

日本海の対馬暖流域における 水温年変化の海域特性

長沼光亮¹⁾

Some Areas of Fluctuations of the Seasonal Water Temperature in the Tsushima Warm Current Region in the Japan Sea

KOSUKE NAGANUMA¹⁾

Abstract

There are several areas where warm or cold water masses have commonly developed and we call them warm or cold water regions. In this paper, we considered the effect of such area properties, as in warm or cold water regions in the upper (southern) or lower (northern) areas of the Tsushima current, against the local seasonal patterns of water temperatures.

A harmonic analysis was applied for monthly mean water temperatures, from 1953 through 1980, of surface, 50, 100 and 200m depth layers by a 0.5×0.5 degrees grid in the Tsushima warm current. Here, the shallower three layers are treated as combined, because no difference was found.

Yearly mean temperatures are higher in the upper current areas in the shallower layers but are upset in the deep layer, seemingly influenced by the cooling for the former and deepening of vertical mixing for the latter.

Amplitude is significantly high for the one-year cycles of the shallower layers, but is not significant for other cases. The phase at the one-year period is earlier in the upper areas of the shallower layers as well as in the warm water regions of the deep layer and later in the opposite case. The phase at a half-year period is earlier in the cold water regions of the deep layer, unlike at the above period.

Components relating to a half-year period seem to affect the maxima to be later and the minima to be earlier in warm water regions and inversely to those in the cold water regions.

Key words Japan Sea, temperature, harmonic analysis

I. は し が き

日本海のはほぼ中央部にあたる $39 \sim 40^\circ \text{N}$ 付近には、極前線といわれる潮境が東西方向に形成されており、その南側の本邦寄りを対馬暖流域、その北側の大陸寄りをリマン寒流域と呼んで

1986年10月21日受理, 日本海区水産研究所業績A第437号

1) 〒951 新潟市水道町1丁目5939-22 日本海区水産研究所

(Japan Sea Regional Fisheries Research Laboratory, Suido-cho, Niigata 951, Japan)

