

海水中における音速度の測定と補正

打田明雄：海洋研究室

Measurement of Sound Speed in Sea Water and Echo-sounding Correction

Akio UCHIDA : Ocean Research Laboratory

1 はじめに

音響測深には、海水中での仮定音速度を1500m/secと規定し、深海域、浅海域とも使用している。しかし、海水中での音速度は、水温、塩分、水圧（深度）により影響を受け変化し、一様ではない。このため、音響測深機で得られた水深に対しては、バーチェックの記録または補正表等を用いて、実際の音速度に適合させるための補正を行っている。

マルチビーム音響測深機では、直下方向を含め左右斜め方向に扇状の測深ビームを形成するので、音速度補正及び音線屈折補正のための各深度毎の音速度が必要である。このため、浅海域では、所定層の音速度が直接測定できる音速度計が導入されたが、深海域では、CTDまたはXBTを使用して、水温等の観測を行い音速度を求め適用している。

音速度の測定もしくは計算する手法としては、音速度に影響を及ぼす要素の取得方法により、次のような方法が使用されている。

- (1) 音速度計を用いて、各層（深度）の音速度を直接測定する。
- (2) CTDにより電気伝導度、水温、水圧（深度）を測定し、音速度計算式を用いて、リアルタイムもしくは後処理で計算する。
- (3) XBTにより水温を測定し、塩分は統計値から採用して、音速度計算式を用い計算する。
- (4) 統計値から各深度の水温、塩分を採用し、音速度計算式を用いて計算し求める。

このように、音響測深及びマルチビーム測深における音速度の測定及び音速度補正については、各種の手法が用いられているので、水路部における現在

までの音速度の測定及び音速度補正手法について、とりまとめた。

2 音速度の補正手法とその変遷

現代のように、電子計算機が日常的に用いられる以前は、音速度の補正のための計算を行うことは、時間と労力が必要で即時の対応が難しかった。このため、浅海域を除き補正表を予め作成して、必要な補正值が簡易な計算で処理できる方法や、表から読み取れる方法がとられていた。また、水路部が深海域でマルチビーム測深を開始した1983年からは、マルチビーム音響測深機に適用する各深度での音速度が必要となり、このため、XBTの深海用プローブ（1800m）を使用し、塩分及び約1800m以深の水温は統計値から採用して、音速度の計算を行っている。浅海域でのマルチビーム測深には、音速度計を使用して、各深度の音速度を得ている。

次に、具体的な例として音速度の補正手法及び音速度計の変遷等について記述する。

2.1 バーチェック

バーチェックは、浅海域での音響測深機の深度更正に用いられている手法であり、音速度の補正のみならず音響測深機の誤差も補正できるため、日常的に使用されている。使用するバーの形状は、円盤型、コーナーレфлекター型、長形状の鉄板もしくはパイプを横に組み合わせたものが使用される。

バーチェック手法は、既知の間隔（通常2m）でバーを送受波器の直下で降下させ、測深深度までの反射記録を得て、その反射記録を付属の標準スケールで読み取った深度とバーの深度から補正值表を作成し適用する手法と仮定音速度を1500m/secとし

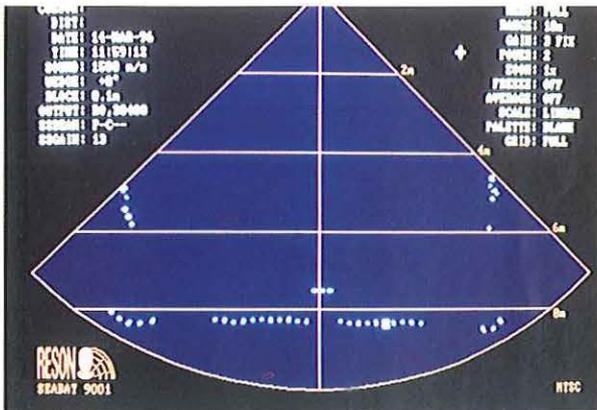


写真1 SEABAT9001によるバーチェック記録例
Photo.1 Example of barcheck record by SEABAT 9001.

