

18. フィールドにおける水温センサーの時定数測定

辻 義人^{*1} 原 俊明^{*1} 佐竹 博^{*1}

フィールドにおいて水温センサーの時定数を簡便に測定できる方法（フィールド法）を考案し、この実用性を検討するために、東京湾で昭和54年9月にCTDの水温センサーの時定数測定を試みた。

表層から20m深度までそれぞれ0.2 m/s, 0.5 m/s, 1 m/s, 2 m/sでCTDを降下させ、0.2 m/sで上昇させた。CTDの降下時と上昇時に得られる水温の鉛直分布の相違によって各降下速度で、水温センサーの時定数を算出した。

得られた時定数は、1 m/s以上のCTD移動速度のときに約0.4 sの一定値を示す。しかしステップチェンジ法によって測定した時定数と比べるとやや大きい。これは主にwater boundary layerの有無によると考えられる。誤差計算によると、フィールド法による時定数測定誤差は0.1 未満である。現状の水温センサーの精度からみて、フィールド法は、水温データの補正を行うための簡便な時定数測定法として有効であると認められた。

Measurement of the T-Sensor Time Constant in the Field

Yoshito Tsuji^{*1}, Toshiaki Hara^{*1}, Hiroshi Satake^{*1}

We tested a new time constant measuring method, field method, which can be applied to the T-sensor which is attached to any type of field instruments. This method can be executed in the field without special apparatus or testing tanks. The field method is effective wherever there is a thermocline with a large temperature gradient.

In order to test the field method, the T-sensor time constant of the CTD was measured at the thermocline ($0.14^{\circ}\text{C}/\text{m}$ from 11 m to 20 m) in Tokyo Bay. The CTD is lowered across the thermocline rapidly, and raised slowly. The time constant can be calculated from the difference between the descending profile and the ascending profile, both of which are assumed to represent the identical temperature distribution.

As the T-sensor speed increased, the time constant decreased until it settled at 0.4 sec. The time constant measured by the field method was larger than that measured by the step function response method. This difference may be attributed to the presence of the water boundary layer around the T-sensor probe in the field measurements.

^{*1} 海洋保全技術部

^{*1} Marine Environment Department

The error estimation indicated that the field method gave accuracy of at least 0.1 sec which was useful enough to correct the distorted temperature data measured by slow response T-sensors. It is concluded that the field method is a facile measuring method in the field for the T-sensor time constant of CTD.

1. はじめに

海洋のダイナミックな現象を詳しく把握するためには、広域にわたって同時性が高く、時間空間的に密で多要素からなるデータの収集が必要である。

たとえば、曳航式海洋観測手法は、空間的に連続なデータを迅速に得ることができ、これからの主要な海洋観測手法の一つと考えられる。一方、曳航式海洋観測手法では、従来の点観測に比べ、センサーの動的な応答特性やプローブ（センサーの先端の感熱部）の構造の流体力学的な特性が、得られたデータの性質に大きな影響を与える可能性を持つ⁹⁾と言われている。これらの二つの問題のうち、本研究ではセンサーの動的な応答特性の問題について検討を行う。

移動しているセンサーの出力は、入力に比べ、レベルの低下と位相の遅れ（これらを以下“ひずみ”と呼ぶ）を伴う。この傾向はセンサーの時定数の増加、または入力信号の周波数の増加によって増大する。入力信号の周波数の増加は水温の空間分布が同じで水温センサーの移動速度が増加したとき、または水温センサーの移動速度が一定で水温の空間的変動が増加したときに起こる。

現在、広く使用されている水温センサーは、熱伝導によってプローブのまわりの水温の変化を受感素子に伝えるタイプなので、これらの水温センサーの時定数は他の物理量測定センサーのものと比べ、1～2のオーダーで大きい。たとえばプレッシー社製のCTD（Model 9400）の電気伝導度、深度、水温センサーの時定数はそれぞれ80 ms、20 ms、350 msである（プレッシー社カタログ、1978年による）。したがって、入力信号の条件が同じならば、水温のひずみは電気伝導度と深度に比べて1～2のオーダーで大きい。このことは、電気伝導度と水温から算出する塩分の精度を悪くしている。

このために測定した水温を補正し、真の水温を推定することが行われ始めた。たとえば、scarlet（1975）は、水温勾配の強いところで見られるサリニティスパイク（salinity spike）が電気伝導度センサーに対する水温センサーの応答の時間遅れによって生じるとして、水温センサーの時定数を組込んだ補正式によって真の水温を推定し、塩分の鉛直分布からサリニティスパイクを取り除くことができた。このように、測定した水温データを補正し、真の水温を算出するためには、水温センサーの正確な時定数を求める必要がある。

これまでの水温センサーの時定数の測定は、主に室内においてプローブを対象^{1～8,10)}として行われた。

一方水温を補正するために必要な情報は、プローブだけではなくその上に海洋観測装置の出力回路系などを含めた総合的な時定数である¹³⁾と言われている。しかし、プローブだけのときに比べ、海洋観測装置の寸法が大きすぎたり、特殊な時定数測定装置を必要とするので、室内で時定数を測定することは困難を伴う。したがって、特別な時定数測定装置を使用せず、海洋観測装置が示す総合的な時定数をフィールドで簡便に測定できれば望ましい。しかし、フィールドにおける時定数測定例は少ない。Goulet ら（1972）はサリニティスパイクの記録から水温センサーの時定数を算出しようとした⁵⁾が、得られた時定数は、ばらつきが大きく、十分満足できるものとは言えてない。

