

## 日本南岸の黒潮流域付近における海洋音速場について\*

中 村 重 久\*\*

### A note on sound speed fields around the Kuroshio south of Japan

Shigehisa NAKAMURA

**Abstract:** A theoretical model is presented for describing the vertical profile of sound speed in the sea. Some examples are given from temperature and salinity data obtained in waters around the Kuroshio area south of Japan. A striking difference in sound speed is found between a cold water mass and the axis of the Kuroshio. Vertical profiles of sound speed in shelf and coastal waters are also presented. In shallow waters the sound speed becomes fast in August to September and slow in February to March.

#### 1. 緒 言

海洋中の音波とその利用の歴史はそれほど古くない。1912年汽船 Titanic 号が氷山と衝突し、数百人の死者をだした後約1カ月で、L.R. RICHARDSON は航空機搭載用音響測距の特許を英国でとり、5月10日には疎密波を用いて海中の巨大物体の存在を調べる方法について特許をとった。米国では1913年1月29日同様な方法について R.A. FESSENDEN が特許をとり、1914年4月27日には2マイルの距離の氷山を発見するのに成功している。それ以来、諸国の活発な開発研究がみられた (CLAY and MEDWIN, 1977)。英国漁船船長 R. BALL は1930年代初期音響反射計を利用し、ノルウェーの O. SUND (1935) は音響測深の漁業への利用について記している。日本では KUWAHARA (1939) が海水中の音速について研究した成果を発表したのが最初とみられ、これが現在でも国の海底測量に利用されている (友田, 1985)。また、外洋における海洋観測での音響式切りはなし装置の使用に関連して、音の鉛直伝ばについては松山・高野 (1975) が Snell の法則を応用して数値的研究を行った。また、別に、沿岸域の流速計測にも海中音波の利用がみられた (MIDDLETON, 1955; 海象(流水)観測グループ, 1983)。

CLAY and MEDWIN (1977) によれば、水中音速の最

初の測定は COLLADON・STURM によって1826年11月スイスのジュネーヴ湖で行なわれた。実際には、音速は、水温・塩分・圧力が増すと速くなり、また季節・時刻・水深・地理的位置・河川周辺・融水などの条件によっても大きく異なる。実用的な音速計算式として CLAY and MEDWIN は次式を与えている。

$$C = 1449.2 + 4.6 T - 0.005 T^2 + 0.00029 T^3 \\ + (1.34 - 0.010 T) (S - 35) + 0.016 Z \quad (1)$$

ここに、 $C$ : 音速 (m/s),  $T$ : 水温 ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $S$ : 塩分 (%),  $Z$ : 水深 (m)。

本文では、まず、海洋中の音速の鉛直分布の特性を理論的モデルによってとらえ、つぎに、太平洋北西部の黒潮流域、とくに本州南岸の紀伊半島周辺を例として、深海・沿岸陸棚域・浅海域の記録によって、それぞれの海域の音速の実態をとらえる手がかりとした。

#### 2. 海洋中の音速の鉛直分布に関するモデル

海中の音速は、すでに述べたように、水温 ( $T$ )、塩分 ( $S$ )、水圧 ( $P$ ) によって定まる。すなわち、 $C$  は  $T$ 、 $S$ 、 $P$  の関数であって、

$$C = C(T, S, P). \quad (2)$$

このとき、第1近似として、2次以上の微分を無視できるものとすれば

$$\frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial C}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{\partial C}{\partial S} \cdot \frac{\partial S}{\partial z} \\ + \frac{\partial C}{\partial P} \cdot \frac{\partial P}{\partial z} \quad (3)$$

\* 1985年7月16日受理 Received July 16, 1985

\*\* 京都大学防災研究所附属白浜海象観測所、  
和歌山県西牟婁郡白浜町堅田畑崎  
Shirahama Oceanographic Observatory, Disaster  
Prevention Research Institute, Kyoto Univ.,  
Katada-Hatasaki, Shirahama, Wakayama, Japan

深海での水温は断熱的分布をし、その変化は、

$$\frac{\partial T_A}{\partial z} = g \frac{(\bar{\gamma} - 1)}{aC^2} \sim 0.10 \text{ } ^\circ\text{C/km.} \quad (4)$$

ここに、 $\bar{\gamma} = 1 + 0.0035$  は 相 対 比 熱 である。(MUNK, 1974)。また、深海での  $T$  が 十 分 小 さ い 値 と して、(3) は つ ぎ の よ う に 書 き か え ら れ る。

$$\frac{\partial C}{\partial z} = a \frac{\partial T'}{\partial z} + \beta \frac{\partial S}{\partial z} + \gamma_A \quad (5)$$

