

(昭和 44 年 11 月日本造船学会秋季講演会において講演)

水中超音波のドプラー効果を用いた 船舶の対地速度測定について

正員 水 谷 郁 夫*

On Measurement of Ship's Speed to the Ground by Means of the
Doppler Effect of Underwater Ultrasonics

By Ikuo Mizutani, *Member*

Summary

This paper describes a theoretical and experimental investigation aimed at measuring ship's speed to the ground by means of the Doppler effect of underwater ultrasonics.

Measurable quantity of the Doppler effect of underwater ultrasonics is thought to be influenced by the distribution of flow velocity, temperature, and salinity of the water. According to the computational formula of the aftereffect obtained by theoretical consideration, calculated speed to the ground is fallen within 1% of the real speed to the ground in a numerical example of the aftereffect. It is suggested that the error in calculation of the speed to the ground may be corrected by measuring the Doppler shift frequency in two direction (θ_1 ($0 < \theta_1 < 90^\circ$) and $180^\circ - \theta_1$). An experimental apparatus is introduced in order that output signal of frequency Δf may emerge from input signal of frequency $f_0 + \Delta f$ and $f_0 - \Delta f$. The spectrum of the output signal in the experimental towing tank is analysed by the frequency analyser, and it is shown that it has a steep peak. Error of velocity measurement is, as a result, shown to be $0.97 \leq \frac{\Delta f_{DC}}{\Delta f_T} \leq 1.01$ and $0.97 \leq \frac{\Delta f_{PS}}{\Delta f_T} \leq 1.02$, where Δf_{DC} , Δf_{PS} and Δf_T are the digital counted, the spectral peak, and the theoretical frequency, respectively.

1 緒 言

従来、船の速力試運転には、標柱や電波式対地速度計などが用いられてきている。これらを利用するかぎり、試運転航路の近くに陸地がなければならない。また、水深および水幅が試運転結果に影響をおよぼさないためと、操船に支障をきたさないために、試運転航路の海面は十分広いことが必要である¹⁾。もし、陸地によることなく、対地速度が正確に測定できれば、これは速力試運転のみならず、大型船の港内、狭水路運航、航法、ポジショニング、漁船の運航あるいはその他の海洋開発などに利用されて、益すること大であると思われる^{2)~5)}。

陸地に依存せず、対地速度を測ろうとして注目されたのが、水中超音波の海底に対するドプラー効果を利用する方法である。これは、送波および受波用の振動子を船体に装着し、送波振動子から斜め下の前方または後方に、周波数が高く指向性のある超音波を水中で送波し、それが海底で反射されて戻ってくるのを受波振動子によって受波するものである。船が対地速度を持つていれば、船と海底との間にドプラー効果が生じるはずである。そして、このドプラー効果を観測すれば、対地速度を知ることができるであろう。

このような方法で、対地速度を求めるための周辺の技術には、電波のドプラー効果を用いる航空機の対地速度計に関するもの^{6~11)}、超音波測深器に関するもの^{12~17)}、超音波流量計に関するもの^{18~22)}などがあつて、これらについては、かなり信頼のおける機器が開発されている。超音波のドプラー効果を用いて、船の対地速度を測定する方法の特許は、Constantine Chilowsky が 1920 年代に申請しており、1930 年代終り頃出された電波式ドブ

* 石川島播磨重工業(株)技術研究所

ラー航法装置 (Doppler Radar) の特許よりも早い。それにもかかわらず、この方法の実用化が遅れているのは種々むずかしい問題が多いからであろう。近年になつて開発に着手したのは Raytheon 社であるが、技術の詳細は明らかにされていない²⁸⁻³¹⁾。

本文では、水中超音波のドプラー効果を用いて船の対地速度を測定しようとするとき問題になる、流速、水温、塩分などの分布、超音波の送受波方向などと、対地速度の算定誤差との理論的關係などについて考察を加え、その結果を検証するために行なつた実験結果などについて述べる。

2 対地速度算定式

表面から海底に至るまで、水が静止しているわけではないし、塩分や水温や密度などが一定でもない。したがつて、たとえ船の対地速度が一定であつても、ドプラーシフト周波数は一定値とはならないように思われる。

2ではこのような問題について、簡単な理論的検討を行ない、対地速度算定式を誘導し、上記のような水の物理的性質が対地速度算出におよぼす影響を調べる。

2.1 計算上の仮定

実験には、200 kHz の超音波が用いられたが、その指向性はどの程度か試算する。音波の強度が中心軸上の強度の半分になる方向 γ は、振動子の直径が 8 cm、超音波の周波数が 200 kHz、音速が 1500 m/sec のとき、 $\gamma = 3^\circ 56'$ となる³²⁾。したがつて、この超音波はかなり指向性のある信号であることがわかる。ここでは、問題を簡単化するために、つぎのような仮定を設ける。

まず、水深は一定、海底は平坦であるとする。送波する音波は、広がりがない、1本のビームと考え、ビームが水中で散乱されて (volume reverberation)³³⁾ できる散乱波の受信を無視する。次に、音波の海底入射角あるいはそれに近い方向へ音波が散乱されることを bottom backscattering³⁴⁾ というが、その bottom backscattering のうち、受波器に到達する1本のビームだけに注目する。そして、海面や船体表面における音波の散乱 (surface reverberation)³⁵⁾ によつて受波器に到達する音波を無視する。次に、送波したビームと海底で散乱され受波器に到達するビームは、船の進行方向を含む鉛直平面内にあつて、水の流れはこの面に平行であるとする。なお、船のローリング、ピッチング、ヨーイング、スウェーイングなどの動揺と船体の振動もないものとする。

2.2 ドプラー効果³⁶⁾

波動源に対して相対速度を持つ観測者が測定する波動の周波数は、波源の周波数と異なつたものとなり、波動源から観測者に向う方向を正として、この効果を式で表わすと

$$f_0 = \frac{c + w - v_0}{c + w - v_s} f_s \quad (2.1)$$

となる。ここで、 f_s は波源の周波数、 f_0 は観測者が測定する波の周波数、 c は静止媒質中における波動の位相速度 (音の伝播速度)、 w は媒質の移動速度、 v_s は波源の移動速度、 v_0 は観測者の移動速度である。

2.3 ドプラー効果測定の物理学的基礎

観測されるドプラー効果は (2.1) 式に示したように、音波の伝播速度と媒質の移動速度に依存する。そして、水中の音速は水温、塩分、水深に依存する。したがつて、船の対地速度に対応するドプラー効果は水温、塩分、音波が伝播している所の水面からの距離、流速などに依存するはずである。

ここでは、 c や w が一定であれば (2.1) 式を用いることが許されるであろうということと、航路の水平面に平行ないくつかの仮想の切断面を入れて考えて行くと、やがて2つの切断面にはさまれた中では音速も流速も、近似的には一定とみなしうるということに注目して、 i 番目の切断面と $i+1$ 番目の切断面の中で (2.1) 式を適用する。すなわち、 i 番目の切断面を波源と考え、 $i+1$ 番目の切断面を観測者として (2.1) 式を適用し、次に $i+1$ 番目の切断面を波源、 $i+2$ 番目の切断面を観測者として (2.1) 式を適用し、この手続を送波から受波に到るまでの間で繰り返して行なう。その際、 $i+1$ 番目の切断面における観測周波数はそのまま $i+1$ 番目の切断面の波源としての周波数に一致させていく。 i 番目の切断面と $i+1$ 番目の切断面とはさまれた区間内では、音響学的性質は変らない。しかし、この区間と次の区間とは音響学的性質は異なる。したがつて、このように設定したモデルにおいて、音の屈折はそれぞれの切断面において行なわれなければならない。 i 番目の切断面の音波入射側における流速の速度ベクトルを $\vec{U}_{i-1}$ 、音波の屈折側における流速の速度ベクトルを $\vec{U}_i$ とし、 $\vec{U}_{i-1}$ と $\vec{U}_i$ の

真中の方向 (Fig. 1 に示したように、これを境界線とよぶことにする) から音の屈折方向に測った角度を φ_i とすれば、音の屈折方向は次式によつて決まる³⁷⁾。なお、 $\dot{U}_{i-1}$ と $\dot{U}_i$ はいずれも鉛直面内にあるものとする。

$$\frac{c_i}{\cos \varphi_i} + |\dot{U}_i| = \text{一定} \quad (2.2)$$

ただし、音速 c_i は次式で表わされ^{38,39)}

$$c_i = 1449.2 + 4.623 T_i - 0.0546 T_i^2 + 1.391 (S_i - 35) - 0.0168 y_i \quad (2.3)$$

T_i は温度 ($^{\circ}\text{C}$)、 S_i は塩分 (‰)、 y_i は深さ (m) である。(2.2) 式は、水の流れに乗った音波の伝播速度の境界線方向の成分は境界へ入射する前と後とで変りがない、ということを意味している。

船の対地速度を測定するために、水中で音波の送波と受波を行なうとき、音波が伝播する様子に注目し、送波された音波が地面へ入射するまでの行程に $n-1$ 個の切断面を入れて、この行程を n 層に分け、海底における散乱から、受波に至るまでの行程に $m-1$ 個の切断面を入れて、この行程を m 層に分ける。これを図示したものが Fig. 2 である。この図の中にある記号を次のように約束する。

