

音を利用した計測

—— 低音で測る ——

講師 鳥越一平

はじめに

音は、物理的には、空気や水などの媒質を伝わる弾性波である。音は、それが発生するメカニズムや、伝わってきた媒質等に関する様々な情報を担っている。「計測」とは、対象に関する情報を抽出する行為であるから、音に注目することによって、いろいろな計測が可能になる。

我々も「音を利用した計測」を日常的に行なっている。例えば、我々は面識のない人と電話で話しても、その声から、相手が男か女か、年配の人か若い人か、あるいは出身地がどこか、更には相手の心理状態まで、おおよその見当を付けることが出来る。これは、声という音が担っている、話し手に関する情報を、脳という偉大なコンピュータが抽出しているのである。また、室内で雨の音を聴いてその雨量を推しはかれるし、野菜を炒める音から鍋の温度を推定している。これらの例はほとんど無意識の計測行為であるが、意識的に、音を聴いて対象の情報を得ようとするのが、「音響診断」といわれる方法である。八百屋でスイカを買うときに、これを叩いてみるのは、音響診断の身近な例の一つである。また、医者は、聴診器で心音や呼吸音を聴いて、心臓や呼吸器の機能に関する情報を得る。この他、軸受や歯車などの機械の回転音からこれらの機械の異常を検知するシステム、血管の中を流れる血液が出す音から頭蓋内血管の異常を検出する試み、原子炉などの設備の異常診断システム、地震波という一種の音による地球内部の診断など様々に音が利用されている。

さて、「計測」という言葉を聞いた時に想起するのは、物差しで長さを測るとか電圧計で電圧を測るといった行為かもしれない。定量的に定義された物理量の

測定も、もちろん「計測」である。そして、このような計測に音を利用する場合、超音波が用いられることが多い。超音波を使った計測器を列挙してみると、ソナー、超音波断層像装置、超音波流速計、魚群探知機、超音波温度計、ドップラー血流計、超音波スペクトロメータ、超音波濃度計、超音波探傷装置などと非常に種類が多い。また、良く知られているように、コウモリ等のある種の動物は、超音波を利用して非常に優れた計測を実践している。一方、もっと低い音—人間に聞こえる程度の周波数の音や更に低い音—を利用した物理量の計測法はあまり開発されていない。筆者の研究室では、東京大学・先端科学技術研究センターの石井研究室と共同で、低周波の音を利用した計測法の研究を行っている。本講では、筆者らの研究のうちから、容積の測定法と流速の測定法を紹介する。

I 音響ブリッジ式容積計

1. 容積の測定

容器の容積を計るのにどんな手段があるだろうか。容器が四角い枺ならば、枺の縦・横・深さを物差しで計って容積を計算することができる。ワイングラスの容積が知りたい場合はどうしたらよいか。ワイングラスの形はなめらかな曲線を描いていて、容積を計算で求めるのは簡単ではない。しかし、グラスに水を注いでその水の量を測定すれば、簡単に容積を知ることができる。それでは、ワイングラスよりも更に複雑な形をした容器の場合はどうしたらよいか。非常に複雑な形状の容器だと、水を注いでも隅々まで行きわたらずに泡が残ったりして、正確な容積を知ることが難しくなってくる。それに、いつでも水を注ぐことができるとは限らない。入口が容器の下側についていてひっくり返せないかも知れないし、その容器が精密な装置の一部で一度水を注げば壊れてしまう場合もありうるからである。このような場合に適用できる方法の一つとして、二酸化炭素などの気体を水の代わりに使う方法がある。容器に気体を注いで（押し込んで）、どれだけの気体が入ったかを測定して、容積を計算してやるのである。しかしこの方法は、枺やワイングラスの容積を計るのに比べて、

