紀伊水道の OCEANIC FRONT の変動

—フェリーボートによる長期間の水温観測から—

吉岡 洋・中島暢太郎・国司秀明

THE VARIATION OF OCEANIC FRONT IN KII CHANNEL

——Observation of the surface water temperature by the use of ferry boat——

By *Hiroshi* YOSHIOKA, *Chotaro* NAKAJIMA and *Hideaki* KUNISHI

Synopsis

Using the surface water temperature recording on the commercial ferry boat, the various modes of the changing state of the oceanic front in Kii Channel have been studied.

It is found that climatological condition in autumn and winter controls the intensity of the oceanic front.

It is the most important that the oceanic front largely and repeatedly with the period of about 15 days changes its intensity and position. It relates to the appearence of warm water mass which seems to come from the Kuroshio along the east side of Kii Channel Approach. The warm water mass also occurs the intrusion of water to the Tanabe Bay and large water exchange at the bay which have been observed at Shirahama Oceanographic Tower station.

1. まえがき

白浜海象観測所の海洋観測塔による水温連続測定により，国司等は水温の急激なjumpを発見した。[1)2)]それは3,4日ないし7,8日から15日程の間隔で発生し，数十分のうちに水温が一方的に変移してしまう現象である。沿岸海域で海水はなだらかな空間的変化をしているのではなく，block状にいくつかの水塊として存在していると考えて，国司等は，jumpは水塊が交代する時，すなわち田辺湾に外洋から別の水塊が侵入する時におこる現象であると仮定して，それによる同湾の海水交換量を見積った。その量は毎日の潮汐混合によるものより大きくなって，沿岸海域における沿岸と沖合との海水混合をおこす有力な機構であると考えられた。その田辺湾への外洋水の侵入は紀伊水道の海況変動の一端であることから，その研究の重要性がとりあげられた。さらに紀伊水道は瀬戸内海と太平洋との境界帯として瀬戸内海の水質に大きな影響を与えるし，その海域での air—sea interaction は近畿地方の気象災害に大いに関係していること等の理由で，筆者らは紀伊水道全域の海況を調べることになり，とくに冬期にそこに発生する顕著な oceanic front を中心に研究を進めた。[3)]

2. 紀伊水道の海況の特性

紀伊水道とは通常，徳島県の伊島と和歌山県の日ノ岬によって狭くなっている海域をさすが，ここで扱か

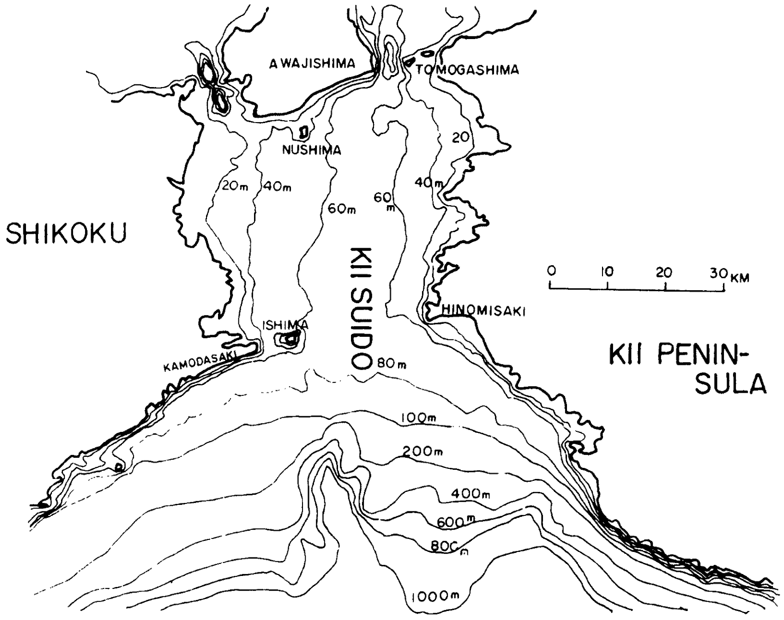

Fig. 1. Topography of Kii Channel

う海域は，北は淡路島，東は紀伊半島，西は四国，南は室戸岬と潮岬を結ぶ線によって囲まれている広い海域である。そのうちで伊島と日ノ岬を結ぶ線より北側を紀伊水道，南側を紀伊水道 Approach と便宜的に呼ぶ(**Fig. 1**)。紀伊水道は水深が 80m 以下で，吉野川，那賀川，紀ノ川等から流入する河川水と，大阪湾や播摩灘からの海水とによって，紀伊水道 Approach に比べて沿岸性の強い海域である。一方紀伊水道 Approach は太平洋の黒潮に向って大きく開き，水深も急に大きくなって 1,000m 以上に達し，紀伊水道に比べて外洋性の強い海域である。

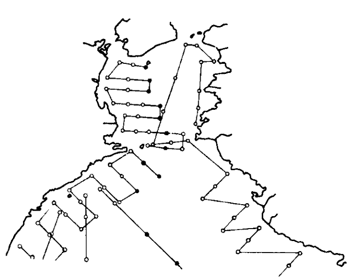

Fig. 2. Station of monthly serial observation by Fish. Invest. Stations.

