



Title	簡単な温度勾配計とその沿岸域における小規模な温度構造への応用
Author(s)	三宅, 秀男; MIYAKE, Hideo
Citation	北海道大學水産學部研究彙報, 29(3), 270-281
Issue Date	1978-09
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/23654
Type	departmental bulletin paper
File Information	29(3)_P270-281.pdf



簡単な温度勾配計とその沿岸域における小規模な温度構造への応用*

三宅秀男**

A Simple Temperature-Gradient Meter and its Application to the Small Scale Thermal Structure in the Coastal Zone.*

Hideo MIYAKE**

Abstract

A simple temperature-gradient meter constructed with Wheatstone bridge circuit having two thermistors was designed to clarify the fine structures of the water in the coastal zone where the waters of different characters distributed and mixed. The accuracy of the measurement was better than 0.02°C within the range of water temperature from 5°C to 25°C , and the vertical resolving power was several tens of centimeters.

Spacial variabilities of the temperature and temperature gradient in the coastal zone in Funka Bay were investigated in August 1976. In this season waters in the coastal zone showed characteristic structures due to the intrusion of the warmer offshore water into the colder coastal water. The tongue-like intrusion of the offshore water which was about 10 m thick and 2 or 3 miles wide was observed by the measurement of the water temperature. The vertical section in temperature in the subsurface layer showed that both the colder coastal water with less saline and the warmer salty offshore water were vertically distributed in the complicated structure. In the center of the warm water core the temperature gradient was less than $0.1^{\circ}\text{C}/0.5\text{ m}$, and under this core the step-like structures of temperature were formed. Near the center of the interaction between the cold water and the warmer water, inversions of temperature, salinity and density were observed. Below the depth of 30 m in the offshore zone, thick layers relatively homogeneous in temperature were separated by transitional layers, which had more than $0.1^{\circ}\text{C}/0.5\text{ m}$ in the temperature gradient and distributed horizontally over several miles.

はじめに

最近の10年間にSTDを始めとする測器の開発によって、鉛直方向の水温あるいは塩分の連続測定が可能になり、様々な規模の鉛直構造が発見され、その形成機構も次第に明らかになりつつある。¹⁻³⁾ これらの現象は海洋だけではなく湖沼においても知られており、⁴⁾ 塩分が本質的な役割を負っていない場合もあると言われている。⁵⁾

STDはもちろんのことこれらの測定に使用される測器は、⁶⁻⁷⁾ 主に精度上の理由から高価になり手

* 北海道大学水産学部北洋水産研究施設業績第102号
(Contribution No. 102 from the Research Institute of North Pacific Fisheries, Faculty of Fisheries, Hokkaido University)

** 北海道大学水産学部北洋水産研究施設
(Research Institute of North Pacific Fisheries, Faculty of Fisheries, Hokkaido University)

軽に使用することは極めて困難な現状にある。しかし比較的小さい時空間的規模での熱の輸送、混合、拡散過程を研究するためには、従来の Nansen Cast ではもちろん、BT やサーミスタ温度計でも把握できない細かな温度変化の測定を必要とすることが多い。

そこで比較的簡単な方法で鉛直距離数 10cm, 温度差 10^{-2}°C 程度の変動を測定できる温度勾配計を試作し、沿岸水と沖合水とが混合する海域において水温構造の測定を試みた。この温度勾配計の概要とこれによって測定された小規模な水温構造の概観について報告する。

温度勾配計の概要

1. 検出回路

この温度勾配計は感温部にサーミスタを用いて温度および温度差を測定するもので、装置は船上の抵抗を組み合わせた検出回路と電流を電圧に変換し記録する記録計、水中におけるサーミスタを含む測定部、さらに両者を結びつけているケーブル等から構成されている。このなかの検出回路を図 1 に示した。右側には測定温度範囲 $0\sim 25^{\circ}\text{C}$ の通常のサーミスタ水温計の、左側は勾配計の回路である。なお抵抗記号上の数は抵抗値で単位は Ω である。勾配計の基本回路はケーブルを通して測定部に固定されている特性の良く似た 2 本のサーミスタと $3\text{K}\Omega$ の 2 個の固定抵抗とを Wheatstone Bridge の 4 つの辺に組み込み、その間の電流を検出するものである。使用したサーミスタ (芝浦電子製、NBS 型) の抵抗値を表 1 に示したが、勾配計用の 2 本のサーミスタには 0°C , 25°C においてそれぞれ 10Ω , 11Ω だけ差がある。このため No. 2 に 10Ω を付け加え、より近い特性が得られるようにした。

