

音響信号を利用した液面レベルと傾斜角度の測定*

島崎 義之^{*1}, 一宮 亮 ^{—*2}
坂本 秀 ^{—*2}, 田中 誠 三^{*3}

Measurement of Water Level and Slant Angle Using Sound Signal

Yoshiyuki SHIMAZAKI, Ryoichi ICHIMIYA,
Shuichi SAKAMOTO and Seizo TANAKA

The most popular fuel level measuring method presently in use employs a float and a resistor plate. This float follows the fluctuations of the fuel surface in an automobile fuel tank. A new accurate measurement of the variation of the cavity volume in the fuel tank has been investigated. This sensor is composed of a speaker, microphone and three Helmholtz resonators. This method detects the level and slant angle of the fuel surface. The sound frequency obtained experimentally is compared with the calculation result of the frequency found by the theoretical analysis in which the cavity system is connected with three Helmholtz resonators. This method of measuring the volume is applicable to measuring the fluctuating fuel surface in an automobile fuel tank.

Key Words: Sound, Sensor, Measurement, Water Level, Slant Angle, Helmholtz Resonator, Antiresonance

1. 緒 言

現在、自動車の燃料タンク内の残量を測定する方法は、フロートと可変抵抗を組み合わせることで検出部を形成し、抵抗変化によってメータを駆動する方式が一般的である。したがって、車の走行時の加減速や、進路方向の変更、道路の勾配等による様々な現象により、自由液面がタンク取り付け面に対して傾斜して、原理的に残量の誤指示をする欠点がある。また、車室内スペースの有効利用のため、隙間空間へ燃料タンクが追いやられる傾向にあり、その結果燃料タンクの形状が複雑化、異形化することとなった。このため、従来の検出方法では、測定精度が更に悪化すると考えられる。

このような問題に対し、高精度な指示を行うセンサの開発を目的として、ヘルムホルツの吸音原理を用いた、容器内の液体残量測定について研究を行った。

本報では容器内の液量と、ヘルムホルツ共鳴器⁽¹⁾内に発生する反共振周波数との関連について実験し、具体的な検出部形状を考案して、各種実験を行った結果について報告する。

2. 測定法の概要

図1に検出方法の概略を示す。検出部は、アクチュエータにより音響を発生しマイクロホンにより音を測定する上部空洞部と、それに接合した3つのヘルムホルツ共鳴器により構成されている。

3つのヘルムホルツ共鳴器は、下端面を液面により構成している。よって、液面高さに応じて、空洞部内の容積が変化することとなり、共鳴器に吸音される音響周波数も、それぞれの空洞部の液面高さに応じて、変化する。

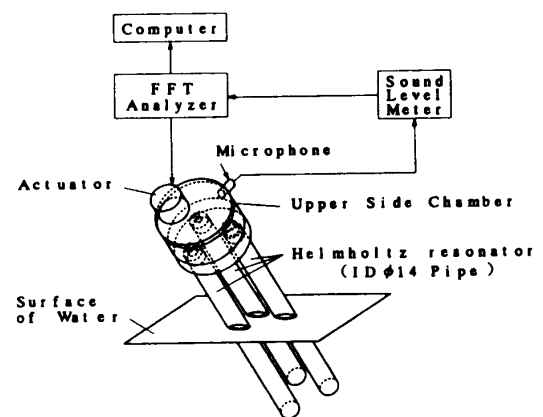


Fig.1 Outline of setup

* 1995年3月18日 北陸信越支部第32期総会講演会において講演, 原稿受付 1995年4月3日.

^{*1} 准員, 日本精機(株) (〒940 長岡市東蔵王2-2-34).

^{*2} 正員, 新潟大学工学部 (〒950 21 新潟市五十嵐2の町8050).

^{*3} 正員, 日本精機(株).

