

## 秋季東シナ海大陸棚における水塊特性について

西田英男\*・岩永義幸\*

### ON THE WATER MASS CHARACTERISTICS IN AUTUMN ON THE CONTINENTAL SHELF OF EAST CHINA SEA

Hideo Nishida\* and Yoshiyuki Iwanaga\*

*Received 1977 October 12*

#### Abstract

The water mass characteristics in autumn on the continental shelf of East China Sea have been described based on the data taken during the cruises of R/V Takuyo of Hydrographic Department in 1973, 1974 and 1975.

The XBT records contain very sharp seasonal thermoclines, and the vertical temperature profiles can be classified into four types, one-layer type, two-layer type, three-layer type and continuous type. The distribution of these temperature types has a good correspondence with the bottom topography.

From the temperature and salinity distributions, the bottom waters found below the thermocline on the continental shelf can be well interpreted as the one which were formed in the previous winter and has remained on the spot with no influence from surrounding water.

Some records having temperature inversions and many-layer structures have been also analyzed with the salinity and oxygen profiles, and these structures can be attributed to mixing process between coastal water and off-shore water.

#### 1. 序 文

東シナ海の大部分は、水深 200 m 以浅の非常に浅い大陸棚によって占められており、その海況は、基本的には、浅海性、沿岸性の海洋特性を有している。すなわち、季節変動は容易に底まで到達し、水温・塩分等の年較差は極めて大きい。そのため、大陸棚上には、通常我々が使う意味での水塊は存在しない。しかし、広大な大陸棚上においては、周期的な季節変動を繰り返す大陸棚固有水とも呼ぶべき水が存在する。また、東シナ海南東部には、水深 2,000 m に達する沖縄舟状海盆が走り、そこには、南の石垣島、宮古島付近から黒潮が流れ込む。この黒潮は、ほぼ大陸棚斜面に沿って北上し、30°N 付近で斜面より離れ東へ向きを変え、吐噶喇海峡を越えて、四国海盆に出る。黒潮の一部は、東シナ海において分岐し、対馬暖流となって大陸より来る沿岸性の水と混合し、変質しながら対馬海峡を抜けて日本海に出る。そのため、東シナ海は次のような海洋学的に興味のある問題を提示している。すなわち、大陸棚上では、中国大陸から流れ出てくる河川水と、外洋性の水との混合の過程、それ

\* 海象課 Oceanographic Division

と関連した季節変動の問題、黒潮水と沿岸水の混合の問題、対馬暖流分岐の場所、原因、そのメカニズム等である。

東シナ海の海洋調査は、戦前、一斉調査が数度行われており(1, 2)、また戦後は、長崎海洋气象台、西海区水産研究所等の手で定期的な観測が積み重ねられてきており、成果も幾つか発表されている(3, 4, 5, 6, 7)。また、近年では沖縄返還に伴い、東シナ海における水路部の黒潮観測の量も増え、海流像の実態もだんだん明らかになりつつある。

東シナ海の大陸棚上では、その水温特性は、季節的な、極めて周期的な変動をすることが知られている。すなわち、冬季には季節風および表面からの冷却効果のため、鉛直混合は海底まで達し、水深が大体150 mより浅い海域では、鉛直方向には完全な一様水が形成される。春から夏にかけての昇温期には、表面のみが温められ、極めて鋭い躍層ができる。秋から冬にかけては、表面混合層の厚さがだんだんと増加して行くため、水深の浅い部分からこの躍層は消滅して行き、2~3月にかけて完全な一様水が形成される。春から秋にかけての躍層下には、前の冬に形成された水がほとんどそのままの形で保持され底冷水を形成する。黄海にこのような水のあることは、宇田によってかなり以前に報告されており(1, 2)、東シナ海についても同種の水のあることが、最近深瀬(4)によって報告されている。

本研究では、水路部の「拓洋」によって1973年から1975年にかけての3年間に行われた東シナ海の観測結果をもとにして、大陸棚上水塊の特性、特に鉛直混合と水塊との関連について研究した結果を報告する。測線図を第1図に示す。調査時期はいずれも秋季であり、季節躍層は消滅して行く時期であった。XBTによる水温、塩分、溶存酸素量の解析から、秋季における海況、特に鉛直混合過程の様子を明らかにする。

東シナ海の家況は、比較的分り易い周期的な変化をするため、半経験的な数値モデルを作るのに適した海であり、そのためには、混合過程の細部が明らかになることは非常に意味がある。現在までの観測資料は夏と冬に得られたものが多く、秋季の観測資料が極めて少ないため、秋季の家況を明らかにすることは大きな意味があると思われる。

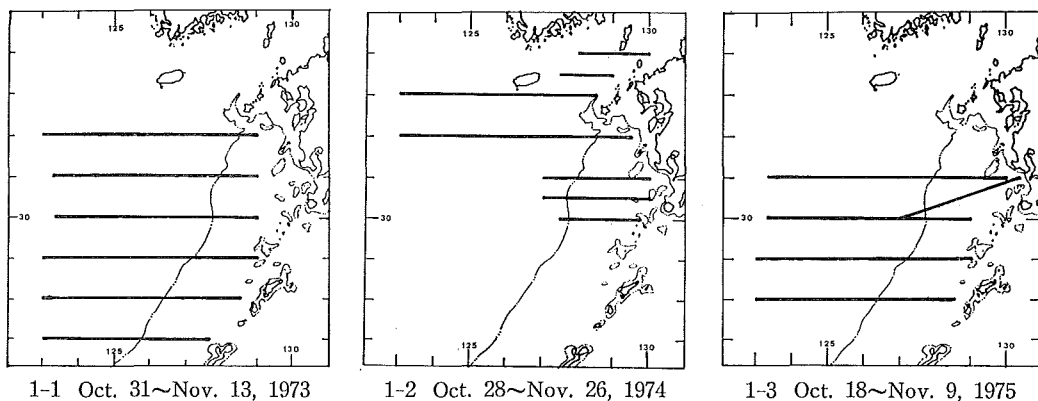
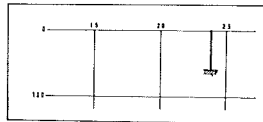