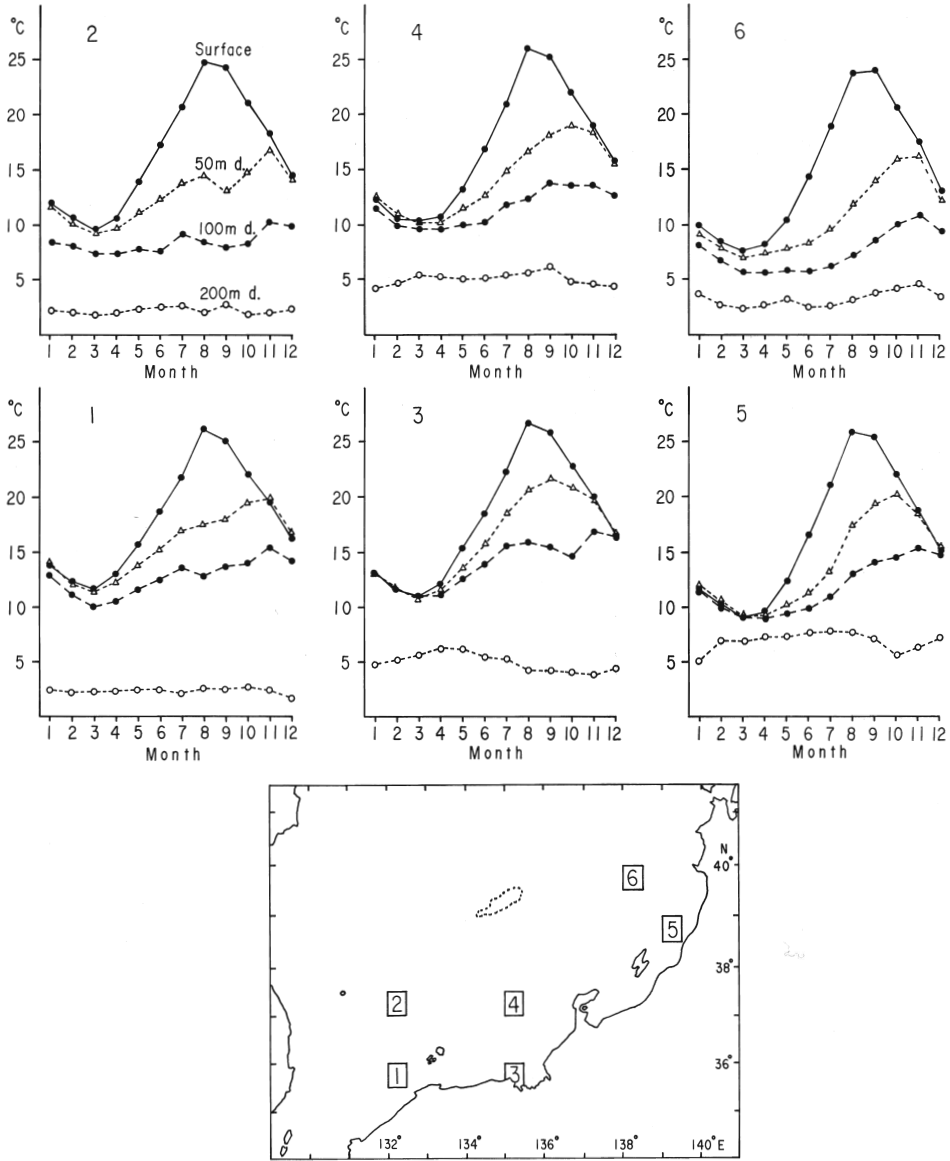


図1 代表海区の各深度水温年変化

Fig. 1. Seasonal changes of mean water temperatures by depth at the six stations in the Japan Sea, sampled from 1953 to 1980.

いる。

対馬暖流域を代表する6海区を選んで、表面(対馬暖流表層水に対応)、50m、100m(対馬暖流中層水に対応)、200m(対馬暖流系水の下部にあたり、その下層にある日本海固有水の影響も受ける)の各深度の水温の年変化を、1953年から1980年の平均値によって表したのが図1である。海区によって多少の違いはあるが、全体を通じて言えることは次のとおりである。振幅(年間の平均値から極値までの幅)は、表面で最も大きく、深度が増すにつれて次第に小さくなり、200m深では極度に小さくなる。また、100m以浅の各深度では1年周期が卓越し、低極

は、各深度とも3～4月頃であるが、高極は、表面が8月頃、50m深が9～10月頃、100m深が10～11月頃と、深度が増すにつれて位相（年変化における極値の出現時期）の遅れがみられる。200m深では卓越周期がほとんどなくなる。

このような水温年変化は、基本的には大気との熱交換や対馬暖流による熱輸送などの年変化によって引き起こされていると言える。前者の受熱・放熱は、海面を通じて行われ、それが、海水自身の熱伝導、渦動による熱の鉛直移動、対流による熱の移動、上昇流または下降流による熱の移動などによって、次第に深層の水温に影響する（須田 1948）。前者が主に鉛直的な熱の移動であるのに対し、後者は主に水平的な熱移動である。暖候期（4～9月）には、対馬暖流の熱輸送によって獲得する熱量は寒候期（10～3月）の2倍以上になり、貯熱量の3分の2はこの寄与によるが、寒候期には、獲得熱量が小さくなり、大気への多量の熱放出の大部分を日本海の貯熱量の減少で補償している（浅井・加藤 1981）。

したがって、対馬暖流域における各深度の水温年変化のプロセスは、一般的には次のように概括されよう。

100m以浅では、春から夏にかけて、大気からの受熱と対馬暖流の熱輸送によって水温が上昇し、秋から冬にかけては、対馬暖流の熱輸送の減少と大気への熱放出によって水温が低下する。200m深では、冬の低極から春先にかけては、100m以浅と同様にやや昇温するが、春の後半頃から夏にかけては、浅層に温度躍層が形成されて、上層からの熱移動が遅くなり降温する。その水温低下は秋前半頃まで続き、秋の後半になると、上層の高温水との鉛直混合によって昇温するが、さらに冬になると、上層からの熱補給が少なくなり降温する。しかし、対馬暖流域でも、朝鮮海台・隠岐海脚・禄剛海脚・佐渡海嶺の各付近には暖水域が頻繁に発達し（以下、この海域を暖水域と略記する）、それらの中間にあたる対馬海盆・大和海盆・富山舟状海盆沖などには冷水域が頻繁に発達している（以下、この海域を冷水域と略称する）ことなど、所によって熱の水平的あるいは鉛直的な移動が異なるために、水温変化には海域による差が現れる。

このように、水温年変化は、海水の動きを反映していると考えられるので、その海域的な特性を明らかにすることは、日本海の海況変動を究明していくうえで基礎的な重要問題である。

このような考えにもとづき、日本海の対馬暖流域における表面、50m、100m、200m各深度水温の年変化について、調和分析法を用いて検討を行った。その結果、若干の知見を得たので報告する。

II. 資料と方法

資料は、筆者ら（1985）によって集計された、日本海の緯経度30分柵目ごとの表面、50m、100m、200m各深度の累年（1953～1980年）月別平均水温である。

この解析に用いた調和分析とは、日本海洋学会（1970）によれば、ある連続量を一定の間隔 Δ ごとに観測した資料が n 個あるとき、この量は $n\Delta$ を基本周期とし、その整数分の1の周期をもついくつかの正弦波の和として近似的に表すとする。このように正弦波に分解し、それぞれの波の振幅と位相を計算することをいう。

