

TUMSAT-OACIS Repository - Tokyo University of Marine Science and Technology (東京海洋大学)

## 超音波による水中温度計測の試み

著者	劉 学振 , 浜田 悦之 , 古澤 昌彦
雑誌名	東京水産大学研究報告
巻	85
号	1
ページ	19-28
発行年	1998-03-27
URL	<a href="http://id.nii.ac.jp/1342/00000614/">http://id.nii.ac.jp/1342/00000614/</a>

## 超音波による水中温度計測の試み\*

劉 学振\*<sup>1</sup>・濱田悦之\*<sup>1</sup>・古澤昌彦\*<sup>1</sup>

### A BASIC STUDY ON ACOUSTICAL MEASUREMENT OF UNDERWATER TEMPERATURE

Liu Xuezheng\*<sup>1</sup>, Etuyuki Hamada\*<sup>1</sup> and Masahiko Furusawa\*<sup>1</sup>

The speed of sound in the water depends on temperature of the water, so that the temperature can be estimated from the measured speed of the sound. That is, if the distance between two points is exactly known beforehand, and if the medium and temperature are uniform, the temperature of the medium can be estimated by the travel time of the sound. But, it is difficult to not only know the propagation distance accurately, but also measure the propagation time accurately. That means, it is not easy to measure underwater temperature from a sailing ship using sound propagation. In this paper, as the first step for such application, the principle of measuring underwater temperature is examined in a water tank. A testing system is developed to verify the principle, and the experiment was conducted. The results showed that the maximum error was 0.06°C, comparing with the results obtained with a digital thermometer. The possibility to measure the underwater temperature using sound scattering was discussed.

**Key words:** Ultrasonic wave, Underwater temperature, Measurement system, Speed of sound, Propagation distance, Propagation time

#### 緒 言

合理的、計画的な水産業のためには、海洋環境の広域的、継続的な情報を知ることが不可欠である。特に、魚類の行動生態や資源の再生産を制限する環境条件として、水温は非常に大切である<sup>1)</sup>。また、漁場形成における水温分布の寄与は大きいので、漁場を早期に発見して操業するためにも水温の測定は不可欠といえる。

海面下の水温分布を把握するために、従来、BT, XBT, STD および CTD などが利用されている<sup>2,3)</sup>。しかし、これらは、停船して測定深度まで測定装置を垂下するか、投げ棄てなければならず、測定に時間、労力、経費がかかり、しかも連続性に欠ける。また、XBT を使う場合は投棄するので、環境上の問題も懸念される。海洋音響トモグラフィにより水中音速（水温）の断面構造を推定する方法<sup>4)</sup>もあるが、船が走りながらその直下の水温を計測することはできない。そこで、航行中に船上から水温分布をリアルタイムで測定できるようなシステムの開発が望まれている。

本研究では、従来の方法と異なり、センサを垂下したり投下することなしに、完全な水温のリモートセンシングが行える超音波水温計の可能性について検討を行った。すなわち、水温によって超音波の伝搬速度が変化することを利用すれば、水槽という条件下においては正確に水温計測

\* Received October 31, 1997.

\*<sup>1</sup> Department of Marine Science and Technology, Tokyo University of Fisheries, 5-7, Konan 4-chome, Minato-ku, Tokyo 108-8477 (東京水産大学海洋生産学科)。

ができることを示唆している。そのため、実験装置を試作し、水槽で計測試験を行った。

### 超音波水温計の計測原理

ここでは、これまでに提案されている超音波による水温計測の原理を簡単に説明する<sup>5)</sup>。Fig. 1に示すように、送波器と受波器を一定の間隔  $B$  に設置し、送受波ビームが交わるように受波器の指向ビームを角度  $\theta$  だけ傾ける。送波器と受波器の指向ビームの交点を  $S$  とすれば、送波器から発射された超音波パルスは、 $S$  点でのプランクトンなどによる体積散乱エコーとして受波器で受信される。超音波が送信されてから受信されるまでの経路長を  $l$  とすると、 $l$  は送・受波器間隔  $B$ 、受波ビーム傾斜角度  $\theta$  で決定される。すなわち

