



Title	沿岸域における季節水温躍層の周期的変動と微細水温分布の観測
Author(s)	小賀, 百樹; KOGA, Momoki; 金成, 誠一 他
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 50, 15-32
Issue Date	1988-02-25
DOI	<a href="https://doi.org/10.14943/gbhu.50.15">https://doi.org/10.14943/gbhu.50.15</a>
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/14188">https://hdl.handle.net/2115/14188</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	50_p15-32.pdf



## 沿岸域における季節水温躍層の 周期的変動と微細水温分布の観測

小 賀 百 樹\*・金 成 誠 一

北海道大学理学部地球物理学教室

(昭和62年7月28日受理)

### Observations of Periodic Motions of the Seasonal Thermocline and Vertical Fine Structures of the Temperature in a Coastal Zone.

Momoki KOGA\* and Sei-ichi KANARI

Department of Geophysics, Faculty of Science, Hokkaido University

(Received July 28, 1987)

Variations of the seasonal thermocline in the coastal zone of 50 m depth, 6 km off Yoichi coast in Ishikari Bay were observed with a meteo-oceanographic spar-buoy system for two months from July to September, 1984. The spar-buoy system consists of meteorological sensors at the head of the spar (3.25 m above the sea surface) and a 11-layer thermister chain (depth between 20 m and 40 m) attached to the lower end of the immersed spar. An energetic spectral peak of the thermocline oscillation occurs at the diurnal frequency which correlates the diurnal surface tide. Thermocline oscillations of near inertial period (17.4 hours) also sometimes occur, which are well correlated to the passage of storms. Concentrated observations of the fine vertical structures of temperature, three times a day, were also made for two days near the buoy station with CTD and XTGP (Expendable temperature gradient profiler) in relation to the principal oscillation of the thermocline. An additional data by a thermister chain of a short sampling interval (1 minute) for three days in September, 1983 were also analyzed. The results show the detailed features of the turbulence of the upper mixed layer and the thermocline structure in relation to the principal oscillation of the thermocline. The additional data also show that the frequency spectra of the isothermal displacement at high frequencies near the Vaisala frequency obey approximate  $-3$  power law, which is somewhat a different spectral law from that of the canonical Garrett-Munk spectrum.

---

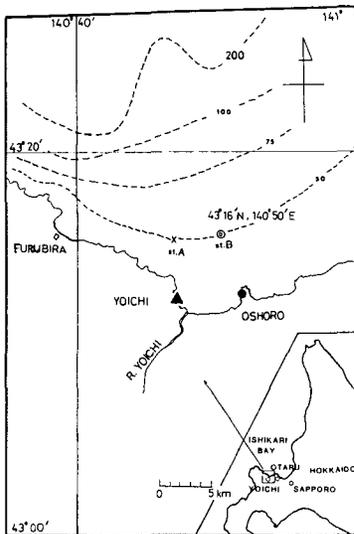
\* 現所属：琉球大学理学部海洋学教室

\* Present affiliation : Department of Oceanography, Ryukyu University

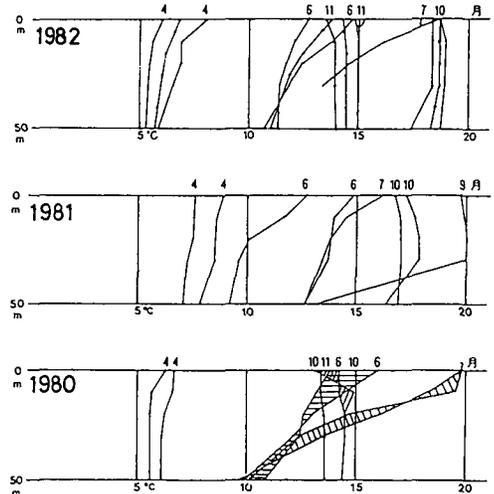
## I. はじめに

沿岸域の海洋混合層と季節水温躍層の変動過程を明らかにすることを目的とし、石狩湾西部海域の余市沿岸(Fig. 1)において、係留系を中心として、CTD、XTGP(Expendable Temperature Gradient Profiler)を適宜使用した海洋観測を行った。Fig. 2は同海域(Fig. 1, st. Aの近傍)における水温鉛直分布の季節変化を示す。資料は北海道中央水産実験場の春・秋を中心とする定期海洋観測(北海道, 1983)により得られた。海表面は春から夏にかけ徐々に加熱され7月までは水温の鉛直勾配は増大していく。8月は測定例がなく不明であるが、9月には秋季の大気側からの海面冷却の効果により徐々に表面混合層が形成され、時には混合層内にゆるやかな水温逆転が存在する。当海域では水深が浅いこともあり、10月になると混合層はほぼ海底に到達し、一様な水温鉛直分布となる。

本観測は、1984年の混合層の形成が見られる夏期から秋季にかけて、Fig. 1のst. Bにおいて行われた。日平均化した混合層の変動過程の解析については、大気側との熱収支を考慮したモデルを含め、すでに金成・小賀(1985)に報告した。しかしながら、当海域では他の沿岸域でも比較



**Fig. 1.** Location of observations off Yoichi coast in Ishikari Bay. St. A indicated by  $\times$  is the position of a thermister chain mooring in 1983. St. B indicated by  $\odot$  is the position of a spar-buoy system mooring in 1984. Solid triangle and circle indicate the positions of Hokkaido Chyūo Fisheries Experimental Station and Oshoro Tidal Station, respectively. Bottom contours are given in meters. The 200-m isobath corresponds to the line of the northern shelf break.



**Fig. 2.** Seasonal change of the temperature profile near St. A off the Yoichi coast. Numbers at the top of each temperature profiles indicate the months of observation. (From Hokkaido, 1983).

的によく見られるように (例えば, Matsuyama, 1985), 水温躍層には半日ないし1日周期程度の卓越した変動が重畳しているが, それらの特性についてはふれられなかった。本報告では, それらの変動特性について述べるとともに, 係留観測と平行して行われたCTD及びXTGPによる水温の微細鉛直分布の測定結果についても述べる。また, 1984年の観測に先立って行われた1983年9月の予備観測の結果についてもふれる。予備観測 (Fig. 1, st. A) ではサーミスタ・チェーンのみを係留し, 気象要素の測定は行わなかったが, 水温データのサンプル時間間隔は1分 (1984年の観測では30分) と短く, ごく短周期の水温変動を調べるにはつごうがよい。

## II. 測定気象要素と水温変動の特性

Fig. 3はスパー・ブイ (spar buoy) 係留システムにより得られた測定結果である。観測は Fig. 1, st. Bにおいて, 1984年7月20日から9月20日まで行われた。30分おきの測定値がブイ・システムに内蔵されたデータ・ロガーに記録される。ブイ・システムと係留方法の詳細は, 金成・小賀 (1985) に述べたので省略する。気象要素の測定はスパー・ブイ先端 (海面上3.25 m) に取り付けられたセンサー群によってなされる。Fig. 3(a), (b), (c), (d), (e)にはそれぞれ, 風速, 風向, 日射, 大気圧, 気温の時間変化を示す。スパー・ブイ下端にはサーミスタ・チェーンがつるされ,