そこで筆者らは、海洋観測装置の水温センサーが示す総合的な時定数をフィールドにおいて簡便に精度よく測定する方法（フィールド法）を考案した。さらに海域試験を行うことによって、本手法の有効性を試したので報告する。

なお、海域試験時に船上作業を手伝っていただいた同僚の美澄篤信氏および久鶴丸の乗組員の方々に感謝する。

2. フィールド法による時定数測定の実理

時定数 τ , 入力 $x(t)$ および $y(t)$ から次のような関係が得られる。

$$x(t) = y(t) + \tau \frac{dy(t)}{dt} \dots\dots\dots (1)$$

センサーの回りの水温が変化するとき、時刻 t_1 および t_2 におけるセンサーの出力をそれぞれ T_1 および T_2 とする。(1)式の両辺を積分することによって、 t_1 から t_2 の区間における入出力と時定数の関係は、つぎのようになる。

$$\int_{t_1}^{t_2} x(t) dt - \int_{t_1}^{t_2} y(t) dt = \tau \{y(t_2) - y(t_1)\} \\ = \tau (T_2 - T_1) \dots\dots\dots (2)$$

時間経過に伴って水温を変化させるには、成層した海域で、水温センサーを鉛直方向に移動させればよい。

センサーを定速 V で鉛直方向に移動させたとき、時間と入出力との関係 $x(t)$ および $y(t)$ がそれぞれ深度と入出力との関係 $X(D)$ および $Y(D)$ に交換されるとする。このときの時刻 t_1 および t_2 に対応する深度をそれぞれ D_1 および D_2 とすると、(2)式から(3)式が得られる。

$$\int_{D_1}^{D_2} X(D) dD - \int_{D_1}^{D_2} Y(D) dD = V \cdot T \cdot (T_2 - T_1) \dots\dots\dots (3)$$

ここで図1に示すように、センサーの上昇時の速度および D_1 と D_2 での水温をそれぞれ V_u および T_{u1} と T_{u2} とする。また同様に、センサーの降下時の速度および D_1 と D_2 での水温をそれぞれ V_d および T_{d1} と T_{d2} とする。ただし降下時および上昇時の速度はそれぞれ下方向および上方向を正とする。

深度 D_1 と D_2 間におけるセンサーの降下時と上昇時の出力の差の積分値 ΔA は、降下時および上昇時に水温センサーの応答遅れによって生じる真の水温の鉛直分布からのずれの積分値の和として(3)式から次式のように求められる。

$$\Delta A = V_d \tau_d (T_{d1} - T_{d2}) + V_u \tau_u (T_{u1} - T_{u2}) \dots\dots\dots (4)$$

この式は、 ΔA , V_d , V_u , T_{d1} , T_{d2} , T_{u1} および T_{u2} , を知れば τ_d と τ_u の関係を求め得ることを示す。ただしこのとき、1組の降下、

上昇時間内に生じるフィールドの水温の鉛直分布の変化は十分に小さいと仮定した。

3. 海域試験の方法

1978年9月8日、午前10時30分、東京湾内金沢沖の水深24mの海域 (N 35° 20' 10", E 139° 40' 37") に実験船 (久鶴丸, 99 t) を投錨し、フィールド法の海域試験を開始した。

当日は前日の強い波浪 (シーステート 3~4) に続く東の風に伴うやや強い (シーステート 2) の海況であった。

使用した水温センサーは、CTD測定装置 (沖電気工業株式会社製) の一部で、白金抵抗型 (0°C, 100 Ω) の温度計である。

図2は水温センサーのプロブの構造を示す。

表層から約20m深度まで、約0.2m/s, 約0.5m/s, 約1m/s および約2m/s で、CTDを降下させた。上昇時は常に約0.2m/s とした。各下降速度について2回の測定を続けて行い、合計8回の降下、上昇を繰り返す、20min以内に全測定を完了した。なお、CTDの降下、上昇時には常に新しい海水が水温センサーのプロブに接触するように、プロブの長手方向を水平とした。下降速度を増すため、CTDの下方に約15kgの錘を取付けた。また、できるだけ正確にCTDの移動速度を一定に保つため、ウインチを手動で操作し、ストップウォッチと線長計の読みを比較し、ウインチ速度を調整した。