かなり面倒な手順を必要とする。このように、容器の容積を測定することは、簡単なようで場合によっては意外に大変なのである。

容積の測定は、もちろん容器の容積を知りたい場合に行なう訳であるが、次のような場合にも役立つ。例えば、タンクの中に燃料が入っている場合に、タンクの空の部分の容積を測定すると、タンクの全容積は一定だから、燃料の残量を知ることができる。また、ある物体の比重を知りたいとき、その重さと体積を測定する必要があるが、重さの測定は容易でも体積の測定は必ずしも容易ではない。このような場合、まずあらかじめ容積のわかっている容器にその物体を入れて、余っている空間の容積（余積）を測定する。元の容器の容積からこの余積を引き算すれば物体の体積がわかるから、重さを計っておけば、この物体の比重を知ることができる。例えば牛肉の比重を計ることで、どのぐらいの霜降り肉かを推定するといった応用も可能である。なお、ここであげた燃料タンクや牛肉の例は、容積測定のために水を注ぐ訳にいかない場合である。

本節では、筆者の研究室で実験を行っている「音響ブリッジ式容積計」について説明する。音響ブリッジ式容積計は、音を利用した容積計で、今までなかった新しい方式の容積計である。また、測定手順も簡便で、色々な方面への応用が期待されるものである。

2. 原理

(1) 音を利用した容積測定

普通、容器の中には空気が入っている。この空気をピストンのようなもので押し込んで容積に変化を加えると、容器の中の圧力が高くなる。逆にピストンを引っ張る方向に容積変化を加えると、圧力は低くなる（図 I-1）。そして、同じだけ容積変化を与えたときに、圧力がどのくらい変化するかは、容器の大きさによって違ってくる。大きな容器では、少しぐらい押し込んでも殆んど圧力は変わらない。一方、同じだけ押し込んでも、元々の容器が小さいと圧力はかなり大きくなる（図 I-2）。このことを利用して、容器内の空気を押し込んだり引っ張ったりしたときの「圧力の変化」の度合いから容積を測定しようというのが、音響ブリッジ式容積計のおおもとの原理である。1. で触れた気体

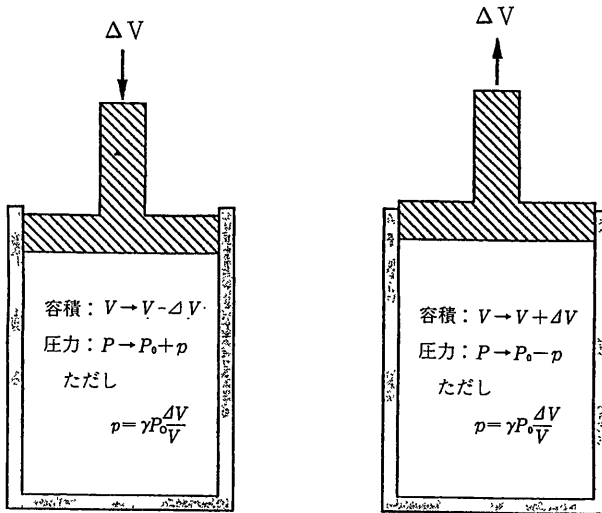


図 I-1 容器をピストンで ΔV だけ押し込むと圧力が $P = \gamma P_0 \frac{\Delta V}{V}$ だけ上昇する (γ は比熱比、断熱圧縮を仮定)。逆に、ピストンを引っ張ると圧力はさがる。

を押し込む測定法に近い考え方であるが、一方向に押し込むだけでなく、押したり引いたりして交番的な容積変化を加える点が異なっている。こうすることにより、測定手順がずっと簡単になり、また容器に小さな穴が開いていても測定可能になる。

容器内の空気を押したり引いたりするピストンとして、オーディオ用のスピーカーを使用してもよい。容器にスピーカーを取り付け、電流を流すとスピーカーのコーン紙が振動し、容器内の空気を押し込んだり引っ張ったりすることになり、これに応じた圧力の変化が容器内に発生する。スピーカーを取付けた容器は一種のスピーカーボックスの構造を持つことになり、スピーカーが振動すると、ボックスの外に音がでてくるだけでなく、ボックス内にも音が発生する。この内側の音が先に述べた「圧力の変化」にはかならない。このようにして発生させた圧力の変化(音)を測定してやれば、原理的には容器の容積がわかる。しかし実は、このままではまだ色々な問題点が残されている。例えば、

