

水中における音響信号を利用した変位の精密測定*

(音響周波数と変位との実験)

鈴木 祐治*¹, 一宮 亮 —*²
渡邊 友行*³, 坂本 秀 —*²

A New Measuring Method for Underwater Displacement, Utilizing Sound Signal

(Experimental Relationship between Sound Frequency and Displacement)

Yuji SUZUKI, Ryoichi ICHIMIYA,
Tomoyuki WATANABE and Shuichi SAKAMOTO

This paper deals with a newly developed underwater displacement sensor utilizing the acoustic resonant frequency of water in a submerged pipe. Both ends of the pipe are closed. A speaker to generate sound is fixed on the end of the pipe with a reflector at the other end. Piezoelectric ceramic is used as a speaker. A sweep signal is radiated from the speaker to the water column in the pipe. The sound pressure takes the largest value at the resonant frequency. The displacement of the reflector which is inserted from another end of the pipe by a plunger, corresponds to the length of the water column. The displacement of the reflector has good correspondence to the resonant frequency of the water column. It is found from the experiment that it is possible to accurately measure underwater displacement, using this sensor.

Key Words: Sensor, Measurement, Accuracy, Sound, Underwater Displacement, Resonance, Frequency, Speaker, Microphone

1. 緒 言

液体中での超音波を利用したセンサ技術は最近、圧電セラミック材料の発展に支えられ各種計測や通信など応用される分野は広範囲に及ぶものと考えられる。

超音波は電磁波などの他の搬送波に比べ液中の伝搬速度は非常に遅く、同一周波数における波長が短くなるため距離方向の分解能が高く、精度の高い計測が期待できる。また設備面に関しても安価に収まるといった特長がある。以上のような特長を生かし液体中での計測を可能にするため、本研究では音響を利用した新しい変位計測用センサの開発を目的としている。

液中超音波計測は、距離の計測、速度の計測、物性の計測などに大きく分けられるが、本報告では、液中に置かれた物体の移動変位量を精密に計測するセンサの開発に取り組んだ。さきに報告した空気中における音響を利用した変位測定用センサの原理⁽¹⁾は、物体の変位をパイプ内に発生する音響の周波数に対応させて変位を精密に測定するというものであるが、このアイデ

アを液中において使用可能な変位測定用センサに応用させた。本報告では液体として純水を使用し実験を行った。

空気中におけるセンサの場合と比較して、媒質を空気から水に変えることにより、かなり大きな物性（圧縮率、粘性、特性インピーダンスなど）の違いから種々の問題が考えられ、例えば音圧により引き起こされる管壁の振動などがある。このような観点を考慮し基礎的研究を行った結果、水中において音響周波数と物体の変位との関係が明らかとなり、変位測定用センサとして十分役立つものと考えられる。

2. 測定法の原理

本研究で使用したセンサの詳細図を図1に示す。センサの音響管部は、一端が反射板によって閉止させられ、また他端はスピーカの放射面によって閉じた両端閉止管構造となっている。音源から音響管内に音波を放射させると管内には入射波と反射波が相互干渉し合い定在波が生じ、ある周波数において音圧のピークが現れ共振点が生じる。管内の音圧は管壁に設けられた小孔からマイクによりピックアップし、電気信号に変換される。水柱の長さは、管の他端から差込まれた反射板が移動することにより、測定子の変位として変換

* 原稿受付 1992年5月27日。

*¹ 正員、新潟大学大学院自然科学研究科 (〒950-21 新潟市五十嵐2の町8050)。

*² 正員、新潟大学工学部。

*³ 学生員、新潟大学大学院。

される。したがって、共振周波数は測定子の変位に対応することになる。このように両端を閉止させた構造を持つ音響管の水柱長さ L と共振周波数 f との関係は、管内径が使用波長に比べて十分小さく管内には平面波が伝搬すると仮定し、空気柱の振動の場合から類推すると式(1)のように考えられる。

$$f = \frac{nc}{2L} \dots\dots\dots(1)$$

- f : 共振周波数
- c : 管内水中音速
- L : 水柱長さ
- n : 倍音次数 ($n=1, 2, \dots$)