Figure 1 Observation lines

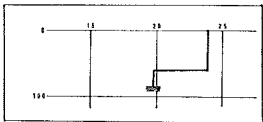
## 2. XBTによる水温鉛直分布

調査時期は10月から11月にかけてであり、表面からの対流混合は大体40~70 m位まで達していた。そのため、大陸棚上の一部の浅い地域では、鉛直混合は海底まで達していた。それ以外の場所では季節躍層が見られたが、この躍層の様子は極めて特徴のある構造を持っていた。すなわち、水深が50~100 m位の海域では、躍層の厚さ

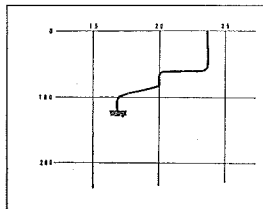
は、数メートル以上にならず、水は表面混合層と底層一様層の二つに完全に分かれている。水深が100mから150m位の海域には、躍層を二つ持つ明瞭な三層構造がしばしば見られた。また、それ以上深い海域では、表面混合層を除いては、連続的な階段成層をなしていた。いずれの場合も、水温で見られる均一層の中では、他の成分も、鉛直方向には完全に一様であった。それぞれのXBTの記録の例を第2図に示す。また、このそれぞれのタイプを持つデータの得られた海域分布図を第3図に示す。これは1973年および1974年の調査結果により作成した(1975年については後で述べる)。これを見ると、タイプ別の分布は水深の分布と良い一致をしていることが見られる。水深が60mより浅い海域では完全に底まで混合した一層構造のタイプのみが見られ、水深が60m~100mの海域では、完全な二層構造のタイプのみが見られる。これは、この海域では鉛直混合が海況に対する支配的なメカニズムであることを示しているものと考えられる。これに対し、31°N~32°Nの北部の海域では、かなり三層構造のタイプが見られるのに対し、南の方の同様の水深の海域では、三層構造のタイプははっきりしない少数例を除いては、見つけることはできなかった。この原因の説明としては、鉛直混合以外の何か他のメカニズムを考える必要があるが、これについては後の章で、塩分、溶存酸素量と一緒に考察する。連続的な階段成層は、水深の深い部分で見られ、東シナ海においては、この水深の深い部分は、黒潮域と対馬暖流域にあたる。この海域では、水平方向の流れが卓越しており、このために、大陸棚上のような一様な底層水が形成されないと考えて説明がつく。



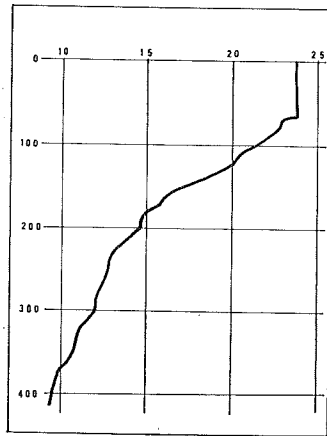
2-1 One-layer structure



2-2 Two-layer structure



2-3 Three-layer structure



2-4 Continuous structure

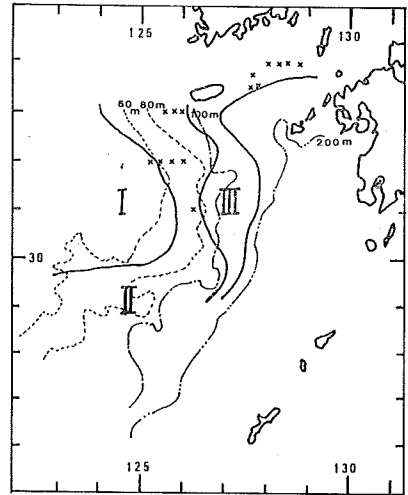


Figure 3 Distribution of vertical temperature types

Figure 2 Examples of XBT records  
(vertical axis — depth in meter,  
horizontal axis — temperature in °C)

1975年の調査は、前2年に比べてやや時期が早かったためと、この年は冬の到来が遅かったため、躍層の深さは前2年の結果よりやや浅く、30~50m程度の深さにあった。このため、1975年は、一層構造のタイプの見られたのは、大陸寄りの極く一部の地域に限られており、大陸棚上ほとんどの海域において、二層構造のタイプが見られた。また三層構造のタイプは、1973年の結果と同様に、ほとんど見られなかった。

第4図に、得られた水温断面のうちいくつかを示す。表面混合層、大陸棚上の底層均一層を細線で図中に表わしてある。大陸棚上の水深のやや深い部分にある底層均一層の様子が良く表われている。大陸棚上の二層構造をしている部分の躍層は、深さ方向に10~20m位、水平方向には40~50マイル位のオーダーで波うっているのが見られる。これは内部波の存在を示すものと考えられるが、内部波については、別の論文で東シナ海の潮流を論じる時に扱いたいと思う。

対馬海峡西水道から、済州島南方の海域では、XBT記録に水温逆転層がしばしば見られた。第3図中に、水温逆転の見つかった場所を×印で記入してある。この例のいくつかを第5図に示してある。特に対馬海峡西水道において得られた例では、数メートル程度の厚さの層が何層もくさび状に入り組んでいるのが見られる(第5図-1, 第5図-2)。水温逆転の見られた海域は、後で塩分分布を扱う時にわかるように、対馬暖流系と考えられる高塩分水と、黄海方面もしくは朝鮮半島沿岸から来る低塩分水とのフロントができている海域であり、これらの多層構造は、このフロント面における水の混合の一過程であると思われる。次に水平方向の広がりについて考えてみると、いずれの例もかなり複雑な構造を持っており、内部波による鉛直方向の振動も考慮に入れなければならないため、隣接する2測点の記録に対応が見られるかどうか、もしくは対応がないかどうかについては、はっきりしたことが言えないが、33°N線上における二つの記録(第5図-3, 第5図-4)の50m付近の躍層の構造は明らかに対応しており、その水平距離は約12マイルである。つまり、厚さにして数メートル程度の極めて薄いシート状の層が数十マイル程度の広がりできし状に入り組んできた構造であると考えることができる。以上のように、これらの水温逆転層は水塊の混合における一過程としてとらえることができるが、この現象の持続時間は、海洋の他の諸現象の時間的オーダーから見ると、ほとんど瞬間的とも言え、こう言う現象を組織的に追求するには、観測の方法論、測器等を変えて行わねば満足な結果は得られないと考える。