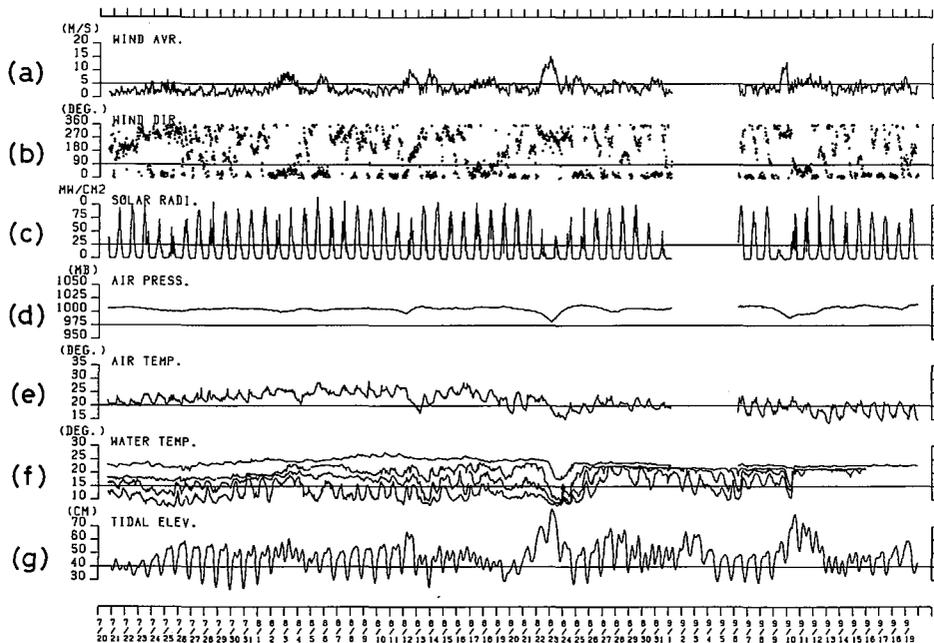


Fig. 3. Time series of the meteorological and oceanographical data obtained by the spar-buoy system at St. B from July 20 to September 20 in 1984. Curves in (f) are selected time series of water temperature at 1 m, 20 m, 30 m, 40 m depth, respectively. The data were obtained at intervals of 30 minutes. The time series (g) is the tidal elevation observed at Oshoro Tidal Station.

水深 20 m から 40 m まで 2 m おきに 11 点で水温が測定される。Fig. 3(f)には温度の高い順にそれぞれ、水面下 1 m にセットした水温センサによる水温，サーミスタ・チェーンによる水深 20 m, 30 m, 40 m における水温の変化を示す。Fig. 3(g)には忍路検潮所 (Fig. 1 の黒丸印) における潮位の時間変化をあわせて示す。

### 1. 測定気象要素の特性

日射及び気温には明瞭な日変化が見られる。気圧及び風速の変化には、約 2 ヶ月の係留期間中に何回かの前線や低気圧の通過がうかがえる。

Fig. 4 はスパーブイ・システムによる測定値の日平均 (図中の実線) 及び参考のために最寄りの気象台 (図中の破線は小樽気象台，点線は余市気象観測所) において測定された対応諸量の日平均値をプロットしたものである。図(a)は風速の日平均値である。海上のブイにおける測定値と陸上の気象台の測定値の絶対値を比較することは両者の平均の定義のちがいもありあまり意味がないが、両者の変動の傾向にはよい対応が見られる。図(c)気圧，(d)気温にもよい対応がある。図(f)降水量 (1 日の合計)，(g)相対湿度については、ブイの測定資料はないが参考のために気象台資料を示しておいた。(f)の降水量は(b)の日平均日射とあわせて、前線や低気圧の通過をよくあらわしている。

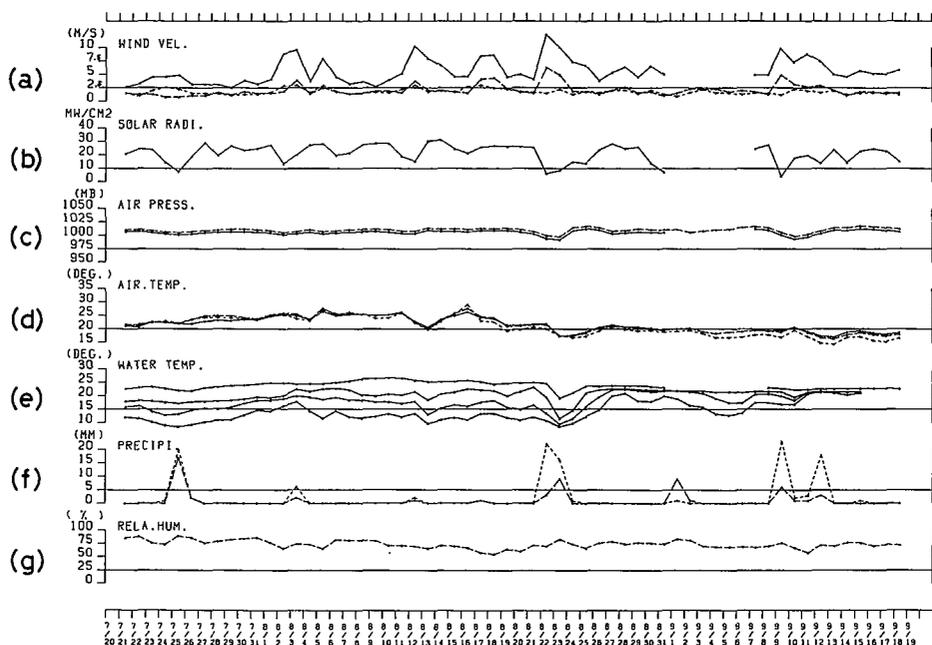


Fig. 4. Time series of diurnal mean of observed data in 1984. Data including precipitation and relative humidity at Yoichi Meteorological Station and Otaru Meteorological Station are also shown with dotted and dashed lines, respectively.

Fig. 5は、北海道中央水産試験場により1日1回測定された試験場 (Fig. 1の黒三角印) での気象資料及び試験場前での表面水温資料を示す。これらの値は先の Fig. 4 とよく対応している。

## 2. 水温変動の特性

Fig. 3(f)の水温変化については、中層及び下層において、日周期程度の変動があることがうかがえる。しかし、その周期性は日射や気温の変化ほどはっきりしたものではない。ここではまず、水温変動が内部潮汐によるものかどうかを調べるために、水温変化(f)と忍路における実測潮位(g)との関係についてスペクトル計算を行った。計算は7月21日から台風10号くずれの強い低気圧が通過する前の8月19日まで(30日間、データ数1440個)の記録について、自由度14で行った。

Fig. 6(a)はパワースペクトルの計算結果である。潮位については、日周期(D. P)、半日周期(SD. P)にピークが見られるが、日周期の方が強い。水温変化については、下層の水温変動の振幅が大きく、等水温深度(isothermal depth)の時系列としては十分な長さの記録が得られなかったため、水温値の時系列のまま、水温変動がもっとも顕著である水深40m層の水温記録についてスペクトルを求めた。水温変動では、日周期に卓越したピークが見られるのみである。

潮位変動と水温変動のクロススペクトルによる2乗コヒーレンス及び位相をそれぞれ Fig. 6(b), (c)に示す。日周期(D. P)のところにコヒーレンスのピークが見られるが相関は必ずしも高いとは言えない。逆に、慣性周期(I. P, 17.4時間)や半日周期(SD. P)については、水温変化のパワー値は小さかったが、コヒーレンスには大きくはないがピークが見られる。また、周波数0.021 CPH (cycle per hour) (周期48時間)付近にもコヒーレンスのピークが見られる。周波数0.021 CPH付近の変動については、今回の1測点での水位や水温の資料からは何とも言えないが、沿岸の地形に捕捉された長周期波が可能性のあるものとしてあげられよう。潮位変動に対する水温変動の位相は、周期0.021 CPHでは $42^\circ$ 遅れ、日周期では $50^\circ$ 進み、慣性周期では $40^\circ$ 、半日周期で