式(1)を導き出すための理論は、液体柱の振動にも応用ができる。ただしこの場合には空気柱が振動する場合において管壁が十分剛体として見なすことができても、水柱が振動する場合に対しては管壁を完全な剛体と見なすことが困難となるため、むしろ柔軟なものとして考えなくてはならない。その結果、管内の水中音波の伝搬速度が自由空間における場合よりも低下する⁽²⁾。したがって、この点に注意し音響管の設計を行う必要がある。

3. 音響管の設計

水の圧縮率は空気のものより小さい(約 0.6×10^{-3} 倍)ため、先に述べたように管壁で囲まれた水柱に発生する音波は管壁に作用してそれを変形する。この管壁の振動による最も重要な影響に、パイプ内の音速の低下に伴い式(1)による共振周波数の低下がある。

液中に浸した管内を伝搬する音速は、式(2)により示される⁽³⁾⁽⁴⁾。

$$\frac{c}{c_0} = \left[1 + \frac{2x}{E} \frac{(1+h/a)^2 + 1}{(1+h/a)^2 - 1} \right]^{-1/2} \dots\dots\dots(2)$$

- c_0 : 水中自由空間内の音速
- a : 管内半径
- h : 管壁厚さ
- E : 管材質のヤング率

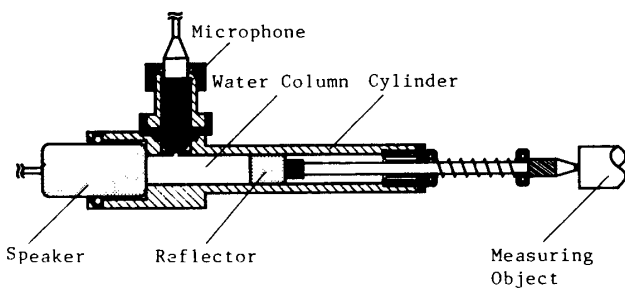


図1 センサの詳細図

x : 水の体積弾性率
したがって、式(2)より算出した管内水中音速を、式(1)に導入する必要がある。

また水中自由空間における音速値には、

$$c_0 = 1402.736 + 5.03358T - 0.0579506T^2 + 3.31636 \times 10^{-4}T^3 - 1.45262 \times 10^{-6}T^4 + 3.0449 \times 10^{-9}T^5$$

T : 水温

の Greenspan-Tschiegg の実験式を使用した⁽⁵⁾。

管壁に膨張性の富んだ材質を利用した場合において、管壁からの音波の放射が無視できなくなり、また管壁の振動損失により共振の Q 値にも影響があることも考えられる。

本センサは管内水柱の共振現象を利用していることにより、測定精度は共振の Q 値自体に大きく影響を受ける。すなわち、音響出力を左右する共振の Q 値が主として管壁の振動により決まる。したがって、音響管を設計する際には、管材質にヤング率の高いものを選択した。また共振の Q 値を高めるためにも管壁の厚さに十分注意し設計を行った。

表1に、本研究で使用した音響管の寸法を記載する。材質には防せい対策を兼ねてSUS304を使用した。このような寸法で設計したセンサ(Pipe-1, 2)において、式(2)より音速低下率 $[c/c_0 \times 100(\%)]$ は、Pipe-1, 2とも約2%となり管壁は十分剛体であるものと見なした。

図2に、センサ内部の拡大図を示す。本センサを設計する際に主に寸法を変化させたのは、パイプ内径(D)マイク穴内径(Dmh)、またマイク穴長さ(Lmh)についてはすべてのセンサに対し0.5mmとした。このように設計寸法を変化させた種々のセンサに対し、パイプ内に気泡が混在しないよう注意を払い実験を行った。また、周囲温度の変化に対しパイプ内と外部との温度を平衡に保つため、スピーカ面と接触するパイプ端面に幅1mm、深さ0.3mmの溝をほり、パイプ内の水と外部の水との連絡が施されている。

4. 実験装置および方法

図3に本実験で使用したスピーカの内部構造図を示

表1 音響管の設計寸法

	Inner diameter of the pipe (mm)	Wall-thickness (mm)	$c/c_0 \times 100(\%)$
Pipe-1	φ8	4	2
Pipe-2	φ6	5	1.5