さらにくわしくみれば，同じ紀伊水道でも東側の方が外洋性である。紀伊半島に黒潮の一部がぶつかって黒潮反流となって紀伊水道 Approach の東沿岸沿いに北上し，紀伊水道の東側に達するためと思われる。そのような地形的な効果の他に，北上する流れに Corioli 力が効いて東側に流れをおしつける状態になることも考えられる。逆に瀬戸内海からの沿岸水は吉野川等の河川水と混合しながら紀伊水道の西側に分布し紀伊水道 Approach の西側沿岸ぞいにのびている。

つまり紀伊水道の塩分の水平分布の特徴は，北西が低塩分

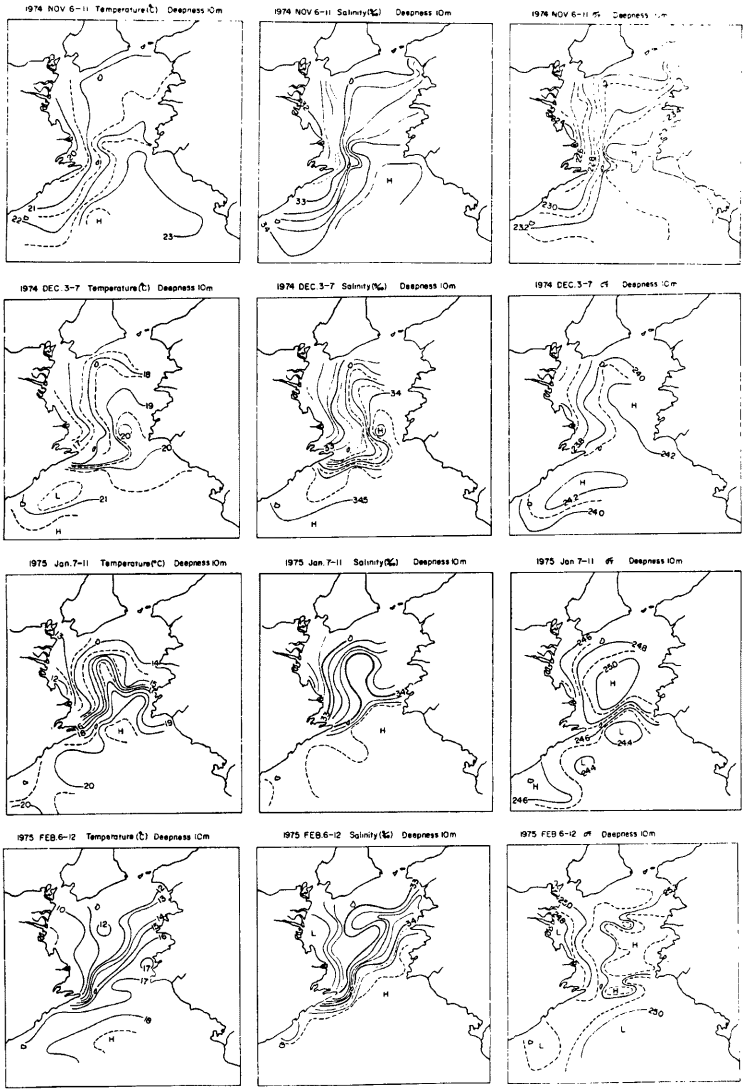

Fig. 3. Horizontal distribution of surface water temperature, salinity and density at Kii Channel

で，南東が高塩分になり，等塩分線が北東から南西に走っていることである。夏から秋にかけて，沿岸水から外洋水への空間的遷移はゆるやかで等塩分線の間隔も一様である。ところが冬になると等塩分線は，伊島の南から日ノ岬の北にかけての部分に密集してしまう。

紀伊水道を毎月ルーチンに観測している徳島県と和歌山県の水産試験場の測点を **Fig.2** に示す。表層は局所的，時間的な変化が大きいと考えて，水深 10m を選んで，水温，塩分と密度 (σ_T) の水平分布が，晩秋から冬にかけてどのように変化するのかを **Fig.3** に掲げた。測点の間隔が 5km 以上と粗く，観測日数も1週間近く要するので，パターンはかなりならされているが，冬 (1月，2月) には伊島の南から日ノ岬の北にかけて紀伊水道をふさぐような，水温と塩分の急変帯がみうけられる。ところが密度はそこではほぼ最大帯にあたり急変帯ではない。すなわち冬期紀伊水道において伊島の南から日ノ岬の北にかけての領域で，高温高塩分の外洋水と，低温低塩分の沿岸水とが sharp な境界線 (oceanic front) をつくり，そこでは水温と塩分は不連続に分布しているが密度は連続的である。

Fig.3 と同じ資料で T-S ダイアグラムを作ったのが **Fig.4** である。秋から冬にかけて紀伊水道の各地点の水温塩分は T-S ダイアグラム上では線状に分布し水温と塩分との対応が非常によい。秋は外洋と沿岸水とは一直線に結ばれ，高温高塩分の外洋水が高密度である。ところが冬になって Front が発生するとT-S ダイアグラム上で紀伊水道の水は折線上に分布する。1975年1月を例にとれば 19°C 以上の外洋水は塩分はほぼ 34.6‰と一定であり，19°C から 15°C にかけての Front の水は等密度線 (σ_T=25.00) に沿って水温と塩分が変化し，15°C 以下の沿岸水は水温が低くなるより塩分低下が密度寄与の点で大きく，密度が小さくなっていく。すなわち Front の南の外洋水は塩分はあまり変化せず南にいく程水温がゆるやかに上昇して黒潮に続いている。Front では水温塩分ともに急変して密度は変らない。Front の北の沿岸水は北にいく程水温塩分密度ともに低くなる。したがって紀伊水道全体から見ると，Front は密度の極大帯にあたる。

5月以降になると陸水の流入が増し，季節躍層が発達して局所的な水温塩分の格差が大きくなり，水温と塩分の対応は悪くなり，T-S ダイアグラム上の分布もバラつきが大きくなる。しかし冬を中心とした季節では水温と塩分の対応がよいので，水温分布だけで水塊の分布を論ずることができそうである。そこで紀伊水道を毎日運航するフェリーボートに水温自記装置をとりつけて毎日の水温分布を連続記録させて，冬期紀伊水道の海況，とくに Front の変動を観測することにした。

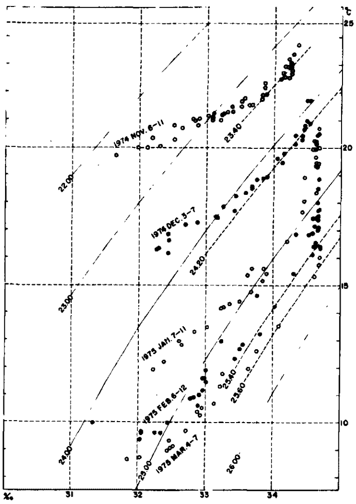

Fig. 4. T-S diagram at Kii Channel in winter.

