラー測流計による測定を行い1時間毎（約10マイル毎）にXBT測定を行った。このドップラー測流計は水深400m以深ではある深度の基準層（ここでは20m深）に対する相対的な流速（対水速度）および船速（対水船速）しか得ることができない。そこでJoyce, Bitterman and Prada (1982)¹⁾が行ったと同様にドップラー測流計から各層の対水速度および対水船速を読みとるとともに、同時にロランC航法装置から海底に対する船速を読みとった。そして、対地船速と対水船速とのベクトル合成から基準層の

対地速度を求め、ほかの2層にもこの基準層の速度を加えることでこれらの層の対地速度を得た。読み取り値には、10数分の時間平均をかけているが、これは航走距離にすると約3kmの空間的な平均を行っていることに相当する。

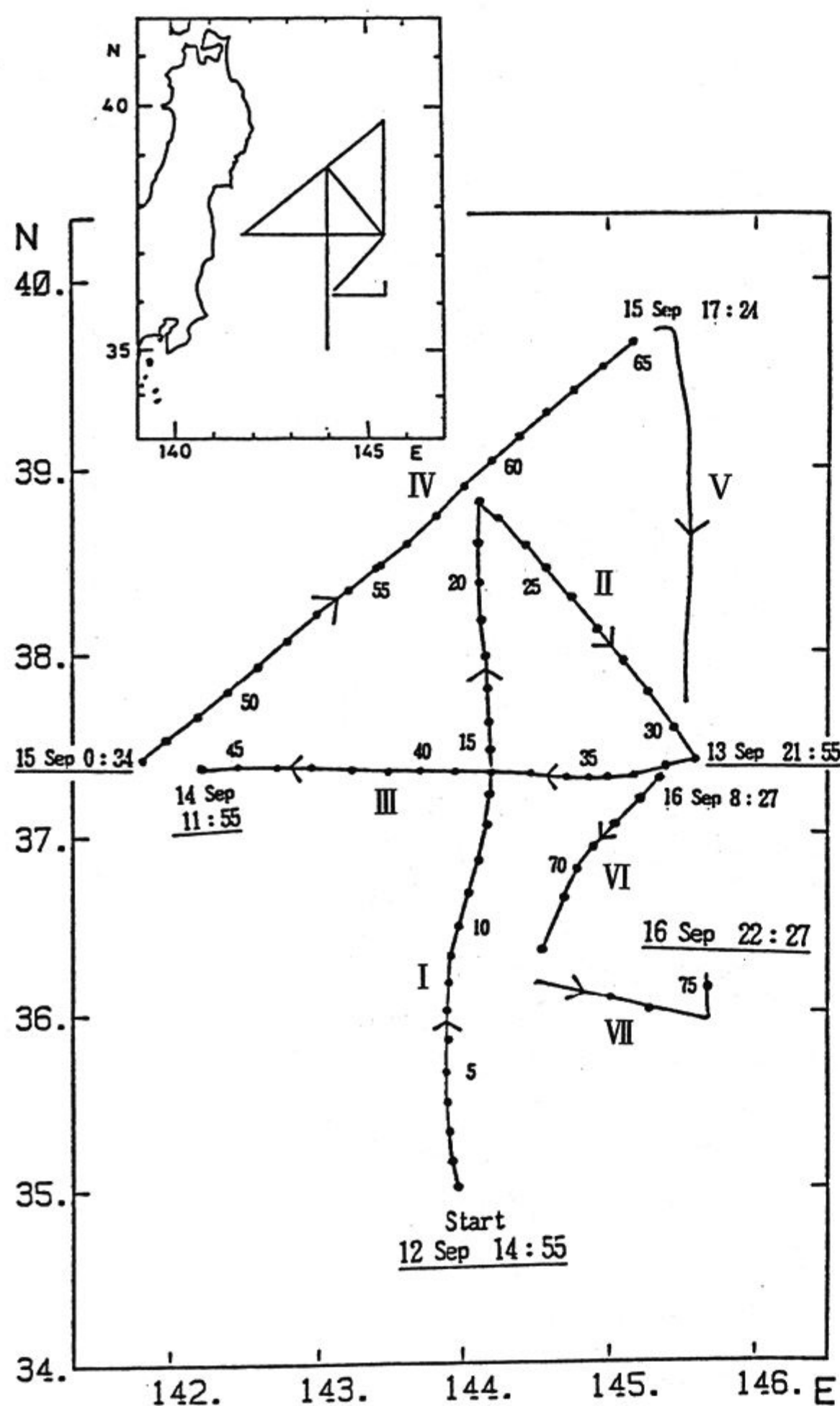


図1 1986年9月12～16日の“かいよう”による航跡
 図中・はXBT測点、I～VIIは測線番号
 Track of R/V Kaiyo with XTB locations during September 12-16 in 1985

なお、ドップラー測流計による流れの方向の妥当性については、図3の測線I上の船位置のドリフトから確かめられた。つまり観測時に東経144°線上で船首方位を方位0°に固定して航走し始めたにもかかわらず、始めは西へつぎに東へドリフトしている。このドリフトの方向は図中の流速ベクト

ルの向きと合致していて蛇行する黒潮の流れにより船が東西方向に流されたものと考えられる。

3. 観測結果および考察

3.1. 流速および水平構造

ここでは、XBTによる水温の水平分布およびドップラー測流計による流速の水平分布から観測時の黒潮や親潮の位置について概略を示す。

図2にXBTから得られた200m深における水温分布を示した。この図にあらわれた200m深15℃以上の水を黒潮、これから北へつながる10℃以上の水を黒潮北上分派、5℃以下の水で沿岸側に存在するものを親潮第1分岐、同じく5℃以下で黒潮北上分派より沖側に存在するものを親潮第2分岐であると定義し、以下の記述をすすめる。ここで黒潮北上分派としたものは、一般的定義は明確でないが、川合(1972)²⁾がいうところの黒潮2次前線が、ここでの黒潮北上分派の縁辺部の前線に対応するものと考えられる。またこの黒潮北上分派が黒潮から切離されれば、暖水塊として解釈されるものである。

次に図3a, bにドップラー測流計から得られたそれぞれ深度20m, 100mでの水平流速分布を示した。黒潮は144°E上を見ると36°40'Nで東流、35°Nで南西流となり最大2m/secの強い流れとなっている。極大流速部を黒潮の流軸とすると、測線I, VI, VIIの流速分布から判断して流軸は144°E, 35°55'Nに中心をおき半径80-100kmで半弧を描き蛇行していると考えられる。