た だ し、

$$\alpha = \frac{\partial C}{\partial T}, \quad \beta = \frac{\partial C}{\partial S}, \quad \gamma = \frac{\partial C}{\partial P},$$

$$\gamma_A = \gamma \frac{\partial P}{\partial z} + a \frac{\partial T_A}{\partial z} = T' + T_A. \quad (6)$$

一 方、海 水 密 度 の 鉛 直 考 配 に つ い て

$$\frac{1}{\rho'} \frac{\partial \rho'}{\partial z} = \frac{\partial \rho'}{\partial T'} \cdot \frac{\partial T'}{\partial z} + \frac{\partial \rho'}{\partial S} \cdot \frac{\partial S}{\partial z}$$

$$\equiv -a \frac{\partial T'}{\partial z} + b \frac{\partial S}{\partial z} \quad (7)$$

と 書 く こ と に す る。と ころ で、Turner 数 は 塩 分 と 温 位 と が 水 柱 の 安 定 度 に 対 す る 寄 与 の 程 度 を 示 す も の で あ り、(7) の  $a$  お よ び  $b$  を 用 い て

$$Tu = \left[ b \frac{\partial S}{\partial z} \right] / \left[ a \frac{\partial T'}{\partial z} \right]. \quad (8)$$

さ ら に、Brunt-Väisälä 周 波 数 は、

$$N(z) = \left[ g \frac{1}{\rho'} \frac{\partial \rho'}{\partial z} \right]^{1/2} \quad (9)$$

と 定 義 さ れ る。こ こ で、(5) と (8) と か ら

$$\frac{\partial C}{\partial z} = a \frac{\partial T'}{\partial z} \left( 1 + \frac{\beta}{\alpha} \cdot \frac{a}{b} \cdot Tu \right) + \gamma_A \quad (10)$$

が 得 ら れ る。と ころ で、(7) よ り

$$\frac{1}{\rho'} \cdot \frac{\partial \rho'}{\partial z} = -a \left( \frac{\partial T'}{\partial z} \right) \left( 1 - \left[ b \frac{\partial S}{\partial z} \right] / \left[ a \frac{\partial T'}{\partial z} \right] \right)$$

で あ る。し た が っ て、

$$\frac{1}{\rho'} \cdot \frac{\partial \rho'}{\partial z} = -a \left( \frac{\partial T'}{\partial z} \right) (1 - Tu). \quad (11)$$

こ の (11) と (10) と か ら  $\partial T' / \partial z$  を 消 去 す る と、

$$\frac{\partial C}{\partial z} = -\frac{\alpha}{a(1-Tu)} \cdot \frac{1}{\rho'} \cdot \frac{\partial \rho'}{\partial z}$$

$$\times \left( 1 + \frac{\beta}{\alpha} \cdot \frac{a}{b} \cdot Tu \right) + \gamma_A. \quad (12)$$

こ こ で (9) を 使 う と、

$$\frac{\partial C}{\partial z} = -\frac{\mu}{g} N^2(z) + \gamma_A. \quad (13)$$

た だ し、

$$\mu = \frac{\alpha}{a} \frac{\left( 1 + \frac{\beta}{\alpha} \cdot \frac{a}{b} \cdot Tu \right)}{(1-Tu)} \quad (14)$$

す な わ ち、(13) が 海 水 中 の 音 速 の 鉛 直 考 配 を 与 え る こ と に な る。

一 般 に、浅 い と ころ で は  $N^2$  を 含 む 項 が 大 き い が、深 海 で は  $N^2 \rightarrow 0$  と な り、音 速 は  $\gamma_A$  の 割 合 で 深 さ と と も に 大 き く な る。

と く に、あ る 水 深  $z = z_1$  に お い て  $\partial C / \partial z = 0$  で あ る と す る と、こ の と き、(13) よ り

$$N(z_1) = \left( \frac{\gamma_A g}{\mu} \right)^{1/2}. \quad (15)$$

水 深  $z$  に お け る 音 速  $C$  は (13) を  $z$  に つ い て 積 分 す る こ と に よ っ て も と ま る。す な わ ち、

$$C = \int_{z_0}^z \left( -\frac{\mu}{g} N^2(z) + \gamma_A \right) dz; \quad z_0 = \text{const.} \quad (16)$$