す。圧電セラミック振動子は放射面としてのプラスチック円形板に接着され、また、放射面の反対側には吸音材としての発泡性ウレタンゴムを設置し余分な音の放射を防ぎ、ケース開口部にはシール材としてのシリコンを充てんした密閉構造となっている。また、使用した圧電セラミック振動子の各々のモードにおける共振周波数を表2に、振動子とプラスチック円形板材質との組合せを表3に記載する。

図4は、実験装置の概略図を示している。水中に設置してあるセンサの周波数特性を測定するために、シグナル・ジェネレータから0~100 kHzまでの正弦波スイープ信号をパワー・アンプを介してスピーカとFFTアナライザのCH-Aに送る。この時、スピーカに送られる電圧を確認するためFFTアナライザのCH-Aによりアンプの出力電圧を確認している。スピーカからパイプ内に放射された音波は、水柱長さに応じた特有の定在波分布を引き起こす。この時の管内音圧はマイクロホン (B & K 8103) により電気信号としてピックアップされ、チャージ・アンプ (B & K 2635)

を介してFFTアナライザのCH-Bに入力し周波数解析を行い、コンピュータに送られる。

測定子の変位は、被測定物として設けた精密マイクロメータヘッドを介しデジタルカウンタにより正確に知ることができる。このようにして管内の水柱長さとの関係は正確に測定される。

5. 実験結果

図5は、表4に示した設計仕様のセンサ (Sensor-1) に対して、水柱長さを0.5 mmごとに変化させFFTアナライザにより周波数解析を行った際のスペクトルについて示したものである。ここでは、共振点の移動を明確にするため水柱長さを1 mmごとに記載した。共振点1は1倍音を表し、共振点2は2倍音を表している。

図6(a)は、図5のように得られたスペクトル

表2 圧電セラミック振動子の共振周波数

	Radial Vibration	Thickness Vibration
A	—	140kHz
B	200kHz	1MHz

表3 スピーカの仕様表

	Piezoelectric Ceramic	Disk Material
Speaker-1	A	Epoxy resin
Speaker-2	B	Polyethylene
Speaker-3	B	Epoxy resin