船上のアナログ データレコーダー (TEAC, R81) にCTDの出力を記録した。後日、陸上で

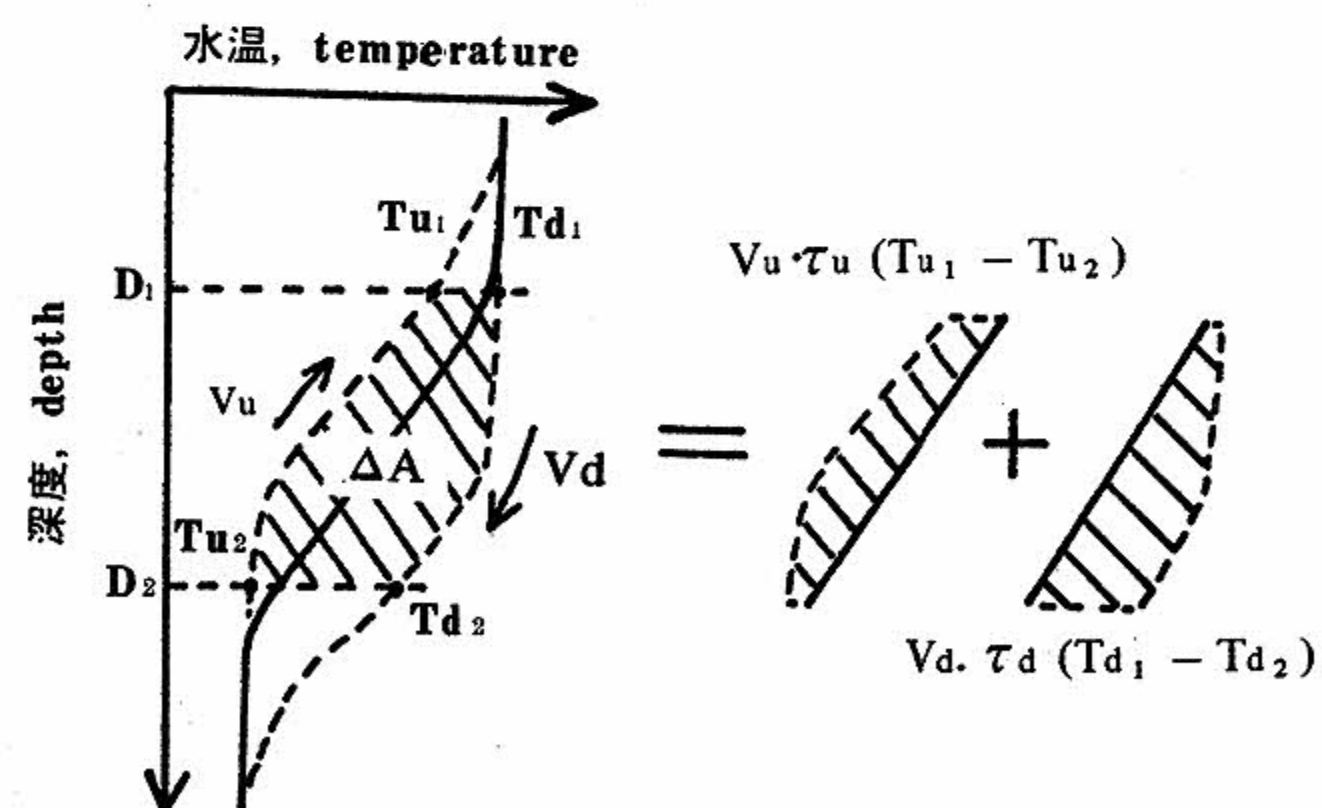


図1 フィールドにおける時定数測定原理図

The principle of the time constant measurement in the field

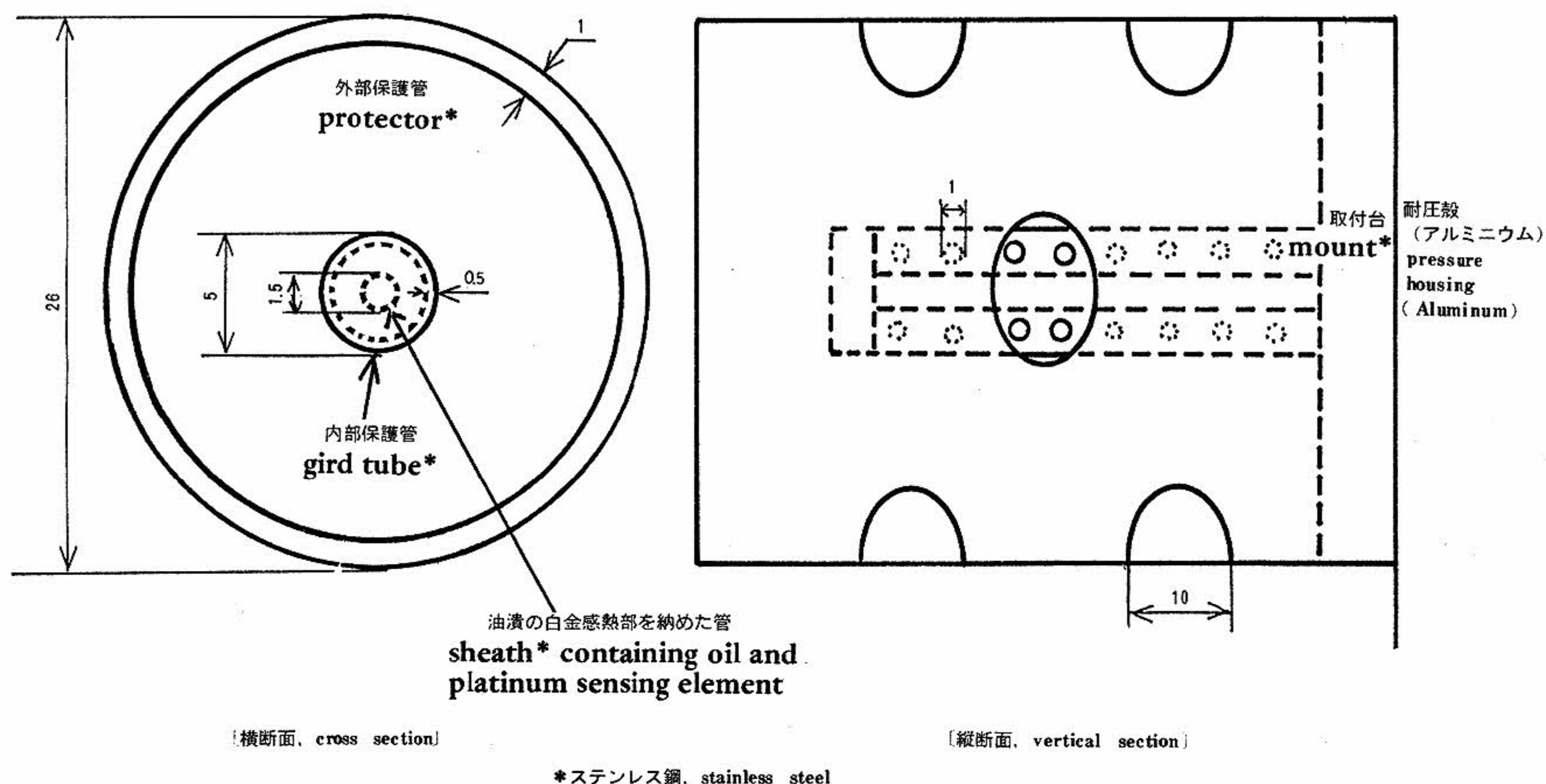


図2 水温センサーのプロブ部の構造

The structure of the T-sensor probe used the time constant measurement in the field

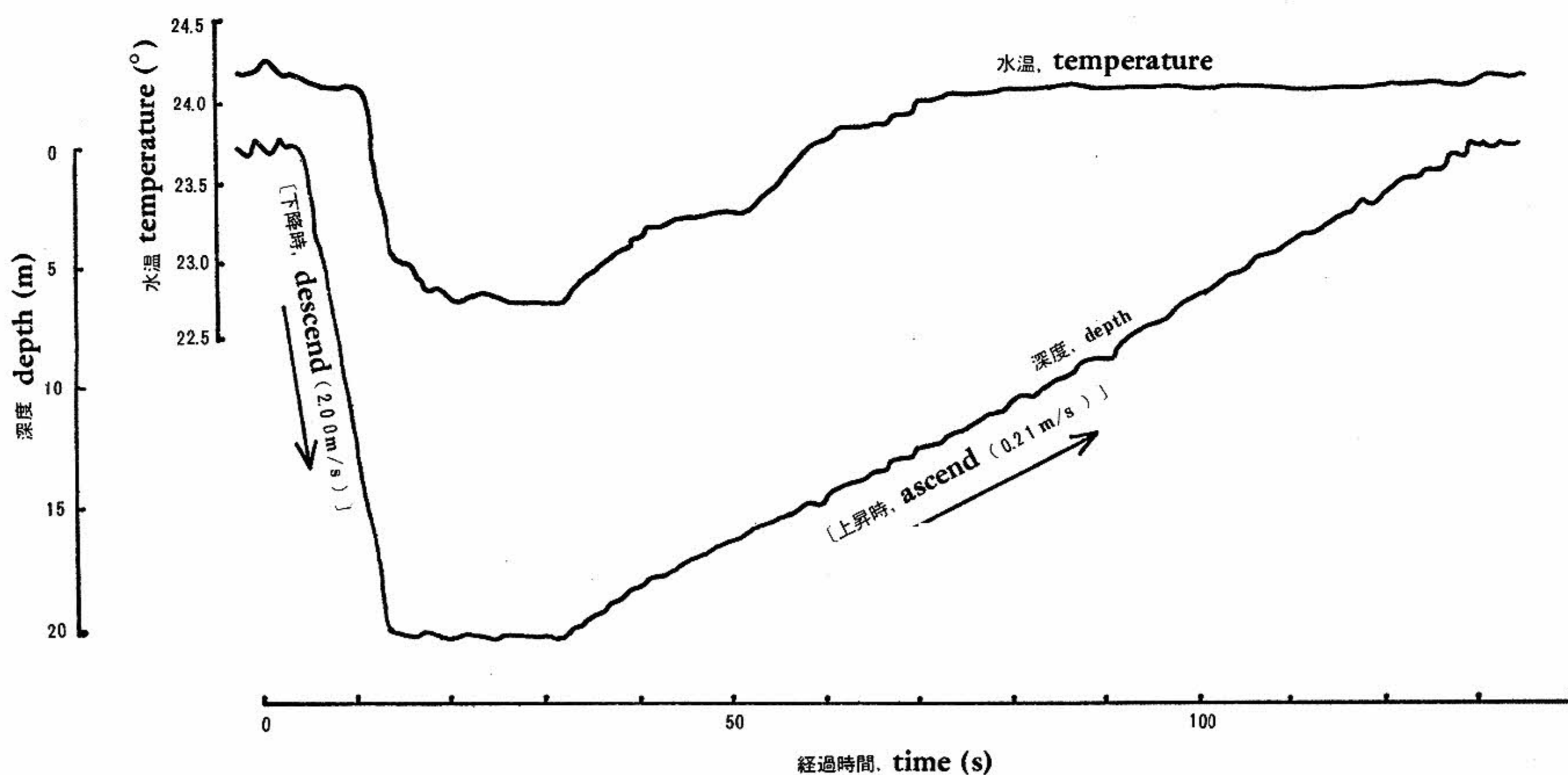


図3 時定数測定時の水温と深度の時間変化の一例

An example of temperature and depth output during the time constant measurement in the field

記録を再生し、X-Yレコーダーに水温の鉛直分布を描かせた。降下時および上昇時の水温センサー出力の鉛直分布曲線に囲まれた部分のうち、成層の強かった11mから20mまでの区間の面積を ΔA として求めた。また、アナログデータレコーダーに記録したCTD深度の時間変化からCTDの下降、上昇速度を正確に算出した。なお、X-Yレコーダーの時定数(0.04s)が水温センサーの時定数の計算結果に影響を与えるので、得られた水温センサーの時定数を補正した。