$\begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \end{pmatrix}$: 音波を(送波)するとき、(送波)面が船の進行方向に動く速度、

$\begin{pmatrix} v_{ohr} \\ v_{ohr} \end{pmatrix}$: 同上の時点に、(送波)面が船の上下方向に動く速度、

$\begin{pmatrix} \theta_1 \\ \theta_{n+m} \end{pmatrix}$: 同上の時点に、音波の(送波)方向と船の進行方向となす角度、

$\begin{pmatrix} f_s \\ f_o \end{pmatrix}$: (送波)振動子が(送波)する音の周波数、

$2 \leq i \leq n+m-1$ として、

v_{bai-1} : $i-1$ 番目の層と i 番目の層の間の音波の屈折点における流速の船の進行方向の成分、

v_{bhi-1} : 同上流速の船のヒービング方向の成分、

θ_i : i 番目の層内の音波伝播方向が水平線となす角度、

$1 \leq i \leq n+m$ として、

c_i : i 番目の層内の水が静止しているとき、その中における音波の伝播速度、

w_i : i 番目の層内における流速の音波伝播方向の成分

2.4 水の物理的性質がドプラー効果の測定におよぼす影響

2.4.1 音波の伝播路が行きと返りとは異なる場合

観測される周波数 f_o は (2.2) 式の条件の下に、次式によつて表わされる。

$$\begin{aligned} f_o = & \frac{c_1 + w_1 - (v_{bai} \cos \theta_1 + v_{bhi} \sin \theta_1)}{c_1 + w_1 - (v_1 \cos \theta_1 + v_{ohr} \sin \theta_1)} \\ & \times \prod_{i=2}^{n-1} \frac{c_i + w_i - (v_{bai} \cos \theta_i + v_{bhi} \sin \theta_i)}{c_i + w_i - (v_{bai-1} \cos \theta_i + v_{bhi-1} \sin \theta_i)} \\ & \times \frac{c_n + w_n}{c_n + w_n - (v_{ban-1} \cos \theta_n + v_{bhn-1} \sin \theta_n)} \\ & \times \frac{c_{n+1} - w_{n+1} + (v_{ban} \cos \theta_{n+1} + v_{bhn} \sin \theta_{n+1})}{c_{n+1} - w_{n+1}} \\ & \times \prod_{i=n+2}^{n+m-1} \frac{c_i - w_i + (v_{bai-1} \cos \theta_i + v_{bhi-1} \sin \theta_i)}{c_i - w_i + (v_{bai-2} \cos \theta_i + v_{bhi-2} \sin \theta_i)} \\ & \times \frac{c_{n+m} - w_{n+m} + (v_2 \cos \theta_{n+m} + v_{ohr} \sin \theta_{n+m})}{c_{n+m} - w_{n+m} + (v_{ban+m-2} \cos \theta_{n+m} + v_{bhn+m-2} \sin \theta_{n+m})} \end{aligned}$$

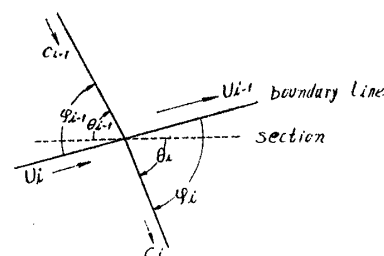


Fig. 1 Refraction of sound ray

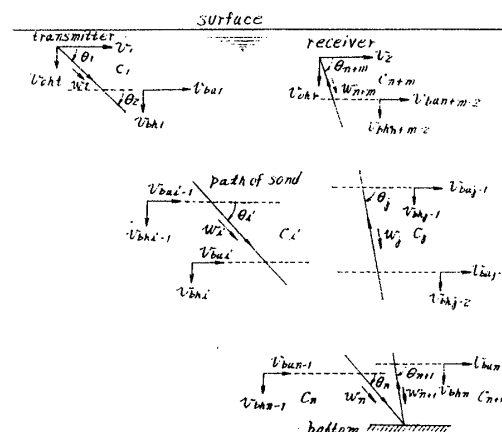


Fig. 2 Schematic view of theoretical model of the Propagating sound ray

$$\times f_s \quad (2.4)$$

ただし、 c_i と w_i とは $1 \leq i \leq n$ のとき、音の伝播方向を正、 $n+1 \leq i \leq n+m$ においては音の伝播方向を負にするように符号を取るものとする。したがって、 $w_i (1 \leq i \leq n+m)$ は矢印のような方向に流れているとき正、矢印と反対方向に流れているとき負の値となる。屈折点における水の水速は Fig. 3 の中に示したように、船の進行方向および海底に向う鉛直下方を正とした。(2.2), (2.3), (2.4) 式から、水中における種々の物理的性質が船の対地速度によつて生ずるドプラー効果の測定におよぼす影響を知ることができる。

いま、(2.4) 式を形式的に $f_0 = \prod_{i=1}^{n+m} \frac{c_i + w_i + v_i \cos \theta_i + v_i^* \sin \theta_i}{c_i + w_i + v_{i-1} \cos \theta_i + v_{i-1}^* \sin \theta_i} f_s$ と書くと、

$$\left. \begin{aligned} \frac{df_0}{f_0} &= \frac{df_s}{f_0} + \sum_{i=1}^{n+m} \frac{c_i + w_i + v_{i-1} \cos \theta_i + v_{i-1}^* \sin \theta_i}{c_i + w_i + v_i \cos \theta_i + v_i^* \sin \theta_i} \\ &\quad \times \{ \alpha (dc_i + dw_i) + \beta dv_{i-1} + r dv_i + \delta dv_{i-1}^* + \varepsilon \cdot dv_i^* + \zeta \cdot d\theta_i \} \\ \alpha &= \frac{(v_{i-1} - v_i) \cos \theta_i + (v_{i-1}^* - v_i^*) \sin \theta_i}{(c_i + w_i + v_{i-1} \cos \theta_i + v_{i-1}^* \sin \theta_i)^2} \\ \beta &= \frac{-\cos \theta_i (c_i + w_i + v_i \cos \theta_i + v_i^* \sin \theta_i)}{(c_i + w_i + v_{i-1} \cos \theta_i + v_{i-1}^* \sin \theta_i)^2} \\ r &= \frac{\cos \theta_i (c_i + w_i + v_{i-1} \cos \theta_i + v_{i-1}^* \sin \theta_i)}{(c_i + w_i + v_{i-1} \cos \theta_i + v_{i-1}^* \sin \theta_i)^2} \\ \delta &= \frac{\sin \theta_i (c_i + w_i + v_i \cos \theta_i + v_i^* \sin \theta_i)}{(c_i + w_i + v_{i-1} \cos \theta_i + v_{i-1}^* \sin \theta_i)^2} \\ \varepsilon &= \frac{\sin \theta_i (c_i + w_i + v_{i-1} \cos \theta_i + v_{i-1}^* \sin \theta_i)}{(c_i + w_i + v_{i-1} \cos \theta_i + v_{i-1}^* \sin \theta_i)^2} \\ \zeta &= \frac{1}{(c_i + w_i + v_{i-1} \cos \theta_i + v_{i-1}^* \sin \theta_i)^2} \\ &\quad \times \{ (v_i^* \cos \theta_i - v_i \sin \theta_i) (c_i + w_i + v_{i-1} \cos \theta_i + v_{i-1}^* \sin \theta_i) \\ &\quad - (v_{i-1}^* \cos \theta_i - v_{i-1} \sin \theta_i) (c_i + w_i + v_i \cos \theta_i + v_i^* \sin \theta_i) \} \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

となる。 c_i が km/sec のオーダーの数であり、 $v_i, v_{i-1}, v_i^*, v_{i-1}^*$ などが m/sec のオーダーの数値であるので、 $\alpha \cdot dw_i$ は $\alpha \cdot dc_i, \beta dv_{i-1}, r \cdot dv_i, \delta \cdot dv_{i-1}^*, \varepsilon \cdot dv_i^*, \zeta \cdot d\theta_i$ などに比べて小さいと考えられる。これは音の伝播方向に沿った流速が多少変化しても、切断面上の水の水速や音線の屈折角が変化することによつて変わる $\frac{df_0}{f_0}$ に比べれば、その影響は小さいということを意味している。

受信されるのは f_0 の周波数の信号であるが、ドプラー効果によつて生ずる周波数の差（ドプラーシフト周波数）は $f_0 - f_s (\equiv \Delta f)$ である。

ここで、

$$\begin{pmatrix} v_{br} \\ v_{1t} \\ v_{2r} \\ v_{bt} \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} v_{ba1} \cos \theta_1 + v_{bh1} \sin \theta_1 \\ v_1 \cos \theta_1 + v_{0ht} \sin \theta_1 \\ v_2 \cos \theta_{n+m} + v_{0hr} \sin \theta_{n+m} \\ v_{ban+m-2} \cos \theta_{n+m} + v_{bhn+m-2} \sin \theta_{n+m} \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

$$\begin{aligned} N &\equiv \frac{c_{n+1} + w_{n+1}}{c_{n+1} - w_{n+1}} \frac{c_{n+1} - w_{n+1} + v_{ban} \cos \theta_{n+1} + v_{bhn} \sin \theta_{n+1}}{c_n + w_n - (v_{ban-1} \cos \theta_n + v_{bhn-1} \sin \theta_n)} \\ &\quad \times \prod_{i=2}^{n-1} \frac{c_i + w_i - (v_{bai} \cos \theta_i + v_{bhi} \sin \theta_i)}{c_i + w_i - (v_{bai-1} \cos \theta_i + v_{bhi-1} \sin \theta_i)} \\ &\quad \times \prod_{i=n+2}^{n+m-1} \frac{c_i - w_i + v_{bai-1} \cos \theta_i + v_{bhi-1} \sin \theta_i}{c_i - w_i + v_{bai-2} \cos \theta_i + v_{bhi-2} \sin \theta_i} \end{aligned} \quad (2.7)$$

