黒潮大蛇行と四国沖の暖水域について

西山勝暢・小長俊二・石崎 廣

Warm Water Regions off Shikoku Associated with the Kuroshio Meander

by

Katsunobu Nishiyama, Shunji Konaga
and Hiroshi Ishizaki

Meteorological Research Institute, Japan

(Received July 31, 1979)

Abstract

There has always been seen a warm water region south of the Kuroshio off Honshu. It is located off Shikoku or Tokaido, according to whether the Kuroshio takes a path with or without meander. These warm water regions have lens-shaped thermostads in the subsurface layer above the main thermocline, which have a thickness of 200 to 400 m at the center and diameters more than 100 km. The lens-shaped thermostads have temperature of 19°C and a thermosteric anomaly of 300 to 320 clt^{-1} when the Kuroshio takes a meandering path, and 17° and 260 to 280 clt^{-1} when it takes a straight path.

A detailed analysis of the water regions observed during two periods when the Kuroshio was meandering, which began in 1959 and 1975 respectively, shows that the warm water regions do not have a lens-shaped thermostad structure in the first years of the periods, but have it in the following years. There are some differences, however, between the two cases. The thermosteric anomalies in the thermostad gradually decrease with time in the former case and increase in the latter. The geographical location of the center of the warm water region off Shikoku is rather stationary in the former case and fluctuates with time in the latter.

1. はじめに

黒潮は東海道沖で大陸棚斜面に沿って東進する直進流路と、大きく回して大冷水域を形成する蛇行流路をとる。1975年夏以来黒潮は蛇行流路をとっているが、このような2つの選択的な現象は数年から10数年の時間スケールで出現し、湾流などにはみられない黒潮に特異なものである。この蛇行流路の生じる原因や、それにもなる大冷水域の維持機構に関して、すでに多くの研究がなされていて KUROSHIO (edited by Stommel and

Yoshida, 1972) や、川合 (1972), 寺本 (1974) によりまとめられているにもかかわらず、まだ十分に解明されていない。

気象研究所海洋研究部では、黒潮の蛇行流路にもなる東海道沖の大冷水域の維持機構を解明する目的で、1977年9月に気象庁の凌風丸に乗船して、本州南方海域において XBT (Expendable Bathythermograph) と DBT (Digital Memory Bathythermograph) による水温の精密な観測を行った。その結果については、すでに一部を報告した(西山ほか, 1978) が、ここでは四国沖の暖

水域の亜表層でみられるレンズ状の等温層（等比容層）に焦点をあてて解析した。

四国沖に存在する暖水域が大冷水域の存在と関わりがあるという考えは、今から30年前に Uda (1949) によって報告されているが、その後詳しく研究されていない。西田 (1977) は、東海道沖の冷水域の深層構造について論議する中で、黒潮の南側にある暖水域が、冷水域の挙動と密接に関係するであろうことを示唆している。Hasunuma and Yoshida (1978) によると、黒潮を含む北西太平洋の大きな亜熱帯循環は、3つの力学的高度偏差の嶺からなる副環流に分裂していて、これらの嶺は高気圧性の渦列よりなりたっている。中でも黒潮のすぐ南の嶺で 30°N , 134°E を中心とする渦は、その高度偏差が最も大きく、この渦の大きさも直径 500 km ほどに達し、半恒久的に存在している。しかし、この暖水渦の性質や挙動についての報告はない。

なお、黒潮に付随する暖水域としては、本州東方の黒潮と親潮の混合域で、黒潮から切離して出来る暖水塊* がある。この暖水塊は、通常約 150 km の直径をもつ楕円型で、2~20 か月の寿命をもち、1日数 km 移動する。そして1年に1ないし2個の割合で発生しているようである。この暖水塊のうち寿命が1年以上にわたる大型のものについてのくわしい報告が秦 (1974), 友定 (1975, 1978) らによってなされている。この暖水塊では、500 m 以浅の所に等温層が存在し、これが暖水塊の形成・消滅に重要な役割をはたしているといわれている。また、等温層の構造の違いにより暖水塊の一生を発生期・中期・末期に分けると、発生期と中期においては、内部に上下2層の等温層（約 16°C と約 10°C ）をもっていて、発生期には下層が厚く、中期には上層が厚い。しかし上層は発生期よりしだいに降温の傾向を示している。末期では約 10°C の1層だけになっていると述べている。