### 3. 水温水平分布

第6図に表面水温分布、第7図に底層水温分布を示す。底層水温分布は、水深の浅い所は底の水温であり、水深の深い所では150m層の水温を採用して画いた。この後、しばしば底層分布を用いるが、いずれも同様の方法で画いたものである。表面水温の例としては、1973年における結果を示してあるが、夏季における昇温効果の影響はまだ残っており、表面水温は水塊の特徴を良くは表わしていない。

底層分布はそれに対し興味のある分布をしている。底まで完全に混合のおこなわれている一層構造の海域を図中に網線で示してある。大陸棚上で水温の高い部分はいずれもこの海域である。これに対し水深50~100m位の海域は、二層ないし三層構造のうち底層均一層における水温分布を示している。この海域では水温は低く、躍層下の水は前年の冬に形成された水がそのまま停滞するという考えを一応支持するが、水温値そのものは、深瀬(4)の言う中部底層水(水温12~15°C, 30°N~32°Nに停滞)、南部底層水(水温17°C前後, 27°N~30°Nに停滞)よりもやや高く北部で(深瀬の言う中部)15~17°C位(第7図-1, 第7図-2)、南部で17~19°C(第7図-1, 第7図-3)である。この原因については良く分からない。

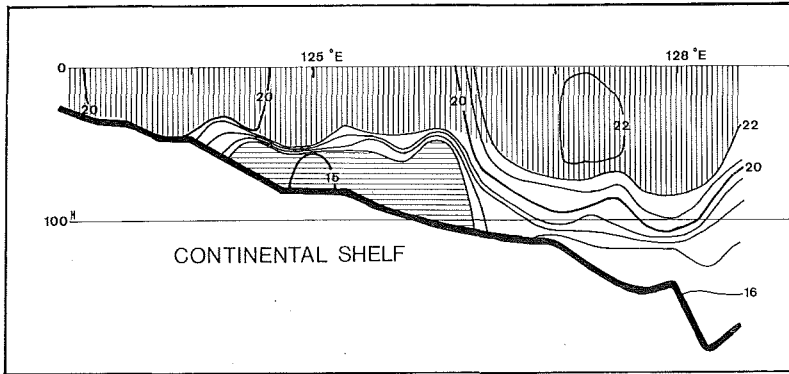
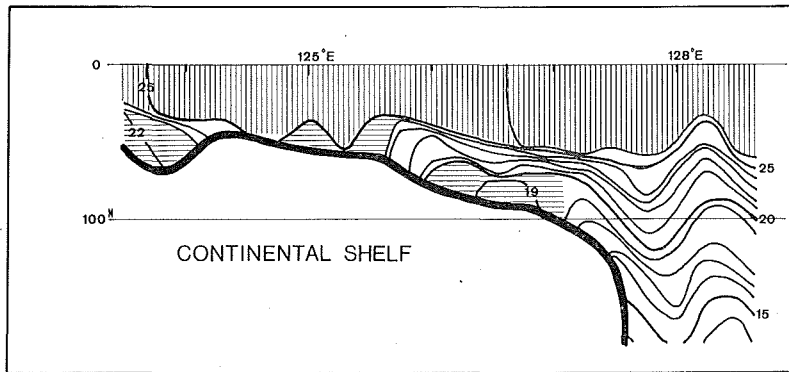
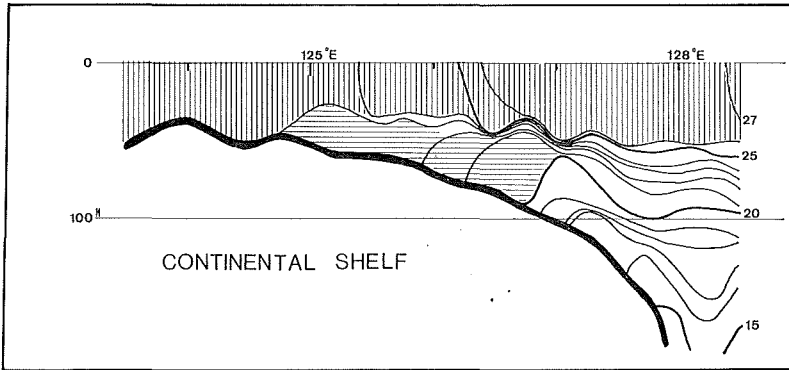


Figure 4  
Temperature  
sections (°C)

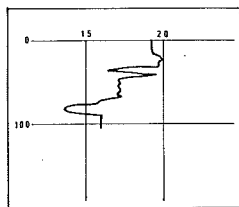
4-1  
32° N, 1974



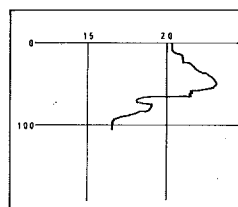
4-2  
28° N, 1975



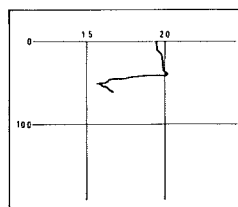
4-3  
29° N, 1975



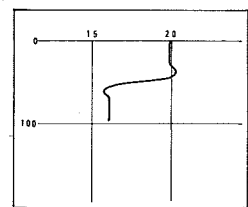
5-1 34°00' N  
128°30' E



5-2 33°40' N  
127°37' E



5-3 32°59' N  
125°46' E



5-4 32°55' N  
126°00' E

Figure 5 Examples of temperature inversions on XBT records (1974)

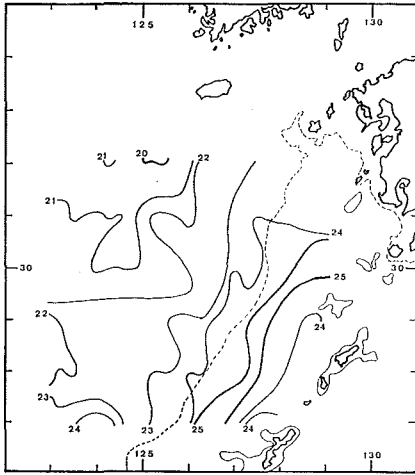


Figure 6 Sea surface temperature in 1973 (°C)