図 1 の左側の回路の上半分は記録紙上に 0 点と温度差 1°C のスケールを作るための調整用切換え回

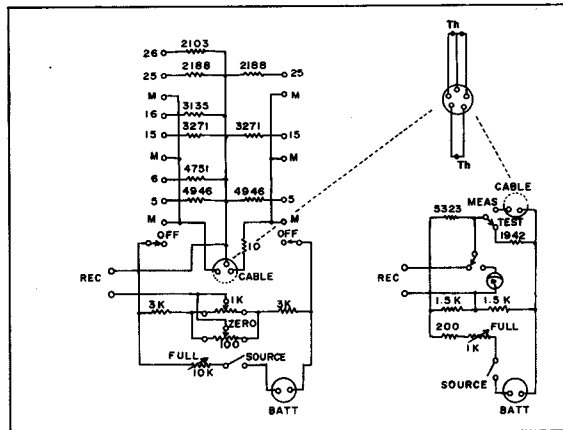


Fig. 1 Circuit diagram of the temperature-gradient meter.

Table 1 Resistance of the thermistors used in the temperature-gradient meter.

Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Temperature-gradient meter		Thermometer
	No. 1	No. 2	
0	6086	6076	5323
25	2196	2185	1942

路である。M は測定用の切換え接点, 5, 6, 15, 16, 25, 26 は後述のように測定域の水温値に応じて選択し, 温度差の更正を行うための切換え接点であって, 選択する水温値を示している。またこの接点に連結される抵抗は, 各々の水温値におけるサーミスタの抵抗に相当している。

実際の操作としては回路中の ZERO や FULL 調整の可変抵抗を用いて, 例えば初め 15-15 であらかじめ決められた記録計の 0 点に一致させ, 次に 15-16 で 1°C をフルスケール 50mV に取り, 最後に M-M で測定するという具合である。0 点の調整には記録計 (東亜電波製, EPR-3T 型) の最高感度 10mV を, フルスケールには 50mV を用いるが, 測定に当っては温度変化に見合った任意のレンジを用いてよい。

2. 0 点の検定と温度差更正

この勾配計で最も留意しなければならないのは, 測定域の水温がどのような値であっても, 勾配計の 2 本のサーミスタ間の鉛直水温の温度差がない時には, 検出される電位差が 0 ないしはそれに近い値を示さなければならない点である。これつまりは勾配計の精度を左右することになるが, 次のように実験室で確かめた。今 15°C での 0 点を記録計のそれに一致させ, 測定時と同じ条件すなわち温度差 1°C を 50mV に取り, 水温を 3°C から 25°C まで変化させて 0 点の平衡をみる。この時 2 本のサーミスタは一緒にし, 攪拌器で常に一樣な温度にしてある水槽内につす。図 2 はこうして得られた記録例である。0 点の不平衡電圧は 5°C 以下では 1mV 以上にもなるが, 5~25°C では ± 1 mV, 10~25°C では ± 0.2 mV 以内にあり, 温度にしてそれぞれ $\pm 0.02^\circ\text{C}$, $\pm 0.005^\circ\text{C}$ の範囲内に 0 点を維持できることがわかる。

同様に 5°C と 25°C の切換え接点を用いてそれぞれ 0 点を作り試験を行ったが, 図 2 からも類推できるように 5°C の場合には 10°C 以上で, 25°C の場合には 10°C 以下で 0 点の不平衡は著るしくなる。従って, 水温値に応じた接点の選択によって高い精度を得ることができる。

一般にサーミスタの温度抵抗の特性は線型ではないために, たとえある水温において 1°C の温度差のスケールを決めたとしても, 他の水温では多少スケールが異ってくる。そこで次の様な手順で補正を行った。あらかじめ 15°C における 1°C の温度差を 50mV にとり, 次に 2 本のサーミスタの間に 5°C から 25°C までの 5°C 毎に 0.5~3°C の温度差を与える。この程度の温度差では極めて直線性が良く, 原点で折れ曲った 2 本の直線が得られる。これらのグラフから 15°C でスケールを決めた場合の各水温における温度差の更正図 (図 3) が得られる。5°C 以下では安定した温度が得られなかったため測定されていない。

鉛直水温分布が普通に見られる様に深くなるにつれて低くなる場合には, 温度差は正の目盛によ

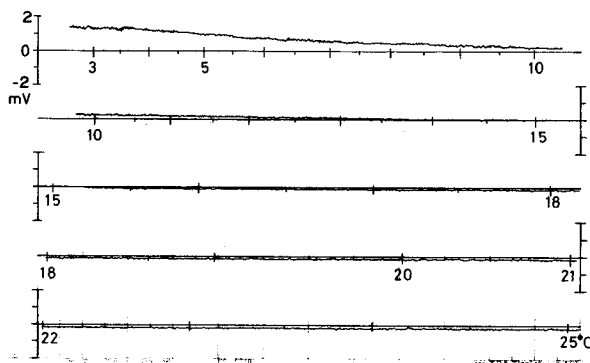


Fig. 2 Record of the zero balance between two thermistors for temperature gradient.

