

## ボールベアリングを用いた魚群探知機の 送受信装置の較正の試み

今関昭博\*・峰 雄二\*・高須康介\*・濱田悦之\*

### Calibration of Transmitting and Receiving System of Echo Sounder by used Ballbearing

Akihiro IMAZEKI\*, Yuji MINE\*, Yasusuke TAKASU\*  
and Etsuyuki HAMADA\*

#### Abstract

In order to calibrate the transmitting and receiving system of the echo sounder, an attempt was made to use the stainless steel sphere and the highcarbon-chrome steel sphere incorporated with the ballbearing of which materials and mesurements had been clearly specified by the Japanese Industrial Standard as a standard reflective sphere. That was to say, considering those steel spheres as elastic spheres, their target strength were obtained through a theoretical operation by the use of the computer. Target strength for the diameters of several spheres were experimentally mesured, and the result was compared with the theoretical value. In consequence, the diameter of the sphere for the transmitting frequency of the echo sounder should be not only free from the variation in target strength of the sphere even if there were some variation in sound medium densities as well as sound velocities but also decided in consideration of the range of "ka" in which the change of " $|f_{\infty}|$ " for "ka" was being slackened. Such "ka" ranges were 3.17 to 4.10 for the stainless steel sphere and 3.17 to 4.06 for the highcarbon-chrome steel sphere. In comparison of the theoretical value of target strength of the sphere with its experimental one, the results induced by errors in measurement varied with transmitting frequency. It was expected, however, that the experimental value could approximate more the theoretical value with the improvement in accuracy of the experimental measurement.

On the other hand, since the elastic constant of the stainless steel sphere was nearly equal to that of the highcarbon-chrome steel sphere, the variation of " $|f_{\infty}|$ " for "ka" of these spheres well resembled one after another. The stainless sphere must be most suitable to use it as a standard reflective sphere.

#### 1. 序

水産では、超音波機器は魚群探知機に代表されるように古くから利用されてきた。近年、TVG (Time varied gain) 回路やデュアルビーム、スプリットビーム、準理想ビームなどの送受波器、あるいはパラメトリック音源などのような各種の開発と、コンピュータと連結したシステム化による目ざましい進歩にともなって、資源調査や生物生態調査などの分野で音響機器の活用は新たに

大きな注目と期待を集めるようになってきた。これは従来の機器の性能が、単に生物や海底の探知のみに限られていたのに対し、現在では魚群の量や魚体長測定などのように計測機器としての利用が可能となってきたためである。

超音波機器を計測の目的で使用するとき、その精度に影響を及ぼす要因の一つとして機器の較正の信頼性があげられるが、中でも送受信装置の較正は重要である。送信パルスの振幅、送受波器の送波感度および受波感度、そして受信機の増幅度からなる送受信係数は、時間の経過や環境要因の変動によって変化する。したがって超音

1992年3月10日受理。

\*東京水産大学 Tokyo University of Fisheries,  
5-7, Konan 4, Minato-ku, Tokyo 108, Japan.

波機器を計測の目的で使用するには、その精度の向上を図るために計測前にこれら送受信装置の較正を行うことが望ましい。

較正方法としては、あらかじめ較正済みのハイドロホンマイクを使用する方法が従来より広く行われており、これによる精度の向上をはかるための検討もなされてきた(宮野鼻ほか, 1982)。しかしながらこの方法では較正用ハイドロホンマイク自身に誤差がある場合、これがそのまま較正誤差へと波及する。また較正に際し、ハイドロホンマイクを送受波器の音軸上に一定の姿勢を保持して懸垂することはかなり面倒である。この点、あらかじめ後方散乱強度が判っている較正用の標準反射球を用いれば、これを送受波器の音軸上に保持することは比較的容易であり、誤差も少なくなるので優れた方法と云える。

現在では、標準反射球として銅球が一般的に用いられるようになってきた。これは材質の特性から加工がしやすく、また入手が比較的容易であるという利点があるが、反面高価である。そこで筆者らは、材質の均一性や寸法および仕上げが日本工業規格(JIS B1501)で統一されており、かつ安価で手軽に入手できる玉軸受用の鋼球に着目し、この後方散乱強度を弾性球の散乱理論にもとづいてコンピュータで計算し、この値と実験計測によって得られたそれとを比較することによって較正用標準反射球としての適性について検討を行ったので報告する。

## 2. 球の散乱理論

不粘性の様な液体中にある同質で等方性の固体弾性球による音響学的散乱は、過去、幾人かによって理論的あるいは実験的に詳述されてきた。FARAN (1951) は、液体中の平面入射正弦波に対する弾性球の散乱をはじめ理論的に定量化した。HAMPTON and MAKINNEY (1961) は水中の金属球からの散乱について、パルス幅が球の径に比べて長い正弦パルス波と短いそれとの比較実験を行った。HICKLING (1962) はFARAN (1951) の理論を発展させることによって、正弦パルス波に対する散乱理論式を確立した。またNEUBAUER *et al.* (1974) はアルミニウムとタングステンカーバイトの二つの材質の球の正弦連続波に対する後方散乱理論による計算値と実験値との比較検討を行った。FOOTE (1982, 1983, 1984) は、球による正弦パルス波の散乱理論に受信機の周波数レスポンスを加味した計算と、その実験検証とからなる一連の研究により、現在、標準反射球として使用されている較正用銅球の礎を築いた。