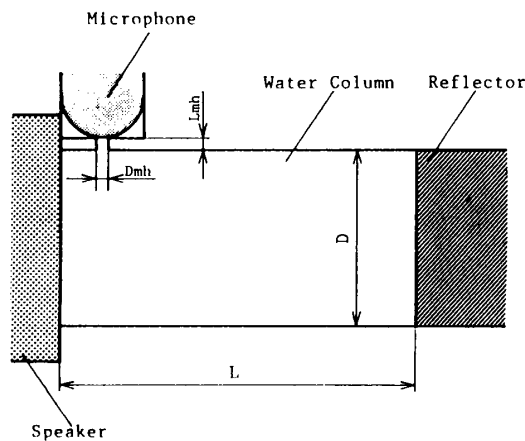


図2 センサ内部の拡大図

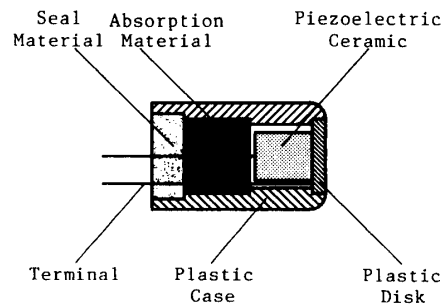


図3 スピーカ内部構造図

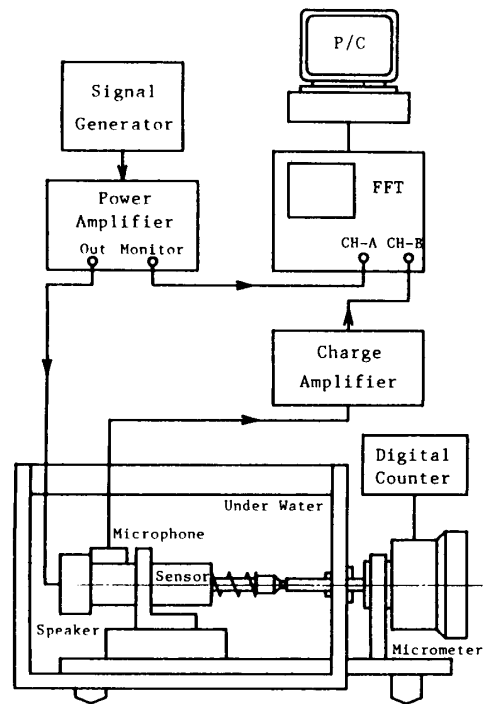


図4 実験装置の概略図

(Sensor-1) に対して、矢印で示した共振点における周波数と水柱長さとの関係を示している。実線は計算値を表し、+印は実験値を表している。この結果より、共振周波数は水柱長さに追従し、水中変位測定用センサとして使用できることが明らかとなった。さらに、各倍音とも同様な傾向を示すため、倍音を利用することにより広範囲な測定が可能である。図の左下にある共

表 4 センサの設計仕様

	Speaker	D	Dmh
Sensor-1	Speaker-2	$\phi 8$	$\phi 1$
Sensor-2	Speaker-2	$\phi 6$	$\phi 1$

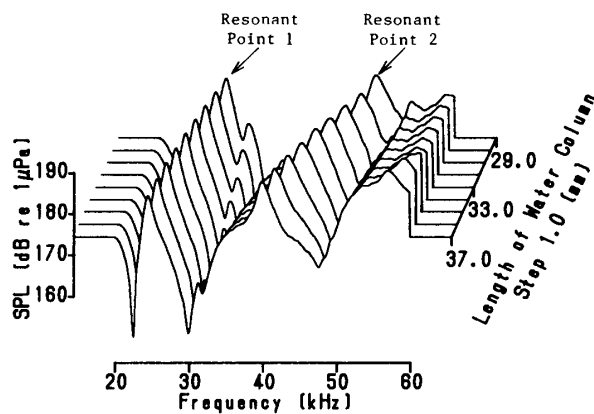
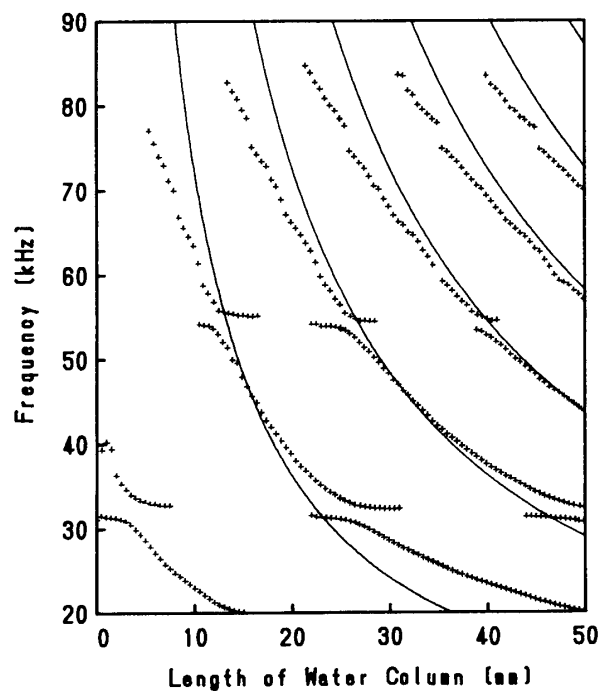


図 5 周波数解析結果 (Sensor-1)

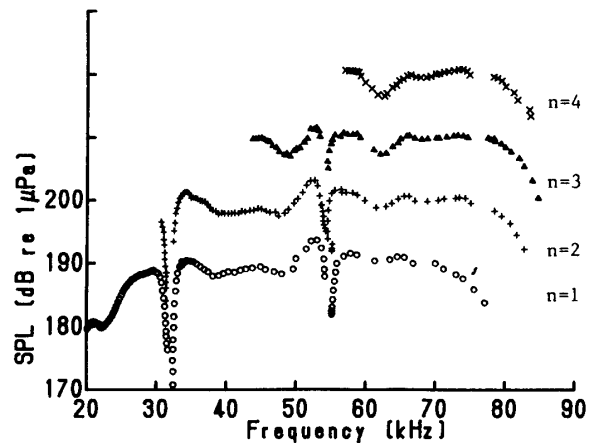


(a) 共振周波数と水柱長さとの関係

振点の移動は、空洞共鳴によるものと考えられる。また図 6 (b) は、共振点における周波数と音圧との関係を示したものである。ここでは、1 倍音から 4 倍音までについて記載した。音圧は、各倍音とも水柱長さによらず周波数に依存して変化し、いずれの倍音についても同様な傾向を示している。