2. 1977年9月の観測

Fig. 1 は1977年9月13日から22日まで、気象庁の凌風丸で行った観測点で、図中の数字は代表的測点の番号である。この時の観測結果及び海上保安庁水路部の拓洋と神戸海洋気象台の春風丸の観測資料を総合して、9月の400 m 層の水温分布

* 切離したものを暖水塊とした。

Fig. 1. Station location chart of the Ryofu Maru. Sep. 13-22, 1977.

Fig. 2. Water temperature at 400 m depth south of Honshu in Sep. 1977.

を描いたのが Fig. 2 である。この図で冷水域は紀伊半島より南東に伸びる長楕円型をしている。中心温度は 6°C 台を示し、この冷水域をはさんで北東側の浜名湖沖には中心温度 16°C 台の、また南西側の四国沖には中心温度 18°C 台の暖水域がある。凌風丸は冷水域の短軸に沿う線上を3~4海里毎に、その他の観測線では25~40海里毎に観測を行った。st. 31~36 と st. 86~89 は冷水域の、st. 94, 95 は浜名湖沖の暖水域の中央部に当り、st. 67, 68 は四国沖の暖水域の中心の北側に当る。

Fig. 3 は浜名湖沖の暖水域の水温断面である。水温の鉛直傾度が 10 m 以上にわたって、 $0.01^{\circ}\text{C}^{-1}$ であるものを等温層と定義して、白ぬきの矩形で示した。深さ 200 m から 400 m の水温 18°C ~ 16°C の所に等温層が発達している。Fig. 4 は四国沖の暖水域の断面で、150 m から 300 m の所に 19°C 台の等温層が発達している。次にこれらの等温層が、どのような規模に発達しているか

Fig. 3. The vertical section of water temperature across the warm water region off Lake Hamana in Sep. 1977.

Fig. 4. The vertical section of water temperature across the warm water region off Shikoku in Sep. 1977.

Fig. 5. The thickness of the 20°-18°C layer south of Honshu in Sep. 1977.

Fig. 6. The thickness of the 18°-16°C layer south of Honshu in Sep. 1977.

をみるために、このときの 20°~18°C と 18°~16°C の層厚を Fig. 5 と Fig. 6 に示した。冷水域と沿岸域はいずれも 50 m 以下である。Fig. 5 には四国沖の暖水域のみがあらわれ、Fig. 6 には浜名湖沖の暖水域のみがあらわれていることは、浜名湖沖の暖水域の中の等温層の方が、2°C ほど温度が低いことを示し、2つの暖水域の水温構造に差のあることが明らかである。Fig. 5 において 29.5°N, 135°E 付近を中心位置とする四国沖暖水域の等温層は、層厚 150 m の等値線で囲まれる領域をその水平規模、中心における層厚を鉛直規模とすると、直径 180~270 km, 中心の厚さ 300 m のレンズ状をしている。この 20°~18°C の範囲にあるレンズ状の等温層の水を、以後“19°C 水”と呼ぶことにする。一方 33°N, 138°E 付近に中心位置のある浜名湖沖暖水域の等温層は、Fig. 6 から前と同様に、150 m の等値線の範囲を水平規模、中心の層厚を鉛直規模とすると、直径約 100 km, 中心の厚さ 200 m 弱のレンズ状を呈している。

3. 四国沖暖水域の動きと等温層の性質

Fig. 7 は 1975 年に黒潮の蛇行流路が始まり、東海道沖に冷水域が定着してから、1978 年までの各夏の冷水域と暖水域の中心位置を示す。図中×印は冷水域の中心を示し、⊗印は 1977 年に冷水域が切離されて出来た切離冷水塊* “はるかぜ”が史上始めて観測されたときの中心位置である。●印は四国沖暖水域の中心位置である。これらの中心位置の傍の数字は、左 2 桁が西暦を、右の 2 桁が

* 切離したものを冷水塊とした。

Fig. 7. Locations of a warm water region ●, of a cold water region ×, and of the cut-off eddy "Harukaze" ⊗. Broken lines show positions of sections of thermosteric anomaly δ_T of Fig. 8.

