

白浜海洋観測塔における水温変動について

(第 2 報)

国司 秀明・西 勝也・由佐 悠紀

ON THE BEHAVIOR OF WATER TEMPERATURE OBSERVED AT SHIRAHAMA OCEANOGRAPHIC TOWER STATION (II)

By *Hideaki KUNISHI, Katsuya NISHI and Yuki YUSA*

Synopsis

Several types of the variation with time in water temperature observed at Shirahama Oceanographic Tower Station are presented. The types, *S* and *R*, with a period of several tens of minutes seem to be related with the oscillation of water level seen on the tidal curve. Diurnal change of water temperature is found at 0.35°C in autumn and at 0.69°C in summer near the surface. The rather small values of these are ascribed to the rather large value, about $300\text{ cm}^2/\text{sec}$, of vertical eddy diffusivity. The net shifts in water temperature and the fluctuations with a period of several or ten and some odd days in daily mean water temperature are also described.

1. ま え が き

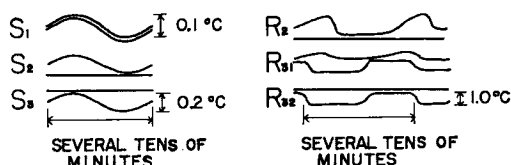
筆者らは以前に白浜海洋観測塔で観測された水温の興味ある変動について報告した¹⁾。この第2報では、さらに広く、この観測塔で1962年来集積されている水温の連続記録について、それを通して認められる水温変動の型を示し、それらのおのおのについて、いくつかの記述と推論とを与える。

2. 水温変動の型

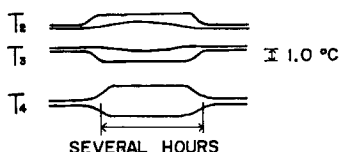
この塔での水温は、時定数数分程度の白金測温抵抗体によって、2分間隔でフルスケール 40°C の記録紙（送り速度 20 mm/H ）上に打点記録されている。その記録上にみられる一年を通しての水温変動の様相は、すでに1963年の記録について前論文¹⁾に記した。その一般的状況は、年によるいくつかの差異を別にとすると、1964年、1965年の記録を通して、ほぼ同様であることが認められ、この塔における水温の変動には、おのづからいくつかの種類のあることがますますはっきりしてきた。

それらを変動の周期の観点で整理配列し、水温変動の型として模式的に示したのが Fig. 1 である。一つの型が二本の線で示してある場合は、上の線が上層（平均海面下 1.8m ）、下が下層（平均海面下 4.7m ）の水温に対応している。また変動の大きさの概念を与えるために、適宜代表的な温度の変化巾を示してある。次節以下にこれらの型のおのおのについて順を追って述べていく。

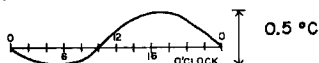
• OSCILLATION WITH A PERIOD OF SEVERAL TENS OF MINUTES



• VARIATION WITH A PERIOD OF SEVERAL TO TEN AND ODD HOURS



• DIURNAL CHANGE



• QUICK SHIFT



• FLUCTUATION WITH A PERIOD OF SEVERAL TO TEN AND ODD DAYS



Fig. 1 Type of the time variation in water temperature observed at Shirahama Oceanographic Tower Station.

3. 数十分周期の変動

夏季にはしばしば数分から十数分程度の周期の不規則な水温の動揺が認められるが、これを別にすると、年間を通じて数十分程度の周期の変動のあることが目につく。それらは形の上で Fig. 1 に S と記した正弦波動的な振動と、 R と記したやや不規則な矩形波動的な変動とにわけることができる。 S の型の振動は水温変動の少ない日が続いている時期にとつぜん現われ、およそ4, 5時間継続するという場合が多いが、その振巾は冬季で 0.1°C 、暖かい季節でも 0.2°C の程度の小さなもので、水温記録上のかすかなゆれとして認められるものである。一方 R の型の変動は、時にただ一回とつぜん現われることもあるが、数時間から1日以上にわたって断続的に続くことが多く、その振巾ももっと大きくて、概念的にいうと 1°C の程度である。