$$l = B(\tan \theta + 1/\cos \theta) \quad (1)$$

となる。超音波が送信されてから受信されるまでの時間  $t$  を測定すれば、水深  $D$  までの水中平均音速  $c$  は

$$c = l/t = B(\tan \theta + 1/\cos \theta)/t \quad (2)$$

である。音速は水温の関数であるので、音速  $c$  が計測できれば、水深  $D$  までの平均水温  $T$  が求められる。

次に、受信機の指向ビームの角度  $\theta$  を変えて  $\theta'$  とすると、送受波器の指向ビームの交点  $S'$  その

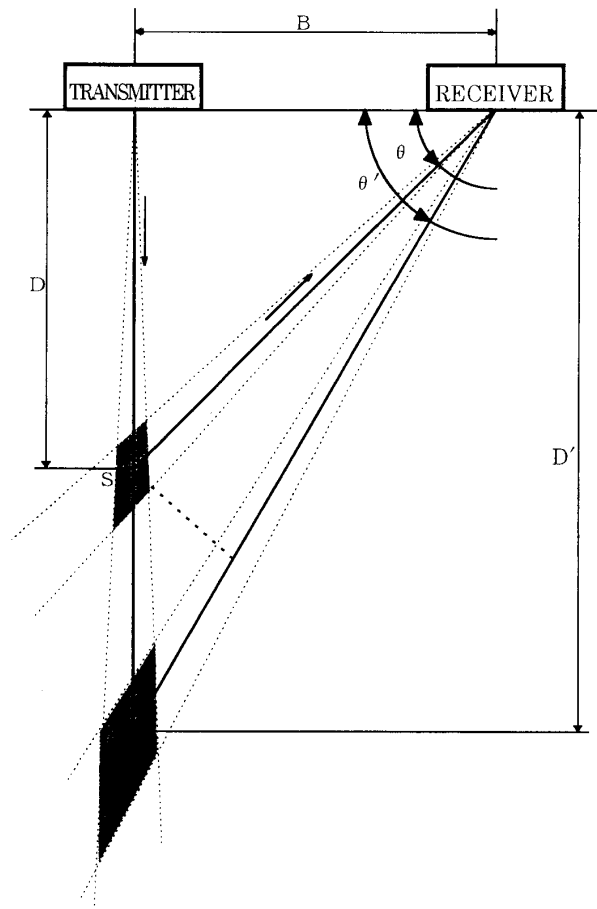


Fig. 1. Principle of underwater temperature measurement with ultrasonic wave propagation.

水深  $D'$  も変わる。受波器で  $S$  点と  $S'$  点からのエコーを受信し、この二つの音線の経路差  $\Delta l$  を到達時間差  $t'-t$  で割ることにより、測定層 ( $D \sim D'$  層) における超音波の伝搬速度  $c'$

$$c' = \Delta l / (t' - t) \quad (3)$$

が求まる。Fig. 1 及び式 (1) から伝搬経路差は

$$\Delta l = B(\tan \theta' - \tan \theta + 1/\cos \theta' - 1/\cos \theta) \quad (4)$$

で求まるから、伝搬時間差  $t'-t$  を測定して、伝搬速度  $c'$  を求め、音速と水温の関係式から  $D \sim D'$  付近の水温を逆算できる。

上記の原理で水温を計測する場合は、超音波エコーが得られるよう、目的とする場所に何らかの超音波散乱体がなければならない。超音波散乱体としては、海中のプランクトン、ネクトン(小魚の群、魚群)、懸濁物質などが想定できる。これらの反射体から高い信号対雑音比 (SN 比) でエコーを得るための超音波送受信系を設計するには、これらの散乱体のターゲットストレングス (TS) 及び分布密度を知る必要がある。TS と分布密度を与えれば、適切な周波数や送受波器の径などを与えることができる<sup>6)</sup>。

音波の交差する点での音波自身による密度変化からの散乱をとらえる案もあるが、この場合、送信音圧を 220 dB (re 1  $\mu$ Pa at 1 m) とすると、音波交差点での水の密度の変化率はわずかに 0.0045% である。この方法により交差点からのエコーは極めて弱く、この案の実現は困難であろう。

## 実験方法

上述した原理に基づき、水中温度を正確に計測するためには、超音波の伝搬速度を正確に計測しなければならない。このため、まず、水槽において伝搬距離が正確に分かっている場合において、伝搬時間を正確に測定し水温を求める方法を検討した。

**実験装置の基本設計** 海中における超音波のエネルギーの吸収減衰は周波数が高いほど大きい。一般に周波数が高いほど分解能が向上する。本研究では、将来プランクトン散乱を利用することを考慮して、比較的小型で、高分解能、高 SN 比でエコーの得られる 200 kHz の超音波を利用する<sup>6)</sup>。

受信機を設計する際、帯域幅が広ければ広いほど通過する雑音が多くなり、エコーの探知を妨げるので、帯域幅を小さくする必要がある。一方、小さすぎるとパルスが直ぐに立ち上がらなくなるので、帯域幅はできるだけ広くしたい。そこで、折衷案として帯域幅はパルス幅の逆数程度<sup>7)</sup>、すなわち、パルス幅を 640  $\mu$ s、帯域幅を 2 kHz にそれぞれ決めた。