月を示している。冷水域は“はるかぜ”の発生した1977年を除いては、ほぼ 137°E 線の近くで、南北に約 50 km 変動しているのに対して、暖水域は 100 km 以上にわたって変動している。この図上で4つの破線 A, B, C, D に沿って、サーモステリックアノマリー δ_T の断面を描いたのが Fig. 8 である。これらの断面図で 19°C 水に相当する等温層は、蛇行流路の始まった1975年にはみられないが、1976年以降には、主サーモクラインの上の垂表層で、 $300\sim 320\text{ clt}^{-1}$ の厚い等比容層を形

成している。 19°C 水の上側では、等値線が上方に隆起していて、水平分布図では一見冷水域に見える。 19°C 水の δ_T の値をくわしくみると、1976年には $307\sim 310\text{ clt}^{-1}$ 、1977年には $308\sim 312\text{ clt}^{-1}$ 、1978年には $314\sim 317\text{ clt}^{-1}$ と徐々に増加の傾向にある。

Fig. 9 は 1977年 9月に海上保安庁水路部の拓洋が、10月に長崎海洋気象台の長風丸が、また 1978年 7月に神戸海洋気象台の春風丸が 19°C 水の中心付近で行った各層観測による塩分・水温・溶在酸素の鉛直分布を示した。水温プロファイルに付した数字は δ_T の値である。 19°C 水は等比容層であることも判る。 19°C 水は 100 m から 300 m の深さにあって、水温の深さによる傾きが、わずかに認められるが、塩分は殆んど一様である。溶在酸素の値は小さいが、この等温層の底の方で、はっきりと極大を示している。Fig. 10 は 1978年 7月に春風丸が観測した $30^\circ 08'\text{N}$, $135^\circ 15'\text{E}$ における XBT の記録である。 19°C 水は 80 m から 330 m の深さにわたって存在し、途中には微細構造が全くみられない一様な等温層であることがわかる。

大西洋のサルガッソ海には広く一様に分布している 18°C 前後の等温層があり、Worthington (1959) はこれを“ 18°C 水”と名付けた。この等温層は塩分も一様に約 36.5‰ を示し、冬季に表層で生成され、厚さが 350 m 以上になると報告されている。一方北西太平洋においても同様な水が存在することを Masuzawa (1969) が見出して

Fig. 8. Vertical sections of thermosteric anomaly in the presence of meander from 1975 to 1978.

Fig. 9. Vertical profiles of salinity, water temperature and amount of dissolved oxygen near the center of the warm water region off Shikoku.

Fig. 10. The XBT-chart of the Shumpu Maru at 30°30'N, 135°15'E in July 1978.

“亜熱帯モード水”と名付けた。この水は北西太平洋中央海域の広い範囲で、冬季に生成されて、亜熱帯循環の中央領域の亜表層で、厚い等温層を形成している。このモード水の水温・塩分・サーモステリック・アノマリーの代表値は 17°C, 34.75 ‰, 260 clt⁻¹ であるが、中心温度は西から東へ行くにしたがって低くなり、本州南方海域で 19°~18°C, 東方海域で 18°~17°C, 黒潮続流域では 17°~16°C となることを述べている。ここで観測された等温層の水は、Masuzawa (1969) のいう亜熱帯モード水と類似した性質を示しているが、

これがレンズ状に集積する力学的過程はよくわからない。

黒潮が東海道沖で蛇行せずに直進流路をとっているときにも、その南側に暖水域が存在する。Fig. 11 は 1957, 1967, 1974 各年夏の暖水域の中心位置を示す。この図中の破線 A, B, C に沿って δT の断面を示したのが Fig. 12 である。1957年は定点観測船“あつみ”その他は春風丸の各層観測による。各年とも δT の値が 270 clt⁻¹ 台の均一な水が、19°C 水と同じようなレンズ状の形で存在している。このレンズ状の等比容層の中央付近の塩分・水温・溶在酸素の鉛直分布を Fig. 13

Fig. 11. Locations of the warm water region and of a thermocline section of Fig. 12 in 1957, 1967 and 1974.