三宅： 簡単な温度勾配計とその小規模な温度構造への応用

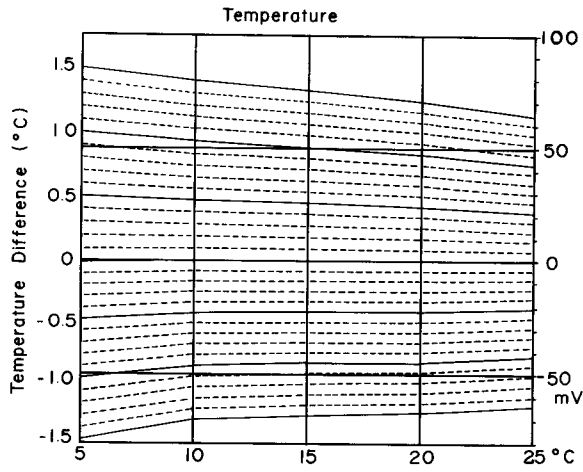


Fig. 3 Calibration curves of temperature differences.

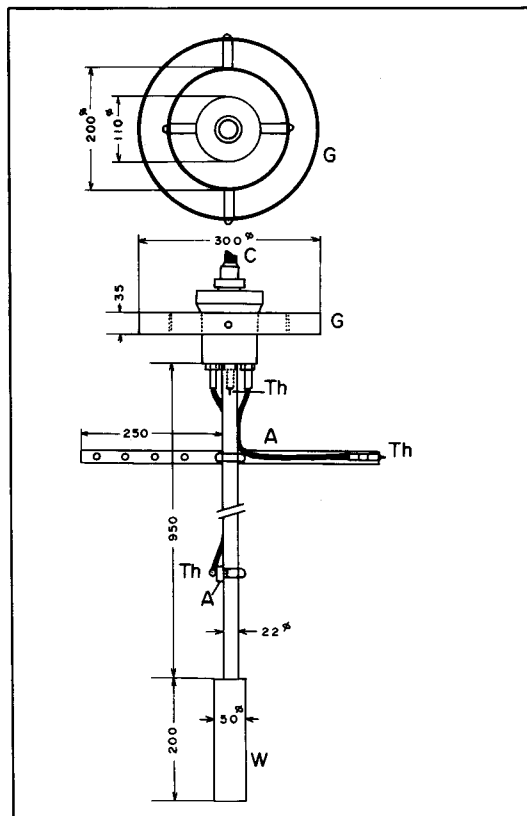


Fig. 4 Schematic diagram of the probe. G: Gimbals, C: Cable, Th: Thermistor, A: Arm, W: Weight.

で示され、温度逆転は負の側に振れる。10°C 以下および 20°C 以上でやや強い傾きとなるが、全体として低温になる程感度が良くなる。また逆転温度差側で目盛が密となることもサーミスタの温度特性が高温になる程鈍くなる理由による。

図3から 5°C における 1mV は温度差にして 1/57~1/52°C すなわち 0.018~0.019°C に、25°C の 0.2mV は、0.2/42°C、すなわち 0.0048°C に相当することがわかる。この程度の温度差は記録計から十分読み取れるから、精度として 5~25°C で $\pm 0.02^\circ\text{C}$ 、10~25°C で $\pm 0.005^\circ\text{C}$ である。

3. 測定部の構造

測定部は長さ 1 m の鉄棒に取り付けられたジンバル、2本のアーム、約 6Kg の鉛の錘からなり(図4, 図5)、全体の空中重量は約 14 Kg である。水温測定用のサーミスタはジンバルの直下に、温度勾配用のそれは長さ 25 cm の2本のアームの先端にセンサー部を露出してそれぞれ取り付けられている。このアーム間の鉛直距離と温度差から温度勾配が求められる。ジンバルと錘の作用により鉄棒が水中で常に鉛直を保つように、また測定時にはアームを十字状にすることによって、降下中の先端部による乱れの影響を除くように考慮した。なおアームを上下に移動することにより、温度変化に応じた必要とする鉛直距離を作ることができる。