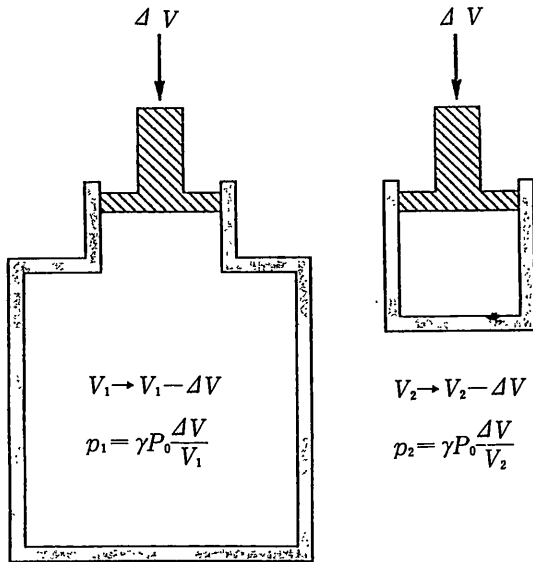


図1-2 同じだけ押し込んでも、圧力の上り方は容積によって異なる。圧力上昇の大きさは容積に逆比例する。

スピーカーを押し込んだり引っ張ったりする度合いを常に一定に保つのは簡単ではない。また、圧力の変化（音）を測定するための測定器（マイクロホン）の感度が変化したら、本当の圧力変化の大きさがわからなくなってしまう。つまり、測定の「誤差」の要因がいくつも残されているのである。これらの誤差要因を除くために、音響ブリッジ式という新しい方式を採用した。

(2) 音響ブリッジ式容積計

音響ブリッジ式容積計は図1-3に示すような構造をしている。容積を測定したい容器のほかに、もう一つ、基準になる容器を用意し、仕切り板を介して二つの容器を固定する。この基準の容器の容積 V_1 は、あらかじめ別の方法で測定しておく。測定したい容器の容積 V_2 は、この基準容器の容積と比較して、あるいはこの容器を基準にして測定される。仕切り板に穴を開けてスピーカーを取付け、また二つの容器の間を一本のパイプで接続する。スピーカーを振動させると、容器の中の空気はコーン紙によって交互に押し込まれたり引っ張られ

たりし、それぞれの容器には交番的な容積変化が加えられることになる。そして、一方の容器が押し込まれる量と他方の容器が引っ張られる量とは完全に等しい。つまり、二つの容器には、大きさは等しく方向が反対の交番的な容積変化が加わることになる。今、測定したい容器が押し込まれた状態であるとすると、この容器内の圧力は上昇している。他方、基準容器の空気は引っ張られているから、こちらの容器内の圧力は下降している筈である。ある時間たつと、今度は測定したい容器の方が引っ張られて圧力が下がり、基準

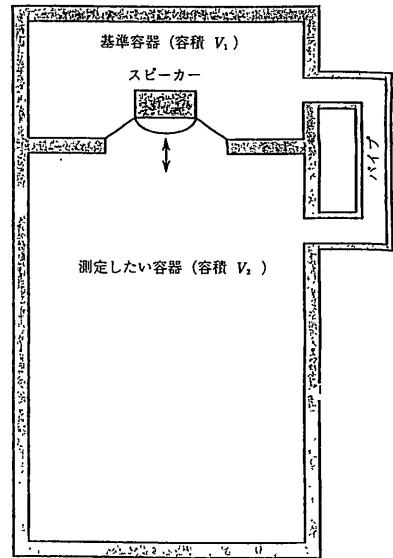


図 I-3 音響ブリッジ式容積計の構造

容器の方が押し込まれて圧力が高くなる。このように、スピーカーの振動による交番的な容積変化に応じて、それぞれの容器内には、方向が反対の交番的な圧力の変化が生じる。そして、二つの容器内の圧力変化の大きさは、それぞれの容器の容積に逆比例する。