いま、連続量を $f(t)$ とすれば、 $t=0$ から $(n-1)\Delta$ までの区間について調和分析を行うと $f(t)$ は次のかたちで近似される。

$$f(t) \sim A_0 + \sum_{m=1}^{m_0} \left(A_m \cos \frac{2\pi mt}{n} + B_m \sin \frac{2\pi mt}{n} \right)$$

$$= A_0 + \sum_{m=1}^{m_0} Rm \cos \left(\frac{2\pi mt}{n} - \delta m \right) \dots\dots\dots(1)$$

ここで

$$\left. \begin{aligned} A_0 &= \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} f(k\Delta) \\ Am &= \frac{2}{n} \sum_{k=0}^{n-1} f(k\Delta) \cos \frac{2\pi km}{n} \\ Bm &= \frac{2}{n} \sum_{k=1}^{n-1} f(k\Delta) \sin \frac{2\pi km}{n} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(2)$$

である。また、 Rm , δm はそれぞれ m 番目の波の振幅と位相を表し

$$Rm = \sqrt{Am^2 + Bm^2}, \quad \delta m = \tan^{-1}(Bm/Am) \dots\dots\dots(3)$$

で表せる。 m の値の上限 m_0 は n が偶数の場合は $n/2$, 奇数の場合は $(n-1)/2$ である。

つまり、本報で取り扱うような各月水温をもとにした水温 T の年変化は、

$$T = T_0 + T_1 \cos(t - \varepsilon_1) + T_2 \cos(2t - \varepsilon_2) + T_3 \cos(3t - \varepsilon_3) \\ + T_4 \cos(4t - \varepsilon_4) + T_5 \cos(5t - \varepsilon_5) - \cos 6t$$

によって近似的に表せる。

ここで、 T_0 ; 年平均水温

$T_1 \dots T_5$; T_1 は 1 年周期, T_2 は 1/2 年周期, $\dots T_5$ は 1/5 年周期の振幅

t ; 期間で, $0 \sim 360^\circ$ の値をとり, 1 月を 30° , 2 月を 60° , \dots 12 月を 360° にあてた。

$\varepsilon_1 \dots \varepsilon_5$; ε_1 は 1 年周期, ε_2 は 1/2 年周期, $\dots \varepsilon_5$ は 1/5 年周期の位相

である。

なお、振幅・位相の計算は、1 年周期から 1/5 年周期まで行っているが、 $100m$ 以浅の各深では、1/3 年よりも短い周期の振幅が非常に小さく、1 年と 1/2 年の両周期の値を合成することでほぼ実測に近い値が得られるところが多い。200m 深では、各周期の振幅が 1°C 以下の小さな値のところが多く、実測に近い値を得るには各周期の値を合成しなければならないほどで、卓越周期は認め難いが、1 年と 1/2 年の両周期の振幅が他の周期のそれよりも大きい傾向がみられる。

したがって、以下、1 年周期と 1/2 年周期のみについて述べることにする。

III. 結果と考察

1. 年平均水温

図 2 は、表面、50m, 100m, 200m 各深度の年平均水温分布を示したものである。

年平均水温は、100m 以浅では、対馬暖流の日本海への流入口にあたる対馬海峡で、表面 19°C , 50m 深 18°C , 100m 深 16°C と最も高く、下流域に向かって次第に低くなる傾向を示し、太平洋への流出口にあたる津軽海峡西口では、表面 15°C , 50m 深 13°C , 100m 深 11°C と、この間、総じて $4 \sim 5^\circ\text{C}$ の温度差となっている。対馬海峡から津軽海峡までの間、対馬暖流系水は、沖合へも大きく広がっているが、表面では $39.5 \sim 40.5^\circ\text{N}$ 付近、50m 深と 100m 深では $39 \sim 40^\circ\text{N}$ 付近に、それぞれ水温傾度の大きいところが見られ、寒流域との境界である極前線の存在がうかがわれる。200m 深では、100m 以浅とは逆に、対馬暖流の上流域にあたる隠岐諸島以西で 3°C と低く、下流域に進むにしたがって高くなり、山形県～秋田県沿岸で 7°C の最高水温とな

