

神戸大学 工学部 正員 篁 源亮

(株) 竹中土木 正員 ○徳永幸彦

1. まえがき

超音波流速計は、ドップラー効果を利用したものであり、パルス伝播時間差法、シングア라운드法等の方法にもとづいた製品が市販されている。本研究では超音波の伝播場の移動速度に応じて送信波と受信波の間に生じる位相差を位相検波により検出する位相差法から流速を求めた。また、同時に計測系としての安定性についても検討を行なった。

2. 測定原理

図1に示すように、流れに平行に送信子S、受信子Rを向かい合わせ、距離をL、連続波の角周波数を ω 、音速をC、流速をVとすると、超音波がS R間を伝播する時間は

$$\tau = L / (C + V)$$

であり、送信波と受信波の位相差は

$$\Delta\phi = \omega L / (C + V) = \omega L / C \cdot (1 - V/C) \quad (1)$$

となる。位相検波にはロックインアンプを用いる。この機能は、送信波と同一の周期・位相をもつ連続ク形波を用い、これを受信波と重複させ図2に示すようにその斜線部の面積和が直流電圧として出力されるのを利用する。静水時に位相差がちょうど $\frac{\pi}{2}$ になるように位相調整を行なって出力を0とすれば、流水時に位相のずれた分だけ流速に関係した出力となる。上記の位相調整後、流水による位相差は次式で表わされる。

$$\Delta\phi = \frac{\pi}{2} - \omega VL / C^2$$

このとき、出力 E_0 は

$$E_0 = A \sin(\phi - \Delta\phi) d\phi = 2A \sin(\omega VL / C^2) \approx \omega VL / C^2 \quad (2)$$

となり、A、 ω 、L、C、が一定であれば、出力は流速に比例する。

3. 実験概要

初め、開水路にて流速測定を行なったが、送・受信子と水面との距離が短かったため、水面反射が生じた。その結果、水面が変動することによっても出力に変化をきたし、流速測定のみを行なうことは困難であった。このため、大型水槽を用い、流速計をこれに設置し、その水面との鉛直距離Zと出力の関係を求め水面反射の影響を検討した。また別に、直径48mmのアクリルパイプを用いた管水路により流速と出力との関係を求めた。

超音波には指向性があり、振動面の直径Dと波長 λ との比の値が大きいほど振動面と直角方向に超音波が直進する傾向が強くなる。

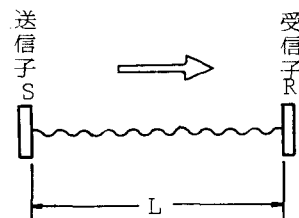


図1

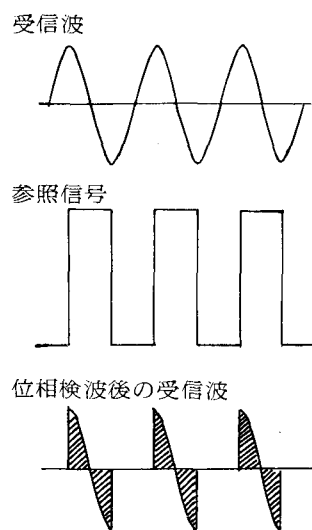


図2

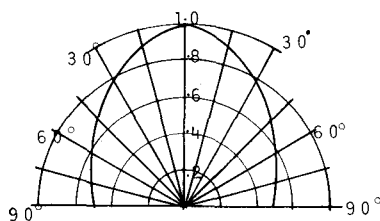


図3 超音波発振子の指向性

本研究で用いた振動子の直径D と共振周波数 fから指向性を算出すると約0.625 となり、図3のようなエネルギー分布をなす。

4. 実験結果及び考察

先に述べたように、超音波が直進せず振動面のまわりにも拡散していく結果、図4から明らかなように、大型水ソウの実験の場合、水面の反射を伴い、その結果出力変動がある。この傾向は、指向性に左右されることが同図より明らかである。