い ま、も し、(14) に 示 さ れ る  $\mu$  の 値 が 一 定 値 を と る 場 合 に は (16) は

$$C = -\frac{\mu}{g} \int_{z_0}^z N^2(z) dz + \gamma_A (z - z_0). \quad (17)$$

と 数 式 の 変 形 と して 書 き か え ら れ る が、実 在 の 海 洋 で の Turner 数  $Tu$  は かな ら ず し も 一 定 値 を と る わ け で は な い か ら、 $\mu$  を 一 定 値 と み な せ る 場 合 も 限 ら れ た 条 件 の 下 で し か 考 え ら れ ない。

こ こ で、 $N_0$  お よ び  $B$  を 定 数 と して、た と え ば 外 洋 で サ ー モ ク ラ イ ン よ り 深 い 層 の み に 着 目 し た と す る と、

$$N = N_0 \exp(-z/B)$$

と 書 く と 解 析 に 好 都合 である (MUNK, 1974)。こ の 場 合 に は (17) は さ ら に つ ぎ の よ う に 書 き か え ら れ る。

$$C = -\frac{\mu N_0^2}{g} \int_{z_0}^z \exp(-2z/B) dz + \gamma_A (z - z_0)$$

$$= \frac{\mu N_0^2 B}{2g} \exp(-2z/B) + \gamma_A z + z_0'. \quad (18)$$

た だ し、

$$z_0' = -\frac{\mu N_0^2 B}{2g} \exp(-2z_0/B) - \gamma_A z_0 \quad (19)$$

す な わ ち、(18) が 海 中 の 音 速 の 鉛 直 分 布 を 特 性 づ け る こ

とになる。

MUNK (1974) は (18) の指数関数を  $z$  の級数展開近似によって表わした。しかし、実用的には、(18) のかわり (1) のように水温、塩分および圧力の級数展開の部分による近似的表示による記述の方が便利である。

### 3. 深海の音速場

すでにみたように、海洋中の音速は水温・塩分・圧力によって定まる。その特性は、基本的には前節の (18) によってあらわされていると考えられるが、実際には、その他の条件によって異なることが多い。

いま、神戸海洋気象台の海洋速報によって、測点の塩分・水温・水深のデータを実用式 (1) に代入すれば音速の鉛直分布を知ることができる。たとえば、Fig. 1 には、測点  $u_3$  ( $32^{\circ}56'N$ ,  $137^{\circ}02'E$ ) において 1983 年 10 月 12 日 23 時の例を黒丸と実線で示した。また、白丸と点線は測点  $u_8$  ( $30^{\circ}30'N$ ,  $137^{\circ}04'E$ ) で 1983 年 10 月 14 日 0 時の例である。測点  $u_3$  は紀伊半島南東方に位置し、当時、いわゆる冷水塊の中にあつた。Fig. 1 の水温の鉛直分布をみても、50-1000 m 深で測点  $u_8$  よりも  $u_3$  の水温が低いことがわかる。海中の音速に対する水温の効果はとくに顕著であり、それは Fig. 1 の音速の鉛直分布について、測点  $u_8$  と  $u_3$  の例を比較するだけでもよくわかる。海面下 1000 m 以深では、測点  $u_3$  も  $u_8$  も、同一

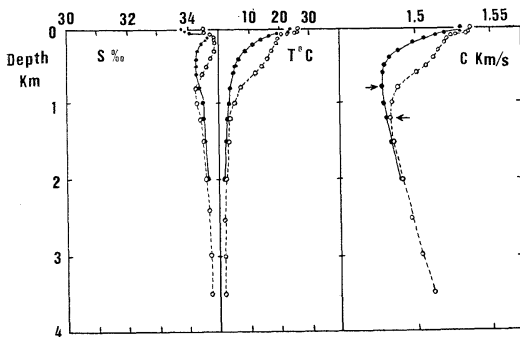


Fig. 1. Salinity, temperature and sound speed at stations in and out of a cold water mass around which the Kuroshio was meandering (arrows show minima of sound speed). The data was obtained on 12 to 14 October 1983 by Kobe Marine Observatory: solid circles are for the station U3 in the cold water mass ( $32.56N$ ,  $137.04E$ ) at 23h on 12 October 1983 and open circles are for the station U8 outside of the cold water mass ( $30.31N$ ,  $137.04E$ ) at 00h on 14 October 1983.

