

紀伊水道に進入する表層暖水と底層冷水

竹内淳一*・中地良樹*・小久保友義**

Intrusion of Surface Warm Water and Bottom Cold Water into the Kii Channel

Junichi TAKEUCHI*, Yoshiki NAKAJI* and Tomoyoshi KOKUBO**

Abstract

Characteristics of water masses in the Kii Channel were studied in relation to the meander of Kuroshio. When southward distance to the Kuroshio axis from Shionomisaki is less than 20 n.-miles, warm Kuroshio-surface-water tends to intrude into the upper layer of the Kii Channel. During passage of meso-scale meander of Kuroshio off Shikoku or Kii Channel, this intrusion tends to continue for 1 to 3 months. When the Kuroshio-distance is less than 20 n.-miles and the path of Kuroshio is stable, warm streamer frequently intrudes into the Kii Channel along the west coast of the Kii Peninsula with a period of several to ten and several days. On the other hand, when the Kuroshio-distance is larger than 30 n.-miles, a cooler and saltier water-mass intrudes into the lower layer of the Kii Channel from the subsurface on the shelf. This intruding water-mass contains a lot of nutrients and the concentration of nutrient has high correlation with the temperature.

1. はじめに

紀伊水道は、その北部で友ヶ島と鳴門の二つの海峡で瀬戸内海へ連結し、南部では太平洋に開いた半開放型の海である。この水域では、(1)瀬戸内海から流出する内海水および紀伊水道へ直接流入する河川水などで構成される内海系水と、(2)黒潮に由来する外海系水、の二つの性質の異なる海水が接して、複雑で不連続な海洋構造が発達する。

とくに、吉岡⁽¹⁾が報告した紀伊水道の冬季フロントは、水平的な水温・塩分の不連続帯としてよく知られている。しかし、紀伊水道の海況を理解する上では、さらにもう一つの重要な視点がある。それは、鉛直的に流れが変化する構造が夏季を中心に発達することである。この鉛直構造は、表層で高温・低塩

分の内海系水が流出し、底層では低温・高塩分の外海由来の亜表層水が流入するパターンである。その流動構造について、藤原ほか⁽²⁾はエスチュアリー循環と理解し、とくに底層で外海性栄養塩の流入があることに注目した。この循環による栄養塩流入は、生物生産の盛んな季節に起こることから、紀伊水道の基礎生産や漁業資源にも密接に関連すると推定され、漁業にとっても重要な問題を内包している。

ここでは、外海の変動が紀伊水道へ進入する現象として、次の二つをとりあげた。その一つは黒潮からの表層暖水が紀伊水道内部まで進入するものであり、第二は外海の亜表層から紀伊水道の底層に低温水(冷水)が進入する現象である。これらを表層暖水と底層冷水と呼ぶ。ふつう、前者は冬季～春季の水温上昇期に、後者は夏季を中心とする成層期に、はっきりと観測されることが多い。いずれも水平および鉛直的な不連続構造と深く関連しており、紀伊水道が外海すなわち黒潮の影響を受けていることを示す特徴ともいえる。

1997年7月9日受理

Accepted 9 July 1997

* 和歌山県水産試験場

* Wakayama Prefectural Fisheries Experimental Station

** 和歌山県水産課

** Fishery Division, Wakayama Prefectural Government

この報告では、紀伊水道においてこれら二つの現象が黒潮の変動と密接に連動して起きていることを、現場で得られた観測例から示す。とくに第二の底層冷水では定線調査での栄養塩類の測定結果から、夏季における栄養塩類の供給機構の一つとして注目した。

2. 黒潮離岸距離に伴う紀伊半島沿岸の水温特性

まずはじめに、長年の定線観測データを使って黒潮までの離岸距離を指標とする視点から、紀伊半島沿岸の水温を統計処理した。これによって黒潮と沿岸水温との関係を連続して表現できる。黒潮の変動とともに変化する紀伊水道の基本的な水温特性の理解に役立つ。

解析には、紀伊半島沿岸の代表的な三つの観測点(測点位置は Fig. 1, WS08: 紀伊水道内, WE25: 潮岬沿岸, WE35: 熊野灘沿岸)の0~200m深水温(WS08は0~65m深水温)を使用した。その解析期間は、1963年~1995年の33年間である。観測回数は、WS08で1,104回、WE25で653回、WE35で375回である。観測回数の違いは沖合・沿岸・浅海などの定線調査で重複した観測が行われることやWS08のように同一測点で実施された徳島・兵庫県などのデータも含んでいるために生じた。

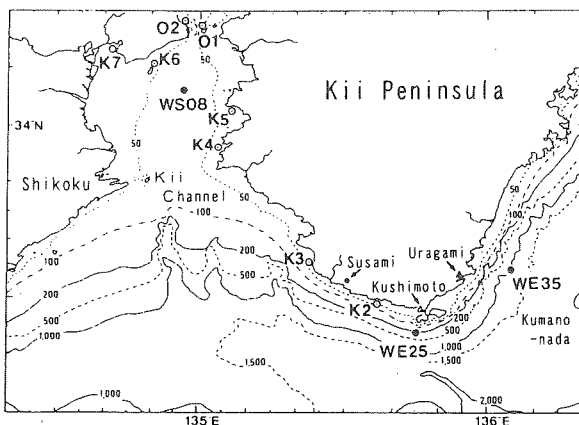


Fig.1 Locations of routine observation stations (●), time series temperature observation stations(○) and sea level stations(△).

定線調査は毎月定期的実施されるが、同一月の同じ日に行われるわけではない。しかも、欠測となることもあり、離散データとして取り扱わなければならない。ここでは、竹内⁽³⁾の変則的な移動平均法で求めた平均値を使って季節変動を除去し、水温偏差とした。

解析結果の代表例を、Fig. 2の a, b, c に示す(竹内⁽⁴⁾)。黒潮の離岸距離別にデータ数が不均一にならないよう距離範囲を規定して、離岸距離と水温偏差の平均値(図中の丸印)を算出した。平均値の上下、左右の細線で示したヒゲは、それぞれの標