測定部はケーブルによって船上の記録部と連結しているが、測定の際には別にワイヤーで垂下し直接ケーブルや測定部に力が加わらないようにした。また深度は線長計の読みと傾角から補正するが、傾角が 10° 以上あるときの記録は採用していない。

サーミスタの時定数は 0.2~0.3 秒であり、記録部を含め 0.5 秒としても、使用したウィンチの降

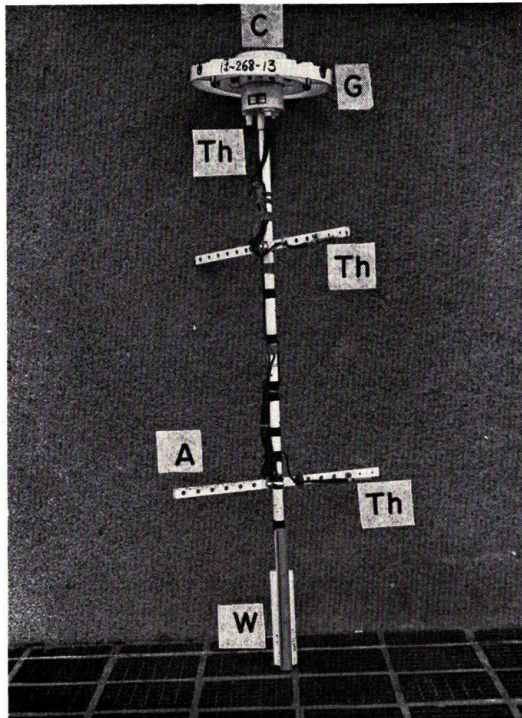


Fig. 5 Photograph of the probe. See Fig. 4 for explanation.

三宅： 簡単な温度勾配計とその小規模な温度構造への応用

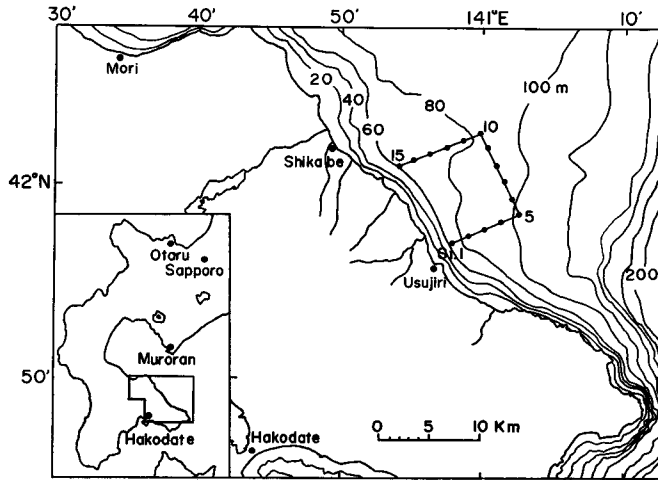


Fig. 6 Bathymetry and the location of stations.

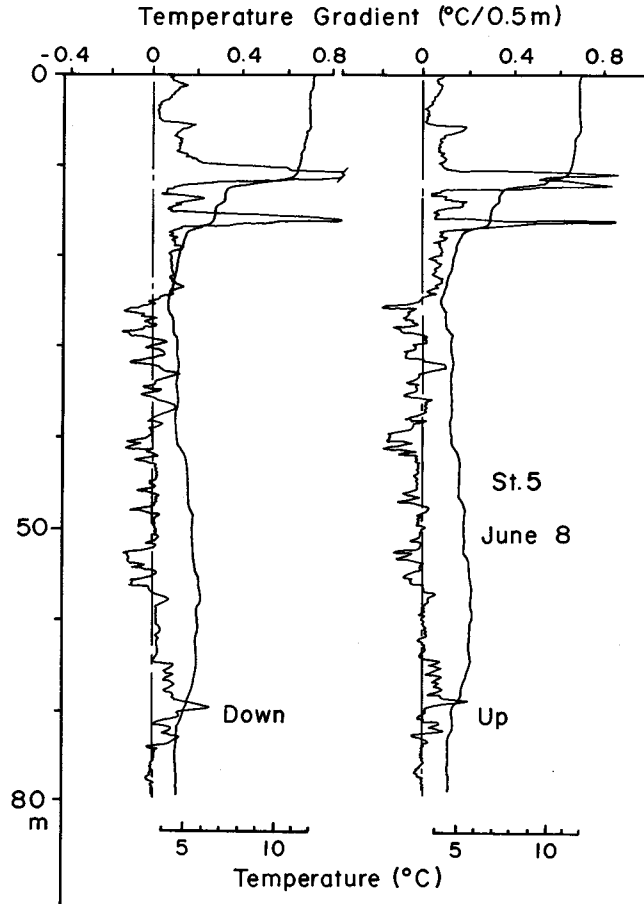


Fig. 7 Records of temperature and temperature gradient profiles during down and up casts.