黒潮北上分派は測線III(37°20'N)上においては144°30'Eに北流1m/sec, 145°20'Eの親潮第2分岐との間の水温前線上で南東流1.5m/secの値を示した。そして測線VI上にも、東南に流れる黒潮と逆方向に北西へ0.5m/secの流れを示した。また測線I(144°E)上の37°Nより北側の海域は、黒潮北上分派の西縁にあたり、38°N～39°Nにかけて弱い前線が存在し1m/sec程度の北流成分をもつ。もしここで黒潮北上分派と呼んだこの暖水域が、黒潮と完全に分離されていたなら、いわゆる根の浅い暖水塊として判断したであろう。

3.2 流速および水温の鉛直構造

図4a, b, c, d, eにそれぞれ測線I, II, III, IV, VI上のXBTによる470m深までの鉛直

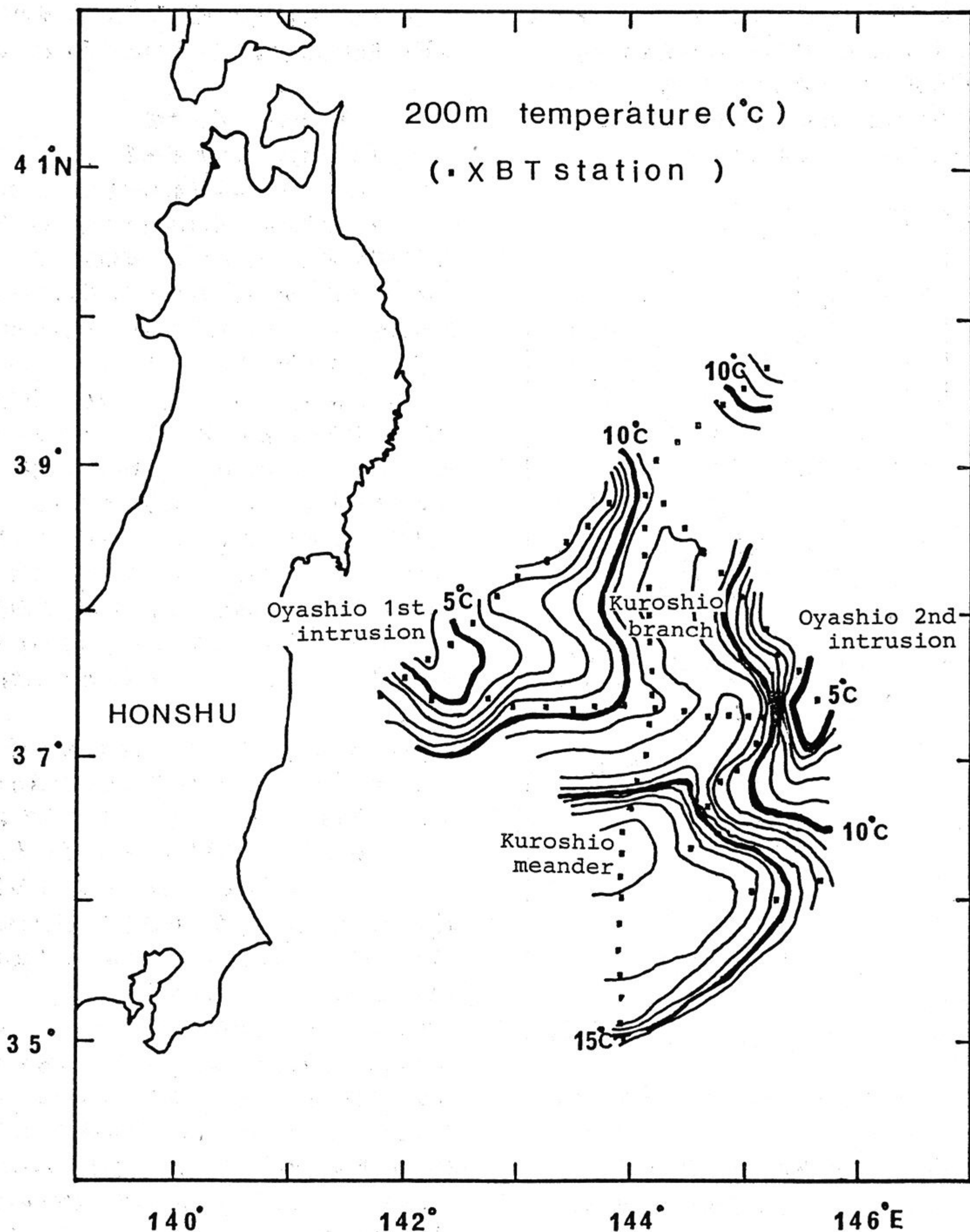


図2 XBT観測から得た200m深における水温分布 (原ら 1986)

Horizontal temperature distribution at 200m depth by XBT observation

断面水温分布およびドップラー測流計による20m深、100m深の流速の断面直交成分を描いた。以下では、これらの図から黒潮、黒潮北上分派の水温および流速の鉛直構造の特徴について述べる。

また Joyce (1984)³⁾がガルフストリームから派生した暖水渦をドップラー測流計で計測し、その地衡流平衡を示したようにここでは黒潮および黒潮北上分派の地衡流平衡について言及する。