ヘルムホルツ共鳴器は、頸部形状と空洞容積に応じた特定周波数において共鳴を起こすので、3つのヘルムホルツ共鳴器の頸部径を、それぞれ異なる穴径にすることで、上部空洞部内の音圧スペクトルにおいては、3つの異なる周波数が吸音されることになる。検出部を取り付けた容器が傾いたとき、3つの空洞部容積は傾斜方向及び傾斜角度に応じてそれぞれ変化する。上部空洞部に現れる3つの反共振周波数も、傾斜方向及び傾斜角度に応じて、それぞれ変化する。よって、得られた反共振周波数から、3つのヘルムホルツ共鳴器のそれぞれの液面高さを求めることにより、傾斜方向と傾斜角度を算出することができ、容器形状から液体体積を求めることが可能となる。

図2に検出部の断面図を示す。3つのヘルムホルツ共鳴器は、上部空洞部中心軸に対して、同一円周上に120度間隔に配置されている。ヘルムホルツ共鳴器の空洞部にあたる部分は、3つの共鳴器共通に内径14mm長さ200mmのパイプを用い、頸部径には $\phi 5, 7, 10$ mmの三種類を用いた。上部空洞部内に発生した音響は、下部ヘルムホルツ共鳴器空洞部容積に応じ

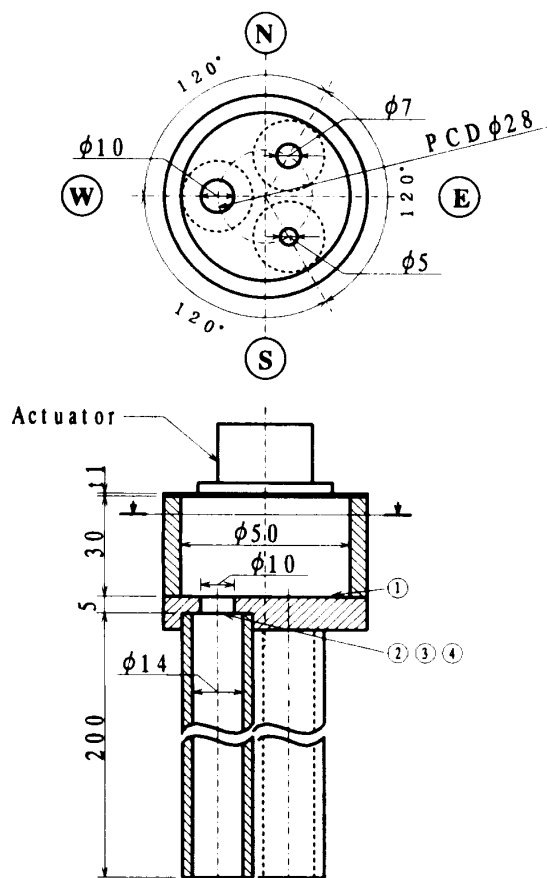


Fig.2 Sectional drawing of detecting part

た特定周波数のみ吸音され、上部空洞部内において3つの反共振周波数として現れる。

音源のアクチュエータユニットは、振動板を持たないスピーカである。このアクチュエータユニットは、音を発生させたい対象物に取り付けることで、対象物自体を直接振動させ音を発生する。本検出部では、上部空洞部上部天板に厚さ1mmのアルミ板を用い、そこにアクチュエータユニットを取り付けることで音源とした。

3. 理論解析^{(2)~(4)}

本研究においては、検出部内部の音響系を電気的等価回路に置き換えて解析を行った。検出部は上部空洞部と、3つのヘルムホルツ共鳴器を有するので、解析においては、各部の音響インピーダンスを求め、最終的に音響系全体の合成インピーダンスを求めればよい。

図3に検出部の音響系モデル図を示す。図中の枠で囲った記号は、検出部内の各音響要素を表す。 Z_U は上部空洞部であり、 N_A, N_B, N_C は3つのヘルムホルツ共鳴器の各頸部、そして Z_{PA}, Z_{PB}, Z_{PC} は3つのヘルムホルツ共鳴器の各空洞部を表す。図中 S_U は上部空洞部の断面積、 S_A, S_B, S_C は各頸部の断面積、 S_P は空洞部パイプ断面積を表す。図4-Aに検出部の電気的等価回路を示す。図2, 3, 4に表した①~④は、音響系モデルと電気的等価回路に、それぞれ対応した位置を表している。