4. 結 果

CTDをそれぞれ約2 m/s, 約0.2 m/s で下降、上昇させたときの深度と水温を図3に示す。

この図から、波浪に伴う船の動揺によって生じたCTDの上下動は20cm以内であると言える。また深さ9mの水槽試験によると、下降、上昇時の深度センサーの履歴は20cm以内であった。したがって、時定数の算出を行った深度区間の長さ(11mから20m深までの差9m)に比べ、波浪に伴うCTDの上下動と深度センサーの履歴は十分に

小さいと考えられるので、今回得られた深度データには特別な補正を行わなかった。

CTDを約0.2 m/s, 約0.5 m/s, 約1 m/s および約2 m/s で下降し、それぞれ約0.2 m/s で上昇したときの水温の鉛直分布を図4に示す。

この図から水温の鉛直分布パターンは時間とともに徐々に変化していたにもかかわらず、一組の下降、上昇時間内の水温の鉛直分布パターンはほぼ一致していることが認められる。したがって、一組の下降、上昇時間(11m→20m→11m; 1~2 min)内に生じるフィールドの水温の鉛直分布の変化は十分に小さいと言える。

得られた水温センサーの時定数を表1に示す。実験3~8では、CTDの上昇がすべて0.21 m/sで行われたとして、実験1と2で得られた平均時定数(2.92s)を上昇時の時定数とし、各下降速度の時定数を算出した。

時定数と対水速度の関係を全体的に把握するため、表1を図形化して図5に示す(実線)。また、回流水槽を使用したステップチェンジ法で原ら

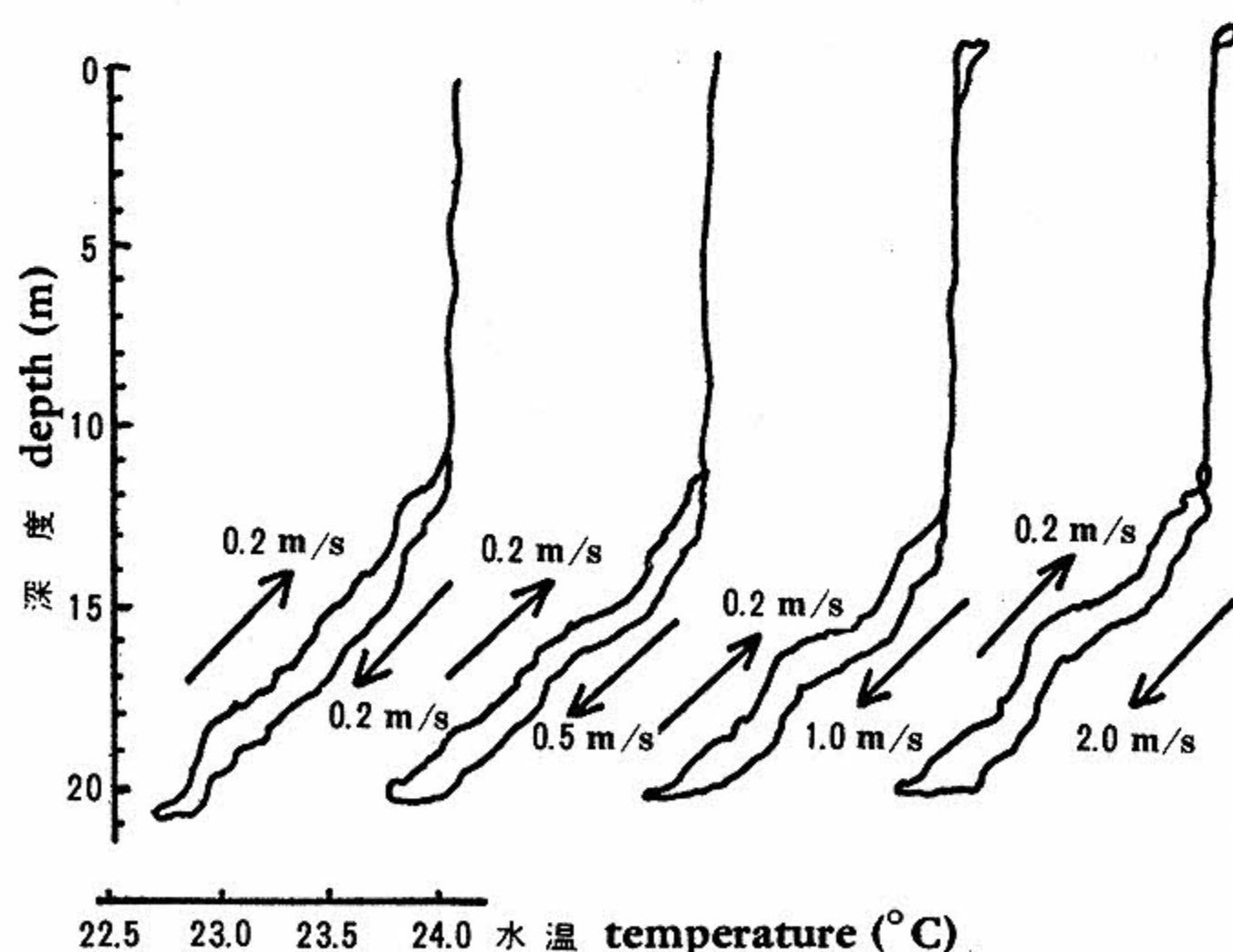


図4 CTDの下降、上昇時の水温の鉛直分布
Temperature profiles measured during the descending and ascending of CTD