Fig. 2 はこれら S および R の型の変動が季節的にどのように出現するのかを示すために、1965年の記録についてとられた統計である。一見して R の型は夏季に特長的な型であることがわかるであろう。 S の型は年間を通して存在するが、型の中の細分に立入ってみると、下層だけに振動のみられる S_3 の型は R の型と同様に夏季に特長的で、それとは反対に上下両層が一しょに振動している S_1 の型は冬季に特長的な型であることがわかる。要するに S_1 だけが冬季に卓越して現われ、それ以外はすべて夏季に現われる変動だといいうことができる。

Fig. 2 Monthly distribution of occurrence of the type *S* (upper) and the type *R* (lower) oscillation.

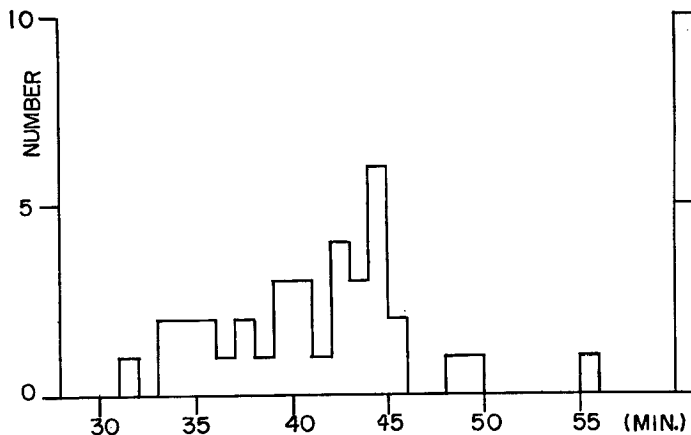
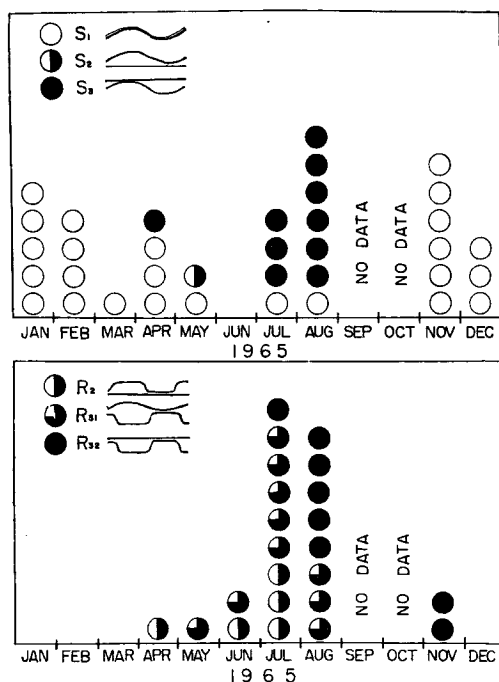


Fig. 3 Histogram on the period of the type *S* oscillation.

Fig. 3 は同じ1965年の資料についてとられた *S* の型の振動の周期に関するヒストグラムである。みられるように、その周期は35～45分の程度で、この周期が同時にこの塔で観測されている潮位の記録に卓越してみられる水位振動の周期と似ていることが興味をひく。たぶん *S* の型とくに *S*₁ の型の振動はこの副振動的な水位変動ともなう海水運動に起因しているのであろう。それはこの水位振動の振巾がほぼ 40cm の程度で、これに対して水平方向にはこの塔のあたりで 80m 程の海水の移動が起ると考えられ、冬季水温が垂直方向に一様な場合でも、水温に 0.1°C/100m 程度の水平分布があれば、0.1°C 程度の振巾の水温変動は可能であって、その可能性は十分考えられるからである。暖かい季節でいくらか振巾が大きくなるのは、それ