3. フェリーボートによる Oceanic Front の観測方法

1971年11月，大阪と高知をむすぶ「株式会社大阪高知特急フェリー」のフェリーボート「かつら」の機関室に同社の御好意により，水温自記装置をとりつけた。計測方法を **Fig.5** に示す。船は走航しながらエンジン冷却水として水深3～5m の海水を水だめ (sea chest) を通して多量にくみあげている。だから水だめの中は常に外の海水がとりこまれている。当初は水だめの水を静水圧によってポリ瓶にそそぎこんでオーバーフローさせ，サーミスターセンサーをポリ瓶につっこんで測定した。(**Fig.5** の→1) この方法はオーバーフローさせる水量が制限されるため，室温の影響を受け安く，信頼できる記録を得るのがむずかしい。そこで翌年にはサーミスターセンサーをサニタリーストレーナーにとりつけた。サニタリー

ストレーナーとは船内の水洗トイレや冷蔵庫等に配給する海水の大きなゴミをとりのぞく部分である。その蓋を取りはずしてサーミスターセンサー付きの蓋を製作して取りつけ，信頼できる資料を得ることができた (**Fig.5**の→2)。

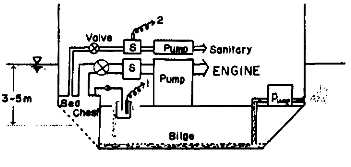

Fig. 5. The method of measuring the water temperature in Ferry Boat. Thermister senser is attached in the sanitary strainer (S).

1973年 11月より神戸と白浜を結ぶ「株式会社神紀フェリー」のフェリーボート「勝浦」にも同じ装置を同社の御好意により取りつけた。二隻の運航図を **Fig. 6** に示す。「かつら」は現在 (1977年) も計測を続けているが「勝浦」は1975年3月営業中止により装置をひきあげた。

水温の記録は1時間に25mmの紙送りで，10秒ごとに打点記録している。船の交流電源は周波数が不安定なので紙送りにムラが生じる。そこで1時間ごとにタイムマークをいれている。タイマーは市販の安価な音叉時計に接点スイッチを組みあわせて作った。船の速力が約18ノットであるから距離にして約100mに1回，水温を打点記録している。通常は点が連なって実線になるが，水温が10秒間に0.1°C以上変化すると記録はjump して点線になる。故に水温の jump というのは記録が点線となる部分，すなわち，水温の距離変化が0.1°C/100m 以上の部分であると便宜上定義する。

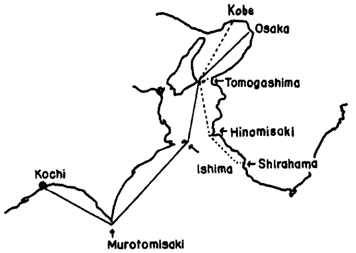

Fig. 6. Course of Ferry "Katsura" (solid li and Ferry "Katsuura" (dotted line)

そういう意味で記録に現れる，紀伊水道の水温のjumpはいたるところに出現しては消えている。(例えば，夏期の成層期には，友ケ島附近のように潮流の強い所では，下層の冷水がまきあげられて冷水域を形成し，まわりの海域との間にjump をつくるし，夏から秋にかけて，大雨の後，吉野川や淀川の河口沖では，陸水の影響を直接受けた非常に低塩分の水が表面をおおい，秋ならば冷水域，夏ならば日射で暖められて暖水域を形成して沖合の通常の沿岸水との間にjumpをつくる。) その中で最も顕著で，かつ安定して存在するのが，先にのべた冬期紀伊水道に発生する oceanic front の水温のjump である。

4. Oceanic Front の年変化 (発生から消滅まで)

Front の発生から消滅にいたるまでの概略を **Fig. 7** および **Fig. 8** で説明する。**Fig. 7** は1971年11月から1972年3月までの，大阪から高知までの水温分布を並べた図である。Oは大阪，Tは友ケ島，Ⅰは伊島，Mは室戸岬でKは高知を表わす。10月まで一定だった水温は，11月になると，大阪湾のように閉鎖的で浅い内湾と，紀伊水道 Approach のように開放的で深い外洋とでは冷却速度の差が生じて水温に地域差が出てくる。そして12月になると伊島の南に Front が発生する。初めは不安定ですぐ消えたりして jump の幅も小さいが12月末にはほとんど常に2°C以上の jump をもつ安定した強い (=jump 幅の大きい) ものとなる。翌年の3月までは Front は最盛期，すなわち最も強い時期である。

Fig.8 は続いて1972年3月から6月までの記録である。4月になると大阪湾が昇温し始めるが紀伊水道では Front 附近の水温はあまり変らず，Front は顕在である。そして時には友ケ島のすぐ南まで北上することがある。5月になると大阪湾と紀伊水道との水温の海域的な差はなくなり，6月になると逆に局地的には大阪湾の方が高くなったりする。紀伊水道でも局地的な水温変化が著しくなり，Front はその中で衰えながら，他のjump との区別がつかなくなっていく。(生の記録ではjump の所だけ点線になるが **Fig. 7**, **Fig 8**, **Fig. 10** では全て実線または点線で表してある。)

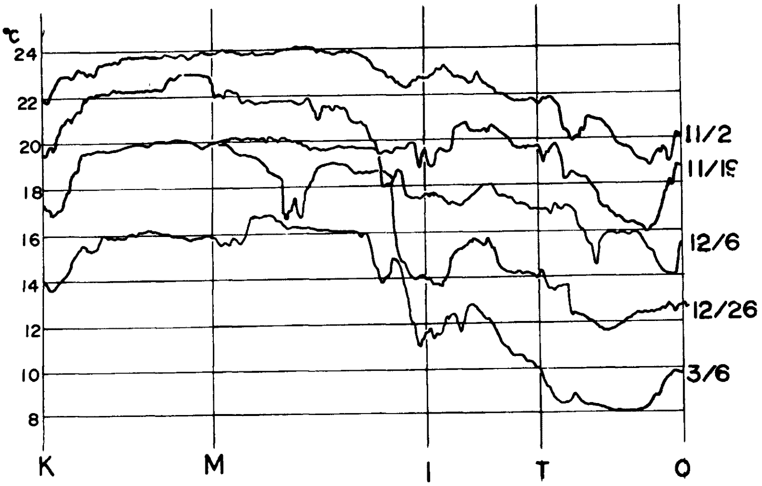

Fig. 7. Surface water temperature observed by "Katsura" from Osaka to Kochi.