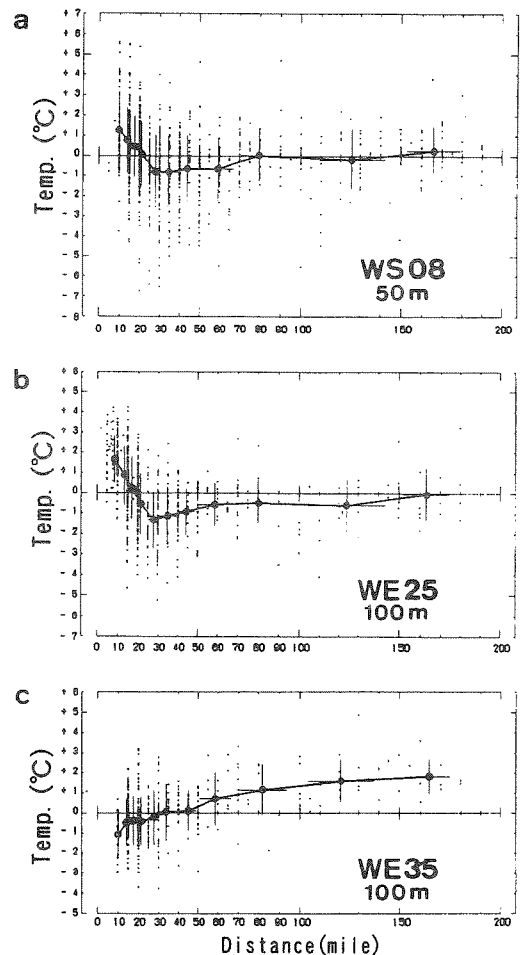


Fig. 2 (a): Relation between temperature anomaly observed at 50m depth of the station WS08 and southward distance to the axis of Kuroshio from Shionomisaki. (b): Same as a, but for 100m depth of the station WE25. (c): Same as a, but for 100m depth of the station WE35.

準偏差である。実測値はかなりバラついているが、平均値ではつぎのような興味深い特徴がある。

紀伊水道と潮岬沿岸では、黒潮の離岸距離が30マイル付近の時に最も低温となり、それよりも黒潮が接岸すると高温になる。これに対し、熊野灘ではこのような黒潮離岸距離による遷移領域はみられず、黒潮が接岸するほど低温となり、離岸時は高温となる。

つまり、紀伊半島先端の潮岬を境として、その東西すなわち紀伊水道側と熊野灘側では水温特性が明らかに違う。なかでも、ここで対象とする紀伊水道側では黒潮が30マイル付近で水温特性が大きく変化する遷移領域のあることが特徴的である。

このような水温特性から、紀伊水道では次の二つの特徴を読みとることができる。その一つは、黒潮が約20マイルよりも接岸して流れるほど水温が高くなる、すなわち黒潮からの表層暖水が沿岸域へ流入することが多くなる。この特性は、本論第3章の表層暖水の進入として紹介する現象に関連し、黒潮の短期変動による暖水波及として観測される（竹内⁽⁵⁾、⁽⁶⁾、竹内・中地⁽⁷⁾など）。

二つめは、黒潮が30マイル付近にある時に沿岸域の水温が最も低くなる現象についてである。水深別にみると75~150m層で顕著となっていることから、黒潮北側の中層冷水（藤本・百田⁽⁸⁾、阪本⁽⁹⁾、藤本ほか⁽¹⁰⁾、阪本⁽¹¹⁾など）に関連すると推定される。本論第4章で紹介する紀伊水道の底層冷水は、外海の亜表層水が底層に進入する現象と理解され、黒潮北側の中層冷水などとの関わりが注目される。

3. 黒潮系表層暖水の流入

紀伊水道に流入する黒潮系の表層暖水は、その時間スケールと成因などから大きく二つのタイプに分けられる。その一つは、黒潮系暖水が比較的長期間にわたって継続的に流入するものである。これは九州から紀伊半島までの南西海域を西から順次東進する黒潮小蛇行の通過に伴って起こると推定されている。二つめは黒潮北縁を移動する擾乱に伴って短期間で周期的に黒潮系暖水が沿岸域に進入する現象である。ここでは、これらの二つの現象について竹

内⁽⁵⁾、⁽⁶⁾、竹内・中地⁽⁷⁾などの報告から、その概要を紹介する。

3-1 黒潮小蛇行の通過に伴う継続的な表層暖水の流入

日本の南西沿岸域における最も大きなイベントの一つに九州南東沖に発生し東方へ波及する黒潮小蛇行の影響がある。これが起こると黒潮の離接岸状況に対応して南西海域の黒潮内側域の海況は一変すると言われている（藤本ほか⁽¹⁰⁾）。

竹内⁽⁶⁾は、黒潮小蛇行が四国沖から紀伊水道沖にかかった時に、紀伊水道に黒潮系暖水の流入がづくことが多く、黒潮蛇行の前面（蛇行北上部）から黒潮系暖水が紀伊水道へ直接流入するようになることを指摘した。とくに、東進速度が遅く熊野灘から遠州灘で大蛇行に発達するような小蛇行の通過前には、暖水の流入が約1~3カ月の比較的長期間にわたって継続することもある。このような年として近年では、1985年、1986年、1989年、1991年、1992年、1994年などがある。和歌山県水産試験場でCTD観測が始まった1987年以降のWS08における8月の水温鉛直分布をFig. 3に示した。この図からわかるように、紀伊水道内では夏季であっても底層近くまで暖水が分布することもあり、季節水温躍層がほとんど消失してしまう年もある（例、1989年、1994年など）。このような時には、紀伊水道全域が比較的厚

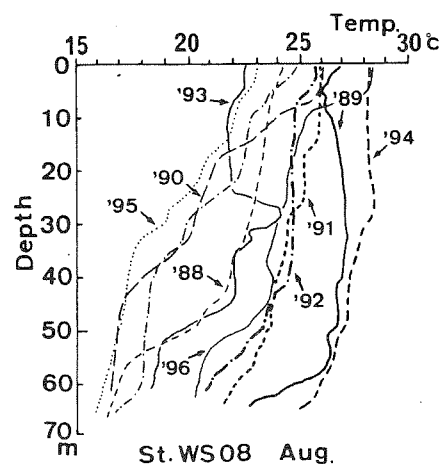


Fig. 3 Vertical profiles of temperature observed at the station WS08 in August.

みのある均一な黒潮系水で広く占拠されることになり、水温連続記録では変動の少ない高水温が持続し、短期日の周期的な水温上昇はあまり観測されない(竹内⁽⁵⁾、竹内・中地⁽⁷⁾)。

また、黒潮系の暖水が比較的長い期間継続して流入することで、紀伊半島周辺の沿岸域でも、川尻⁽¹²⁾が伊豆半島周辺で報告したような大規模な「磯焼け」現象の発生に結びつく事例も認められ、今後の詳しい調査が必要である。

3-2 黒潮北縁の擾乱に伴う表層暖水舌の進入

二つめの暖水進入は、黒潮北縁に出現する擾乱に関連する現象である。これは黒潮が潮岬南約20マイル以内で安定した接岸のつづく時、Fig. 4に示すように紀伊半島西岸(測点位置はFig.1)に沿って水温ジャンプが紀伊水道内部まで順次伝播する現象で、おもに冬季～春季あるいは夏季までの水温上昇期にはっきりと観測されることが多く、秋季から冬季までの水温下降期には不明瞭になるという季節的な特徴がある。黒潮系暖水の沿岸域への進入に伴って、数日～十数日程度の短期日で周期的な水温ジャンプが繰り返して起こる。水温ジャンプ前後の衛星画像などによると、黒潮フロントから派生する擾乱が発達