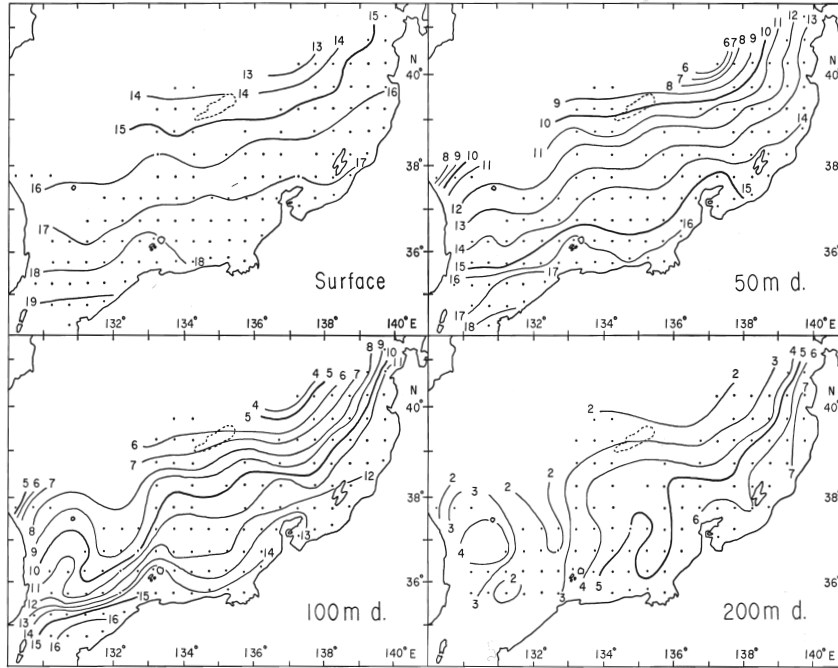


図2 各深度における年平均水温

Fig. 2. Distributions of the annual mean water temperatures in each depth zone.

っている。これは、友定 (1984) のように、対馬海峡の海深が浅いために、入口付近の対馬暖流の深さが200mに達せず、下流に行くにしたがって、鉛直混合により200m深まで広がるためであろう。

2. 振幅

表面、50m、100m、200m各深度水温の年変化における1年周期の振幅を図3に、同1/2年周期の振幅を図4に示した。

図3から、1年周期の振幅は、表面で6.5~9°C、50m深で3~6°C、100m深で1~3°C、200m深で0.2~1°Cである。それらは、表面では、対馬暖流の上流域にあたる対馬海峡で小さく、下流域に進むにしたがって大きくなる傾向がみられる。これは、対馬暖流の下流域が上流域にくらべ、大気との熱交換の影響を受けやすいことによるものであろう。50m深と100m深では、沿岸で大きく、沖合へ向かって次第に小さくなるが、本土沿岸ぞいでは、わずかながら下流域ほど振幅が大きい傾向がみられる。200m深では、暖水域で大きく、冷水域で小さい傾向がみられる。

図4から、1/2年周期の振幅は、概して小さく、表面で0.8~1.4°C、50m深で0.2~1.2°C、100m深で0.2~1.2°C、200m深で0.2~1°Cと、1年周期のそれに比べ、100m以浅では著しく小さく、200m深ではほぼ同じである。それらの分布は、各深度とも暖水域と冷水域とで分断されるような様相を示し、表面と50m深では、暖水域で小さく、冷水域で大きくなっているが、本土沿岸ぞいでは、対馬暖流の上流域で小さく、下流域に進むにしたがって大きい傾向がみられる。100m深と200m深では、50m以浅とは逆に、暖水域で大きく、冷水域で小さい傾向がみられる。振幅の大きい海域が、50m以浅と100m以深とで逆転することは、前者では、大気との熱交換の程度の海域的な違いが、後者では、鉛直混合発達の海域的な違いが、それぞ

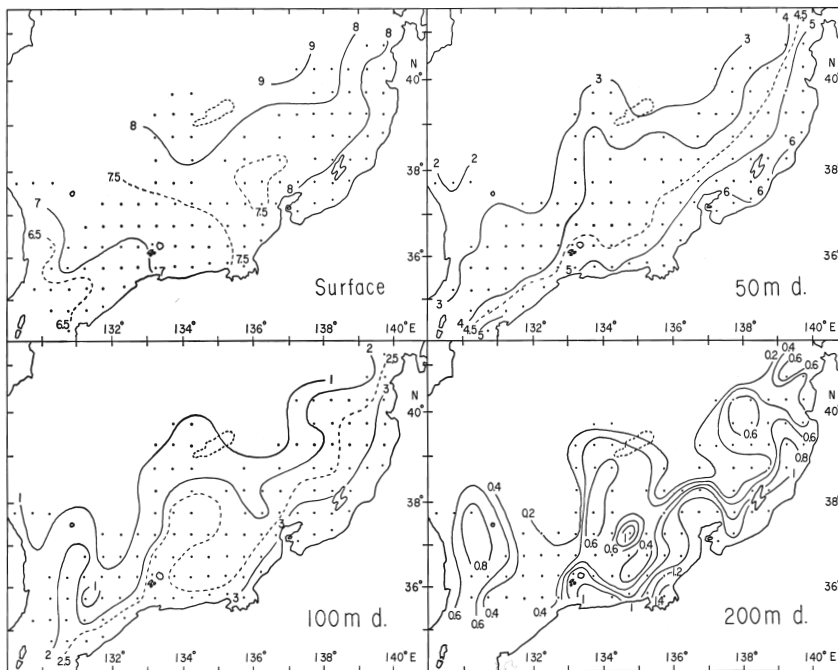


図3 各深度における1年周期の振幅

Fig. 3. Distributions of the amplitudes of seasonal fluctuation curves of the water temperatures at one year period in each depth zone (unit: °C).