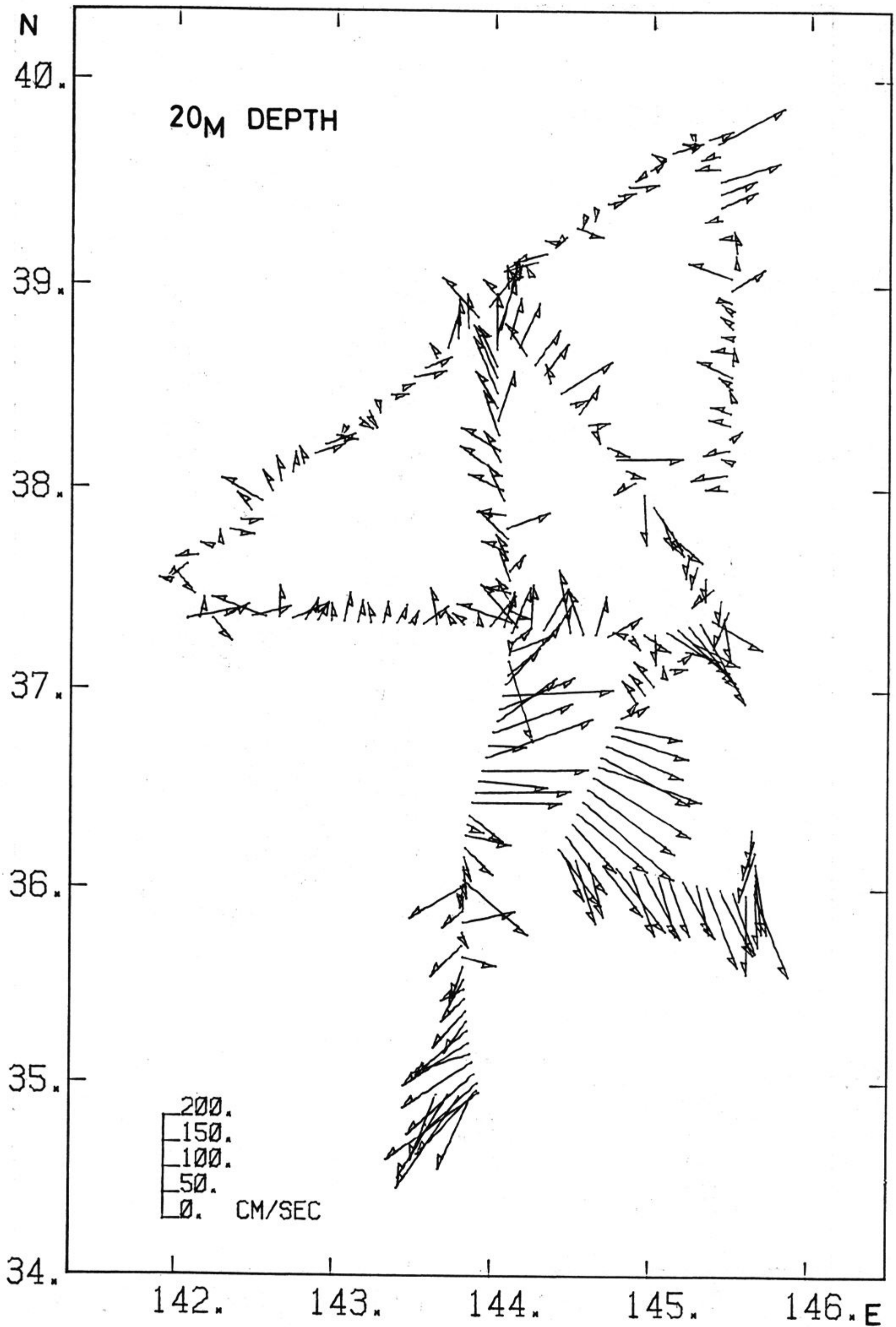


図3 a ドップラー測流計から得た水平流速分布

図3 aは20m深, 図3 bは100m深

Velocity fields at 20m depth(Fig.3a) and 100m depth (Fig.3b)'observed with the Doppler current meter