とおくと、(2.4) 式は次のように変形される。

$$\Delta f = f_s \left\{ \frac{(c_1 + w_1 + v_{br})(c_{n+m} - w_{n+m} + v_{2r})}{(c_1 + w_1 - v_{1t})(c_{n+m} - w_{n+m} + v_{bt})} N - 1 \right\} \quad (2.8)$$

船の対地速度 v_1, v_2 、音波の送受波角度 θ_1, θ_{n+m} が一定のとき、いかなる航路を行つても、この Δf が一定となれば都合がよいのであるが、海の状態は一様でないので、(2.8) 式の $\{ \}$ 内が一定になることは極めて例外の場合を除いて無理にちがいない。また、さまざまに変化する海の状態に応じて、 Δf が一定になるように送波周波数 f_s を調整することができればよいのであるが、それには、海の中の様子が表面から海底に至るまでわかっていなければ、むずかしい。したがって、量の大小は別としても、ドプラーシフト周波数 Δf の計測値が海水の状態によつて変動することは避けられないであろう。

2.4.2 同じ伝播路を音波が往復する場合

船が水深の浅い所を航走したり、水深の深い所を低速で航走するような場合には、音波はほぼ同じ経路を往復したかのように見えるであろう。このとき、便宜的に

$$\left. \begin{aligned} n &= m \\ v_2 &= -v_1 \\ v_{0hr} &= -v_{0ht} \\ w_i &= -w_{2n-i+1} \quad (n+1 \leq i \leq 2n) \\ c_i &= -c_{2n-i+1} \quad (n+1 \leq i \leq 2n) \\ \theta_i &= \theta_{2n-i+1} \quad (n+1 \leq i \leq 2n) \\ v_{bai} &= -v_{ba2n-i-1} \quad (n \leq i \leq 2n-2) \\ v_{bhi} &= -v_{bh2n-i-1} \quad (n \leq i \leq 2n-2) \end{aligned} \right\} \quad (2.9)$$

とすることができて、(2.4) 式を次のように書き直すことができる。

$$\begin{aligned} f_0 &= \frac{c_1 + w_1 - (v_{ba1} \cos \theta_1 + v_{bh1} \sin \theta_1)}{c_1 + w_1 - (v_1 \cos \theta_1 + v_{0ht} \sin \theta_1)} \cdot \frac{c_1 - w_1 + v_1 \cos \theta_1 + v_{0ht} \sin \theta_1}{c_1 - w_1 + v_{ba1} \cos \theta_1 + v_{bh1} \sin \theta_1} \\ &\times \frac{c_n + w_n}{c_n - w_n} \cdot \frac{c_n - w_n + v_{ban-1} \cos \theta_n + v_{bhn-1} \sin \theta_n}{c_n + w_n - (v_{ban-1} \cos \theta_n + v_{bhn-1} \sin \theta_n)} \\ &\times \prod_{i=2}^{n-1} \left\{ \frac{c_i + w_i - (v_{bai} \cos \theta_i + v_{bhi} \sin \theta_i)}{c_i + w_i - (v_{bai-1} \cos \theta_i + v_{bhi-1} \sin \theta_i)} \cdot \frac{c_i - w_i + v_{bai-1} \cos \theta_i + v_{bhi-1} \sin \theta_i}{c_i - w_i + v_{bai} \cos \theta_i + v_{bhi} \sin \theta_i} \right\} f_s \quad (2.10) \end{aligned}$$

ここで、 N を次のように置くと、

$$\begin{aligned} N &\equiv \frac{c_n + w_n}{c_n - w_n} \cdot \frac{c_n - w_n + v_{ban-1} \cos \theta_n + v_{bhn-1} \sin \theta_n}{c_n + w_n - (v_{ban-1} \cos \theta_n + v_{bhn-1} \sin \theta_n)} \\ &\times \prod_{i=2}^{n-1} \frac{c_i + w_i - (v_{bai} \cos \theta_i + v_{bhi} \sin \theta_i)}{c_i + w_i - (v_{bai-1} \cos \theta_i + v_{bhi-1} \sin \theta_i)} \cdot \frac{c_i - w_i + v_{bai-1} \cos \theta_i + v_{bhi-1} \sin \theta_i}{c_i - w_i + v_{bai} \cos \theta_i + v_{bhi} \sin \theta_i} \quad (2.11) \end{aligned}$$

$$f_0 = N \times \frac{c_1 + w_1 - (v_{ba1} \cos \theta_1 + v_{bh1} \sin \theta_1)}{c_1 + w_1 - (v_1 \cos \theta_1 + v_{0ht} \sin \theta_1)} \times \frac{c_1 - w_1 + v_1 \cos \theta_1 + v_{0ht} \sin \theta_1}{c_1 - w_1 + v_{ba1} \cos \theta_1 + v_{bh1} \sin \theta_1} \times f_s \quad (2.12)$$

したがって、

$$\begin{pmatrix} v_{b1} \\ v_1' \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} v_{ba1} \cos \theta_1 + v_{bh1} \sin \theta_1 \\ v_1 \cos \theta_1 + v_{0ht} \sin \theta_1 \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

とおくならば、ドブラーシフト周波数 Δf は次のようになる。

$$\Delta f = f_s \left\{ \frac{(c_1 + w_1 - v_{b1})(c_1 - w_1 - v_1')}{(c_1 + w_1 - v_1')(c_1 - w_1 + v_{b1})} N - 1 \right\} \quad (2.14)$$

2.5 対地速度算定式

音波伝播経路の水の性質がドブラーシフト周波数におよぼす影響は(2.8) 式あるいは(2.14) 式によつて表わされるとしても、観測できるのは、送受波器近くの水の温度、塩分、それに送波周波数と送受波方向を示す角およびドブラー周波数だけであるので、(2.8) 式あるいは(2.14) 式から対地速度を求きことはできない。そこで、(2.14) 式を簡単化することを考えてみる。

w_n は海底に最も近い層の流速の音波入射方向の成分であるので、 $w_n \equiv 0$ としても良いであろう。そしてこの層が地面に十分近いことから、 $v_{ban-1} = v_{bhn-1} \equiv 0$ とすると、(2.11) 式は次のようになる。

$$N = \prod_{i=2}^{n-1} \frac{c_i + w_i - (v_{bai} \cos \theta_i + v_{bhi} \sin \theta_i)}{c_i + w_i - (v_{bai-1} \cos \theta_i + v_{bhi-1} \sin \theta_i)} \cdot \frac{c_i - w_i + v_{bai-1} \cos \theta_i + v_{bhi-1} \sin \theta_i}{c_i - w_i + v_{bai} \cos \theta_i + v_{bhi} \sin \theta_i} \quad (2.15)$$

1 つの層から次の層へ移るとき、 w_i および(2.2) 式の $|\dot{U}_i|$ が i の変化と共にゆるやかに変化し、 $v_{bai} \equiv v_{bai-1}$ かつ $v_{bhi} \equiv v_{bhi-1}$ であるとする。また、 w_i や v_{bai} そして v_{bhi} などが c_i に比べて小さいので、(2.15) 式の N はほぼ 1 に近い数であるとなすことができる。こうして(2.14) 式を次のようにかくことにする。

$$\frac{\Delta f}{f_s} = \frac{(c_1 + w_1 - v_{b1})(c_1 - w_1 + v_1')}{(c_1 + w_1 - v_1')(c_1 - w_1 + v_{b1})} - 1 \quad (2.16)$$

(2.16) 式の右辺は $\frac{2c_1(v_1' - v_{b1})}{c_1^2 + c_1(v_{b1} - v_1') + (w_1 - v_1')(v_{b1} - w_1)}$ となる。この分母の第 2 項と第 3 項とを第 1 項の c_1^2 に比べて小さいとして略すと、 $\frac{2(v_1' - v_{b1})}{c_1}$ となる。これに(2.13) 式を代入して書き直すと、次のようになる。

$$\frac{\Delta f}{f_s} = \frac{2(v_1 \cos \theta_1 + v_{0ht} \sin \theta_1 - v_{ba1} \cos \theta_1 - v_{bh1} \sin \theta_1)}{c_1} \quad (2.17)$$