FARAN (1951) によって理論化され、HICKLING (1962) によって確立された正弦連続波に対する弾性球の後方散乱強度を求める式は、次の通りである。密度が  $\rho$ 、音波の伝播速度が  $c$  の様な液体中に置かれた球の中心に、Fig. 1 の座標系のように、 $z$  軸の正から負の方向へと入射する正弦波の圧力  $P_i$  は、

$$P_i = P_0 \exp [ i (\omega t - kz) ] \quad (1)$$

で表される。

ここで  $P_0$  は球の中心を原点としたときに、球が無い場合の原点における入射波圧力であり、 $\omega$  は角周波数、そして  $k$  は波数 (wave length constant) である。球の外側のある一点の圧力  $P$  は入射波圧力  $P_i$  と散乱波圧力  $P_s$  との和であるから、

$$P = P_i + P_s \quad (2)$$

となる。そして散乱波圧力  $P_s$  は次のように表される。

$$P_s = (P_0 a / 2r) \exp [ i (\omega t - kr) ] f_r \quad (3)$$

ここで  $a$  は球の半径であり、 $r$  は球の中心から圧力場の一点までの距離である。また  $f_r$  は散乱波の圧力振幅を表し、“form function” と呼ばれ、次のとおりである。

$$f_r = -2(kr/ka) e^{ikr} \sum_{n=0}^{\infty} (-i)^{n+1} h_n^{(2)}(kr) (-1)^n \times (2n+1) \sin \eta_n e^{i\eta_n} \quad (4)$$

$h_n^{(2)}(kr)$  は球ヘンケル関数であり、 $\eta_n$  は  $n$  番目の部分波の位相角である。 $r$  が大きくなると、 $h_n^{(2)}(kr)$  の漸化式を用いて遠距離音場のモノスタティックケースの  $f_{\infty}$  が、

$$f_{\infty} = -2(a/x) \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n (2n+1) \sin \eta_n e^{i\eta_n} \quad (5)$$

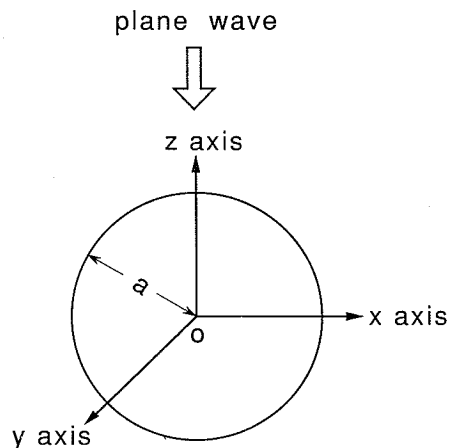


Fig. 1 Coordinate system.

として得られる。また位相角  $\eta_n$  は次のように表される。

$$\tan \eta_n = \frac{j_n(x)F_n - x j_n'(x)}{n_n(x)F_n - x \eta_n'(x)} \quad (6)$$

$$F_n = \frac{\rho_1 \frac{x_2^2}{2} \frac{x_1 j_n'(x_1) - j_n(x_1)}{x_1 j_n'(x_1) - j_n(x_1)} - \frac{2(n^2+n)j_n(x_2)}{(n^2+n-2)j_n(x_2) + x_2^2 j_n''(x_2)}}{\rho_1 \frac{x_1^2}{2} \frac{\{m/(1-2m)\}j_n(x_1) - j_n''(x_1)}{x_1 j_n'(x_1) - j_n(x_1)} - \frac{2(n^2+n)[j_n(x_2) - x_2 j_n''(x_2)]}{(n^2+n-2)j_n(x_2) + x_2^2 j_n''(x_2)}} \quad (7)$$

ここで  $x=ka$ ,  $x_1=k_1 a = kac_1/c$ ,  $x_2=k_2 a = kac_2/c$  であり,  $c_1$  は球の疎密波速度,  $c_2$  は球のねじれ波速度, また  $\rho$  および  $\rho_1$  はそれぞれ媒体密度と球の密度であり,  $m$  は球のポアソン比である。  $j_n$  と  $n_n$  は第一種および第二種球ベッセル関数を表し, またプライム ( ' ), ( " ) はそれぞれの関数の一次および二次導関数を表している。球のターゲットストレングス  $T_s$  は, 入射波圧力の二乗に対する反射波圧力の二乗の比で表されるが, 遠距離音場の条件を満たし, 球の中心から基準距離にある点の圧力場を考えると, (1), (3) および (5) 式から,

$$T_s = (P_s/P_i)^2 = (a |f_\infty| / 2)^2 \quad (8)$$

となる。

一般的に魚群探知機などに使用される音波の形式は正弦パルス波であるため, 球の散乱理論は正弦パルス波について展開されなければならない。FOOTE (1982) は正弦パルス波の後方散乱理論によって, 銅球の後方散乱断面積を次のように与えている。

$$\sigma = 4\pi \int_0^\infty |SFH|^2 dfw / \int_0^\infty |SH|^2 dw \quad (9)$$

ここで  $S$  は入射正弦パルス波の周波数スペクトルを表し,  $F$  は (5) 式による  $|f_\infty|$ ,  $H$  は受信周波数レスポンス関数を示している。本来, 玉軸受用鋼球のターゲットストレングスを理論計算により求めるためには (9) 式によるべきであるが, 本論文では (8) で計算を行った。