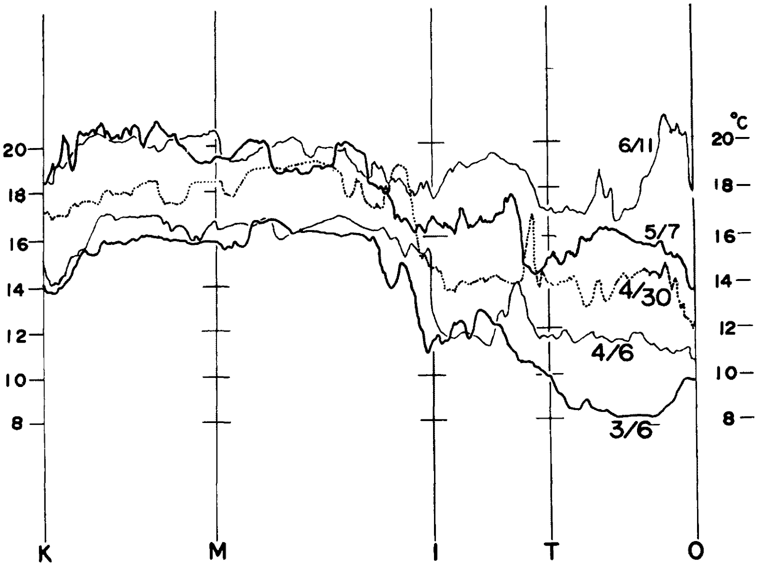

Fig. 8. Surface water temperature observed by "Katsura" from Osaka to Kochi

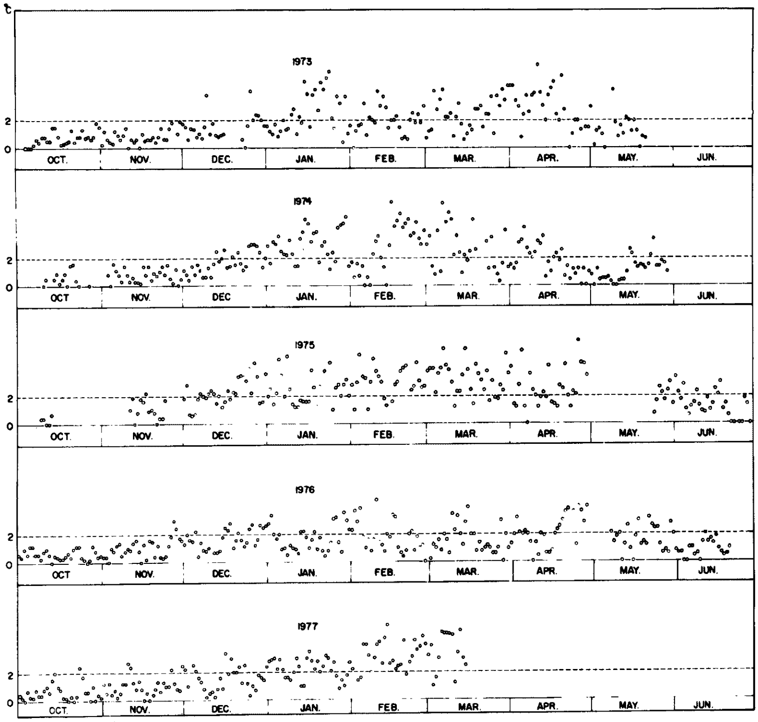

Fig. 9. Intensity of the Oceanic Front in Kii Channel observed near Ishima by "Katsura"

Front の発生や消滅の時期，最盛期の強さ等が，年によって，どの位異なるかを調べるため，「かつら」の記録で，伊島附近の明らかに Front のものと思われる jump の温度差（ΔT）を読みとって（複数ある場合は最大値をとって），プロットしたのが **Fig.9** である。

秋から冬にかけては Front 以外の jump は非常に小さいので ΔT が 1°C をこせば顕著に識別できるが，春から夏にかけては局所的な jump が大きくなってくるので，Front は ΔT が 2°C より小さくなると他とまぎらわしくなってくる。一応の目安として，Front の年変化を議論する場合，秋に Front の jump が平均して 2°C を越した時を Front の発生とし，春に平均して 2°C を下まわるようになった時を Front の消滅と考えると，発生は11月から12月，消滅は4月から5月といえるが，年によってかなり変化する。又，1月から3月にかけては，ほとんどの日が ΔT は 2°C を越しているが，その割合や，又，ΔT が 4°C を越すような顕著な Front の発達をみせる回数も，年によって異なる。

例えば1973年から1974年にかけての冬は，Front の発達が著しいが，消滅時期も早いのは，秋から冬にかけて例年より寒い日が続き[4]，逆に春になると例年より暖かい日が続いたせいであろう。逆に 1975年から1976年にかけての冬は Front の発達はよくないが，消滅時期もおそい。これは1月2月に暖冬が続き，3月になると寒さがぶりかえしてきたせいであろう。このように全体的にみた Front の発達の具合や，発生

