

亜熱帯モード水のモニタリング研究

吉川 泰司^{*1} 安藤健太郎^{*1}

三寺 史夫^{*1} 花輪 公雄^{*2}

伊豆・小笠原海嶺上において、定期航路船を利用した北太平洋亜熱帯モード水(NPSTMW)のモニタリングを行なった。XBTを用いたモニタリングによって、1988年8月～1995年11月までの期間に、44の表層水温断面観測データ(912プロファイル)が取得された。このデータを用いて、伊豆・小笠原海嶺上に分布するNPSTMWの季節変化と年々変動を調べた。NPSTMWは晩冬季に黒潮の南方の海域で形成される。季節の進行と共にこの海域には、東方で形成された低温のNPSTMWが、深い深度に分布することが明らかになった。また、NPSTMWの鉛直一様性は徐々に弱まる傾向を示す。NPSTMWのコアの水温に年々変動が見られた。NPSTMWの中核水の水温の年々変動は、日本付近の冬季の大気場の年々変動と一致していた。NPSTMWのコアの水温は、形成される時期の大気場を反映しているという考えを支持する結果を得た。

キーワード：亜熱帯モード水、黒潮再循環系、海洋混合層

Variabilities of the North Pacific Subtropical Mode Water over the Izu-Ogasawara Ridge

Yasushi YOSHIKAWA^{*3} Kentaro ANDO^{*3}

Humio MITSUDERA^{*3} Kimio HANAWA^{*4}

The north Pacific subtropical mode water (NPSTMW) has been monitored since August 1988 by using a ferry ship over the Izu-Ogasawara Ridge. Seasonal and interannual variabilities of NPSTMW are studied by using the number of 44 temperature section data obtained during 7 years. In late winter the NPSTMW was formed in the region south of Kuroshio. And in the sequence seasons other type of NPSTMW was distributed. That is, colder NPSTMW formed far east region were advected in deeper depth. The core temperature of the NPSTMW had the interannual signal, which was related with that of atmosphere condition near Japan. It is speculated that the year-to-year difference of the NPSTMW reflects interannual change of the large scale atmospheric condition.

Key Words : Subtropical mode water, Kuroshio recirculation, Mixed layer

* 1 海洋科学技術センター海洋観測研究部

* 2 東北大学大学院理学研究科

* 3 Ocean Research Department, JAMSTEC

* 4 Graduate School of Science, Tohoku University

1 はじめに

北太平洋亜熱帯モード水 (North Pacific SubTropical Mode Water: NPSTMW) は、北太平洋亜熱帯循環系北西部の黒潮再循環系の亜表層に広く分布する水系である。このNPSTMWは、北大西洋の「18°C水」に対応するもので、水温が16°C~19°C、塩分濃度が34.7psu. 以上の値をとり、鉛直一様な層を形成して、上層海洋において体積的にモードとなる (Masuzawa, 1969¹⁾, 1972²⁾)。

NPSTMWは、黒潮続流の南方において、冬季に海洋から大気への熱放出とそれに伴う海洋混合層の発達によって形成される (Hanawa, 1987³⁾)。形成時の水温や塩分の特性は年によって異なるが、季節の進行と共にそれらの特性は二重拡散過程などで弱められながら (Suga and Hanawa 1995a⁴⁾)、黒潮反流などで移流されて、黒潮再循環系内部に広がる (Suga and Hanawa 1990⁵⁾) と Suga and Hanawa, 1995b⁶⁾)。移流されてきたNPSTMWは、形成時期の水温情報を保持していて、この情報は形成時期の日本周辺の大気の状態を強く反映することが明らかになっている (種子田, 1994)⁷⁾。この様にNPSTMWの研究は近年精力的になされており、解明されてきた成果は、Hanawa and Suga (1995)⁸⁾ に詳しくレビューされている。

本研究は、NPSTMWが移流されてくる海域において実施されている水温モニタリングデータを用いて、この海域に分布するNPSTMWの季節変化と年々変化を調べたものである。既に吉川 (1993)⁹⁾ において、季節変化特性が明らかにされているが、ここでは用いるデータの期間を延長して再解析を行った。NPSTMWの年々変化については、種子田 (1994)⁷⁾ の成果をもとに考察を加える。以下、2ではモニタリングについて簡単に説明する。3ではデータとその処理方法を述べる。4ではNPSTMWの季節変動について、5では年々変化についての解析結果を示し、考察を行う。そして6でまとめを行う。

2 「TOLEX」モニタリング

東北大学理学部では、東京と小笠原・父島を結ぶ定期航路船「おがさわら丸」 (小笠原海運株式会社) を用いて、海洋モニタリング (Tokyo-Ogasawara Line Experiment: TOLEX) を実施している (代表: 花輪公雄教授)。「おがさわら丸」は、黒潮流域と黒潮反流域を横断する航路を航行するため (図1)、黒潮やNPSTMWをモニターすることができる。従って、TOLEXは、黒潮再循環系の構造やその変動を研究するにあたって、過去に得られなかった有効な情報が得られる重要な海洋

モニタリングである。海洋科学技術センターでも、1993年からこのTOLEXに参加している。

TOLEXでは、1988年からXBTによる上層海洋の水温断面モニタリング (TOLEX-XBT) を行っている。観測は原則として2ヶ月に一度の割合で行い、各航海では、約55km間隔に約17点で観測が行われている。1988年8月~1995年11月までの期間に、44航海における断面観測 (全観測点数は912点) がなされている (図2)。

また、1991年からは同船に船底方式のADCPを設置し、黒潮と黒潮反流域の流れの場の断面モニタリングを行なっていて、年間100断面を超える観測データを取得している (TOLEX-ADCP)。民間船を用いた同一航路上での、長期にわたるほぼ毎日連続的な、流れの場のモニタリングは、世界初の試みである。