て作成された標準スケール(0%)から0.5%間隔で±5.0%(初期は±4.0%)まで作成されたパーセントスケールから、バーチェックの記録と合致するスケールを選択することにより、実際の音速度に適合した水深の読み取りを行う方法がある。音響測深機によっては、記録の掃引速度を変えることにより音速度に合わせる方法もあるが、水路部では採用していない。

なお、パーセントスケールの開発については、加藤(1973)に報告されている。

また、浅海用マルチビーム音響測深機についてもバーチェックを実施することにより、喫水の測定と作動状況が把握できる。例として写真1には、水槽内に設置したSEABAT9001の送受波器から約7.5mに直径40cmの円盤型のバーを吊り下げた状態で、測深ビーム3本の反射が得られている状況を示している。

2.2 音速度補正表

我が国においては、音響測深が盛んに行われ始めた1935年、岸人(1935)により、水深に対する平均音響速度を示す「日本近海海中音響速度表」、通称「測深音速表」と呼ばれる表が発表された。また、1938年には、「海水中における音波の速度及測深音速の計算法」、通称桑原表と呼ばれる音速度計算法が発表された。

桑原表には、次の表が作成され使用された。

第1表：海水中における音波の速度及び比例表

第2表：温度に対する修正値

第3表：塩分に対する修正値

第4表：塩分、温度並びに圧力の中の二要素以上のもの同時変化に対する修正値

第5表：各深度に対する海水の圧力

第6表：第5表の圧力を用いて計算した音波速度の重力に対する修正値

第7表：正規測深音速

第8表：測深音速の重力に対する修正値

また、1939年3月には、太平洋を対象海域として、次の図表からなる「音速水深修正用図表(太平洋及近海之部)」が刊行され、水路図誌として一般に販売された。

第1表：音速水深を正規音速水深に換算する表

第1図：音速水深200mに対する等修正値線図

第2図：音速水深400mに対する等修正値線図

第3図：音速水深600mに対する等修正値線図

第4図：音速水深800mに対する等修正値線図

第5図付第2表：音速水深1000m以上に対する平均修正値及地方的修正値

これらの作成に至る経緯については、音響測深機の導入と併せて桑原(1978)に詳細に記述されている。当時使用された音速度の計算手法については、桑原(1938)、Kuwahara(1939)に報告されている。また、桑原(1978)によれば、桑原表は、1950年U.S.Navy Electronics LaboratoryのE.C.Lafondからの要請により米国に送付し、1951年Dr. K.V. Mackenzieにより桑原表に良く合う近似式が作成された。長井(1978)によれば、その5~6年後米国海軍水路部に採用され、1961年にWillsonの式に変更されるまで使用された。この式を長井(1978)は、「桑原-Mackenzieの式」と呼んだ。

また、国際的な動向について、D.J.T. Carter(1980)によれば、1927年に英国海軍が作成したMathews表第1版、1939年には、その第2版が発表され、1947年の第5回国際水路会議において、各国水路部に対して、この第2版を採用するよう勧告した。1953年頃からは、その海域と水深補正值について考察がされ始めた。1964年、NIO(the National Institute of Oceanography)、IOS(the Institute of Oceanographic Sciences)は、Mathews表で定められた海域と水深補正值について修正の要否を確認す

るため、選択した数海域について試験的な調査研究に着手した。調査は、地中海(Charnock and Crease, 1966)及びメキシコ湾流の海域(Crease and Edwards, 1972)から着手された。

また、カナダが保有する海域のデータでも、その修正が必要であることを明らかにした(Greenberg and Sweers, 1972)。1972年の第10回国際水路会議では、カナダの提案により、国際的に使用可能な改訂音響測深補正表の調査をすべきであると決議された。英国水路部とNIOの後身であるIOSによって、すでに決定していたMathews表の新刊プロジェクトが、その要求をかなえるものとみなされた。1977年の第11回国際水路会議において、改訂音響測深補正表についての英国の報告書が採択された。

1982年の第12回国際水路会議では、英国水路部によって刊行されたNP139 Echo-Sounding Correction Tables Third Edition, 通称Carter表と呼ばれる音響測深補正表がMathews表に代わるものとして採用された。この表の作成には、米国国立海洋データセンター(NODC)のデータを使用し、Wilson (1960)の音速度計算式が用いられた。また、その後発表されたDel Grosso, Mader (1972)の音速度計算式での計算結果との適合性を得るために、Wilson (1960)で計算された音速度から -0.65 m/sec (Ryan, 1974)の補正がされている。