Sensor-1 を用いる場合、周波数が約 55 kHz 以上になると共振点におけるピークの先鋭さが失われ、ピーク周波数データがばらついてしまい安定した計測が困難となる。しかし、図 7 のように Sensor-2 を用いた場合には周波数が 69 kHz 付近まで安定した計測が可能であった。以上のことから、共振周波数と水柱長さの関係において安定した追従性を示さない周波数域の原因として次のことが考えられる。管内径が使用波長に比べて十分小さく管内平面波が伝搬する、という仮定が周波数が高くなると成り立たなくなり、きれいな定在波分布が得られない結果、共振点の先鋭さを失うためである。したがって、振動子面積と管内面積との関係を考慮しながら管内径をより小さくすることにより、これ以上での周波数域における測定が可能となり、より高精度な変位測定が可能であるものと期待できる。

図 8 は、Sensor-1 を使用し微小変位量に対する共振周波数の追従性を調べるため、FFT アナライザのランニングズーム機能を用い(a)においては周波数分解能を 15.625 Hz にし水柱長さを 50 μm ごとに、また、(b)においては周波数分解能を 7.8125 Hz とし、10 μm ごとに水柱長さを変化させた時の共振周波数との関係を示したものである。この結果より、本センサでは 10 μm 単位での水中変位測定が可能であることが明らかとなった。



(b) 周波数と音圧との関係

図 6 Sensor-1 に対する実験結果

6. 考 察

図6(a), 7の周波数と水柱長さとの関係から、共振点の移動がある周波数において不連続となる傾向がある。図6(a)においては33 kHzおよび、55 kHz付近に、また図7において35 kHz, 50 kHz付近で生じ

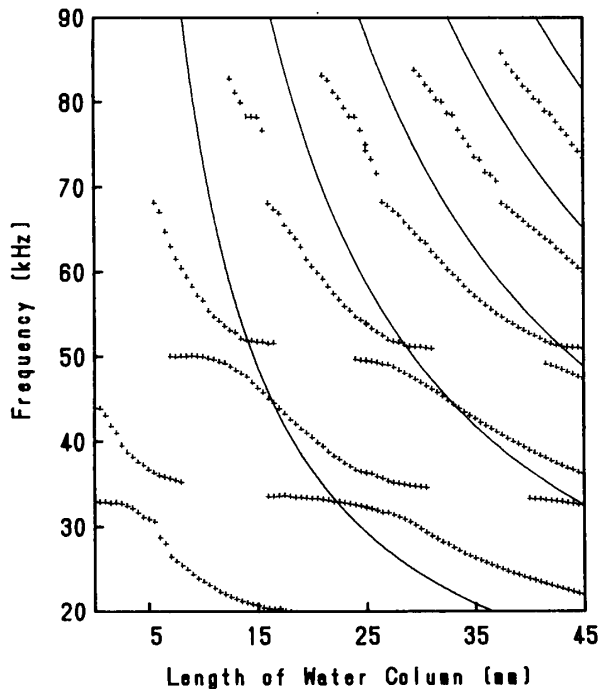
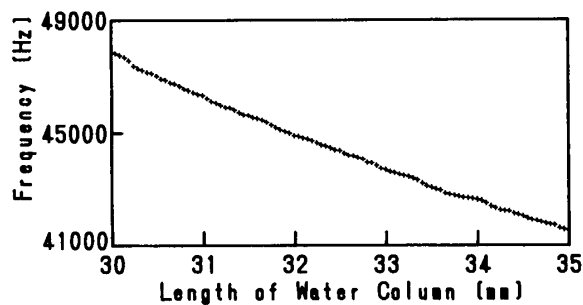
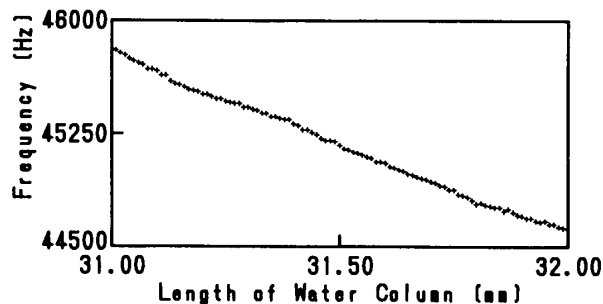