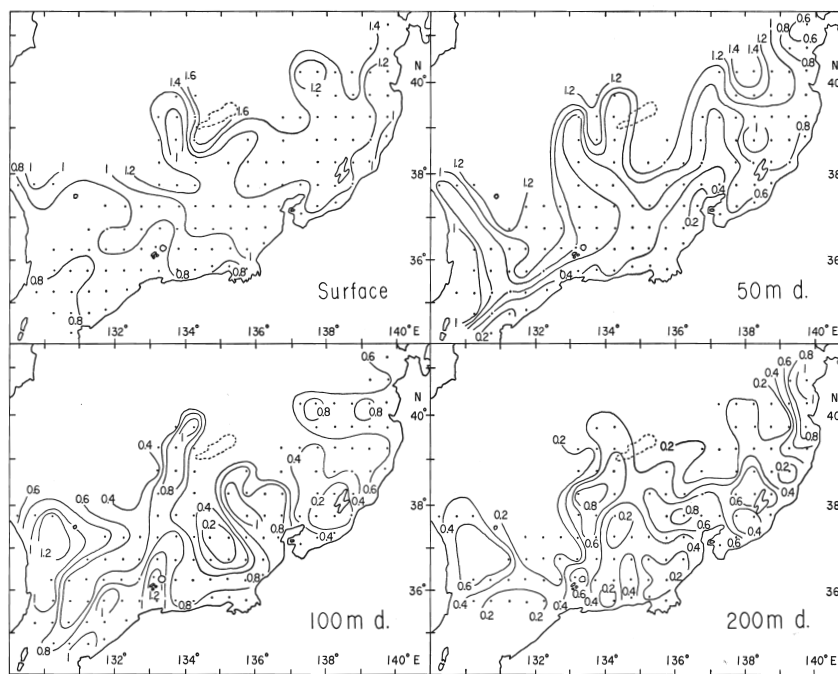


図4 各深度における1/2年周期の振幅

Fig. 4. Distributions of the amplitudes of seasonal fluctuation curves of the water temperatures at half a year period in each depth zone (unit: °C).

れ主に影響しているためと考えられる。

図5は、1年周期の振幅に対する1/2年周期の振幅の比 (T_1/T_2) を示したものである。

その振幅比は、100m以浅では、1年周期が1/2年周期のそれよりもかなり大きく、表面で5~10倍、50m深で3~20倍、100m深で2~10倍となっており、1年周期が卓越していることを示している。それらの分布は、いずれも沿岸で大きく、沖合へ向かって小さくなる傾向を示している。つまり、対馬暖流系水の影響がより強い海域ほど1年周期が卓越していることを示している。一方、200m深では、暖水域で1~2倍、冷水域で0.5~1倍となっており、冷水域では、1/2年周期の振幅が1年周期のそれを上回っている。

3. 位相

図6と図7は、表面、50m、100m、200m各深度水温の年変化における1年周期と1/2年周期の位相を示したものである。

図6から、1年周期の位相、すなわち、水温年変化における極大の出現時期は、100m以浅では、対馬暖流の上流域にあたる対馬海峡付近で、表面260°(8月下旬に相当)、50m深280°(9月中旬に相当)、100m深280°(8月下旬に相当)と最も早く、下流域に向かって次第に遅れ、津軽海峡西口では、表面266°(8月下旬に相当)、50m深290°(9月下旬に相当)、100m深320°(10月下旬に相当)となっており、この間、表面で6日、50m深で10日、100m深で40日の差が見られる。200m深では、水塊配置に対応した形で、暖水域で120°(4月上旬に相当)と早く、冷水域で300°(10月上旬に相当)と遅れている。

図7から、1/2年周期の位相は、100m以浅では、1年周期のそれとは違って、対馬暖流の上流域から下流域へ次第に遅れるというのではなく、対馬暖流域全域があまり差のない分布状況を示し、表面で130~140°(4月中旬~下旬に相当)、50m深と100m深で300°(10月上旬に相