に水温成層の効果が加わるのであろう。

S_2 , S_3 の型は後の R の型とも関連して、必ずしもこの水位振動にともなう海水運動だけに起因しているのではないかもしれないが、水温の垂直勾配が S_2 の型がみられる夏季にはいりかける頃では上層で、また S_3 の型がみられる夏季では下層で大きいとみられるから、水位振動にともなう海水の垂直運動によるのが自然であろう。振巾が小さく周期が似ている点で、その可能性が多いように思える。要するに S の型は潮位記録に卓越してみられる周期40分程度の副振動的な水位振動にともなう海水運動に起因している可能性が強い。なおこの水位振動にみられる40分という周期は、田辺湾の固有副振動（大きく見積っても23分の程度）の周期よりたいへん長くて、それ自体たいへん興味ある問題であることを付記しておこう。

一方 R の型は、上層だけに変動のみられる R_2 の型が、 S_2 の型と同様夏季でも早い時期に現われており、ついで $R_{3,1}$ の型が多く現われ、最後に $R_{3,2}$ の型が多くなってくる。とくにはっきりしたものが多いのは $R_{3,2}$ の型で、その水温の変化は数分の間に $0.7 \sim 1.5^\circ\text{C}$ 、時には前論文²⁾に示した例のように 3°C にもおよぶことがある。 S の型と異なるとみられるのは、単に振巾が大きいというだけでなく、波形が歪んで矩形波的な様相をおび、現われ方もかなり不規則になる点にある。しかし R_2 の型は振巾もそう大きくはなく、波形もそれ程歪んではいないから、これはあるいは S_2 の型の延長と考えた方がよいかもしれない。 R_3 の型の方は S_3 の型の単純な延長とみるのは少し無理で、変動の周期は S_3 の型よりはるかにばらつきが多く、矩形波的なその形からみて、やはり前論文²⁾に述べたように、R. Arthur²⁾ や O. S. Lee³⁾ の述べているような内部波によるものとする方が自然である。ただ全体的にみると、やはり S_3 の場合と周期が似ていることが認められるから、全く S_3 の型と無関係とみるのも不自然で、なにか水位振動が同じ周期の内部波を誘発する機構があるのではないかと思われる。おそらく逆に、 S_3 の型にも、そのようにして誘発された内部波の効果がつけ加わっているのであらう。

この節に述べたこれら数十分周期の変動に関するいくつかの推論は、今後の精細な観測とその分析によって解決可能な問題であって、それらは今後に残された興味ある問題の一つである。

4. 数時間から十数時間周期の変動

前節に述べたような比較的短い周期の変動のほかに、数分間から十数時間にわたって水温の変化が継続する現象がある。この種の変動にはさまざまな型があるが、たいていは後に述べる非周期的な変動の組合せと考えられる場合が多く、主に春から夏にかけてみられる Fig. 1 に T と記した変動だけがいくらか特別であるようにみえる。このなかでは T_2 , T_3 の型が多く、ごく稀に T_4 の型がみられることがあるが、これはむしろ例外的である。

Fig. 4 にこの型の実例の例を示す。5時間程下層の水温が約 1°C 下がっているのがみられるであろう。この型の変動は、Arthur²⁾ によって示されたように、潮汐による水温躍層の上下運動に起因したものである可能性がある。もしそうだとすると、潮位と水温は逆位相、この例では6時頃満潮であると考えられることとなるが、この日の潮汐をみると、4時頃に満潮、10時頃に干潮となっていて、あまりよく一致しない。他の例について調べてみても、そのような潮汐との関係はあまりはっきりせず、この変動が単純な躍層の潮汐による上下運動によるとは考えにくい。しかしこの型の水温変化の継続時間は3~5時間とか、15~18時

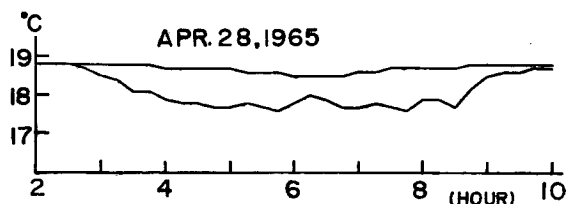


Fig. 4 An example of the type T variation.