Fig. 2(a) に計測方法を示す。深さ 1 m 程度の水槽で、その底のエコーを把えて、水槽内の水温を計測する。温度の変化  $\Delta T = T_2 - T_1$  により音速  $c$  が変化する。水槽中の短い経路長に対する水温差による伝搬時間  $t$  の差  $\Delta t$  は微小であり、これを測定するのは難しい。設計上では、0.1°C の水温変化を計測できることが望ましい。水温が 1°C 変化する毎に、水中音速は約 4.5 m/s 変化する。もし伝搬距離が 1.4 m (実験水槽の場合) とすれば、0.2  $\mu$ s の伝搬時間差を計測しなければならない。一般にパルス波形の立ち上がり部分は徐々に大きくなるため、あるスレッシュホールドで検波した信号の時間差測定方法では、検波回路のローパスフィルタの時定数による遅れ誤差が発生する。かつ、1 サイクル時間 (200 kHz で 5  $\mu$ s) の整数倍の誤差を生じることがある。この程度の時間差を計測することは不可能である。そこで、エコー波形と基準波形との位相差  $\Delta \phi$  を計測す

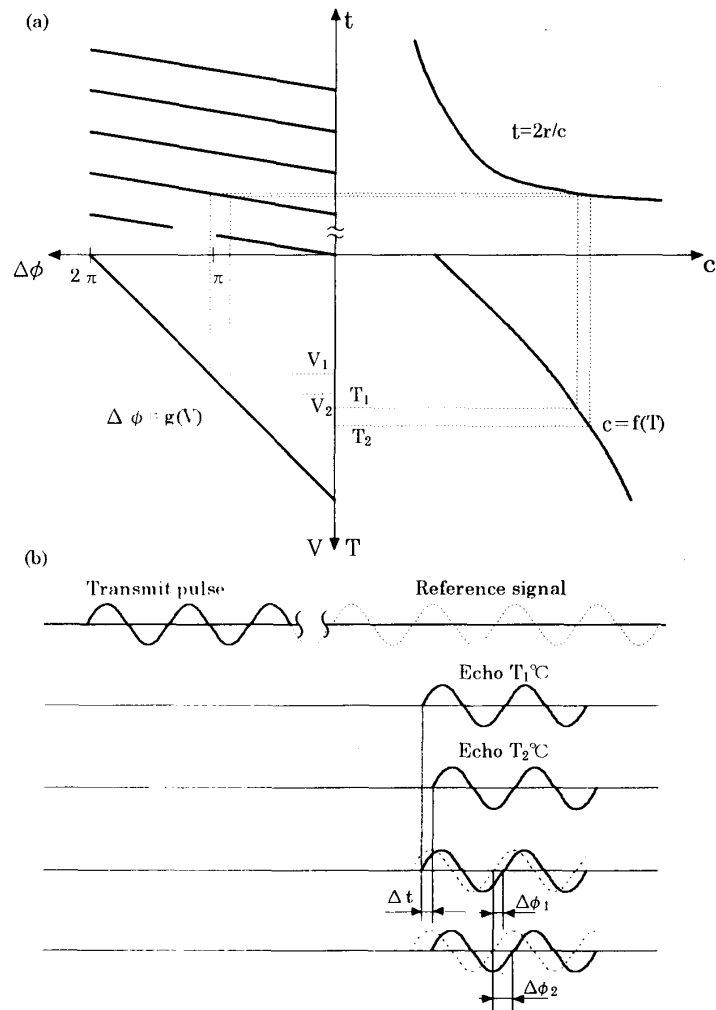


Fig. 2. Principle of temperature measurement in an experimental tank.

ることとした。Fig. 2(b) に示すように、送信波と位相同期した基準波と受信エコーとの位相差  $\Delta\phi_1$ ,  $\Delta\phi_2$  を読むことにより微小な伝搬時間差を計測することが可能である。位相差は  $2\pi/100$  まで測定でき、この実験の目的には十分な精度が得られる。位相差  $\Delta\phi$  は位相検波回路の出力電圧  $V$  により計測する。