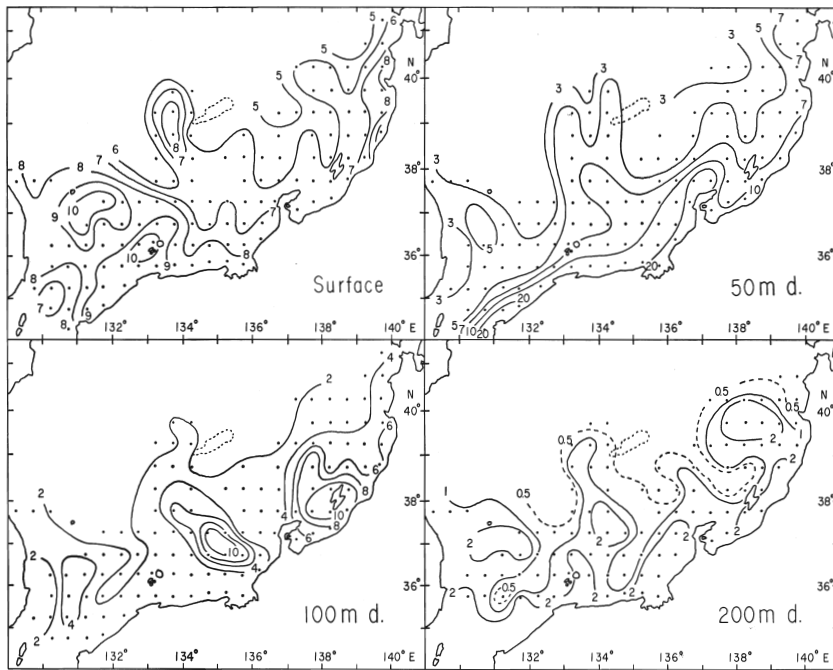


図5 各深度における1年周期と1/2年周期の振幅比

Fig. 5. Distributions of the ratios of amplitudes between one year (Fig. 3) and half a year (Fig. 4) periods in each depth zone.

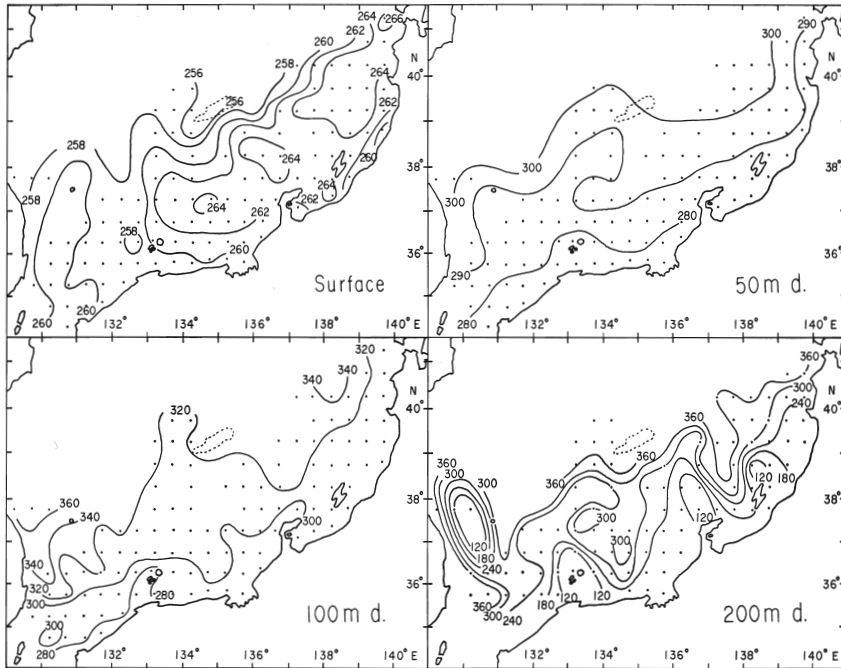


図6 各深度における1年周期の位相
Fig. 6. Distributions of the phases of seasonal fluctuation curves of the water temperatures at one year period in each depth zone (unit: degree).

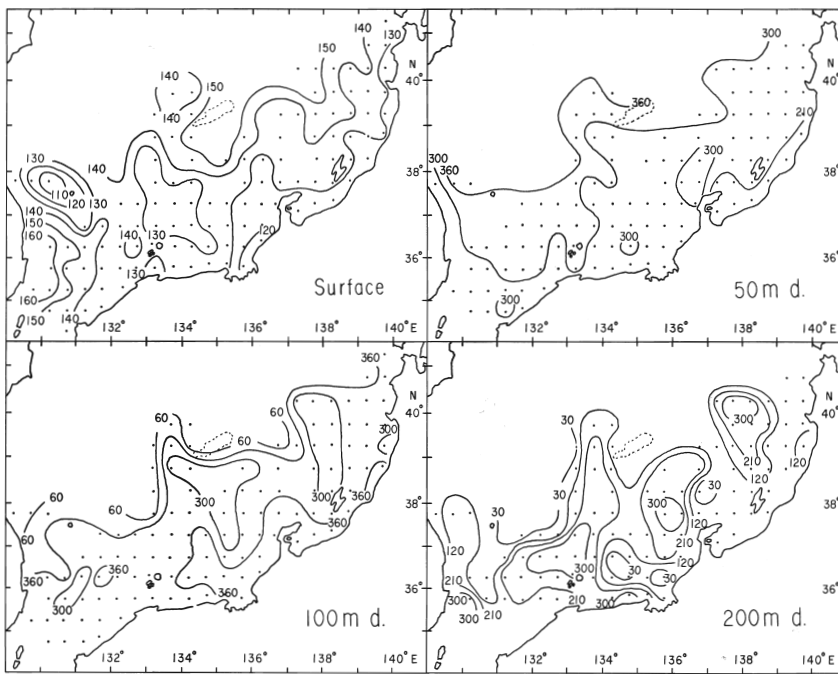


図7 各深度における1/2年周期の位相
Fig. 7. Distributions of the phases of seasonal fluctuation curves of the water temperatures at half a year period in each depth zone (unit: degree).