Fig. 12. Vertical sections of a thermosteric anomaly in the absence of meander in 1957, 1967 and 1974.

Fig. 13. Vertical profiles of salinity, water temperature and amount of dissolved oxygen near the center of the warm water region of Fig. 11.

に、また1974年7月に凌風丸が観測した31°09'N, 137°08'EのXBT記録をFig. 14に示した。この均一な270 clt⁻¹台の水は、19°C水の場合とほぼ同様に100mから500mの深さまでの垂表層に存在し、水温は17°C台でこの区間では殆んど一様である。塩分と溶在酸素には小さな極大値がみられる。それらの値は年によって多少異なる。Fig. 13の水温プロファイルに δ_T の値を数字で

示したが、水温が高い年は塩分も高く、結果的に各年とも270 clt⁻¹台の δ_T の値を保持している。この水は“19°C水”に対して“17°C水”と呼ぶことにする。

1959年から1963年にも黒潮は蛇行流路をとっているが、Fig. 15はこの期間の各夏の冷・暖水域の中心位置を、Fig. 16はFig. 15に示した破線に沿っての δ_T の断面図である。この期間の冷水

Fig. 14. The XBT-chart of the Ryofu Maru at 31°09'N, 137°08'E in July 1974.

Fig. 15. Location of a warm water region and a cold water region $\times$ in the presence of meander from 1959 to 1963.

Fig. 16. Vertical thermocline sections in the presence of meander from 1959 to 1963.

域の中心位置の変動については Nitani (1975) の報告があるが、暖水域の中心は四国沖の 31°N, 134°E 付近にあって殆んど変動がない。これは先に述べた1975年発生の場合と大きく異なる現象である。Fig. 16 からわかるように、等温層は1975年発生の場合と同じように、蛇行発生した1959年にはみられなくて、1960年以降にみられる。しかしこの等温層の δ_T の値に関してみると、1975年発生の場合と異って、1960年には 308 clt^{-1} , 1961年には 300 clt^{-1} , 1962年には 290 clt^{-1} , 蛇行流路が消滅した1963年には 270 clt^{-1} と次第に値を小さくしている。1962年には等温層の水温は18°C

台に下降しており、1963年には 17°C 水となって黒潮も直進流路へと変化している。このような等温層の性質の変化は、本州東方海域の暖水塊の消滅過程にみられる等温層の役割と同じように考えられ、黒潮蛇行の消滅の物理過程に関連するものと思われる。

観測資料が少ないが、1953年から1956年にかけても蛇行流路が存在した。1955年11月の春風丸の観測によると 31°00'N, 135°40'E に、厚さ約 250 m, δ_T が 310 clt^{-1} の 19°C 水が存在している。この水は翌年5月の春風丸の観測では 295 clt^{-1} となっている。また、1969年にも一時蛇行流路が

あらわれた。8月の春風丸の観測によると 31°N , 135°E 付近で厚さ約 100 m, δ_T が 305 clt^{-1} の 19°C 水がみられる。

4. 冷水域と暖水域との関係

1959年から1963年まで、及び1975年以降はともに黒潮は蛇行流路をとっていて、東海道沖に大冷水域が定着している。そしてこのときには四国沖に暖水域が存在する。

この2つの期間の暖水域を比較してみると、共通点として、1959年と1975年の蛇行発生年には、顕著な等温層はあらわれていないが、翌年の1960年と1976年からは、レンズ状の 19°C 水が形成されている。