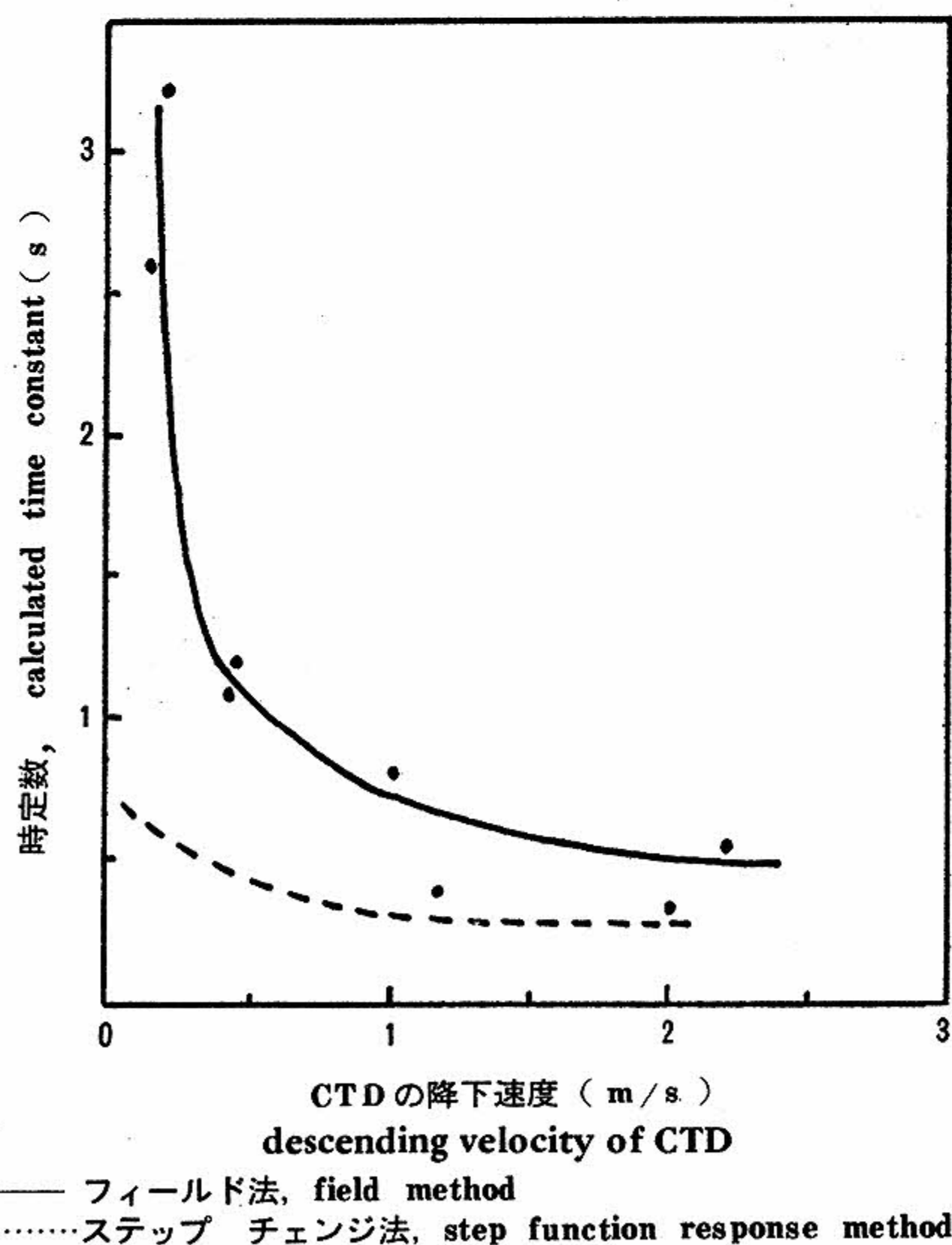


図5 水温センサーの時定数
Time constant of the T-sensor

表 1 フィールドで測定した水温センサーの時定数

T-sensor time constants measured in the field

実験番号 Experiment no.	下降速度(m/s) Descending velocity	上昇速度 (m/s) Ascending velocity	下降時の時定数 (s) Time constant at the descending velocity
1	0.21	0.21	3.21
2	0.20	0.21	2.62
3	0.51	0.22	1.18
4	0.51	0.21	1.07
5	1.00	0.21	0.82
6	1.14	0.20	0.43
7	2.23	0.20	0.52
8	2.00	0.21	0.37

(1979)が今回と同一の水温センサーで測定した時定数(破線)⁶⁾をも合わせて図5に示す。この図から、次のことが認められる。

- (1) フィールド法で測定した水温センサーの時定数は、測定した対水速度範囲内では、ステップチェンジ法のものよりも大きい。
- (2) フィールド法とステップチェンジ法によって得られた時定数は、対水速度に対して同様の傾向を示す。
- (3) フィールド法で測定した水温センサーの時定数はセンサーの移動速度が0.2 m/s から増加するに従って3s から0.4s まで減少し、センサーの移動速度が約1 m / s を超えると0.4 s の一定値を示す。

5. 考 察

5.1 ステップチェンジ法とフィールド法によって得られた時定数の比較

ステップチェンジ法では、空中から水中に水温センサーのプローブを投下したときに生じる室温 T_i から水温 T_f への温度のステップチェンジを利用し、水温センサーのインデシヤル応答性から時定数を算出する。このとき、空中のプローブは

