

白浜海洋観測塔における水温変動について

国司 秀明・西 勝也・由佐 悠紀

ON THE BEHAVIOR OF WATER TEMPERATURE

OBSERVED AT

SHIRAHAMA OCEANOGRAPHIC TOWER STATION

By Hideaki KUNISHI, Katsuya NISHI and Yuki YUSA

Synopsis

Several types of variation in water temperature are found in the continuous thermograms obtained at Shirahama Oceanographic Tower Station. Most of the fluctuations seen in the summer season are considered to be due to internal waves. The most interesting variation is the quick temperature shift which can be commonly seen throughout the year. It suggests that the sea in and near this bay consists of several weak thermal water masses. This situation of the sea is partly supported by the preliminary survey of the horizontal distribution of water temperature made in the summer of 1963.

The net shifts in water temperature which mean the ultimate alternation of water masses are found to occur at intervals of 3 to 16 days. The hypothetical assumption that such water movement is in effect the only process of water exchange between the bay and the open sea is tested from the points of view of the heat budget and of the horizontal diffusion.

The fluctuations in the daily mean water temperature also have the periods of 3 to 16 days, and can be understood mainly to be associated with the above-mentioned process. The causing factor of these phenomena seems to be related to the variations in meteorological state, and the scale or extent of these phenomena is found to be as wide as the whole region of Kii Channel.

1. ま え が き

田辺湾の白浜海洋観測塔における水温の連続観測記録は、いくらかの欠測はあるが、すでに一年以上の集積をみるにいたった。この論文はその記録の全貌とそれを通じて考えられるこのような沿岸海域の基本的構造ならびに過程に関するものである。

考えの要点はすでに前論文¹⁾に一つの仮設として簡単に述べてある。すなわち、塔の建っている田辺湾内外の海水は、少くとも温度的に異なるいくつかの水塊を形成していて、外海からの熱量の供給ひいては外海水との交流の問題には、数日あるいは十数日に一回位の割で起っていると思われる内外の水塊の交代というような過程が重要な役割を果しているとする考えである。この論文には、その後のいくらかの発展をつけ加えたこのわれわれの考えの詳細な展開が示されている。

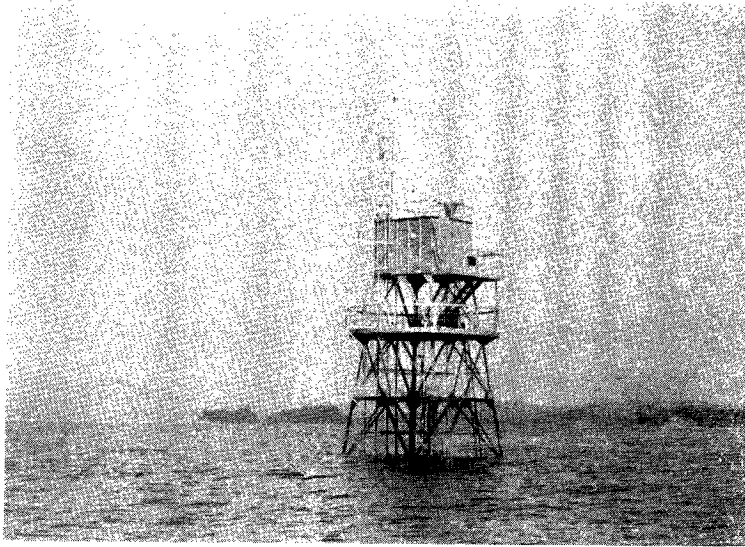


Fig. 1. Shirahama Oceanographic Tower Station.

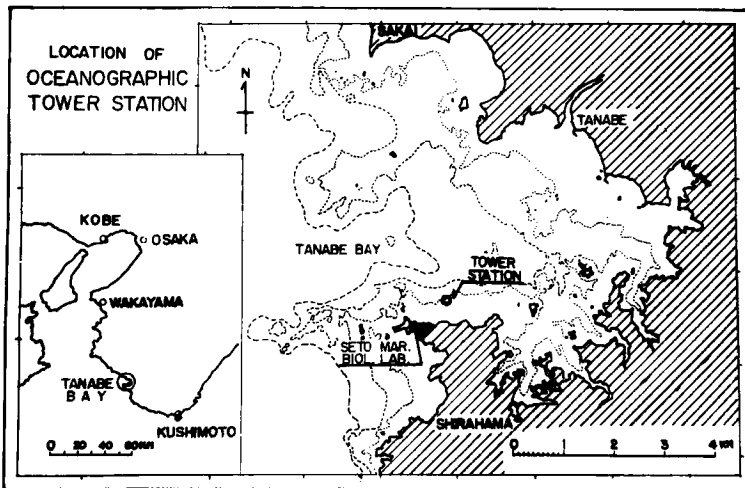


Fig. 2. Location of Shirahama Oceanographic Tower Station.

Fig. 1 と Fig. 2 に塔の外観とその設置位置を示しておいた。水温の観測は現在三層(平均海面下 1.8 m, 3.4 m, 4.7 m)で行なわれているが、この論文で主に取扱われている水温はそのうちの最下層のものである。また気温は平均海面上 4.4 m のものが用いてある。

2. 夏季にみられる水温の変動と内部波

Fig. 3 に1962年8月20日から21日にかけてえられたなまの記録が示してある。記録中最も下方の線が水温である。みられるように、8月20日23時30分頃から21日2時頃にかけて、 24°C から 21°C の間に矩形波を連想させるような数回のいちじるしい振動がある。

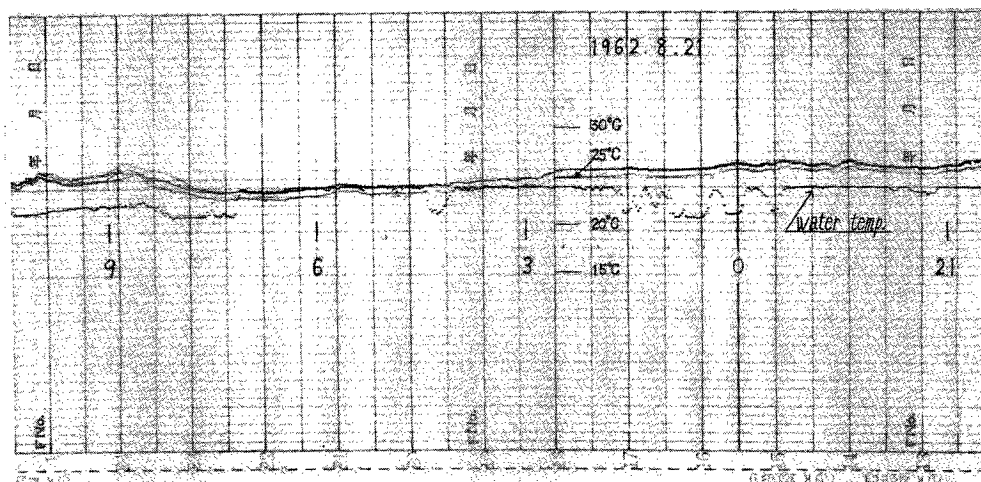


Fig. 3. The marked oscillations in water temperature which occurred in the summer of 1962.

