

丹後海南部の海底付近 にみられる低温水の侵入 現象

上野 正博
京都大学農学部水産実験所
和田 洋藏
原 哲之
京都大学農学部
宗 清正 廣



丹後海南部海域での水温・塩分分布観測（1989年7月3日～同7日）において、海底近傍に低温水が侵入・流出する現象が観測された。解析の結果、この低温水の侵入は、主水温躍層の上昇によって押し上げられた下層の相対的に低温高塩分の水が、海域の尾根を越えて侵入して生じる現象と考察した。こうした現象は、比較的安定して存在すると考えられていた底部冷水が短時間に大きく発達・衰退を繰り返していることを示唆する。

京都府沿岸の若狭湾西部海域（丹後海）では底層水温が数日～十数日の時間規模で変動することが知られている。この水温変動は、沿岸水位の変動と良く対応していて、水位変動に対するバロクリニックな応答として生じる水温分布の鉛直変位がこの水温変動をひき起すのだと考えられている（小田巻，1987；河岸ほか，1989）。

一方、日本海南西部の島根・山口両県沖合の大陸棚上の底層には10°C以下の低温水がしばしば出現し、底部冷水と呼ばれている（山崎，1969；小川・森脇，1986；森脇・小川，1988）。小川と森脇は底部冷水現象が海上風の変動に伴う一種の沿岸湧昇・沈降現象であると考えた。彼らは底部冷水の季節的消長が海上風の卓越風向の季節変化と良く対応することを示し、風が起す海水のエクマン輸送によって沿岸水位が変動し、これに反応して生じる主水温躍層の鉛直変位が底部冷水の消長だとするモデルを提示している。

このように、丹後海の底層水温変動現象と日本海南西域の底部冷水現象とは良く似た機構により発生・変動すると考えられている。一方、前者は後者に比べるとより浅い水深における変動であり、かつ、ごく短い時間規模の現象である。本報では、丹後海南部海域における底層水温変動現象をより詳細に記述し、それと主水温躍層の鉛直変位などとの関係を検討し、上述の2つの現象の関係を明らかにする。

材料と方法

京都大学農学部附属水産実験所では、Fig. 1に示す21測点において10回の水温・塩分分布観測を1989年6月～7月に実施した。観測はすべて昼間に行い、1回の観測に要した時間は5、6時間であった。ここでは連続した5日間にわたり観測が実施された同年7月3日～7日の各日に得られた資料を用いる

なお、観測は1～2隻の船で行われたので、同一日の観測においても2台のCTD（アレック電子製ADR-500、同

製 AST-1000m) が用いられた場合もある。この際、塩分については2台のCTD間の校正が十分に行えなかったの

で、塩分についてはAST-1000mで得られた資料のみを以下では用いる。

主水温躍層の鉛直変位を検討するために、京都府立海洋センターが Fig. 1 に黒丸で示した 35°51'N, 135°26.5'E の測点で同年6月14, 21, 7月3, 6, 11, 12, 14日の各日に行ったCTD (Neil Brown 1150) 観測資料を用いる。

沿岸水位の資料は舞鶴海洋気象台舞鶴検潮所の潮汐偏差計算表を用いる。なお、日平均潮位偏差の気圧補正は1 mbの海面気圧変動が1 cmの水位を起こすものとして行った。

海上風の資料については10分間平均風速の最大風速時における風向を用いる。ただし、周囲を500 m級の山で囲まれた舞鶴海洋気象台で得られた資料では海上風の変化を十分に反映していない可能性があるため、浜田測候所(島根県)の資料も併せて用いた。浜田測候所における風の変動は海上風の変動と良く対応することが知られている(森脇・小川, 1988)。