管水路実験の結果を図5に示す。送信出力を変化させて測定を行なったところ、同一送信出力では(2)式に示す流速と出力との比例関係が得られた。また、図5からわかるように、送信出力を受信側において0.32v としたときが最も理論に近いものとなった。その出力より大きくなっても小さくなくても、分布にややばらつきが見られ、信号雑音比において、この計測系では最適出力が存在する。

超音波を利用した計測法では温度変化による零点シフトが大きな問題である。この計測法では比較的この温度変化による影響が少なく、下記のように従来の方法と比較して温度変化による出力変化を理論上から求めた。

位相差法では

$$\frac{\Delta\phi}{\phi} = - \frac{6.524 - 0.098T}{1422.838 + 3.626T - 0.0245T^2} \\ \approx 0 \left(\frac{3}{1000} \right) T = 20^\circ\text{C}$$

シングア라운드法 (往復) では

$$\frac{\Delta\tau}{\tau} = - \frac{6.524 - 0.098T}{1422.838 + 3.626T - 0.0245T^2} \\ \approx 0 \left(\frac{3}{1000} \right) T = 20^\circ\text{C}$$

パルス伝播時間差法 (片道) では

$$\frac{\Delta\tau}{\tau} = - (3.626 - 0.049T) \approx 0(3) T = 20^\circ\text{C}$$

となり、位相差法ではシングア라운드法と同様、水温変化に伴う速度誤差はパルス伝播時間差法に比して非常に小さい。シングア라운드法では発振パルスが計測場を伝播する間に変形し、発振パルスが完全なパルス波でないため測定時間に誤差を生じるが、位相差法では連続波を使用しているためそのような誤差を伴わない。また、静水時においては $\phi = \omega L / c$ となり、 $\Delta\phi / \phi = -\Delta c / c$ となる。実際に、静水時において水温を変化させ位相の変化をみたところ、 $\Delta\phi / \phi$ は負となり、その値のオーダーも理論値に近く、この実験の妥当性裏付ける結果が求まった。

5. あとがき

ロックインアンプの周波数特性上、高周波の音波を利用し指向性を高め水面反射の誤差を小さくすることは出来なかったが、これは、高周波音波を低周波音波で振幅変調し、検波後この低周波音波の位相を検波を行えばよいと思われる。このことについては今後研究する予定である。

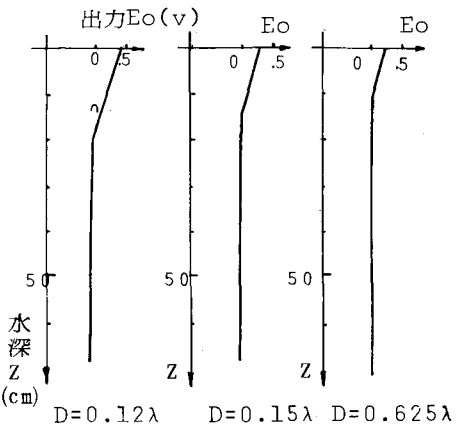


図4 水深と出力の関係 (反射の影響)

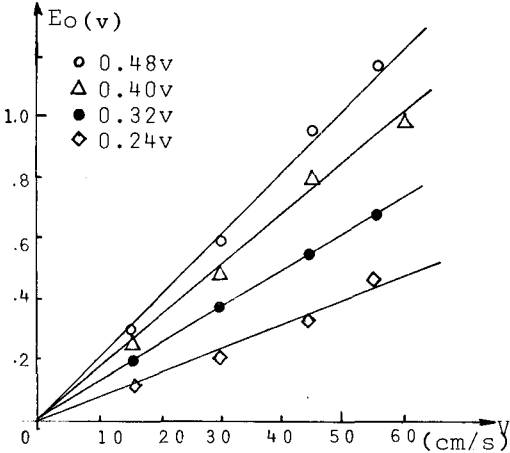


図5 管水路での流速と出力の関係
ただし、T : 水温 $^\circ\text{C}$