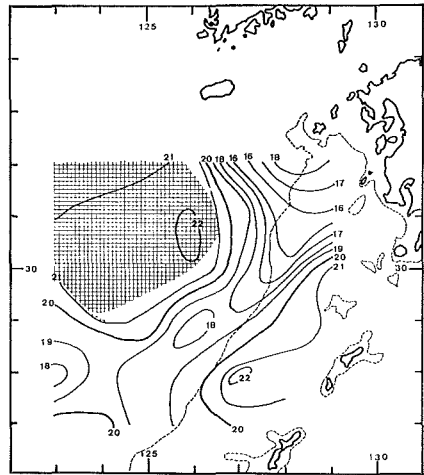


Figure 7-1 Bottom temperature in 1973 (°C)

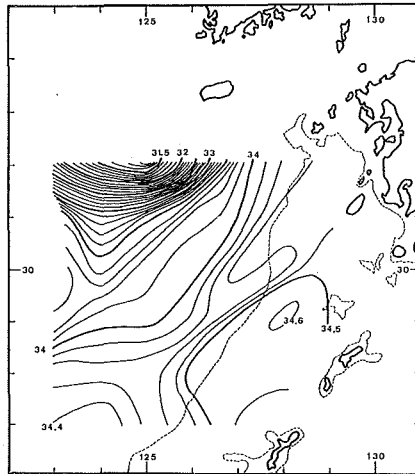


Figure 7-2 Bottom temperature in 1974 (°C)

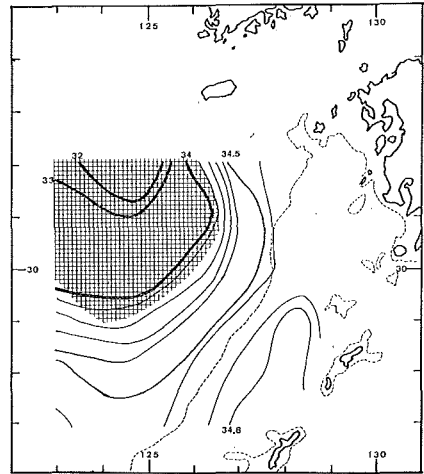


Figure 7-3 Bottom temperature in 1975 (°C)

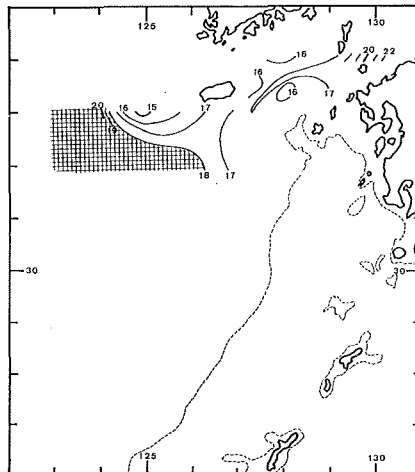


Figure 8 Surface salinity in 1973 (‰)

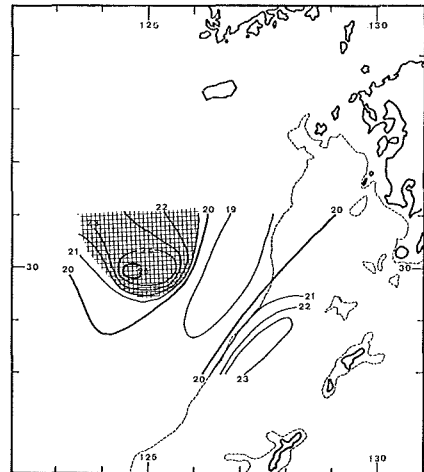


Figure 9-1 Bottom salinity in 1973 (‰)

#### 4. 塩分分布

第8図に表面塩分分布, 第9図に底層塩分分布を示す. 表面塩分分布を見ると, 済州島西方に31‰代の極めて低い塩分を持つ水が見られる(第8図). 他の著者の報告を見ても(3, 4), この海域には常に低塩分水が見られ, 特に夏季には, 30‰を割る低塩分水が黄海方面より表面に薄く広がってくる. また時おり, 黄海方面とは別に揚子江起源と思われる水が大陸側より広がっている分布が得られることもあるようであるが, 我々が調査した3年間では, 特にそのような形跡は見られなかった. 黒潮域では塩分値は上り, 34.6‰まで上る. 済州島南方には, 極めて鋭い塩分フロントが見られる(第8図). このフロントの東側の34.0‰を越える水が対馬暖流を形成するものと考えられる. 大陸棚上には, 32‰~34‰の値を持つ水が分布しているが, 一般に大陸に近い方が塩分値が低く, 大陸からの河川水の影響が及んでいることを示している. これに対し28°Nより南では, 34.5‰程度に達し, 黒潮水の影響が強いことを示している.

次に底層塩分分布について見てみる. 画き方は底層水温分布と同様の方法で画いた. また同様に, 底まで完全に混合の行われている海域を網線で引いて示してある. この部分の分布は, 混合が底まで行われているため, 表面分布と完全に同じである. XBTで, 二層ないし三層構造タイプの得られた場所の分布は, 大陸棚上の底層均一層の分布を示すことになる. この分布図を見ると, 3ヵ年とも比較的良く似た分布をしているのが見られる. 塩分値は, 表面に比べて比較的高く, おおむね34‰~34.5‰の間に分布している. 低塩分の水は済州島南西の比較的狭い海域で見られるだけである(第9図-1, 2). この分布を土田(5)の冬の塩分分布と比較してみると極めて良く似ていることが見られる. このことは, 大陸棚上の底層水は, すべて前年の冬に形成された水が春から夏へかけて躍層下に維持, 停滞していたと考ええると良くつじつまが合う.

塩分の断面図を3例示した(第10図). 水温断面図と比較してみると表面混合層, 底層均一層の構造は完全に一致していることが見てとれる. また33°Nの塩分断面には(第10図-1), 先程XBTによる水温鉛直分布の項で述べた, 塩分フロント付近の複雑な構造が見える.