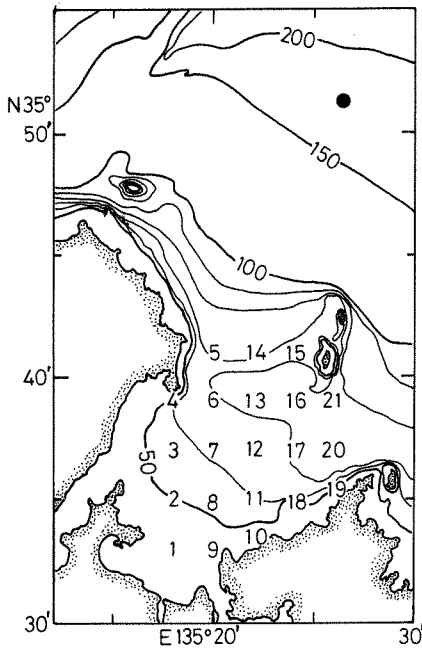


Fig. 1. Locations of stations and a bottom topography. Figures from 1 to 21 show CTD stations occupied by Kyoto Univ. Solid circle shows also a CTD station occupied by Kyoto Institute of Oceanic and Fishery Science. Between 50 meters and 100 meters, additional depth contour lines are drawn every 10 meters.

結果

Fig. 2 に7月3日から同7日の各日における海底直上の水温分布を海底地形と併せて示す。17°C以下の低温域(以下では低温域と略す)の形状が5日間で大きく変化し、それに伴って水温分布が変化していることがわかる。すなわち、3日には海域の中央に孤立した低温域があり、底深が55 m以浅の測点では18°C以上であった。4日には、北西部の Stn. 5 で16.5°C以下の低温が観測され、低温域が海域の北西部から南東部にかけて帯状に形成された。こ

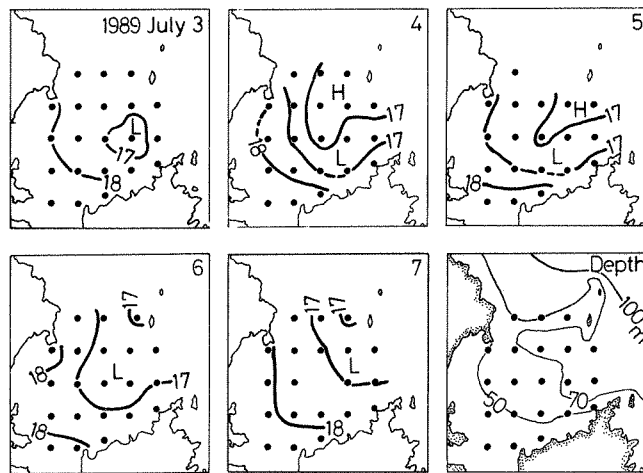


Fig. 2. Daily changes in water temperature patterns near the bottom from 3rd to 7th July, 1989. In lower right frame, a bottom topography is shown.

のために、18°C以上の海域は底深が50m以浅にまで縮小している。そして、5日には帯状低温域がさらに拡がり、ほぼ底深50mの測点にまで達した。一方、冠島の南側の測点は海域内でもっとも底深が大きいにもかかわらず17°C以上の水温を保っている。6日になると低温域は東北ないし東の谷に向い移動・縮小し始め、その分布水深は深くなった。そして、7日には底深が70m以深の測点でのみ低温域がみられ、逆に18°C以上の海域は3日とほぼ同じ範囲にまで拡がっている。

5日間を通じて、この低温域を形成していたのは水温が16.5~17.0°Cで塩分が34.55のほぼ均質な水であった。ただし、4日のStn. 5と6日のStn. 21の底層では16.5°C以下で塩分34.55の冷たい水が観測された。

以上のように、丹後海南部の底層水温分布は5日間程度の短い間に大きく変化する。また、この水温分布の変化は低温水が北側の尾根を越えて侵入し、東側の谷へと流出する過程に対応した低温域の拡大・縮小としてとらえられる。ここでは解析を省略するが同年6月21日~23日の3日間に行われた観測においても、ほぼ同様の低温水の侵入・流出現象が発生していた。