間位であることが多いことをみると、潮汐と全く無関係ではないように思える。後の6節に少しふれてあるように、この型も後の非周期な変動の特別な場合であるという風にもみられるが、水温変動と潮汐との関連をもっと詳細に調べるだけの資料がまだ得られていないので、これ以上の推論はさしひかえたい。

5. 水温の日変化

この塔での水温観測記録に日変化のあることは、早い時期から気付かれていたが、それはそう大きなものでなく、前論文²⁾にも記述してあるように、その振巾は秋で 0.3°C の程度とみられる。この値は岸近くでの観測値としてはかなり小さく、むしろ奇異な感さえもたれたのであるが、これまでもっと詳細な日変化の様相や何故そのように振巾が小さいかの理由などには、なお全くふれることができないままに残されていた。これらの点を明らかにするために、1963年の秋から初冬の期間と、1965年の夏の期間とについて、毎日の水温をそのまま重ね合わせるという方法によって日変化をとりだしてみた。その結果が Fig. 5 である。

明らかに変化は日周的で、水温の最低は6時頃、最高は15~17時に起っている。最高の現われ方は夏の場

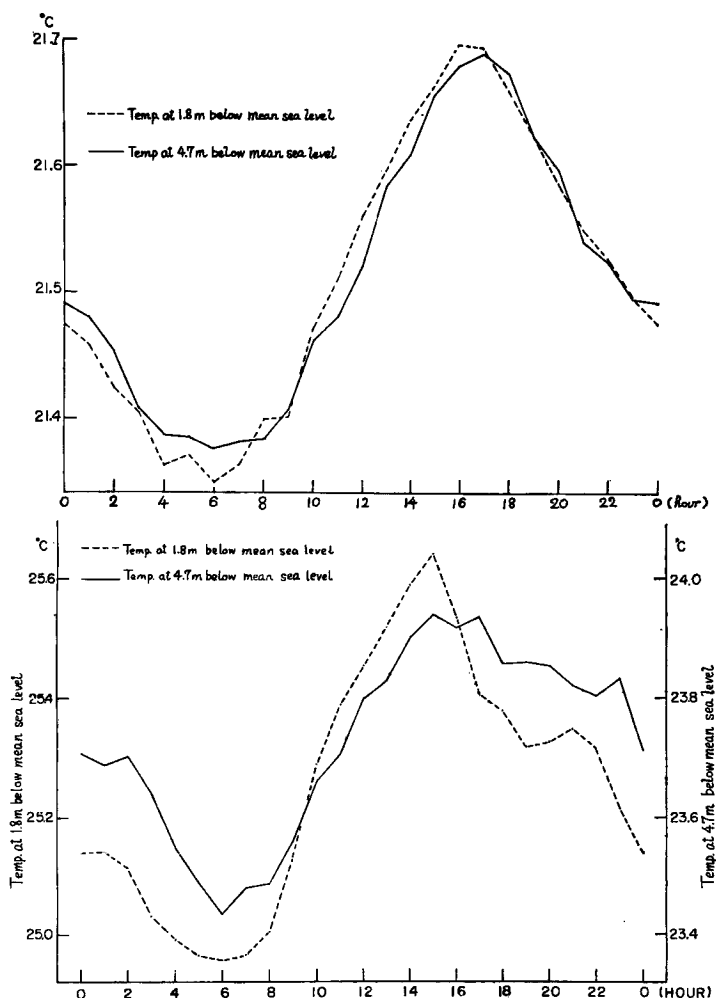


Fig. 5 Diurnal change of water temperature in autumn (upper) and in summer (lower).