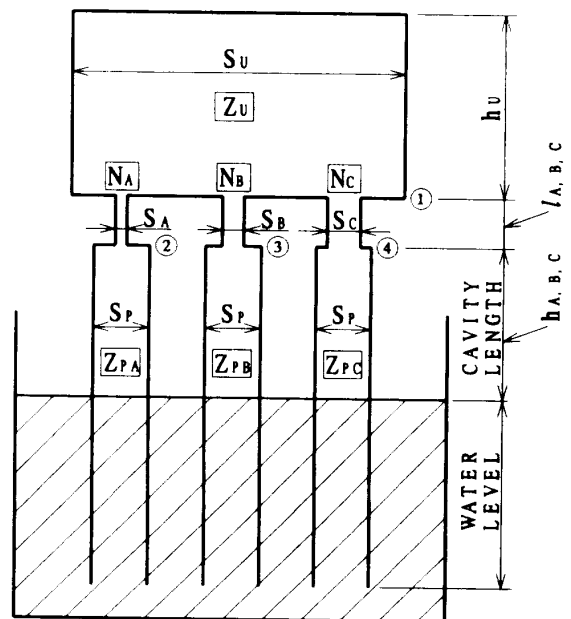


Fig.3 Model of cavity inside of detecting part

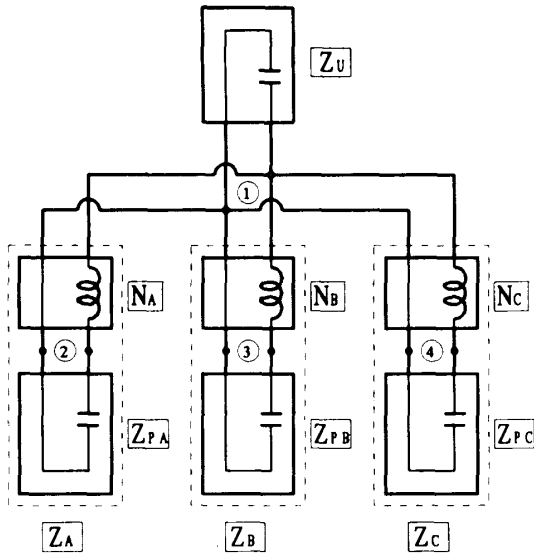


Fig.4-A Analogy of detecting part

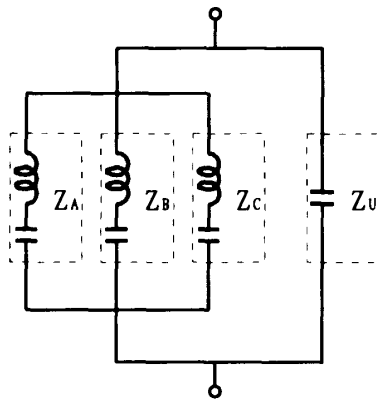


Fig.4-B Analogy of detecting part

3つのヘルムホルツ共鳴器を仮に音響系 A, B, C とおき、各インピーダンスを表すと次式のようになる。ここで ρ は空気密度、 c は音速を表す。

上部空洞部の音響インピーダンス

$$Z_u = -i \frac{\rho c}{S_u} \frac{1}{\tan(2\pi f h_u / c)} \dots\dots\dots (1)$$

音響系 A の音響インピーダンス

$$Z_A = i \frac{\rho c}{S_A} \tan(2\pi f l_A / c) - i \frac{\rho c}{S_P} \frac{1}{\tan(2\pi f h_A / c)} \dots\dots (2)$$



音響系 B の音響インピーダンス

$$Z_B = i \frac{\rho c}{S_B} \tan(2\pi f l_B / c) - i \frac{\rho c}{S_P} \frac{1}{\tan(2\pi f h_B / c)} \dots\dots (3)$$