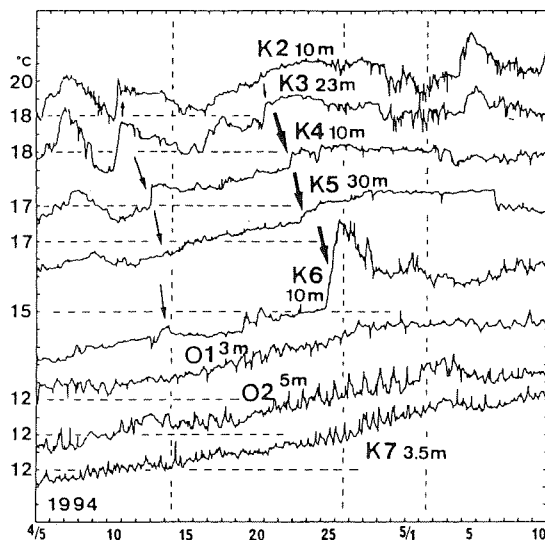


Fig.4 (a): Time series of temperature at the eight stations K2, K3, K4, K5, K6, O1, O2, and K7 from 5 April to 10 May 1994. (from Takeuchi and Nakaji⁽⁷⁾). Arrows indicate intrusions of surface warm water into the Kii Channel.

し、黒潮系水が暖水舌あるいは暖水ストリーマとして沿岸域へ周期的に進入することで起こることが示唆されている(竹内⁽⁵⁾、⁽⁶⁾、竹内・中地⁽⁷⁾など)。

また、黒潮が潮岬に接岸している時は、紀伊半島西岸のすさみ付近(Fig.1)を中心として「振り分け潮」と呼ばれる東西に分かれる特異な流れが発生し⁽¹³⁾、そのうちの一方が半島西岸に沿って北上する。この北上流は古くから紀南分枝流(黒潮分枝流)と呼称されてきた流れで、紀伊水道内部まで達するような暖水進入にも関連すると推定される。この消長が、紀伊水道付近の漁場形成など紀伊水道の漁業にとって最も重要な海況条件の一つと考えられている(阪本⁽¹¹⁾、竹内・中地⁽⁷⁾)。

4. 外海から進入する底層冷水

紀伊水道の底層冷水について、はじめて注目したのは浜田ほか⁽¹⁴⁾、浜田⁽¹⁵⁾である。彼らは、この著しい低水温のことを冷水塊あるいは異常冷水と記述している。竹内⁽¹⁶⁾は1968年～1985年の18年間のデータを整理した結果、1976年以降この低水温の出現回数が多くなっていて、必ずしも異常とはいえないことを示した。さらに、低水温時には高塩分であることから、この現象は紀伊水道の表層から流出した海水を補うように、外海の中層水が上昇しながら水道内の底層へ進入したものと推定した。また、その出現は黒潮の大蛇行と準大蛇行の期間に集中していることを指摘した。

ここでは、まずはじめに紀伊水道を代表する観測点での水温と塩分の実測値と平均的な季節変化を示し、夏季から秋季に出現する底層冷水の特徴を概観する。

つぎに、1967年～1996年の30年間の長期にわたる月1回の定線観測による時系列データから、竹内⁽¹⁶⁾が報告した底層冷水の特徴をあらためて確認する。さらに底層冷水の短期的な変動について、水温連続記録からその特徴を記述し、あわせて紀伊水道の南北断面観測で底層冷水をとらえた事例について紹介する。また、定線調査結果などから、底層冷水の栄養塩濃度がきわめて高いことを示す。

4-1 紀伊水道における水温、塩分の季節変化

紀伊水道中央部の St.WS08 (測点位置は Fig. 1) における水深50mの水温と塩分の季節変化を Fig. 5 に示した。この測点は、和歌山県の浅海・沖合定線 (WS08, AI-N15)、徳島県の浅海定線 (TO12)、兵庫県の瀬戸内海重要水属環境調査 (HG・K4) などによる4測点が集中した位置にあり、それぞれ原則として毎月1回の観測が行われることから、きわめて観測頻度が高いことで特異な観測点である。これら4測点を同一測点として扱い St.WS08とした。データの期間は、1967年～1996年の30年間である。観測回数は観測水深によってわずかに違うこともあるが、ここで例として示した50mでは1,135回である。図中、実測値を点であらわし、平均値は竹内⁽³⁾の変則的な移動平均法を一部改変して求め、曲線で示した。7月～9月の夏季に水温の変動がきわめて大きい特徴があり、塩分では年間を通じてバラつきが大きく、最も高い塩分は3月～9月ころに観測される傾向がある。

水温と塩分について観測水深ごとの平均値を季節変化曲線として重ねて示したものが Fig. 6 である。

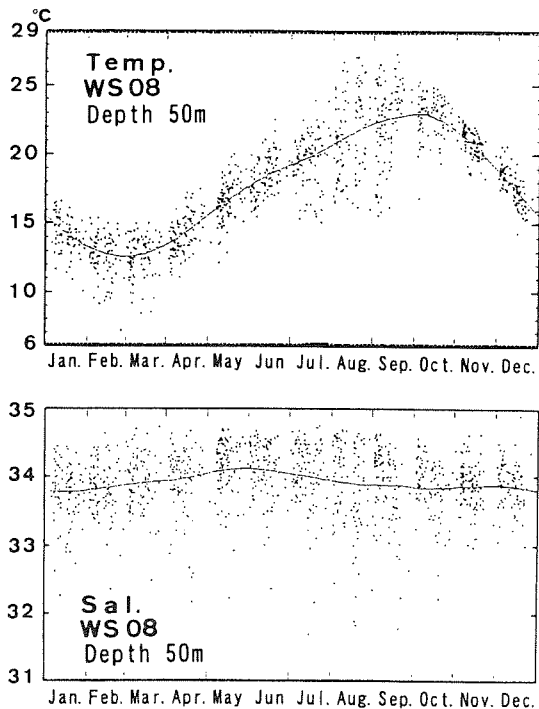


Fig.5 Seasonal variations in temperature(upper) and salinity(lower) at 50m depth of the station WS08.