水路部においては、1977年11月、Mathews表第2版を6冊入手し、海洋情報課に保管されているが、水深改正に使用された事例は見当たらない。Carter表は、1980年11月3冊入手しているが、岡田(1982)によれば、1983年からそれまでの桑原表に代えて直営並びに外注作業において採用することとなった。大陸棚調査では、1983年から1995年8月まで使用された。

2.3 音速度計の種類

海水中の音速度を測定する方法は、直接所定層において、超音波を一定の距離の間で発信・受信を繰返し、その周波数の変化から音速度を求めるsing-aroundまたはhowlerと呼ばれる方式と一定の距離の間での一回の発信から受信までの時間を計測し音速度を求める方式がある。後者の内、カナダAp-

plide Microsystems社が開発した方式は、Time of Flightと呼ばれている。また、近年の電子機器の小型化により、CTDでの水温・塩分・深度の測定から、リアルタイムに音速度が得られる機種も存在する。例として米国Falmouth Scientific社製Micro Sound Velocity Profiler SVP2[®]及びSVP3[®]がある。

また、水路部での音速度計開発の先駆けとなった事として、1967年7月27日、水路部会議室において、写真2に示すU.S. Navy Electronics Laboratory

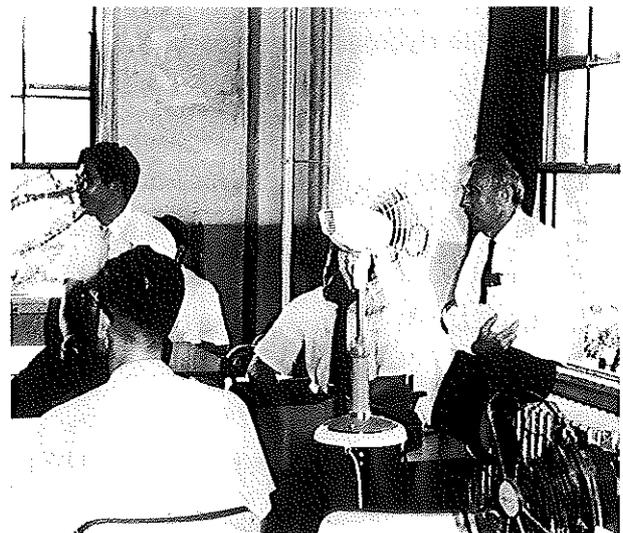


写真2 1967年7月27日、来日し水路部で講演したMackenzie博士

Photo. 2 Dr. K. V. Mackenzie gave a lecture in the Hydrographic Department on July 27, 1967.

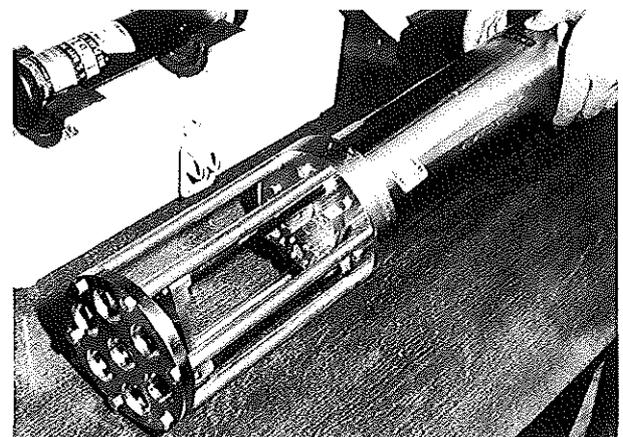


写真3 TR-4-C型音速度計

Photo. 3 TR-4-C type sound velocimeter.

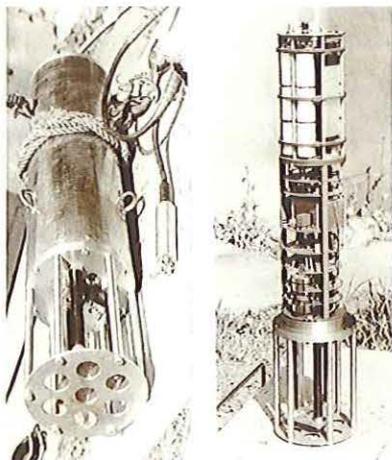


写真4 水路部で開発した音速度計
Photo.4 The sound velocimeter developed by the Hydrographic Department.