音響系 C の音響インピーダンス

$$Z_C = i \frac{\rho c}{S_C} \tan(2\pi f l_C / c) - i \frac{\rho c}{S_P} \frac{1}{\tan(2\pi f h_C / c)} \dots\dots (4)$$



電氣的等価回路において、マイクは①点に接続された電圧計に相当する。①点から見た音響系全体のインピーダンスは、図4-Bに示すように並列インピーダンスとなるので次式で表されることとなる。

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{Z_u} + \frac{1}{Z_A} + \frac{1}{Z_B} + \frac{1}{Z_C}} \dots\dots\dots (5)$$

①点から見た音響系の共振周波数においては、3つのヘルムホルツ共鳴器の吸音作用により音圧は極小となるので、式(5)で $|Z|$ (絶対値 Z) が極小値をとるときの周波数 f を、検出部の共鳴周波数として計算する。

4. 実験装置と方法

上部空洞部から見た音響インピーダンスは、検出部空洞体積に応じて変化するため、それに伴って音響系の伝達関数の周波数応答も変化することとなる。

実験は、液面に対し垂直に検出部を固定し液面レベルを変化させた、空洞長さによる伝達関数の周波数応答を測定する液面レベル特性と、検出部の傾斜角度を変化させた傾斜角度特性の、二種類について行った。また以下の実験は、温度変化による音の伝搬速度の変化を避けるため、24℃の恒温室内にて行った。

4.1 液面レベル特性 図5に液面レベル特性測定に用いた実験の実験装置の概略を示す。音源は、FFT

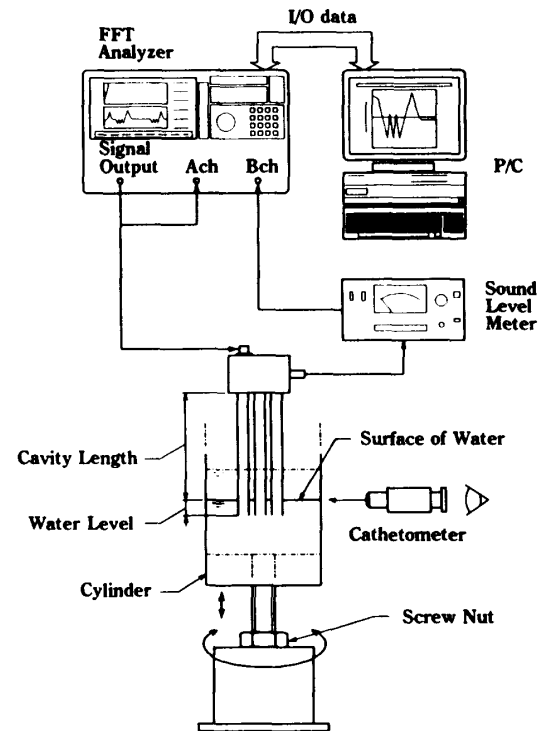


Fig.5 Experimental setup for surface level of liquid

アナライザ内蔵の信号発生器を用い、0 Hz から 2 kHz 迄の正弦波スイープ信号を発生させ、アクチュエータから上部空洞内部に放射させた。その同一基準信号をFFTアナライザのAチャンネルに入力し、上部空洞部内の測定信号を、Bチャンネルに入力することにより、伝達関数の周波数応答特性を測定した。

空洞長さの変化量は、水を投入した円筒容器をネジ軸により昇降させ、液面の昇降量をカセットメータにより高精度に測定した。空洞長さの変化量は、20mm 間隔で変化させた。空洞長さは頸部下端面を0mmとして、200mm から40mm まで変化させ音響特性を測定した。

4.2 傾斜角度特性 図6に傾斜角度特性の測定に用いた実験装置の概略を示す。音源及び信号処理については前節と同一である。傾斜角度特性は、検出部と液体の入った円筒容器を同一中心軸上に固定し、検出部と円筒容器とを同時に傾斜させ測定した。傾斜方向は図に示すように方向を取り決め、傾斜角度をそれぞれの方向に10度間隔で40度まで傾斜させ、音響特性を測定した。