このような水温のはげしい変動は、1953年の夏 La Jolla (California) の有名な Scripps Pier ならびに Occanside Pier においてとられた水温の記録²⁾ とかなりよく似ている。両地点とも水温は上下の二層ではかかれているが、それらの深さはほぼわれわれの場合と同じである。Arthur はこのとき同時にその沖合で行なった B.T. (Bathy Thermograph) 観測の結果などから、そのような変動の主な原因は平均 5~6 m の深さに中心をもつ温度躍層が上下に大きく振動していること、いいかえれば内部波に結びついた等温層の垂直運動に基因していることを示している。

おそらくわれわれの場合も同様であろうと想像はされるけれども、このとき水温はまだ一層だけでしか観測されておらず、またそのほかの特別な観測もないので、にわかに結論はできない。La Jolla の場合は、振巾 5°C におよぶ大きな振動が夏から秋にかけてかなりしばしば起っているようだが、われわれの場合には Fig. 3 の例のような状態はひじょうに稀であって、その後少なくとも1963年中には一度もあらわれていない。しかし1963年一年間の記録を通覧してみると、振巾はずっと小さいけれども、本質的には同じだと考えられる振動が、主として水温の上昇期にあらわれていることに気がつく。まずこの温度上昇期における水温変動の一般的特長についてすこし記述しよう。

この年1963年の水温は1月末に最低に達し、2月から再び上昇に転じている。3月から4月の中旬にかけて欠測しているためそのあたりの事情はよくわからないが、2月や4月の状態から判断すると、おおむね上下の水温は均一に保たれているが、時に表層の温度が上って弱い成層を生じ、しばらくしてそれが消えたり、逆に表層が冷却して対流をひきおこし、そのためと思われる水温の動揺がしばらく続くとか、時には下の方の水温が上って、そのために対流が起っているような場合もあるというようなことをくりかえし、全体としては次第に温度が上昇していくという状態のように思える。

5月初旬から半ばを過ぎると、表面近くの成層状態はややいちじるしくなり、浅い温度躍層が形成され始めたのではないかと感じさせる。これにともなうやや持続的な数十分から数時間程度の周期の不規則な水温の振動が目立ち始める。その振巾はあまり大きくはなく、大きくてもせいぜい 1°C の程度であるが、変動状況の全体的な印象はやや Fig. 3 のそれに似ている。興味深いのは、この頃は上下どちらの水温にも同程度の振動がみられ、しかもそれら相互の間にほとんど位相の相関が認められないことであろう。

このような状態は6月の中旬から下旬にかけていったん消え、上下は一樣な温度に近づき、時には逆転さ

え起るといった状態がみられるが、7月にはいるとまた再びあらわれてくる。6月の中断はおそらく梅雨の影響であろう。7月に再びあらわれたこの変動の状況はそれから8月半ば頃まで持続する。この間次第に下の水温の変動の方が目立ってくる傾向があり、同時に上下の変動位相も全くでたらめではなくなってくるようにみえる。その半面、一連の変動が持続する時間は短くなる傾向があり、全体的にみて水温安定化の傾向がうかがえる。

印象的なのは、8月上旬の終り、8日から11日にかけて、ほとんど全く変動のない数日間のあることだが、この時期はちょうど台風9号による大きなうねりが浸入していた時で、あるいはそれと関連があるのかもしれない。12日にはまた再び変動があらわれ、いくらか前よりも強くなったように感じられる。特長的なのは、この頃になるとはっきりと下方の水温の変動の方が大きく、最上層の水温には変動のあらわれないことがしばしば起ることである。

このような初夏から夏にかけての水温変動状況の推移は、この頃の水温変動が主として Arthur の述べているような内部波機構によって起ったものであり、初夏に生ずる浅い温度躍層が次第に深い層へ移行していく過程と密接に関連していることを示唆しているように思える。La Jolla での観測にくらべて、振巾の小さな振動しかみられないのは、たぶん地理的気候的条件の差のために、ここでは躍層がかなり強く発達する頃には、すでにその深さもかなり深くなってしまっているためではないかと思われる。まだ十分な観測は行なってはいないが、8月下旬の頃、躍層はだいたい 10m より深いところにあるようである。

1963年を通じてただ一回、それも一振動だけ振巾が大きく 1°C をうまわった例がある。それを Fig. 4 に示した。3本の線は上から順にそれぞれ上、中、下の3つの水温である。8月26日の8時半頃から50分程

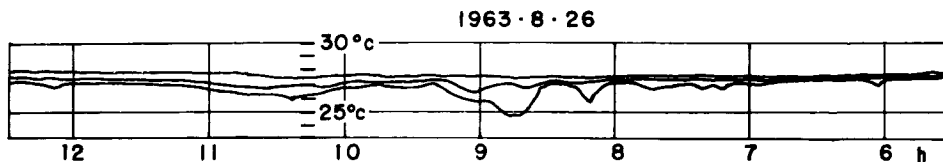


Fig. 4. The large oscillation in water temperature which was only observed during the summer months of 1963.

の間に、下の水温が 27.0°C から 24.7°C に乳房状に下って、再びもとにかえっているのがみられる。その上の水温には多少同様な変動がみられるが、いちばん上の水温にはほとんど何もあらわれていない。このような状況からみて、たぶんこの場合も、それは主として内部波機構によって起ったと考えてよいであろう。おそらく、稀には躍層の 5m 以上におよぶ大きな上昇が台風の擾乱などに関連して起るのである。

夏季に躍層のあることは間違いないことではあるし、Fig. 4 のような例もあるところからみて、Fig. 3 に示した例もたぶん同様なものと考えてよいと思われる。おそらくこの日の前後に相次いで日本を襲った台風12号、13号、14号の影響であろう。ただ Fig. 3 の場合、とくに注意しなければならないのは、最初水温は 24°C のレベルにあるが、夜半からの 21°C レベルとの間の数回のはげしい振動の後、21日7時過ぎ最後に 21°C に落込んでからは、今度はほぼその温度レベルに固着するという一方的な水温の変移がみられることである。