計算には, 東京水産大学情報処理センターの汎用コンピュータ FACOM M760/6 (富士通製) が使用された。第一種および第二種球ベッセル関数の計算は, 漸化式,

$$j_{n-1}(x) = j_n(x)(2n+1)/x - j_{n+1}(x),$$

$$n_{n-1}(x) = n_n(x)(2n+1) - n_{n+1}(x)$$

によって行った。

### 3. 実験方法

ターゲットストレングス  $T_s$  (dB) の計算および計測に用いた玉軸受用鋼球は, ステンレス鋼球 (SUS440C) と高炭素クロム鋼球 (SUJ2) の二種類の材質のものである。ここで  $T_s$  は  $T_s$  をデシベルで表した値であり,  $TS = 10 \log T_s$  である。Table 1 にそれぞれ魚群探知機の周波数, 球の径, そして波数  $k$  と球の半径  $a$  との積  $ka$  を示す。

実験は, 1991年5月および8月に東京港内の晴海埠頭の棧橋で行なわれた。実験現場の水深は6.3から8.5mであった。魚群探知機の送受信器を固定した懸垂架台を棧橋から海中に降ろし, 送受信器の音軸上でかつそれから

Table 1. Dimensions of the stainless steel spheres and the highcarbon-chrome steel spheres to be used in experiment and calculation. The diameter of the stainless steel spheres and the highcarbon-chrome steel spheres are identical diameter for each frequencies. The value of sound velocity is 1,516m/sec in calculating wave length constant  $k$ .

| Frequency(kHz) | Diameter(mm) | $ka$  |
|----------------|--------------|-------|
| 19.7           | 63.5000      | 2.592 |
| 38.0           | 41.2750      | 3.250 |
| 59.0           | 25.4000      | 3.106 |
| 88.0           | 19.0500      | 3.474 |
| 98.2           | 15.8750      | 3.231 |
| 120.0          | 14.2875      | 3.553 |
| 179.0          | 19.0500      | 7.066 |
| 200.0          | 15.8750      | 6.580 |

の距離が遠距離音場の条件を満たす位置に hidroホンマイク TW-9103-S. 1099 (東和製作所製) を送受信波面と平行に配置し、各周波数毎に送受信装置の校正を行った。この後、同様に送受信装置の音軸上に高炭素クロム鋼球あるいはステンレス鋼球を懸垂し、各周波数毎に反射波の受信出力電圧を50から100送信について計測し、平均処理を行った。

球のターゲットストレングスを TS (dB) としたとき、球からの反射信号の受信レベルを EL (1Vを0dB)、送受信装置面から球の中心までの距離を r (m)、海中の音波の吸収係数を  $\alpha$  (dB/m) とすると、TSはソナー方程式から次のように表される。

$$TS = EL + 40 \log r + 2\alpha r - C_n \quad (10)$$

ここで  $C_n$  は使用する魚群探知機の送受信装置の特性によって決まる値で、ソースレベル SL (基準距離 1 m で  $1 \mu Pa$  を 0 dB) と受波感度 VR ( $1 \mu Pa$  で 1 V を 0 dB) との和で表される。SLとVRは校正によって求められるが、これを hidroホンマイクを用いて行う場合、魚群探知機の送受信装置から放射された音波を hidroホンマイクで受波したときの受信レベルを ER (1Vを0dB)、 hidroホンマイクの受波感度を M ( $1 \mu Pa$  で 1 V を 0 dB) とすると、SLは

$$SL = ER - M + 20 \log r + \alpha r \quad (11)$$

となり、また魚群探知機の送信を断にして受信状態のみとし、オッシレータによって hidroホンマイクから音波を放射したときの hidroホンのソースレベルを ES (基準距離 1 m で  $1 \mu Pa$  を 0 dB)、魚群探知機による受信レベルを E (1Vを0dB)、 hidroホンマイクの送波感度を S ( $1 \text{ watt}$  で  $1 \mu Pa$  を 0 dB) とすると、VRは、

$$VR = E - ES - S + 20 \log r + \alpha r \quad (12)$$

となる。したがって (10), (11), (12) 式から球の TS (dB) は、

$$TS = EL + ES - S + 20 \log r + \alpha r \quad (13)$$

として求めることができる。

測定に用いた魚群探知機は多周波魚群探知機 RCV-

210T (古野電気製) であり、電圧計測にはデジタルオシロスコープ YHP-54200A (横河ヒューレットパカード製) を使用した。また hidroホンマイクによる校正にはそれぞれオッシレータ 204C (HEWLETT PACKARD製)、周波数カウンター 5381A 80MHz (HEWLETT PACKARD製)、ボルトメータ 400FLAC (HEWLETT PACKARD製)、そしてアッテネータ 350D (HEWLETT PACKARD製) を使用した。現場の水温、塩分濃度、水素イオン濃度指数は、ポータブル型 STメータ Model-602 (YEIKAL製) と PHメータ UC-23 (セントラル科学製) によって測定し、これらの値はそれぞれ 25.0°C, 16.5‰, 8.13pH であった。