合の方がいくらか早いようである。一方振巾の方は、秋から初冬にかけての場合、上層（平均海面下1.8m）で 0.35°C 、下層（平均海面下 4.7m）で 0.31°C であって、先の推定値とよく一致している。夏の場合にはそれより大きく、上層で 0.69°C 、下層で 0.51°C であるが、やはり沿岸の値としてはかなり小さく、それらの値は南方定点や北方定点ではかれた外洋での値と同じ程度である。

このように日変化の振巾が小さいということは、このあたりの海況がかなり外洋的な性格をもつことを意味するものと考えられるが、そのことに関連して、それら上下両層の日変化から、それぞれの時期の平均的な垂直渦動拡散係数の値を求めてみることは興味深い。すなわち、上下両層の日変化曲線を近似的に正弦曲線とみなし、現象が表面から垂直方向の渦動拡散係数 K のみによって運ばれると仮定すると、深さ z_1, z_2 の任意の二層 ($z_2 > z_1$) における振動の振巾の比 r と位相の差 δ とは、浅い方の層 z_1 を基準にして、それぞれ

$$r = \exp\left[-\sqrt{\frac{\omega}{2K}}(z_2 - z_1)\right], \quad \delta = \sqrt{\frac{\omega}{2K}}(z_2 - z_1) \dots\dots\dots (1)$$

と与えられる。ここに ω は正弦波的振動の角周波数である。

この関係によって、上下両層の振巾の値から垂直渦動拡散係数 K および位相の時間差 δ/ω を求めると、秋から初冬の場合で、 $K=330\text{cm}^2/\text{sec}$ 、 $\delta/\omega=22\text{min}$ 、夏の場合で $K=270\text{cm}^2/\text{sec}$ 、 $\delta/\omega=25\text{min}$ となる。全体的にみて位相の時間差もだいたい合っているから、得られた拡散係数の値もほぼ実際に近いものと考えてよいであろう。成層して安定な夏の場合の方が係数の値が小さいこともつじつまが合っているが、それよりも内湾では普通の値が $1\sim 10\text{cm}^2/\text{sec}$ の程度といわれているのにくらべて、はるかに大きいことが注目される。このように垂直拡散係数の値が意外に大きいということが、日変化を小さなものとしている大きな原因だと考えられるのである。

6. 非 周 期 変 動

この塔での水温記録には、これまで述べてきたようなある程度の周期性をもった変動のほか、一見全く様相の異なる変動がある。この変動は多くの場合十数分という短時間のうちに水温が急速に上昇あるいは下降して、もとにもどらない現象である。著者らはこれを水温の一方的変移となづけ、その原因はいわゆるサーマルフロントの通過で、このとき湾内外の海水が大きくいれかわることを意味し、実質的な湾内外海水の交流はほとんどこの大規模な海水の移動交代によるのではないかとこの考えを前論文¹⁾に詳しく述べてきた。ここではこの現象の現われ方に関するいくつかの補足をしておこう。

この現象はその後1964年、1965年を通してやはりたえず起っていて、決してある年だけに限った現象ではない。Fig. 6 に1965年の1例を示しておく。水温の一方的上昇の場合は、上層の水温の方が下層の水温より一般に早く上昇し、下層の水温は通常数分程度遅れて上昇する。しかし時には Fig. 6 の例のように数時

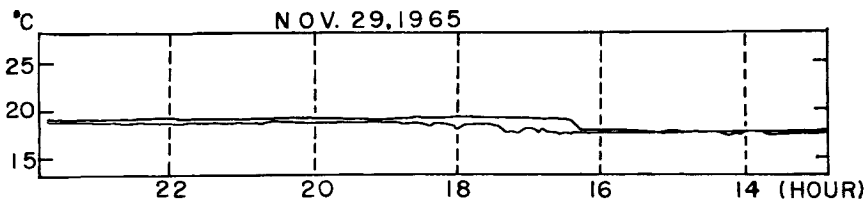


Fig. 6 An example of the quick shift in water temperature.