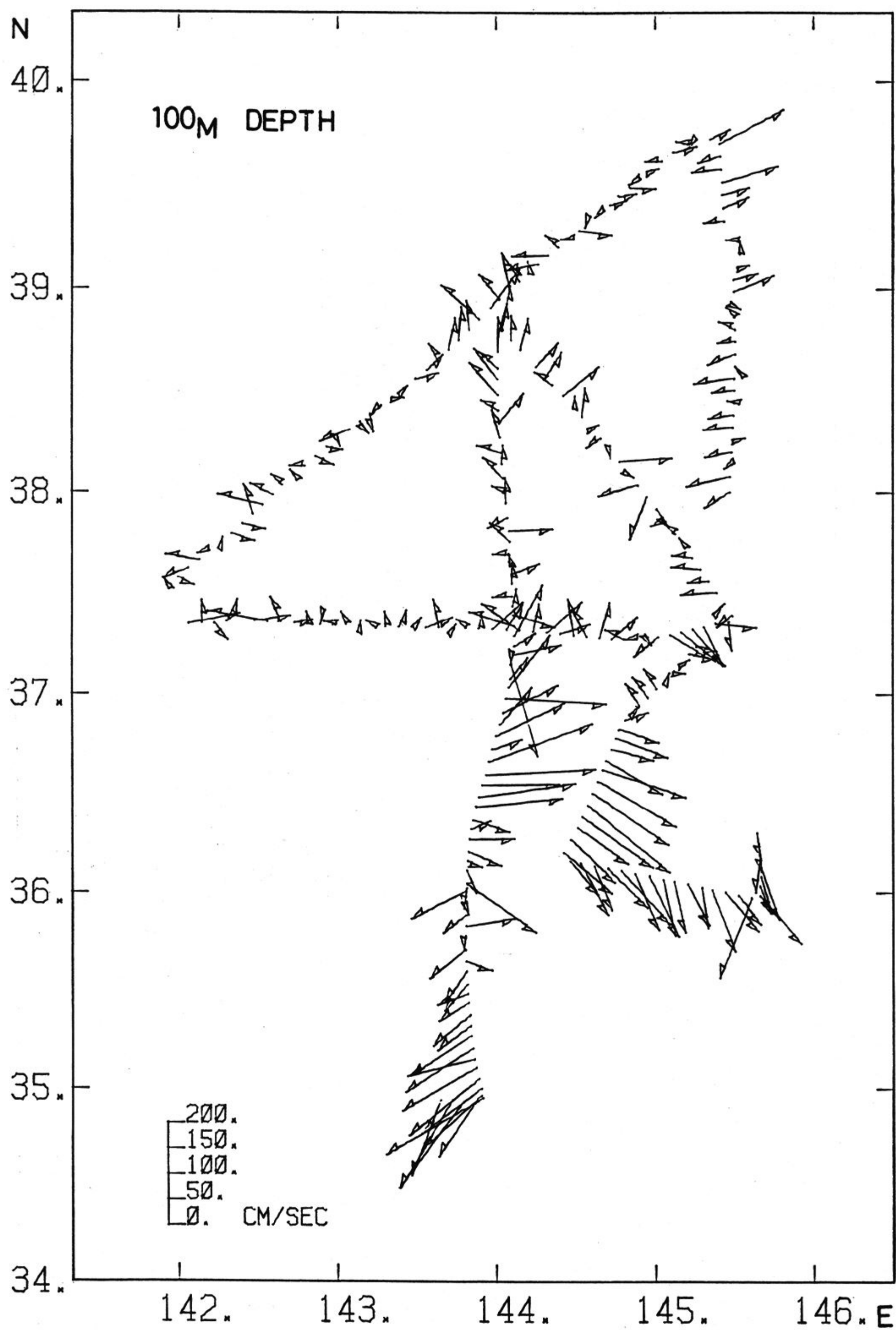


图 3 b

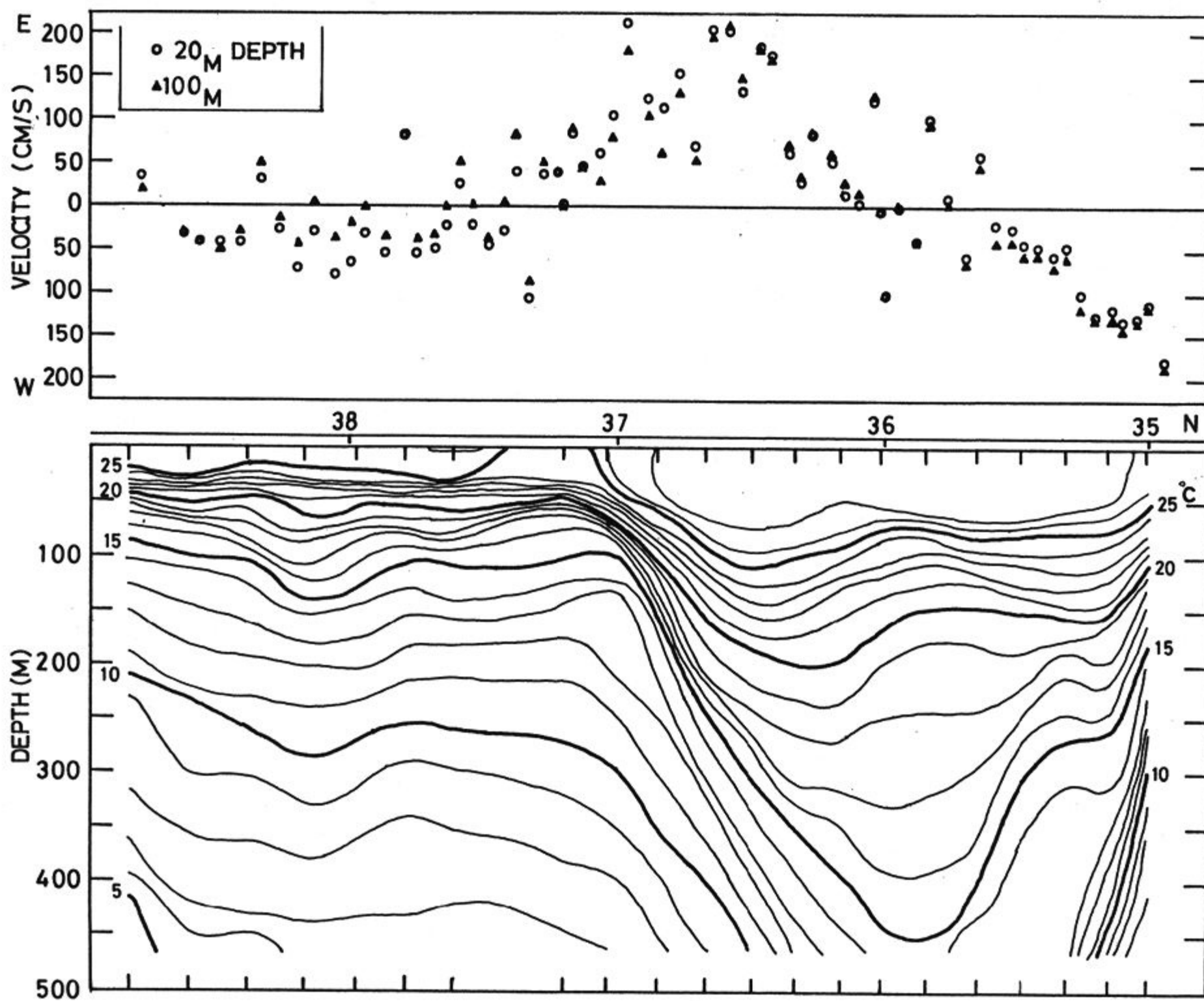


図4 a ドップラー測流計による断面直交成分の流速とXBT観測による鉛直断面水温分布の比較
 図4 a, b, c, d, eはそれぞれ測線 I, II, III, IV, VI,
 Velocity components across the sections at the 20m depth and 100m depth are
 plotted over the temperature sections obtained by XBT
 Fig.4a,b,c,d,e correspond to the section: I, II, III, IV, VI,