**実験装置** 試作した実験装置の構成を Fig. 3 に示す。本装置はバイスタティック送受システムを採用しており、ファンクションシンセサイザ、送信機、超音波送波器、受波器、受信機、位相測定器、ディスプレイ、および記録部で構成されている。

送・受信システムの電気回路図を Fig. 4 に示す。ファンクションシンセサイザからの 400 kHz のクロック信号 (方形波) を送信機に入力する。送信機は周波数 200 kHz, パルス幅 640  $\mu$ s の超音波信号を、328 ms ごとに送信する。水槽の底からの反射波は受波器で受信される。送信機は送波器を駆動すると同時に、トリガ信号と 200 kHz のクロック信号も出力する。そのトリガ信号をオシロスコープに入力し、クロック信号は位相測定器に入力する。受信機からのエコーパルス信号は送信機からのクロック信号により位相測定器で検波され、送受信信号間の位相差が測定される。位相測定器からの出力信号はオシロスコープに表示する。同時に、パソコンに取り込み、デー

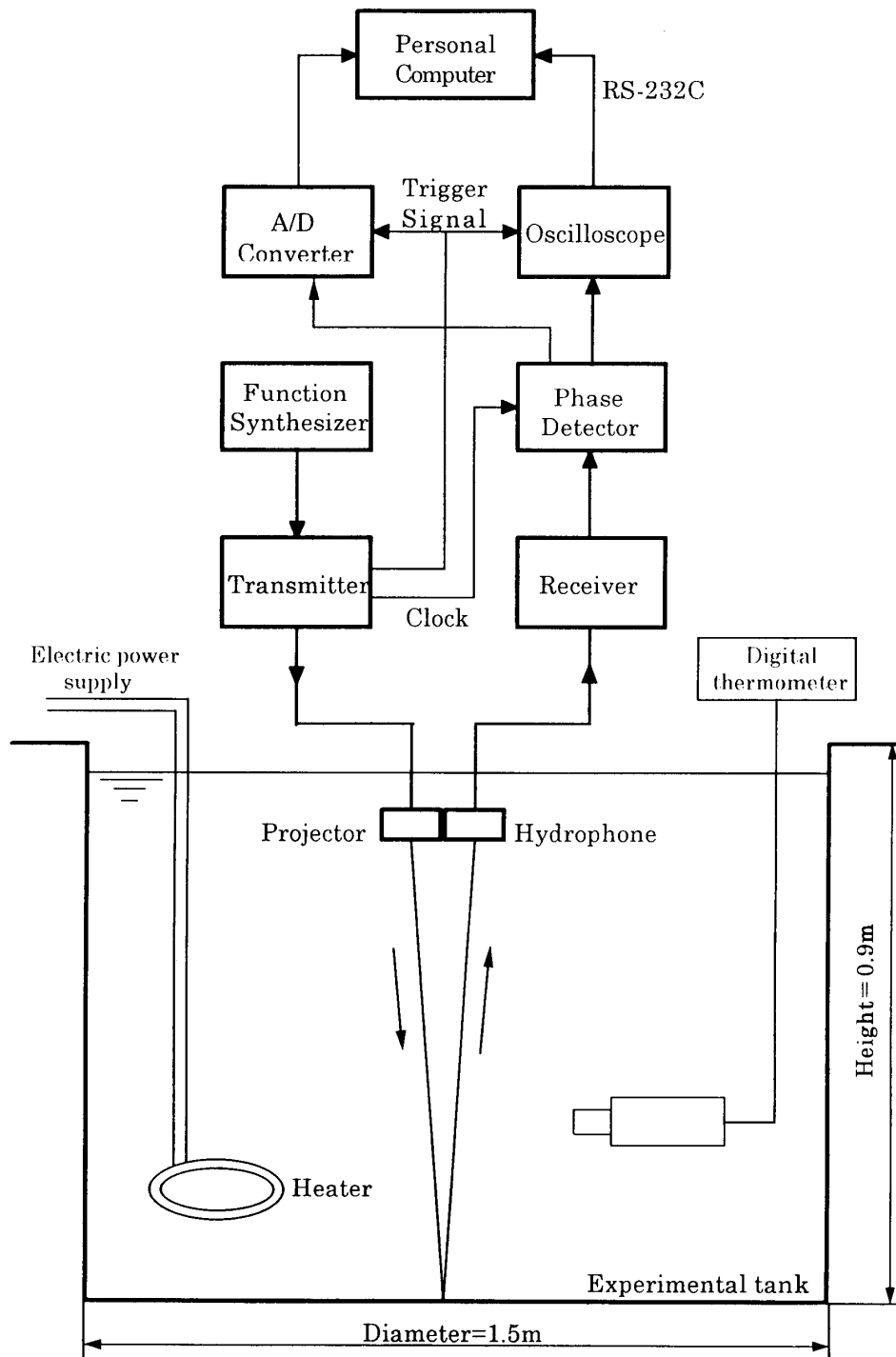


Fig. 3. Block diagram of experiment system.