水深に対する水温・塩分はほぼ同じとみられる。ちなみに、測点  $u_3$  および  $u_8$  を含む測線  $137^{\circ}E$  に沿って  $30-34^{\circ}N$  の音速鉛直断面分布をもとめた結果は Fig. 2 のようになる。これからみて冷水塊の部分では音速はその周囲より小さい値であり、また、深海での鉛直分布は緯度によって顕著な差がないといえる。

海中の音速について  $\partial C/\partial z=0$  (音速極小) の位置を Fig. 1 では矢印によって示した。これに対応したものが Fig. 2 では 1 点鎖線で示されており、これは axis of sound channel とよばれる (CLAY and MEDWIN, 1977)。

黒潮流路には大きく分けて直進型と蛇行型との 1 つのパターンがあることはよく知られている。1981 年 7 月の直進型の時期の  $135^{\circ}E$  測線の音速分布を Fig. 3 に示した。これに対して 1983 年 7 月の蛇行型の時期の  $135^{\circ}E$  測線の音速分布は Fig. 4 のようになっている。1000 m 以浅の等音速線群が蛇行型は直進型に比較して約 60 km 南へずれているようにみえる。このように、音速の鉛直分布は、黒潮の流路の相違によって大きく異なる。しかし、たとえば直進型の期間では、音速鉛直分布の季節的変化は表面付近を除けばそれほど顕著ではない。

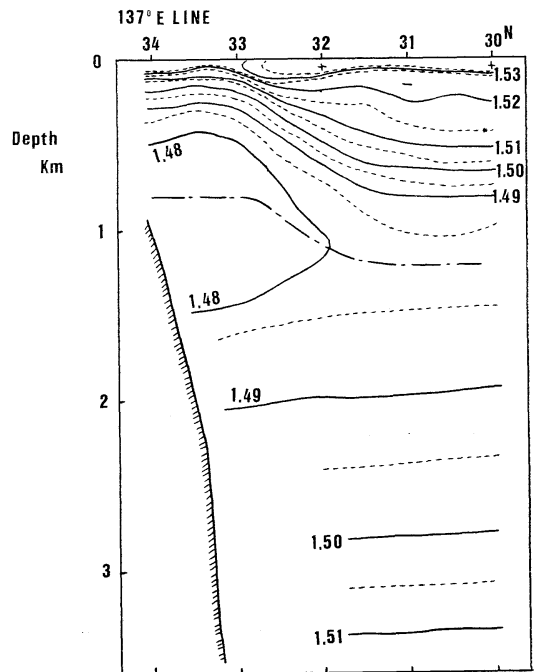


Fig. 2. Cross section of sound speed field (km/s) on 12 to 14 October 1983 (after data by Kobe Marine Observatory).

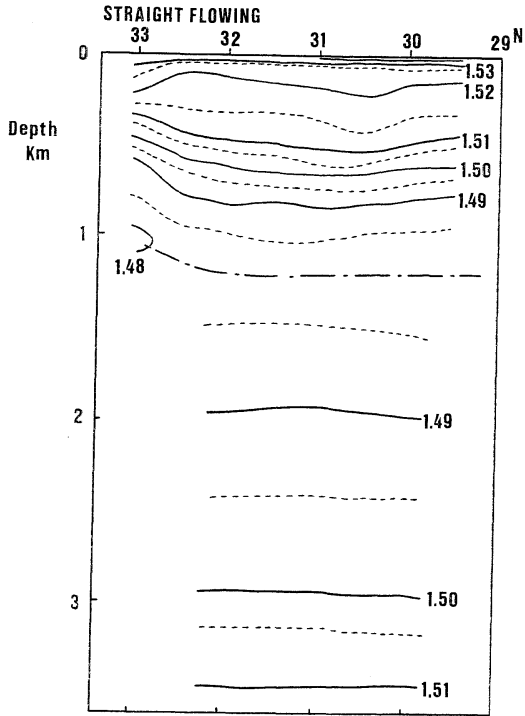


Fig. 3. Cross section of sound speed field (km/s) along 135E on 6 to 8 July 1981 (after data by Kobe Marine Observatory).