と消滅の時期は，その年の気象（気温，風，日射量，降水量）との対応がありそうである。

5. Oceanic Front の15日前後の変動

Fig.9 を見れば Front は秋に発生してから春消滅するまで，ずっと存続しているのでなく，顕著に発達したり（$\Delta T>4°C$），消滅したり（$\Delta T<1°C$），その変動は大きい。消滅したといっても，勾配が 0.1°C/100m よりゆるくなっただけで，それでもかなりの勾配をもつ「ゆるんだ」Front といえるような場合もあれば，友ケ島から伊島の南まで，水温がなめらかに変化している場合もある。顕著に発達した Front も数日たつとメアンダしたり，ゆるんだりして，だんだん衰え，時には消滅することもあるが，やがて徐々に，又は突然に，発達していくという15日位の変動をくりかえしているようである。

また Front は強さだけでなく，その位置の変動も大きいことがフェリーの観測からわかってきた。**Fig. 10** は1972年1月17日から28日までの伊島附近の「かつら」の記録を並べたもので，実線がその日の水温分布，点線が前日のそれを示す。17日まで伊島の南 30km にあった Front は，発達しながら北上して，21日には伊島の北 20km まではりだす。ただし伊島をう回するようにメアンダしているので伊島周辺は低温の沿岸水に占められている。そしてメアンダが著しくなり，沿岸水と外洋水との混合がすすみ，Front は弱まり，伊島の北にはりだした部分は衰えて，28日には17日と似た分布になっている。

18日から19日にかけて24時間のうちに 20km も Front が北上することは,このあたりの Tidal Excurtion がせいぜい 10km であろうと考えれば非常に大きな動きである。それに伊島通過時刻は，大阪行きも高知行きも午前1時から3時の間で，観測の時間間隔はほぼ24時間であり，Tidal Excurtion はほとんどないと期待できる。ただし 20日に伊島の南 20km に存在した Front が 21日には伊島をう回して伊島の北 20km

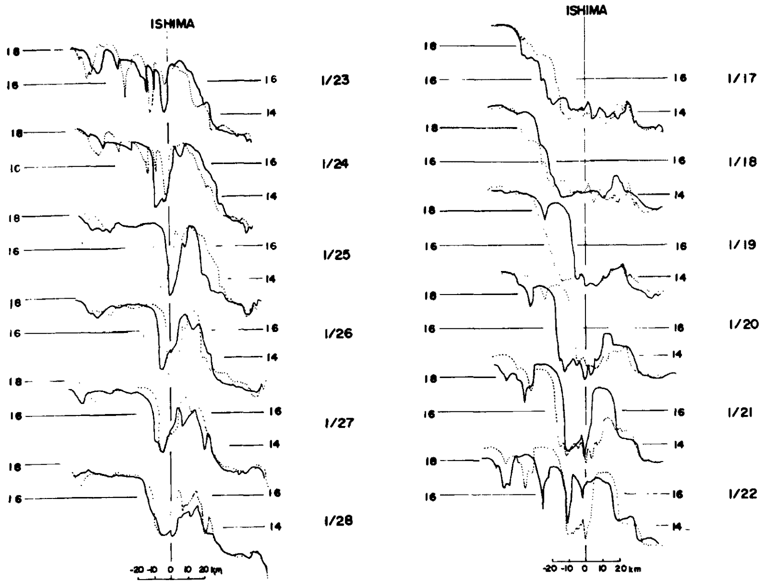

Fig. 10. Change of the distribution of the water temperature near Ishima observed by "Katsura"

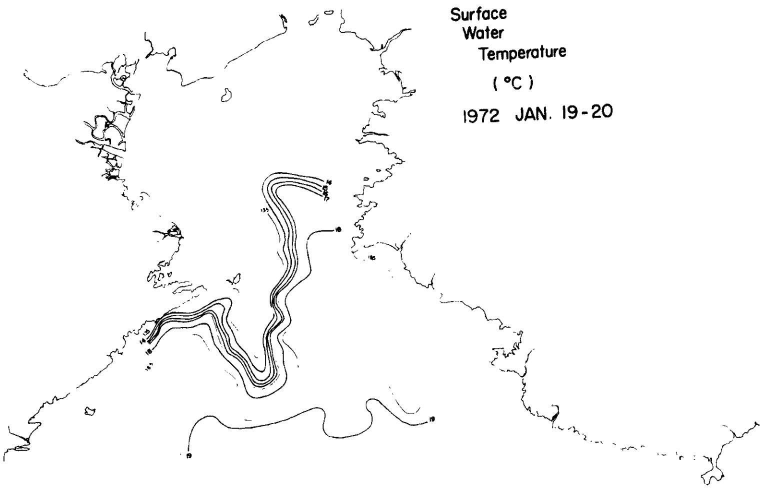

Fig. 11. Horizontal distribution of surface water temperature observed by "Tansei Maru" at KT-72-1 Cruise

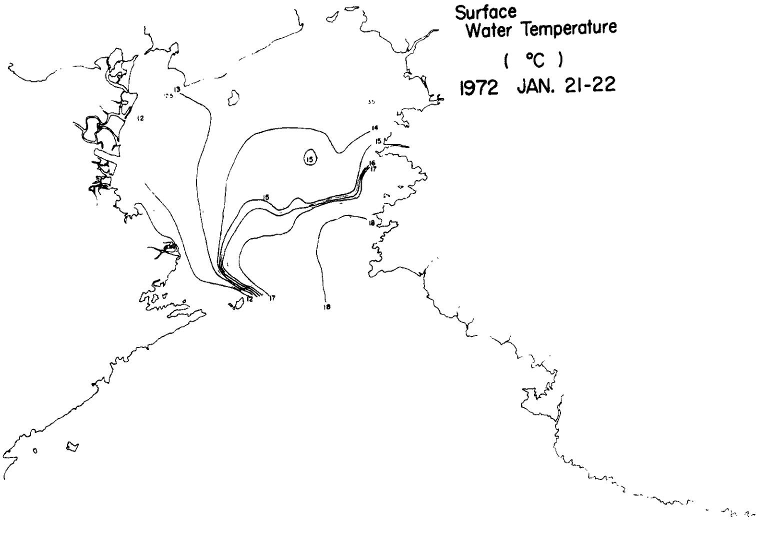

Fig. 12. Horizontal distribution of surface water temperature observed "Tansei Maru" at KT-72-1 Cruise