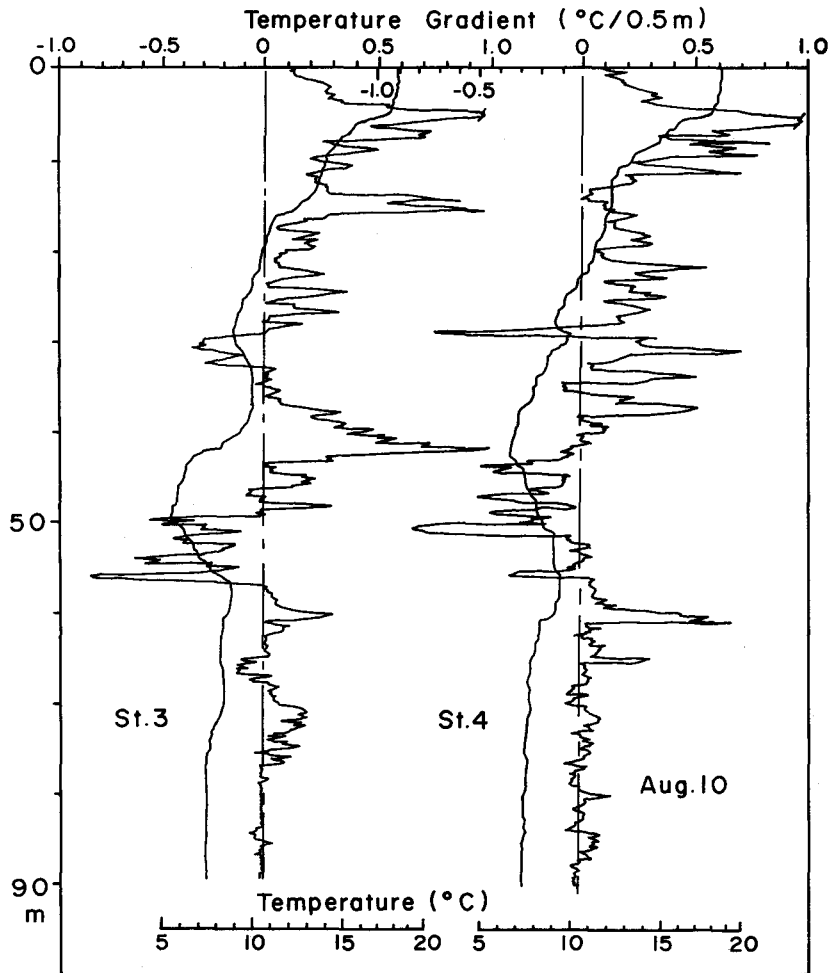


Fig. 8 Temperature and temperature gradient profiles including remarkable temperature inversions.

下速度 0.33m/sec から、鉛直分解能としておよそ 17cm が得られる。従って温度差を測定する 2つのサーミスタ間の間隔を小さく取り過ぎても意味はない。

小規模な温度構造の測定

測器の試験をかねて噴火湾湾口部の水深 100m 以浅の沿岸水と沖合水とが混合する海域において、鉛直温度分布を測定した。図 6 はその海域図と観測点で、1 マイル間隔に 15 測点をとっている。このうち奇数点では Nansen Cast を併用した。この海域は夏から秋にかけて暖流水が沿岸に流入し、顕著な水温変動の生ずることが知られている。⁸⁾ そこで測定は本学部所属調査船うしお丸 (98 トン) によって、1976 年 6 月 8 日および 8 月 10 日に実施した。なお両日とも極めて「なぎ」のよい日であった。測定は全て鉛直間隔 50cm、記録計のレンジは 50mV、巻き取り速度を 60mm/min にして記録し

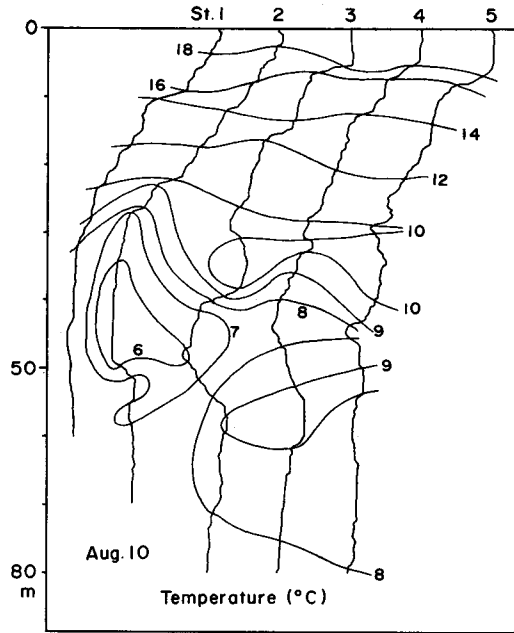


Fig. 9 Temperature section through St. 1 to 5, Aug. 10.