#### 5. 冬季の推定塩分分布

大陸棚上の底層水の成因に関連して, 次のようなことを考えてみた. 今, 大陸棚上における海況変動のメカニズムが, 春から夏へかけての季節躍層の生成と, 秋から冬へかけての躍層の消滅だけであるとする. そうすると, 塩分は, 現場で生産も消費もされないことのない保存量であるため, 次の様な推定が可能である. 冬季には150 mまで完全に混合が行われるとして, 冬季の推定塩分分布を画くことができる. これを第11図に示す. この結果を見ると, 1973年, 1974年の結果は(第11図-1, 2), 値も, パターンも良く似ている. また1975年の結果はパターンは似ているが値そのものはやや小さい. これを土田(5)の冬の分布図と比較してみると, やはり, パターンは似ているが冬の分布図の方が値が高い. つまり, 冬季になるとパターンはそのまま, 全体の塩分値が高くなる. これは, 1975年の結果の塩分がやや低い(時期がやや早い)という事実と矛盾しない. この原因としては, 大陸棚の全体の塩分値を上げる水平移流による塩分補給か, また秋から冬へかけての水分の蒸発のどちらか, またその両方であると考えられる. パターンが同じで全体的な塩分値のみが違うという事実からは蒸発説をとりたいたいが, これ以上の議論は裏づけとなるデータがないためできない.

#### 6. 溶存酸素分布

表面の溶存酸素分布を第12図に示す. 表面の酸素分布は, 表面からの補給, 生物による消費のいずれも大きく空間的・時間的な変動が大きく, 水塊の有効な指標とはなり得ないが, いずれの分布も4.5~5 ml/l程度の値を持っている.

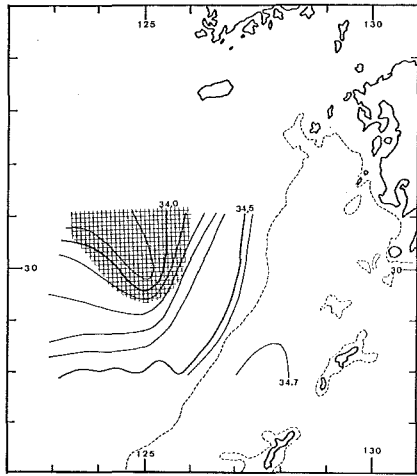


Figure 9-2 Bottom salinity in 1974 (‰)

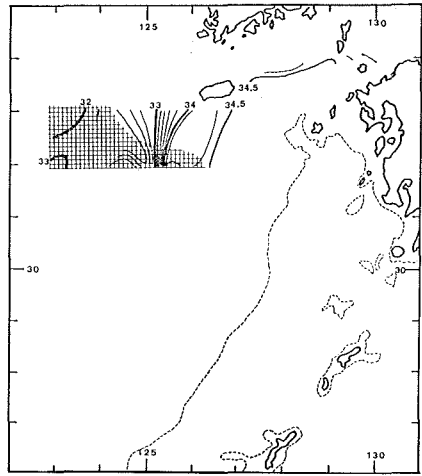


Figure 9-3 Bottom salinity in 1975 (‰)

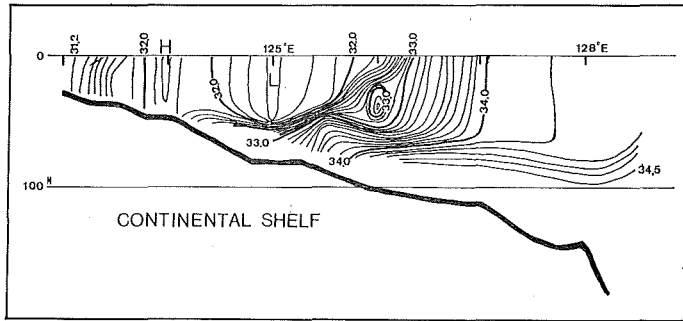


Figure 10-1  
Salinity section along  
33°N in 1974 (‰)

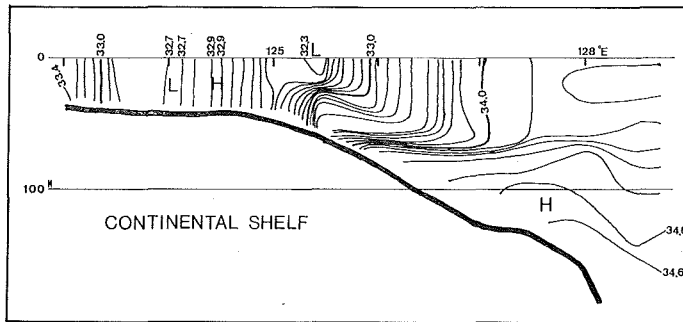


Figure 10-2  
Salinity section along  
32°N in 1974 (‰)

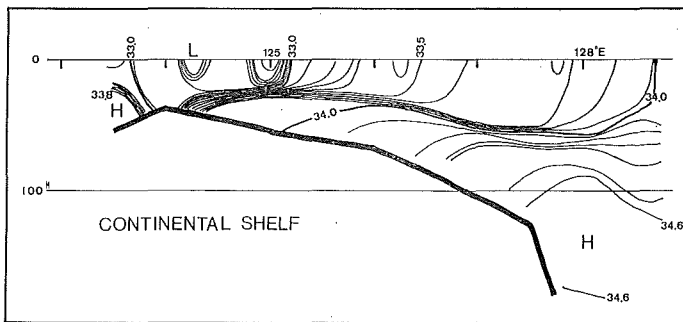


Figure 10-3  
Salinity section along  
31°N in 1975 (‰)



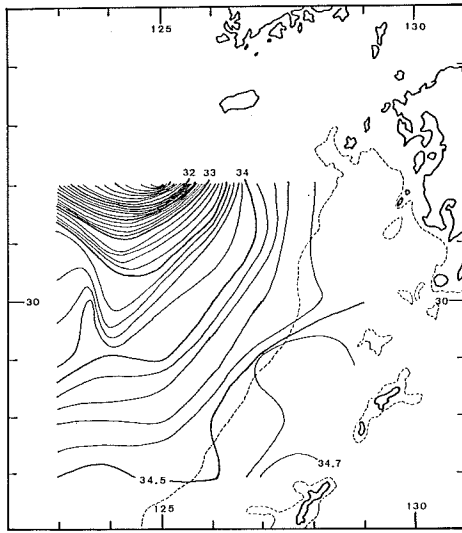


Figure 11-1 Salinity distribution inferred on the winter of 1973 (‰)