の Dr. K.V. Mackenzie が、「海洋開発に関する概要」と題して講演を行った。この際に写真3に示す sing-around 方式による水中音速度計 (ACF Model TR-4-C) 及び温度センサー (HP-2832A) の展示を行っている。温度センサーの適用範囲は、-20度から+40度、分解能は0.001度と記載されている。

次に、水路部における開発機器を含めて、現在までに使用した音速度計を示す。

(1) 水路部で開発した音速度計

1969年、水路部において sing-around 方式を採用した音速度計を開発した。写真4にその外観と耐圧容器を外した状況を示す。使用周波数は5MHz、音速レンジは1,500 m ± 100 m/sec、精度は音速度の ± 1/10,000、耐圧設計深度は5,000 m であり、測定データは、ワイヤーレコーダーに録音される。船上に揚収後、6秒間隔で測定録音された音速度と深度の信号を周波数カウンターを用いて計測し印字出力する方式を採用している。

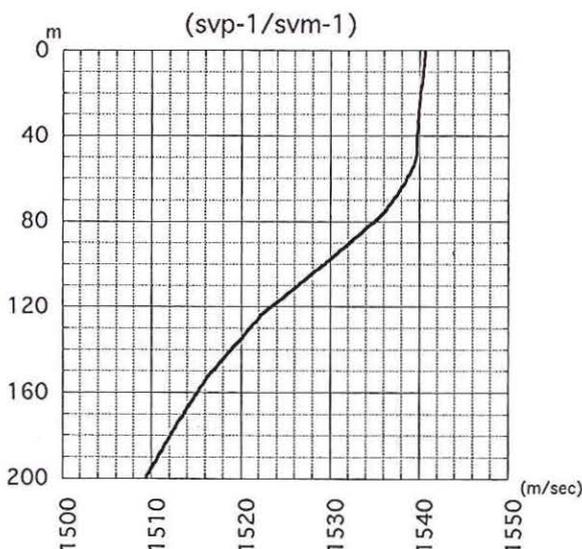
1969年3月、伊豆大島東方海域で深さ2,100m ~ 2,300m までの海上試験を実施し、川鍋 (1969) に報告されている。

(2) NAVITRONIC SVP-1/SVM-1

1987年から1989年にかけて、写真5に示すデนมール NAVITRONIC 社の SVP-1/SVM-1 が6台導入された。この音速度計は、音速度プローブ SVP



写真5 NAVITRONIC 社製の音速度計, SVP-1/SVM-1
Photo.5 Sound velocimeter made by NAVITRONIC, SVP-1/SVM-1.



第1図 SVP-1/SVM-1で測定した音速度曲線
Fig.1 The sound speed curve measured by SVP-1/SVM-1 (1992/9/29).

-1と音速度モニターSVM-1からなり、音速度プローブの超音波発信スロットから発信した超音波が、取り付けられた反射板で反射し受波器で受信されるまでの時間を20cmあたり48パルスを用いて測定し、内部メモリーに記憶する。音速度プローブから音速度モニターへのデータ転送には、超音波を使用している。使用周波数は、音速度の計測及びデータ伝送とも 2 MHz を使用し、音速レンジは1400 m/sec ~ 1700 m/sec、分解能0.1 m/sec、精度 ± 0.2 m/sec、使用可能深度200 m (オプションで600 m まで) であり、ロープ等の索で所定の深度まで下降させ使用する

る。最後に使用したのは、1992年水路部が参加し実施したフィリピンのパラワン島東岸にあるプエルトプリンセッサ港周辺海域の水路測量である。第1図に1992年9月29日測定した音速度の記録例を示す。

(3) AML SVPS

1998年、全管区本部水路部に浅海用音速度計として、カナダ Applide Microsystems 社の SVPS 型音速度計が導入された。この音速度計は、Time of Flight 方式による計測方法を採用している。使用周波数は1MHz、音速レンジは1400m/sec~1550m/sec、分解能0.015m/sec、精度±0.060m/sec、使用可能深度は300mであるが、本体に接続するデータケーブルは、長さ100mのものを使用している。

(4) AML SVPLUS

1998年3月建造された測量船「昭洋」には、Applide Microsystems 社の SVPLUS 型深海用音速度計が導入された。この音速度計のセンサーは、SVPS 型と同一で、測定データは、内部メモリーに記憶し、水深5000mまでの測定が可能である。