#### 4. 結 果

弾性球であるステンレス鋼球、高炭素クロム鋼球、そして銅球に対する連続正弦波の後方散乱理論に基づく解がコンピュータを使用して計算された。計算に必要な各々の球の弾性定数を Table 2 に示す。またこの計算によって得られた球の "form-function"  $f_\infty$  の絶対値をそれぞれ Fig. 2, Fig. 3 および Fig. 4 に示す。縦軸は  $|f_\infty|$  であり、横軸は波数 k と球の半径 a との積 ka である。STENZEL (1939) は、不動の剛球に対する  $f_\infty$  の式を与えているが、この結果は (7) 式において極限  $P_n \rightarrow \infty$  としたときの (5) 式による計算結果と一致する。そしてこの結果が Fig. 2, Fig. 3 中に破線で示されている。この不動の剛球に対する  $|f_\infty|$  の一連の変化は、0 から立ち上がり ka が 1.2 付近で極大に達し、以後 ka の増加にともなって振動しながら次第に 1 に収束する。これに対して弾性球であるステンレス鋼球と高炭素クロム鋼球の場合は、ka が 5.0 より小さい範囲では比較的鋼球の変化と似ているが、ka が大きくなるにつれて振幅が増大し、極大と極小の連なりとなって変化している。HICKLING (1962) は、球の材質が圧縮性に富み、弾性が増すにつれて振動の振幅は大きくなり、極大間もしくは極小間の間隔は狭く、波形がシャープになることを

Table 2. Elastic constants of a stainless steel sphere and a highcarbon-chrome steel sphere.

| Material                | Density(g/cm <sup>3</sup> ) | Poisson' ratio | Compressional velocity(m/sec) | Shear velocity (m/sec) |
|-------------------------|-----------------------------|----------------|-------------------------------|------------------------|
| Stainless steel         | 7.830                       | 0.271          | 5,764.5                       | 3,230.8                |
| Highcarbon-chrome steel | 7.680                       | 0.286          | 5,811.1                       | 3,181.4                |
| Copper                  | 8.947                       | 0.350          | 4,760.0                       | 2,288.5                |

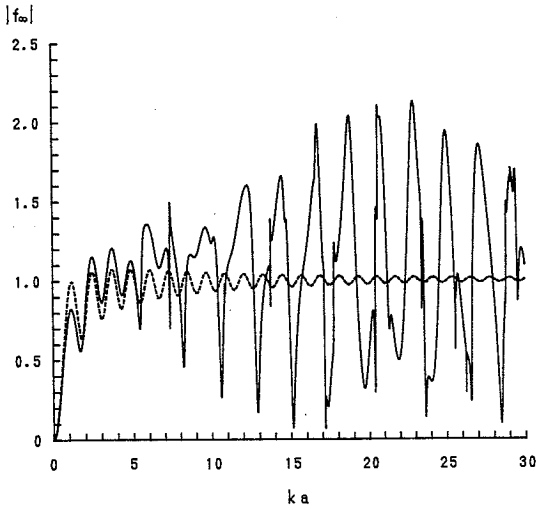


Fig. 2 The pressure amplitude as a function of frequency of the echo returned by a stainless steel sphere to a distant source of continuous waves. The broken line show the pressure amplitude of the echo returned by a rigid immovale sphere.

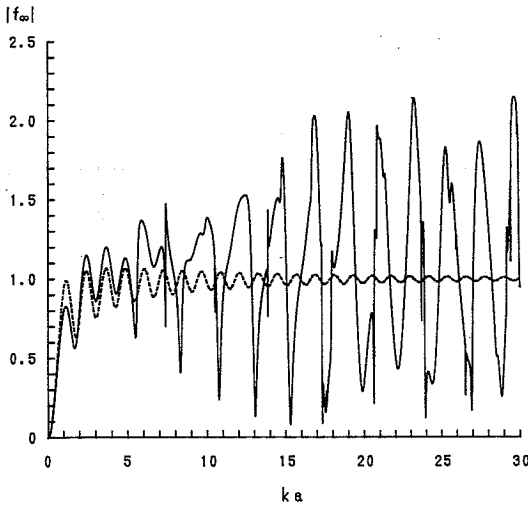


Fig. 3 The pressure amplitude as a function of frequency of the echo returned by a high-carbon-chrome steel sphere to a distant source of continuous waves. The broken line show the pressure amplitude of the echo returned by a rigid immovale sphere.

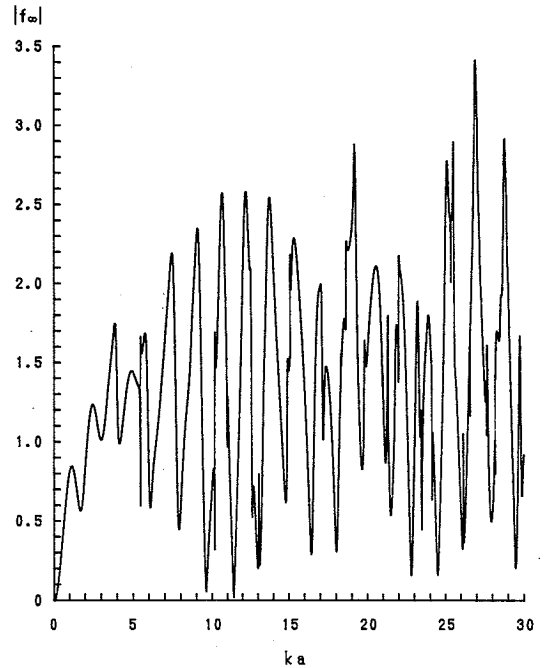


Fig. 4 The pressure amplitude as a function of frequency of the echo returned by a copper sphere to a distant source of continuous waves.