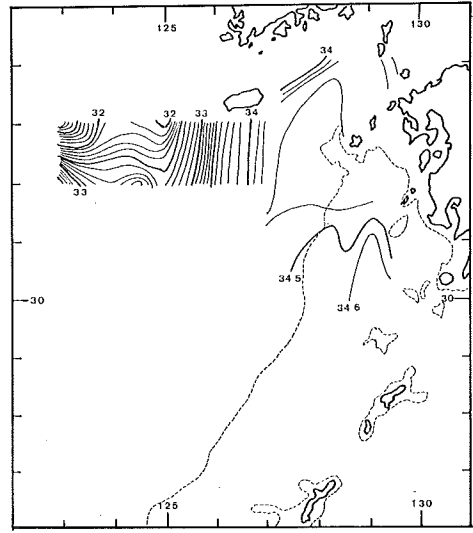


Figure 11-2 Salinity distribution inferred on the winter of 1974 (‰)

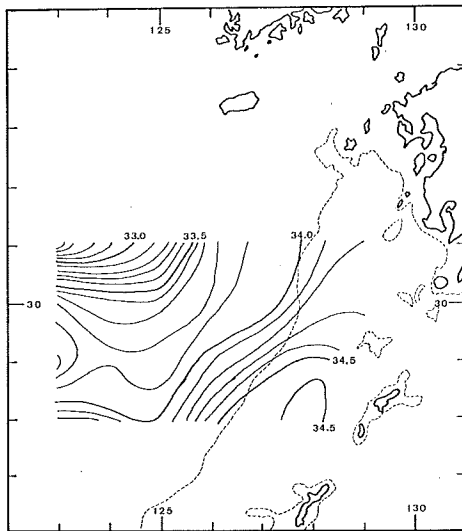


Figure 11-3 Salinity distribution inferred on the winter of 1975 (‰)

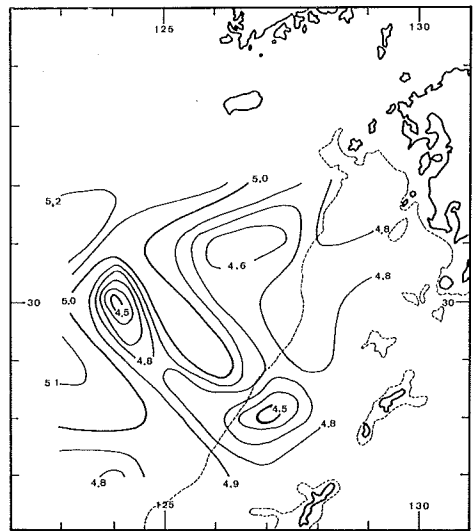


Figure 12 Surface oxygen content in 1973 (ml/l)

次に底層の溶存酸素分布を第13図に示す。底層分布は表面に比較して興味ある分布をしている。鉛直混合が底まで到達している海域(図中に網線を入れて示してある)では、いずれも、溶存酸素値は高く、表面からの酸素補給が底まで届いていることを示している。これに対し、大陸棚上の二層、三層構造をしている海域の底層水では極めて低酸素の水が見つかった。1973年、1974年の結果では、水深が60~80mの海域一帯に2 ml/l代の水が存在し、1975年は、31°N、123°30' E付近に2 ml/lを下回る水が見つかった。

鉛直断面図の例を数例第14図として示す。これを見ると、酸素分布も塩分の鉛直断面と同様に、XBTによる水温構造と完全に一致している。また大陸棚上50~100 mの所にある底層水の酸素分布は、周辺から独立した存在であることが良くあらわれている。

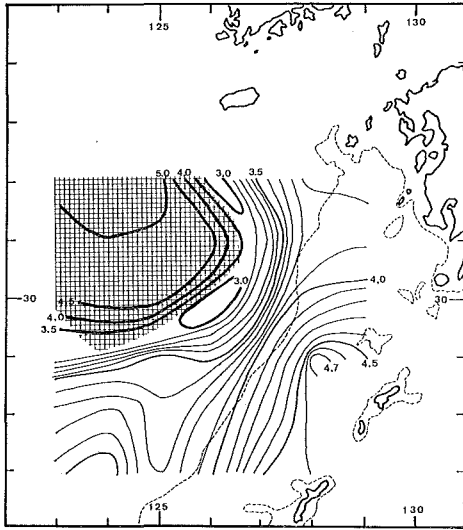


Figure 13-1 Bottom oxygen content in 1973 (ml/l)

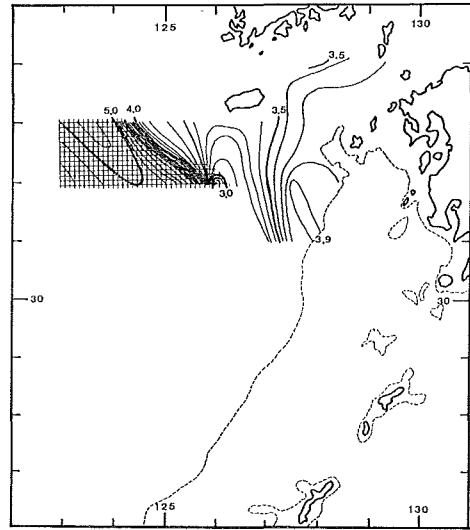


Figure 13-2 Bottom oxygen content in 1974 (ml/l)

従来、大陸棚の底層にある水は、しばしば、黒潮系の水の湧昇の結果であると解釈されたようであるが、この低酸素水の起源を黒潮系の水に求めようとすると、水深400~500mの所から上ってこなければならず、この底層水の塩分値が、黒潮水の200~300m位の水に相当することを考えると少し矛盾する。むしろ、塩分分布を考えた時と同様に、前年の冬に形成された水が底層水として停滞したと考える方が自然であろう。その場合には、この低酸素の原因を消費に求めなければならない。冬季、溶存酸素量の値は、5~6 ml/lに達する(5)。春から夏にかけての時期に、季節躍層下で底層水として残った場合、補給のない酸素消費にさらされて、このような低酸素量になったものと考えられる。しかし、定量的な議論をするには、生物量を考慮に入れて考えなければならず、今後に残された問題である。