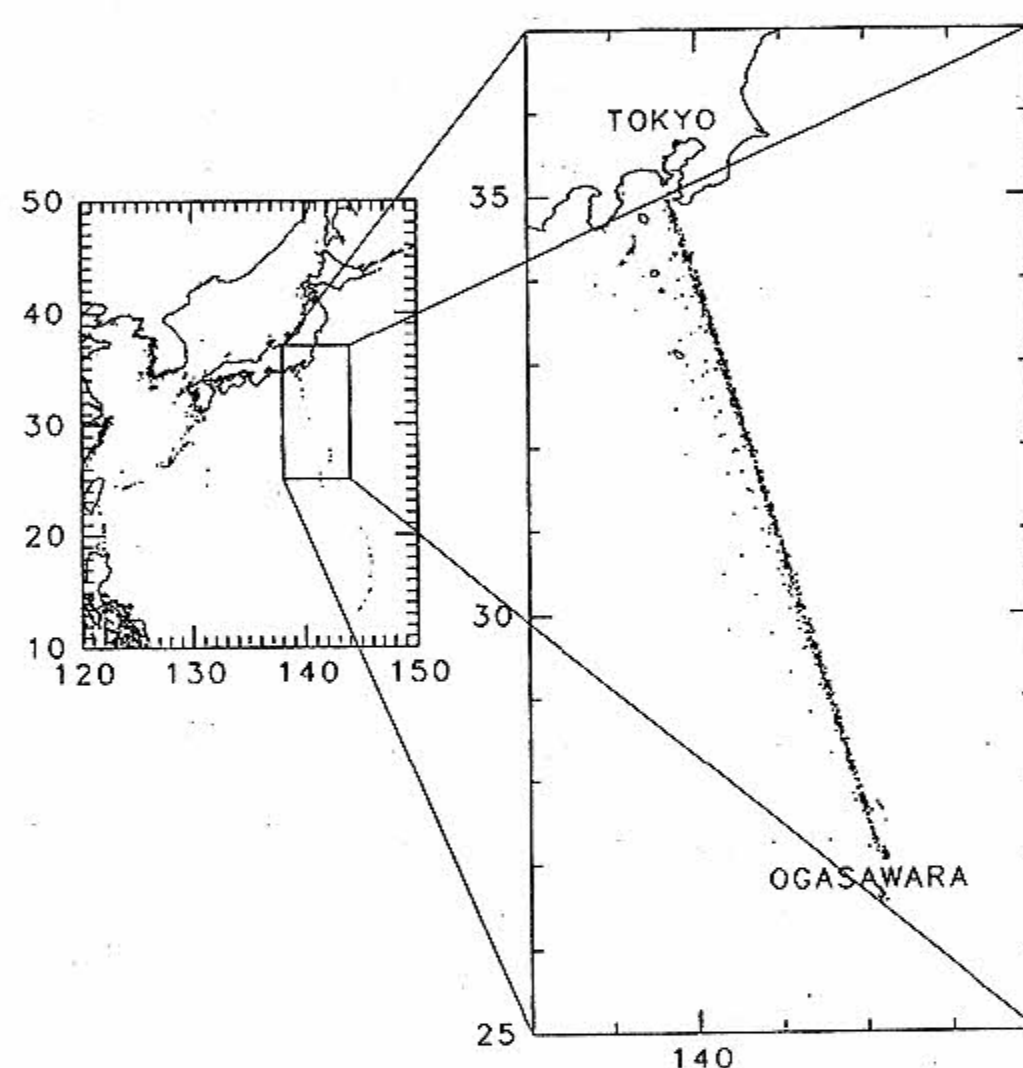


図1 「おがさわら丸」で行なわれたXBT観測点の位置を示す。観測は、東京と小笠原・父島を結ぶ同一航路で行なわれている。

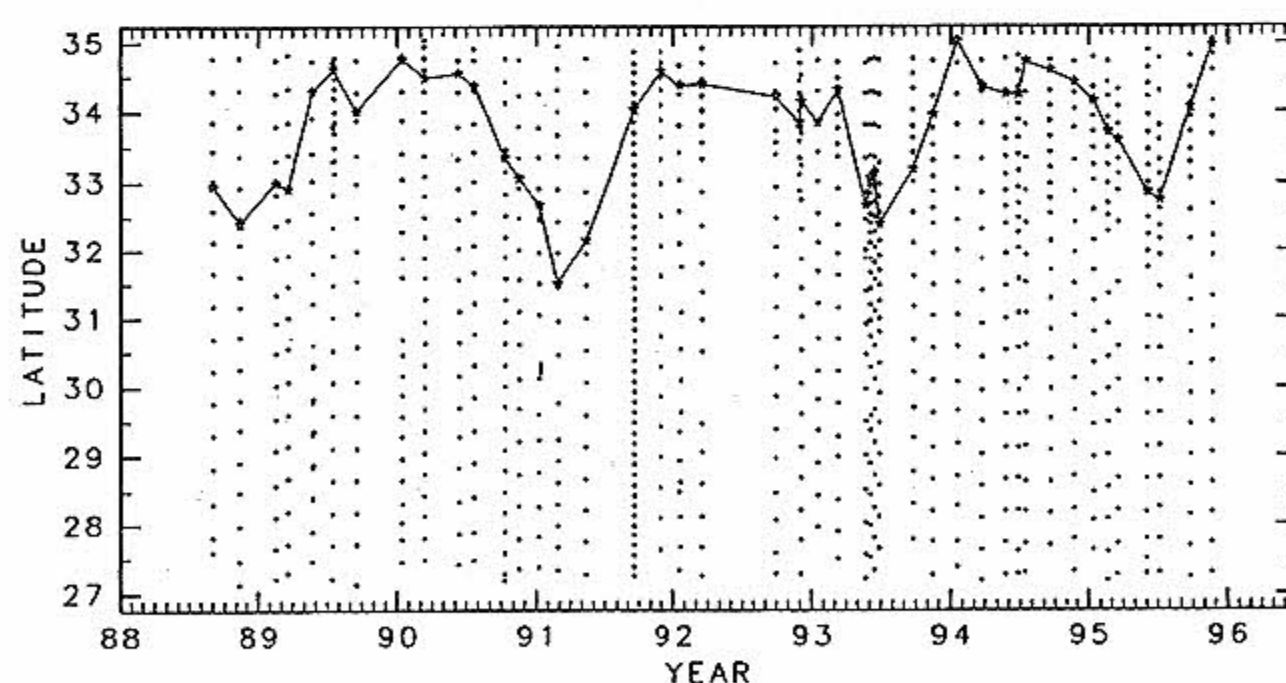


図2 XBT観測が行なわれた時期とその緯度を示す。観測はほぼ2ヶ月に一度の割合で行なわれている。図中の★印は各観測断面ごとに算出された黒潮の位置 (15°C等温線が200m深を通過する場所: Nitani (1969) を引用) を示す。

3 データと処理方法

1988年8月～1995年11月の期間の44航海で実施された TOLEX-XBTデータを用いて研究を行なった。全データ数は912点である。各水温プロファイルの生データは、Hanawa and Yoritaka (1987)¹¹⁾の式を用いて1 mごとに換算して、データセット化した。

NPSTMWの特徴として鉛直一様性が挙げられる。この鉛直一様性を水温の鉛直勾配を用いて評価した。なお、水温の鉛直勾配値は線形化した渦位と良い対応を示すことが判っている。(Hanawa et al., 1988)¹²⁾。

1993年5月と1994年3月の水温分布とその鉛直勾配値の分布をそれぞれ図3、図4に示す。1993年5月には、

黒潮が八丈島の南側を流れていて、それに伴う水温構造が北緯32度～北緯33度に見られる。黒潮の南方の亜表層には水温が16℃～19℃の厚い層が見られる。その鉛直勾配の分布から、NPSTMWが広く分布することが判る。また、北緯27度～北緯28度の海面付近には水温の等値線の傾斜が見られる。これは亜熱帯前線の北片に対応するものである。1994年3月には黒潮は北編し、伊豆大島の南側を流れていた。黒潮の南側では、やはり16℃～19℃のNPSTMWが広く分布する。ただし、海洋混合層の発達に伴い、NPSTMWの層が海面に露出している。つまり、この晩冬季には、伊豆・小笠原海嶺上でNPSTMWが形成されていたことを意味する。また、北緯28度付近