上に述べた特徴は、過去において得られたデータについても同様である。

#### 4. 沿岸域の音速場

海洋の水温や塩分の変動は、表面に近いほど大きい。それに対応して、音速の変動も大きいものと考えられる。とくに、沿岸域では陸での熱的環境条件による効果が加わって、その変動はかなり複雑なものとなってくる。

いま、例として、田辺湾沖ノ島 (33°43'7N, 135°20'1E) および潮岬 (33°24'1N, 135°44'7E) における音速の鉛直分布を、和歌山県水産試験場の観測による水温・塩分・水深を (1) に入れてもとめた結果を Fig. 5 に示す。図中、黒丸は 1983 年 9 月、白丸は 1983 年 3 月の例である。沖ノ島では、Fig. 5 上段のように、9 月には海面下 6 m までは塩分が小さいが、音速には水温の効果が顕著にあらわれている。3 月には、音速は水温と同様、深さに対してほぼ一様な分布をしている。潮岬では、Fig. 5 下段にみるように、水深 20 m までについては、沖ノ島とよく似た傾向を示しているが、Fig. 5 からみて顕著な年周変動は大体海面下 50 m 位までに認められる。すなわ

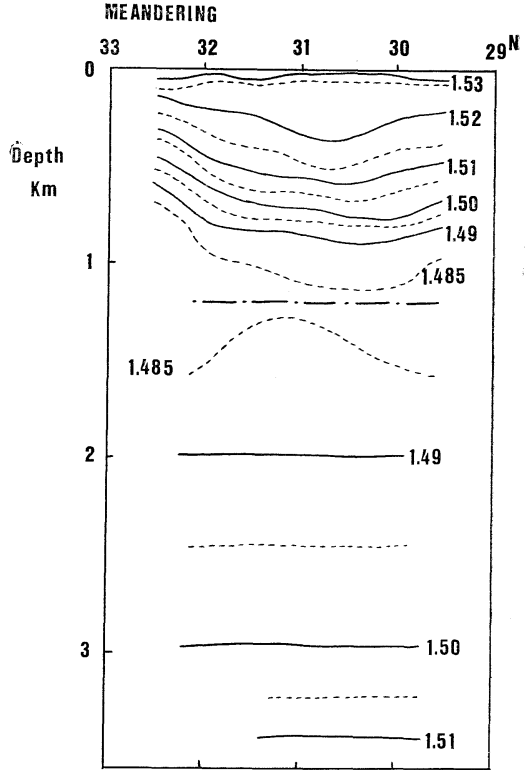


Fig. 4. Cross section of sound speed field (km/s) along 135E on 8 to 9 July 1983 (after data by Kobe Marine Observatory).

ち、海面付近の変動の大きい場合をとってみると、塩分にして年間 4‰ 程度の変化はみられるが、これには陸からの河川水や降雨などの影響も考えなくてはならない。また、水温については、年周変動幅は 14°C 程度であり、これに対応して、音速の変動幅は高々 30 m/s 程度である。海面下 50 m 以深 200 m までの範囲では、その年周変動幅は、塩分にして高々 0.3‰ 程度、水温にして高々 1°C 程度、そして、音速にして高々 4 m/s 程度となっている。

上述と同様なことは、同一測点の過去の記録からもうかがうことができる。

#### 5. 白浜海洋観測塔の音速場の年周変動

紀伊半島南西部の田辺湾湾口部付近に位置する白浜海洋観測塔 (33°41.63'N, 135°20.88'E) では、サーミスタを用いて水温を、電気伝導度用コイルを用いて塩分を連続記録してきた (1985 年 6 月 30 日、台風 6 号接近時、遂にセンサー折損落失) が、とくに、塩分の記録にはセ

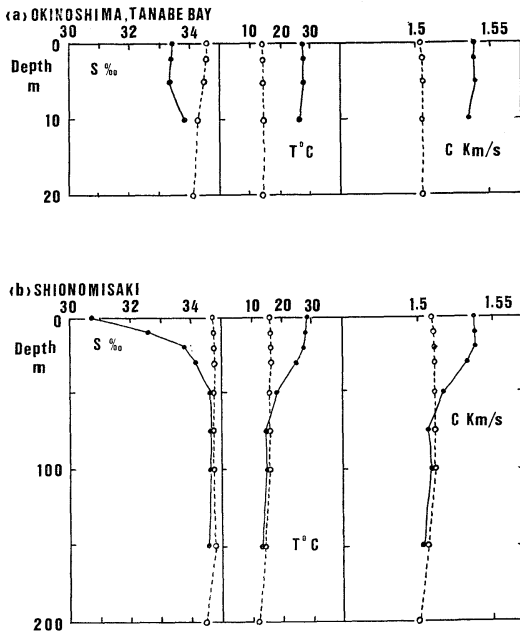


Fig. 5. Vertical profiles of salinity, temperature and sound speed in a coastal zone of (a) Okinoshima, Tanabe Bay and (b) Shionomisaki. Solid circles for September 1983 and open circles for March 1983 (after data by Wakayama Fisheries Research Station).