た。

図7は比較的温度変化の小さい6月における勾配計の降下時(Down)と上昇時(Up)の記録例で、通常温度分布と温度勾配の記録を合わせて示した。温度勾配のスケールは15°Cにおける値であって、図3による更正是加えていない。主温度躍層は大きな温度勾配をもつ薄い層とその間にある勾配の小さい厚い層とから成っていることがわかる。最大温度勾配は50cmで0.8°C以上にも達する。一方25m以深からは逆転気味の温度分布を示しており、0.1~0.2°C/0.5m程度の階段が数段にわたって見られ、微細な鉛直温度分布が決して滑らかではないことを示している。降下時と上昇時とを比較してみると再現性は良く、各々の温度勾配におけるピークの位置およびその大きさはほとんど一致しており、むしろ測定中の船の漂流と温度分布自体の時間変化による差異の方が大きいようである。

顕著な温度逆転のある場合を図8に示した。St.3の表層および40m深附近の水温低下部での勾配は、部分的に1.0°C/0.5mを越している。一方30m深、50~56m深の温度逆転部での勾配はそれぞれ最大0.4, 0.9°C/0.5mであって、後者では3°C以上の逆転温度差が認められる。この温度構造は深度と大きさを変えながらも1マイル離れたSt.4に連続している。

Nansen CastによればSt.3では温度逆転層が高塩分水に対応し、30mから60m深にかけて低温低塩水と高温高塩水とが交互に層を形成している。このとき温度変化によって補償される以上に塩分による密度の増加の割合が大きいため、40mと50m深の間には σ_t で0.27という密度逆転が生じている。このような密度逆転層は他の観測点でも見られるが、静力学的には不安定な状態であって、瞬間的な現象であるのかまたは別な維持機構が存在するのか興味深い。

今これをSt.1~5の温度断面(図9)から考えてみると、St.2の40~50m深に中心をもつ6°C以下の低温な沿岸水とSt.5から沖合の30m以深にある9~10°C以上の高温沖合水とが相互に水平貫入する形をしている。これらの低温、高温で特徴づけられる水塊は塩分においても著るしい差を有し、