示している。そしてさらにこの振動の傾向は、先に示した弾性定数のうちのねじれ波速度と強い相関があるため、球の内部のねじれ波の動きにかなり依存することが推察されることを述べている。したがって、Table 2 に示されたステンレス鋼球と高炭素クロム鋼球の弾性定数はかなり近い値であるため、Fig. 2 および Fig. 3 に示された両者の  $ka$  に対する  $|f_\omega|$  の一連の変化も酷似しているが、これらの球より弾性に富んだ銅球では、Fig. 4 で示されるように振幅が大きくシャープになっている。(6) および (7) 式中のパラメータのうち、球の密度、ポアソン比、疎密波速度、そしてねじれ波速度は球の材質によって決まる値である。これに対して媒体の密度と音波の伝播速度は媒体条件によって変化する。例えば海水であるならば、それらは水温、塩分濃度、そして水圧によって左右される。FOOTE (1982) は銅球を校正用標準反射球として使用するにあたり、各周波数毎に球の径を定めるために水温の変化  $dt$  に対する球の後方散乱断面積の変化  $d\sigma$  に着目し、次の条件を満たすように球の

径を決定している。

$$d\sigma/dt|_{t_0=0} \quad (14)$$

ここで $t_0$ は、ある温度範囲内に存在する任意の温度である。媒体の温度が変化すれば、媒体の密度と音速の両者がともに変化し、これにともなって波数 $k$ と $|f_\infty|$ の値も変化する。(14)式は較正用標準反射球として適当な球の径は、媒体の温度変化に対するTS値の変化量が小さく、ある温度範囲においてその変化の割合がゼロ、つまり極大値か極小値が存在するような径が最も良いことを意味している。本研究においてもこれに従って塩分濃度を16.5‰に固定し、水温を0から30℃まで1℃毎に変化させ、これにともなうTS値の変化を $ka$ が0から30まで0.01毎に計算させた結果、TS値の変化が最も小さい、つまり最も安定しているところの $ka$ は、ステンレス鋼

球で3.17から4.10、高炭素クロム鋼球で3.17から4.06であった。またそれぞれの球において $ka$ がこの範囲内であるならば、Fig. 2およびFig. 3に示されたように $ka$ に対する $|f_\infty|$ の変化の様子が比較的不動の鋼球のそれと似ており、かつ変動の振幅も小さく安定しているので、この点からも較正用標準反射球として適した径であると云える。

Fig. 5およびFig. 6は、Table 1に示された各周波数毎のステンレス鋼球と高炭素クロム鋼球の径について、水温を0から30℃まで変化させたときのTS値の変化の様子を表したものであり、縦軸がTS (dB)、横軸が温度(℃)である。ステンレス鋼球および高炭素クロム鋼球の両者ともそれぞれ38.0kHz, 59.0kHz, 88.0kHz, 98.2kHzの結果が前述の $ka$ 値の範囲内にあるため、海

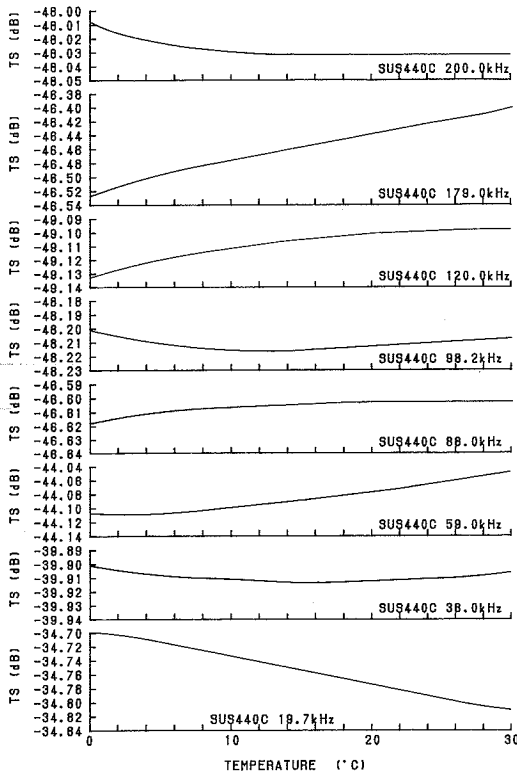


Fig. 5 Effects of variations in the medium temperature on TS of the stainless steel spheres of each diameters for the frequency, respectively. A constant medium salinity of 16.5‰ is assumed.

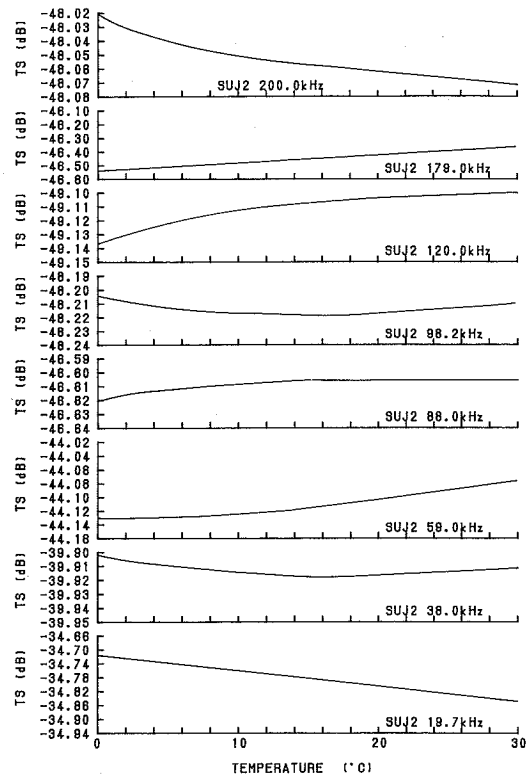


Fig. 6 Effects of variations in the medium temperature on TS of the highcarbon-chrome steel spheres of each diameters for the frequency, respectively. A constant medium salinity of 16.5‰ is assumed.