このように簡便化した (2.17) 式によれば、切断面上にある水の速度 v_{ba1} (進行方向) と v_{bh1} (上下方向) とは船の速度 v_1 (進行方向) と v_{0ht} (上下方向) などと同じ重みで、ドプラーシフト周波数に影響することを示しているが、 Δf が (2.17) 式で表わされるとき、忘れることができないのは、(2.15) 式に始まる簡便化という過程が含まれていることである。 v_{ba1} や v_{bh1} は観測困難であるので、静水における値として、 $v_{ba1}=0$, $v_{bh1}=0$ を採用すると、(2.17) 式は次のようになる。

$$\frac{\Delta f}{f_s} = \frac{2(v_1 \cos \theta_1 + v_{0ht} \sin \theta_1)}{c_1} \quad (2.18)$$

(2.18) 式右辺の分子の () 内は送受波器の速度の音波送受波方向の成分を示している。したがって、 z 軸を鉛直下方、 x, y 軸を水平面内に持つ船に原点を固定した座標系において、超音波の送受波方向が極座標表示で (θ_i, φ_i) 方向であるとすれば、船の x 方向、 y 方向、 z の速度がそれぞれ、 v_x, v_y, v_z のとき、ドプラーシフト周波数とこれらの数値との間に次のような関係が考えられる。

$$\frac{\Delta f}{f_s} = \frac{2(v_x \sin \theta_i \cos \varphi_i + v_y \sin \theta_i \sin \varphi_i + v_z \cos \theta_i)}{c_1} \quad (2.19)$$

当然、 $\varphi_i=0$, $\theta_i=90-\theta_1$, $v_x=v_1$, $v_z=v_{0ht}$ とおけば、(2.19) 式は (2.18) 式となる。

ドプラーレーダーでは (2.18) 式に相当する次の式がすでによく知られている⁹⁾。

$$\frac{\Delta f}{f_s} = \frac{2v \cos \theta}{c}, \quad \text{ここに } c \text{ は電波の速度} \quad (2.20)$$

2.6 対地速度の算定式の誤差

ドプラーシフト周波数におよぼす水の物理的性質の影響は (2.8) 式あるいは (2.14) 式によつて表わされることが考えられるが、このドプラーシフト周波数を計測し、(2.19) 式あるいは (2.18) 式によつて対地速度を算出すれば、誤差はどの位であろうか。(2.19) 式を除いて、すべて 2 次元的に取り扱ってきたので、以後も 2 次元の場合について考察する。

実測される Δf は (2.8) 式あるいは (2.14) 式によつて表わされるであろうから、その Δf を (2.18) 式に入れて算出する対地速度を v_1^* とするならば、

$$v_1^* = \frac{c_1}{2 \cos \theta_1} \left(\frac{\Delta f}{f_s} - \frac{2 v_{0ht} \sin \theta}{c_1} \right) \quad (2.21)$$

となる。ただし、右辺の量はすべてわかっているものとする。今、真の対地速度を v_1 として、

$$E = \frac{v_1^*}{v_1} - 1 \quad (2.22)$$

を作ると、これは水の物理的性質が対地速度 v_1^* の算出にどのような影響をおよぼしているかという誤差を示すものとなり、これから対地速度算定式の妥当性を判断することができよう。

2.7 対地速度算出誤差の数値計算例

超音波の送受波面と海底との間に 1 つだけの切断面を入れる場合の数値計算を行なつてみた。その結果の一部を説明する。

塩分は一定で、温度は表層と下層とに分かれ、表層には流れ w_1 があるが、下層には流れがないとし、 $v_{bh1}=0$, $v_{ba1}=\frac{1}{2}\left(\frac{w_1}{\cos \theta_1}\right)$ という場合を考える。この時、(2.11) 式に相当する N は $N=\frac{c_2+v_{ba1} \cos \theta_2}{c_2-v_{ba1} \cos \theta_2}$ となる。

考察が容易であるので、 $\theta_i=\varphi_i$ とすると、 θ_2 を決める式は (2.2) 式より $\frac{c_2}{\cos \theta_2}=\frac{c_1}{\cos \theta_1}+2 v_{ba1}$ となる。これらと、(2.13), (2.14), (2.21), (2.22) 式を用いると、 E の計算ができる (v_{0ht} は 0 とする)。

$(T_1, T_2, Z_1, Z_2, S_1(=S_2))=(21^\circ\text{C}, 18^\circ\text{C}, 0\text{ m}, 10\text{ m}, 35\text{‰})$, $0.1 \leq v_{ba1} \leq 2.5 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$ として行なつた数値計算によれば、 $|E|$ は 10^{-2} 以下であつた。Fig. 3 は数値計算結果の 1 例で、 $v_{ba1}=0.1 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$ におけるものを示す。

したがって、水の物理的性質が異なることに起因する Δf 変動量は $\pm 1\%$ 以内であり、(2.18) 式による対地速度の算出は、この場合、 $\pm 1\%$ 以内の誤差範囲内で許されると思われる。

(2.17) 式の分子には、 v_{ba1} と v_{bh1} とが同じ重みで入っているが、この数値計算結果によれば、 v_{ba1} はほとんど Δf に影響しないことを示している。これは、 Δf が (2.17) 式だけによつて表わされるということと矛盾す

るという意味を示すのではなく、2.6でも述べたように、(2.15)式に始まる簡単化も合わせて考えられるべきなのであつて、(2.17)式は(2.18)式を誘導するための便宜的1段階にすぎなかつたということを忘れてはならない。

Fig. 3によれば、 $\theta = \theta_1$ と $\theta = 180 - \theta_1$ においては、 $E_{\theta = \theta_1} = -E_{\theta = 180 - \theta_1}$ となつていて、 $\theta = \theta_1$ 方向の Δf を Δf_{θ_1} 、 $\theta = 180 - \theta_1$ 方向の Δf を $\Delta f_{\theta_1}'$ とすれば、 Δf_{θ_1} と $\Delta f_{\theta_1}'$ を測定し、(2.21)式の代りに次式を用いれば、

$$v_1' = \frac{c_1}{2 \cos \theta_1} \left(\frac{\Delta f_{\theta_1} + \Delta f_{\theta_1}'}{2 f_s} - \frac{2 v_{0ht} \sin \theta_1}{c_1} \right) \quad (2.23)$$

より正確な対地速度が算出できそうである。

3 船型試験水槽における実験

航空機のドプラーレーダーの信号の方式には、Pulse system, Pure continuous wave system, Frequency modulation continuous wave system などがあり⁶⁾、変形を考えるならば、この他にも色々できると思われるが、ここでは、Pure continuous wave systemを採用することにした。本来、船は港湾内とか外洋において対地速度を知りたいのであるが、条件が厳しいので、海上で計測を行なうことは少しむずかしい。しかし、船型試験水槽では、海に比べて、はるかに実験が行ない易く、条件も簡単化されている。その実験結果を述べる。

3.1 実験方法

つぎに説明するような実験装置を船型試験水槽の曳引電車に乗せ、Fig. 4に示すように超音波を送波し、水槽の底からの散乱波からドプラーシフト信号を検出した。Fig. 5は実験の様子、Fig. 6は実験中に撮つた水中の振動子の写真である。陰極線オシロスコープでドプラーシフト信号を観察したところ、50 mの走行中、時間間隔 0.5 sec 以下くらいで1～2回振幅が小さくなることがあつたが、それを除くと、比較的正弦波に近い波形であつた。Fig. 7はその波形の1例である。この正弦状波形は対地速度が大きいと波が密になり、遅いと粗になつた。そこで、振動子を水面から0.3 m沈め、音波の送受波角度と対地速度とを色々変えてドプラーシフト

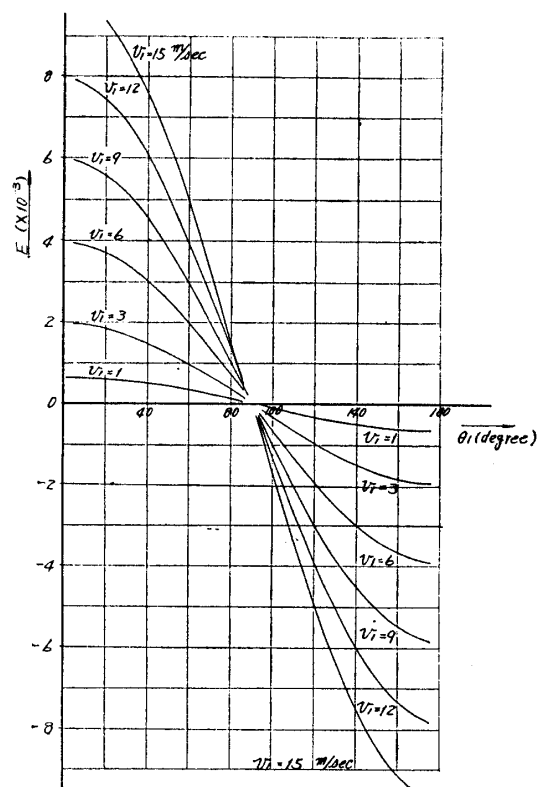


Fig. 3 Error in calculating of the speed to the ground

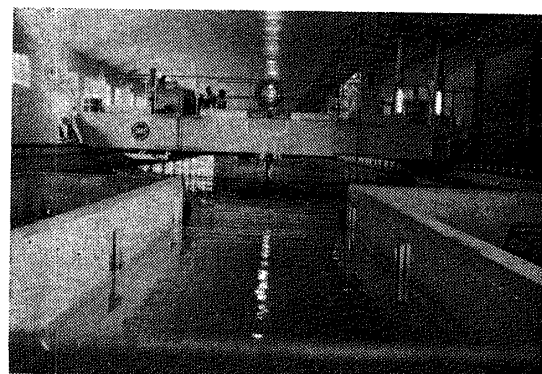


Fig. 5 Experiment in towing tank

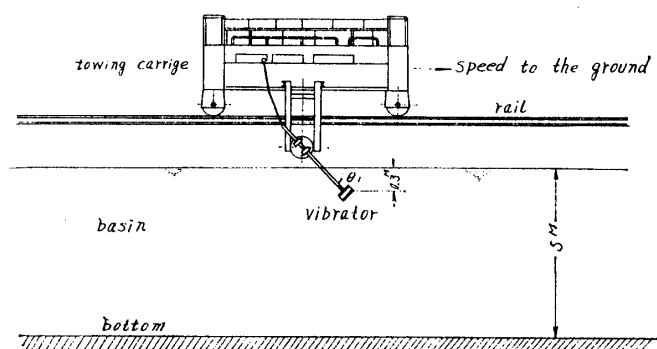


Fig. 4 Experimental profile



Fig. 6 Transducer in experiment

信号を観測した。観測は、その場でデジタル的に波の数を数える方法と、そのドブラーシフト信号を磁気テープに記録し、後でその記録を再生し、周波数分析する方法の2方法によった。