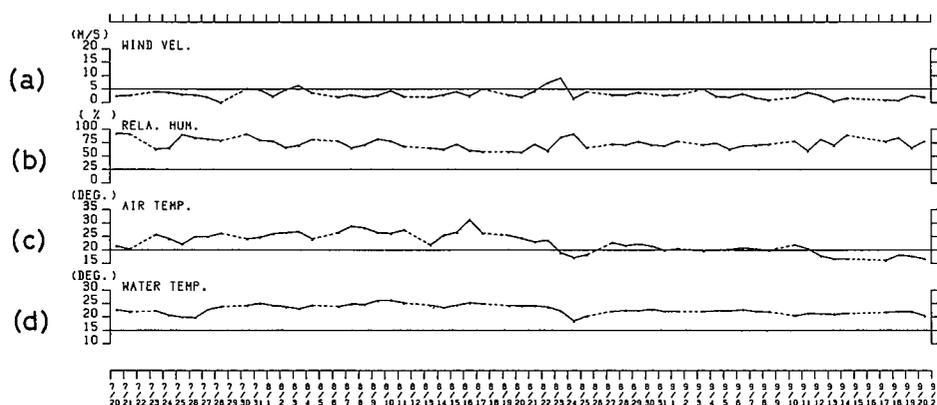
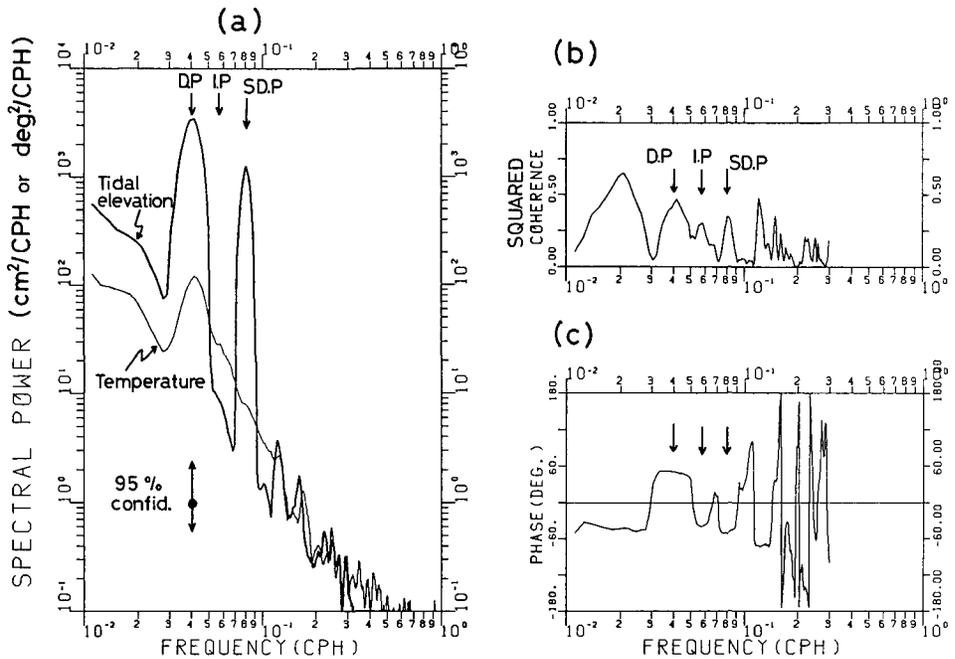


Fig. 5. Time series of meteorological data and water temperature data observed at Hokkaido Chyuo Fisheries Experimental Station (solid triangle in Fig. 1) in the corresponding period of the spar-buoy mooring. The data were obtained once a day.



**Fig. 6.** (a) Power spectra of tidal elevation and water temperature (40-m layer). Time series from July 21 to August 19, 1984 (30 days, number of data 1440) are used for the spectral analysis with 14 degrees of freedom. (b) Squared coherence between the two time series. (c) Phase. Positive phase value means that the temperature change precedes the change of tidal elevation. Vertical arrows with D.P, I.P, and S.D.P indicate the frequencies of diurnal tide, inertial oscillation, and semi-diurnal tide, respectively.

は  $49^\circ$  遅れている。

上に見られたように、潮位変化に対応した中層及び下層の水温変化は、内部汐潮による水温躍層の上下運動に伴う水温変化を示唆している。しかしながら、潮位変化と水温変化の相関は必ずしも十分高いとは言えない。また慣性周期にも小さいながら相関のピークが見られることから、内部潮汐による水温変動を基本的背景としながらも、気象擾乱等により生じた慣性振動に起因する水温変動の存在も考えられる。ちなみに、Fig. 7は、中層ないし下層に見られる水温変動の個々の周期（変動の峰から峰あるいは谷から谷の時間）の時間変化と気象擾乱の関係をしらべたものである。測定気象要素から推定される前線ないし低気圧（以下、あわせてストームと呼ぶことにする）の通過時を図中の上方の三角印  $S_1$  から  $S_6$  に示した。特に  $S_4$  は台風崩れの強い低気圧の通過に対応している。先のスペクトル計算を行った期間では、 $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  のストームが通過している。各  $S_2$  から  $S_6$  の通過時には水温変動の周期性が失われ、その後、半日周期ないし慣性周期程度の変動が見られる。 $S_1$  においては周期性は残っているが、やはり同様の日周期より短い変動が見られる。

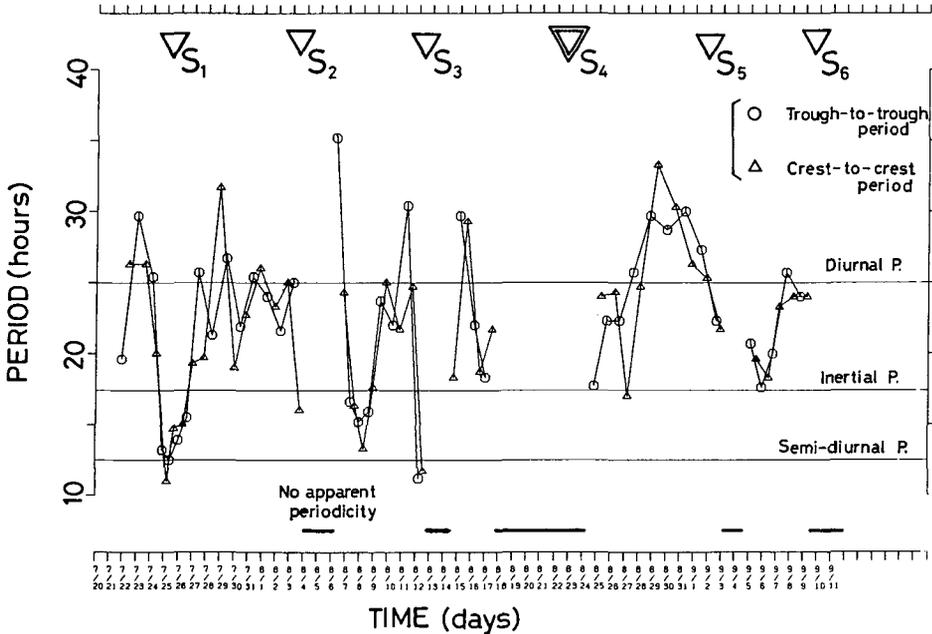


Fig. 7. Periods of the water temperature change and their relation to the passage of storms from July 20 to September 12, 1984. The individual peroids (trough-to-trough or crest-to-crest) of the water temperature change were evaluated in the time series of the thermister chain data. Triangles on the top indicate the passage of storms ( $S_1$ ,  $S_2$  and so on).

同沿岸海域における近慣性内部波の存在については、Fig. 1のst. Bでの1985年夏期の流速観測資料をもとに、金成ら(1987)に報告した。同海域はFig. 1に見られる水深200mが陸棚の端にあたり、そこを境として沖合では急激に深くなっている。同報告では、陸棚端で気象擾乱等により励起された近慣性内部波がst. Bで測定され得ることを、内部波伝播のレイ・トレーシング・モデルにより示した。著者らは、今回の報告の1984年の水温観測に加えて、1985年(一部は金成ら(1987)に報告)、1986年に同海域で流速計の係留観測を行っており、これらの資料を総合して、気象擾乱と水温・流速の変動の関係について今後明らかにしていく必要があると考えている。