まで北上したと考えるのは誤まりである。

ちょうどこの時，著者等（吉岡，国司）は，東京大学海洋研究所の海洋観測船「淡青丸」に乗船して紀伊水道から紀伊水道 Approach を観測していた（KT-72-1 航海）。観測は1月19日から22日まで行なわれた。19日と20日の表面水温観測から描いた Front の位置（**Fig. 11**）と21日と22日のそれ（**Fig. 12**）とは，かなりパターンが変化している。20日から21日のうちに紀伊水道で Front は四国側に 10km はりだしている。つまり「かつら」の記録では，伊島の南から北に Front が北上したように見えるが，実際は，Front は西にシフトして，それまで伊島の北では「かつら」の航路の東側にあった Front が航路まではりだしたのである。Fig. 11 が通常の Front の位置とすると Front は紀伊水道の東側では「勝浦」の航路と直交するが，中央や西側では「かつら」の航路に平行気味になり，伊島の南では直交することになる。そこで伊島の南での Frontの変動は「かつら」の記録で，紀伊水道の東側（日ノ岬の北）は「勝浦」の記録でわかるが，その中間（紀伊水道の中央部及び西側）は両者を照合しないと不正確である。

6.　Oceanic Front と白浜沖の暖水域との関係

Fig.13 と **Fig.14** は「勝浦」の1974年12月7日より1975年1月3日にわたる記録を解析してまとめた，神戸から白浜までの水温分布の変動を表した図である。横軸は時間で，月日と月齢を目盛ってあり，縦軸は場所を表わし，上端が神戸，下端が白浜，途中の横線は友ケ島と日ノ岬である。神戸と友ケ島の間が大阪湾，友ケ島と日ノ岬の間が紀伊水道の東側，日ノ岬から白浜の間は紀伊水道 Approach の東沿岸域にあたり，日ノ岬の南 30km あたりが最も沖にでていて 40km から白浜までは田辺湾にあたる。船は神戸と白浜を往復する細い実線上を運航している。その運航線上に水温の値をプロットして隣りあう運航線上のプロットとの関係をしらべて等温線を結んだのが Fig.13 と Fig.14 の模様である。等温線が密集している所は jump を示し，特に日ノ岬附近の jump は Front を示している。

全体の傾向として海は水温下降期にあたり，とくに大阪湾の水温低下が著しい。それに比べて紀伊水道の水温低下は少なく，紀伊水道の入口や紀伊水道 Approach においては，下降傾向に逆らって，しばしば大規模で急な昇温が見られる。この暖水域の急な拡大とそのゆるやかな縮小は，南の黒潮からの暖水塊の北上とその撤退又は消滅と考えられる。そうすると紀伊水道の東側では Front と暖水塊との間に密切な関係のあることがわかる。

12月8日まで紀伊水道の東側には Front は発生していない。ところが9日に白浜沖に突然，20°C以上の暖水域で代表される暖水塊が発生し，その北端は Front になっている。そして10日までの暖水域の拡大とともに Front は発達しながら北上して日ノ岬の北 10km まで達する。11日以降，暖水域が縮小するとともに Front は弱くなり，13日には消えてしまう。

ところが23日に再び暖水塊が発生し25日には日ノ岬の北20km まで北上すると，その北端に再び Front が発生し，北上しながら発達する。今度は27日以降，暖水塊が消滅した後も，Front はメアンダしながら衰えるが，消滅はしない。同様なパターンの変動が1月4日以降もくりかえされる。

つまり，紀伊水道の東側では，およそ15日くらいの周期で出現する暖水塊の，発生と拡大→停滞＝最拡大期→減衰→消滅，と対応して Front の，発達と北上→停滞＝最盛期→メアンダ→衰弱，といった変動をくりかえしながら，しだいに Front が発達していくようである。

ところが同じ時期の「かつら」の記録を同様に解析したのが **Fig.15** である。左端が大阪，右端が高知，途中の縦線は友ケ島と伊島と室戸岬である。友ケ島と伊島の間が紀伊水道の西側，伊島と室戸岬の間が紀伊水道 Approach の西沿岸域，室戸岬と高知の間が土佐湾にあたる。

12月10日に白浜沖から日ノ岬まで拡大した 20°C 以上の暖水域は，**Fig.15** でも10日に伊島の南に現れ，それまで伊島の南にあった Front が北に移動している。しかし Front は北上しても顕著に発達はしない。やがて 20°C 以上の暖水域は南下して消滅している。このことは暖水塊が白浜沖から日ノ岬を経て伊島に達