底層の酸素量分布は、大陸棚上においても、中部・西部では低いが、南部ではやや高く、同じ底層水といっても分布は一様ではない。塩分について考察した時に、底層水の塩分分布の不均一は、冬季大陸棚上において一様水が形成される時の塩分分布によって説明されることを述べたが、溶存酸素については同様の議論はできない。すなわち、冬季においては、表面からの酸素補給は非常に大きく、至る所、飽和量に近くなる。そのため、底層水の溶存酸素量の不均一は、消費量の差か、水平移流、もしくは拡散の効果として説明されねばならない。ここでは、このどちらとも判断がつかないが、南部の方では黒潮系の水からの何らかの酸素補給のメカニズムを考えるべきかも知れない。

## 7. 水温逆転、三層構造の解析例

対馬海峡西水道から、済州島南方にかけて、しばしば水温逆転が見つかり、また済州島南方の海域では、広範囲にわたって、明瞭な三層構造が見られたことは、水温の項で既に述べたが、これらはすべて、XBT観測で見出されたもので、全部の観測点において採水による塩分等のデータがあるわけではない。また、XBTの記録にあらわれる鉛直方向の細かい構造は、ナンゼン採水観測では必ずしもとらえられないが、見つかった例について、できるだけ限りの解析を試みた。水温逆転層の例を第15図に、三層構造の例を第16図に掲げる。第15図を見るとわ

かるように、水深30~70m程度の所にあらわれる高温の水は、いずれも塩分が高い。また水深70~100mの所にある低温水は(第15図—1, 4), 低酸素, 高塩分という特徴を持っている。この水は他の場所で見られる大陸棚の底層水と同じ特徴を有している。つまり、これらの水温逆転層は、大陸棚上に広く存在する季節躍層の上に、大陸より出て来た低温・低塩分の比較的軽い水が、対馬暖流系の高温・高塩分の水と接した所に生じた構造であると考えられる。

次に三層構造の例を見てみる。第16図では年度の違う例を2例あげてあるが、いずれも良く似ている。塩分は下層になるにつれて増加するのに対し、溶存酸素量は第2層が値が一番低い。このことより浅い方の躍層は、他の場所でも出てくる通常の躍層であると考えられるが、最下層にある水はその起源がはっきりしない。高塩分であることから、対馬暖流系の水がもぐり込んで来たとも考えられるが、水温が低いことは矛盾する。ここでは前年にできた躍層が底層近くにそのまま保持されたと考えてみたい。

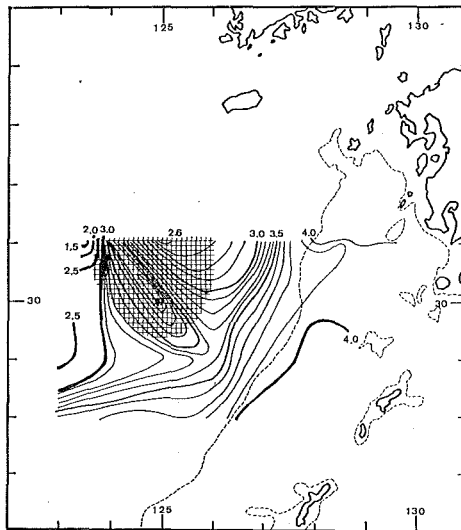


Figure 13-3 Bottom oxygen content in 1975 (ml/l)

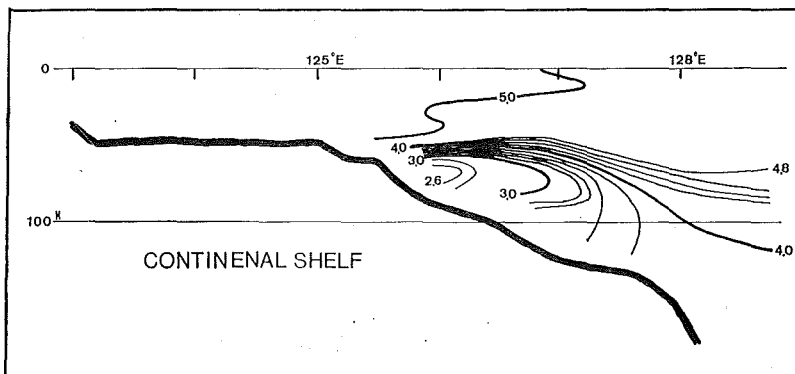


Figure 14-1 Oxygen content section along 32°N in 1973 (ml/l)

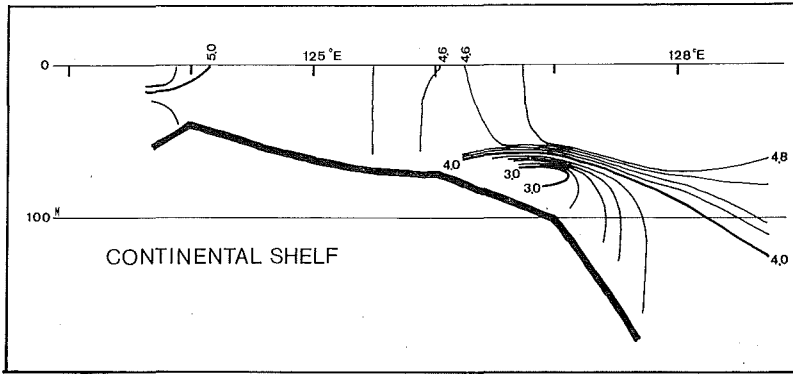


Figure 14-2  
Oxygen content  
section along  
31°N in 1973 (ml/l)