### III. 水温微細鉛直分布

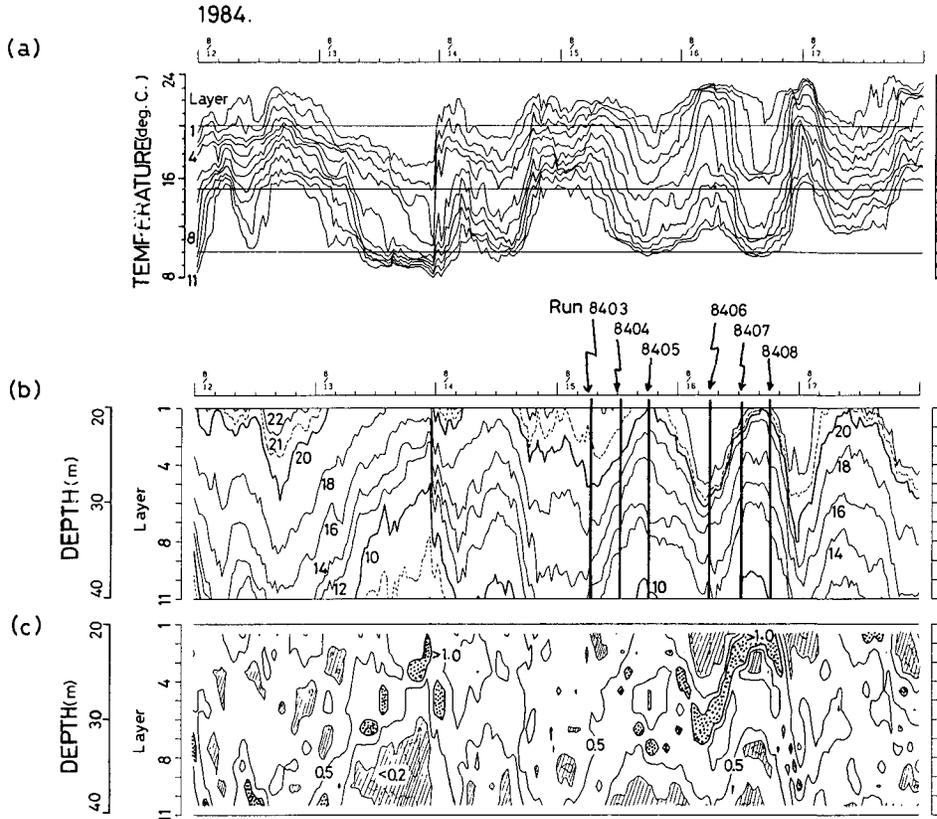
係留系設置に平行して、Table 1に示した日程でCTD及びXTGPによる水温鉛直分布の観測を行った。主たる観測期間中の係留系(サーミスタ・チェーン)による水温変化をFig. 8(a)に示す。図(b)には図(a)の資料をもとに等水温深度(isothermal depth)の時間変化を示した。図中に8月15・16日の集中観測時の観測時刻を太い縦線で示した。図(c)は各深さでの水温勾配の変化を示したものであり、成層の程度を知る際の目安となる。

## 1. CTD 記録

Fig. 9 に 8 月 1 日, 8 月 15・16 日の集中観測時, 及び 9 月 20 日における CTD 測定の結果を示す。ただし, 8 月 1 日のみ T・S 計 (HAMON Temperature Bridge Model 602) による 2 m おきの測定である。残りの CTD データは AD 変換値に基づき水深 0.5 m おきの値をプロットした。8 月 15・16 日の水温分布では水深 20 m 付近まで水温が比較的一様な混合層があり, その下に水温躍層が見られる。しかし, 先のサーミスタ・チェーンの測定結果からも推察できる

**Table 1.** CTD, XTGP observations at St.B in 1984. Each RUN takes about 20 minutes.

RUN NO.	Date. Time	CTD Obs.	XTGP Obs.
8401	8/ 1. 14:25	△	—
8403	8/15. 6:25	○	○
8404	12:30	○	○
9405	17:55	○	—
8406	8/16. 6:20	○	○
8407	12:25	○	○
8408	18:05	○	○
8409	8/20. 10:05	○	○



**Fig. 8.** Concentrated observations of the temperature, salinity profiles by CTD and XTGP, on August 15-16. (a) Overall temperature change during the observations obtained by means of the moored thermometer chain. (b) The corresponding depth of the isotherm (deg. C) versus time. Times of six runs of CTD, XTGP measurement (Table 1) are indicated by thick vertical lines. (c) Isolethets of the vertical temperature gradient obtained. Unit in deg. C/m.

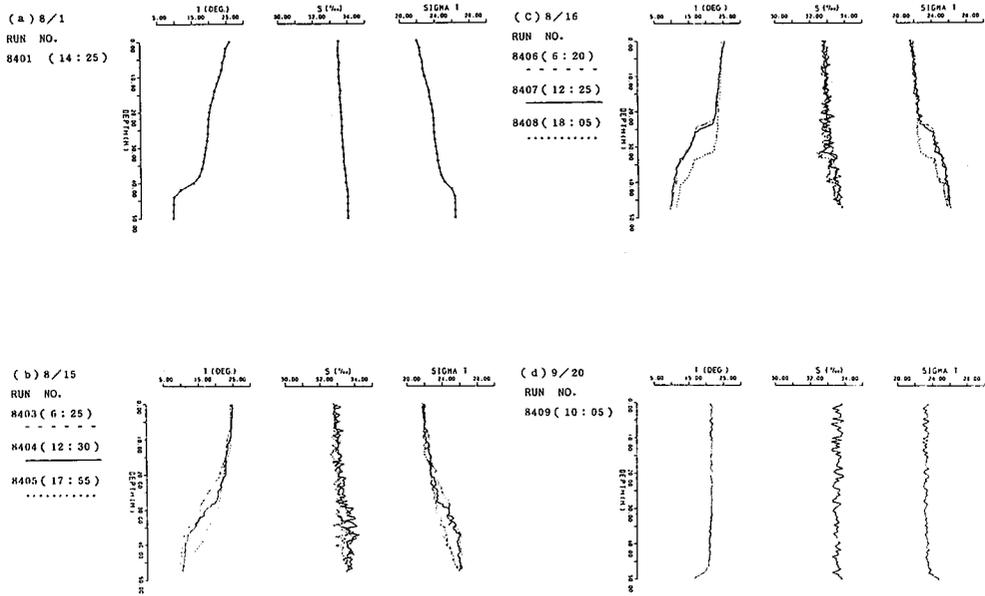


Fig. 9. Temperature, salinity and density profiles by CTD in the concentrated observations in 1984.

ように、これらの水温鉛直分布に見られる混合層の厚さや躍層の状態は、ストームの通過等の気象条件のちがいや日周期程度の変動に大きく影響されていることに注意しなければならない。9月20日の分布は水温、塩分とも底近くまで一様であり、混合層は底近くまで成長している。

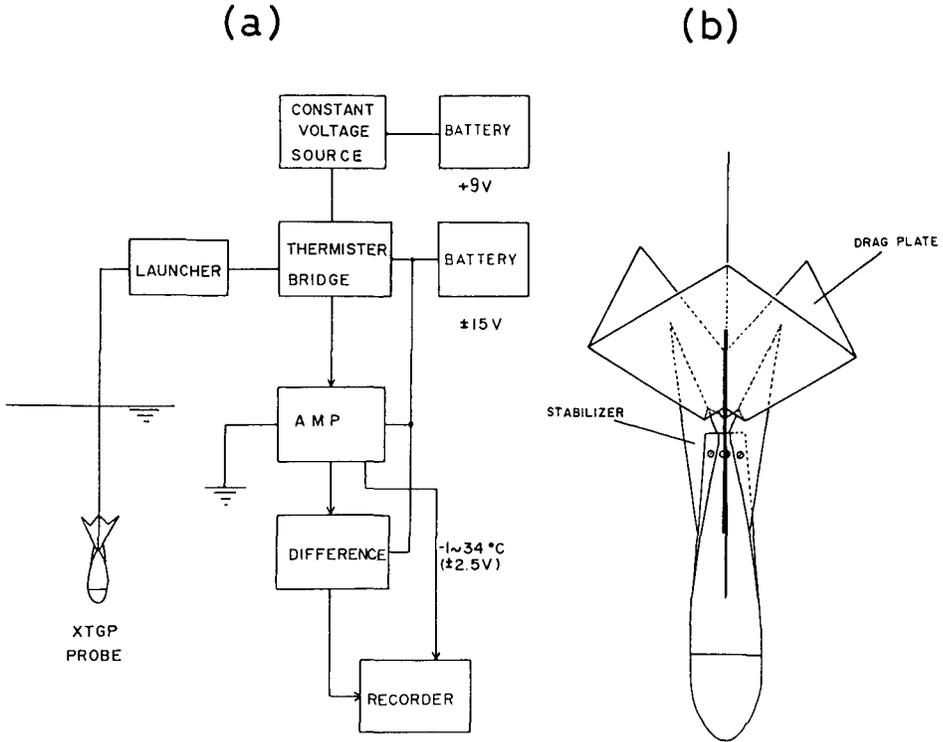
## 2. XTGP による微細水温分布

XTGPの測定システムの概略については Kanari and Koga (1985) に述べた。Fig. 10(a)はシステムのブロック・ダイアグラム、(b)はプローブの形状を示す。使用プローブは市販のXBTプローブに抵抗板を付け落下速度を小さくするよう工夫してある。本観測では落下速度は23.3 cm/sである。Fig. 11は8月15・16日の集中観測時のXTGPによる測定結果の例である。図のT、DT/DZはそれぞれ測定された水温及び水温の鉛直勾配である。残りのMEAN DT/DZ、Cox No.は後に述べる手続きにより計算されたものである。これらの測定により以下に述べる海洋の乱れに関する諸量が求められる。