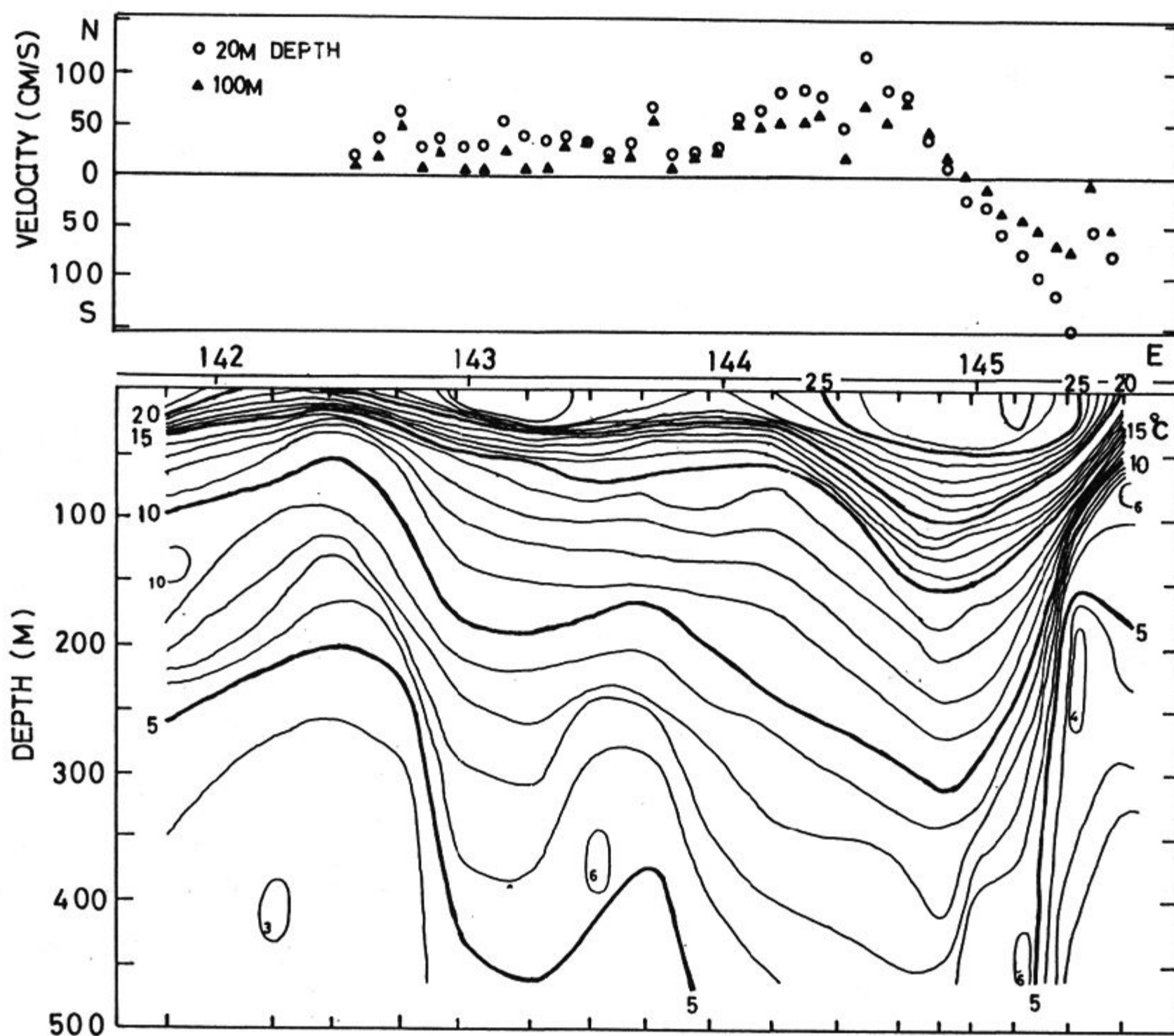


図4 c 測線 III

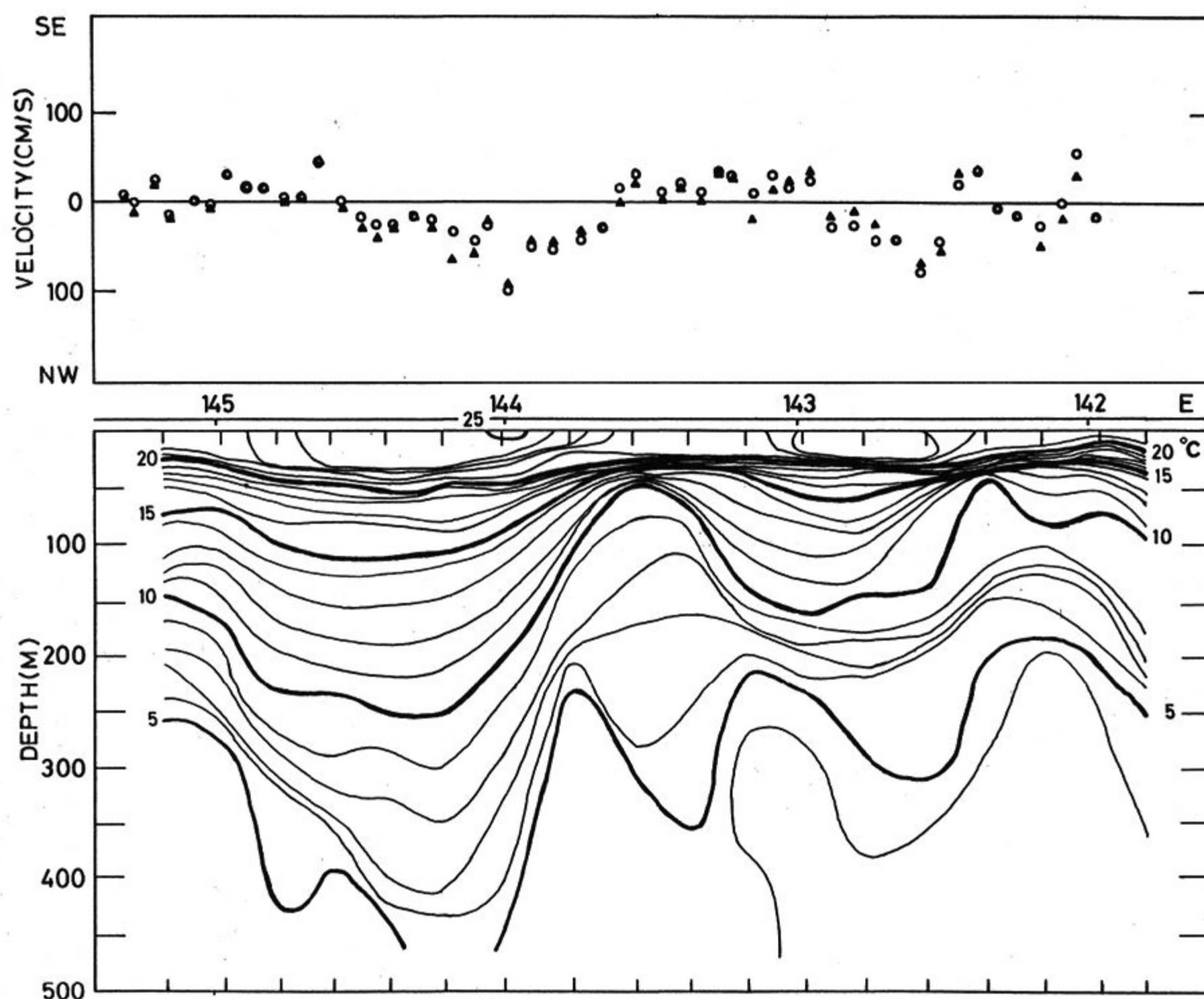


図 4 d 測線IV

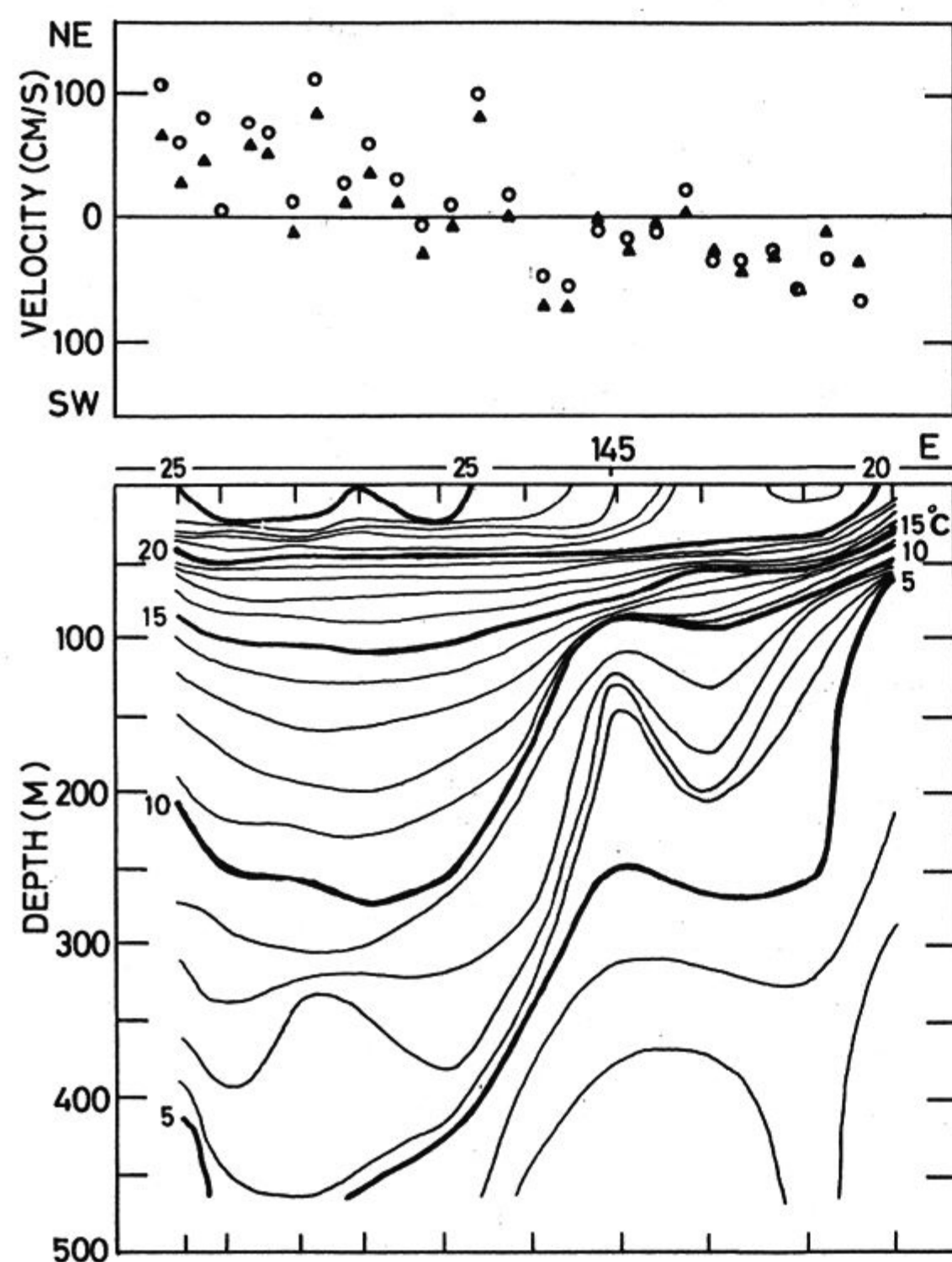


図 4 b 測線II

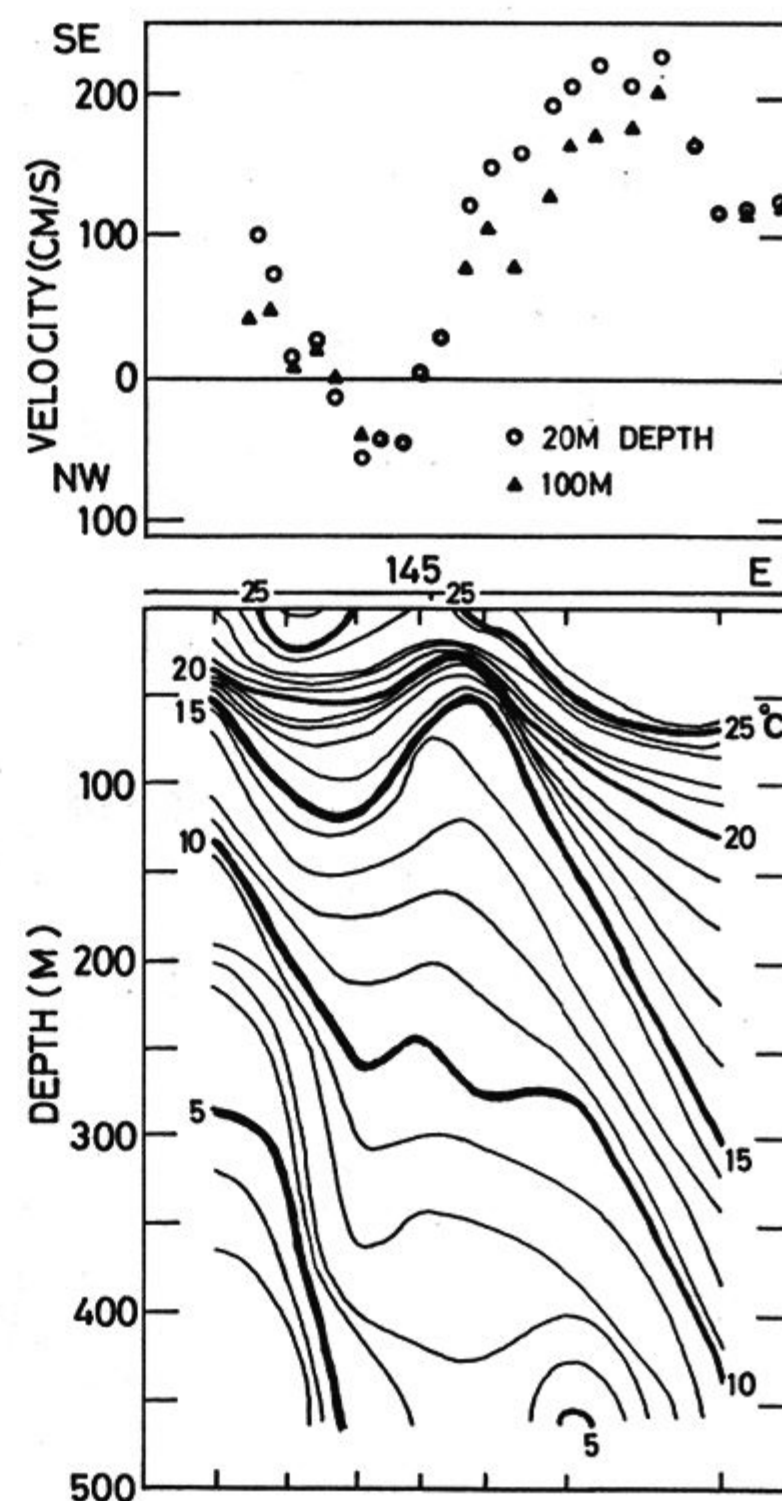


図 4 e 測線VI

表1 黒潮および黒潮北上分派域における特徴的スケールと地衡流平衡にあるとしたときの各項の値

Characteristics of the Kuroshio and Kuroshio branch

		深 度	流 速 u	水 平 スケール r	ロスビー数 $\frac{u}{fr}$	コリオリ項 fu	遠 心 力 $\frac{u^2}{r}$	力学高度差 ΔD
黒潮蛇行	東流域	20m, 100	200 cm/sec	85km	0.27	1.7×10^{-2} cm/sec ²	0.47×10^{-2} cm/sec ²	1.1 dynamic meter
黒潮北上分派	北流域	20	120	30	0.46	1.0×10^{-2}	-	0.30
		100	70	30	0.27	0.6×10^{-2}	-	0.18
	南流域	20	150	44	0.39	1.3×10^{-2}	-	0.58
		100	75	44	0.20	0.65×10^{-2}	-	0.29

$f=8.6 \times 10^{-5}$ rad/sec
dynamic meter= 10^5 cm²/sec

3.2.1 黒 潮

図4 aの測線Ⅰ上において、黒潮は海面から50～75mの厚さで27℃の等温層をもち、水温15℃の等温線の最大深度は450mであった。また、黒潮前線は36°30'～37°Nに存在し最大0.3℃/kmの勾配を示した。この水温前線内の36°40'Nに東流2m/secの最大流速があり、この緯度より南側では20m深と100m深での流速の大きさは同程度であった。これは表層の等温層が厚いことから20m深と100m深では同様な密度の水が占め、両者の深度における水平圧力勾配にほとんど差がない事を意味する。