3.2 実験装置

3.2.1 船型試験水槽と曳引電車⁴⁰⁾ 船型試験水槽の主要寸法は長さ 100 m, 幅 10 m, 深さ 5.4 m であり, 実験を行なつたときの水深は 5 m, 水槽の底はなめらかなコンクリートである。Fig. 8 は水槽の略図を示す。実験装置を積み込んで対地速度を与える曳引電車は 0.3~50 m/sec の範囲の速度調整能力をもつので, 実験には 0.5~5.0 m/sec の速度を用いた。

3.2.2 超音波の送受信回路

魚群探知機に使用されている周波数はだいたい 10 数 kHz から 200 kHz におよんでいるようであるが, 低い周波数をもつ超音波では指向性の点で不利である。ここでは, 魚探としては周波数が高い 200 kHz の超音波を用いることにした。電気回路は 100 kHz の発振および周波数倍

器, 電力増幅器などからなる部分 (Fig. 9) とオートマチックゲインコントロールをきかせたスーパーヘテロダイン受信を行なう部分 (Fig. 10) とからなる。

3.2.2.1 受信回路の入出力特性 受信信号からドブラーシフト信号を取りだすと, 海面下の状況の不規則さのために, $4f$ 信号の振幅も不規則に変動するはずである。その変動を緩和するため, 本回路にはオートマチックゲインコントロールを施こした。この性能をチェックするために, 200 kHz 近くの周波数の種々の大きさの振幅をもつ入力信号に対する, ドブラーシフト信号の大きさを, 陰極線オシロスコープによつて測定した。(Fig. 11) 図は平坦な所が広いほど, 性能がよいことを示す。