温度 T_i の空気を取巻かれているが、水没時には速やかに水温 T_f の水に取巻かれる。したがって、プローブの表面は水没とほとんど同時に水温 T_f の水と接し、速やかに水温 T_f に近づく。

一方、フィールド法ではつぎのようになる。水温センサーのプローブは水温 T_1 の水(A)から水温 T_2 の水(B)へ移動するとする。A内のプローブは水温 T_1 の水に取巻かれている。センサーをB内へ移動すると、Aの水がプローブの回りのごく薄い水の層(water boundary layer)¹⁰⁾となってBに移る。したがって、B内のプローブの表面は直接水温 T_2 の水と接することができず、プローブの回りを取巻くAの水の薄い層を通してはじめて水温 T_2 のBから熱をうける。

このように、フィールド法で測定した時定数は、water boundary layer による熱伝導の遅れを含み、ステップチェンジ法に比べて大きいと考えられる。また、ステップチェンジ法では外部保護管を取除き、フィールド法ではこれを取付けていた。したがって外部保護管によって、プローブの回りの海水が乱されたり、内部保護管の回りの海水の交換が妨げられた可能性がある。しかしこれが時定数に与える影響については今後の検討を要する。いずれにせよ、CTDを実際に水中で使用するときは、水温センサーのプローブの回りには常に water boundary layer が存在するので、CTDの総合的な時定数として、フィールド法による測定値を採用すべきである。

5.2 フィールド法の測定誤差

ここでは、算出した時定数の最大誤差について検討を行う。

真島および磯部(1974)¹¹⁾によると間接測定時の誤差は以下のように計算できる。次式のように x_1 , x_2 , ……等の量の値を観測し、 y なる量の値を算出するものとする。

$$y = f(x_1, x_2, \dots) \text{ -----(5)}$$

x_1 に δx_1 , δx_2 に δx_2 ……等の誤差を生じたものとする、これらによって求められる y の値に生ずべき誤差 δy は次式で与えられる。

$$\delta y = \frac{\partial f(x_1, x_2, \dots)}{\partial x_1} \delta x_1 + \frac{\partial f(x_1, x_2, \dots)}{\partial x_2} \delta x_2 + \dots \text{ (6)}$$

上記の誤差計算手法をフィールド法による時定数測定の場合に適用するにあたり、計算の煩雑化を避けるため、水温センサーを等速度で下降、上昇させるとする。そのときの下降時と上昇時の時定数は等しくなる。また水温センサーの遅れによって生ずる真の水温の鉛直分布と観測した水温の鉛直分布のずれは、下降時と上昇時で、ほぼ等しい絶対値だけ逆方向に生じると考えられる。

これらの仮定は、次のように表わされる (図1 参照)

$$\left. \begin{aligned} V &= V_d = V_u \\ \tau &= \tau_d = \tau_u \\ \Delta T &= T_{d1} - T_{d2} = T_{u1} - T_{u2} \end{aligned} \right\} \text{----- (7)}$$

(7)式を(4)式に代入して整理し、(8)式を得る。

$$\tau = \frac{\Delta A}{V \cdot \Delta T} \text{----- (8)}$$

(8)式を(6)式に従って計算し、について
整理すると次式を得る。

$$\frac{\delta \tau}{\tau} = \frac{\delta(\Delta A)}{\Delta A} - \frac{\delta V}{V} - \frac{\delta(\Delta T)}{\Delta T} \text{----- (9)}$$

ΔA は、面積の有効数字を3桁まで取ったので、次の関係式が成立する。

$$\frac{\delta(\Delta A)}{\Delta A} \leq 0.01 \text{----- (10)}$$

V は水温センサーの時定数が一定 (最小) 値となり始める対水速度 1.00 m/s を考えれば、有効数字が3桁なので、以下の関係式を得る。

$$\frac{\delta V}{V} \leq 0.01 \text{----- (11)}$$

なお、センサーの移動速度は短時間内でやや変動を示し、ある程度の長時間内で一定値を示した。今回の測定では下降または上昇距離は 9 m あり、移動時間は十分に長いと考えられる。

測定した水温にはアナログデータレコーダーと深度計の誤差が含まれている。アナログデータレコーダーは $\pm 5 \text{ mV}$ の精度を有し、今回の実験では、 $\pm 0.034^\circ\text{C}$ の水温に相当する。

一方、 $\pm 10 \text{ cm}$ の深度誤差は水温躍層の勾配が 0.14°C/m とすると、 $\pm 0.014^\circ\text{C}$ の水温誤差に相当する。また ΔT は水温の差なので、その最大誤

差は水温誤差の2倍となる。

今回は ΔT がほぼ 1°C であったので、次の関係式を得る。

$$\frac{\delta(\Delta T)}{\Delta T} \leq \frac{0.034 + 0.014}{1.0} \times 2 = 0.096 \text{----- (12)}$$

(9)式の各項の絶対値の和が時定数の最大誤差となるので、この式に(10)式、(11)式および(12)式を代入し、次の関係式を得る。

$$\frac{\delta \tau}{\tau} \leq 0.116 < 0.12 \text{----- (13)}$$

この式からフィールド法によって測定した時定数の最大の誤差は12%と推定できる。実際の誤差はこれよりも小さいと考えられるので、フィールド法によって測定した 0.1 s オーダーの時定数は少くとも有効数字1桁 (0.1 s の位) の信頼性があると言える。