(5) 深海用マルチビーム測深機用音速度計

深海用マルチビーム測深機用音速度計は、船底から海水を汲み上げるポンプと音速度を計測するセンサー及び表示部（リード・アウトユニット）から構成されている。1993年10月建造された測量船「海洋」搭載の SEABEAM2000 には、米国 Ocean Data Equipments 社の sing-around 方式によるセンサーを使用した SV-5000 型音速度計が組み込まれ、リアルタイムに表層（深さ約3m）の音速度を取り入れ適用したが、1998年に Applide Microsystems 社の Time of Flight 方式によるセンサーに更新し使用している。

1998年3月建造された測量船「昭洋」搭載の SEABEAM2100 には、当初 SV-5000 型音速度計が組み込まれていたが、竣工時には Applide Microsystems 社のセンサーに交換し、リアルタイムに表層（深さ約5m）の音速度を取り入れ適用している。また、測量船「拓洋」の SEA BEAM2100 についても、2000年に Applide Microsystems 社のセンサーを使用した音速度計を導入した。なお、音速度の測定性能は、SVPS と同一である。

3 音速度計算式

3.1 水路部が使用した音速度計算式

水路部での音速度計算手法は、桑原表及び Wilson の式を基とした式が使用された。桑原 (1938)、Kuwahara (1939) に報告されている桑原表は、1982年まで使用されたようであるが、中西 (1979) によれば、1979年以前にすでに電子計算機を使用して、音速度の計算を行っており、1979年には、北西太平洋海域110,000測点の海洋観測資料に基づき編集した「日本近海音速水深補正用ファイル」を作成し、音速度計算に使用するデータ検索に要していた時間の短縮とデータ入力の手間を省くとともに、桑原—Mackenzie の式または Wilson の式を選択して計算ができるようにしたと記述している。

現在水路部で使用している式の基としている1960年米国海軍 Wayne D. Wilson が発表した音速度計算式を第2図に示す。水路部には、「Naval Oceanographic Office SP 68 (1966) より」と記入された複写資料が存在している。複写資料には、その Wilson (1960) の式と Wilson (1960) に発表されていない(1)式に示す深度から圧力に換算する P の項が掲載されている。また、Table 13として P(decibars) と D35, 0, p (Dynamic meters) の換算表 (Lafond, 1951) が併せて掲載されている。当初、この複写資料を Wilson の音速度計算式として使用した。

$$P = 0.101970 \times D + 1.0332 \dots\dots\dots(1)$$

(P=Pressure in kg/cm²)
(D=Depth in meters)

$$V = 1449.14 + V_T + V_P + V_B + V_{STR}$$

$$V_T = 4.5721T - 4.4532 \times 10^{-2}T^2 - 2.6045 \times 10^{-4}T^3 + 7.9851 \times 10^{-6}T^4$$

$$V_P = 1.60272 \times 10^{-1}P + 1.0268 \times 10^{-4}P^2 + 3.5216 \times 10^{-9}P^3 - 3.3603 \times 10^{-11}P^4$$

$$V_B = 1.39799(S-35) + 1.69202 \times 10^{-3}(S-35)^2$$

$$V_{STR} = (S-35)(-1.1244 \times 10^{-2}T + 7.7711 \times 10^{-3}T^2 + 7.7016 \times 10^{-5}P - 1.2943 \times 10^{-1}P^2 + 3.1580 \times 10^{-3}PT + 1.5790 \times 10^{-2}P^2T) + P(-1.8607 \times 10^{-4}T + 7.4812 \times 10^{-6}T^2 + 4.5283 \times 10^{-8}T^3) + P^2(-2.5294 \times 10^{-7}T + 1.8563 \times 10^{-9}T^2) + P^3(-1.9646 \times 10^{-10}T)$$

第2図 1960年に発表された Wilson の音速度計算式
Fig. 2 The equation for sound speed developed by Wilson (Wilson, 1960).