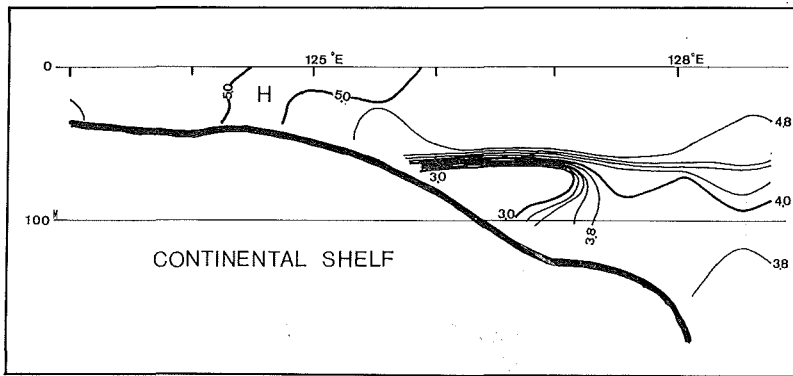


Figure 14-3  
Oxygen content  
section along  
32°N in 1974 (ml/l)

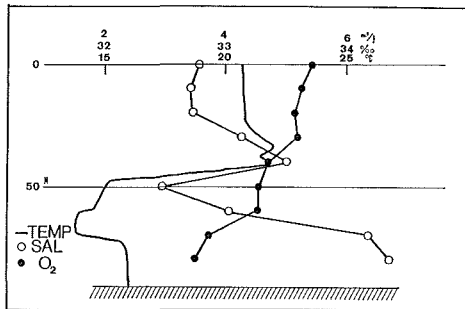


Figure 15-1 Temperature inversion at  
34°00' N 128°00' E in 1974

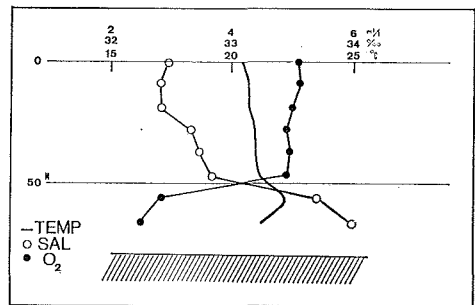


Figure 15-2 Temperature inversion at  
32°00' N 126°00' E in 1973

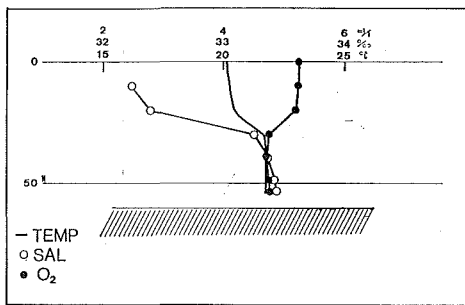


Figure 15-3 Temperature inversion at  
32°00' N 125°30' E in 1974

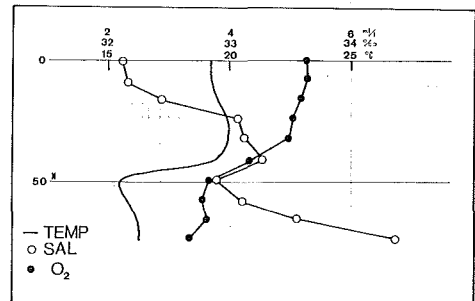


Figure 15-4 Temperature inversion at  
33°00' N 126°00' E in 1974

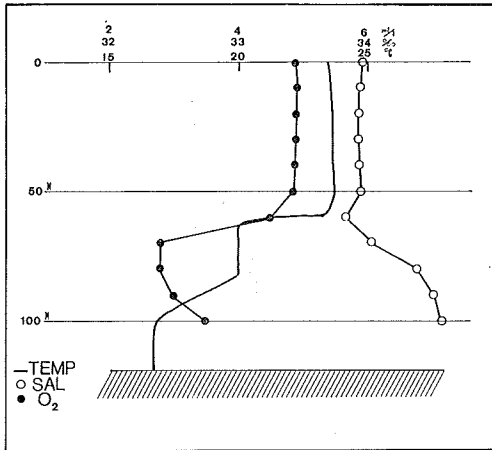


Figure 16-1 Three-layer structure at 32°00' N 127°50' E in 1974

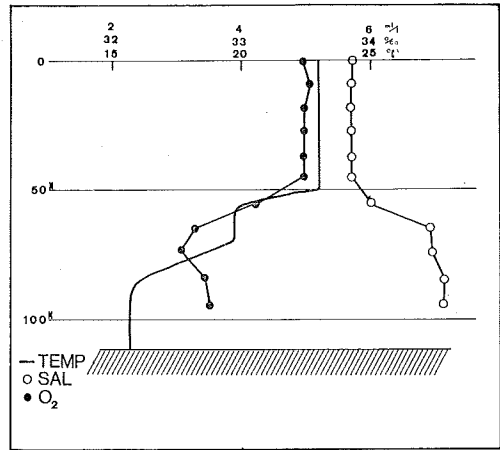


Figure 16-2 Three-layer structure at 32°00' N 127°00' E in 1973

### 8. 結論

東シナ海大陸棚上においては、秋季、季節躍層は40~70m位の深さにあり、一部地域では混合が完全に底まで達している。やや深い所では、ほぼ完全な二層および三層構造が見られる。二層、三層構造の下の部分の底層水は特徴のある分布をしており、前年の冬に形成された水が、そのまま残ったと考えられる。一部の北部の海域では、季節躍層の他に、対馬暖流系の水と大陸より出て来たと思われる低温・低塩分の水が接して複雑な層構造をしており、これは異水系の水の混合過程の一部であると解釈できる。

なお、本研究は「東シナ海に関する総合研究」として、科学技術庁特別研究促進調整費により、昭和48年から50年までの3ヵ年間実施されたものであるが、この観測調査に当たった 測量船「拓洋」 乗組員一同ならびに観測員各位に深く謝意を表します。

### 参 考 文 献

- 1 宇田道隆： 日本海・黄海・オホーツク海の平年各月海況 (水産試験場報告 第5号 1934)
- 2 宇田道隆： 昭和14年6, 7月における支那海方面の海況 (水産試験場報告, 第11号, 1941)
- 3 長崎海洋气象台： 海洋速報
- 4 深瀬茂： 東シナ海陸棚上の底層水 (海洋科学, 1975, 第1号)
- 5 土田武雄： 東シナ海における水温・塩分・溶在酸素量の平年値 (海洋科学, 1975, 第1号)
- 6 小泉政美： 東シナ海の表面水温の標準偏差について
- 7 井上尚文： 対馬暖流の海洋構造 (対馬暖流, 恒星社厚生閣, 1974)