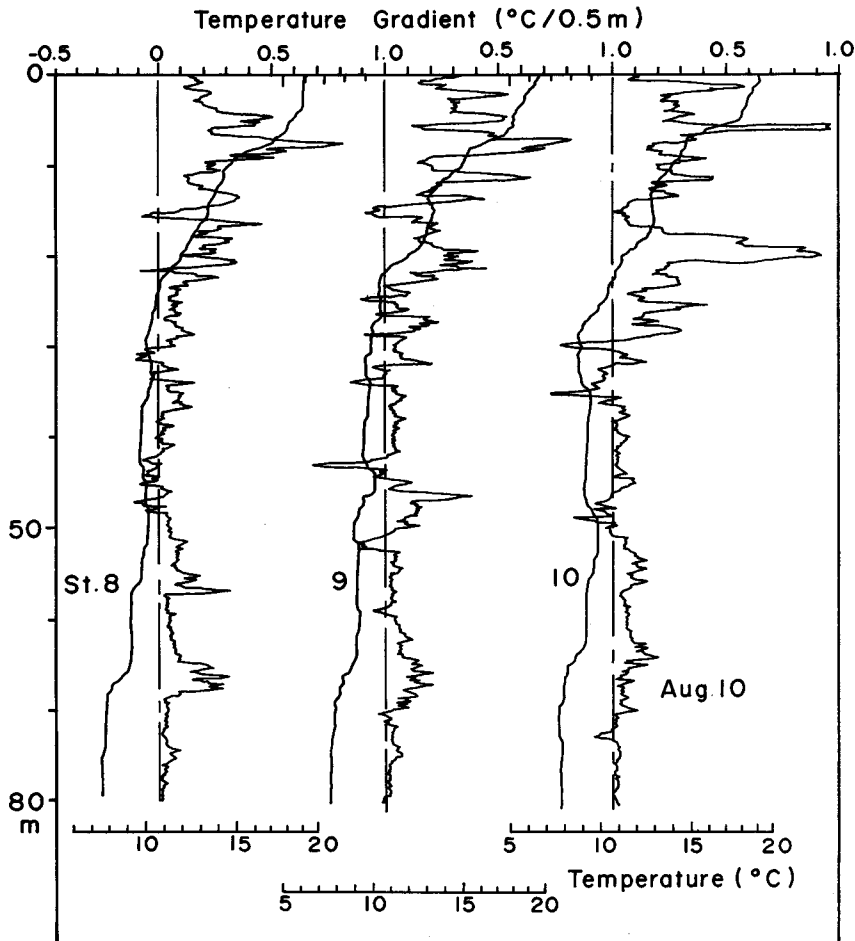


Fig. 10 Profiles of temperature and temperature gradient for St. 8, 9 and 10, Aug. 10.

低温水は 33.0% 以下，高温水では 33.6% 以上の値をもっている。30~50m 深の貫入層は厚さにして 10m 程度，水平距離にして 2~3 マイルの小規模な構造ではあるが，この様な現象は沿岸域における水塊の混合の一般的形態の一つと考えられ，沿岸の水塊形成や海況を知る上では重要な視点であろう。

図 10 は沖合の St. 8~10 の測定例である。ここでは 30m 以深の中深層において比較的温度変化の小さい層が大きな温度勾配をもつ遷移層によって分断されていることがわかる。このうち 35~45m, 55~65m, 70m 以深にあるほぼ一様な水温の層は水平均に 2 マイル以上連続しているように思われる。塩分値の資料不足からこれ以上のことは不明であるが，このような温度構造は各層観測からは見つけ出せないもので，温度分布からみて中深層においてもなお成層の形成があることを示唆している。

次にもう一つの測線 St. 10~15 を見てみる。図 11 は図 9 と同様に勾配計の水温用のサーミスタによって得られた鉛直分布から描いた温度断面図である。40m 深を中心にした沖合からの高温水の張り出しが明白に現れている。その中心部の St. 11, 12 の 30~50m 深にかけては 10°C の閉じた等温線と

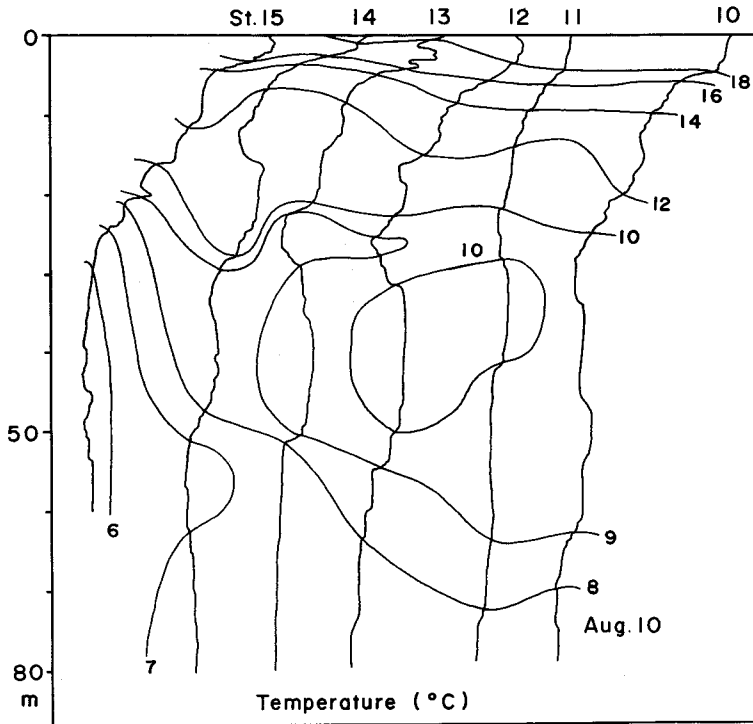


Fig. 11 Temperature section through St. 10 to 15, Aug. 10.

なっており、張り出しの中心部が既に分離し始めていると考えられる。高温水は St. 14 の 40 m 深にも影響し、その水平規模は 4 マイル以上におよぶ。この中心部 St. 12 の鉛直温度および温度勾配の記録を図 12 に示したが、32~49 m 深にある高温層では温度勾配が $0.1^{\circ}\text{C}/0.5\text{m}$ 以下の変化の小さい水柱であって、これより上層あるいは下層とは全く異った特徴を示している。また 50 m 以深は典型的な階段構造で、ステップの最大温度勾配は $0.9^{\circ}\text{C}/0.5\text{m}$ にもなっている。この様な階段構造は図 7、図 10 にも認められ、Woods and Fosberry⁹⁾ の主張する Layer-Sheet 構造が躍層以深にも存在することを暗示している。しかし 1 マイル離れた前後の観測点では、はっきりした連続性は見られない。