この現象はあるいはそのような大きな内部波が砕けて、岸近くに次第に拡がる冷水の領域を形成するというような過程で起ったのかもしれない。またあるいはなんらかの理由で沖合にそのような冷水の領域があって、それが移動してきたために起ったのかもしれない。いずれにしても、この時の現象は単純な内部波機構だけによって起っているのではないように思われる。おそらく夜半からの数回のはげしい振動の主な理由は内部波によるのであろうが、同時になんらかの理由で水平方向にも温度分布があり、等温層は水平ではなく、どこ

かにかなり強いいわゆるサーマルフロント³⁾ が形成されていて、いいかえれば何か水塊のようなものができていて、最後にそれが移動してきて水温レベルの急速な一方的変移をひき起したのではないと思われるのである。

3. 水温の一方的変移と水塊

前節の終りに述べた水温レベルの一方的な変移の典型的な例を Fig. 5 に示した。上方の2本の線が上から順に平均海面下 1.8 m, 4.7m の水温である。上下とも約2時間に 2.5°C もの温度上昇があって、その前後の水温のレベルを一方的に変化させている。この図では上層の水温の方が全体的に 0.5°C 程高く記録されているが、これは計器較正の不十分なためで、実は上下の水温はほとんど一致しているのである。ただよくみると、変移時にわずかながら上層が先に変移し始めていることがわかる。

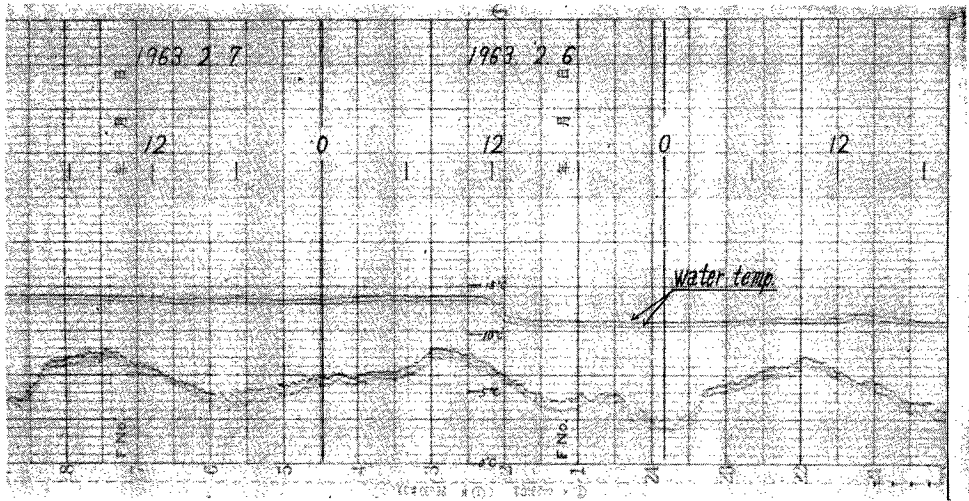


Fig. 5. A typical example of the quick shift in water temperature.

このような水温の一方的変移は、Fig. 5 の例はとくにいちじるしいもので、通常は 0.5°C の程度であるが、実は一年を通じてたえず起っているのである。とくに秋から冬にかけてははっきりしたものが多く、水温下降期の一つの特長を与えている。ここで水温下降期における水温変動の一般的な記述を少ししておこう。

全体的にみて温度下降期の水温変動は少い。とくに9月の海の水温は静穏である。初旬には夏の名残を思わせるわずかな水温のゆるやかなゆれがところどころにみられるが、中旬以後はそれもなく、日変化のような長い周期のゆっくりした振動(振巾 0.3°C 程度)は別として、全く何の変動もみられない日が続く。もちろん、全体として水温はゆっくりと下降してはいるが、このような状態の中に数回、あまりはっきりしたものではないが、1時間位の間には 0.4°C 程の水温の一方的な上昇がみられる。

10月にはいと、ゆるい変動がいくらかみられるようになるが、やはり穏やかと表現できるような状態が中旬過ぎまで続いていて、注意深くみると、夏にみられた表面近くの弱い成層が9月初旬からこの頃にかけて次第に解消してゆく様子がかがわれる。この頃にかなりはっきりした水温の一方的変移が数回起っている。10月の下旬になると、どうやら表面の強い冷却によってやや強い対流が起ったと思われる状況があらわれ、一時かなりの水温の変動がみられる。しかし11月にはいと、それも消えて再び静穏になり、そのまま中旬から12月にかけて、どちらかというといくらか下の方が水温が高いといった状態に次第に移行しながら

ら、全体として水温はさらに下降を続けてゆく。その間にも時々一方的な水温の変移が特長的に見出されるのである。

一方、水温上昇期には、前節に述べたような内部波によると思われる変動がかなりあるために、その中から水温の一方的変移を見出すことはかなり難しくはなるが、なかにははっきりしたものもあり、よく注意してみると、温度下降期には水温の一方的上昇がほとんどであったのくらべて下降の回数が多くなるといった差はあるけれども、やはり同じようにたえず存在していることが認められる。全体を通してこのような水温の一方的変移には、いくらかの例外はあるようだが、水温レベルが上昇する時は上層の水温から順に、下降する時は逆に下層から順に起るといった特長がある。これは前に Fig. 5 の説明の際にもちよっと注意しておいたことで、このような点に留意してみると、水温上昇期のようないろいろな変動の多い時でも、比較的容易にこの種の変移を見出すことができる。

このように比較的急速な水温レベルの一方的変移がたえず存在しているということはひじょうに興味深いことである。われわれはこのことからこの湾内外の海水が通常水塊の構造をとって存在しているのではないかと推測したのである。それは第一に冬季は上下ほとんど水温に差はなく、その原因を垂直方向に求めることは難しいこと、またすでに前節の終りにふれたように、間接的に内部波に結びついている可能性もある夏季の水温レベルの一方的下降の場合でも、直接的には水温に水平方向の分布があって、それが水平方向に移動することによって起ると考えられるからである。

しかもこれらの水温の一方的変移は通常30分とか1時間という程度の短い時間の間に起っており、とくにこのとき大きな流速があったという観測は全くないから、水温の水平分布といってもなだらかな連続的な変化ではなく、いくらかの場所に比較的強い水温の水平方向の勾配が集中的に存在するといったいくらか不連続的な構造をとっていると考えなければならない。つまり、少なくとも熱的にみた場合、この湾の内外はいくつかの水塊のようなものから構成されているとみなければならないのである。われわれは前論文において、このような考えからいくらかの根拠に基いて、そのような水塊は温度差 0.5°C 代表的な長さのスケール 2km 、境界の中 300m 程度と推定した。

すでに前論文で示唆したように、このような水塊構造とその移動という過程は、このような沿岸海域における海況の変動にとって基本的に重要な物理的素過程であると考えられるのであるが、この考えの確立にはなお多くの実証が必要である。まず第一に果してそのような水塊が存在しているのかどうかを実証する必要がある。Fig. 6 はその目的で、1963年の夏に行った予備的な観測の結果である。観測は海面下約 2m の深