Osborn and Cox (1972) は微細水温変化の大きさの目安となる量として、次式で定義されるCox数、 $C_x$ を用いた。

$$C_x = \overline{(dT'/dz)^2} / (\overline{dT}/dz)^2 \dots\dots\dots(1)$$

ただし、 $\bar{T}$ 及び $T'$ はそれぞれ平均水温及び水温の平均からのずれを表わす。 $(dT'/dz)^2$ は一定の深さ範囲での $dT'/dz$ の2乗平均を表わす。さらに、鉛直渦拡散係数 $K_z$ は $C_x$ を用い次のように



**Fig. 10.** XTGP (eXpendable Temperature Gradient Profiler). (a) Block diagram of data collection. Both the temperature  $\bar{T}$  and differentiated temperature (temperature gradient in high frequency range)  $dT'/dz$  are simultaneously recorded. (b) XTGP temperature probe (XBT probe with drag plates).

見積っている。

$$K_z = (2 \pm 1) D \cdot C_x \dots\dots\dots(2)$$

ただし、 $D$  は熱拡散率である。またその後、これらの量を用いて、エネルギー逸散率  $\epsilon$  の評価も Weinstock (1978) らにより試みられている。

今回の XTGP により  $d\bar{T}/dz$ ,  $dT'/dz$  の鉛直分布が測定できるが、測定値にはノイズが見られ、特に高周波側で顕著であった。ここでは、ノイズが比較的小さくなる低周波側の成分のみを扱うことにした。鉛直波数  $k$  と周波数  $f$  はプローブの落下速度  $w$  を介して、 $k=f/w$  の関係にあり、波数  $k$  で 50 cycle/m 以下の成分のみを扱った。具体的には水深 2 m の範囲ごとに測定された水温勾配値の波数のパワースペクトルを求め、波数 50 cycle/m 以下のパワー成分についてのみ和を計算し、 $(dT'/dz)^2$  とした。一方、 $d\bar{T}/dz$  は各範囲の上端と下端の水温差より求めた。

Dillon and Caldwell (1980), Oakey (1982) 等の従来の研究によれば、 $C_x$ ,  $K_z$ ,  $\epsilon$  等を適切に求めるには、少なくとも 120 cycle/m (長さのスケールで 8 mm) 程度まで波数分解能が必要とさ

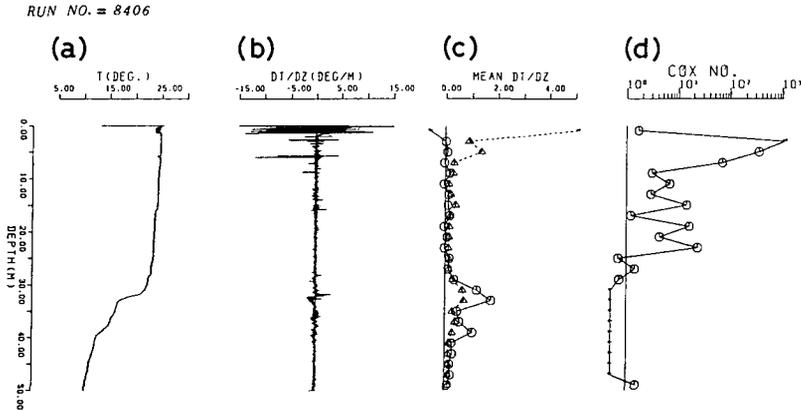


Fig. 11. Example of profiles measured by XTGP. (a) Temperature profile  $\bar{T}$ . (b) Profile of temperature gradient,  $d\bar{T}/dz$ . (c) Vertically average profile of temperature gradient. The profile of  $d\bar{T}/dz$  is shown with circles. The rms averaged temperature gradient profile  $\sqrt{(d\bar{T}/dz)^2}$  is shown with triangles. (d) Profile of the estimated Cox number.

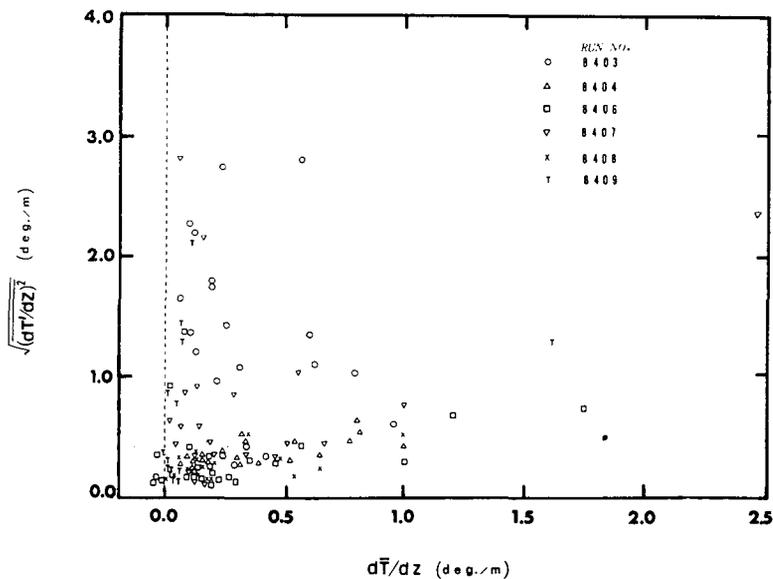
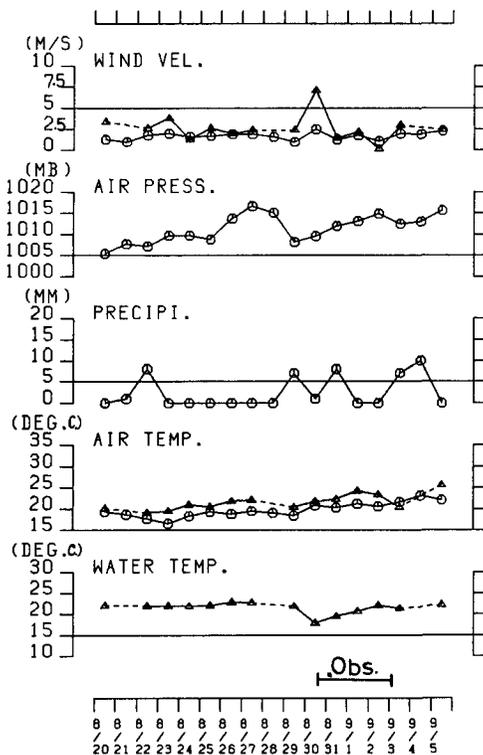


Fig. 12. Root mean square of temperature gradient in high frequency range  $\sqrt{(dT'/dz)^2}$  versus  $d\bar{T}/dz$ .