同じ期間の各測点における水温の時間-深度断面図をFig. 3に示す。なお、岸近くの海底傾斜の大きいところで底深が大きく変化する測点があるが、これはロランCの欠射などの理由で観測位置が0.2海里程度ずれるために生じたものである。Fig. 2では、この観測位置のずれを可能な限り補正して水温分布図を描いている。

Fig. 3にみられるように、Stn. 5では4日に底層で16.5°C以下の低温水が現れたが、これに伴って18~20°Cの等温線にも顕著な鉛直変位が生じている。すなわち、17°C等温線は4日にもっとも浅くなるが、18°C等温線は3日から5日にかけて上昇し、5日にもっとも浅くなった。さらに上層にある19°Cと20°Cの等温線では、4日までは変化しないかやや下降し、4日から5日にかけて上昇して5日にもっとも浅くなった。このように等温線の鉛直変位は下層から上層へとおよそ1日程度かかかって伝わっている。

次に、この等温線の鉛直変位が水平方向にどのように伝わったかを検討すると、18~20°Cの等温線がもっとも浅くなるのはStn. 5とその南側の測点では5日であるが、海域南東部のStns. 17~20では6日であった。したがって、この等温線の鉛直変位はまず南へ次いで東へと反時計廻りに伝播しているように見える。しかし、冠島南側のStns. 16, 21では4日ないし5日に18~20°Cの等温線がもっとも浅くなっており、しかも、このときには底層に17°C以下の低温水が存在しない。また、Stn. 5の東側に

あるStns. 14, 15では、5日が欠測しているために詳細は不明だが、18~20°Cの等温線が3日から4日にかけて急上昇しており、やはり17°C以下の水が4日には存在しない。これらのことから、18~20°C等温線の鉛直変位現象の空間スケールやそれが伝わる経路は、17°C以下の低温域のそれらと良く似てはいるが必ずしも一致していないことがわかる。

一方、18°C等温線は34.50の等塩分線とほぼ一致しており、この等温線の鉛直変位はある性質をもった水が鉛直的に変位したり、その厚みが増減することにより生じていることがわかる。Stn. 5における17°Cと18°Cとの等温線間隔は、3日と4日との間ではほとんど変化せず、5日に急激に大きくなる。すなわち、4日に17°C以下で塩分34.55の水が侵入したのに続き、5日には17~18°Cで塩分34.50~34.55の水が侵入してきたものと推測された。

以上のように、丹後海南部に夏期にみられる底層水温の低下現象は、沖合からの低温水の侵入によって生じてい

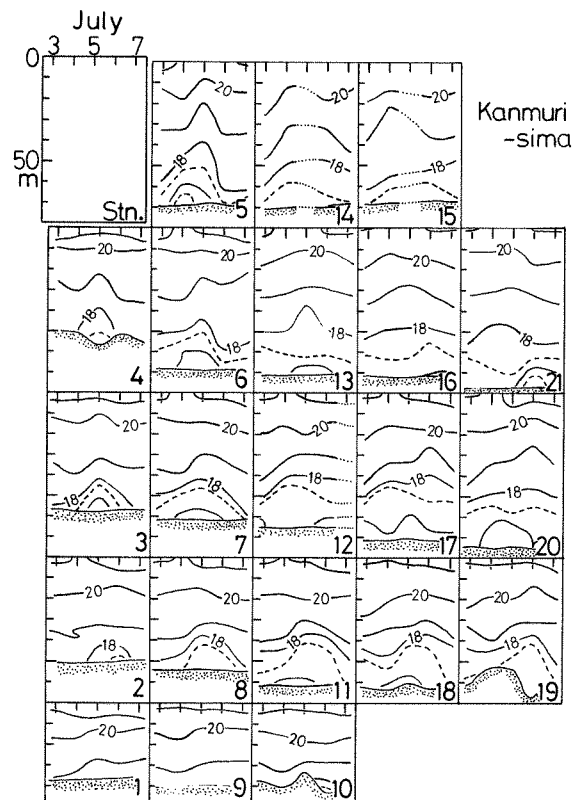


Fig. 3. Time-depth sections of water temperature at each stations from 3rd to 7th July, 1989. Dotted parts on contour lines show the lack of observation.