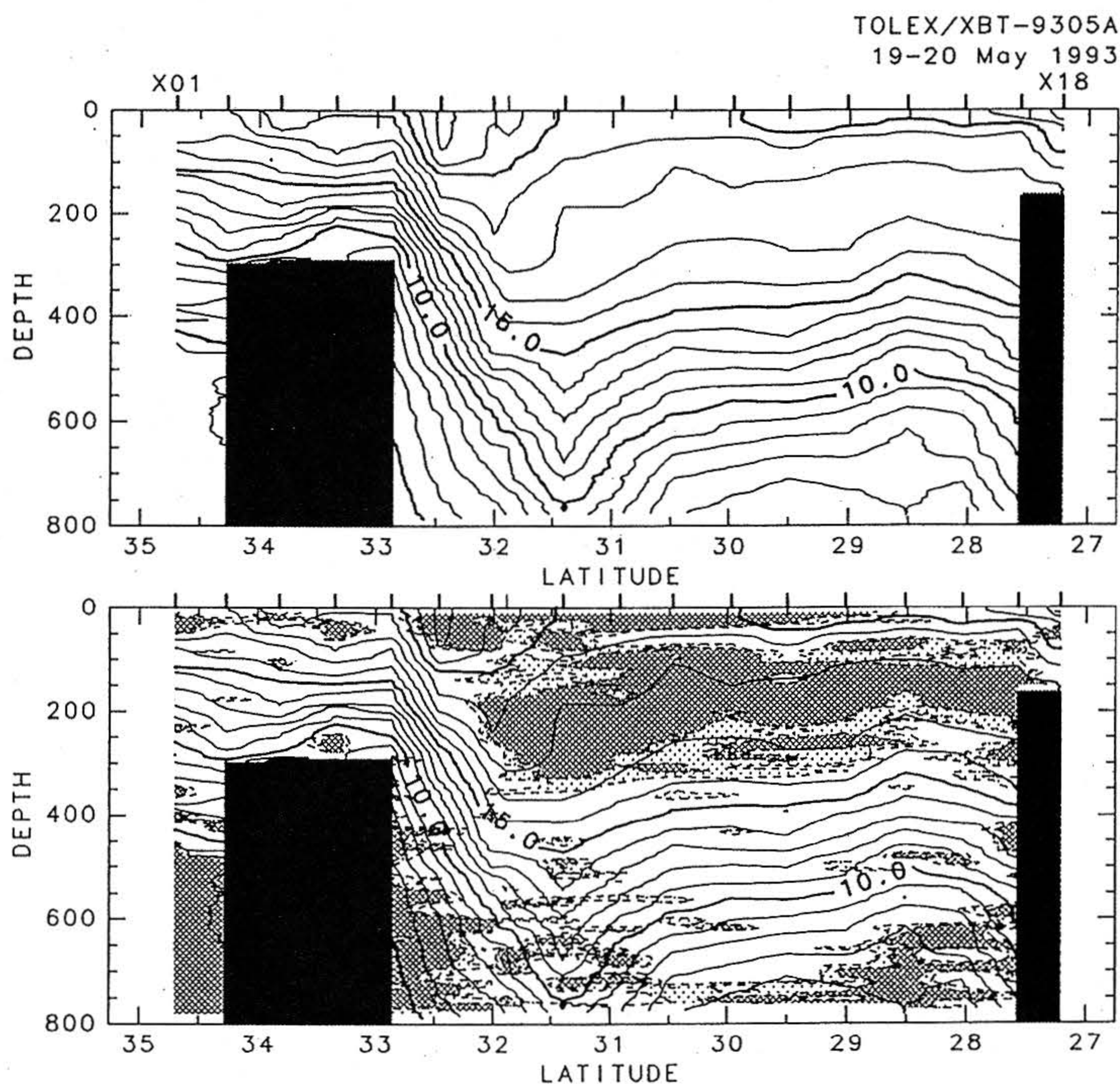


図3 1993年5月19日～5月20日に観測された水温の断面図(上)とその鉛直勾配値の断面図(下)。ここで、100 mで水温が1.0℃以上低下する領域を点描し、1.5℃以上低下する領域を斜線で示す。なお、黒く塗りつぶした部分は海底の地形を表わす。

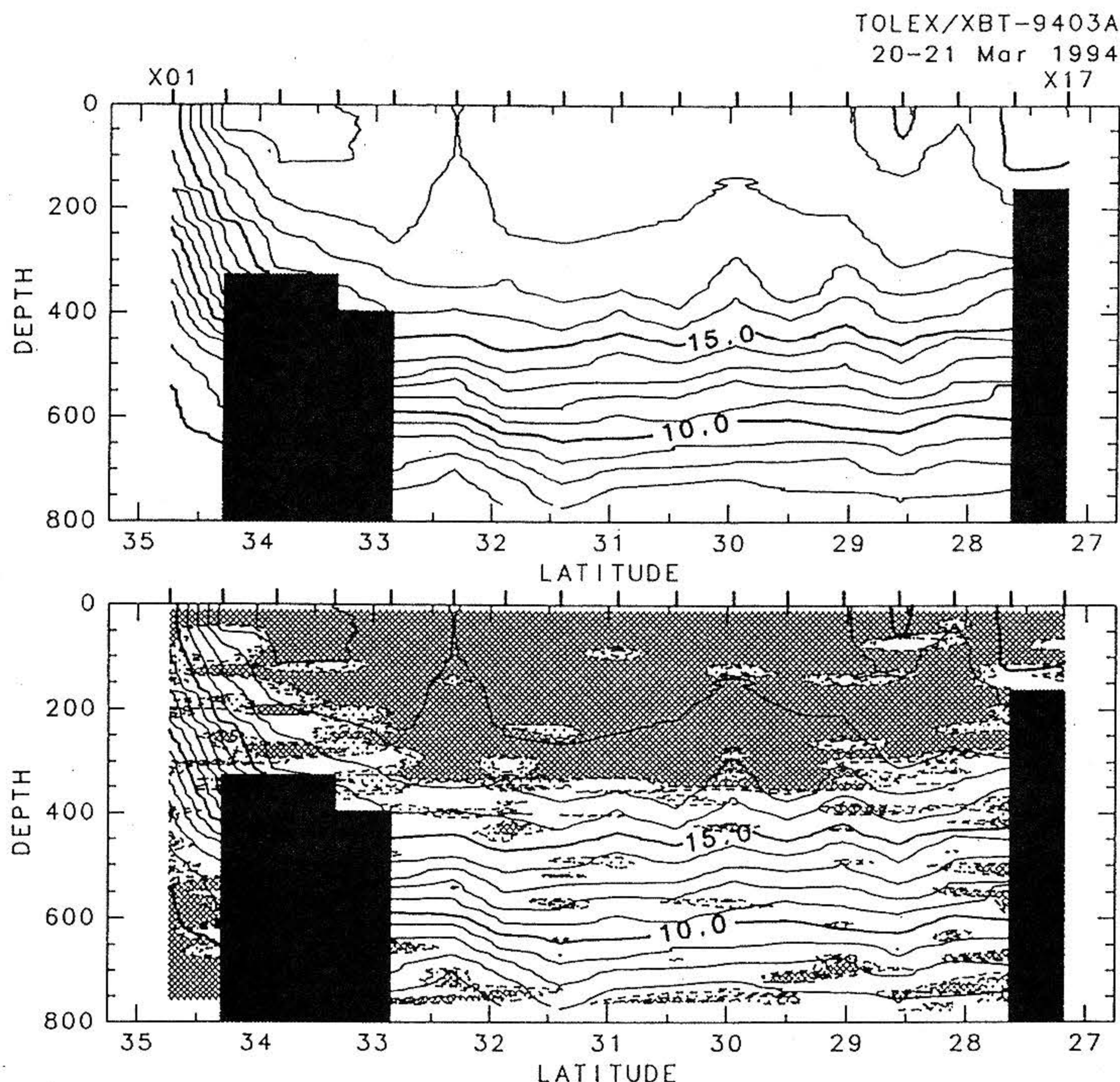


図4 1994年3月20日～3月21日に観測された水温の断面図(上)とその鉛直勾配配置の断面図(下)。表示の方法は図3と同じ。

には、亜熱帯前線の構造が見られ、その海域ではNPSTMWがあまり形成されていないことが見て取れる。

4 NPSTMWの分布の季節変化

NPSTMWの分布には、黒潮が存在する位置(緯度)が大きく影響することが、図3と図4から判断できる。そこで、吉川(1993)⁹⁾で用いられた方法を用いて、黒潮近傍と黒潮位置の変動の影響を受けにくい海域とを区別し、それぞれの水温の構造を調べた。黒潮近傍に関しては、各観測ごとに黒潮流軸位置を決定し、流軸に相対的な緯度でデータ(水温とその鉛直勾配値)を集計した。北緯31度以南の海域に関しては、地理的な緯度ごとにデータを集計した。時間的には、それぞれの観測時期に応じて、連続する2ヶ月ごとに集計した。図5に各時期ごとにまとめた亜表層の水温とその鉛直勾配値(NPSTMW)