水温の年間最高値は、0mで8月、65mでは10月にみられ、水深の深いほど遅れる。水温躍層は6月～9月に形成され、10月から翌年の4月ころまでの冬季を中心に水温逆転がみられる。

塩分で水深による違いがはっきりとあらわれるのは、5月～10月である。表層の水深0m～30mでは最低値が7月～9月に観測され、深いほど遅れる。これに対し、底層の水深50mと65mでは、5月から9月にゆるやかなピークを示し、11月から翌年2月にかけてゆるやかな谷となる。塩分の季節変化は、水深30m付近を境に上層と下層ではほぼ逆転していることが特徴的である。

このように、夏季(6月～9月)を中心に水温、塩分の鉛直的な違いが発達すること、とくに Fig. 5 からわかるように7月～9月には観測ごとに水温が大きくバラつく特徴がある。つまり、7月～9月に極めて低い水温が観測されることも多く、季節が2～3カ月も逆戻りした5月、6月と同じ程度の水温となることも珍しくない。ここで紹介する底層冷水とは、このような7月～9月の夏季から秋季に紀伊水道の中・底層で観測される特異的な低温現象のことである。

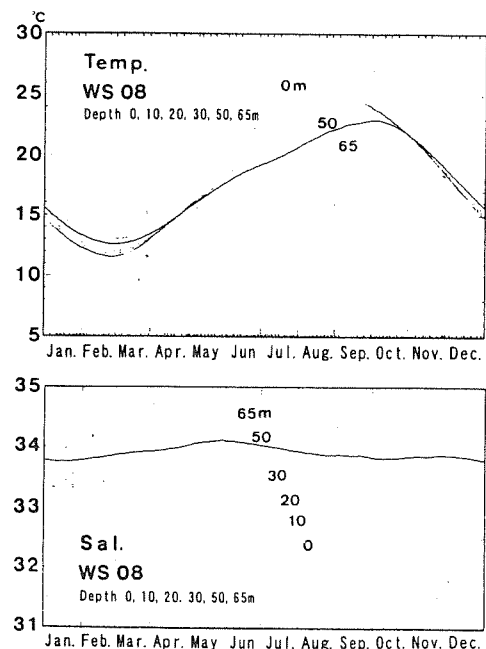


Fig.6 Seasonal variations in temperature(upper) and salinity(lower) at various depths of the station WS08.

4-2 夏季から秋季に出現する底層冷水

1) 定線観測資料

まずはじめに、竹内⁽¹⁶⁾が指摘した紀伊水道で夏季から秋季に出現する底層冷水の特徴について、できるだけ長期間のデータを使って再確認する。

Fig. 7は、上から潮岬南沖の黒潮離岸距離 (a, マイル), 串本・浦神の潮位差 (b, cm), 紀伊水道 (WS08) における7月~9月の水深50mにおける平均水温 (cの□印) および最低水温 (cの●印), そして平均塩分 (dの□印) および最高塩分 (dの●印) である。和歌山・徳島・兵庫県の3機関が7月~9月の3カ月間で毎月定期的を実施する観測回数は、年による違いもあるが6~12回になる。

ここでは、(1)平均水温が21℃以下、(2)最低水温が18℃以下、(3)最高塩分34.50以上、の三つの条件のうち二つ以上の条件を満足する年を底層冷水分とし、図中に縦の破線で示した。底層冷水分の出現頻度は、1967年から1996年の30年間で13回、43%に達する。底層冷水分の特徴は、次のようにまとめられる。

(1) 50mの最低水温は15~17℃台であり、最高塩分は34.5以上のことが多く高塩分の傾向が認められる。

(2) 黒潮が安定して接岸する年には出現しない。

(3) 黒潮が30マイルよりも離岸する年に限って集中的に出現し、1976年以降に多い。

潮岬南沖における黒潮の離岸は、大蛇行期あるいは小蛇行の通過をあらわしているから、紀伊水道に出現する底層冷水は黒潮の流路など外洋の中・長期的な海況条件がベースとなって起きていることがわかる。

2) 連続記録

竹内⁽¹⁶⁾の報告の中に、観測点 WS08で1978年8月5日と11日に実施した観測で、わずか数日の間に底層水温が約5℃も低下する事例のあることから、短期間で急激な水温低下がまれに起こるらしいことが指摘されている。そこで、このような短期変動について連続観測から詳しく調べた。

Fig. 8は、紀伊水道東部に位置する湯浅湾 (観測位置は Fig. 1の K 5, 海深34m) の水深20mで得られた1985年から1990年の夏季を中心とする水温記録

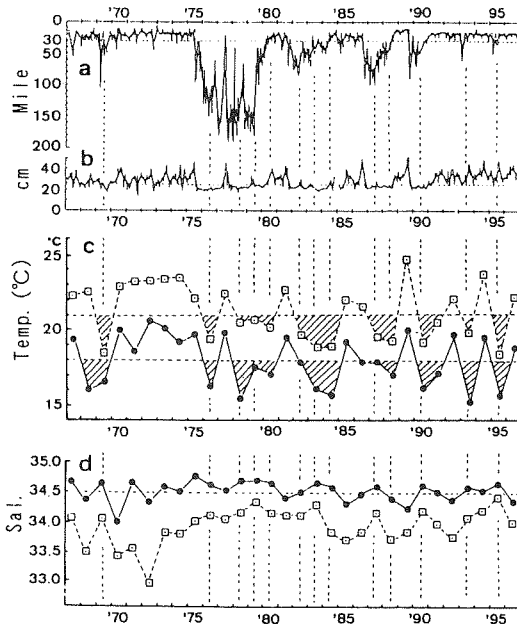


Fig. 7 (a):Temporal variation of the position of the Kuroshio axis measured southward from Cape Shionomisaki(in n-mile). (b):The sea level difference between Kushimoto and Uragami(in cm). (c):Mean temperature(□) and minimum temperature(●) during July to September at 50m depth of the station WS08. (d):Same as c. but for mean salinity(□) and maximum salinity(●).

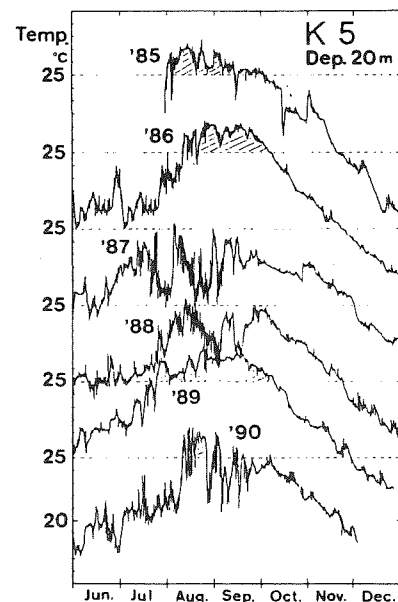


Fig. 8 Time series of temperature at 20m depth of the station K5 for various years.