図7 共振周波数と水柱長さとの関係 (Sensor-2)



(a) 変位量 50 μm の場合



(b) 変位量 10 μm の場合

図8 微小変位測定結果

る。これらの周波数帯における Sensor-2 の場合のスペクトルを図9に示す。

共振点1は、水柱長さが短くなるにつれピーク周波数が上がって行くが、35 kHz 付近に別のピークが存在するためこのピークに接近しながら徐々に音圧が低くなり、この周波数に一致して行く。また、35 kHz 付近に存在していたピークは接近してくる共振点1に誘発されたかのように周波数と音圧とが徐々に上がっていく。したがって、あたかも共振点が二つに分けられたかのような共振割れ状態が現れる。共振点2においても同様な傾向が見られた。

図10(a), (b)は、式(1)より求められる共振周波数の計算値を正規化し、実験値との偏差($\Delta f^* = \text{実験値}/\text{計算値} - 1$)を表したものである。

(a)はパイプ内径(Pipe-1)を変えないで、スピーカの種類だけを変えた場合の共振周波数の移動傾向を表した。この結果より不連続となる周波数はスピーカ、倍音次数に関わらず33 kHz, 55 kHz 付近で生じている。また、振動子やディスク材質により、共振周波数の移動傾向は大きく影響される。

(b)はスピーカに Speaker-2 を使用し、パイプ内径のみ(Pipe-1, 2)を変えた場合の影響を表したものである。Pipe-1 においては不連続となる周波数が倍音次数に関係なく33 kHz, 55 kHz 付近であるのに対して、Pipe-2 においては35 kHz, 50 kHz となる。

以上のことから、パイプ内径が主に共振周波数の追従を不連続にする影響をもたらしているものと考えられる。これらの共振割れが起こる周波数帯には、管の長さ方向以外の共振、すなわち管の半径方向もしくは円周方向による共振が存在しているものと推測される。このことは厚み振動を利用した圧電トランスジューサにおいて、厚み振動と横方向の振動が互いに結合して共振割れを引き起こす現象⁽⁶⁾から考えられる。