37°Nでは1.5 m / sec程度の西流成分をもつ流れが存在し黒潮は大きく蛇行していると考えられる。この海域の黒潮の特徴的なスケールを図4 aから読みとり表1に示した。uは黒潮の最大流速で約2 m / sec, rは蛇行の中心から最大流速が現われるまでの距離で約85kmであり、これらの値からロスビー数は1より小さく地衡流平衡の状態にあるとみられる。

一般に曲座標上の地衡流は

$$f u + \frac{u^2}{r} = \frac{\partial D}{\partial r} \dots\dots\dots(1)$$

の関係を満たす。fはコリオリパタメータ、uは方位角方向の流速、rは蛇行の中心位置からの距離、Dは力学高度である。

(1)式の各項の評価を行った結果を表1に示した。それによると左辺第2項の遠心力の項は第1項のコリオリ項にくらべて30%近い値をもつこと、またΔDは約1 dynamic meterであることがわかった。黒潮域ではuの値が20m深と100 m深で変化しないことからこの2つの深度での各項目の値は等しい。

3.2.2 黒潮北上分派

図4 cの測線Ⅲ上で黒潮北上分派は、海面から40mの厚さで26℃の等温層をもち水温15℃等温線の最大深度は150mであり黒潮の1/3の値となりかなり浅くなっていた。この最大深度が現われたXBTの水温プロファイルは測線Ⅰの36°50'Nの黒潮北縁におけるXBTプロファイルと同様な形を示しこの付近から分流したものと考えられ、この測線Ⅲ上の暖水域が黒潮北上分派の源流と推測される。

この測線Ⅲ上の144°30' Eには水温勾配0.3℃/kmの前線があり、その場の流速は20m深で1.2 m/sec, 100 m深で0.7 m / secの北流成分をもつ。この前線は川合(1972)²⁾のいう黒潮2次前線にあたるものと解釈される。この東方の145°20'Eにある200 m深4℃の水は親潮第2分岐の低温水であり、黒潮北上分派との間に水温勾配0.7℃/kmの非常に強い水温前線を形成し、流速は20m深で1.5 m / sec, 100mで0.75 m / secの南流成分をもつ

ていた。この親潮第2分岐と黒潮北上分派の間の水温前線は黒田, 浅沼 (1986)⁴⁾に示されたNOAA 9号の9月8日の画像からも顕著に見られた。