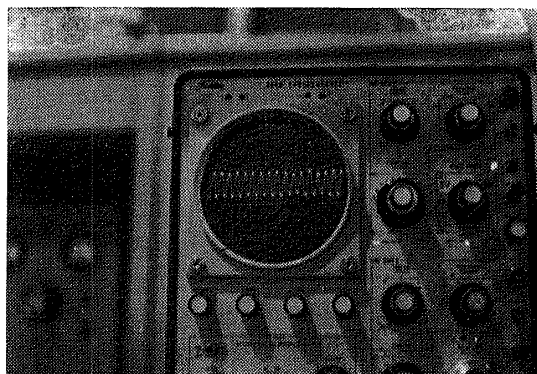


Fig. 7 An example of Doppler shift signal

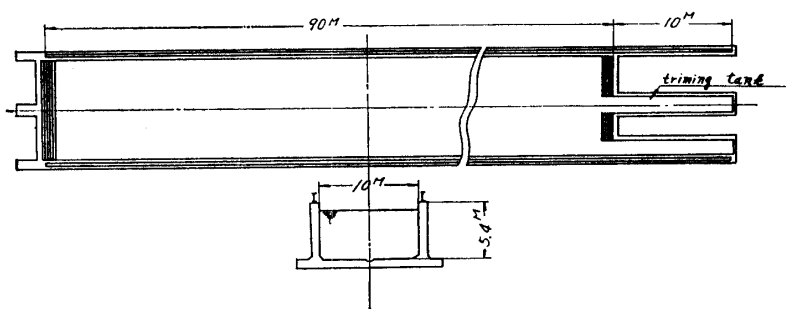


Fig. 8 Dimension of experimental towing tank

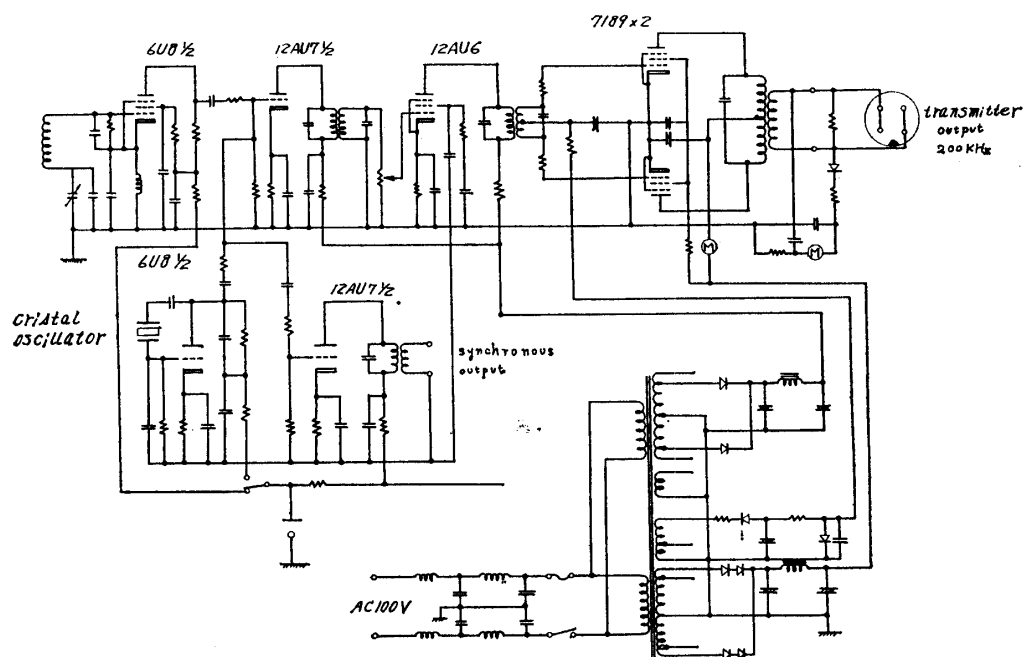


Fig. 9 200 kHz Oscillator

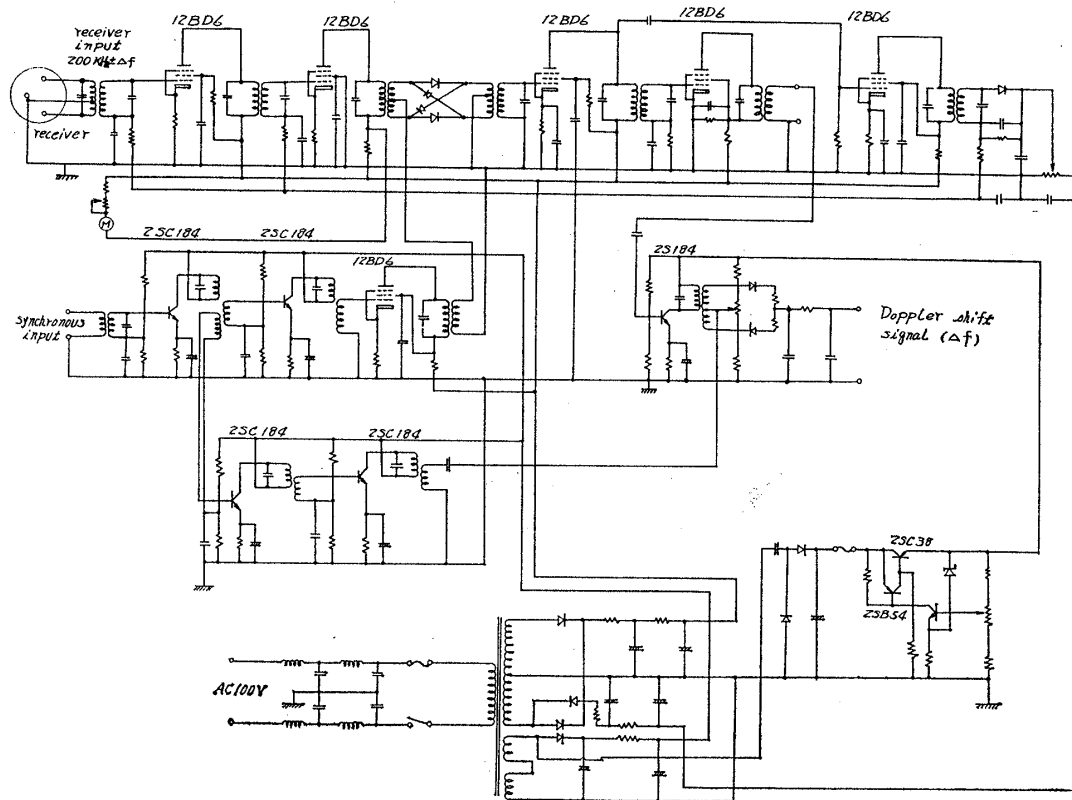


Fig. 10 Superheterodyne receiver

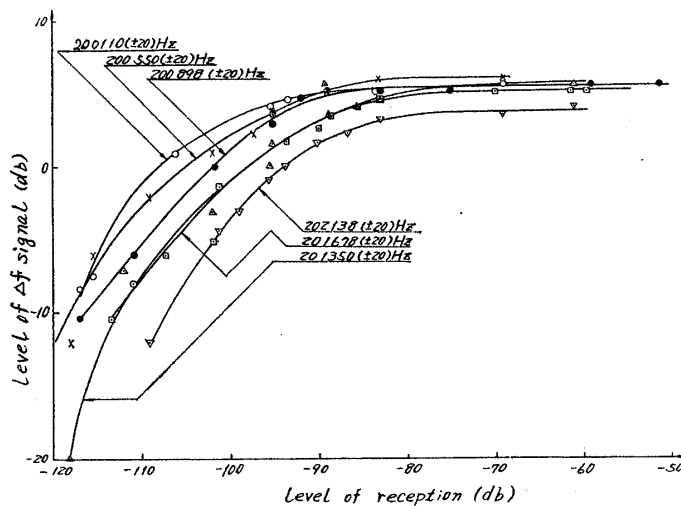


Fig. 11 Input output characteristic

3.2.2.2 送受信回路の信号解析 Δf 信号を測定するために用いた実験装置の系をブロックダイアグラムで表わすと Fig. 12 のようになる。

この図で、①の出力である発信信号電圧 E_0 を

$$E_0 = e_0 \cos(\omega_0 t + \theta_0) \quad (3.1)$$

とし、⑥によつて、種々の周波数成分からなる受信波が電気信号に変換された電圧 E_1 を

$$E_1 = \sum_{n=1}^{N_1} e_{n1} \cos[(I\omega_0 + \Delta\omega_{n1})t + \theta_{n1}] \quad (3.2)$$

として、どのような形で、⑭の出力電圧 E_s が出されるように意図されているか説明する。

発信信号の周波数が J 倍された⑧の出力電圧 E_0' は

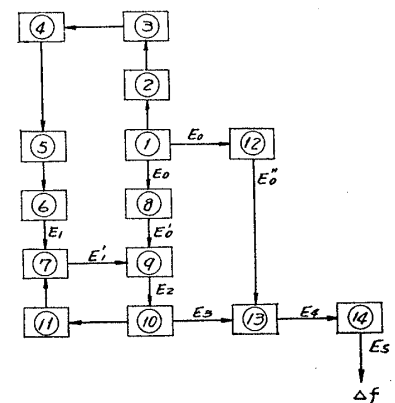


Fig. 12 Block diagram

① Oscillator, ② Frequency multiplier, ③ Power amplifier, ④ Electro-acoustic transducer (Transmitter), ⑤ Sea bottom, ⑥ Transducer (receiver), ⑦ Voltage amplifier, ⑧ Frequency multiplier, ⑨ Modulator, ⑩ Tuning circuit, ⑪ Automatic gain control, ⑫ Frequency multiplier, ⑬ Modulator, ⑭ Low pass filter.

$$E_0' = e_0' \cos(J \cdot \omega_0 t + \theta_0') \quad (3.3)$$

であり、周波数に対して一様な増幅度をもつた増幅器によつて E_1 を増幅した後の⑦の出力電圧 E_1' は a_1 を増幅定数として、

$$E_1' = a_1 \sum_{n1=1}^{N1} e_{n1} \cos[(I\omega_0 + \Delta\omega_{n1})t + \theta_{n1}'] \quad (3.4)$$

と表わせる。

E_0' と E_1' は変調度 α の変調回路によつて E_2 となる。

$$E_2 = a_2 \left\{ \cos(J \cdot \omega_0 t + \theta_0'') + \alpha \cos(J \cdot \omega_0 t + \theta_0''') \sum_{n1=1}^{N1} e_{n1} \cos[(I\omega_0 + \Delta\omega_{n1})t + \theta_{n1}'] \right\} \quad (3.5)$$

これを次のように書き直しておく。

$$E_2 = a_2 \left\{ \cos(J \cdot \omega_0 t + \theta_0'') + \frac{\alpha}{2} \sum_{n1=1}^{N1} [\cos\{[(I-J)\omega_0 + \Delta\omega_{n1}]t + \theta_{n1}'' - \theta_0'''\} + \cos\{[(I+J)\omega_0 + \Delta\omega_{n1}]t + \theta_{n1}'' + \theta_0'''\}] \right\} \quad (3.6)$$

同調後の増幅度が周波数に依存しないとすれば、⑩の出力電圧は

$$E_3 = a_3 \sum_{n1=1}^{N1} e_{n1} \cos\{[(I+J)\omega_0 + \Delta\omega_{n1}]t + \theta_{n1}^{(3)}\} \quad (3.7)$$

となる。ただし、オートマティックゲインコントロールを a_3 に考慮するものとする。

倍率 $(I+J)$ の周波数で倍器⑫では

$$E_0'' = e_0'' \cos\{(I+J)\omega_0 + \theta_0^{(4)}\} \quad (3.8)$$

が作られ、これと E_3 とから変調度 β の変調回路⑬の出力には、

$$E_4 = a_4 \left\{ \cos\{(I+J)\omega_0 + \theta_0^{(4)}\} + \beta \cos\{(I+J)\omega_0 + \theta_0^{(6)}\} \sum_{n1=1}^{N1} e_{n1} \cos\{[(I+J)\omega_0 + \Delta\omega_{n1}]t + \theta_{n1}^{(4)}\} \right\} \quad (3.9)$$

が得られるが、これは次のように書き直すことができる。

$$E_4 = a_4 \left\{ \cos\{(I+J)\omega_0 + \theta_0^{(6)}\} + \beta \sum_{n1=1}^{N1} e_{n1} [\cos(\Delta\omega_{n1}t + \theta_{n1}^{(4)} - \theta_0^{(6)}) + \cos(\Delta\omega_{n1} + \overline{I+J} \cdot \omega_0)t + \theta_{n1}^{(4)} + \theta_0^{(6)}] \right\} \quad (3.10)$$

そして⑭において、 $(I+J)\omega_0$ 、 $\Delta\omega_{n1} + \overline{I+J} \cdot \omega_0$ などの高周波成分を切り落とすことにより、 E_5 の表式は次のようになる。

$$E_5 = a_5 \sum_{n1=1}^{N1} e_{n1} \cos(\Delta\omega_{n1}t + \theta_{n1}^{(7)}) \quad (3.11)$$

送受波器を進行方向へ向けて航走するときは $\Delta\omega_{n1} > 0$ であるが、送受波器を後方へ向けて航走すると、 $\Delta\omega_{n1} < 0$ となる。 $\Delta\omega_{n1} < 0$ のとき、(3.11) 式は

$$E_5 = a_5 \sum_{n1=1}^{N1} e_{n1} \cos(|\Delta\omega_{n1}|t - \theta_{n1}^{(7)}) \quad (3.12)$$

であるから、 E_5 を構成する信号の周波数は $\Delta\omega_{n1} > 0$ の場合と変わらない。また、(3.2) 式の E_1 を構成していた三角関数の係数 e_{n1} は (3.11)、(3.12) 式の Δf 信号 E_5 にそのまま伝えられるので、受波音波を電気信号に変換したところの信号スペクトル形状はドプラーシフトスペクトル形状と相似になるように出来ている。

3.2.3 送受波振動子 振動子の型式には、磁歪型のものと、電歪型のもの（または圧電型）とがあつて、周波数が低い所では磁歪、高い所では電歪型のものが用いられている⁴¹⁾。200 kHz の超音波を利用するために、本装置では、電歪型に属する Langevin 式チタン酸バリウム磁器振動子が採用された。送受波用振動子の直径は 60 mm のものと 80 mm のものと

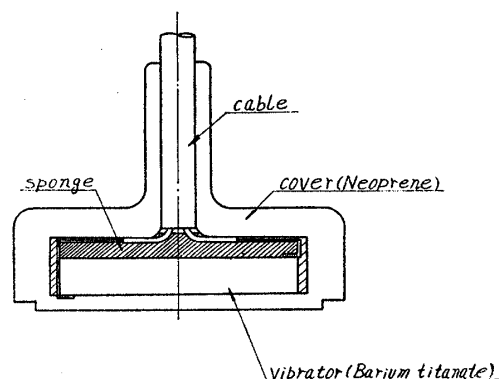


Fig. 13 Schematic representation of transducer

が 50 kHz や 160 kHz の超音波によく用いられている。直径は大きい方が指向性が大きいので、ここでは直径 80 mm の振動子が選ばれた。Fig. 13 はこの振動子の断面図である。送波と受波用に同じ型式の振動子が用いられ、それらは左右に平行に並べられた。bottom backscattering の受信は、この間隔が近いほど有効に行なわれるが、2つの振動子が近すぎると、送波器の音波が直接受波器の方へ回り込むようなことが起るであろうと思ひ、適当にあけた2振動子の間に、音波の遮へい板を入れられるような用意をしたが、実験の結果、遮へい板を用いる必要はなかつた。Fig. 14 は送受波振動子収納体の図である。