る。また、この低温水侵入現象は上層の等温線の鉛直変位を伴っており、Fig. 3 からわかるようにその影響は少なくとも水深 10 m 前後の表層にまで達している。さらに、この鉛直変位には等温線間隔の変化も含まれていて、水の水平的な移動を伴っているものと考えられる。

考察

1. 低温水侵入現象と海上風・沿岸水位・主水温躍層深度の関係

ISOZAKI (1969) は、日本海南西海域では日平均水位の変動が海面気圧と相関を持つ風系により誘起されることを示唆した。また、原ほか (1989) は、若狭湾沖合で東向きの成分を持つ風が吹くと舞鶴の水位が上昇することを示し、岸向きのエクマン輸送が発達するためだと推定した。さらに、河岸ほか (1989) は先述のように丹後海の底層水温変動が舞鶴の水位変動と良く対応することを示している。これらの研究結果は低温水侵入現象と密接に関係していると考えられるので、まずこれらの点について検討する。

Fig. 4 に1989年6月10日から7月15日における海面気圧と潮位偏差のそれぞれの日平均値と最大風速時の風向を示す。ただし、風向は風の吹き去る方向で示されている。ま

た、横軸の日付けの間にひかれた横線は水温・塩分分布観測が行われた期間を示している。

海面気圧と潮位偏差はほぼ逆位相にあり、それらの変動は極めて良く対応している。また、潮位偏差が極大値をとる数日前から浜田では東向きの成分を持つ風が吹いている。海上風との対応に疑問が持たれる舞鶴でも、潮位偏差の極大時前後には東向きの成分を持つ風が観測されている。

すなわち、この期間においては海面気圧が低下するときに東向きの成分を持つ風がよく吹く。先述のように、東向きの風は若狭湾では岸に向かうエクマン輸送を発達させるから水位が上昇し、したがって潮位偏差が極大となる。逆に、海面気圧が上昇すると西向きの成分を持つ風が多くなり、沖に向かうエクマン輸送が発達するから水位は低下し、潮位偏差は極小となる。Fig. 4 はこのような関係をよく表わしている。

次に、水位変動と主水温躍層の鉛直変位との関係を検討する。Fig. 5 は 35°51.3'N, 135°26.5'E の測点における水温の時間一深度断面図である。森脇・小川 (1988) にならい 10°C の等温線が主水温躍層の上限を指標すると考えると、主水温躍層の鉛直変位が Fig. 4 の潮位偏差の変動と良く対応していることがわかる。すなわち、10°C 等温線は、潮位偏差が極小値をとっていた6月21日と7月3日に

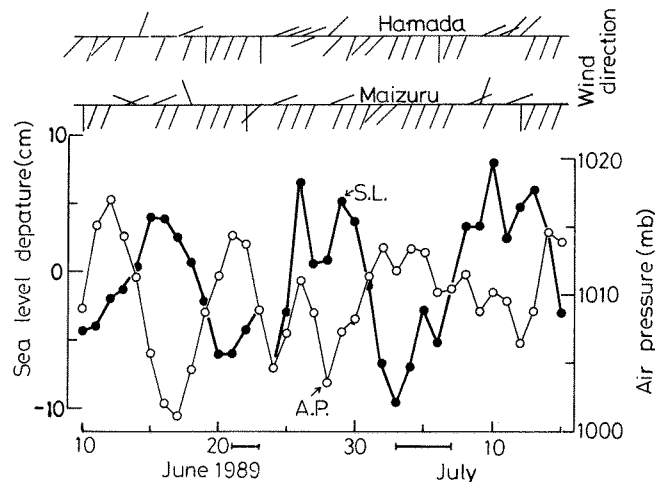


Fig. 4. Daily fluctuations of adjusted sea level departure from normal (solid circle: SL), air pressure at the mean sea level (open circle: AP), and wind directions (upper; WD). The SL and the AP are daily means measured at Maizuru in Kyoto prefecture respectively. The WD measured at Maizuru (lower) and Hamada (upper) in Simane prefecture follow the wind with maximum speed of ten minutes mean wind speed in each day.