黒潮北上分派域についても先と同様に地衡流平衡が成り立つとして(1)式の各項を評価する。この場合には, 流れは南北に直進とみて遠心力項は省略する。北流と南流間の流速0の位置を原点にとり, 北流および南流の極大値までの距離を特徴的水平スケールとした。北流域, 南流域の20m深, 100m深について図4cから値を読みとり各項の評価を行い結果を表1に示した。南流域の ΔD の値は0.6 dynamic meterで北流域の2倍の値をもち, 黒潮北上分派と親潮第2分岐との間により大きな水平圧力勾配をもつことを示す。つぎに20m深と100m深の ΔD をくらべると北流域でも南流域でも, 100m深での値は20m深の $\frac{1}{2}$ の値となり, 黒潮域にくらべて黒潮北上分派域では水平圧力勾配が深くなるとともに, 急激に減少していることがわかる。

3.3 0-100m深の流量

ここでは, 黒潮および黒潮北上分派がもつ0-100m深の流量を, ドップラー測流計で測った断面直交流速値を用いて見積った。各測線において鉛直方向に10m毎, 水平方向に10km毎の格子をとり, ドップラー測流計による20m, 50m, 100m深の値を格子内の中心に1次補間し(20m以浅は20m深の流速値をそのまま用いた。)断面積を乗じ各断面での流量を求めた。またXBTの値は10m毎にチャートから読み取った値を用い上と同様に1次補間し, 流量の積をとり0°C基準の熱流量とした。

これらの結果を図5に表わした。今回計測された黒潮流量は $13 \sim 15 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{sec}$ であった。秦 (1974)⁵⁾によるとこの海域の黒潮は $40 \sim 60 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{sec}$ の流量をもつので, 今回計測された流量は100m深までで黒潮の全体の流量のうち20~30%に相当することになる。

つぎに測線Ⅲ上の黒潮北上分派の0-100m深の流量について述べる。北流は $3.9 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{sec}$ であり, この時の0-100m深の黒潮流量の30%近い流量に相当する。しかし南流成分も $3.4 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{sec}$ の流量をもち北流成分とほぼ平衡していて黒潮北上分派の暖水域断面での北向きの流量はど