の平均分布を示す。

水温構造の最も顕著な季節変化は、海面付近の成層状況の変化に見られる。秋季から徐々に海洋混合層が発達し、晩冬季に最大の成長をみる。晩冬季の混合層の平均水温は18℃～19℃で、NPSTMWの水温帯に入る。また、北緯30度以北で黒潮の南側1.5度の海域では、18℃台にまで水温が低下し、混合層の発達が著しい。これは、鉛直勾配の断面図からも見て取れる。また、北緯28度近辺の海面近くには、亜熱帯前線の北片が季節を問わず見られる。夏季の水温分布で北緯30度付近に等温線のゆがみが見られる。これは、データの期間に対して、渦の通過に伴った変動が相対的に大きいことを表わしている。

NPSTMWの季節的な分布の違いを見ると、水温構造から予想される以上に、その変化が著しい。亜表層に着目すると、NPSTMWの分布の変化が見られるが、基本

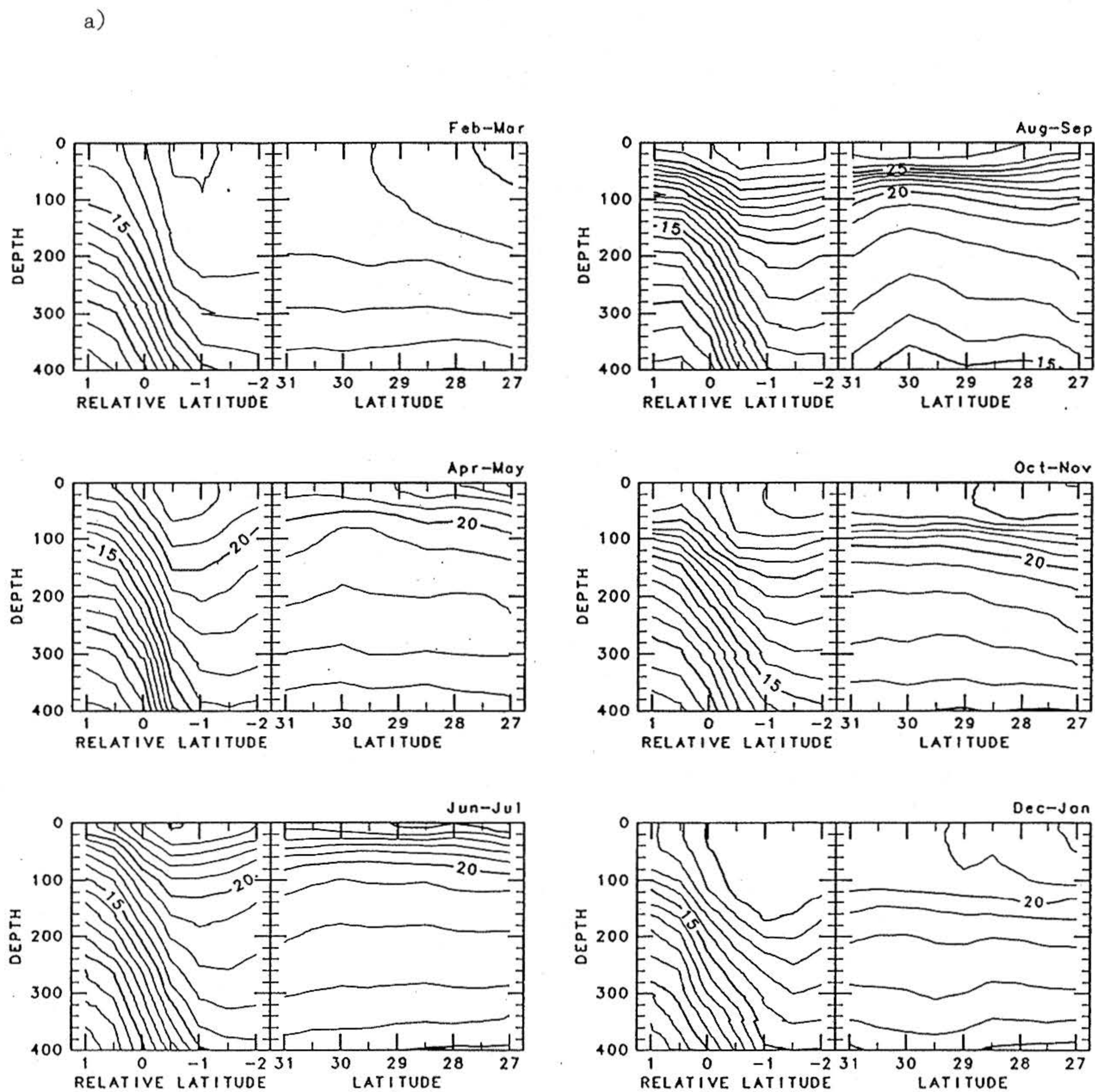


図5 各季節ごとの水温分布(a)とNPSTMWの分布(b)。それぞれの6つのパネルは、左上から右下に、2・3月(晩冬)、4・5月(春季)、6・7月(初夏)、右上から右下に8・9月(夏季)、10・11月(秋季)、12・1月(初冬)の時期で平均した断面図を示す。鉛直勾配の分布の表示方法は図3と同じ。

b)