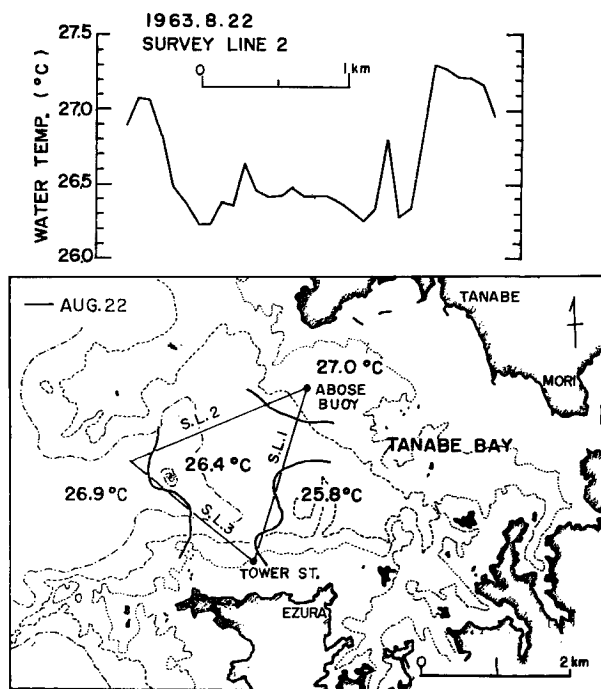


Fig. 6. The result of the preliminary survey of the horizontal distribution of water temperature made in the summer of 1963.

さで水温感部を曳航し、約1時間半の間に図中に細い実線で示した三角形の測線に沿って行なわれた。

同図の上側に一つの測線の観測例が示してある。すぐ目につくことは記録例の両端近くに300~500mに1°C程度のかなり急な水温勾配がみられ、その両側では全体的にみて水温レベルに差があることである。前節に述べたようにこの頃の温度躍層はかなり深いところにあり、内部波によって2m層にこのような温度の水平分布があらわれているとはちょっと考えにくい。そうではなくて、このような水平分布はもう少し定常的なもので、急な水温勾配の場所にいわゆるサーマルフロント³⁾が形成されていて、湾内外の海水が少くとも熱的に異なるいくつかの水塊にわかれた形をとっていると考える方が適当である。平面図に示した太い実線は、そのような考えで、観測記録の急な水温勾配を頼りに、水塊の境を推定してひいたものである。また記入してある水温はそれぞれの領域の観測値の平均である。これからみると、だいたい湾内外はほぼ0.5°Cづつ異なる数箇の水塊から形成されているとみなされる。ただこの1回の観測から水塊構造という考えを全面的に肯定することはなお早計であるかもしれないが、図にみられる水塊の規模、境界の巾、また二つの水塊の間の温度差など、いずれも先に述べた塔での水温記録から推定した値によく一致しており、われわれは実際に湾内外が、季節によってその形、規模、強さなどはおそらく異なるであろうが、このような比較的定常な水塊構成をとっていることはかなり確実なことと考える。次節にも述べるように、水温レベルの一方的変移の中には、たとえば一方的上昇の後1日位の間に一方的下降が起って再びもとにもどっているいくつかの例がある。これは同一境界の逆向きの通過をあらわすものと考えられ、水塊の比較的な定常性を示しているように思われる。

4. 水塊の移動と海水の交流

われわれは前節で、この湾の内外の海水が少くとも熱的ないくつかの水塊の形をとっているであろうという推定と、いくらかのその実証とを示した。われわれが、このような湾内外海水の水塊構造という基礎の上にさらに考えを進めて、そこからなんらかの確実な知識をひきだすためには、それらの水塊の行動に関するはっきりした認識を必要とする。つまり、そのような水塊がいかにして形成され、いかに移動し、いかに消滅するかのいわゆるライフサイクルが追求されなければならない。

現在われわれはその計画を実行中だが、まだ成果をみるまでにはいたっていない。しかし、塔での観測記録からも、水温変化の全体的動向から、水塊の行動に関してある種の印象がえられる。次にこれについて少し述べよう。

問題は前節に述べた水温レベルの変移である。われわれは実際の記録からこれらの変移を見出す一つの技術的方法として、1時間に0.4°C以上の変化があった部分をすべてとりあげ、その一つ一つについて検討する方法をとった。

Fig. 7 は1962年11月頃の水温を、記録の3時間毎の読みとりによって示したものである。参考のために、気圧および気温が同時に示してある。図中の矢印が急速な水温の変化があった場所を示しており、矢印の大きさと変化の大きさを代表させてある。斜の矢印は1時間以上の長時間を要してはいるが、その前後の逆方向の急速な変化とちょうど見合う程度の温度変化があった場所を示したものである。

5日頃の数組の変動は上下の対流によるものと判断されたが、それ以外のものは急速な水温の変移と判断された。しかしその中には、17日頃や22日頃にみられるように1日前後で逆方向の変化が起り、差し引きとしては何も残らない例がある。われわれはこれを一たん水塊が移動して他の水塊と交代したけれども、再び前の水塊にもどったことを意味すると解釈した。矢印の上に○印をつけたものは、そのような対応する逆向きの変化も認められず、正味として残った水温の変移を示したものである。いいかえれば、ここで水塊は完全に交代してしまつたとみなされることとなる。全体的な水温度変化の様子からも、このことの妥当性は首肯されるであろう。すなわち、この○印をつけた矢印のあたりで、水温変化の異った段階にやや不連続的にはいったことが認められ、一方これらの正味の変移と変移の間では、小さな起伏をならしてみると、水温は

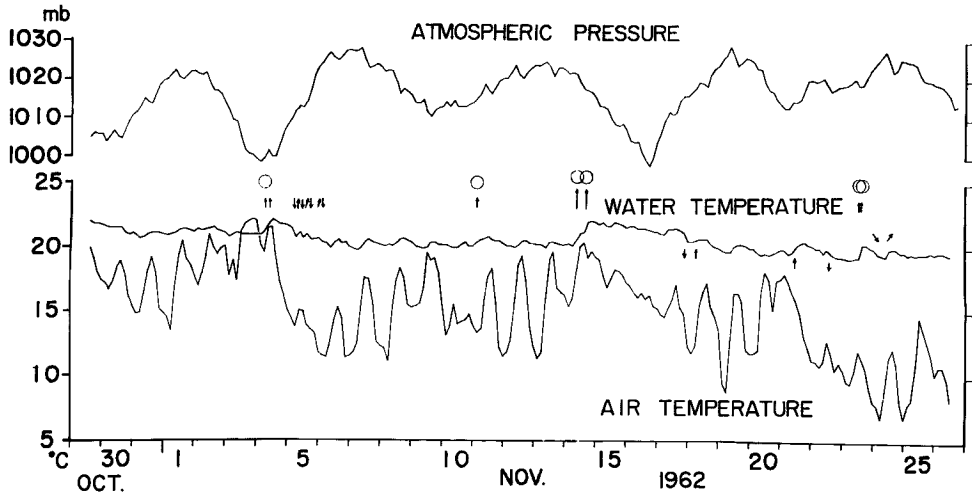


Fig. 7. Illustrations in the net shifts in water temperature.