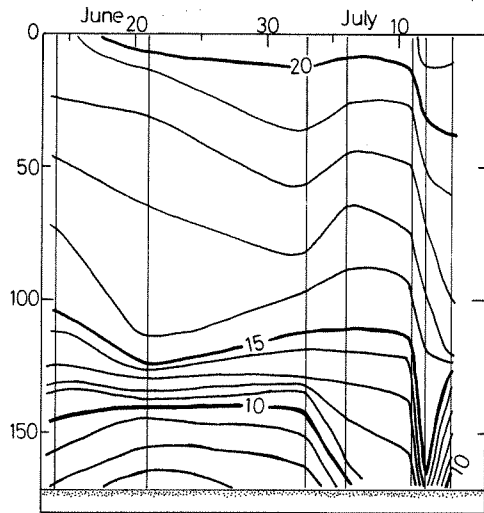


Fig. 5. Water temperature time-depth section at 35°51.3'N and 135°26.5'E (solid circle in Fig. 1) from 14th June to 14th July, 1989. Vertical thin lines show the days observed.

は 140 m 深付近にあったが、それが極大値をとった7月11, 12日まで 170 m 以深にあってこの測点では観測されなかった。

Fig. 5 は観測間隔がかなり粗いために、主水温躍層の鉛直変位を十分にとらえているとはいえないが、潮位偏差すなわち水位の変動に対する応答として主水温躍層が大きく鉛直変位していることは間違いない。また、このような関係は先述の小田巻 (1987) の観測結果とも良く一致している。

以上のような海上風と沿岸水位 (潮位偏差) そして主水温躍層深度の関係は、小川と森脇 (小川・森脇, 1986; 森脇・小川, 1988) が提唱した底部冷水の季節変動機構のモデルにおけるそれらの関係に等しい。したがって、彼らのモデルが妥当なものであり、彼らが示唆したように底部冷水現象が対馬暖流域に一般的にみられる現象であることを以上の考察は示している。

しかし、若狭湾ではこのような主水温躍層の鉛直変位が数日～十数日の時間規模で発生することが知られている (小田巻, 1987; 河岸ほか, 1989)。Fig. 5 でも、観測間隔の比較的狭い7月3日から14日の間では、10°C 等温線が大きく鉛直変位をしておりこのことを裏付けている。一方、この時間規模の主水温躍層の鉛直変位をもたらす水位の変動は舞鶴と同様に浜田でも観測される (松山ほか, 1986)。したがって、島根県沖合域においても数日～十数日程度の時間規模で主水温躍層が鉛直変位しているものと

考えられる。

すなわち、これらの観測結果は底部冷水が従来から考えられていたよりもはるかに短い時間規模で発達と衰退をくり返していることを示唆する。森脇・小川 (1988) が底部冷水の季節的消長としたのは、そのような短期的な発達・衰退の発生頻度か、あるいは発達した状態での持続時間の季節的变化の可能性が大きい。

さて、Figs. 4, 5 によれば低温水の侵入が始った6月22日と7月4日のいずれもが、潮位偏差が極小になり主水温躍層が浅くなった日の直後であることがわかる。次に、主水温躍層の鉛直変位がどのようにして低温水の侵入と関係するのかを検討する。

2. 低温水侵入現象と主水温躍層の鉛直変位

Fig. 5 の7月3日と6日との間では、12°C 以下の等温線が右下りなのに対して、16°C 以上のそれらは右上りである。また、7月11, 12, 14日の間では15°C 以下と16°C 以上との間で等温線の形状が大きく異なる。これらは等温線の鉛直変位が、下層から上層へと少しずつ遅れながら伝わったために生じたものと考えられる。すなわち、Fig. 6 に細線で示したように、実際の等温線の鉛直変位は少しずつ遅れながら下層から上層へと伝播したのだが、観測間隔が粗すぎるために太線で示したような水温分布が得られた