である。図中、水温 25°C 以上を斜線で示した。低水温（冷水）年は1987年、1988年、1990年である。

水温の連続記録からみると、冷水年と言っても7月～9月の期間中ずっと同じ程度の低水温は続かず、何回かの急激な水温低下が間欠的に発生し、短期日で激しい変動が起きていることがわかる。また、冷水年には、暖水年（1985年、1986年、1989年）のように年間最高水温の明らかなピークはあらわれず、変動の激しい鋸歯状の水温記録が特徴的である。

1990年のように7月から8月初めにかけて、低温から高温へきわめて急激に水温レベルが変移する場合もある。この1990年の場合、潮岬沖で黒潮が接岸しはじめたのは12月後半あるいは1991年1月からであり、夏季には離岸状態がつづいていた。しかし、水路部海洋速報の平成2年第14号～18号によると、すでに夏季には四国沖で黒潮が接岸しはじめており、四国東岸から黒潮系暖水が紀伊水道内部へ流入していたと推定され、この暖水波及によって8月初めに一方的な水温上昇が起きた、と推定される。

水温と同時に塩分の連続記録が得られている例を、Fig. 9に示す。連続記録はFig. 8に示した水温記録と同じ地点（Fig. 1のK5）の30m層で観測した。観測機器はSea-Bird社製のSBE16である。Fig. 9のa, bは、それぞれ1994年と1995年の7月～8月の記録である。それぞれの図で、上から串本・浦神の日平均潮位差（Ku-Ug, cm）そして1時間ごとの水温・塩分の連続記録である。

1994年は水温 25°C 以上の高水温の期間が長い。いっぽう1995年は 25°C 以上の水温はほとんど観測されていない。

Fig. 7で指摘したように、1994年は暖水年、1995年が冷水年である。

1994年には、8月3日から6日にかけて約 5°C の水温低下と同時に 0.5 程度の塩分上昇が発生し、その低温・高塩分が約10日間ほど続いた（Fig. 8.9aの矢印）。串本・浦神の潮位差にも、これに符合した変動が認められる。水路部海洋速報（平成6年第9号～第21号）によれば、1994年4月から6月にかけて小蛇行の東進がみられた後、7月以降は黒潮の接岸が安定してつづいた。したがって、このような短

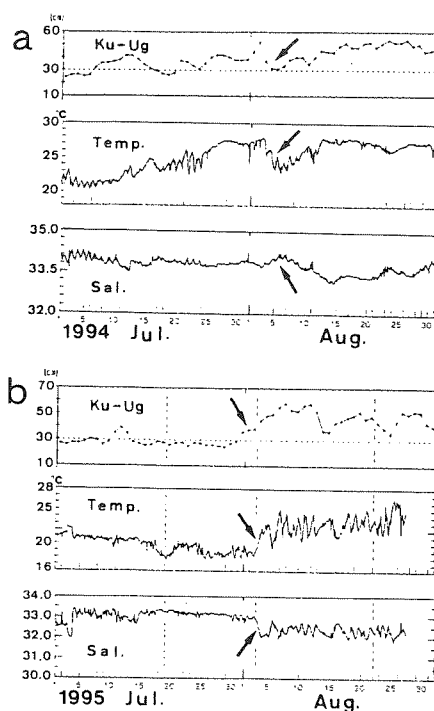


Fig. 9 (a): The sea level difference between Kushimoto and Uragami (Ku-Ug, in cm), temperature and salinity at 30m depth at the station K5 in 1994. (b): Same as a, but for 1995. Arrows indicate intrusions of bottom cold water into the Kii Channel.

期日の低水温・高塩分現象は、次に示す1995年のような黒潮小蛇行の通過に伴う変動ではなく、それよりも短い変動をとらえたものと推定される。

つぎの1995年では、8月2日ころを境に海況が急変していること（Fig. 9bの矢印）がわかる。水温上昇は2日間で約 5°C に達し、塩分は約 1.0 低下している。この急変のあとで水温・塩分の変動が激しくなり、それまでの記録とは全く違う変動となった。あきらかに、海況が一方的に変移したとみられる。このころ、黒潮の離接岸の指標となる串本・浦神の潮位差にも約 30cm の急激な増加がみられ、黒潮が接岸しはじめたことがわかる。

水路部の海洋速報（平成7年第9号～第16号）などからも7月下旬に黒潮小蛇行が潮岬を通過したあと、黒潮がそれまでの 35 マイルから 15 マイルへ接岸したことで水温・塩分の一方的なシフトが起こったと理解できよう。基本的には、Fig. 8の1990年8月

初めに起きたのと同じような現象と推定される。

このように、紀伊水道の底層では短期日で激しい変動があること、水温の低下(上昇)と同時に塩分増加(低下)が起きていることがわかる。しかも、それは黒潮の離接岸の指標となる串本・浦神の潮位差の変化とも符合しており、黒潮の短期の変動を反映したものと、理解できる。つまり、底層冷水は黒潮の変動と関連して外洋の亜表層水(低水温・高塩分)が底層付近から紀伊水道へ進入した現象であると考えられる。

3) 1995年夏季の海洋観測(紀伊水道南北断面)

1995年7月から8月にかけて、小蛇行の通過前後に、紀伊水道の南北(Fig. 10のA線あるいはB線)断面の観測を行った。観測は、Fig. 9のbの図中に縦の破線で示した3回(7月18~19日、8月2日、8月21~22日)実施した。小蛇行の通過で紀伊水道の海洋構造が変化した事例を、3回の断面図としてFig. 11のa, b, cに示す。

1995年夏季の海洋観測が行われた前後に、潮岬を通過した小蛇行の移動経過は、水路部海洋速報などによると次のとおりである。1995年5月前半、都井岬東沖に発生した小蛇行は規模を縮小しながら東進して6月中旬には土佐湾沖まで達し、7月末から8月初めに潮岬を通過した。Fig. 9のbに示したように、串本・浦神の潮位差は8月初めに急激に大きくなり、その後は比較的安定した高い潮位差がつづいている。つまり、小蛇行の通過後、潮岬沖で黒潮が安定した接岸へ転じたことがわかる。

7月18~19日(Fig. 11のa)は、潮岬沖に小蛇行があり黒潮は潮岬南沖35マイル付近を東北東へ約2.3ktで流れていた(和歌山県沖合黒潮調査速報, 1995.No.6)。

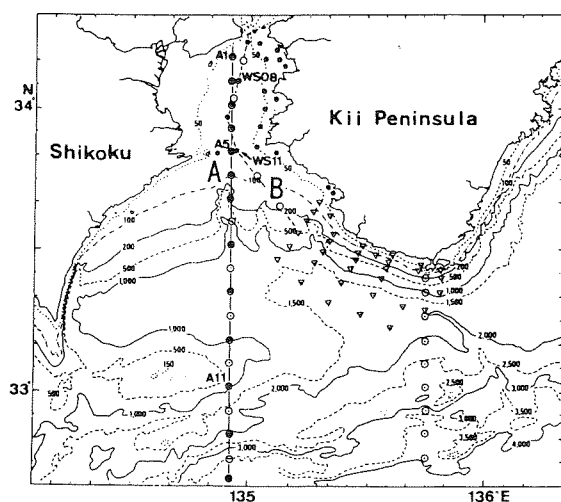


Fig.10 Station map of the observation conducted by the R/V Wakayama in July to August 1995. A and B indicate the longitudinal transect lines.