開発した水中変位測定用センサは、周囲温度の変化

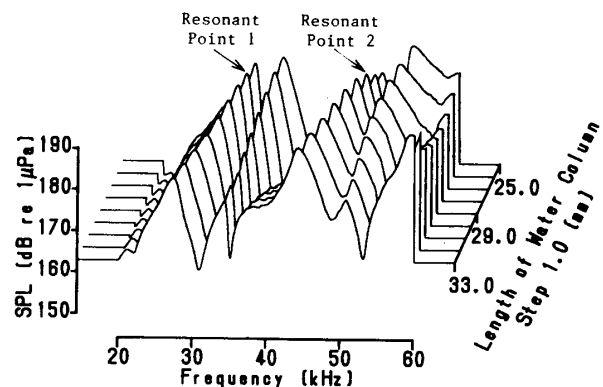
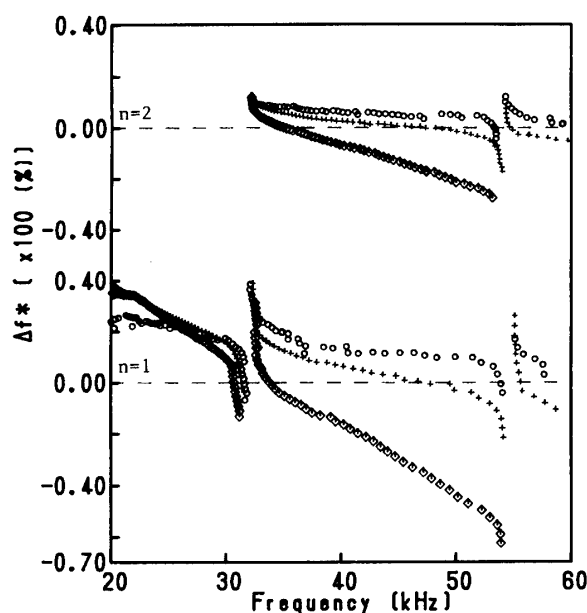
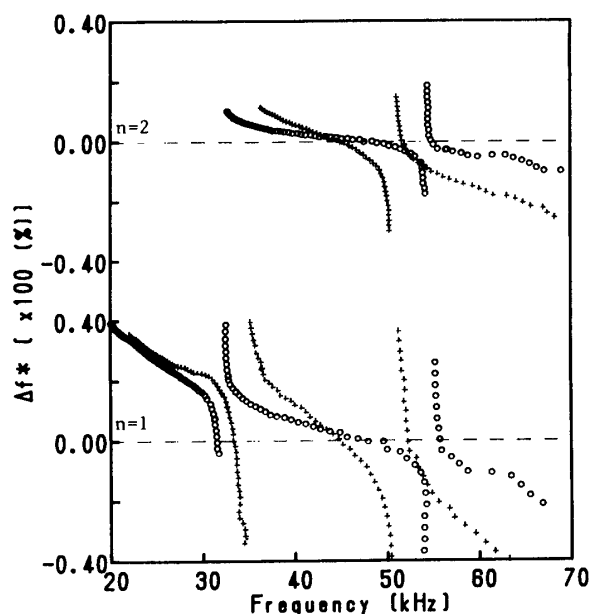


図9 周波数解析結果 (Sensor-2)



	Speaker	D	Dmh
+	Speaker-1	φ8	φ1
o	Speaker-2	φ8	φ1
◇	Speaker-3	φ8	φ1

(a) スピーカのみを変えた時



	Speaker	D	Dmh
o	Speaker-2	φ8	φ1
+	Speaker-2	φ6	φ1

(b) パイプ内径のみを変えた時

図 10 計算値と実験値との比較

に対して、管内温度が外部と平衡になるものと考えているが、しかし管内音波のエネルギー損失に対する管内温度変化の補正が行われていなく、将来この点についての解析が必要である。また、水中に溶在している空気が気化し気泡が発生することにより、音波の伝搬に影響を与え共振が得られ難くなるものと考えられる。したがって、長期的にセンサを使用する場合には気泡の発生に対する処置も必要とされる。

7. 結 言

一端がスピーカの放射面に、他端が反射板により閉じた両端閉止音響管を水中に設ける。このような音響管に音波を放射させると水柱長さに対応した共振点が得られる。したがって、反射板を動かして水柱長さを変化させると被測定物の変位に対して共振周波数が追従することになる。

この現象を利用した水中における音響周波数を利用した新しい変位測定方法を考案し、実験を行った結果、次の結論を得た。

(1) ここに考案した水中変位測定用センサは、比

較的測定範囲が広く、高精度測定も可能である。

(2) 開発した変位測定用センサは、10 μm 単位での水中における変位測定が可能である。

(3) 液体内での変位測定は、空気中の場合と比べ種々の制約により比較的困難であるが、本測定法は音響を利用することにより容易にかつ安価に収まるという特徴を有している。

(4) 本実験は、液体に純水を用いたが他の液体についても応用することが可能であり、油中における物体のように外部から可視できない場合にも変位の測定ができる特徴も有している。

なお、本論文は財団法人村田学術振興財団からの助成金による研究の一部を取りまとめたものである。

文 献

- (1) 坂本・一宮・鈴木, 機論, 56-530, C (1990), 2562.
- (2) 伊藤, 音響工学原論, 上巻, (1955), 174, コロナ社.
- (3) 奥島, 低周波音源部報告書, (1983), 41, 海洋音響研究会.
- (4) 実吉・菊池・能本監修, 超音波技術便覧, (1978), 481, 日刊工業新聞社.
- (5) 文献(4)の1202ページ.
- (6) 中村, 音響誌, 47-3 (1991), 196.