概して単純な推移をとっているように感じられるのである。

ところで、この頃の水温は外海の方が高いことを考えると、全体的には次第に低下しながら、水塊の移動交代とともにやや不連続的に上昇して、先の低下をくいとめるといった形をくりかえしているこの一連の水温変化の動向は、水塊の移動が単に湾内部だけでの相互的な位置の変化でなく、外海水との交代をともなったもので、外海からの影響は事実上そのような水塊移動という形だけで起っているのではないかという感じを強く抱かせる。これは一つの仮説である。しかし十分実証してみる価値のある興味ある仮説であろう。直接の実証は、この節の最初に述べたように、なお将来の問題である。ここでは間接的ないくらかの評価を示しておこう。

その一つは熱収支の立場からの評価である。Fig. 8 は上に述べた考えで、水塊の移動にともなう水温の変

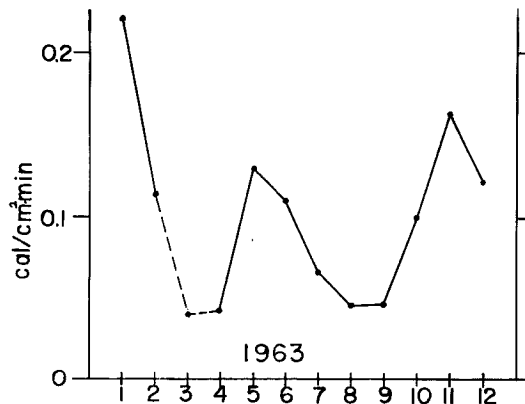


Fig. 8. Estimated heat amount brought into the Tanabe Bay from the open sea based on the net temperature shifts in water thermograms.

移量から計算した外海からの流入熱量を示したものである。海面の単位表面積 (cm²) について周囲から単位時間 (min) に水平にはいつてきた月毎の平均熱量で示してある。この計算の際に、水深はこの湾の平均水深をとったことと、水温の変移量としては、先の正味として残る急速な水温変移の量をそのままとったのではなく、もう少し全体的な眼で、その前後の水温動向から飛躍量を推定して用いたことを注意しておく。

3月 は欠測なので、単なる推測値にすぎない。冬季について5, 6月に多いのが興味をひくが、理由はよくわからない。5月に気温が高く、6月に低いことと何か関係があるかもしれない。ともあれ、この図から年平均では流入熱量 $Q_v=141$ ly/day という値がえられる。

さて、この移流による年平均流入熱量 Q_v は、同じく年平均の蒸発によって失なわれる熱量を Q_e 、対流・伝導によるものを Q_h 、また輻射過程ではいつてくる熱量を Q_r として、

$$Q_v = Q_e + Q_h - Q_r$$

の関係になければならない。 Q_r は短波の形で海にはいつてくる太陽ならびに天空輻射 Q_s と、長波の形のいわゆる有効逆輻射 Q_b との差 $Q_r = Q_s - Q_b$ である。

これらの量は、平均水温 θ_s 、それに対応する飽和水蒸気圧 e_s 、平均気温 θ_a と水蒸気圧 e_a 、平均風速 U ならびに摩擦係数 r^2 、および平均雲量 N を与えて計算することができる。われわれの場合、これらの値はそれぞれ $\theta_s=20.3^\circ\text{C}$ 、 $e_s=23.4\text{mb}$ 、 $\theta_a=17.2^\circ\text{C}$ 、 $e_a=13.6\text{mb}$ (相対湿度70%)、 $U=5\text{m/sec}$ 、 $r^2=1.4\times 10^{-3}$ ⁴⁾、 $N=0.4$ と計算もしくは推定された。なおそのほかに必要な常数の値もあわせて記しておく。すなわち、空気の密度 $\rho_a=1.25\times 10^{-3}$ gr/cm³、空気の定圧比熱 $C_p=0.24$ cal/gr $\cdot^\circ\text{C}$ 、蒸発の潜熱 $L=586$ cal/gr、大気圧 $p=1000$ mb、およびStefan-Boltzmannの常数 $\sigma=0.825\times 10^{-10}$ ly/min $^\circ\text{C}^4$ である。

いま Q_s として Defant⁵⁾ の与えた表 (Table 38) から、田辺湾の緯度 $33^\circ 40' \text{N}$ に対する内挿値 309ly/day をとる。 Q_b としては同じく Defant* の示している Ångström型の式

$$Q_b = \{0.954 - (0.790 - 0.174 \times 10^{-0.041e_a})\} \cdot \sigma T_s^4 \cdot (1 - 0.765N)$$

を用いると、129 ly/day という値がえられる。なお T_s は絶対温度であらわした水温である。したがって、これらから $Q_r=180$ ly/day となる。

次に Q_e は中立大気に関して、風速および水蒸気張力が対数分布をする場合を考えると、

$$Q_e = \frac{0.622}{p} \rho_a L \cdot r^2 U (e_s - e_a)$$

で計算することができ、結果は 270ly/day となる。これは約 5mm/day の蒸発量に相当する。また Q_h は Bowen ratio R

$$R = \frac{Q_h}{Q_e} = \frac{C_p \cdot p}{0.622L} \frac{d\theta/dz}{de/dz} \sim 0.64 \frac{\theta_s - \theta_a}{e_s - e_a}$$

を計算して0.2という値から、54 ly/day となる。これは平板上の強制対流として風速から推定しても、だいたいこの位の値になる。これらの値を用いると、結局 $Q_e + Q_h - Q_r = 270 + 54 - 180 = 144$ ly/day となり、先に推定した Q_v の値ときわめてよく一致する。もちろんこの種の計算は粗いものであって、完全な一致にとくに意味があるわけではない。しかしこのようになりによく合うということは、外海からの影響は事実上水塊交代という形式だけで行なわれているとするわれわれの考えが、そう大きな誤りではないことを意味しているように思われるのである。

もう一つの評価は海水交流の立場からの評価である。われわれはこれまで水温の面からだけみてきたが、この考えは同時に外海水との交流が事実上水塊交代という形式だけで行なわれているとみなしていることにほかならない。次に述べることはこの面からの考察である。