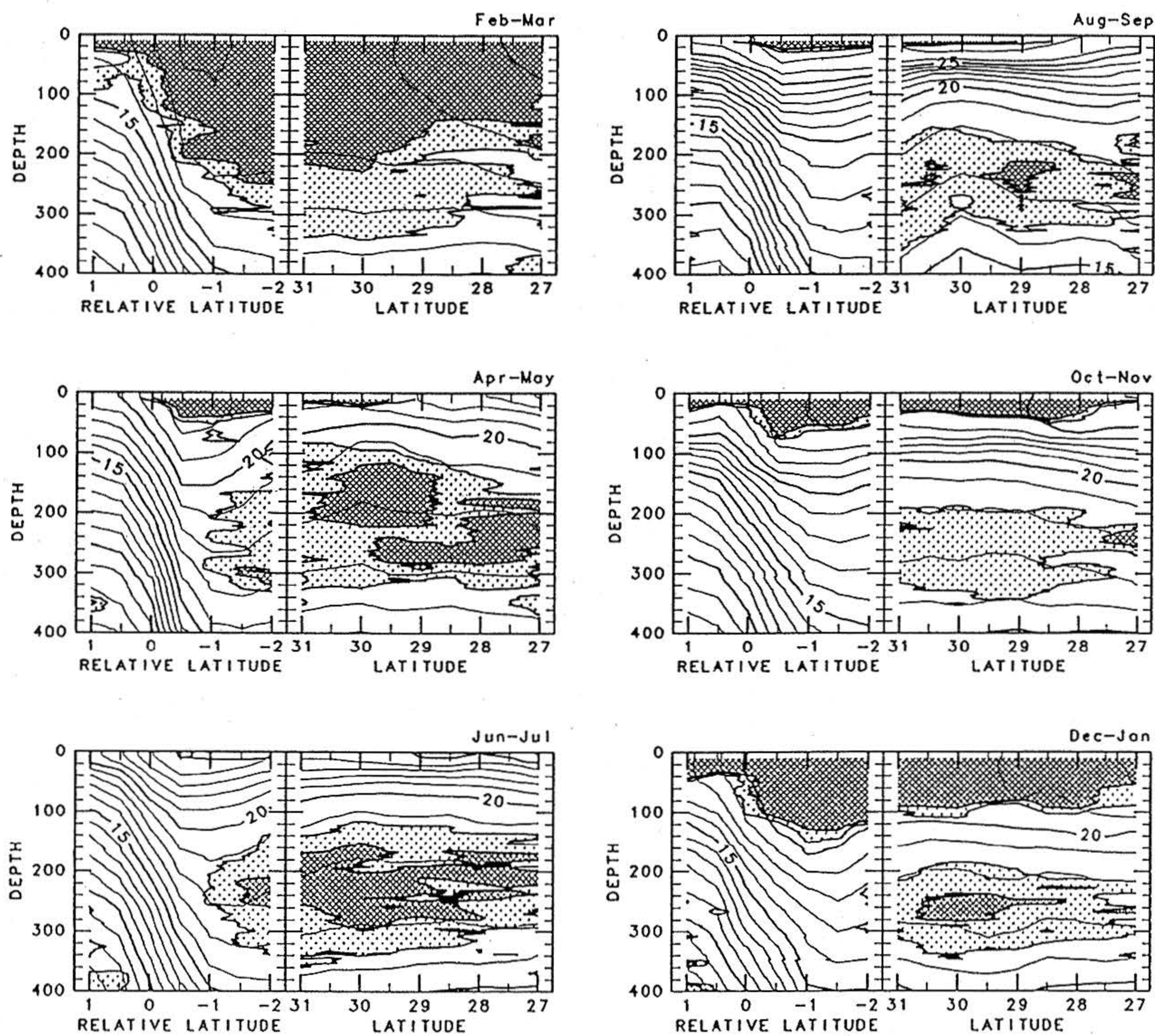


図5 続き

的な季節変化としては、形成時期に一様性が強く（図の斜線部）、季節の進行に伴って、拡散などの過程によって、一様性が弱まっていく様子（斜線から点描への移行）が見られる。この傾向は、北緯31度～北緯27度の海域全般について言えることである。

NPSTMWの中核（図の斜線部）の水温分布に着目すると、晩冬季の形成時期には18℃以上であった水温が、春季には、18.0℃、初夏には17.5℃と徐々に低下している。また、その深さも深くなっている。さらに、北緯28度付近では春季にNPSTMWが分布しているが、この海域では、晩冬季に混合層の深まりは弱く、春季の分布深度まで達していない。この様子は、鉛直一次元の混合、拡散過程では説明できず、NPSTMWの移流を加味して説明できる。即ち、より東方で冬季に形成されたより低温のNPSTMWが、徐々に移流され、季節の進行と共に、伊豆・小笠原海嶺上のより深い層に侵入することを意味する。また、この時には、拡散などの過程によって一様性は弱まったNPSTMWが出現する。以上に示したNPSTMWの季節変化の特性は約5年間のデータを用いて解析した吉川(1993)⁹⁾に示された結果と同様のものである。

初冬の亜表層には、秋季と比較して強いNPSTMWが分布している様に見られる。これは、上記の季節サイクルでは説明できない。吉川(1993)⁹⁾でも同様にNPSTMWが分布しており、その原因を初冬のデータ数不足に起因すると述べている。その後の2年間のデータを加えて再解析しても同様な結果が得られるが、NPSTMWの中核の水温を見ると秋季と初冬では共に約17.2℃とほぼ等しく、晩冬に新たに形成されるモード水と異なるものである。従って、渦などの水温場をゆがめる原因となる現象が、初冬に発生しやすい傾向があるかもしれない。

5 NPSTMWの年々変動

NPSTMWが分布する北緯31度～北緯27度の海域について、その年々変動を調べた。ここで、北緯29度近傍でNPSTMWの形成の度合いが異なることを考慮して、北緯30度と北緯28度を中心として、その南北1度内で取得されたデータをそれぞれ集計した。その時系列をそれぞれ図6、図7に示す。ただし、それぞれの下方の図では、縦軸を水温としている。

図6、7に見られる様に、1989年～1995年の全期間の晩冬季にNPSTMWが形成されている。そして、4で示した季節変化を示しつつ、翌年の晩冬季に新たにNPSTMWが形成されるパターンを示すことがわかる。

形成されるNPSTMWの到達深度やその水温、また晩

冬季以降の季節に出現するNPSTMWの状態には年による違いが大きい。形成時期のNPSTMWの状態を調べるために、晩冬季の海洋混合層の状態（混合層水温と混合層の発達深度）を図8に示す。混合層の水温は10mの深