データをフロッピーディスクに保存する。

この実験システムでは、 $2\pi$ の全周期で位相検波できる回路を採用した。この回路では、基準信号と受信信号間の位相差によって検波出力信号（矩形波）のデューティ比が変わる。検波された信号を積分すれば、出力の電圧レベルは位相差に比例する。位相測定器の出力電圧  $V_{out}$  [V] と位

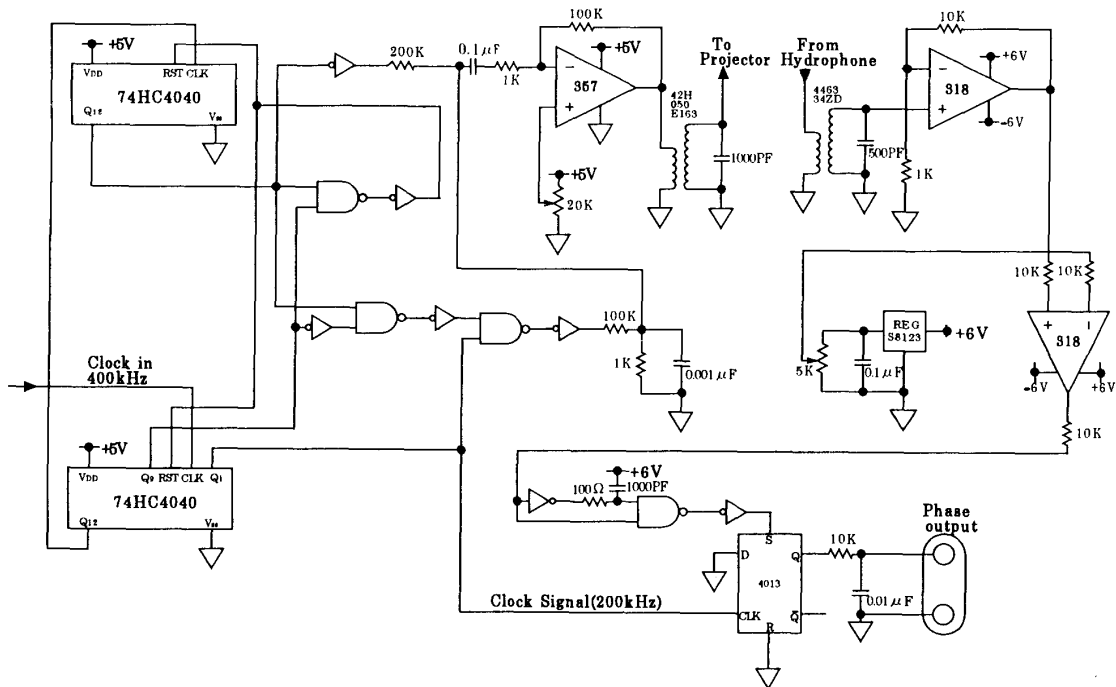


Fig. 4. Circuit diagram of the experiment system.

相差  $\Delta\phi$  [rad] の関係は

$$V_{out} = 6 - (3/\pi)\Delta\phi \tag{5}$$

となるように調整した。位相差と出力電圧レベルの関係を実測したものを Fig. 5 に示す。図中黒点は各測定点での 25 回の平均値であり、直線は回帰直線である。 $\Delta\phi = 2\pi f\Delta t$  であるから、 $f = 200$  kHz とすると、伝搬時間差は

$$\Delta t = 5 - (5/6)V_{out} \tag{6}$$

で表すことができる。ここに、 $\Delta t$  の単位は  $\mu s$  である。位相測定器からの出力は、Fig. 6 に示すように、出力信号の水平部分  $V_{out}$  が位相差に (5) 式のように関係しているの、その部分の電圧の値を読み、(6) 式により伝搬時間差が求まる。

**計測方法** 実験は直径 1.5 m、深さ 0.9 m の円筒状の水槽で行った。水温が変化することにより音波の伝搬速度が変化し、同じ距離でも伝搬時間が変化する。その伝搬時間の変化は位相測定器から出力された信号の検波電圧レベルで測定する。伝搬距離は既知であるので、伝搬時間で割ることによって、その伝搬経路の平均音速を求めることができ、それを元に水温を求める。

Fig. 3 に示すように、水槽の水中温度は、加熱器を用いて変化させた。アレック電子株式会社製のデジタル水温計 MDS-TD (分解能:  $0.01^\circ C$ , 測定精度:  $\pm 0.05^\circ C$ ) を用いて水温を測った。2 週間わたって、加熱器による水温上昇過程と自然状態での水温下降過程を数回観測し、超音波による水温計測を行った。水温計で測った水温の値と超音波により実験で求めた水温の値とを比較することによって、超音波による水中温度計測方法を検証した。