5. 実験結果

5.1 液面レベル特性 図7に空洞長さに応じた、伝達関数の周波数応答を測定した結果を示す。グラフは一番上が空洞長さ200mmのもので、下方向に空洞長

さ20mm 間隔でオフセットさせ、測定結果を一覧に表示した。図中の数値は空洞長さを表す。

それぞれの空洞長さにおいて、図中矢印で示したように明確な3つの反共振周波数が現れ、空洞長さの変化に応じ反共振周波数も変化することが判る。3つの反共振周波数において、一番低く現れる反共振周波数は、頸部径5mmのヘルムホルツ空洞共鳴によるもの、中央は7mm、そして一番高い周波数値は10mmによるものである。

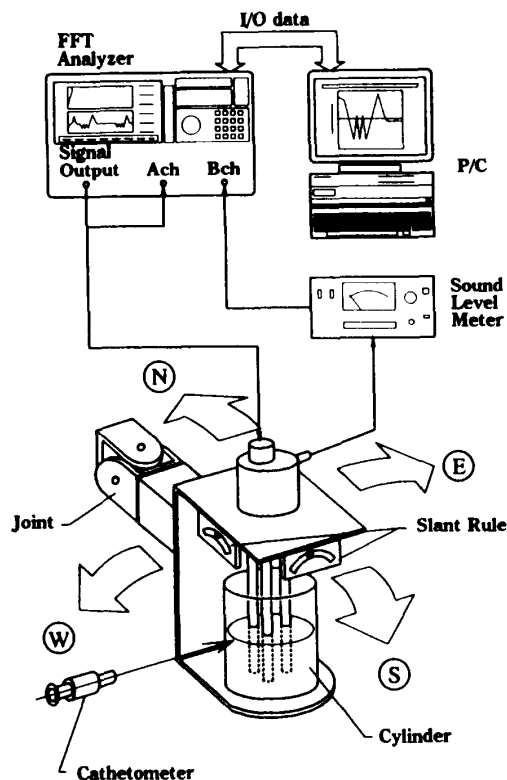


Fig.6 Experimental setup for slant angle

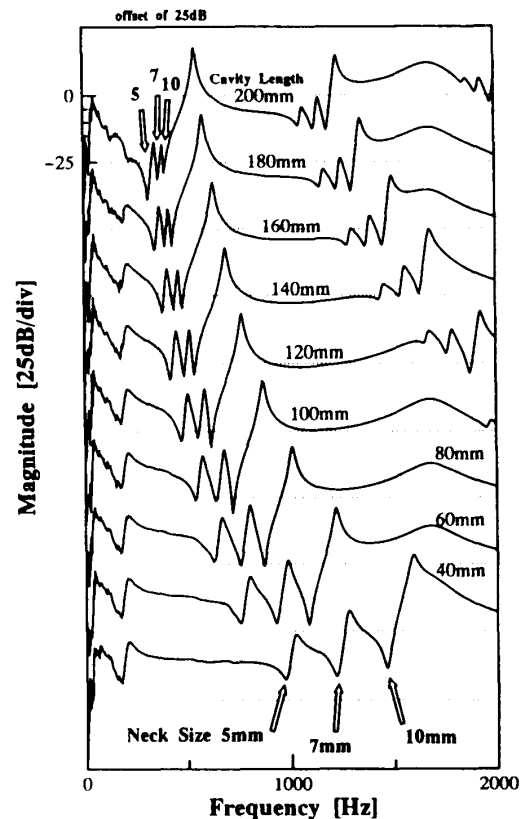


Fig.7 Frequency response of length of cavity

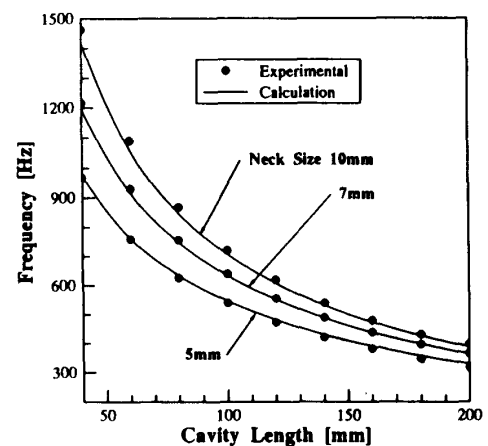


Fig.8 Variation of antiresonance frequency with length of cavity

図8に空洞長さに応じた反共振周波数測定値の推移と、インピーダンス計算値との比較結果を示す。このように、インピーダンスが極小値をとる3つの周波数(計算値)と、実験により得られた反共振周波数値とは、空洞長さ全域について、良く一致することが判る。また空洞長さの短い(例えば40~100mm間)ときと、長い(例えば140~200mm間)ときとでは、反共振周波数の空洞長さに応じた変化率が異なるが、これはヘルムホルツ共鳴の特性で、空洞体積が小さくなるほど(空洞長さが短くなるほど)共鳴周波数の変化率が大きくなる。

5.2 傾斜角度特性 図9と図10に検出部傾斜角度の変化に応じた、伝達関数の周波数応答を測定した結果を示す。グラフは空洞長さ120mmにおける測定結果である。傾斜角度は、検出部固定角度が液面に対し90度の位置を0度として、二方向について10度間隔で40度まで傾斜させ測定したものである。グラフから、傾斜角度に応じた明確な反共振周波数値の推移があることが判る。図9において10mmの頸部により得られた、一番高い反共振周波数値に、傾斜角度による変化がないのは、前出の図2の検出部上面図を見て判るとおり、その頸部が傾斜方向に対して直角方向の軸上に存在するため、傾斜を加えても空洞長さに変化

はなく、そのため空洞容積が変化しないためである。

図11と図12に検出部傾斜角度に応じた反共振周波数(測定値)の推移と計算値との比較結果を示す。反共振周波数(測定値)と、インピーダンスが極小値をとる3つの周波数(計算値)とが、ほぼ同じ傾向で変化しているのが判る。