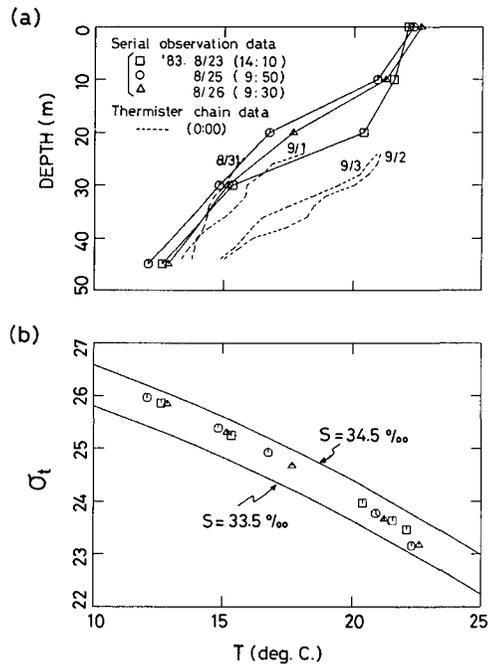
れている。しかしながら、一方で、Dillon(1982)などの研究により、高波数まで考慮した  $\varepsilon$  値と数 10 cycle/m ないし数 cycle/m の波数領域の水温変化には強い相関があることが指摘されている。今回の計算値は高周波成分を除いたことにより、従来値より 1 桁程小さい値となったが、 $(dT'/dz)^2$ ,  $K_z$ ,  $C_x$ ,  $\varepsilon$  等には相対値ながら本来のそれらの変化傾向が見られる。ちなみに、Fig.

12は $\sqrt{(dT'/dz)^2}$ と $d\bar{T}/dz$ の関係を示すが、大すじの傾向として $\sqrt{(dT'/dz)^2}$ の大きいところは $d\bar{T}/dz$ の小さい混合層内に見られ、 $\sqrt{(dT'/dz)^2}$ は乱れの強さの程度を強く反映しているように思われる。

今回は測器のノイズの問題があり、 $K_z$ ,  $C_x$ ,  $\epsilon$ 等の量が比較的容易に測定できる平均的な水温や密度の鉛直分布とどういう関係にあるか、さらに外力としての海での風のストレス等とどういう関係にあるかは言及できなかった。さらに、沿岸域の問題としては、先述の日周期から半日周期の顕著な水温変動がここでの微細な乱れスケールの現象ないしはごく短周期の内部波の現象とどのように関係するか興味深い。Fig. 8(c)はサーミスタ・チェーン記録より求めた水温鉛直勾配の時間変化を示す。水温の鉛直勾配、ひいては成層の強さは日周期から半日周期の顕著な水温変動



**Fig. 13.** Time series of meteorological data in 1983. Circles show diurnal mean of meteorological data at Otaru Meteorological Station. Meteorological data and water temperature data at Hokkaido Chyūo Fisheries Experimental Station are shown by triangles. The period of water temperature observation by the thermister chain mooring is shown by a horizontal segment in the bottom of the figure.



**Fig. 14.** (a) Temperature profiles at and near St. A in 1983. Serial observation data near St. A were obtained by Hokkaido Chyūo Fisheries Experimental Station. (b)  $\sigma_t$  versus  $T$ , estimated from  $T$ ,  $S$  data of the serial observation.

(躍層の上昇・下降)に伴い変動する。変動は高さにより微妙な位相のずれをもち、勾配の大きいところ、小さいところは図で見てパッチ状に散在している。これらの特性は短周期の内部波の崩れ等による乱れの生成過程に強く関連すると思われる。次の章では、データのサンプル時間間隔の短い1983年のサーミスタ・チェーンの資料により、水温躍層における短周期(周期3時間から10分程度まで)の水温変動の特性について検討する。

#### IV. サーミスタ・チェーン記録に見られる短周期水温変動の特性

ここで使用するデータは1983年8月30日から9月3日にかけて、Fig. 1, st. Aにおいて、水深24 mから44 mまで(2 mおき11層)の深さに設置されたサーミスタ・チェーンによって得られた。データのサンプル時間間隔は1分である。当観測では気象要素の測定は行われなかったので、参考のために同時期の小樽気象台における風速、気圧、降水、気温の資料及び北海道中央水産試験場前での風速、気温、水温の資料をFig. 13に示す。観測に先立つ8月29日には低気圧の通過

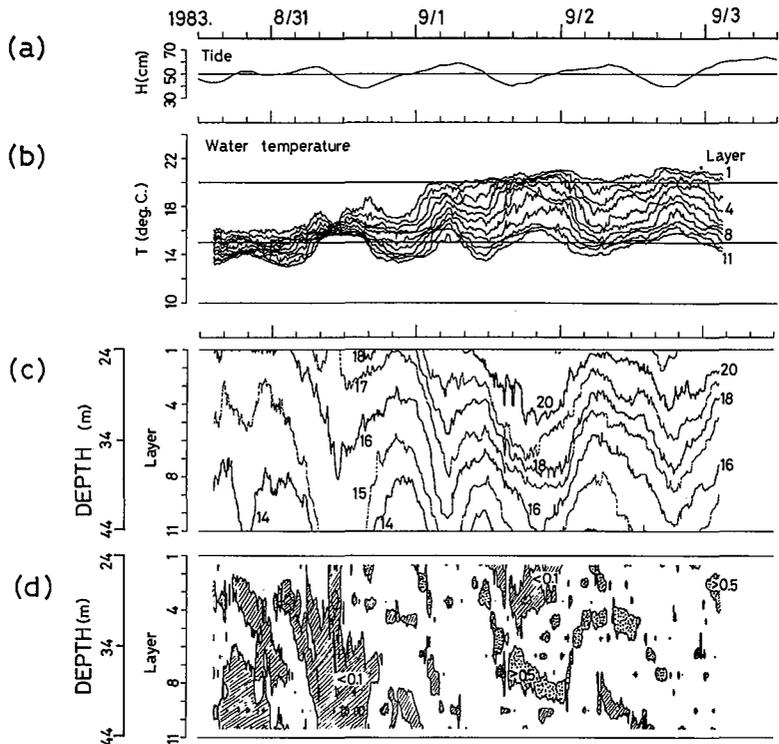


Fig. 15. (a) Tidal elevation at Oshoro Tidal Station in 1983. (b) Water temperature by the moored thermister chain, between the depth 24 m and 44 m (11 layers). (c) Isothermal depth evaluated from the chain data. (d) Isoplethes of the vertical temperature gradient evaluated.

が見られ、観測期はその後の水温降下から水温回復期にあたる。Fig. 14 (a)にはサーミスタ・チェーンによる水温プロフィールとともに8月23日から26日にかけてst. Aの近傍で行われた北海道中央水産試験場の定期観測による水温鉛直分布を示す。(b)には定期観測のT, S資料から求めた水温Tと密度 $\sigma_t$ の関係を示す。

### 1. 日周期から半日周期程度の変動の特性

Fig. 15 (a)は測定期間中の忍路における潮位の変化、(b)はサーミスタ・チェーンによる水温記録を示す。(c)、(d)はそれぞれ水温記録をもとに求めた等水温深度の変化及び水温鉛直勾配の変化を示す。(b)の水温記録には1984年の水温記録(Fig. 3 (f))に見られたように日周期から半日周期程度の顕著な水温変動がある。しかし、ここでも図(a)の潮位との相関は必ずしもよくない。Fig. 16は第II章のFig. 7と同様な方法で、気象擾乱と個々の水温変動の周期との関係を示したものである。測定開始時はストームの通過直後にあたり、ほぼ慣性周期の変動が見られ、後半では日周期に近い変動に遷移している。

Fig. 17 (a)は9月1日から9月3日にかけての水温変動を等水温深度の変化として示したものである。サーモクラインにおける慣性周期ないし日周期の主要な変動は、変動波形の前方斜面が急で、背の斜面がゆるやかな非対称な波形となっている。これは、Cairns (1967) が述べたように、徐々に浅くなる岸に向かう内部波の波形の非対称(前のめり型)に対応するものであろう。このような沿岸域の内部波の非対称な形状は、Matsuyama and Teramoto (1985), Serebryanny (1985) 等の多くの観測例で見られる。