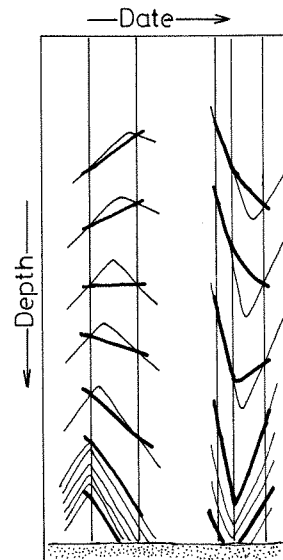


Fig. 6. A model of water temperature time-depth section (thin contour line) to explain the pattern of contour lines from 3rd to 14th July on Fig. 5. A false pattern (thick contour line) made by discrete CTD observations in similar to the pattern on Fig. 5.

のであろう。

若狭湾の西につらなる兵庫県の但馬沿岸で得られた水温の連続記録(松山ほか, 1986の Fig. 1 と Fig. 6)でも, 水位が極小となった日か, その翌日に110 m 深の水温が極小値をとり, その0~3日後に10 m 深の水温が極小値をとっている。すなわち, 水位の変動に回答した主水温躍層の鉛直変位が, 少しずつ遅れながら表層にまで伝わるとした Fig. 6 のモデルと良く一致する。

先の結果(Figs. 2, 3)では, 低温水の侵入が, 潮位偏差の極小となった7月3日の翌日4日に17°C以下の低温水の侵入として始まり, 続く5日に17~18°Cの水が侵入していた。したがって, 潮位偏差が極小となった後, 1日以内に主水温躍層がもっとも浅くなり, この主水温躍層の変位が表層にまで伝わるのにさらに1~2日を要したと考えれば, Fig. 6 のモデルは低温水侵入とそれに伴う上層の水温変化を合理的に説明している。

以上のように, 丹後海南部における底層への低温水侵入現象は, 主水温躍層の上昇と伴って生じる沿岸域の低温化現象の一部である。先述のように, この低温化現象はその影響が表層にまで達する。また, 熱伝導によって水温分布が変化するのではなく, ある性質を持った水が鉛直あるいは水平的に移動することで生じている。したがって, 塩分分布や流動構造などの変動を伴っていることが予想される。

小田巻(1987)は舞鶴の水位と経ヶ岬沖の流れの東向き成分の大きさとの間に明瞭な正の相関関係があることを示した。これは沖合と沿岸との水位の差, すなわち海面の傾斜に対して流れが地衡流バランスをとろうと応答していることを示す。海面傾斜によって生じる流れに関するエクマンの理論によれば, 水深が十分に大きいときには, 海面に近づくほど海面の下る方向に対して直角右向きの成分が大きくなり, 海底に近づくほど海面の下る方向への成分が大きくなる。したがって, 沿岸水位が低いときには, 沖合の表層では東向きの流れの成分の減衰または西向きの流れの発生が生じることになり, 小田巻(1987)の観測結果と良く一致する。また, このとき海底近くでは岸に向う流れが発生するから, 底層での低温水侵入現象はこの流れとも密接に関連していると考えられる。著者らは, この点に関した調査・解析を現在進めている。

上述の論議は海上風の変化によって生じる数日~十数日の時間規模をもつ一連の現象が, かなり大きな空間規模を持つ海況変動と関係していることを示唆している。丹後海程度の空間規模についてはすでに原ほか(1989)が報告したが, 著者らは若狭湾規模についてもこのような海況変動の実例を得ており, それは近く別に報告する予定である。

3. 低温水の侵入経路

低温水はなぜ, より水深の大きい東側の谷から侵入せず北側の尾根を越えて侵入するのだろうか。能登半島以西の山陰・若狭沿岸では, 水位変動が西から東へと伝わるということが知られている(Isozaki, 1969; 松山ほか, 1986)。主水温躍層の鉛直変位は水位変動により駆動されるから, この変位も西から東へと伝わっていることが予想される。