おわりに

以上述べた様に試作した温度勾配計によって、Nansen Cast や BT では得られない小規模な水温構造、すなわち高温水塊の舌状貫入、沿岸水と沖合水の入り組んだ構造、温度逆転、階段構造等を測定することができた。今回は測器の試験が主目的であったため概観の報告程度にとどめるが、これらの現象は沿岸海況の把握という観点からだけではなく、広く海洋で生じている水塊の混合、拡散過程の解明という立場からも重要であろう。またこの海域では水塊によっては水温あるいは塩分に比較的大きな差異が生じることがあり、この点からもこの勾配計は測定に好適である。今後十分な観測を続ける予定である。

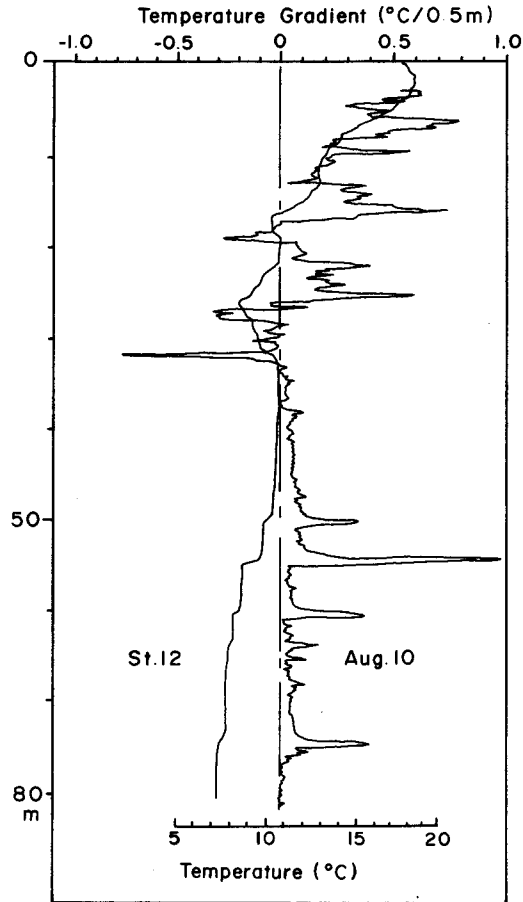


Fig. 12 Record showing the homogeneous layer of warm core and the step-like structures of temperature.

謝 辞

本研究に際して、終始適切な御指導と原稿の御校閲をいただいた福岡二郎教授、梶原昌弘助教授に厚く感謝します。測器の製作には北斗電気株式会社工場課田中耕作主任を始め御一同に、観測に際しては、坂口延一前船長を始めうしお丸乗組員御一同、梶原昌弘助教授、竹田仁技官、研究生の藤芳義裕、松岡光明（現在紋別漁協）の両氏に多大な御協力を得た。ここに謹んで感謝します。なお本研究の一部は昭和51年度文部省科学研究費補助金奨励研究によった。

文 献

- 1) Stommel, H. and Fedorov, K. N. (1967). Small scale structure in temperature and salinity near Timor and Mindanao. *Tellus* 19, 306-325.
- 2) Gregg, M. C. and Cox, C. S. (1972). The vertical microstructure of temperature and salinity. *Deep-Sea Res.* 19, 355-376.
- 3) Woods, J. D. and Wiley, R. L. (1972). Billow turbulence and ocean microstructure.

Deep-Sea Res. **19**, 87-121.

- 4) Osborn, T. R. (1973). Temperature microstructure in Powell lake. *J. Phys. Oceanogr.* **3**, 302-307.
- 5) Simpson, J. H. and Woods, J. D. (1970). Temperature microstructure in a fresh water thermocline. *Nature* **226**, 832-834.
- 6) Gregg, M. C. and Cox, C. S. (1971). Measurements of the oceanic microstructure of the temperature and electrical conductivity. *Deep-Sea Res.* **18**, 926-934.
- 7) Caldwell, D. R., Wilcox, S. V. and Matsler, M. (1975). A freely falling probe for small-scale temperature gradients. *Limnol. Oceanogr.* **20**, 1034-1042.
- 8) 三宅秀男 (1976). 噴火湾湾口部 10 m 深の水温変動の二、三の特徴 (序報). 北大水産集報 **27**, 6-14.
- 9) Woods, J. D. and Fosberry, G. G. (1967). Structure of the thermocline. *Rep. Underwater Assn.* **1966-67**, **2**, 5-18.