予め一定の温度の状態での音波の伝搬時間  $t_0$  をオシロスコープで測り、校正しておき、次に水温を変え、デジタル水温計で水温を計りながら、オシロスコープの出力の電圧  $V_{out}$  の値を読み取って、(6) 式から水温変化による伝搬時間変化  $t_0$  を求める。

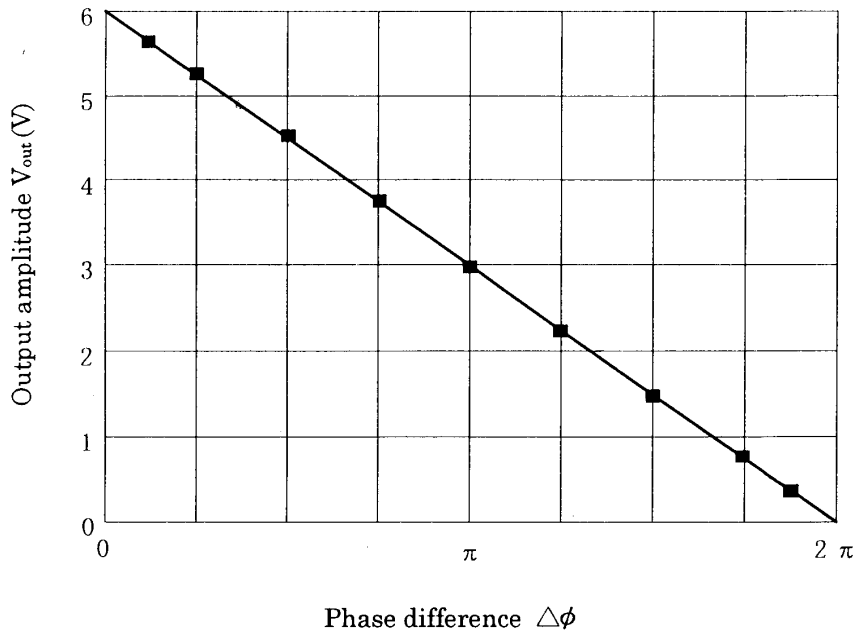


Fig. 5. Relationship between phase difference and output voltage of phase detector.

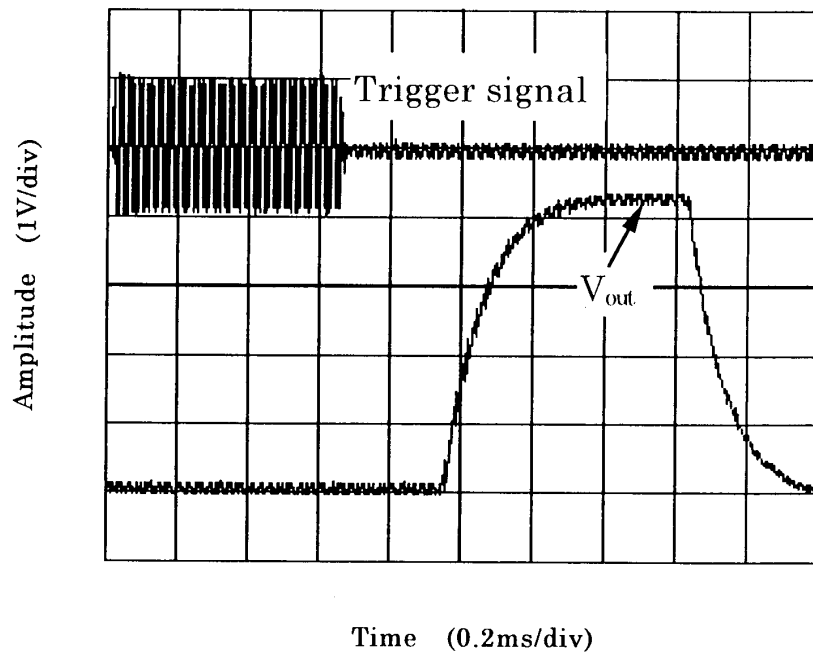


Fig. 6. Oscillogram of phase detector output.