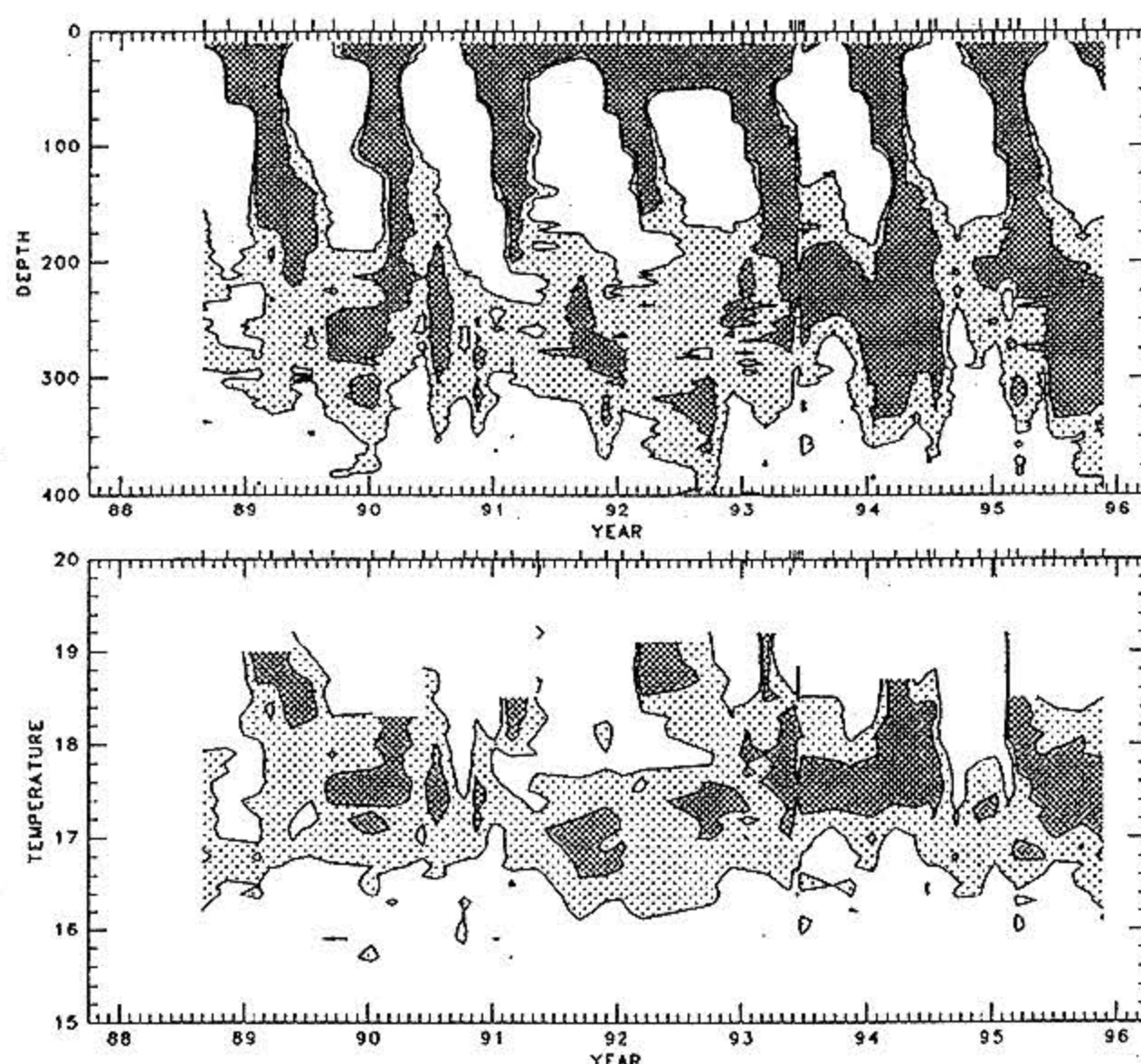


図6 北緯30度近傍に分布するNPSTMWの時系列。横軸を時間（1988年～1996年）とし、縦軸を上図では水深、下図では水温とする。鉛直勾配の表示方法は図3と同じ。