さて、このように実際には不連続的に起っている現象でも、もっと巨視的な立場からみれば、外海との間

* Defant の示している式には誤植があるので注意されたい。

の連続的な拡散あるいは混合の現象とみなすことができる。問題はそのときの水平渦動拡散係数 μ である。われわれの場合、ごく単純に前にあった一つの水塊が外にでて、その代りに外海から一つの水塊がはいってきたと考えると、この等価な混合係数 μ は水塊の代表的な長さ L とその移動の速さ u とから、

$$\mu = u \cdot L = L^2 / T$$

とあらわされる。 T は相次ぐ水塊交代の間の代表的な時間間隔を意味する。

L の値は前に述べたようにほぼ 2 km と推定された。 T の値の推定は Fig. 9 によって与えられる。こ

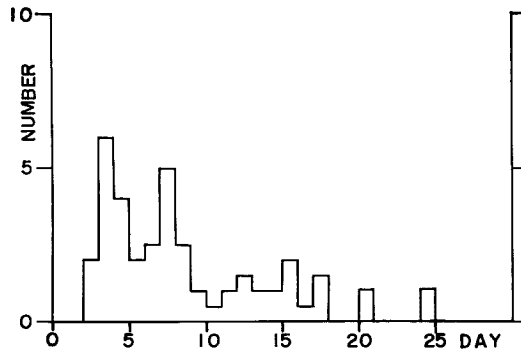


Fig. 9. Histogram on the occurrence intervals of the net shifts in water temperature.

の図は一つの水塊交代が起って次の交代が起るまでの時間間隔に関する統計である。用いたのは1963年末までの全資料で、単位は1日にえらんである。みられるように、この生起時間間隔の値はかなり広く散っているが、3~4日、7~8日、15~16日にいくらかのピークがある。全体の平均値は9.2日である。

いま T として3.5日をとって計算すると、 $\mu = 1.3 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 、9.2日として、 $\mu = 0.5 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{sec}$ となる。後者の値は、これまでのいろいろな量の分布などに関連して普通にいわれてきたこの程度の規模の湾の値としては、いくらか小さいが、そう小さすぎるという程ではない。前者は普通にみられる値である⁶⁾。

一方、いわゆる潮汐混合⁷⁾という考えでは、 μ は潮汐による水の移動距離を L 、平均流速を u 、さらに一回の往復運動で混合する割合を α と書いて、

$$\mu = \alpha u L$$

とあらわされる。この湾の規模 4 km × 4 km、平均水深 20 m、潮差 1 m、さらに $\alpha = 0.1$ ⁸⁾ とし、上から下まで一様に水は動くものと考え、値の最も大きな湾口でも、この μ の値はわずかに $2 \times 10^3 \text{ cm}^2/\text{sec}$ の程度にしかならない。

もちろん実際の事柄はここに述べた程単純ではないであろうから、そのあたりの十分な検討が今後必要だが、上の結果からみると、少くともこの種の沿岸海域では、外海水との交流はこれまで多くの人が簡単に考えていたような潮汐混合なのではなくて、われわれの場合に水塊の移動として認められたような、もっと長い周期の現象に結びついた海水の流動によっているように思われる。われわれが、湾内外の水塊構造とその移動過程がこの種の沿岸海域の海況変動にとって基本的に重要な素過程であると主張するのは、この意味にほかならない。

5. 日平均水温

これまでわれわれは湾内外の水塊構造とその移動様式について述べてきた。われわれはさらにそのような過程と日平均水温との関連ならびに現象の規模についていくらか述べなければならない。Fig. 10 は1963年

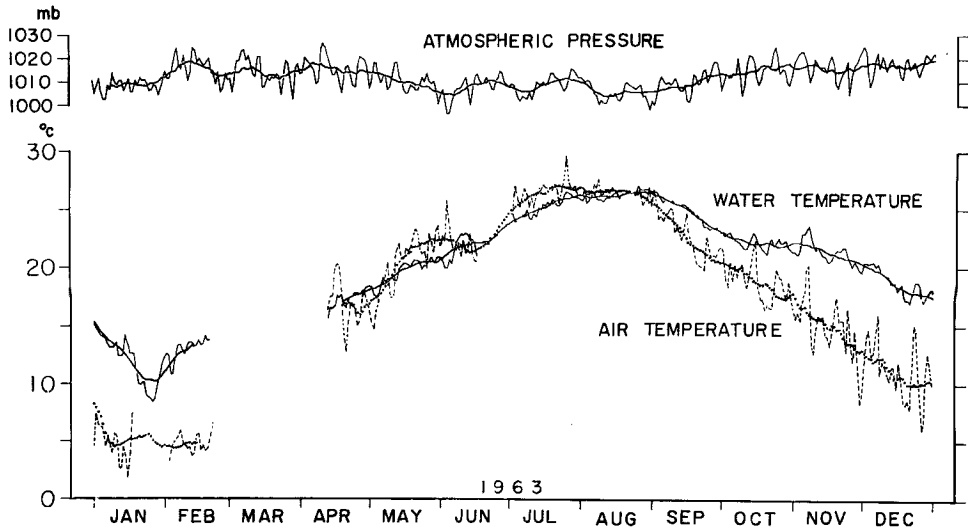


Fig. 10. Daily mean and 15 days' moving average curves of water temperature, air temperature and atmospheric pressure.

一年間の日平均水温を示したものである。下方の多くの振動がみられる実線がそれである。その中を通っているなだらかな実線は、後に述べる15日の移動平均によってひいたものである。気温についての同様な意味のものが破線と点線とで示してある。上方に示した気圧についても同様である。

日平均水温の系列の中にこれまでに述べた水塊とその移動というようなやや不連続的な水温変化の構造を直接見出すことは困難で、系列の全体的な印象は長い周期のゆっくりした変化の上にさまざまな短い周期の振動が重なっているという普通によくみられる形をしている。それでは水塊の移動にともなう温度の飛躍はいったいこの系列の中にどのようにあらわれているのであろうか。いま系列の振動の周期をよく注意してみると、3~4日、7~8日、14~15日位のものがいくらか卓越しているのがわかる。これらの値は前に Fig. 9 で述べた水塊移動の生起時間間隔の卓越値とよく一致している。このことはこの周期的にみえる振動それ自身が実は水塊交代の現象に結びついたものであることを思わせる。

この点をはっきりさせるために、15日の移動平均で曲線を平滑化し、その残りとしてとりだした振動を示したのが Fig. 11 と Fig. 12 である。図があまり複雑になることを避けるためと、あざやかな2週間程度の振動を示すために、さらに7日の移動平均で平滑化したのが Fig. 11 である。平滑にともなう振巾の減少を補うために、周期は14日とみて、係数1.5がかけられていることを注意しておこう。Fig. 12 はその残差で、7日以下の周期の部分とみなされる。両図とも点線の部分はいくらかの欠測のためあまり確実でない部分である。