ところで、二つの容器はパイプによって接続されており、(1)で説明した状況とは異なっている。あるいは、スピーカーで容器内の空気を押し込んでも、パイプを通して空気が移動してしまつて圧力は変化しないのではないかとと思われるかも知れない。確かに、スピーカーの振動周波数を低くして、容積変化を非常にゆっくりにすると、容器内の圧力変化は殆ど起こらない。しかし、振動周波数がある程度以上になると、慣性のために空気の移動が追いつけず、パイプがないときと同じような圧力変化が発生する。音響ブリッジ式容積計では、スピーカーの振動周波数を、このような状況になるような値に設定する。それでは、このパイプ内では圧力はどうなっているのであろうか。パイプの上端の圧力は、基準容器内の圧力に等しい。一方、下端の圧力は、測定したい容器の圧

力に等しい。そしてパイプ内の圧力は、上端から下端へと連続的に変化している。ふたつの容器内の圧力は、一方は上昇し他方は下降しているのだから、パイプの中には圧力が全く変化していない点があるはずである。このことは、時間が経過して、一方の容器の圧力が上昇から下降へ転じ、他方が下降から上昇に変化した場合でも同じで、この点では圧力が変化しない。つまり、パイプ内の圧力は、この点を支点にしたシーソーのように変化しているのである。この圧力の分布の様子を模式的に表したのが図 I-4 である。

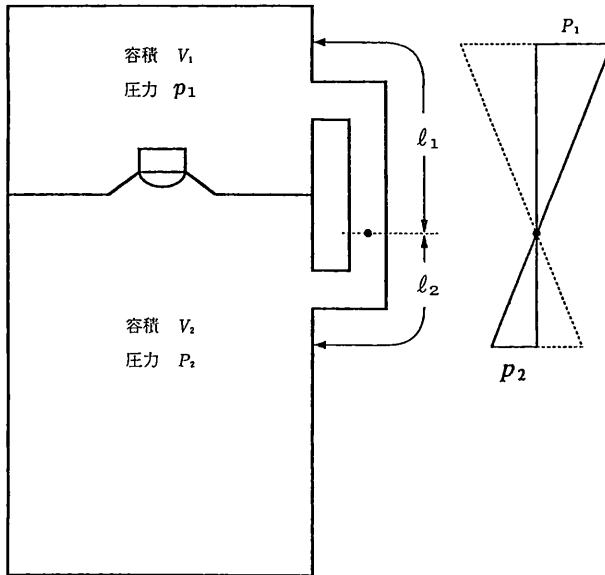
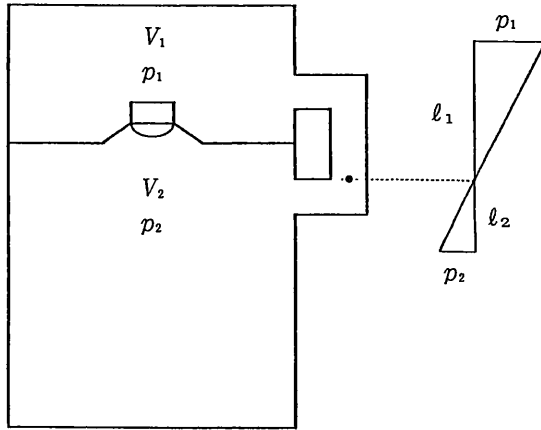
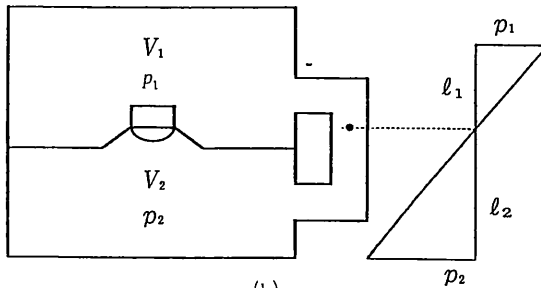