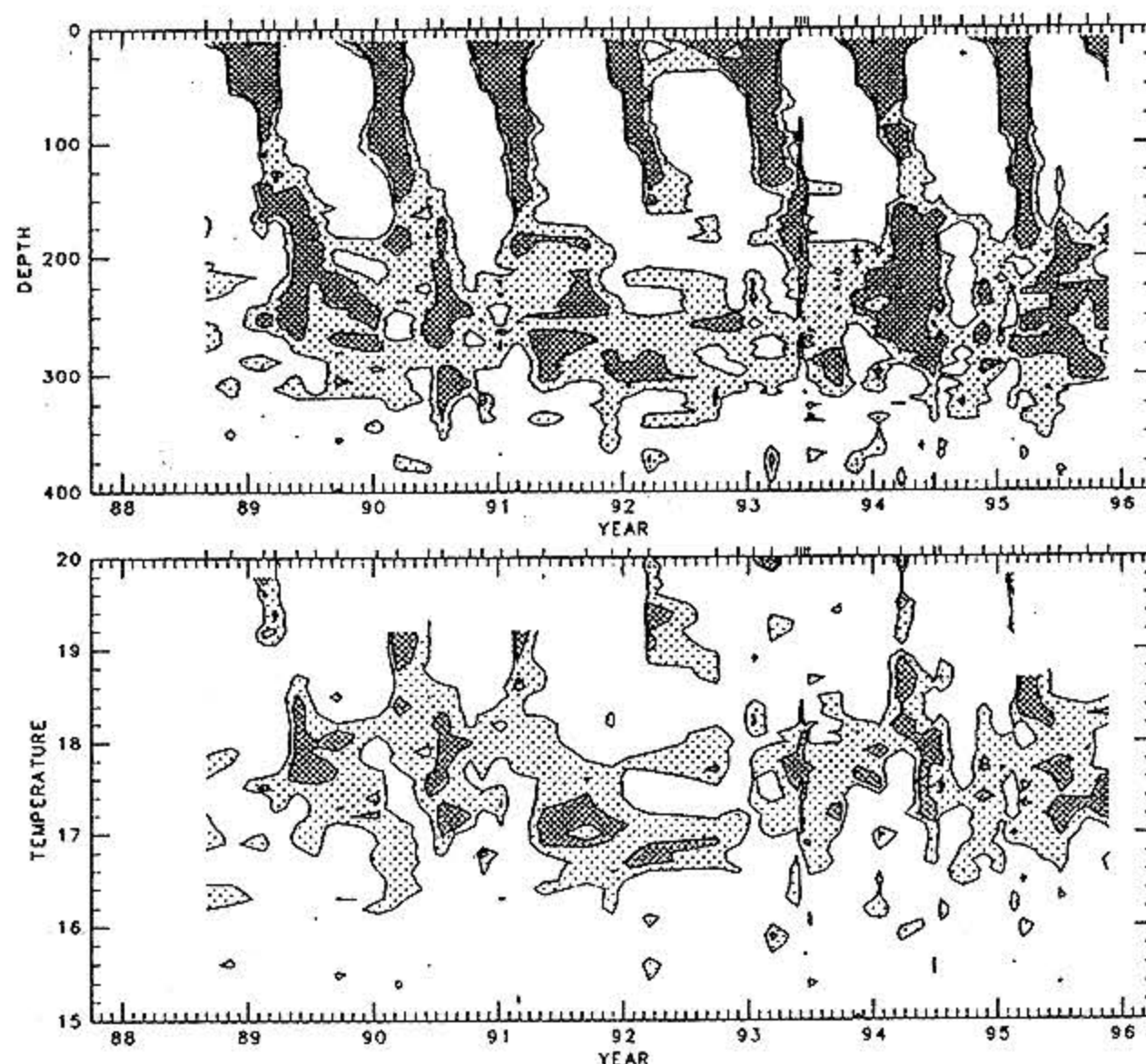


図7 北緯28度近傍に分布するNPSTMWの時系列。表示方法は図6と同じ。

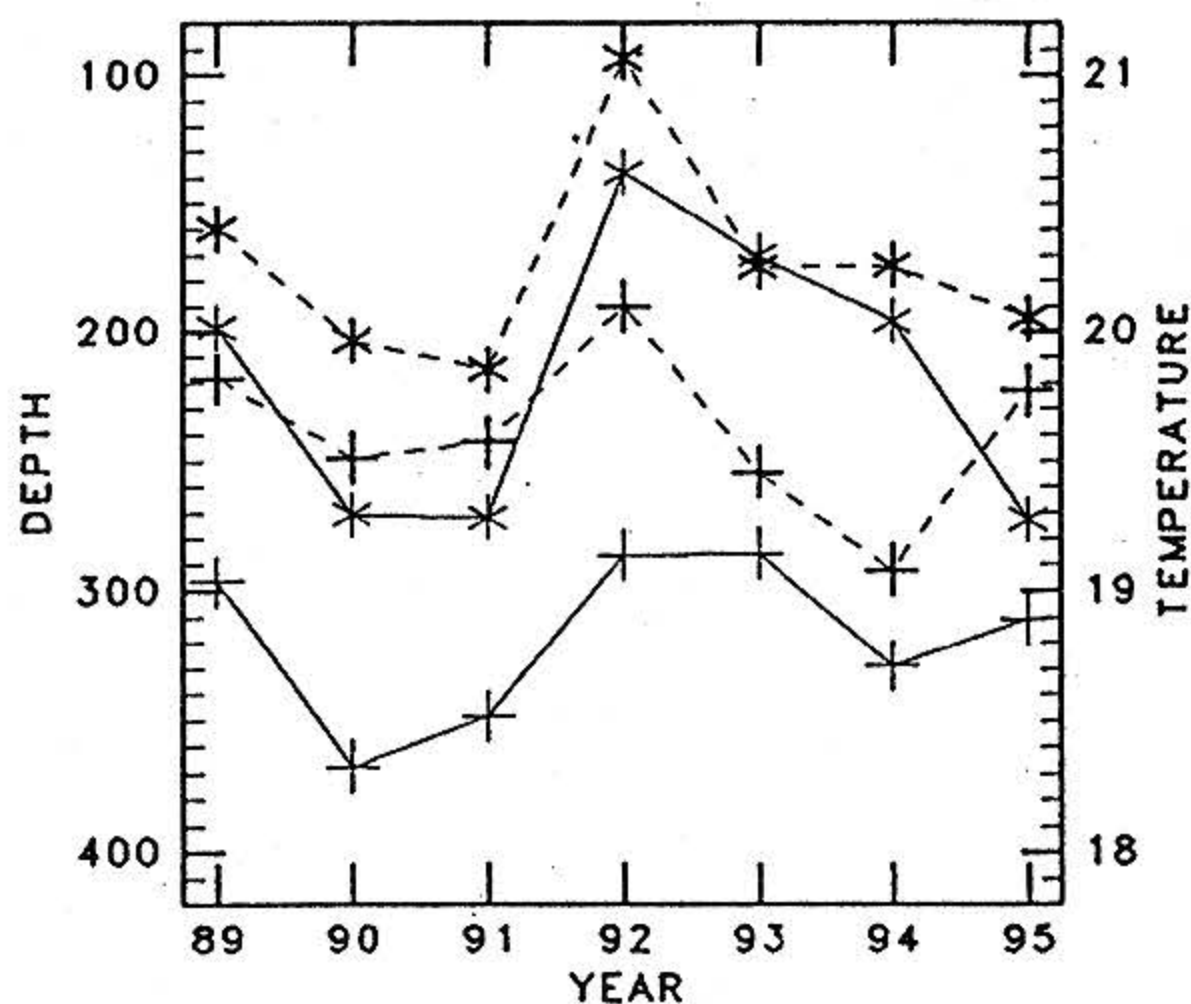


図8 晩冬季の海洋混合層の水温と層厚の年変化。+印は北緯30度近傍、*印は北緯28度近傍の海域における混合層の水温（実線）と層厚（点線）をそれぞれ表わす。

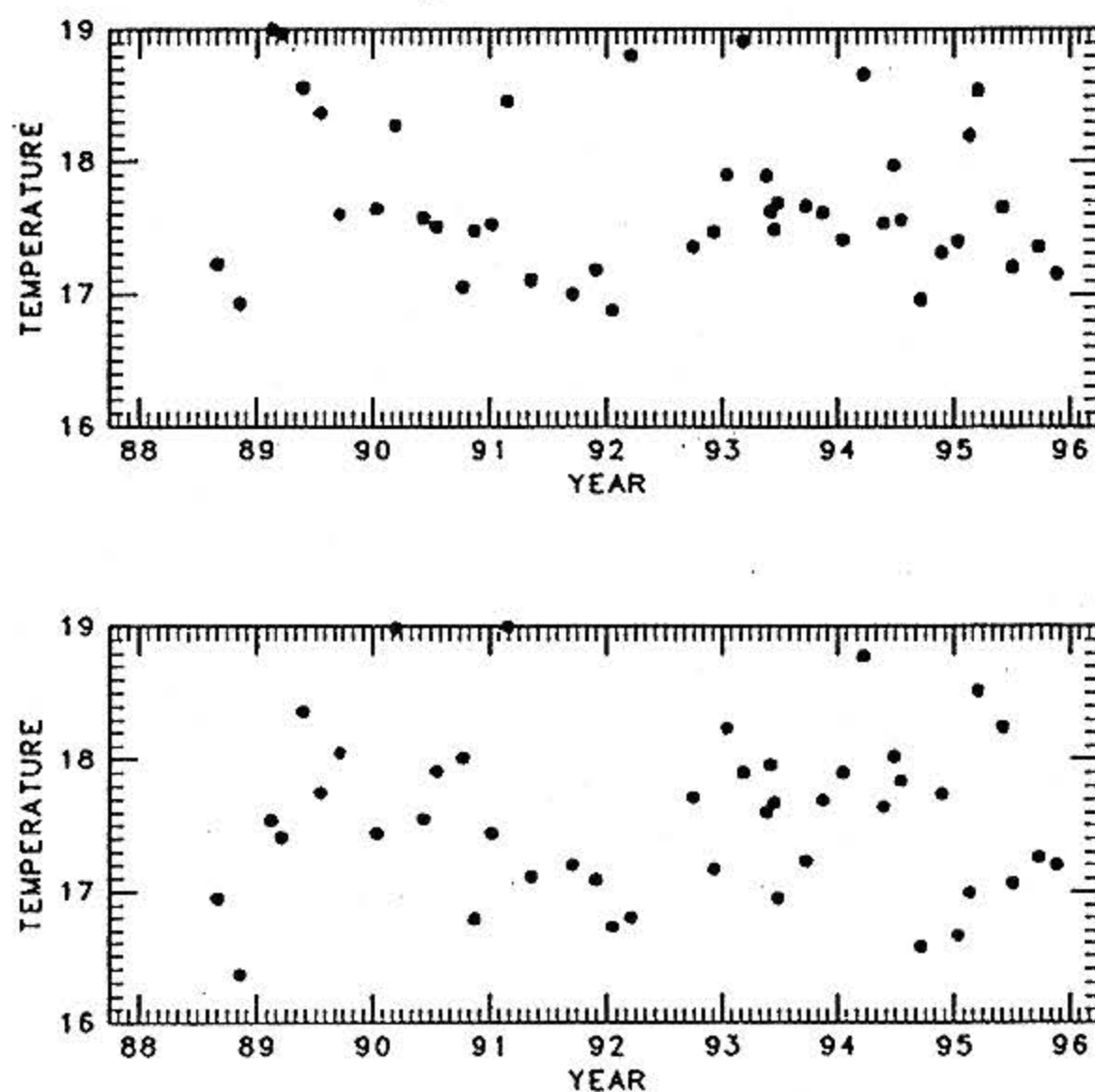


図9 北緯30度近傍（上）と北緯28度近傍（下）のNPSTMWの中核の水温の時系列。縦軸は中核の水温、横軸は観測時期。

さでの水温、層厚は混合層水温から1℃低い水温をとる深度とした。北緯30度近傍と北緯28度近傍の混合層水温を比較すると、1995年を除いて、その変動傾向は同じである。特に1990年と1991年の晩冬季には、混合層の水温が、北緯30度で18.3℃、18.5℃、北緯28度で19.3℃、19.3℃と低下している。それに対して、1992年には混合層水温が1℃前後上昇し、以後、1995年まで徐々に低下する傾向を持つ。一方、混合層の厚層も、1990年と1991年の厚い状態から、1992年に急激に薄くなり、以後徐々に

厚みを増す傾向を持ち、水温と同様の変動パターンを示す。北緯30度に限ってみれば、水温と層厚は同様の変動パターンを示すにもかかわらず、絶対値自体に対応は現れない。すなわち、1990年と1991年と比較して、1993年と1994年では、混合層水温が上昇しているにもかかわらず、混合層の厚層は逆に厚くなっている。これは、その時期の海洋構造を反映した結果かも知れない。