また両者の相違点として、(1) 等温層のサーモステリックアノマリーの経年変化をみると、1959年発生の場合は1960年を最大値として以後徐々に、3年にわたって 17°C 水になるまで減少しているのに対し、1975年発生の場合は、発生後3年たってもまだ大きい値を維持している。(2) 暖水域の位置の変動をみると、前者の場合は全期間ほぼ 31°N , 134°E に位置しているが、後者の場合は Fig. 7 に示すように 100 km 以上にわたって中心位置が変動している。

一方冷水域の動きは、1959年発生の場合には Nitani (1975) が報告しているように、1960年に最南、最西に偏って、以後徐々にほぼ東へ動いて、1963年には、冷水域はほぼ消滅した。1975年発生の場合は1976年までは安定しているが、1977年になると切離冷水塊が発生したり、Fig. 2 に示したように扁平型になったりして、著しい流路の変動がみられる。

黒潮が直進流路をとるときは、紀伊半島沖から東海道沖の黒潮の南側に暖水域が存在する。以上のことから、東海道沖大冷水域の存在と黒潮の南

側にみられる暖水域のレンズ状の等温層が示すサーモステリックアノマリーの値との関係を1955年以降について、Fig. 17 に示した。図中 ▲ 印は、1959年と1975年に蛇行流路が発生して出来た暖水域の亜表層を占める水の中央の値である。なお、前にも述べた通り、この年にはレンズ状の等温層はあらわれていない。この図から明らかなように、黒潮が直進流路をとるときには、等温層のサーモステリックアノマリーは $260 \sim 280 \text{ clt}^{-1}$ 、蛇行流路の場合は $300 \sim 320 \text{ clt}^{-1}$ で、蛇行が弱まるにしたがって減少する傾向が顕著である。

5. 考察と結論

本州南方の黒潮の南側には常に暖水域が存在していて、黒潮が東海道沖で蛇行流路をとるときは四国沖に、直進流路のときには紀伊半島から東海道の沖に位置している。

これらの暖水域は主サーモクラインの上の亜表層に、中心の厚さ 200~400 m, 直径 100 km 以上のレンズ状の等温層を形成している。これらの等温層は蛇行流路のときは水温 19°C 、サーモステリックアノマリー $300 \sim 320 \text{ clt}^{-1}$ をもち、直進流路のときはそれぞれ 17°C , $260 \sim 280 \text{ clt}^{-1}$ である。

1977年9月に凌風丸で観測した浜名湖沖暖水域の等温層は後者とほぼ同じである。この浜名湖沖暖水域は、切離冷水塊の発生や蛇行流路の変動に関係して消長していると思われるが、ここでは観測資料が少ないために解析しなかった。

四国沖暖水域の 19°C 水はサルガッソ海の 18°C 水 (Worthington 1959) や、北西太平洋の亜熱帯モード水 (Masuzawa 1969) と同じように、冬季に表層で生成された混合水よりなっていると思われるが、蛇行流路発生時には冬季の水温が高いため (小長 1978) に、これら等温層の水温が高

Fig. 17. The variation of the thermosteric anomaly of the thermocline in a warm water region south of the Kuroshio.

いのか、暖水域の循環の強さに関係して力学的バランスによるものか、はっきりしない。浜名湖沖暖水域の性状を考え合せると後者のようにみえるが、更に検討してみたい。

1959年と1975年発生した蛇行流路の場合には、発生した年には両者とも暖水域の中のレンズ状の等温層は消えていて、翌年になってあらわれている。そして、前者の場合には、暖水域は四国沖で比較的安定した位置を占めていて、等温層のサーモステリックアノマリーは、1960年に極大を示して以後漸減していった。後者の場合には、中心位置がかなり大きく変動して、サーモステリックアノマリーは1978年までは漸増する傾向にあって、両者はかなり異ったふるまいをしている。