水の温度変化に対するTS値の変化は小さく、温度が0から30℃の範囲でその変化量は両者ともほぼ0.012から0.036dBであった。

一方、媒体密度と音速に影響を及ぼすもう一つの要因として、塩分濃度の変化があげられる。水温変化に対するTS値の変化と同様に水温を25℃に固定して、塩分濃度を0から35‰まで1‰毎に変化させ、この変化に対するTS値の変化をkaが0から30まで計算した結果、ステンレス鋼球および高炭素クロム鋼球の両者とも、水温変化に対してTS値が最も安定していたkaの値の範囲内では、塩分濃度の変化に対しても安定していた。Fig. 7とFig. 8は、それぞれステンレス鋼球と高炭素クロム鋼球についての各周波数毎の塩分濃度の変化に対するTS値の変化を表したものである。またTable 3は、ステンレス鋼球および高炭素クロム鋼球について、各周波数毎にそれぞれの球に対するTSの計算値と実験値とを比較したものである。ステンレス鋼および高炭素クロム鋼のどちらの球も周波数がそれぞれ38.0kHz, 120.0kHz, 179.0kHzおよび200.0kHzでは両者の値は良く一致していたが、19.7kHzではその差に最も開きがあり、計算値の方が0.8dBほど大きかった。

## 5. 考 察

玉軸受用のステンレス鋼球や高炭素クロム鋼球を魚群探知機の送受信装置の較正用の標準反射球として使用するに際し、送信周波数に対して球の径をいくにするかは次の二点について考慮する必要がある。第一点は、媒体中の音波の伝播速度と媒体密度と云う二つのパラメータの変化に対する球の後方散乱強度の変化の割合が、最も小さく安定しているところの球の径の値を採用することである。媒体が海水である場合、先の二つのパラメータは水温、塩分濃度、そして水圧によって左右される。このうち水圧に関しては、実際に送受信装置の較正を行うについてその変化量は微小であるため、球のターゲットストレングスの変化にあまり影響を与えない。水温の変化に対しては、ステンレス鋼および高炭素クロム鋼のそれぞれの球でkaの値が3.17から4.10と3.17から4.06の範囲内でターゲットストレングスの値は安定しており、水温の1℃の変化に対する最大変化量は、前者で0.95<sup>-3</sup>dB、後者で0.94<sup>-3</sup>dBであった。さらにこの範囲内においては塩分濃度の変化に対しても安定しており、その変化量は水温変化の場合に比べてやや小さかった。したがってこのka値内で各周波数毎に球の径を決定すれば良いが、周波数が100kHz以上の高周波になると球の径が

かなり小さなものになる。この結果、媒体のパラメータの変化に対する球のターゲットストレングスの変化量は小さいが、実際に送受信装置の較正を行うにあたり、球からの反射波の受信々号レベルが非常に小さくなるため、実用に適さない。したがって球の径を大きくするために、このような高周波ではkaの値をステンレス鋼球では6.78から6.87に、また高炭素クロム鋼球では6.83から6.91にとるのが良い。ka値がこれらの範囲内では、例えば水温の1℃の変化に対する球のターゲットストレングスの変化量は、前者で0.124<sup>-2</sup>dB、後者で0.133<sup>-2</sup>dBと先の値に比べてやや劣るが、他のkaの値に対するその変化量と比較するとかなり安定している。またこれらの球はボールベアリングであるために、その径は日本工業規格で定められている。したがって音響機器の送信周波数によってはkaの値が先の範囲内に治まるように球の径を選ぶことが困難な場合も生じる。このようなときには極力この近傍で径を定めるのが適当であろう。

球の径を決定するために考慮すべきもう一つの点は、Fig. 2およびFig. 3中でkaの値の変化に対して急激に $|f_{\infty}|$ の値が変化するところは避け、その変化の様子が比較的なだらかな部分で径を定めるべきであるということである。この点から先のka値の範囲内では、両球の $|f_{\infty}|$ の変化は不動の剛球のそれと似ており緩やかである。またkaがこの範囲内では、ステンレス鋼球と高炭素クロム鋼球の $|f_{\infty}|$ の値はほぼ一致しているように、(5)~(7)式中で球の材質によって決まるパラメータの値に多少の誤差があっても計算から得られたTS値に波及する誤差は微小であり無視できる。

本来、ステンレス鋼球や高炭素クロム鋼球を較正用標準反射球として使用するためには、球のTS値の理論計算は(9)式によらなければならない。これを(8)式で計算することによってどれだけの誤差が生じるかを、TS値が(9)式によって求められているSIMRAD製の較正用の銅球を用いて比較検討した。200.0kHz, 120.0kHz, 70.0kHz, 38.0kHzの4周波について、それぞれの球の較正用のTS値と(8)式によって計算された値とを比較した結果、その差は最大で0.1dBであった。したがってステンレス鋼球や高炭素クロム鋼球についても両者の差はこの程度であると思われる。