3.3 測定結果

水槽の温度分布は実験時間中ほとんど変わらないことが予想されたので、1日1回測定することにした。Fig. 15 はその1例である。

$\theta_1=15^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 69.5^\circ, 110.5^\circ, 120^\circ, 130^\circ, 140^\circ, 150^\circ, 165^\circ, v_1=0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$ において、ドブラーシフト信号が計測された。 $15^\circ \leq \theta_1 \leq 110.5^\circ$ の範囲では問題ないようであつたが、 $120^\circ \leq \theta_1 \leq 165^\circ$ では送受波振動子の前面に気泡が現われ、音波の送信と受信が妨げられていた。このとき、デジタルカウンターはドブラーシフト信号を計数して、計算値より 20~50% 低い値を示した。

気泡が問題にならないとき、デジタル的に計数されると共に、ドブラーシフト信号は周波数分析され、スペクトルのピークを示す周波数が探された。Fig. 16 はスペクトルの1例である。

$15^\circ \leq \theta_1 \leq 110.5^\circ$ の範囲では (2.3), (2.18) 式による計算値とドブラーシフト周波数の計測値との一致の程度はほとんど同じであつたので、その一部分を Table 1 にまとめた。表中、水槽表面の流速の計測は翼車式流速計によつてゐる。2の数値計算結果では $4f$ の計算値と計測値とのちがいは高々 1% であつたにもかかわらず、Table 1 ではむしろそれ以上の誤差を示すものの方が多い。これは、ドブラーシフト信号の波形が時々くずれたためであろう。

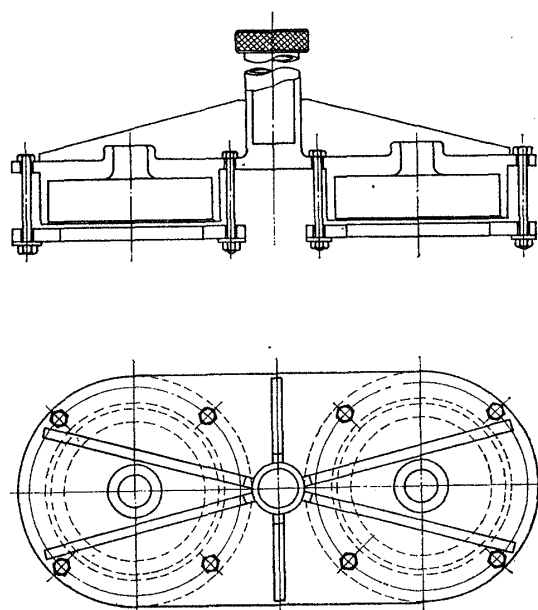


Fig. 14 Case of transduce

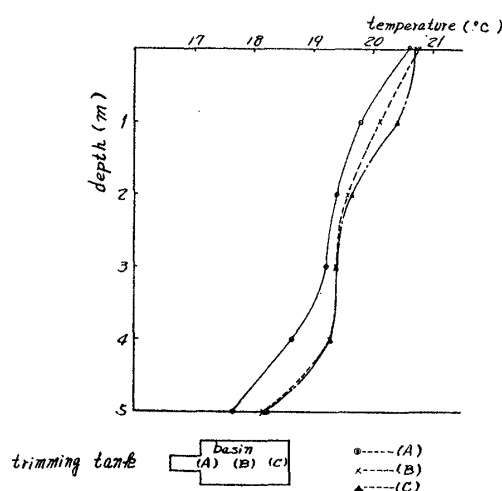


Fig. 15 Temperature of water

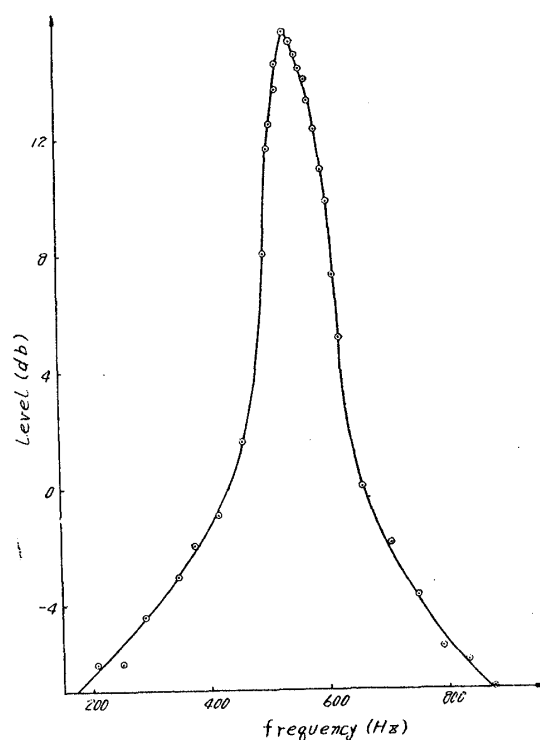


Fig. 16 Spectrum of Doppler shift signal

Table 1 Numerical results

Place		IHI Experimental Towing Tank								
Date of Experiment	Depth (m)	Angle θ_1 (deg)	Speed v_1 (m/sec)	Theoretically Predicted Frequency Δf_T (Hz)	Digitalcounted Frequency Δf_{DC} (Hz)	Frequency of Peak of Spectrum Δf_{PS} (Hz)	$\frac{\Delta f_{DC}}{\Delta f_T}$	$\frac{\Delta f_{PS}}{\Delta f_T}$	Velocity of Surface Water (mm/sec)	Temperature of Surface Water (°C)
Aug. 12, 1966	5.0	40.0	0.500	104	110	101	1.06	0.97	3	20.6
"	"	"	1.00	208	210	202	1.01	0.97	"	"
"	"	"	2.00	416	410	420	0.98	1.01	"	"
"	"	"	3.00	624	615	630	0.98	1.01	"	"
"	"	"	4.00	833	810	830	0.97	0.99	"	"
"	"	"	5.00	1040	1010	1010	0.97	0.97	"	"
Aug. 11, 1966	"	50.0	0.500	86	89	93	1.03	1.08	"	20.7
"	"	"	1.00	171	172	170	1.01	0.99	"	"
"	"	"	2.00	342	340	345	0.99	1.01	"	"
"	"	"	3.00	513	510	515	0.99	1.00	"	"
"	"	"	4.00	684	673	700	0.98	1.02	"	"
"	"	"	5.00	855	834	830	0.97	0.97	"	"
Aug. 12, 1966	"	60.0	0.50	68	70	71	1.03	1.04	"	20.6
"	"	"	1.00	136	135	132	0.99	0.97	"	"
"	"	"	3.00	408	400	407	0.98	0.99	"	"
"	"	"	4.00	543	528	540	0.97	0.99	"	"
"	"	"	5.00	679	660	667	0.97	0.98	"	"

3.4 考 察

波形がくずれる原因としては、水中の浮遊物（気泡、ごみなど）、水槽の底の不均一さ、水中音波の干渉⁴²⁾（送波音波と受波音波との干渉、水槽内の残響波間の干渉）などが考えられる。

θ_1 方向に送波された音波は、実際にはひろがりをもっている。このために、水槽の底への入射角が θ_1 方向へ送波された音波の入射角のまわりに分布しており、垂直入射に近い音波ほど大きな backscattering strength で散乱されるので³⁴⁾、みかけ上 θ_1 より少し大きい角度の方向に相当する Δf のスペクトルを受信するような状態になりうる。 $\frac{\Delta f_{DC}}{\Delta f_T}$ も $\frac{\Delta f_{PS}}{\Delta f_T}$ も共にやや1より小さ目に出ている原因の1つはこれであろう。

対地速度の成分 v_x , v_y , v_z とドプラーシフト信号周波数 Δf との関係 (2.19) に注目する。水槽実験では $v_y = v_z = 0$, $v_x = \text{一定}$, $f_s = \text{一定}$, $c_1 = \text{一定}$ となつていので、 $90^\circ - \theta_1 \equiv \theta_i$, $\varphi_1 \equiv \varphi_i$ とすれば、(2.19) は次のようになる。 $\Delta f = \frac{2v_x f_s}{c_1} \cos \theta_1 \cos \varphi_1$ したがって、 $\frac{d(\Delta f)}{\Delta f} = -(\tan \theta_1 d\theta_1 + \tan \varphi_1 d\varphi_1)$ となる。

$$\theta_1 = 60 \times \frac{\pi}{180} \text{ rad}, d\theta_1 = \frac{\pi}{180} \text{ rad} \text{ のとき } \tan \theta_1 \cdot d\theta_1 \approx 0.03,$$

$$\theta_1 = 40 \times \frac{\pi}{180} \text{ rad}, d\theta_1 = \frac{\pi}{180} \text{ rad} \text{ のとき } \tan \theta_1 \cdot d\theta_1 \approx 0.01$$