さて、Fig. 11 の2週間程度の振動はとくに11月などきわめて印象的である。図にはわれわれが先に水塊の交代が起ったと判断した場所を水温飛躍の大きさに比例した矢印で示してある。両者にはよい対応のあるのがわかるであろう。Fig. 12 の方にも同じ矢印が示してあるが、やはり少し振巾の大きな振動にはほとんど対応があつて、Fig. 11 とつきあわせてみると、さらにはっきりその対応をすることができる。また振動の振巾と矢印の大きさともかなりの相関がみられる。

このように日平均水温の振動は、あるいは全部とはいえないかもしれないが、かなりの部分が水塊の移動交代に基因しているとみてよさそうである。もしそうであれば、これらの振動から外海の影響を推定するこ

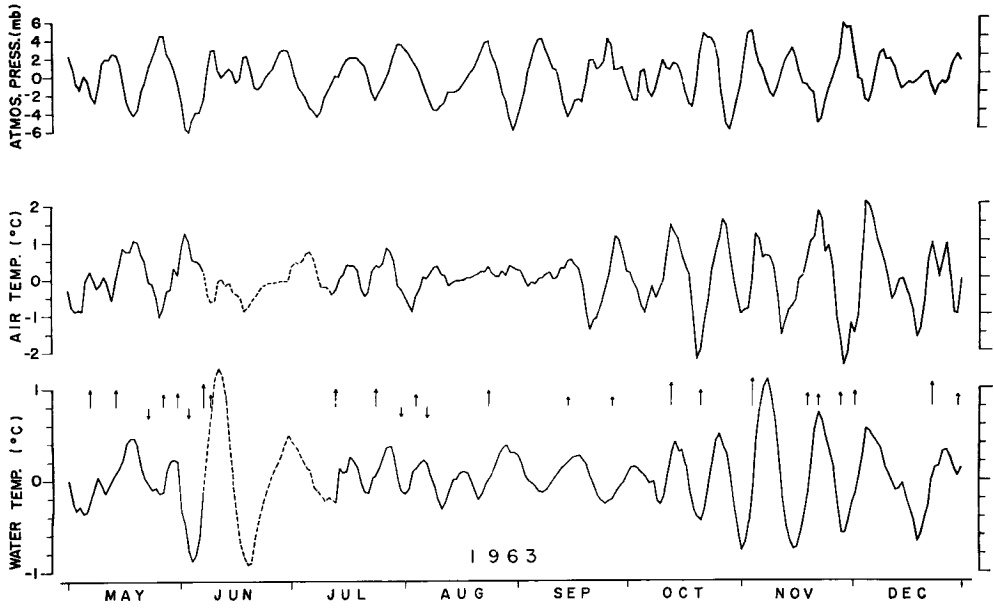


Fig. 11. Fluctuations in the daily mean curves with periods between 7 and 15 days.

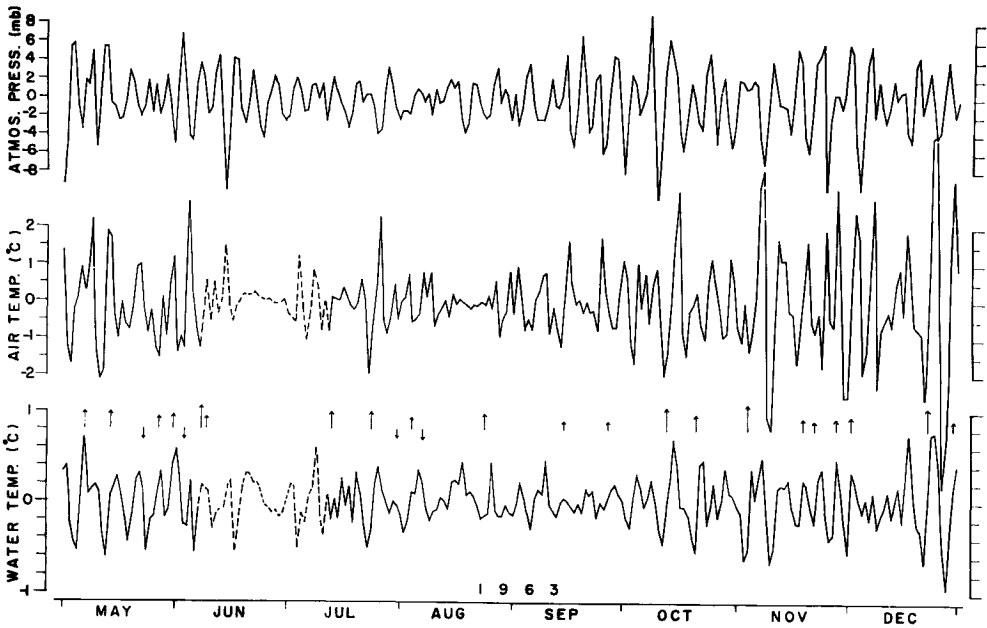


Fig. 12. Fluctuations in the daily mean curves with periods less than 7 days.

とができ、それによって、15日の移動平均曲線のような全体的な水温の変化を理解できるようになるであろう。われわれはこの点を今後さらに追求してゆきたいと考えている。

一方、この水温振動の気温や気圧に対する関係を見ると、これらにもかなりよい対応がある。全体を通じて気温との位相の一致のよいことが眼を惹く。しかし、この気温の変動が直接この水温の変動をひき起したとは考えられない。気温のこの程度の変化で、浅いといっても5m層の海水の水温をこんなに変動させるとはとても考えられないからである。気圧の方にはそのようなよい位相の関係はないようである。これらの点から判断して、気温や気圧との相関で最も重要なのは、要するにそれらの振動の周波数帯がお互いにかなりよく似ている点だと考えられる。

元来6~7日という周期はいわゆる三寒四温で、気象現象の方でよく知られている周期である。実際にも、Fig. 13をみれば、気温や気圧にこの周期のものが卓越していることがわかる。3~4日というのはその倍振動に相当する。14~15日は気象現象では普通あまり問題にされない周期だが、6~7日の半倍振動に相当するわけで、調べてみると、Fig. 11にみられるように、かなりなものが実際に存在しているのである。これらからわれわれは、日平均水温の変動、従って前に述べたことから水塊の移動交代という現象が、気象現象の変動と強く結びついていること、おそらく気象における変動を原動力として起っているのであろうと推測することができる。われわれはまだその機構が具体的に何であるかを知らない。それは今後の問題だが、それらのことを考えていく上に、気温との位相の一致のよいことはとくに考慮すべきことであろう。

このように、もし水塊の移動の原因が気象現象にあることになると、現象の規模はかなり大きなものとなる可能性が多い。またもっと単純に、長い周期の現象は空間的な規模も大きいという考えから、この現象の規模を調べてみることは意味がある。このためにわれわれは、先に述べた顕著な2週間周期のみられる1963年10月~11月をえらんで、Fig. 13に示した5箇所の水温を調べてみた。これらの資料は各地の水産試験所などでとっているだいたい1日1回の表面水温の観測である。1日1回であるためサンプリングエラーが多く、白浜での毎時読取による日平均水温にくらべて質的に劣るのはやむをえない。

それでも同様な処理をした結果はFig. 14に示した通りで、振動の特長はかなりよくあらわれた。これを見ると、三重県英虞湾の浜島はかなり様子が違うようだが、あとは似ている。もっとも、よくみると11月には大瀨から里浦と紀伊水道の奥にはいるにつれて位相が進む傾向があり、白浜と里浦とでは90°近くも位相



Fig. 13. Locations of the observation points in Fig. 14.