球のターゲットストレングスの計算値と実験値の比較では、38.0kHz, 120.0kHz, 179.0kHz, 200.0kHzの4周波についてはステンレス鋼球および高炭素クロム鋼球の両者ともその差は0.1dB以下であったが、他の周波数ではばらつきが大きく、特に19.7kHzではその差は0.8

dBと最大であった。このように周波数によってTSの計算値と実験値にはばつきがあるのは実験精度に問題があったためであると思われる。この最大の原因は、実験

が海上で行われたために風浪や潮流の影響を受けやすく、常に送受波器の音軸上に球やハイドロホンマイクを保持しておくことが困難であるため、これらが音軸からずれ

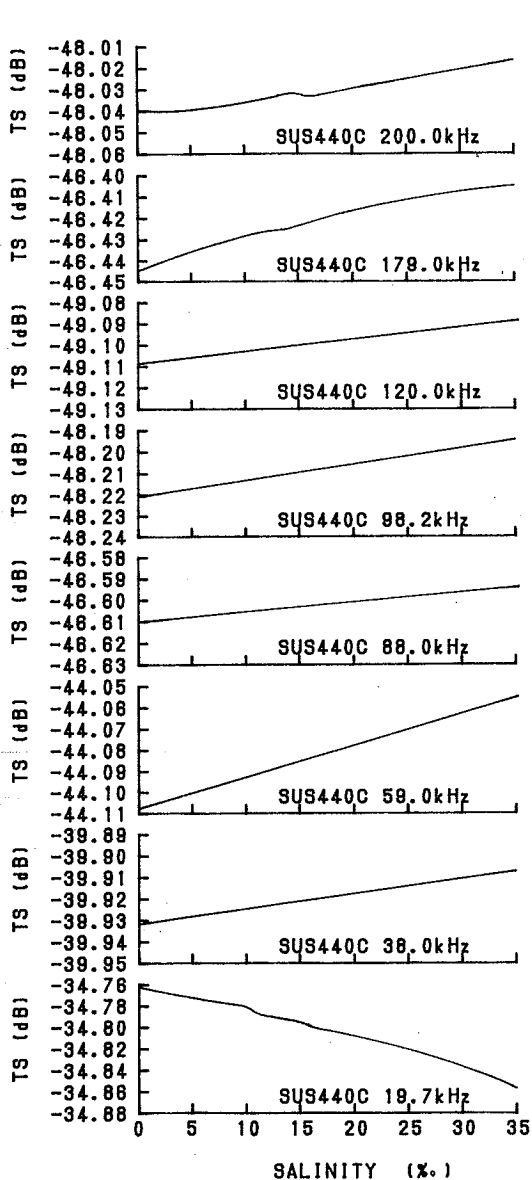


Fig. 7 Effects of variations in the medium salinity on TS of the stainless steel spheres of each diameters for the frequencies, respectively. A constant medium temperature of 25°C is assumed.

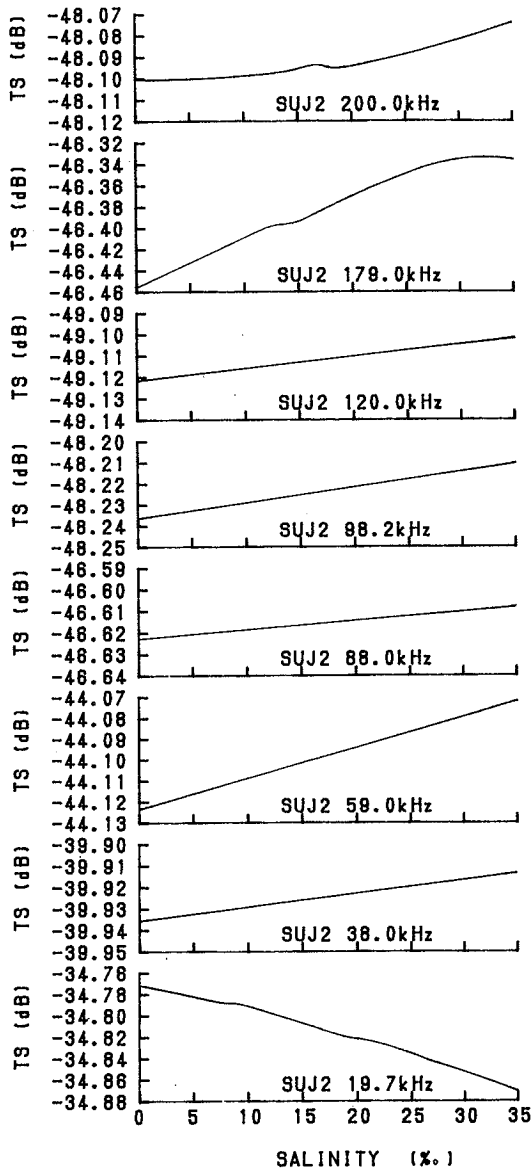


Fig. 8 Effect of variations in the medium salinity on TS of highcarbon-chrome steel spheres of each diameters for the frequencies, respectively. A constant medium temperature of 25°C is assumed.