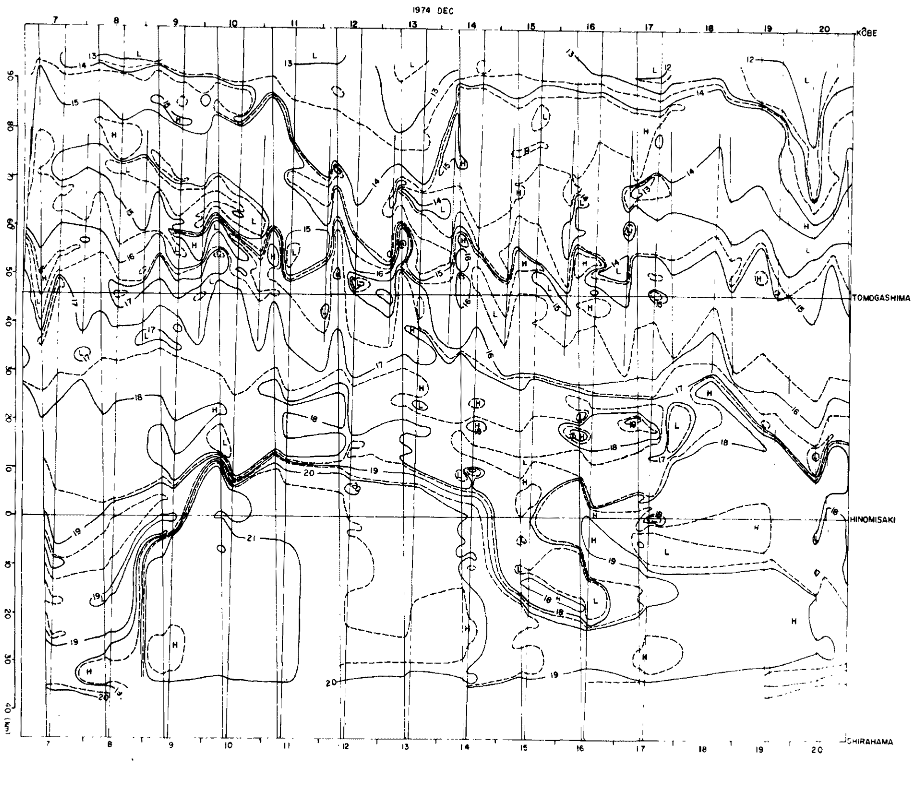

Fig. 13. Change of surface water temperature distribution from Kobe to Shirahama observed by "Katsuura"

し，南下して岸をはなれたことを意味し，黒潮反流のパターンと一致している。

一方，伊島附近の Front が顕著に発達するのは 12 月 20 日以降である。この時，Front の南には顕著な暖水域はみあたらず，非常に一様な水温になっている。むしろ，Front の北側に冷水域が発生してそれが Front の温度差を大きくしているようである。

以上の様な事実をふまえて，1974年 12月から翌年の 1 月にかけて紀伊水道の Frontの変動と暖水塊の変動とを概括した図が **Fig.16** である。上図は Front の温度差を示し，実線①が「かつら」によって紀伊水

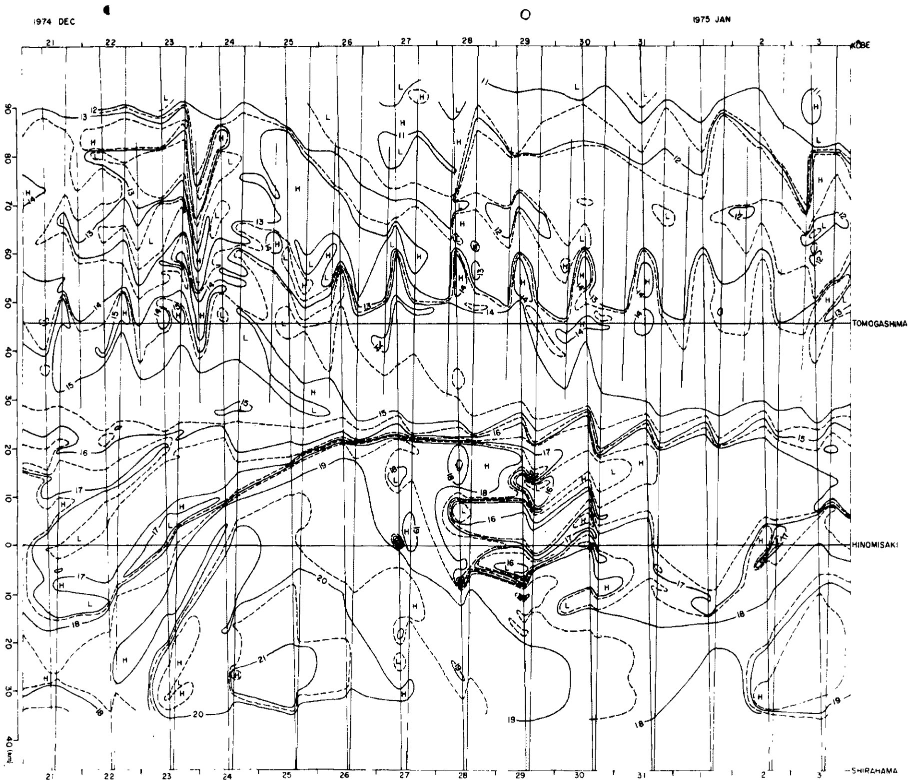

Fig. 14. Change of surface water temperature distribution from Kobe to Shirahama observed by "Katsuura"

道の西側で測られたもの，点線②が「勝浦」によって東側で測られたものである。全体として Front が発達していく時期にあたり，西側の方がより発達していることがわかる。

下図の実線①は「かつら」の記録で室戸岬から高知にかけて測られた最高水温を示し，12月 2 日や29日に顕著に高くなっているのは黒潮の室戸岬への接近を表わしていると考えられる。実線②は同じ「かつら」の記録で伊島から室戸岬にかけて測られた最高水温を示し，12 月 4 日や 26 日に高くなっているのは紀伊水道 Approach の西岸よりに暖水塊があることを示している。点線③は「勝浦」の記録で日ノ岬から白浜にか