しかし、中西 (1979) によれば、Wilson (1960) の音速度計算式には P の項がないので、水路部では (1)式とは別に米国海軍海洋測量部刊行の音速度表 (1962) から最小自乗法により 3 次の多項式として (2)式を求めた。また、地球自転の影響による補正值 (通称緯度の項と呼ばれるもので、緯度と水深による重力の変化が音速度に与える修正量) を K.V. Mackenzie (1960) から (3)式をそのまま採用した。

$$P = 1.11 + 1.02663 \times 10^{-1} D + 2.691 \times 10^{-7} D^2 - 4.11 \times 10^{-12} D^3 \dots\dots\dots(2)$$

(P=Pressure in kg/cm²)

(D=Depth in meters)

$$\Delta C_\phi = 1.50 \times 10^{-6} D (\phi - 35) + 0.94 \times 10^{-12} D^2 (\phi - 35)^2 - 2.94 \times 10^{-18} D^3 (\phi - 35)^3 - 1.214 \times 10^{-3} (\phi - 35) \dots\dots\dots(3)$$

(φ=Latitude)

(D=Depth in meters)

また、1980年11月、Carter 表を入手したことにより、(4)式に示すとおり、記載されている Wilson の音速度計算式で得られた音速度に -0.65 m/s を補正することとした。

$$V(\text{m/sec.}) = 1449.14 - 0.65 + V_p + V_s + V_t + V_{stp} = 1448.49 + V_p + V_s + V_t + V_{stp} \dots\dots\dots(4)$$

これらの改良及び修正を加えた式を「海中の音速度計算」として、1982年に水路測量業務準則施行細則の別表の計算式集に第 3 図に示す式が掲載され、現在使用されている。

3.2 The Journal of the Acoustical Society of America に掲載された音速度計算式等

様々な計算式に関する発表がなされているが、1959年から年代を追って、呼ばれている通称名と著者名、発表年について記述すると次のとおりである。

- (1) Wilson : Wayne D. Wilson, (1959, 1960, 1962)
- (2) Mackenzie : Kenneth V. Mackenzie, (1960)
- (3) Leroy : Claude. C. Leroy, (1969)
- (4) Del Grosso : V. A. Del Grosso, (1974)
- (5) Medwin : Herman Medwin, (1975)

$$\begin{aligned} P &= 1.11 + 1.02663 \times 10^{-1} D + 2.691 \times 10^{-7} D^2 - 4.11 \times 10^{-12} D^3 \\ V &= 1448.49 + V_T + V_S + V_P + V_\phi + V_{TSP} \\ V_T &= 4.5721 T - 4.4532 \times 10^{-3} T^2 - 2.6045 \times 10^{-6} T^3 + 7.9851 \times 10^{-9} T^4 \\ V_S &= 1.39799(S-35) + 1.69202 \times 10^{-3}(S-35)^2 \\ V_P &= 1.60272 \times 10^{-1} P + 1.0268 \times 10^{-5} P^2 + 3.5216 \times 10^{-9} P^3 - 3.3603 \times 10^{-12} P^4 \\ V_\phi &= 1.50 \times 10^{-6} D (\phi - 35) + 0.94 \times 10^{-12} D^2 (\phi - 35)^2 \\ &\quad - 2.94 \times 10^{-18} D^3 (\phi - 35)^3 - 1.214 \times 10^{-3} (\phi - 35) \\ V_{TSP} &= (S-35)(-1.1244 \times 10^{-7} T + 7.7711 \times 10^{-7} T^2 \\ &\quad + 7.7016 \times 10^{-5} P - 1.2943 \times 10^{-7} P^2 \\ &\quad + 3.1580 \times 10^{-8} P T + 1.5790 \times 10^{-9} P T^2) \\ &\quad + P(-1.8607 \times 10^{-4} T + 7.4812 \times 10^{-4} T^2 + 4.5283 \times 10^{-7} T^3) \\ &\quad + P^2(-2.5294 \times 10^{-7} T + 1.8563 \times 10^{-9} T^2) - 1.9646 \times 10^{-10} P^3 T \end{aligned}$$

ただし

- P : 深度 D_m のときの圧力 Kg/cm²
- V_T : 水温 T℃ の音速度補正值 m/sec
- V_S : 塩分 S‰ の音速度補正值 m/sec
- V_P : 圧力 P Kg/cm² の音速度補正值 m/sec
- V_φ : 緯度 φ°, 深度 D_m の音速度補正值 m/sec
- V_{TSP} : 水温、塩分、深度の 2 要素以上の同時変化に対する音速度補正值 m/sec
- V : 水温 T℃、塩分 S‰、圧力 P Kg/cm² のときの音速度 m/sec

第 3 図 水路測量業務準則施行細則に掲載の音速度計算式

Fig. 3 The formula for sound speed used in the Hydrographic Department.