Table 3. Comparison between the values of calculated TS and experimental TS, for the stainless steel spheres and the highcarbon-chrome steel spheres, respectively.

| Frequency<br>(kHz) | Diameter<br>(mm) | Stainless steel sphere |                         | Highcarbon-chrome steel sphere |                         |
|--------------------|------------------|------------------------|-------------------------|--------------------------------|-------------------------|
|                    |                  | Theoretical TS<br>(dB) | Experimental TS<br>(dB) | Theoretical TS<br>(dB)         | Experimental TS<br>(dB) |
| 19.7               | 63.5000          | -34.847                | -35.6                   | -34.860                        | -35.6                   |
| 38.0               | 41.2750          | -39.900                | -40.0                   | -39.915                        | -39.9                   |
| 59.0               | 25.4000          | -44.062                | -44.6                   | -44.079                        | -44.4                   |
| 88.0               | 19.0500          | -46.596                | -46.2                   | -46.609                        | -46.2                   |
| 98.2               | 15.8750          | -48.198                | -47.9                   | -48.213                        | -48.0                   |
| 120.0              | 14.2875          | -49.091                | -49.2                   | -49.104                        | -49.2                   |
| 179.0              | 19.0500          | -46.408                | -46.5                   | -46.349                        | -46.4                   |
| 200.0              | 15.8750          | -48.020                | -47.8                   | -48.080                        | -48.0                   |

ることによって生じる誤差に起因するものと推察される。したがって今後、水槽実験の採用や、球あるいは hidroホンマイクの固定方法の再考により、さらにTSの実験値と計算値は合致するものと思われる。

以上より、魚群探知機の送受信装置の校正用標準反射球としてステンレス鋼球や高炭素クロム鋼球を用いることは可能であるが、それにはなお一層の正確な実験による検証が必要である。しかしながら、現在、ある特定の周波数について標準反射球として銅球が市販されているが、これらの周波数についてはその銅球を使用し、それ以外の周波数に対しては銅球の代用としてこれらの球を使用することは可能と思われる。またこれらの球を標準反射球として代用する場合、ステンレス鋼球と高炭素クロム鋼球の音波の後方散乱特性が良く似ているということから、腐食しにくい前者を用いるのが適当であろう。

## 6. まとめ

魚群探知機の送受信装置の校正に、日本工業規格で材質寸法等が明確に定められている玉軸受用のステンレス鋼球と高炭素クロム鋼球を標準反射球として使用することを試みた。これらの球を弾性球として、そのターゲットストレングスをコンピュータを用いて理論計算した。またこれらの球のいくつかの径について、ターゲットストレングスを実験によって計測し、両者の比較検討を行った。その結果、次のようなことが明らかになった。

(1) 魚群探知機の送信周波数に対して球の径をいくらにするかは、球を取りまく媒体の密度と音速の変化に対

して球のターゲットストレングスの変化が最も安定し、かつ  $ka$  の値の変化に対する  $|f_{\infty}|$  の一連の変化の中で、その変化の割合が緩やかなところの  $ka$  の範囲を選んで決定すれば良い。その範囲はステンレス鋼球で3.17から4.10、高炭素クロム鋼球で3.17から4.06であった。

(2) 球のターゲットストレングスの計算値と実験値の比較では、周波数によって良く一致したものとそうでないものとの開きがあった。このように周波数によって両者にばらつきがあるのは、実験精度に問題があったためであり、この向上を図ることにより、さらに両者は合致するものと思われる。

(3) ステンレス鋼球と高炭素クロム鋼球の弾性定数は比較的近い値であるため、 $ka$  に対する  $|f_{\infty}|$  の一連の変化も酷似している。したがって、標準反射球として用いるには腐食しにくいステンレス鋼球が適当であろう。

## 文 献

- FARAN, J. Jr. (1951) Sound scattering by solid cylinders and spheres. *J. Acoust. Soc. Am.*, **23**, 405-418.
- FOOTE, K. G. (1982) Optimizing copper spheres for precision calibration of hydroacoustic equipment. *J. Acoust. Soc. Am.*, **71**, 742-747.
- FOOTE, K. G. (1983) Maintaining precision calibrations with optimal copper spheres. *J. Acoust. Soc. Am.*, **73**, 1054-1063.
- FOOTE, K. G. and D. N. MACLENNAN (1984) Comparison of copper and tungsten carbide calibration spheres. *J. Acoust. Soc. Am.*, **75**,

612-616.

- HAMPTON, L. D. and C. M. MAKINNEY (1961)  
Experimental study of the scattering of acoustic  
energy from solid metal spheres in water. *J.*  
*Acoust. Soc. Am.*, **33**, 664-673.
- HICKLING, R. (1962) Analysis of echoes from  
a solid elastic sphere in water. *J. Acoust.*  
*Soc. Am.*, **34**, 1582-1592.
- 宮野鼻洋一・石井 憲・古沢昌彦 (1982) 魚体反射率

測定における同時較正法. 水産工学研究所報告, **3**,  
187-193.

- NEUBAUER, W. G, R. H. VOGT and L. R. DRAGONETTE (1974) Acoustic reflection from elastic spheres. I. Steady-state signals. *J. Acoust. Soc. Am.*, **55**, 1123-1129.
- STENZEL, H. (1939) Leifaden zur Berechnung von Schallvorgängen. P. 104, Julius Springer.