ンサー部位の付着生物の影響が顕著であり、その記録の補正は難かしい。この補正の目的で不定期にサーミスタ設置位置での採水・測温を北原式採水器によって行っている。いま、例として、1979年1月から1980年12月までの2年間について、その塩分・水温およびそれらを(1)に入れて得られた音速をもとめ Fig. 6 に示した。

観測塔における水温の変動をみると、2-3月に1年間の最低水温がみられ、8-9月に最高水温がみられる傾向がとらえられる。1年間を通して、平常の水温の日周変動幅は $0.7^{\circ}\text{C}$ 程度である。このような水温の年周変動や日周変動の原因は主に海面への太陽放射によるものと考えられる。ただ、フロントの通過によると考えられる不規則な顕著な変動も認められる(海象(流れ)観測グループ, 1983)。

観測塔における塩分の変動をみると、全般的傾向として、2-4月頃に塩分は最高であり、7-9月頃に塩分は最低となっていることがわかる。とくに、7-9月頃の低塩分は、この時期が梅雨期から台風期に対応し、沿岸域は多雨の条件下にあり、陸からの河川流出量も増大することによるものと考えられる。とくに、観測塔での採水・

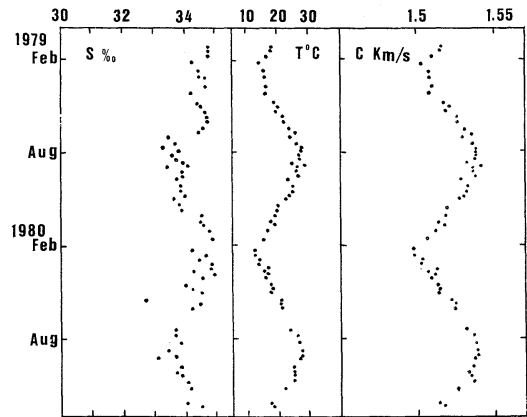


Fig. 6. Annual variations of salinity, temperature and sound speed at Shirahama Oceanographic Tower Station ( $33^{\circ}41.63'\text{N}$ ,  $135^{\circ}20.88'\text{E}$ ).

測温直前に強い降雨があり、雨水を多量に混合した沿岸水パッチがサーミスタ付近を通過すると、たとえば、1980年5月17日(11時10分)の測定例のように一時的に顕著に小さい塩分値が記録される。観測塔の記録をみても、塩分には日周変動があるようにはみえないが、フロントの通過に対応すると考えられる不規則な変化はしばしばとらえられている。

上に示したような水温と塩分とからもとめた音速にも年周変動がとらえられる。その特徴は Fig. 6 によって示されるように、2-3月には音速も最小値をとり、8-9月には最大値をとる。

海中の音波に関連した問題を検討する場合には、単純化したモデルによってその基本的特性をとらえることも必要であるが、海中の音速がいろいろの条件によって時間的・空間的に一様ではなく変動していることも忘れてはならない。

## 謝 辞

白浜海洋観測塔における採水および観測記録は芹沢重厚・片山富晴両君の協力によるものである。また、採水試料の塩分検定には、京都大学理学部附属瀬戸臨海実験所の設備を利用した。

## 参 考 文 献

- CLAY, C. S. and H. MEDWIN (1977): *Acoustical oceanography: principles and applications*. Wiley-Intersci. Pub., N.Y., 544 p.  
 海象(流れ)観測グループ (1983): 田辺湾における流れの長期連続観測. 京大防災研年報, No. 26B-2, 637-672.

- KUWAHARA, A. (1939): Velocity of sound in sea water and calculation of the velocity for use in sonic sounding. *Hydrographic Rev.*, **17**, 391-501.
- 松山佐和・高野健三 (1975): 音の鉛直伝ば. *La mer*, **13**, 179-182.
- MIDDLETON, F.H. (1955): An ultrasonic current meter for estuarine research. *Jour. Marine Res.*, **14**, 176-186.
- MUNK, W.H. (1974): Sound channel in an exponentially stratified ocean with application to SOFAR. *Jour. Acoust. Soc. America*, **55**, 220-226.
- SUND, O. (1935): Echo sounding in fisheries research. *Nature*, **135**, 956.
- 友田好文編 (1985): 地球観測ハンドブック. 東京大学出版会, 830 pp.