く小さいと考えられる。

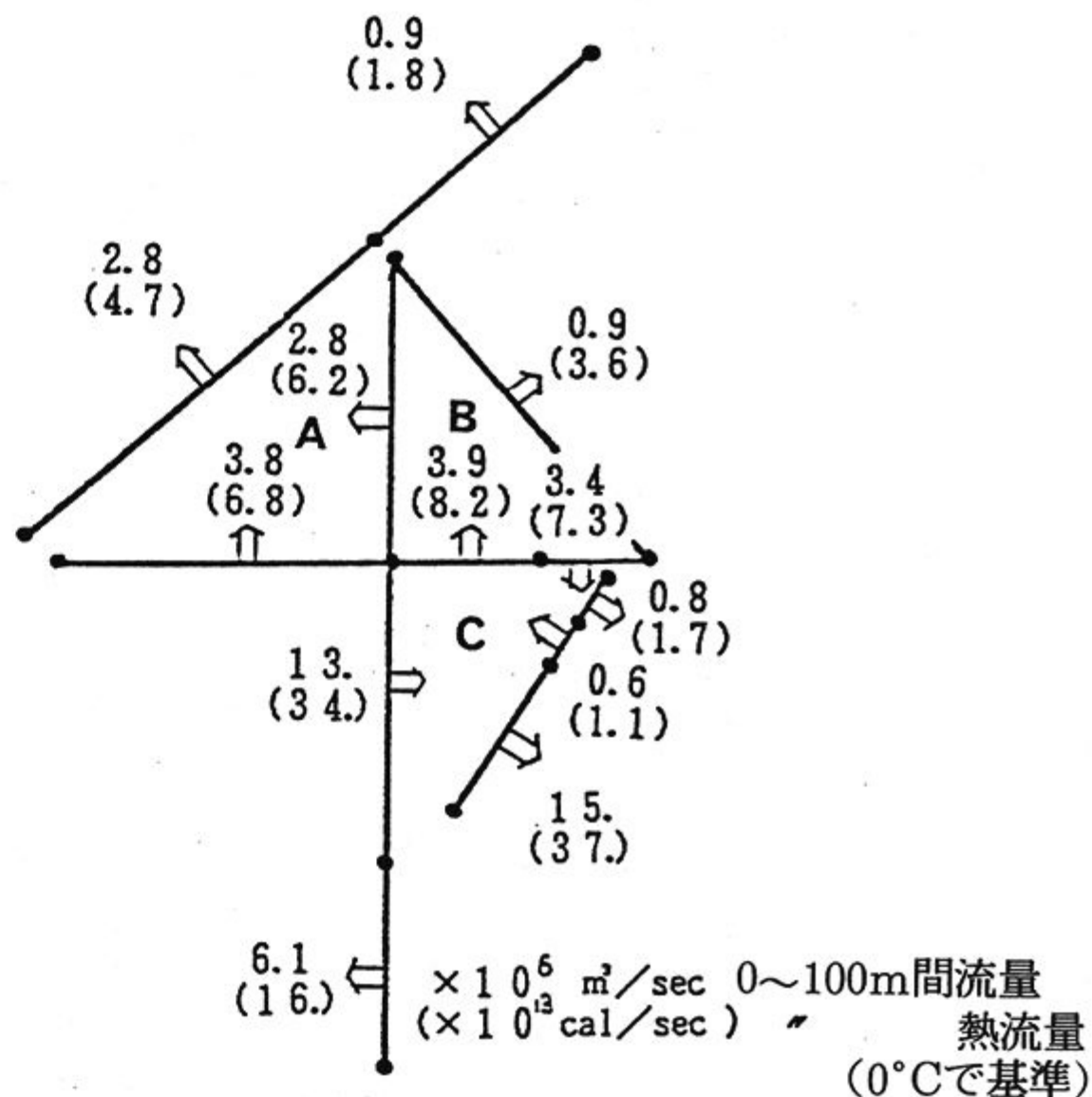


図5 0-100m深の断面流量

図中・は筆者らが断面を分割した点を示す
Volume transports across the vertical sections of the 0-100m depth

なお図5中, 各測線に囲まれたA, B, Cの三角形をした3つの各閉曲線内の流入, 流出を考えた場合, Aで $3.8 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{sec}$ の収束, B, Cで3.2および $2.7 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{sec}$ の発散が認められる。実際にこのような程度の値をもつものなのか, 各測線の測定時間差の為か, あるいは測定精度の問題なのかは今後の検討課題である。

4. まとめ

1985年9月12~16日にかけてのドップラー測流計による100m深まで3層の流速測定およびXBTによる水温測定から以下の事が明らかになった。

1) 黒潮は最大流速2 m/secをもち, 144°E , $35^\circ 55' \text{N}$ を中心とし半径80~100kmで半弧を描き蛇行していた。そして, 0-100m深の流量は $13 \sim 15 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{sec}$ であった。測定値から蛇行中心と最大流速が存在した地点との海面高度差は約1 dynamic meterと推定された。

2) 黒潮北上分派(200m深で 10°C 以上の水で区別される水域)は黒潮前線北縁から分流したとみられ, 東西に100km程度の幅をもち $37^\circ 20' \text{N}$ では深度20mで北流最大1.2 m/sec, 南流最大1.5

m/secを示し、その間の距離は70kmであった。100 m深の流速値は20m深の流速値の1/2程度となり、黒潮域と異なり急激に小さくなる。0-100m深の流量は北流域で $3.9 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{sec}$ 、南流域で $3.4 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{sec}$ であり北流、南流の流量はほぼ平衡していて、北向き流量はごく小さい。

最後に、観測航海中においては、堀明夫船長以下“かいよう”乗組員、および観測隊員の方々から多大な協力を得ました。ここに深く感謝の意を表します。

文 献

- 1) Joyce, T. M., D. S. Bitterman Jr., and K. E. Prada, 1982 “Shipboard acoustic profiling of upper ocean

currents”, Deep Sea Res., 7 A, 903-913.

- 2) 川合英夫, 1972, “黒潮と親潮の海況学”, 海洋物理II, 東海大学出版局, 129-321.
- 3) Joyce, T. M., 1984, “Velocity and hydrographic structure of a Gulf Stream warm-coring” J. Phys. Oceanogr., 14, 936-947.
- 4) 黒田芳史, 浅沼市男, 1986, “衛星熱赤外画像から推定される1985年三陸・常磐沖の海況変動”, JAMSTECTR, 17, 109-122.
- 5) 秦克己, 1974, “黒潮から分離した暖水塊の変動について”, 気象庁研究時報, 26, 295-321.

(原稿受理: 1986年11月7日)