解析方法 音速  $c$  と水温  $T$  の関係については多くの計算式があるが<sup>8)</sup>, 水温, 塩分, および水深の適応範囲によって, 淡水でも対応できる Medwin の音速式<sup>9)</sup>

$$c = 1449.2 + 4.6T - 5.5 \times 10^{-2}T^2 + 2.9 \times 10^{-4}T^3 + (1.34 - 10^{-2}T)(S - 35) + 1.6 \times 10^{-2}D \quad (7)$$

$T$ : 水温 ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $0 \leq T \leq 35$

$S$ : 塩分濃度 (psu),  $0 \leq S \leq 45$

$D$ : 水深 (m),  $0 \leq D \leq 1,000$



を用いた。

水槽内の送受波形を明確に分離できるように、送受波器は別々にしており、水中における超音波伝搬距離  $l=1.4$  m,  $t=t_0+\Delta t$ , 伝搬速度  $c$  を求める。水槽の水は淡水であり、実測した塩分濃度は 2 psu である。水温  $T=20^\circ\text{C}$  とし、(7) 式の中の水深  $D=1$  m とした場合と、 $D$  を無視して逆算した水温の値との差は僅かに  $0.005^\circ\text{C}$  であったので、今回の水槽の場合水深を無視した。上記により求めた音速  $c$  の値を (7) 式に代入して、ニュートン法により、 $T$  の近似値の相対誤差を  $10^{-6}$  に設定し、水温  $T$  の値を求めた。

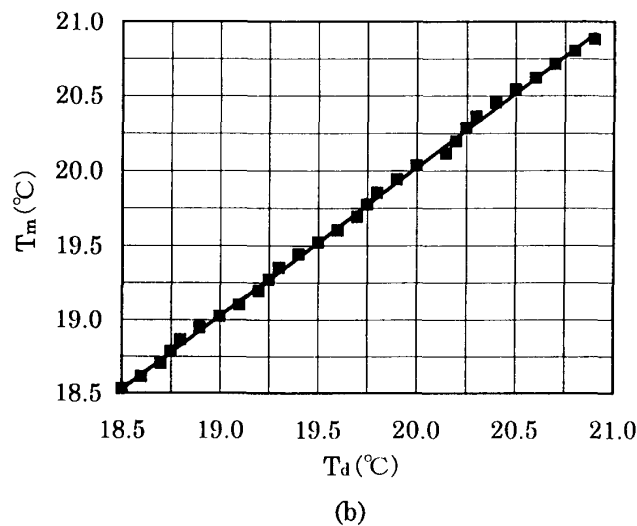
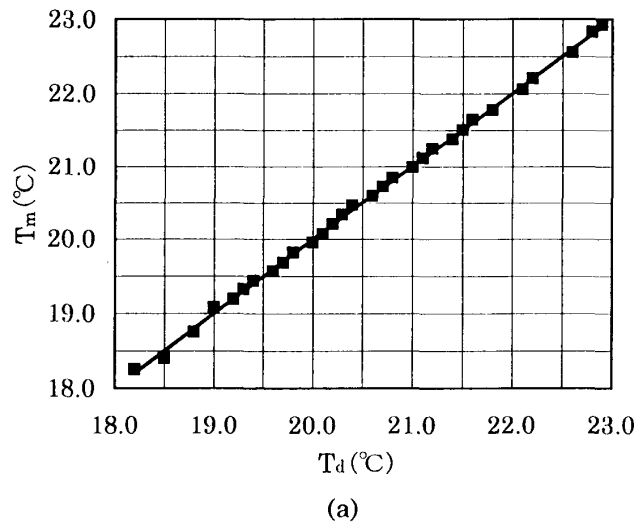


Fig. 7. Comparison between temperature by digital thermometer ( $T_d$ ) and that by acoustic method ( $T_m$ ), when water was heated (a), and when water was cooled naturally (b).

### 結果および考察

超音波により求めた水温の結果をデジタル水温計で測った水温の値と比べた。水温の上昇と下降の各実験を数回行ったが、得られたデータの再現性はよかった。上昇時と下降時の例を Fig. 7(a) (水温が 18.2°C から 22.9°C まで上昇) と Fig. 7(b) (水温が 20.9°C から 18.5°C まで下降) にそれぞれ示した。 $T_d$  はデジタル水温計を用いて測った水温の値である。 $T_m$  は Medwin の音速式を用いて計算した水温の値である。直線は回帰直線である。