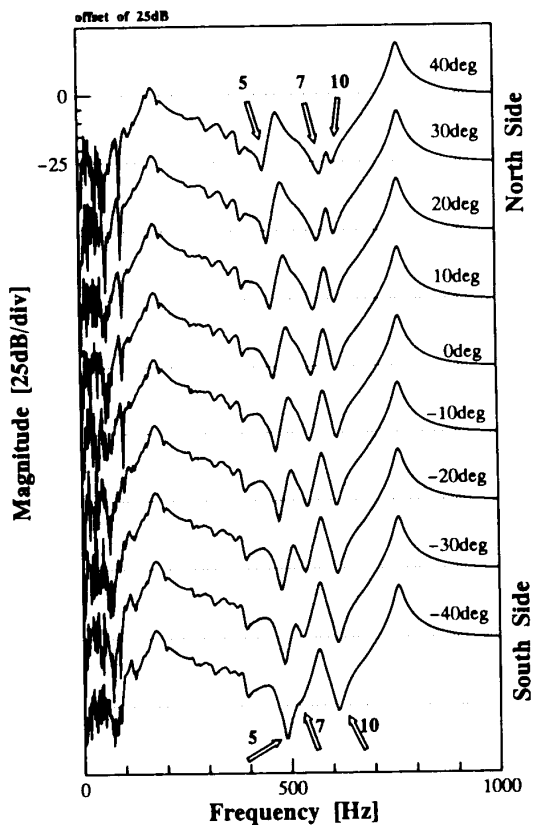


Fig.9 Frequency response with slant angle

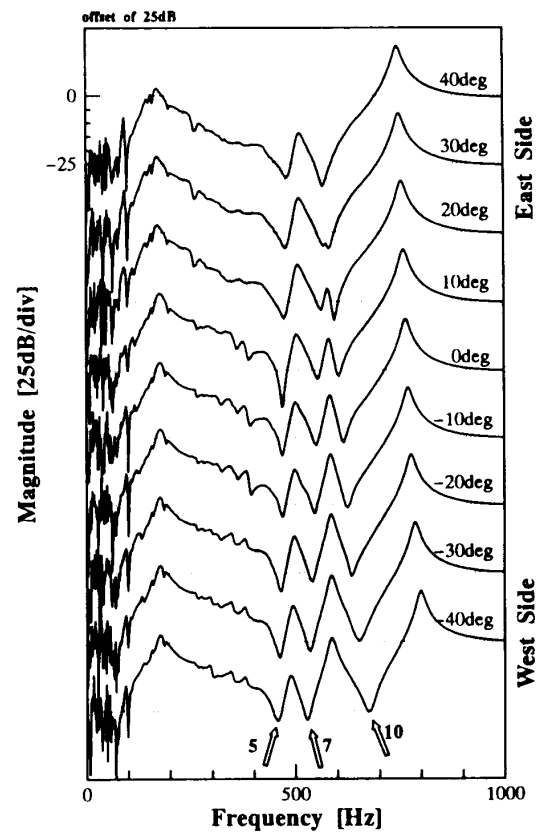


Fig.10 Frequency response with slant angle

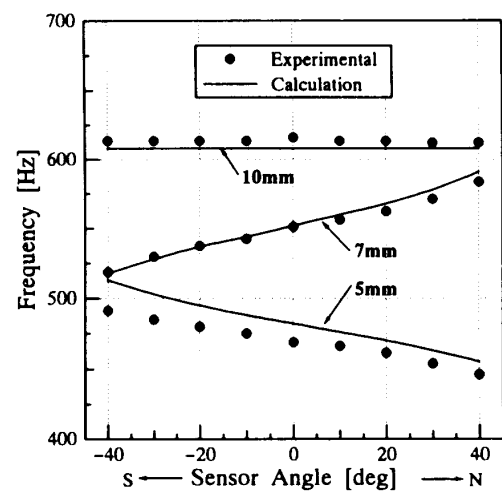


Fig.11 Antiresonance frequency with slant angle

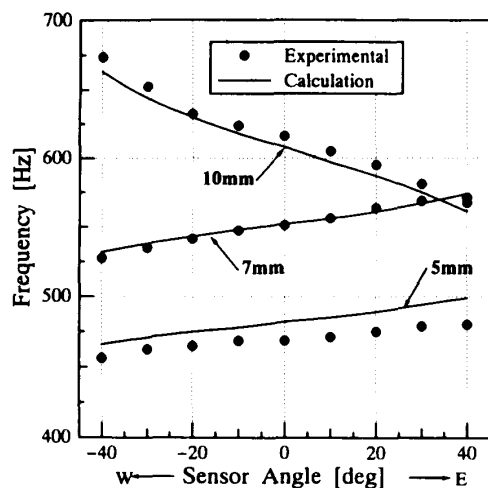


Fig.12 Antiresonance frequency with slant angle

6. 結 言

一対の音源とマイク、3つのヘルムホルツ共鳴器を用いた検出法に対し、液面レベル高さに関する実験および傾斜角度に関する実験等、基礎的実験を行い次の

結論を得た。

(1) 空洞長さ変化に対応した、明確な3つの反共振周波数が得られた。

(2) 傾斜方向及び傾斜角度に対応した、明確な3つの反共振周波数が得られた。

(3) 検出部内のヘルムホルツ空洞共鳴に対応した理論解析を行い、計算を行った結果、実験値と計算値は良く一致し、実験、理論の両面から本測定法の有効性が確かめられた。

(4) この3つの反共振周波数を利用することにより、容器内の液面レベルと傾斜角度を計算し、測定対象容器の形状から、液体残量の容量を算出することが可能である。

文 献

- (1) 一宮・遠藤, 機論, 57- 533,C(1991),332.
- (2) 一宮・遠藤・石川, 機論, 57- 541,C(1991),2888.
- (3) 坂本・一宮, 機論, 58- 555,C(1992),3259.
- (4) 一宮・石川・藤田, 機論, 60- 570,C(1994),538.