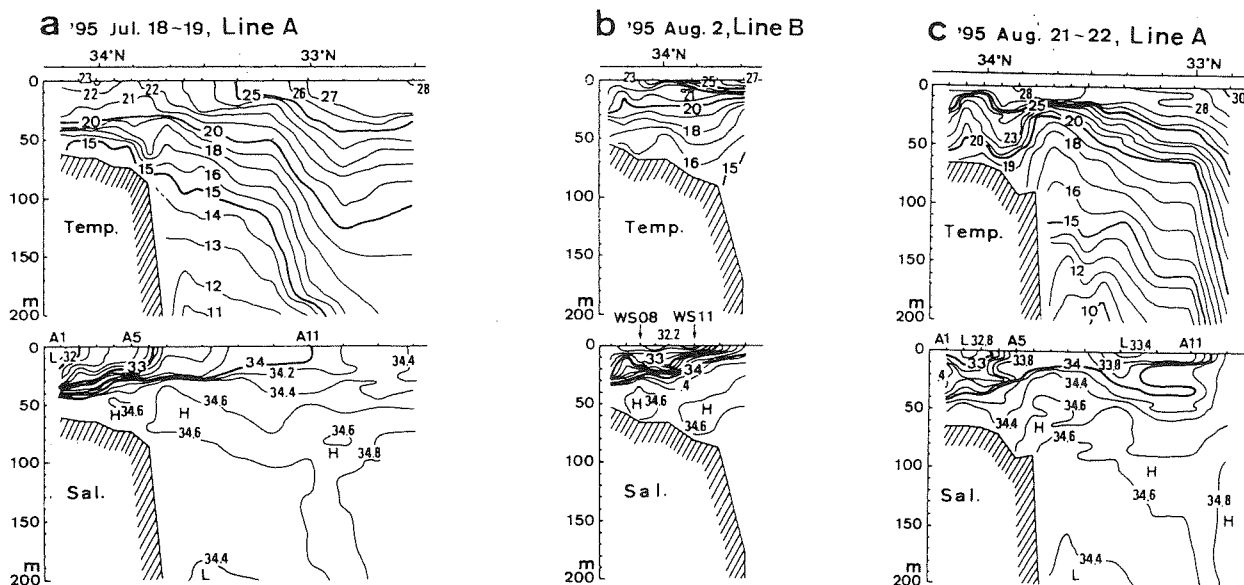


Fig.11 Sectional distributions of temperature(upper) and salinity(lower) along the A or B lines.

8月2日 (Fig. 11のb) は、前述の小蛇行が潮岬を通過した直後の観測である。観測は浅海定線調査時に実施されたものでB線で行われた。B線はA線のように南北に真っ直ぐではないが、水道内部ではA線とほぼ同じである。

8月21~22日 (Fig. 11のc) は、黒潮が潮岬南15マイル付近を東北東へ約2.8ktで流れており (和歌山県沖合黒潮調査速報, 1995.No.7), Fig. 9のbに示した潮位差からも黒潮の安定した接岸がつづいてきたと推定される。

これら3回の紀伊水道における南北断面観測から次のことがわかる。小蛇行が潮岬沖を通過中 (a) あるいは通過直後 (b) には、紀伊水道内の底層に外海からつづく16℃以下の低温、34.6以上の高塩分の水が分布している。水深20~40m以浅には、水温20℃以上、塩分約34.0以下の表層水が分布しており、上下層の鉛直的な違いが大きい。

これに対し、小蛇行が通過し黒潮の接岸がしばらく続いたあとの観測 (c) では、底層水温は18℃以上に上昇し、塩分は約34.4に低下している。表層暖水の厚さは深くなり、20℃以上の暖水が底層近くまで分布して鉛直的な水温の違いは小さくなっている。

このような一連の海洋構造の変化は、黒潮小蛇行の通過に伴うものであり、これによって紀伊水道の海況が大きく変化したことがわかる。

4-3 底層冷水と栄養塩

1) 紀伊水道の鉛直分布観測

1995年8月2日に紀伊水道内のWS08とWS11の2点 (測点位置はFig. 10) で栄養塩の鉛直分布調査を行った。観測日は、Fig. 9のbに縦の破線で示した日である。観測は、前述したように小蛇行が潮岬沖を通過してから黒潮の接岸が始まった直後にあたる。採水は表層から底層付近まで5mごとに行った。試水はろ過し、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ などを分析した。 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の合計値をDIN ($\mu\text{mol/l}$) とした。

Fig. 12にDINと密度の鉛直分布を示す。密度躍層は、WS08で水深15~30mにみられ、WS11では水深0~15m付近にある。密度躍層の下部付近より

も深いところで、DINが急激に増加する。DINは水深25~35m付近を境に、上層で低く ($0.5\sim 4.0\mu\text{mol/l}$)、下層できわめて高い ($5.7\sim 10.9\mu\text{mol/l}$)。PO₄-Pでも、これとほぼ同様の鉛直分布であった。水温・塩分の断面図 (Fig. 11のb) から、栄養塩は表層の高温・低塩分 waters で少なく、底層の低温・高塩分 waters できわめて高濃度であることがわかる。

2) 紀伊水道沿岸から沖合の観測

調査船「わかやま」を使って、1995年7月~8月にFig. 10の紀伊水道からその沖合域に示す測点で5回の観測を実施した。その観測日、調査海域と測点数、採水層 (m) ごとのサンプル数 (カッコ内の数字) などを次に示した。

(1) 7月25~26日 (Fig. 10の▽印) ; 潮岬~瀬戸崎沿岸の36点, 0 m (36) ; 50 m (35)。

(2) 8月1~2日 (Fig. 10の●印) ; 紀伊水道内~外域沿岸・田辺湾の18点, 0 m (22) ; 20 m (22)。

(3) 8月2日 (Fig. 10の●印) ; 紀伊水道内WS08とWS11の2点, 0~80mの5m間隔 (31)。

(4) 8月21~22日 (Fig. 10の○印) ; 潮岬沖40マイル~紀伊水道沖60マイル~紀伊水道内の30点, 0 m (30) ; 50 m (23)。

(5) 8月24日 (Fig. 10の▽印) ; 潮岬~市江崎沿岸の27点, 0 m (27) ; 50 m (27)。

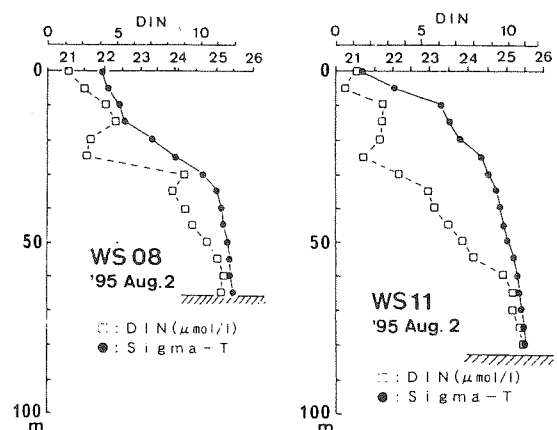


Fig. 12 Vertical profiles of density (●, sigma-t unit) and DIN (□, $\mu\text{mol/l}$) at the station WS08 (left) and at the station WS11 (right) on 2 August 1995.