Fig. 7(a) の場合は、回帰直線式は  $T_m = 0.9999T_d + 0.002$ 、相関係数  $R$  は 0.9995 である。Fig. 7(b) の場合は、回帰直線式は  $T_m = 0.9947T_d + 0.125$ 、相関係数  $R$  は 0.9994 である。両者とも、 $T_m$  と  $T_d$  とはよく一致しており、ほとんど一直線となった。 $T_m$  の  $T_d$  に対する最大測定誤差は 0.06°C であった。また、回帰直線式から見れば、上昇時の場合は +0.002°C のオフセット量、下降時の場合は +0.125°C のオフセット量があった。下降時の場合のオフセット量が若干大きかったのは、水温が均一でなかったのが原因だと考えられる。しかし、回帰直線は 1:1 直線と極めてよく一致し、数回行った実験の結果もよく整い合い、再現性も確認された。以上により、試作したシステムを用いて、超音波により水中温度を計測できることがわかった。

水槽試験では、マルチパスや周囲雑音が少なく、反射体（いまの場合水槽底）からのエコーが先鋭であり、位相測定が行いやすい。しかし、船が航走中に、プランクトンなどの反射を利用する場合には、受信信号の立ち上がりは先鋭ではなく、測定がかなり困難である。高 SN 比の計測システムを構築し、信号処理を工夫することによって、水中温度のリモートセンシングが可能とするつもりである。

なお、製作したシステムは液体類の音速計測器という別の用途としても使用できる。

### 要 約

本研究の結論を以下に列挙する。

- 1) バイスタティック送受信システムを利用した超音波による水温計測の原理を確認した。
- 2) 水槽において精密に超音波伝搬時間を測定できる超音波送受信システムを構築、設計、試作した。
- 3) 水槽内の水温計測実験から、超音波により求めた水温の値とデジタル水温計で測った水温の値はよく一致した。これにより、水槽では超音波により精確な水温計測ができることがわかった。

今後、海中水温を計測する場合には、以下のようないくつかの課題があると考えられる。

- 1) 海中プランクトンなどの散乱体からのエコーを高精度、明確な伝搬経路について、確実にとらえる方法を開発すること。
- 2) 測定海域内で塩分濃度の違いがある場合、その測定方法と水中温度計測結果の補正方法を検討する必要がある。
- 3) 超音波ビームが広がることにより計測誤差が生じる。ペンシルビームが理想であるが、現実にはビーム幅を持つ。適切なビーム幅について検討する必要がある。

## 文 献

- 1) 黒木敏郎. 1986. 水温, 黒木敏郎先生研究の歩み. 黒木敏郎ファンクラブ編集, (株)東京プリント印刷, 東京.
- 2) 気象庁. 1978. 海洋観測指針, 日本気象協会, 東京, 50-109.
- 3) 日本海洋学学会. 1985. 海洋環境調査法 (改訂版), 東京, 恒星社厚生閣, 74-101.
- 4) Toshiharu Kakiyama and Jiro Segawa. 1995. Acoustic micro tomography. *Journal of Tokyo University of Fisheries*, Vol. 82, No. 1, 55-78.
- 5) E. H. Brown, H. Ramm and D. M. Farmer. 1982. Final Report to NOAA/ATO-OTES on the April Echometer Ocean Tests, Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences, University of Colorado, Boulder, CO 80309.
- 6) Liu Xuezheng, Masahiko Furusawa and Etuyuki Hamada. 1997. Basic Design of Ultrasonic Transmitting Receiving System for Measuring Volume Backscattering Strength of Zooplankton, *Proceedings of Ultrasonics World Congress, 1997, Yokohama, Japan*.
- 7) 古澤昌彦. 1990. 水産資源推定のための超音波による魚群探知に関する研究. 水産工学研究所研究報告, 第11号, 別冊, 173-249.
- 8) 阿部緑治, 尾崎俊二. 1995. 海洋音響学会第5回技術講習会テキスト, 9-16.
- 9) Robert J. Urlick. 1983. *Principles of underwater sound*, 3rd Edition, McGraw-Hill Book Company, New York.

## 超音波による水中温度計測の試み

劉 学振・濱田悦之・古澤昌彦

水中超音波の伝搬速度はその媒体である水の温度に依存するので, その伝搬速度を計測することによって逆に水の温度を推定できる。すなわち, 距離の正確な既知なる2点間で温度と媒体が均一であれば, その間の超音波の伝搬速度を計測すれば, 媒質の温度が推定できる。しかし, 海水中の場合, 正確な伝搬距離を知るのが難しく, さらに, 正確な伝搬時間を計測するのも困難である。本研究では, 航走中の船舶による超音波を利用して下方の水層の温度を推定する方法の研究の第一歩として, 超音波による水温計測原理を検討した上で, 計測システムを試作し, 実験水槽で超音波による水中温度計測の可能性を調べ, 精度高く水温が測定できることを実証した。

キーワード: 超音波, 水中温度, 計測システム, 超音波伝搬速度, 伝搬距離, 伝搬時間