時定数測定時の誤差を小さくするためには、(9)式の各項の分母を大きくすればよい。つまり、移動速度 V を増加させるか、又はより強く成層した海域を選んで ΔT を増加させればよい。特に強い躍層のところで測定すれば、必然的に ΔA も大きくなり、 ΔT の増大と相まって測定精度が向上する。

5.3 フィールド法の有効性

ここでは、フィールド法によって得られた時定数が、真の水温を求めるために十分なだけの精度を持っているかどうかを検討する。

水温センサーの時定数を τ 、入力を $x(t)$ 、出力を $y(t)$ とする。このセンサーに(14)式の入力を加えるとする。

$$\frac{dx(t)}{dt} = a \text{----- (14)}$$

このときの入出力の差 Z を求める。

$$z = x(t) - y(t) \text{----- (15)}$$

(14)式および(15)式を(1)式に代入して整理し、次式を得る。

$$\frac{dz}{dt} + \frac{1}{\tau} \cdot z - a = 0 \text{----- (16)}$$

$t = 0$ のとき、 $Z = 0$ の条件のもとに(16)式を解き、つぎの関係式を得る。

$$z = \tau \cdot a - \frac{1}{\tau \cdot a} \cdot e^{-t/\tau} \text{----- (17)}$$

この式から、入出力の差は時間経過とともに、 τa に近づくことが理解できる。これは、測定された水温（出力）から真の水温（入力）を推定するための補正項の大きさの目安がセンサーの時定数と入力の変化率 a の積によって与えられることを示す。

たとえば、 $0.5^{\circ}\text{C}/\text{m}$ の水温躍層で水温センサーを $1\text{m}/\text{s}$ で下降させると、センサー入力の変化率は $0.5^{\circ}\text{C}/\text{s}$ となる。フィールド法によって測定した時定数が 0.1s の位まで信頼できるとすると、この時定数によって算出された補正項のうち少くとも 0.05°C の水温まで信頼できる。また、測定した時定数の 0.01s の位に誤差が生じたとしても、これが与える補正項の誤差は 0.05°C 以下である。実海域の水温の鉛直勾配は $0.5^{\circ}\text{C}/\text{m}$ よりも小さい場合が多いと考えられるので、水温センサーの精度の現状からすれば、時定数の 0.01s の位の誤差は無視できる。

したがって、フィールド法によって測定した水温センサーの時定数は、得られた水温の補正に使用する限り実用上十分な精度を有すると考えられる。

6. おわりに

考案したフィールド法によって、CTDの水温センサーの時定数を測定した結果、つぎのことがわかった。

- (1) フィールド法で測定した時定数は、センサーの対水速度に関して、ステップチェンジ法のものと同じ傾向を示す。
- (2) フィールド法で測定した時定数は、ステップチェンジ法のものよりも大きい。water boundary layerの影響を含み、観測時にセンサーが示す実際の時定数に近いと考えられる。
- (3) フィールド法の測定誤差は 0.1s 未満である。
- (4) フィールド法で得られた時定数は、現状の水温センサーの精度からみて、水温データの補正に使用する限り、十分な精度を有する。
- (5) フィールド法は、特別な時定数測定用治具を使用せず、フィールドで、水温センサーの時定数を測定できる簡便な手法として有効である。

文 献

- 1) Aagaard, E.E., "Transient Response of Thermistor Probes in Moving Water" Marine Sciences Instrumentation vol. 4 (1968), p. 518-525, Plenum Press, New York
- 2) Aagaard, E.E., "Dynamic Characteristics of Sensors for Marine Temperature Measurements". Transactions Marine Temperature Measurements Symposium (1969), p. 117-125
- (3) 阿部喜昭, 長谷川雄三, 石井信夫, 小林啓一, "微少ビード型サーミスタの現場における温度計測", 第15回SICE学術講演会要旨集(1976) p. 277 - 278
- 4) Fabula, A.G., 1968, "The Dynamic Response of Towed Thermometers", J. Fluid. Mech. 34 (3), 449-464
- 5) Goulet, J.R., B.J. Culverhouse, Jr., 1972, "STD Thermometer Time Constant", J. Geophys. Res. 77, 4588-4589
- (6) 原俊明, 佐竹博, 辻義人, 1979, "水温センサーの時定数測定", JAMSTECTR 3, 89-93
- 7) Hurst, W.S., 1975, "Note on the Measurement of the Response of Oceanographic Temperature Sensors", J. Geophys. Res. 80, 2663-2666
- 8) Irish, J.D., W.E. Nodland, "Evaluation of Metal-film Temperature and Velocity Sensors and the Stability of a Self-Propelled Research Vehicle for Making Measurements of Ocean Turbulence", Transactions of Oceans (1978), p. 180-187
- (9) 科学技術庁研究調整局, 曳航式海洋観測システムの開発に関する総合研究報告(1978) 158 pp.

10) Lueck, R.G., O. Hertzman, T.R. Osborn, 1977, "The Spectral Response of Thermistors", Deep-Sea Res. 24, 951-970

(11) 真島正市, 磯部孝, 計測法通論 (1974), p. 4-7, 東京大学出版会

12) Scarlet, R.I., 1975, "A Data Processing Method for Salinity, Temperature, Depth Profile", Deep-Sea Res. 22, 509-515

(13) 吉岡洋, 芹澤重厚, "S T Dの水温, 塩分の補正", 1978年度日本海洋学会秋季大会講演要旨集 (1978), p. 71-72