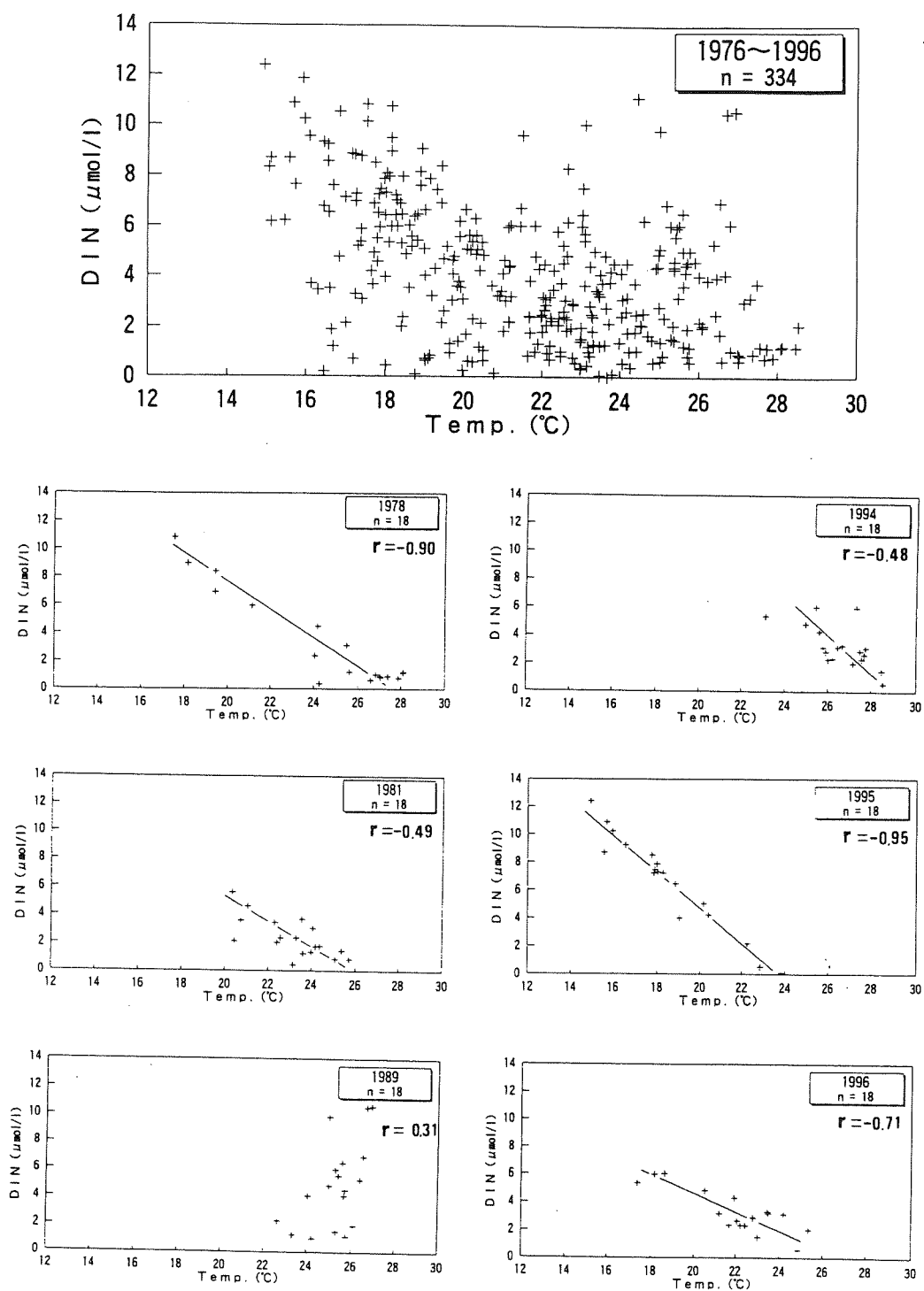


Fig. 14 (Upper) Scattering diagram of temperature and DIN for a period from 1976 to 1996. (Lower) Scattering diagram of temperature and DIN for each year.

117測点で合計253のサンプルを採水し、栄養塩の分析を行った。

Fig. 13は、水深0～5mと水深10～50mの二つの水深に区別して描いた水温とDIN濃度の散布図である。ごく表層の0～5m深では、DIN濃度がほとんどゼロである。これに対し、水深10～50mでは水温が低いほどDIN濃度が高い相関関係が認められる。とくに水温が25℃以下の時に高い相関がある。水温25℃以上では、DINが $2.0 \mu\text{mol/l}$ 以下となり相関は認められない。水深10～50mのDIN ($\mu\text{mol/l}$) を使うと、次の回帰式として水温 (T, 25℃以下) から濃度を求めることができる。

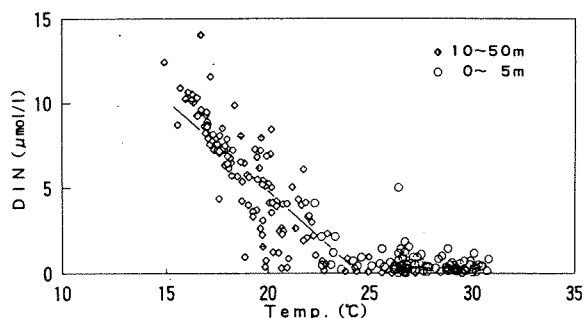


Fig.13 Scattering diagram of temperature and DIN in July to August 1995.

$$\text{DIN} = -1.04 \times T + 25.7 \quad (\text{相関係数}0.75)$$

この回帰式は、藤原ほか⁽¹⁷⁾が豊後水道で得た結果 ($\text{DIN} = -0.74 \times T + 21.0$, 相関係数0.84) に比べるとDINはやや低めに計算される。