間も遅れて上昇する場合もある。この場合下層の水温にしばしば十数分から数十分程度の振動のみられることが多い。水温の一方的下降の場合は逆に下層の水温がまず急に下降し、上層の水温がそれに続いて下降するが、その下降の仕方はどちらかというところゆるやかなことが多く、やはり振動をとまなう場合が多いことを

述べておこう。なおこのように一方の水温がかなりゆっくり変化する場合もあることから、4節に述べたTの型もこの型の変動の特別な場合と考えられる可能性のあることを付け加えておこう。

すでに前論文¹⁾にも述べたように、このような変動には数時間後ないしは1日程度の間にもとにもどってしまうものと、そうでないものがあり、著者らはその後者だけを水温の一方的変移としてとりあげている。それは Fig. 7 にみられるように、そのような基準でとりあげた水温の変動が、全体的な水温変化の動

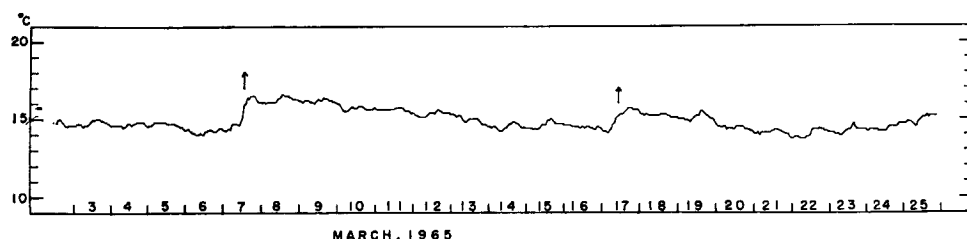


Fig. 7 Relation between the general trend of water temperature and the net shifts in water temperature.

向におけるなにか異質的なものへの変化のよい指標になるように見えるからである。図中の矢印がそのような水温の一方的変移が起った場所を示し、そこで水温の全体的な変化の様子が明らかに変わっていることに気付かれるであろう。われわれはこの点から、この一方的変移の現象が海水の交流に重要な関連があると考えているのである。

Fig. 8 はそのような水温の一方的変移の起る月別の頻度を 1963～1965 年の資料について調べたものであ

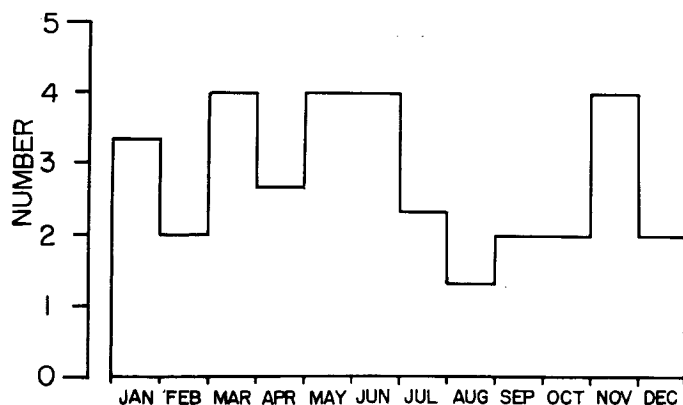


Fig. 8 Monthly distribution of occurrence of the net shifts in water temperature.

る。みられるように、どの月に特別に多く起るということはないようである。また Fig. 9 はこの現象の生起時間間隔に関するヒストグラムである。年によるいくつかの差はあるが、やはり 3～4 日、7～8 日、14～15 日位にいくつかのピークが認められる。

7. 数日から十数日周期の変動

これまで述べてきた変動とはいくらかカテゴリーが異なるが、日平均水温をとると、その系列には年変化の上に数日から十数日周期の変動がのっているのがわかる。このことは 1963 年について前論文¹⁾に詳しく記述し、この変動が前節に述べた非周期的な水温の一方的変移と関連のあることを指摘した。