であるが、 $\varphi_1 = \frac{\pi}{180} \text{ rad}$, $d\varphi_1 = \frac{\pi}{180} \text{ rad}$ としても $\tan \varphi_1 \cdot d\varphi_1 \approx 0.0003$ の程度であるから、 θ_1 の調整精度は φ_1 のそれに比べて Δf の計測精度にかなり大きな影響をおよぼす。Table 1 の $\frac{\Delta f_{DC}}{\Delta f_T}$ と $\frac{\Delta f_{PS}}{\Delta f_T}$ とが、1よりやや大き目に出ていることの原因はこの θ_1 の精度にもあるものと思われる。

対地速度が小さいときに、1.00 からのずれが目立つ $\frac{\Delta f_{DC}}{\Delta f_T}$ と $\frac{\Delta f_{PS}}{\Delta f_T}$ とが表の中にある。これは Δf の波形がくずれることがあつたためにように思われるが、中には、計測器の都合で、2桁しか周波数が読み取れなかつたことも重なつて起因しているものもありそうである。このようなものを除くと、 $\frac{\Delta f_{DC}}{\Delta f_T}$ も $\frac{\Delta f_{PS}}{\Delta f_T}$ も共に $\pm 3\%$ 以内に入るようである。なお、計算値と計測値とをよりよく一致させることは、今後の考究に俟たなければならない。

4 結 言

水中超音波のドプラー効果によつて、船舶の対地速度を測定するという技術を向上させるために行なつた、以上の基礎的研究をまとめる。

1. 水の物理的性質に依存するドプラーシフト周波数は 2.1 の仮定のもとで、音波伝播行程の相違に応じて、(2.8) または (2.14) 式で表わされる。

2. ドプラーシフト周波数 Δf を測定して、対地速度を算出する式として、(2.18), (2.19), (2.23) 式を導びいた。

3. (2.2), (2.3), (2.11), (2.13), (2.14), (2.21), (2.22) 式をもとに, 水の物理的性質が対地速度算出におよぼす影響について数値計算したところ, 1% 以内の誤差におさまる結果が得られた。

4. この数値計算結果は次のことを示唆している。すなわち, 水の物理的性質に起因する一方向計測による誤差は, θ_1 と $180^\circ - \theta_1$ との2方向のドプラーシフト周波数を計測し, (2.23) 式によつて対地速度を算出することにより小さくなる。

5. 実験して得られたドプラーシフト信号は比較的正弦波形に近いものであつた。

6. 試作した装置は送波周波数 f_0 に対し, 受波周波数が $f_0 + \Delta f$ でも $f_0 - \Delta f$ でも同じドプラーシフト周波数 Δf の信号を作り出し, 受波スペクトル形状とドプラーシフトスペクトル形状とは相似になるようにできている。

7. ドプラーシフト信号の波数をディジタルカウンターで計数したものを Δf_{DC} , (2.18) 式から計算されたドプラーシフト周波数を Δf_T とすると, 対地速度が 1 m/sec から 5 m/sec の範囲で, θ_1 が 40° , 50° , 60° の場合には

$$0.97 \leq \frac{\Delta f_{DC}}{\Delta f_T} \leq 1.01$$

ドプラーシフト信号を周波数分析したときのピークを示す周波数を Δf_{PS} とすると

$$0.97 \leq \frac{\Delta f_{PS}}{\Delta f_T} \leq 1.02$$

となつた。

8. ドプラーシフト周波数の計測は $15^\circ \leq \theta_1 \leq 165^\circ$ の範囲で行なわれ, 気泡が送波と受波の妨害をしていたような場合を除けば, ドプラーシフト周波数の計算値と計測値とはかなりよく一致した。

終りに, 本稿を校閲していただいた大阪大学名誉教授太田友弥博士, 本稿作成にあたり示唆に富む討論をたまわつた東京大学航空宇宙研究所 丹羽登教授に厚くお礼申しあげます。また実験にあたり, 種々貴重なご指導をいただいた当社研究所の寺尾副所長, 服部, 神中両部長, 梶田, 藤井両主任研究員に深謝いたします。なお, 実験装置の製作にあたつては森技術研究所の協力をいただきました。

文 献

- 1) 試験水槽委員会：巨大船の海上試運転施行方案の試案作成について, 造船協会誌, No. 442, May 1966, p. 27
- 2) 桜本幹夫：航法計器開発に対する提言, 航海, No. 20, Oct. 1964
- 3) Jack B. Cline: Precise Position Fixing by Acoustic Means, Proceedings of Offshore Exploration Conference, 1967, p. 94
- 4) 平岩 節：船位測定の基礎, 日本航海学会誌, July 1968, p. 75
- 5) A. H. Keil: The challenge of Ocean Engineering of the Future, Marine Technology, Jan. 1968, p. 31
- 6) Walter R. Fried: Doppler Radars for Guidance Design Techniques and Performance, ARS Journal, Dec. 1959, p. 957
- 7) F. B. Berger: The Nature of Doppler Velocity Measurement, I. R. E. Trans., Vol. ANE-4, Sep. 1957, p. 103
- 8) C. L. Bachtel: Doppler Radars, Signal, Sep. 1966, p. 41
- 9) 丹羽 登, 佐下橋市太郎, 今村和彦：機上ドプラー用超音波シミュレータ, 東京大学航空研究所集報, Vol. 2, No. 8, Dec. 1961, p. 631
- 10) 松田節雄：航空電子技術 (コロナ社, 1956) p. 540
- 11) 岡田 実：電波応用 (コロナ社, 1962) p. 234
- 12) 橋橋富寿：超音波測深並魚探の研究, Feb. 1951
- 13) 実吉純一：超音波による魚群探知と測深, 日本音響学会誌, Vol. 8, No. 2
- 14) 鶴ヶ谷武雄：ソナーについて, 船舶, No. 9, 1961
- 15) J. B. Horton: Fundamentals of Sonar (U. S. Naval Institute, 1957)
- 16) 間庭愛信：mm 波超音波を応用した水中測器の開発に関する研究, 1962
- 17) D. G. Tucker: Underwater Observation Using Sonar, (Fishing News, 1966)
- 18) Henry, P. Kalmust: Ultrasonic Flowmeter System, Rev. Sci. Instrum., 25, 1954, p. 201
- 19) Keeper S. Stull: Ultrasonic Phase Meter Measures Water Velocity, Electronics, Sep. 1955, p. 128

- 20) H. Dalke, W. Welkowitz : Ultrasonic Flowmeter, I. R. E. International Convention Record 8, Part 6, 1960, p. 255
- 21) 山本美明 : 超音波利用計測, 日本機械学会第249回講習会教材, Feb. 1966
- 22) 吉山裕二 : 超音波流量計による計測, 計測と制御, Vol. 5, No. 7, July 1966
- 23) E. E. Turner, B. J. Thompson, O. H. Jackson : The Raytheon Acoustic Doppler Navigator, Navigation, Vol. 13, No. 3, 1966, p. 210, 音響式ドプラナビゲータ, 日本船用工業会技術資料, 第13号, June, 1967
- 24) レイセオン社 : 船舶の電子式自動操縦装置, 電気計算, Vol. 32, No. 6, 1964
- 25) E. G. Richardson : Technical Aspects of Sound, Vol. II (Elsevier, 1957) p. 123
- 26) 実吉純一 : 超音波の応用, エレクトロニクス講座, 応用編 1, (共立出版, 1957) p. 191
- 27) 実吉純一, 菊池喜充, 能本乙彦監修 : 超音波技術便覧 (日刊工業, 1960)
- 28) 運輸技術研究所船舶機装部監修 : 船用品便覧 (天然社, 1960) p. 136
- 29) 造船協会編 : 船舶工学便覧, 第2分冊 (コロナ社, 1962) p. 478, p. 615
- 30) Richard G. Goldman : Ultrasonic Technology (Reinhold, 1962) p. 237
- 31) Julian R. Frederick : Ultrasonic Engineering (John Wiley & Sons, 1965) p. 198
- 32) 実吉, 菊池, 能本監修, 超音波技術便覧 (日刊工業, 1966) p. 5
- 33) Vernon M. Albers : Underwater Acoustics Handbook-II, (The Pennsylvania State University Press, 1965) p. 122
- 34) ditto p. 131
- 35) ditto p. 125
- 36) 戸田盛和 : 理科教養の物理学 (朝倉, 1962) p. 85
- 37) Rayleigh : The Theory of Sound (Dover, 1945) Vol. II, p. 133
- 38) Wayne D. Wilson : Speed of Sound in Sea Water as a Function of Temperature, Pressure, and Salinity, J. A. S. A., Vol. 32, No. 6, June 1960, p. 641
- 39) 実吉, 菊池, 能本監修 : 超音波技術便覧 (日刊工業, 1966) p. 696
- 40) 寺尾貞一, 神中竜雄, 岡田 主, 海瀬 彊, 山崎禎昭 : IHI 船型試験水槽について, 造船協会論文集, Vol. 121, June 1967, p. 72
- 41) 藤森聰雄 : やさしい超音波の応用 (産報, 1964) p. 24
- 42) 漆原 清, 大坪久泰 : 音波伝播信号の“ゆらぎ”に関する研究 (第1報), 防衛庁技術研究本部技報第226号, p. 185