当)前後が大勢を占めている. なお, 50m深の能登半島以東沿岸が210°(7月上旬に相当)と異常に早くなっているのは, その水域が, 河川水の流出分布域であることから, そのことに関連しているものと考えられる. また, 北陸沿岸域で, 100m深がその沖合よりも約1~2カ月位相が遅れているのは, 図1の3海区の100m深水温年変化にみられるように, 10月頃に第2極小が形成されることによるものと考えられる. 第2極小形成の成因, つまり, 9~10月にかけて50m深と同様に降温へ向かっている水温が, 10月から11月にかけて再び昇温するのは, 9月頃から発達してくる鉛直混合によって, 上層からの高温水がその頃に100m深に達するからであろう. 200m深では, 冷水域で120°(4月上旬に相当)程度と早く, 暖水域で210~300°(7月上旬~10月上旬に相当)と遅れている.

図8は, 1年周期と1/2年周期との位相差 ($\epsilon_1 - (\frac{\epsilon_2}{2} + 180^\circ)$)を示したものである. その差がないところは, 1年周期と1/2年周期の成分の極大値の出現時期が同じであることを示し, 正域のところは, 1/2年周期成分の効果が, 1年周期の極大値の出現を早め, 極小値の出現を遅らせるように作用し, 負域のところは, 正域と逆の作用をしていることを示している(宮地1977).

表面では, いずれも正域となっており, その値は, 沿岸で大きく, 沖合で小さい傾向を示している. 50m深では, 極前線以北は, 正域になっており, 以南の対馬暖流域は, ほとんどが負域になっているが, 能登半島以東の距岸約30海里までの沿岸域(河川水の流出域に対応)では正域となっている. 100m深では, 50m深とほぼ同様に, 極前線以北が正域, 対馬暖流域が負域となっている. 負域の値は, 沿岸ほど大きく, 沖合に向かって小さくなっている. 200m深では, 暖水域が負域, 冷水域が正域となっている.

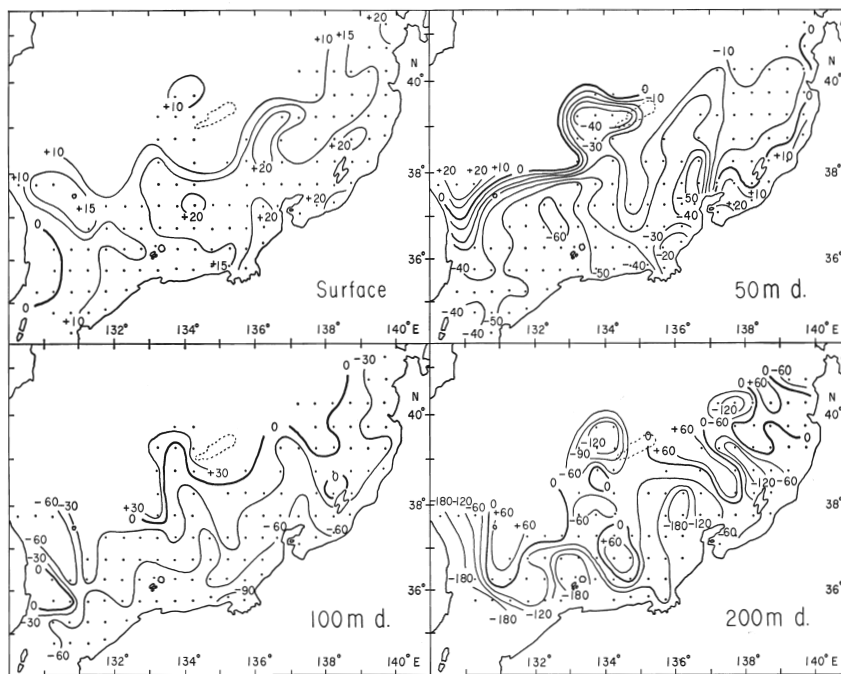


図8 各深度における1年周期と1/2年周期の位相差

Fig. 8. Distributions of the differences of phases between one year (Fig. 6) and half a year (Fig. 7) periods in each depth zone.