### 2. 短周期水温変動の特性

Fig. 15 (b), (c)によると慣性周期程度の水温変動に重畳して、数時間の周期から1時間に満たないごく短周期までの水温変動が存在することがわかる。ここでは水温回復期の9月1日から3日にかけての等水温深度の詳細な変化を先のFig. 17 (a)に示すとともに、(b)には(a)の記録のごく短周期成分のみを示した。ハイパスフィルター作業には斎藤 (1978) の設計によるバターワース型ハイパスフィルターを使用した。なお低周波側のカットオフ周波数は0.3 CPH(周期約3.3時間)とした。今回使用のサーミスタ・チェーンの水温センサの応答時間は約1分であり10 CPH程度までは十分応答性がある。

ごく短周期の変動には、各層で位相のずれがほとんどない変動(例えば、9月1日15時ころ)

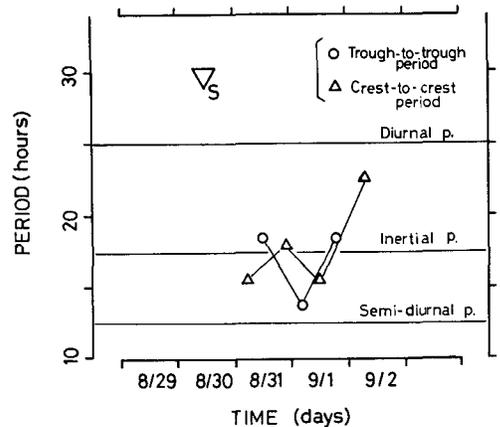


Fig. 16. Periods of the water temperature change evaluated in the thermister chain data and their relation to the passage of a storm, in the late summer, 1983. Definitions are the same as those in Fig. 7.

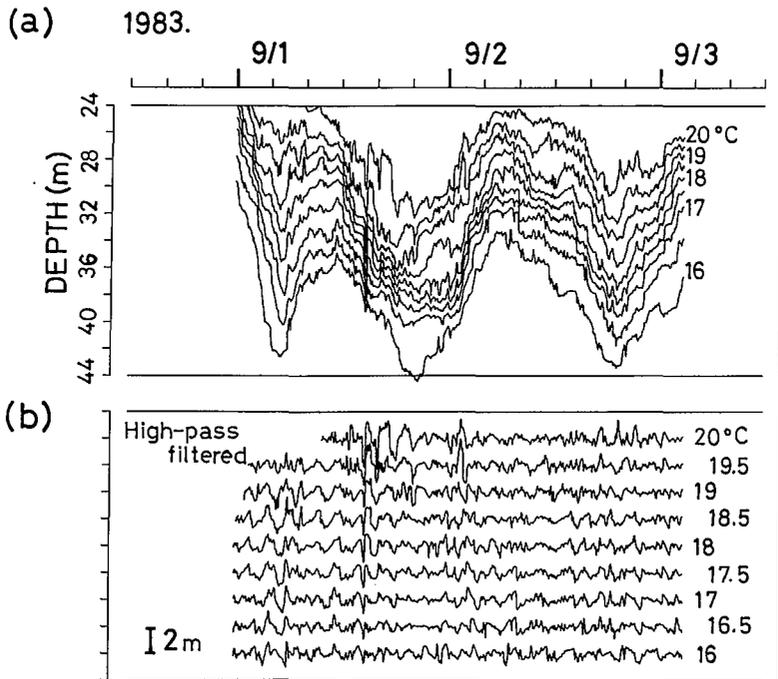


Fig. 17. (a) Isothermal depths as a function of time in early September, 1983 evaluated from the thermister chain data. (b) High-frequency fluctuations of isothermal, high-pass filtered with a lower cutoff frequency 0.3 CPH.

と各層で位相が少しずつずれている変動(例えば, 9月2日2時ころ)が混在している。Serebryanyy (1985) は沿岸域の観測で半日周期の内部潮汐により水温躍層が上昇する位相(波形の前方斜面)でごく短周期の内部波が顕著である例を報告している。本観測では記録長も短く, 水温躍層の主要な変動の位相と短周期内部波の分布にはそれほど明瞭な関係はない。ただ, 9月1日15時ごろの各層の位相のずれのない短周期の変動を例外的なものと思えば, フィルター後の Fig. 17(b)に見られる変動の振幅の大きいところは主要変動の谷から前方斜面にかけた位相で見られる傾向にある。

Fig. 18(a), (b)は Fig. 17(b)の 16.5°C の等水温深度の変動に対する各等水温深度のクロススペクトルを求めたものである。(a)は二乗コヒーレンス, (b)はフェイズを示す。後に示すパワースペクトル (Fig. 19) でピークの見られる周波数 0.9 CPH 及びその高調波にあたる 1.8 CPH 付近でコヒーレンスも大きい。周波数 0.9 CPH のピークが何を意味するかはよくわからないが, 位相は 16.5°C の等水温深度の変動に対して上方に行くにつれ少しずつ遅れている。

Fig. 19 は Fig. 17(b)の等水温深度の時系列のパワースペクトルを示す。ここでは, 解析周波数の制限があり明瞭でないが, 2 CPH より低周波数側では内部波に関する GM スペクトル (Garrett and Munk, 1975) の周波数  $f$  に関する  $f^{-2}$  型のスペクトル勾配の存在がうかがえる。しかしなが

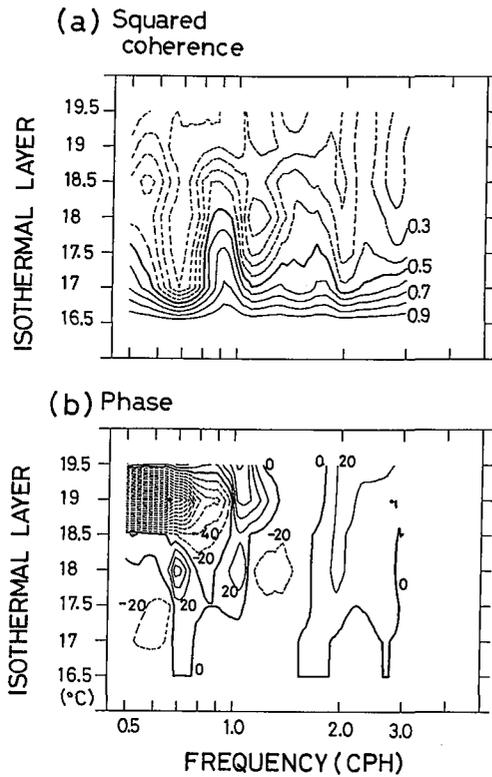


Fig. 18. (a) Squared coherence relative to the 16.5°C isothermal fluctuation. (b) Phase. Solid and dashed lines indicate positive and negative phase differences with the intervals of 20 degrees relative to 16.5°C isothermal, respectively.

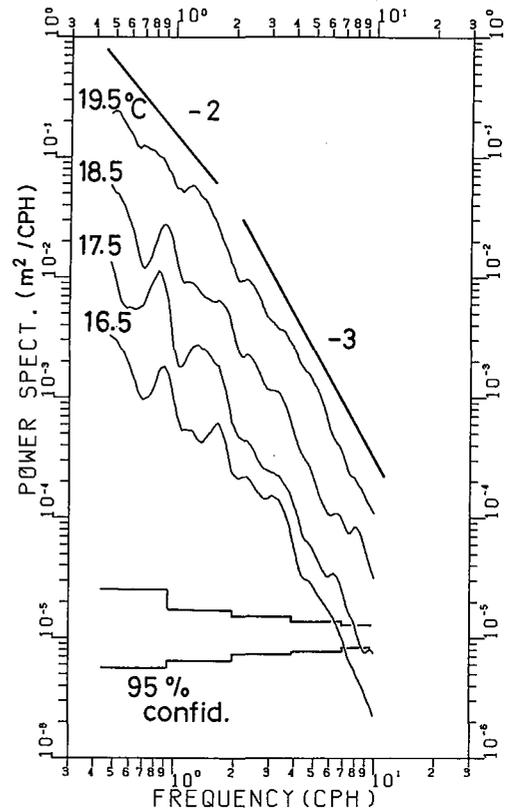


Fig. 19. Power spectra of time series of isotherm displacement shown in Fig. 17 (b). The scale on the ordinate axis is given for 19.5°C spectrum. Scales for other spectra are given in successive shifts by a factor of  $10^{-1/2}$  from previous one.