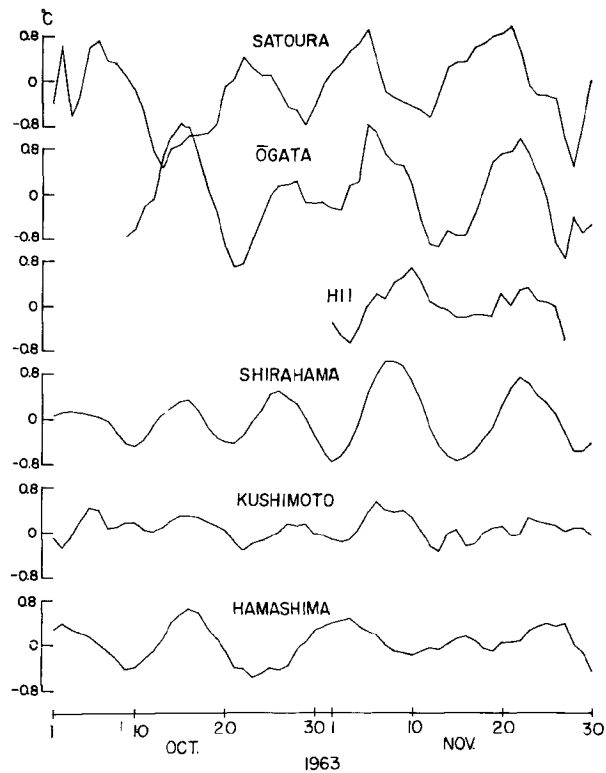


Fig. 14. Comparison of observed fluctuations in water temperature with periods between 7 and 15 days at various places in and near Kii Channel.

差がある。また10月の大潮は白浜と同位相だが、里浦は逆転してしまっている。

このように問題はいろいろあり、資料も十分でなく、とくに紀伊水道開口部の四国側に資料のえられていないのが残念だが、だいたいいおいて、この現象の規模は紀伊水道開口部全域にわたると考えてそう無理ではないように思う。関連があるという意味では紀伊水道全域と考えるとよいかもしれない。いずれにしても、この現象はやはり相当広範囲にわたる大規模な原因に関連して起っているとみるべきであろう。われわれはこれからさらに進んだ推測を行なうこともできる。しかし、水塊形成の理由もその寿命といったものもまだわかっていない現在、この程度以上に推測の歩を進めることはあまり適当だとは考えられない。

6. む す び

われわれはこの論文で、白浜の塔における水温の長期にわたる連続記録をもとにして、田辺湾内外における水塊構造とその移動様式とがもつ意味の重要性を指摘してきた。われわれは事実上数日とか十数日に一回の割で起っている水塊の移動交代という形式だけで外海水との交流が行なわれると考えている。もちろんこれはなお一つの仮設にすぎない。しかしひじょうに重要な仮設である。われわれは現在これを一つの作業仮設として観測および解析の作業を進めている。

この論文を通してそのための手段と方法が明らかに示唆されている。第一は直接観測による水塊の行動の追求である。われわれは1964年に少し広範な調査を行なった。現在その解析が進行中である。第二は熱収支

の立場からの追求である。これに対してわれわれは新たに長波、短波の各輻射計を設置準備中であり、蒸発計も適当に利用してさらに追求する計画である。第三は日平均水温と水塊移動による温度飛躍との相関の追求である。もしこの方法の使えることがはつきりすれば、これまでわれわれが用いてきた方法では、水塊交代時とそれによる飛躍量との決定に、どうしてもある程度主観的な要素のはいりこむのを避けることができる。これに関連してもっと多くの資料から現象の関連している規模を知る作業も続けられるべきであろう。

また塔で観測されている他の量、潮位とかプランクトンとかいったものとの関係も追求されるべきである。とくに潮位や塩分は重要だと考えられるが、思いがけないいろいろな事故のためにまだ十分なことのできないのは残念である。しかしそれらの計器も一つ一つ改良が積み重ねられて、ようやく軌道に乗り始めているから、近い将来にその成果がみられるようになるであろう。

われわれが狙っているのは、沿岸海域なるものはいったい外海とどのような結合をしているのかという問題である。この問題はわかっているようで意外にわからないことの多い問題なのである。黒潮が変動したら、田辺湾はいったいどういう影響を受けるのか。誰もまだ適確にそれに答えうる人はないのである。われわれはこの研究の完成によって、その方向への大きな一歩が踏みだされることを強く期待している。

この論文を終るに当って、研究の道程を通じてたえずわれわれの勇気を鼓舞しつづけてくださり、またその豊富な経験から適切な多くの忠告をいただいた速水頌一郎教授に深く感謝の意を捧げたい。

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、京大防災研年報、第7号、(1964)、pp. 434-453.
- 2) Arthur, R.S.: Oscillations in sea temperature at Scripps and Oceanside Piers, Deep-Sea Res., vol. 2, (1955), pp. 107-121.
- 3) La Fond, E.C.: Three-dimensional measurements of sea temperature structure, Studies on Oceanography 日高教授還暦記念海洋学論文集、(1964)、p. 316.
- 4) 国司秀明：風洞水槽による風波の研究II、日本海洋学会創立20周年記念論文集、(1962)、p. 483.
- 5) Defant, A.: Physical Oceanography, vol. 1, Pergamon press, (1961), pp. 88-94.
- 6) 福尾義昭：海水比重の Knudsen 公式からの偏倚と海洋生産力、日本海洋学会創立20周年記念論文集、1962、p. 398.
- 7) Arons, A.B. and H. Stommel: A mixing length theory of tidal flushing, Trans. A.G.U., vol. 32, (1951), pp. 419-421.
- 8) Hayami, S., Y. Fukuo and D. Yada: On the tidal mixing of sea water through narrow channels, Rec. Oceanogr. Works in Japan, vol. 3, (1957), p. 55.