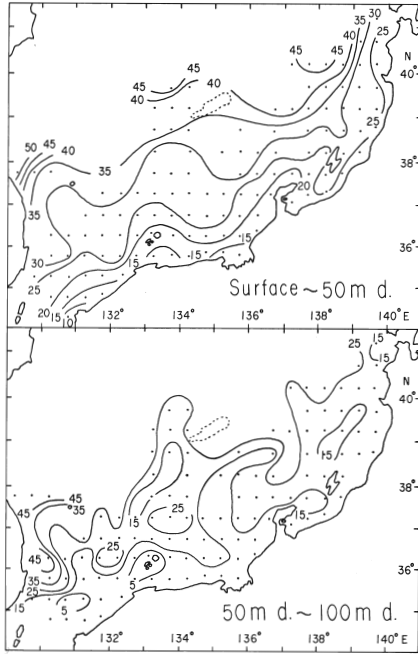


図9 1年周期の深度間における位相差

Fig. 9. Distributions of the differences of phases at one year period (Fig. 6) between two depth zones.

るが、その遅れは表面对50m深の場合よりも小さく、対馬海峡で5日、津軽海峡西口で15日となっている。なお、100m深と200m深との間については、200m深の水温年変化に1年周期の卓越がみとめられないので求めなかった。

IV. 要 約

日本海の対馬暖流域における水温年変化の海域特性を調べることを目的として、先にまとめた(長沼・市橋1985)、緯経度30分柵目ごとの表面、50m・100m・200m各深度の1953~1980年の累年月別平均水温を調和分析し、次の結果を得た。

1. 年平均水温は、100m以浅の各深では、対馬暖流の降温を反映して、上流域で高く、下流域に向かって次第に低くなり、200m深では、暖流の鉛直混合の広がりやを反映して、上流域よりも下流域で高温となっている。

2. 振幅は、100m以浅の各深度では、1年周期のものが他の周期に比べ著しく卓越しているが、200m深では、各周期の値がいずれも小さく、卓越した周期はみられない。

3. 1年周期の位相は、100m以浅の各深度では、対馬暖流の上流域で早く、下流域に向かって遅れる傾向を示し、200m深では、暖水域の出現域で早く、冷水域の出現域で遅れている。1/2年周期の位相には、100m以浅の各深度では、対馬暖流域内で大きな差がみられない。200m深では、1年周期のそれとは逆に冷水域の出現域で早く、暖水域の出現域で遅れている。

4. 1/2年周期成分は、対馬暖流域の100m以浅の各深度と暖水域の200m深では、1年周期の最大値の出現を遅らせ、最小値の出現を早める作用をし、極前線以北の100m以浅の各深と

1/2年周期成分の効果によって、水温年変化は、正域では、昇温期には短い期間で昇温し、降温期には長い期間かかり、負域では、その逆になるわけで、そのことからすれば、表面の全域が正域となっていることは、大気の影響が直接的であることを反映しているためであろうし、50m深・100m深の暖流域及び200m深の暖水域が負域で、それらの位相が大きくなっていることは、昇温期には海面から暖められることによって躍層が形成され、熱は徐々に深層に及ぶが、降温期には海面冷却によって躍層がこわれ混合層を形成し、比較的早く深層に及ぶことを示していると考えられる。したがって、1/2年周期成分は、鉛直混合に関連した因子と考えられよう。

図9は、深度間における1年周期の位相差を示したものである。

表面と50m深との間では、全般に深層の50m深の方が遅れている。その遅れは、沿岸で小さく、沖合へ向かって次第に大きくなっているが、沿岸ぞいでは対馬海峡で10日、津軽海峡西口で25日と、下流域に進むにつれて大きくなっている。50m深と100m深の間でも、深層の方が遅れている。

冷水域の200m深では、1年周期の最大値の出現を早め、最小値の出現を遅らせる作用をしている。

終りに、本文の御校閲と御助言を賜った日本海区水産研究所北野裕資源部長に厚くお礼申し上げます。また、資料の計算及び作図に御協力いただいた同所の市橋正子技官、上村孝子嬢に深謝の意を表する。

文 献

- 浅井富雄・加藤内蔵進（1981） 日本海における大気と海洋の熱収支と対馬暖流の季節変化. 海洋科学, 13(6), 407-413.
- 宮地邦明（1977） 有明海における表面水温の季節変化特性について. 昭和52年度日本海洋学会春季大会講演要旨集, 139pp.
- 長沼光亮・市橋正子（1985） 日本海における水温の平均像—1953～1980年の平均水温とその標準偏差—. 日本海ブロック試験研究集録(5), 1-100.
- 日本海洋学会（1970） 海洋観測指針. pp. 409—417, 日本海洋学会, 東京, 432pp.
- 須田皖次（1948） 海洋科学. 増訂版, pp. 61—176, 古今書院, 東京, 770pp.
- 友定 彰（1984） 日本周辺の水溫変動—水産における定線観測から—. 資源 (218), 49—61.