- (6) Chen and Milleo : Chen-Tung Chen and Frank J. Milleo, (1977)
- (7) Coppens : Alan B. Coppens, (1981)
- (8) Mackenzie : Kenneth V. Mackenzie, (1981)
- (9) Speisberger and Metzger : J. L. Speisberger and K. Metzger, (1991, 1993)
- (10) Dushaw, Worcester, Cornuelle and Howe : JB. D. Dushaw, P. F. Worcester, B. D. Cornuelle and B. M. Howe, (1993)
- (11) Wong and Zhu : G. S. K. Wong and S. Zhu, (1995)

この他、Kinsler, Lawrence E., Frey, Austin R. (1982) 及び Chen and Milleo (1977) を基とした Fofonoff and Millard (1983) による UNESCO の式と呼ばれる式がある。

なお、参考文献には、できるだけ多くの音速度の計算に関連した文献を掲載したので参考にさせていただきたい。

4 まとめ

海水中の音速度を把握することは、仮定音速度を用いる音響測深及び各深度毎の音速度を設定するマルチビーム測深にとって、浅海域、深海域とも水深

計測の精度に極めて重要である。このため、現場海域の状況に合わせて適切な手法及び観測機材を使用することが必要がある。また、浅海用マルチビーム音響測深機を使用するにあたっては、直下ビームのパーチェックの実施は、喫水の確認と測深機自体の性能保持の検証に必要なことであるので、確実に実施する必要がある。なお、パーチェック用のパーの形状及び実施方法については、測量船に搭載されているマルチビーム音響測深機の送受波器が船底装備であることから、今後検討する必要がある。

深海用マルチビーム音響測深機については、パーチェックが困難なので、これに代わるものとして、現場海域での音速度を適用し、動揺センサーのバイアス値を求めるパッチテストを定期的に行うのはもとより、深海平坦面において測深線方向を直角に交差させ、直下水深と各ビーム水深とを比較するクロスチェックが必要である。

なお、水深の音速度補正に使用する手法及び音速度計算式については、適応水深により各種あるので、音速度補正及び音速度の計算を行った場合は、その手法、名称及び使用したデータ等をメタデータとして記録・保存しておくことが必要である。

5 おわりに

本報告書の作成にあたり、音速度計等の写真を提供していただきました川鍋元二氏、また、資料の提供をしていただきました方々に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 岸人三郎：音速水深の修正に就て，水路要報，**157**，469-471 (1935)。
 桑原 新：海水中における音波の速度及測深音速の計算法(其の一，二，三)，水路要報，**191-193**，391-501 (1938)。
 水路部：音速水深修正用図表（太平洋及近海之部）(1939)。
 Susumu Kuwahara : Velocity of Sound in Sea-Water and Calculation of the Velocity for use in Sonic Sounding, *The Hydrographic*

Review, **XVI**, NO2 (1939).

- D. J. Matthews', F.I.C. : NP139, Tables of the Velocity of Sound in Pure Water and Sea Water, Second Edition, Hydrographic Department Ministry of Defence (Naval) (1939).

Wayne D. Wilson : Speed of Sound in Distilled Water as a Function of Temperature and Pressure, *The Journal of the Acoustical Society of America*, **31**, NO.8, 1067 (1959).

K. V. Mackezie : Formulas for Computation of Sound of Speed in Sea Water, *The Journal of the Acoustical Society of America*, **32**, NO.1, 100-104 (1960).

Wayne D. Wilson : Speed of Sound in Sea Water a Function of Temperature, Pressure, and Salinity, *The Journal of the Acoustical Society of America*, **32**, NO.6, 641-644 (1960).

Wayne D. Wilson : Equation for the Speed of Sound in Sea Water, *The Journal of the Acoustical Society of America*, **32**, NO.10, 1357 (1960).

Wayne D. Wilson : Extrapolation of the Equation for the Speed of Sound in Sea Water, *The Journal of the Acoustical Society of America*, **34**, NO.6, 866 (1962).