図6、図7から、1992年の半ばを境として、その前後でNPSTMWの分布状況が変化している様に見られる。即ち、この時期の以前は、上記の季節変化のパターンをよく示しているが、以後では、分布するNPSTMWの層厚が厚く、また水温も高温化している様に見られる。そこで、種子田(1994)⁷⁾とほぼ同等な方法を用いて、種子田(1994)⁷⁾で定義したNPSTMWの中核水を抽出した。方法は、各水温の±0.1℃の範囲に入る水温帯での鉛直勾配値を平均して、その値が最小値をとる時、その水温をNPSTMWの中核水と定義した。図9にNPSTMWの中核の水温の時系列を示す。NPSTMW中核水の水温の年々変動を見ると、1988年～1989年にかけて上昇し、1989年の末に極大となる。1990年から水温は低下し、1992年の初めに極小となる。以後、上昇傾向を示して1993年の半ばに再び極大となる。そして、1995年の秋季まで低下傾向を示す。なお、北緯28度と北緯30度の傾向を比較すると両者はほぼ同様の变化を示す。しかし北緯30度の方がばらつきは小さく、特に1993年～1995年にかけて、北緯30度の方が変化傾向にまとまりを持つ。

この年々変動は、Hanawa and Yoritaka (1994)¹³⁾が示した、NPSTMWの形成域（北緯32.5度上、東経140度～東経160度の範囲）の1990年～1993年の期間の中核水の年々変動とよく一致する。その海域のNPSTMW中核水の水温は1990年以降1993年まで、それぞれ17.5℃、16.9℃、17.3℃、17.6℃、と年々変化し、各年の中核水水温は、今回の伊豆・小笠原海嶺上に分布する中核水と同様な変動傾向を示し、またほぼ同じ水温値を示す。

NPSTMWの中核水の年々変動について、種子田(1994)⁷⁾では、それと大気場の年々変動とが良好な対応があることを示している。そこでは、東アジアモンスーンと関連のある日本付近の気圧場の指標(MOI)で冬季の値の年々変動は、小笠原近海で、春季以降、翌年の初冬までに分布するNPSTMW中核水の水温の年々変動と強い逆相関関係を示す。これは冬季の海面冷却の度合いをNPSTMW中核水が記憶して黒潮再循環系内に移流することを意味する。

本研究の結果は、種子田(1994)⁷⁾の考えを支持するも

のである。種子田(1994)⁷⁾では、1993年、1994年とMOIが上昇しているにもかかわらず、中核水水温も上昇する結果であったが、本研究の北緯30度では、中核水水温は低下している。つまり、考えにより合致する結果が得られている。この違いは、小笠原に近い北緯28度の結果では、1993年、1994年の変動が曖昧であることが挙げられる。また、中核水の検出に用いたデータの鉛直分解能に違いがあることも考えられる。

6 まとめ

伊豆・小笠原海嶺上において、定期航路船を利用したNPSTMWのモニタリングを行なった。1988年8月～1995年11月までの期間に、XBTを用いた表層水温観測が実施され、44の表層水温断面観測データ(912プロファイル)が取得された。このデータを用いて、伊豆・小笠原海嶺上に分布するNPSTMWの季節変化と年々変動を調べた。

NPSTMWは晩冬季に黒潮の南方の海域で形成される。特に、亜熱帯前線の北側の海域では海洋混合層が発達し、NPSTMWが形成されやすい。季節の進行と共に、東方で形成された低温のNPSTMWが、この海域の深い深度に侵入していることが明らかになった。また、分布するNPSTMWの鉛直一様性は、季節の進行と共に徐々に弱まる傾向を示し、翌年には新たなNPSTMWが形成されるため、翌年春季以降には、判別がつかなくなる。

NPSTMWのコアの水温の変動には、季節的な変化の他に、年々変動が見られた。NPSTMWの中核水の水温の年々変動は、1988年～1989年にかけて上昇し、1989年の末に極大となる。1990年から水温は低下し、1992年の初めに極小となる。以後、上昇傾向を示して1993年の半ばに再び極大となる。そして、1995年の秋季まで低下傾向を示した。年々変動は、黒潮再循環系のNPSTMWが分布する海域全般についてみられ、日本付近の冬季の大気場の年々変動と一致していた。NPSTMWのコアの水温は、形成される時期の大気場を反映しているという考えを支持する結果を得た。

謝 辞

TOLEXの観測は、小笠原海運株式会社の全面的な御協力のもとに行なわれています。

特に安積聖夫氏には御便宜を計って頂きました。甲斐雄一郎船長、京極精一船長、古森進機関長をはじめとする「おがさわら丸」の皆様にも観測の際にお世話になりました。皆様の御好意に対して厚く御礼申し上げます。

なお、TOLEXは日本のWCRPの「海洋混合層の実験観測(OMLET)」(主査:鳥羽良明東北大学教授)の一環としておこなわれてきました。また1993年5月以後の観測は海洋科学技術センター経常研究「亜熱帯モード水のモニタリング研究(TOLEX)」で実施したものです。

参考文献

- 1) Masuzawa J.: Subtropical Mode Water. Deep-Sea Research, **16**, 463-472. (1969)
- 2) Masuzawa J.: Water characteristics of the North Pacific central region.
In: Kuroshio-Its physical aspects, H. Stommel and K. Yoshida, editors, University of Tokyo Press, Tokyo, pp. 95-127. (1972)
- 3) Hanawa K.: Interannual variations of the winter-time outcrop area of Subtropical Mode Water in the western North Pacific ocean. ATMOSPHERE-OCEAN. **25**, 358-374. (1987)
- 4) Suga T. and K. Hanawa: Interannual variations of North Pacific Subtropical Mode water in the 137° E section. Journal of Physical Oceanography, **25**, 1012-1017 (1995a)
- 5) Suga T. and K. Hanawa: The mixed-layer climatology in the northwestern part of the North Pacific subtropical gyre and the formation area of Subtropical Mode Water. Journal of Marine Research, **48**, 543-566. (1990)
- 6) Suga T. and K. Hanawa: Subtropical Mode Water south of Honshu, Japan in the spring of 1988 and 1989. Journal of Oceanography, **51**, 1-19. (1995b)
- 7) 種子田 雄: 北太平洋亜熱帯循環系北西部における水位と上層海洋構造の長周期変動, 東北大学大学院理学研究科修士論文, (1994)
- 8) Hanawa K. and T. Suga: A review on the subtropical mode water of the North Pacific (NPSTMW) Biogeochemical Processes and Ocean Flux in the Western Pacific, H. Sakai and Y. Nozaki, editors, Terra Scientific Publishing Company (TERRAPUB), Tokyo, pp. 613-627. (1995)
- 9) 吉川 泰司: TOLEX-XBT/ADCP モニタリングによる黒潮システムの構造とその変動の研究, 東北大学大学院理学研究科博士論文, (1993)

- 10) Nitani. H. : On the variability of the Kuroshio in recent several years. Bulletin of Japan Society of Fishers Oceanography, **14**, 13-18. (1969)
- 11) Hanawa K. and H. Yoritaka : Detection of systematic errors in XBT data and their correction. Journal of Oceanographic Society of Japan, **43**, 68-76. (1987)
- 12) Hanawa K., N. Iwasaka, T. Watanabe, T. Suga and Y. Toba : The XBT observations-Subtropical Mode Water in 1987 winter. Preliminary Report of Hakuho Maru Cruise KH-87-1 (WESTPAC), Ocean Research Institute, University of Tokyo, pp. 47-54. (1988)
- 13) Hanawa K. and H. Yoritaka : Year-to-year variation of upper thermal condition along 30° 30' N line based on XBT observations. (1994) (in preparation)

(原稿受理 : 1996年1月29日)