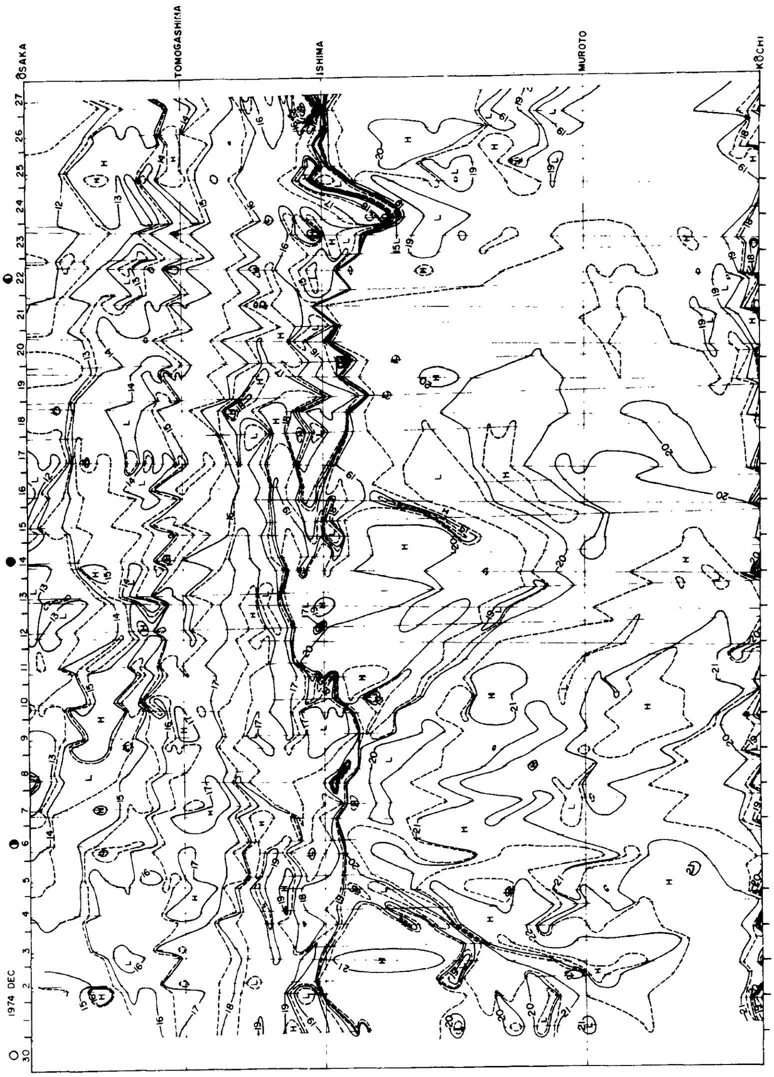

Fig. 15. Change of surface water temperature distribution from Osaka to Kochi observed by "Katsura"

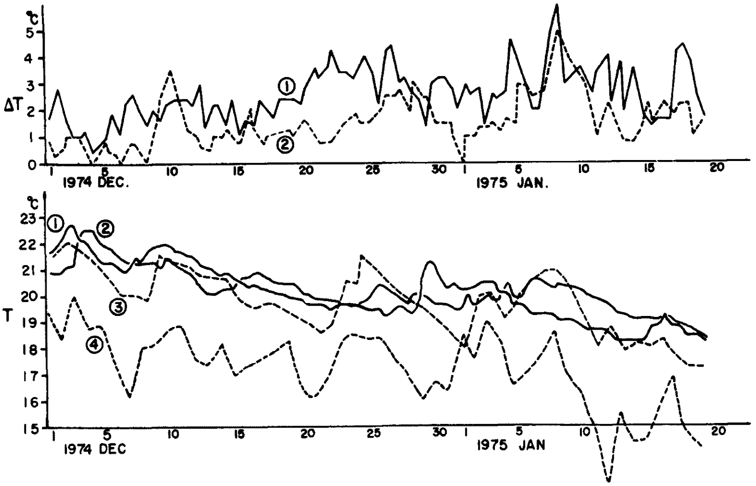

Fig. 16. Change of intensity of the Oceanic Front at Kii Channel and Change of the highest water temperature at the sea area near the Front

けて測られた最高水温を示し，12月9日や24日の顕著な高水温は白浜沖の暖水塊の存在を示している。点線④は和歌山県水産試験場によって串本西岸で測られた沿岸水温を示している。

上図の点線②と下図の点線③④の対応がよいことは，紀伊水道の東側，日ノ岬附近の Front の発達は，白浜沖の暖水塊の存在と密接な関係があり，暖水塊の発生と潮岬の沿岸水温の上昇との対応がよいことを示している。それに比較して上図の実線①と下図の実線①②の対応が点線の場合程よくないのは，西側では Front の発達と暖水塊の存在との関係があまりなく，別の原因があると思われる。

白浜沖の暖水塊の動きが紀伊水道の Front から潮岬の沿岸水温の変化まで影響を与えていることは，田辺湾の海況変動が外洋の海況変動の影響を受けているという，田辺湾の観測結果を裏打ちするものである。実際，白浜沖に暖水塊が出現するや，田辺湾はそれに占拠されて，白浜海洋観測塔の水温の記録が jump を示すことが確認された。

7. あとがき

紀伊水道の Oceanic Front の観測は，その構造を調べる STD 観測と，その変動を調べるフェリーボートによる毎日の水温観測とが中心であった。将来は飛行機や衛星によるリモートセンシングの応用とか，自記流向流速計等による流れの場の実測が期待されている。この論文では，とくに変動にしぼって述べたが，6年前，全く未知の領域を手さぐりで探って，やっとスタート地点である田辺湾の海況変動との関係をつかむところまできた。今後は定量的な肉付けや理論的な把握を進めていく予定である。

長期にわたり，フェリーボートの使用を快諾し，観測に協力していただいた「株式会社大阪高知特急フェリー」と「株式会社神紀フェリー」に心からの謝意を述べたい。計測装置の製作，取りつけに際しての理学部地球物理学教室の田中耕三郎技官と防災研究所附属白浜海象観測所の芹沢重厚技官のていねいな仕事ぶり，毎月たゆまず紀伊水道で海洋観測を敢行し，貴重な資料を送っていただいた徳島県と和歌山県の水産試

験場の方々の御努力，観測成果の解析に際しての理学部地球物理学教室海洋研究室の皆様の熱心な討論，資料整理に際しての白浜海象観測所の片山富晴技術補佐員の協力等に感謝している。

参　考　文　献

1) 速水頌一郎・国司秀明・西勝也：白浜海洋観測塔の設備と二，三の観測記録について，京都大学防災研究所年報，第7号, 1964, pp. 434-453.

2) 土屋義人・国司秀明・吉岡洋・芹沢重厚：白浜海象観測所の現況と観測成果について，京都大学防災研究所年報，第18号B, 1975, pp. 575-587.

3) 吉岡洋：冬期紀伊水道に発生する Oceanic Front について (1)，海と空，第46巻，2号，1971, pp. 1-14.

4) 和歌山地方気象台：和歌山県気象月報.