ら、それより高周波側ではいずれの等水温深度についても  $f^{-3}$  型がよくあてはまる。Fig. 14 (b)を参照し、9月1日から3日における平均的水温勾配より求めたバイサラ周波数は10 CPH程度である。GM スペクトルは、本来バイサラ周波数より低周波数のスペクトル領域についてモデル化されたものであり、バイサラ周波数においてすどいカットオフをもつ。従って、バイサラ周波数近辺では十分よいスペクトル表現を与えない可能性がある。今回見られた  $f^{-3}$  型のスペクトルは、Brekhovskikh et al. (1975), Serebryanny (1985), Levine et al. (1985) 等の観測例に広く見られる。 $f^{-3}$  型のスペクトル勾配は多くの場合バイサラ周波数よりやや低周波数の領域を含めて存在する。

上述のバイサラ周波数付近のスペクトル構造については、微細なステップ状の密度成層場がある場合には、短周期の内部波や乱流がなくとも  $f^{-2}$  型のスペクトル構造を持ち得ることが、Phillips (1971) により示され、その後類似の議論が Garrett and Munk (1971), Levine and Irish

(1981)らによってなされている。特にスペクトルの傾きについては、ステップ構造の明瞭さの程度に依存し、今回見られた $f^{-3}$ 型のスペクトルもこのような考え方で説明され得る余地が残されている。ただ、バイサラ周波数より高周波の領域では内部波としての特性が失われることを考えれば、乱流場の特性を考慮した議論が必要となろう。また、高周波領域では、スペクトル形状はドップラー・シフトの影響を強く受けていることも考えられ、スペクトル構造は単純に議論できないと思われる。このような事情からか、従来の観測結果の解析ではここで吟味した高周波領域のスペクトル形状については積極的な議論が少なかったように思われる。

## V. まとめと今後の課題

本報告では、主として沿岸域に係留されたサーミスタ・チェーンの観測資料を用い、日周期程度より短い周期について、季節水温躍層の変動特性を調べた。その結果はおよそ次のようにまとめられる。

(1)水温躍層には、平均的に見れば日周期程度の周期の卓越した変動が存在する。また、ストームの通過に対応して、慣性周期(17.4時間)程度の変動も励起される。これらの水温躍層の変動特性は、流速観測資料や気象資料と照しあわせ、今後さらに吟味する必要がある。

(2)上述の日周期から半日周期程度の水温躍層の主要な変動は、岸に向かう少し前のめり形状をもった内部波の様相を示しており、これらの変動には周期が数時間から数分に至るごく短周期の変動が重畳している。今回のCTD, XTGPの観測ではごく短周期の内部波や乱れの特性が水温躍層の主要な変動の位相とどのような関係にあるかは十分明らかにはできなかった。しかしながら、沿岸域において内部波の崩れや乱れによるエネルギー消散を考える際には、これらの位相関係に注目することが必要となろう。

(3)周期30分から6分(バイサラ周波数程度)の短周期の等水温深度変位(isothermal displacement)のスペクトルは、周波数 $f$ に関して $f^{-3}$ 型であった。これは従来のGMスペクトルの $f^{-2}$ 型とは異なる。 $f^{-3}$ 型のスペクトルについては、微細な水温ステップ構造の存在効果などさまざまな成因が考えられている。具体的に成因を明らかにするには、躍層内での水温、塩分、流速の連続観測に水温の微細鉛直分布の観測を効果的にむすびつける必要がある。

**謝辞** 本研究を遂行するにあたり、係留系の設置に協力していただいた小樽市漁業協同組合並びに同漁協忍路漁区の方々、また、係留系の設置・回収作業及び集中観測を手伝っていただいた北海道大学理学部海洋物理学講座の竹内謙介氏並びに院生・学部4年生諸氏に心からお礼申し上げます。同理学部忍路臨海実験所の信田和郎氏には観測期間中いろいろお世話になった。論文中の北海道中央水産試験場の測定による資料に関しては、同試験場の茄子川郁夫氏、鹿又一良氏にお世話になった。忍路検潮場の潮位資料は建設省国土地理院より提供していただいた。陸上の小樽、余市の気象資料は札幌管区气象台よりいただいた。XTGP観測資料の解析に際しては、北海道大学理学部海底地震観測施設のAD変換器を使わせていただいた。その際、同施設の岩崎貴哉氏に

お世話になった。また同氏からはバターワース・フィルター使用に関しても助言をいただいた。本研究の一部は文部省科学研究補助金(課題番号 58460044)によった。あわせてお礼申し上げる。

## 文 献

- Brekhovskikh, L. M., K. V. Konjaev, K. D. Sabinin and A. N. Serikov, 1975. Short-period internal waves in the sea. *J. Geophys. Res.*, **80**, 856–864.
- Gairns, J. L., 1967. Asymmetry of internal tidal waves in shallow coastal waters. *J. Geophys. Res.*, **72**, 3563–3565.
- Dillon, T. M., 1982. Vertical overturns: A comparison of Thorpe and Ozmidov length scales. *J. Geophys. Res.*, **87**, 9601–9613.
- Dillon, T. M. and D. R. Caldwell, 1980. High-frequency internal waves at ocean station P. *J. Geophys. Res.*, **85**, 3277–3284.
- Garrett, C. and W. Munk, 1971. Internal wave spectra in the presence of fine-structure. *J. Phys. Oceanogr.*, **1**, 196–202.
- Garrett, C. and W. Munk, 1975. Space-time scales of internal waves—a progress report. *J. Geophys. Res.*, **80**, 291–297.
- 北海道, 1983. 石狩湾新港海域生態調査報告書, 237 pp.
- Kanari, S. and M. Koga, 1985. Surface mixed layer observation using a meteo-oceanographic spar buoy, XTGP and SEMVP system. "Ocean Surface" Y. Toba and H. Mitsuyasu (eds.), D. Reidel Publishing Company, 559–564.
- 金成誠一, 小賀百樹, 1985. Modified DKT モデルによる沿岸域表層混合層の数値実験. 北海道大学地球物理学研究報告, **46**, 53–68.
- 金成誠一, 小賀百樹, 竹内謙介, 辻 正明, 1987. 北海道余市沿岸の近慣性内部波. 北海道大学地球物理学研究報告, **49**, 369–379.
- Levine, M. D. and J. D. Irish, 1981. A statistical description of temperature fine structure in the presence of internal waves. *J. Phys. Oceanogr.*, **11**, 676–691.
- Levine, M. D., C. A. Paulson and J. H. Morison, 1985. Internal waves in the Arctic Ocean: Comparison with lower-latitude observations. *J. Phys. Oceanogr.*, **15**, 800–809.
- Matsuyama, M., 1985. Internal tides in Uchiura Bay—Subsurface temperature observations near the bay head. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **41**, 135–144.
- Matsuyama, M. and T. Teramoto, 1985. Observations of internal tides in Uchiura Bay. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **41**, 39–48.
- Oakey, N. S., 1982. Determination of the rate of dissipation of turbulent energy from simultaneous temperature and velocity shear microstructure measurements. *J. Phys. Oceanogr.*, **12**, 256–271.
- Osborn, T. R. and C. S. Cox, 1972. Oceanic fine structure. *Geophys. Fluid Dyn.*, **3**, 321–345.
- Phillips, O. M., 1971. On the spectra measured in an undulating layered medium. *J. Phys. Oceanogr.*, **1**, 1–6.
- 斎藤正徳, 1978. 漸化式デジタル・フィルターの自動設計. 物理探鉱, **31**, 240–263.
- Serebryanny, A. N., 1985. Internal waves in the coastal zone of a tidal sea. *Oceanology*, **25**, 578–582.
- Weinstock, J., 1978. Vertical turbulent diffusion in a stably stratified fluid. *J. Atmos. Sci.*, **35**, 1022–1027.