したがって, 観測海域のより西側に位置する尾根の側で先に低温化するために低温水が侵入するのだと考えられなくはない。しかし, 水位変動の伝播速度は約4 m/sと非常に速く, 海域の北側と東側でもせいぜい1~2時間程度の遅れが生じるだけと推定される。実際には, Stn. 5で16.5°C以下の最低水温が生じた2日後にStn. 21で同様の最低水温が生じている(Fig. 3)。したがって, Stn. 5からStn. 21まで最短距離を伝わったとすれば, その伝播速度は数cm/s程度である。冠島の北側を伝わったとしてもこの伝播速度はせいぜい数十cm/s程度であろう。このような伝播速度の大きな違いは, たとえ主水温躍層の変位が西から東へと伝わるものであったとしても, 低温水の侵入経路が決まる原因をそれに求めるのは難しいことを示している。

Fig. 1にみられるように丹後海の海底地形は複雑で, 等深線は大きく屈曲し, 海底勾配も大きく変化する。この海底地形の影響で, 同じ等温線についてみればその鉛直変位の大きさが空間的に大きく変動している可能性が大きい。低温水の侵入経路を決める要因を検討するためには, 観測海域を拡大した調査研究を進めることが必要であろう。

謝 辞

観測の遂行にあたり多大の尽力をいただいた京都府立海洋センターと京都大学農学部船舶職員の各位に厚くお礼申し上げます。

文 献

- 原 哲之・河 岸 賢・宗清正廣・和田洋蔵・飯塚 覚.
1989. 水位変動と短期海況変動について. 京都海洋センター研報, 12: 37-43.
- Isozaki, I. 1969. An Investigation on the Variations of Sea Level due to Meteorological Disturbances on the Coast of Japanese Island (III). J. Oceanogr. Soc. Japan, 24: 178-190.
- 河 岸 賢・原 哲之・宗清正廣・飯塚 覚・和田洋蔵.
1989. 沖合および沿岸海域底層水温の変動現象につ

いて. 京都海洋センター研報, **12**: 31-35.
松山優治・名角辰郎・高畑哲男. 1986. 但馬沿岸の流れの場の特性. 沿岸海洋研究ノート, **23**(2): 129-138.
森脇普平. 小川嘉彦. 1988. “底部冷水”の海況学的特性. 東北水研研報, **50**: 25-47.
小田巻実. 1987. 海洋生物資源の生産能力と海洋資源に関

する研究(第Ⅱ期)成果報告書. 59-87. 科学技術庁研究開発局.
小川嘉彦・森脇普平. 1986. “底部冷水”の変動機構. 東北水研研報, **48**: 97-114.
山崎 繁. 1969. 底部冷水について. 水産海洋研究会報, **14**: 93-101.

Synopsis

The Invading of Low Temperature Water Along the Bottom in Southern Tango-kai: Southwestern Part of Wakasa Bay

Masahiro UENO, Yozo WADA, Noriyuki HARA and Masahiro MUNEKIYO

In southwestern part of Wakasa Bay, low temperature water frequently invade along the bottom at one or two days after the sea level departure has become minimum. The minimum caused by Ekman's transport with easterly wind rises the main thermocline through baroclinic response, and the rise should hence lead to the invading. Moreover, the rise with the invading may occur a few times in a month because the minimum occurs with the same frequencies.

Although the Bottom Cold Water found on the continental shelf in the southwestern Japan sea has been considered to grow/decay mainly with seasonal fluctuations, it is clear that the growth/decay which is the same phenomenon as the rise/fall of the thermocline occurs with the above-mentioned frequencies of the rise/fall accordingly.

Consequently, the invading is only a part of the phenomena caused by changes of the direction of wind blowing over the sea surface. It seems that the phenomena lead to a chain of oceanographic fluctuations with various time-space scales.