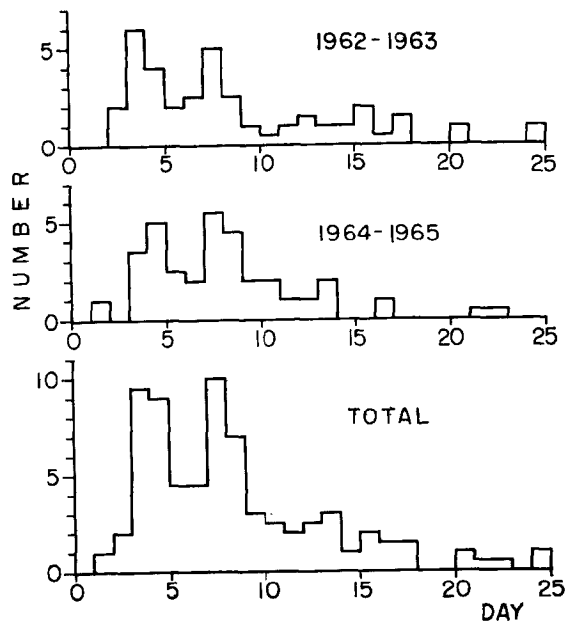


Fig. 9 Histogram on the occurrence interval of the net shifts.

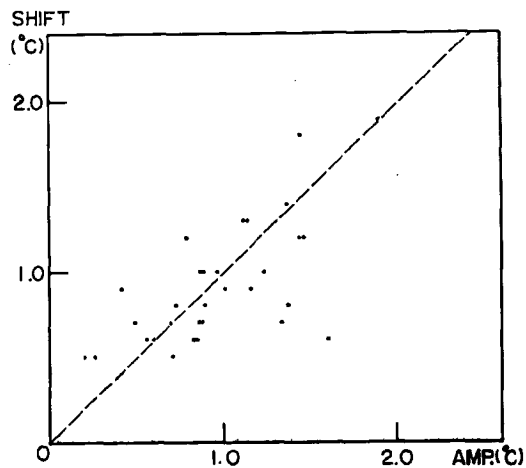


Fig. 10 Correlation between the net shifts in water temperature and the amplitudes of fluctuations in daily mean water temperature.

1964年, 1965年についてもことがらは同様であって, この種の変動と水温の一方的変移とは明らかに関連がある。Fig. 10 はその関連の程度をみるために, 試みに変動の振幅と水温の変移量との相関をとってみた図である。縦軸が一方的変移から推定された水温のシフトの量, 横軸が振幅である。点は少し散ってはいるが, かなりの相関のあることが認められるであろう。実はこの相関のとり方はやや無思慮にやりすぎたき

らがあるので、もう少し一つ一つ丹念に対応を調べてやり直せば、さらに相関はよくなるものと思われる。

8. む す び

この論文で著者らは白浜海洋観測塔における水温の変動にいくつかの型があることを示してきた。そのなかで *S* 型および *R* 型とした数十分程度の周期の変動は、潮位記録に卓越してみられる副振動的水位振動と関連がありそうにみえることを指摘した。

T 型とした数時間から十数時間周期の変動は、潮汐となんらかの関連にあるように思われるが、なお明らかでない。潮汐は水温成層の存在する季節に半日程度の周期の水温振動をひきおこす可能性があるが、まだこの点を明らかにする十分な資料が得られていないので、*T* 型の問題と合わせて、さらに今後の研究にゆだねたい。

日変化の様相はかなり明らかにすることができ、垂直渦動拡散係数がかなり大きいことが、その振巾を小さなものとしている原因であると推論された。

このようにしていくつかの点でこの塔における水温変動の研究は前へ進められたが、同時に変動のなかで最も興味があるのは、やはり非周期的な水温の一方的変移と日平均水温についてのもっと長周期の変動とであることが痛感された。今後意を改たにしてこの点を深く追求したいと考えている。

参 考 文 献

- 1) 国司秀明・西 勝也・由佐悠紀：白浜海洋観測塔における水温変動について，京大防災研年報，第8号，(1965)，pp.479—493.
- 2) Arthur, R.S.: Oscillations in sea temperature at Scripps and Oceanside Piers, Deep-Sea Res., vol.2, (1955), pp.107—121.
- 3) Lee, O.S.: Observations on internal waves in shallow water, Limnol. Oceanog., vol.6, (1961), pp.312—321.