つまり25℃以上の表層付近を除けば、紀伊水道内とその外域のかなり広い海域で、上記の回帰式からおおよそのDIN濃度が計算できる。

3) 浅海定線データ

定期的な浅海定線調査における栄養塩類のデータのうち、8月あるいは9月に観測した底層(底上1～5m)のDIN ($\mu\text{mol/l}$)のデータから、紀伊水道東部に位置する18点(観測点はFig. 11の●印)を使って、水温との相関を検討した。データの期間は、1976年から1996年の21年間である。観測が実施されなかった年やDINデータの欠測などもあり、データ数の合計は334である。

水温とDIN濃度の散布図を、Fig. 14に示す。1976～1996年の全データでは、両者はおおよそ逆相関はあるもののかなりバラついている。その下に、年ごとの散布図の例を選んで示した。1989年のように全く相関が認められないこともあるが、ほとんどの年には強い相関関係が認められる。ただし、その回帰式(図中の実線)は年によって少しずつ異なる。

このように、夏季の紀伊水道では、DIN濃度と水温とは相関関係があり、年ごとの回帰式を使えば水温からDIN濃度を推定できそうである。

5. おわりに

紀伊水道へ進入する表層暖水と底層冷水について、現場での調査結果を紹介した。前者は冬季から春季の水平的な不連続構造と関連し、後者は夏季に鉛直的な海洋構造の違いが著しくなることと深い関わりがある。いずれも黒潮の変動に伴って、外海の変動が内湾域へ進入することで起きていることが示唆された。

外海の亜表層水が紀伊水道の下層に進入して起こる底層冷水では、水温が低いほど栄養塩濃度が高いといった相関関係があり、夏季から秋季の栄養塩の供給機構の一つとして注目される。この栄養塩類の供給は、生物生産の盛んな季節に、幼稚仔魚の生育場として極めて重要な紀伊水道内で起こることから、紀伊水道の生物生産、さらに漁業にも深く関係することが想定される。しかし、魚類など高次の生物生産までを含めた物質循環を理解するための基礎的な知見は極めて少ない。

竹内・吉村⁽¹⁸⁾は、プランクトン量の季節的な特徴が年によって変化することを指摘し、それは阪本⁽⁹⁾の示したタチウオとサバの漁獲量にみられる季節変動特性の変遷とよく符節していると報告している。まず、このような視点から、高栄養塩が流入する底層冷水年に生物生産の季節的な特徴がどのように変化するのか、具体的な事例から検討することも必要であろう。

謝辞

本シンポジウム講演の機会と、本稿をまとめるにあたり貴重なご教示とご校閲をいただいた京都大学農学部の藤原建紀助教授に深く感謝いたします。また、長年にわたり定線観測を遂行された歴代の調査員、分析担当者および船長はじめ乗組員の方々に厚くお礼申し上げます。

参考文献

- (1) 吉岡 洋(1971)：冬期紀伊水道に発生する Oceanic front について(1). 海と空, 46(2), 31-44.
- (2) 藤原建紀・宇野奈津子・笠井亮秀・須佐美智嗣・多田光男・地本直弘・中辻啓二(1996)：外洋から瀬戸内海に流入する窒素・リン. 1996年度日本海洋学会春季大会講演要旨集, 355-356.
- (3) 竹内淳一(1987)：定線調査データを使った季節変化曲線の算出方法. 南西海区ブロック海洋研究会報告, 4, 73-78.
- (4) 竹内淳一(1996)：黒潮離岸距離に伴う紀伊半島沿岸の水温特性. 1996年度日本海洋学会春季大会講演要旨集, 18-19.
- (5) 竹内淳一(1989)：紀伊水道周辺海域の短期海況変動(要旨). 南西海区ブロック海洋研究会報告, 6, 1-3.
- (6) 竹内淳一(1990)：紀伊水道における短周期の暖水波及(概報). 南西海区ブロック海洋研究会報告, 7, 1-7.
- (7) 竹内淳一・中地良樹(1995)：紀伊水道に侵入する暖水について. 南西海ブロック海洋研究会報告, 12, 33-46.
- (8) 藤本 実・万田方子(1984)：本州南西海域の黒潮北縁冷水域について. 黒潮の開発利用の調査研究成果報告書, 7, 306-313.
- (9) 阪本俊雄(1987)：熊野灘・紀伊水道周辺域の中長期の漁海況変動. 海洋科学, 19(8), 456-462.
- (10) 藤本 実・坂本久雄・中川倫寿(1988)：黒潮大蛇行と南西海域の海況. 海と空, 64(3), 129-144.
- (11) 阪本俊雄(1990)：和歌山県沿岸域の漁海況. 海と空, 66, 347-366.
- (12) 川尻正博・佐々木 正・影山佳之(1981)：下田市田牛地先における磯焼け現象とアワビ資源の変動. 静岡県水産試験場研究報告, 15, 19-30.
- (13) 竹内淳一・本多直人・森川由隆・小池 隆・永田豊(1997)：紀伊半島南西沿岸沿いの振り分け潮. 1997年度日本海洋学会春季大会講演要旨集, 227.
- (14) 浜田尚雄・岩井昌三・森脇絆二(1971)：大阪湾におけるフクラヤムシ *Sagitta enflata* の進入条件Ⅱ. 水産学会誌, 37(5), 357-363.

- (15) 浜田尚雄(1978)：兵庫県下内海における主要水族漁獲量の経年推移. 水産海洋研究会報, 32, 67-74.
- (16) 竹内淳一(1986)：紀伊水道における海況の変動—夏・秋季に出現する中・底層の低水温現象—. 南西海区ブロック海洋研究会報告, 3, 69-84.
- (17) 藤原建紀・山岡到保・肥後竹彦(1984)：豊後水道をへて瀬戸内海に“流入”する窒素について. 1984年度日本海洋学会春季大会講演要旨集, 108-109.
- (18) 竹内淳一・吉村晃一(1988)：紀伊水道のプランクトン沈殿量・湿重量(要旨). 南西海区ブロック海洋研究会報告, 5, 41-42.

要旨

紀伊水道における水塊構造の変化を、潮岬南方の黒潮離岸距離と関連させながら調べた。黒潮離岸距離が20マイル以下では、高温の黒潮系表層水が紀伊水道に流入することが多くなる。黒潮の小蛇行が四国沖から紀伊水道沖にかかったときには、この暖水の流入は1～3ヶ月間にわたって継続することがある。離岸距離が20マイル以下で安定した接岸が続くときには、暖水ストリーマが紀伊半島西岸に沿って数日から十数日の周期で繰り返し流入する。一方、離岸距離が30マイル以上となる大蛇行時や小蛇行の通過に伴って、外海の亜表層の低温・高塩・高栄養塩の海水が紀伊水道の下層に進入する。この進入は黒潮変動と関連し、短期間の変動を伴っている。また、外海の亜表層水においては、栄養塩濃度と水温の間に高い相関関係がある。