1955・1956年には暖水域にみられる等温層のサーモステリックアノマリーの減少は、1962・1963年とは傾向が必ずしも一致していなくて、1953年発生と1959年発生した蛇行流路の消滅過程が異っているようである。また、1969年の蛇行流路では、はっきりした19°C水がみられ、1959・1975年とは異っていて、蛇行流路の発生過程にも違いがあることが考えられる。これらのことについても、今後、更に詳細は解析を行いたい。

6. お わ り に

この研究を進めるにあたり、文部省科学研究費及び科学技術庁黒潮開発利用調査研究促進費により一部観測を行った。また、いろいろと御教示・御便宜をはかって下さった東京大学の故吉田耕造教授、東京大学海洋研究所の寺本俊彦教授を始めとする黒潮懇談会グループのみなさま、観測資料をいただいた海上保安庁水路部、神戸海洋気象台海洋課、気象庁海洋課、観測にあたっては凌風丸の乗組員のみなさまに厚く御礼申し上げるとともに、

この報告の作成にあたって終始御鞭達をいただいた気象研究所南日俊夫海洋研究部長に心から感謝の意を表する。またレビューアから有益な御助言をいただいたことに対しても心から感謝する。

References

- Masuzawa, J., 1969: Subtropical mode water. *Deep-sea Res.*, 16, 463-472.
 Nitani, H., 1975: Variation of the Kuroshio south of Japan. *Jour. Oceanogr. Soc. Japan*, 31, 154-173.
 Stommel, H. and K. Yoshida, 1972: Kuroshio. Univ. Tokyo Press, Tokyo, 517p.
 Uda, M., 1949: On the correlated fluctuation of the Kuroshio current and the cold water mass. *Oceanogr. Mag.*, 1, 1-12.
 Worthington, L. V., 1959: The 18° water in the Sargasso Sea. *Deep-sea Res.*, 56, 1239-1249.

参 考 文 献

- 秦 克己, 1974: 黒潮から分離した暖水塊の変動について, 研究時報, 26, 296-321.
 川合英夫, 1972: 黒潮流路の蛇行と長期変動, 海洋物理 II, 東海大学出版会, 東京, pp. 267-301.
 小長俊二, 1978: 黒潮の変動, 号外海洋科学, 1(2), 67-80.
 西田英男, 1977: 大冷水塊と黒潮の深層構造, 海洋科学, 9(3), 37-43.
 西山勝暢, 小長俊二, 石崎 廣, 1978: 黒潮大冷水域の水温構造の観測. 号外海洋科学, 1(2), 60-66.
 寺本俊彦, 1974: 海流の蛇行. 海洋物理 I, 東京大学出版会, 東京, pp. 161-206.
 友定 彰, 1975: 本州東方海域で黒潮から切離する暖水塊について. 東海区水産研究所研究報告, 81, 13-85.
 友定 彰, 1978: 本州東方海域で黒潮から切離する暖水塊の海洋構造. 号外海洋科学, 1(2), 141-154.

黒潮大蛇行と四国沖の暖水域について

(海洋研究部)

西山勝暢・小長俊二・石崎 廣

本州南方の黒潮の南側には常に暖水域が存在していて、黒潮が東海道沖で蛇行流路をとるときは四国沖に、直進流路をとるときは紀伊半島から東海道の沖に位置している。

これらの暖水域は主サーモクラインの上の亜表層に、中心の厚さ 200~400 m, 直径 100 km 以上のレンズ状の等温層を形成している。その等温層は蛇行流路のときは 19°C, サーモステリックアノマリーは 300~320 cl/t⁻¹ で、直進流路のときはそれぞれ 17°C, 260~280 cl/t⁻¹ である。

しかし1959年と1975年に発生した蛇行流路の場合を注意深く解析してみると、蛇行の発生した年の暖水域にはレンズ状の等温層構造はみられなく、翌年以後にこれが形成されている。また、この等温層のサーモステリックアノマリーの時間変化をみると、前者では年の経過とともに減少したが、後者では漸増している、一方暖水域の地理的な位置の動きをみると、前者の場合は時間的にはほぼ同じ所に存在しているが、後者の場合には時間的に大きく変動している。