U. S. Naval Oceanographic office : Table of sound speed in sea water, Special publication 58 (1962).

C. C. Leroy : Development of Simple Equations for Accurate and More Realistic Calculation of the Speed of Sound in Seawater, *The Journal of the Acoustical Society of America*, **46**, NO.1, 216-226 (1969).

川鍋元二：音速度計について，測量 (1969)。

V. A. Del Grosso and C. W. Mader : Speed of Sound in Pure Water, *The Journal of the Acoustical Society of America*, **2**, NO.4, 1442-1446 (1972).

- 加藤俊雄：音速読取りパーセントスケール，水路，4，20-23 (1973).
- V. A. Del Grosso：New Equation for the Speed of Sound in Natural Water (with Comparison to Other Equations), *The Journal of the Acoustical Society of America*, 56, NO.4, 1084-1091 (1974).
- Herman Medwin：Speed of sound in water：A simple equation for realistic parameter, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 58, NO.6, 1318-1319 (1975).
- C. T. Chen and F. J. Milleo：Speed of sound in seawater at high pressures, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 62, NO.5, 1129-1135 (1977).
- 財団法人日本水路協会：水路測量，149-159(1977).
- 長井俊夫：Mackenzieの作成した桑原表の近似式について，水路要報，98，101-103 (1978).
- 桑原 新：音響測深機実用化の思い出，水路，27，15-23 (1978).
- 中西 昭：日本近海音測水深補正ファイルの作成と利用，水路，31，49-55 (1979).
- D. J. T. Carter：NP139, Echo-Sounding Correction Table, Hydrographic Department Ministry of Defence., Third edition (1980).
- A. B. Coppens：Simple equation for the speed of sound in Neptunian water, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 69, NO. 3, 862-863 (1981).
- Kenneth V. Mackenzie：Nine-term equation for the sound speed in oceans, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 70, NO. 3, 807-812 (1981).
- Kinsler, Lawrence E., Frey, Austin R.：Fundamentals of acoustics 3rd edition (1982).
- 岡田 貢：音響測深補正表について，水路，43，58-67 (1982).
- Author: Urick, Robert J.：Principles of underwater sound 3rd edition, 111-128 (1983).
- N. P. Fofonoff and R. C. Millard Jr.：Algorithms for computation of fundamental properties of seawater UNESCO technical papers in marine science, NO.44 (1983).
- J. L. Speisberger and K. Metzger：New estimates of sound speed in water, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 89, NO. 4, 1697-1700 (1991).
- J. L. Speisberger and K. Metzger：A new algorithm for sound speed in seawater, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 89, NO.6, 2677-2687 (1991).
- J. M. Pike and F. L. Beiboer：A comparison between algorithms for the speed of sound in seawater, The Hydrographic Society Special Publication, NO.34 (1993).
- B. D. Dushaw, P. F. Worcester, B. D. Cornuelle and B. M. Howe：On equations for the speed of sound in sea water, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 93, NO.1, 255-275 (1993).
- J. L. Speisberger：IS Del Grosso's sound-speed algorithm correct?, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 93, NO.4, 2235-2237 (1993).
- F. J. Millero and Xu Li：Comments on "On equations for the speed of sound in seawater, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 95, NO.5, 2757-2759 (1994).
- G. S. K. Wong and S. Zhu：Speed of sound in seawater as a function of salinity, temperature and pressure, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 97, NO.3, 1732-1736 (1995).
- 沖野郷子，泉 紀明：マルチビーム測深データの音速改正について，水路部技報，14，104-110 (1996).
- Greg Eaton and D. Tom Dakin：Miniature Time of Flight Sound Velocimeter Offers Increased Accuracy over Sing-Around Technology and CTD Instrumentation, Oceanol-

- ogy International 96 Proceedings (1996).
- 東陽テクニカ：タイムオブフライト方式音速計の開発，日本音響学会誌，53, 7, 563-565(1997).
- C. S. Meinen and D. R. Watts : Further evidence that the sound-speed algorithm of DelGrosso is more accurate than that of Chen and Millero, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 102, NO.4, 2058-2062 (1997).
- C. C. Leroy and F Parthiot : Depth-pressure relationship in the oceans and seas, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 103, NO.3, 1346-1352 (1998).
- 水路測量業務準則施行細則：海水中の音速度計算，計算式集，179の26 (2000).
- 大島章一：海底地形調査の歴史と現状，地学雑誌，103, 3, 474-482 (2000).