図 I-4 容器内およびパイプ内の圧力

さて、パイプの上端と下端の圧力変化の幅すなわちシーソーの振れ幅は、それぞれ基準容器および測定したい容器の容積に逆比例している。基準容器の容積は一定であるから、上端での圧力の振幅はほぼ一定になるが、測定したい容器の容積はいろいろに変わるから、場合に応じて下端の圧力振幅は変化する。このとき、パイプ内の圧力不変の点すなわちシーソーの支点の位置は下端の圧力振幅に対応して移動する（図 I-5）。つまり、圧力不変の点の位置は、測定したい容器の容積 V_2 に応じて変化する。容器の容積と圧力不変の点の位置との



(a)



(b)

図 I-5 パイプ内の圧力不変の点は、容積 V_2 の大きさによってその位置を変える。

関係は、圧力不変の点がパイプ上端から l_1 、パイプ下端から l_2 の位置にあるとしたとき

$$\frac{l_1}{l_2} = \frac{V_2}{V_1}$$

と表される。測定したい容器の容積 V_2 は、

$$V_2 = \frac{l_1}{l_2} V_1$$

となる。従って、パイプ内の圧力不変の点を見つけてその位置 (l_1 、 l_2) を測定すれば、測定したい容器の容積 V_2 を知ることができる。

(3) 等価回路

あるシステムの動作を考えると、方程式が同じになるような電気回路に置き換えて考えるということがよく行なわれる。例えば、ある物体の運動を考えると、物体に働く摩擦は、電気回路における抵抗に置き換えることができる。あるシステムを置き換えた電気回路ことを、そのシステムの等価回路と呼ぶ。

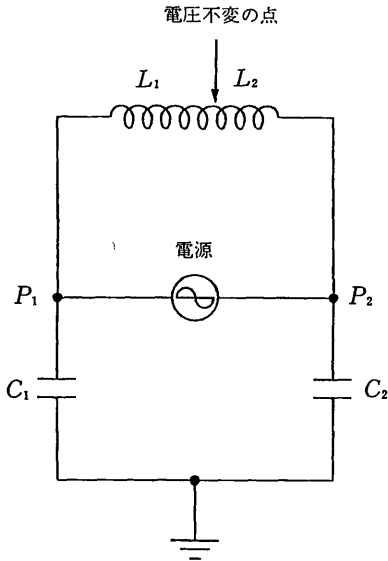


図 I-6 音響ブリッジ式容積計の等価回路

する回路である。本節で説明した容積計を、「音響ブリッジ式」と命名しているのは、この容積計の等価回路がブリッジ回路になっているからである。

3. 実験

図 I-7 に示すような実験装置を作製して、原理どおり容積測定ができるかどうかを確認した。実際の装置を写真 I-1 に示す。下側の容器に水を入れ、その量をいろいろに変えることによって下側容器の容積を変化させている。一方、マイクロホンに細いチューブを取付けてこれをパイプの中に入れ、圧力の変化しない点を探す。圧力不変の点を探索しその位置を測定するのは、マイクロコンピューターによって自動的に行なわれる。容器の容積をかえながら圧力

音響ブリッジ式容積計の装置を、等価回路に置き換えると、図 I-6 の様になる。容器がコンデンサで、パイプがコイルで、スピーカーが電源で表されている。そして、パイプ内の圧力不変の点を探すという動作は、等価回路でいえば、コイル上の電圧不変の点を探す動作に対応する。この回路は、電気インピーダンスを測定するために用いられる「ブリッジ回路」を構成している。ブリッジ回路は、簡単にしかも精度よくインピーダンス測定ができるので、電気工学の分野ではしばしば登場

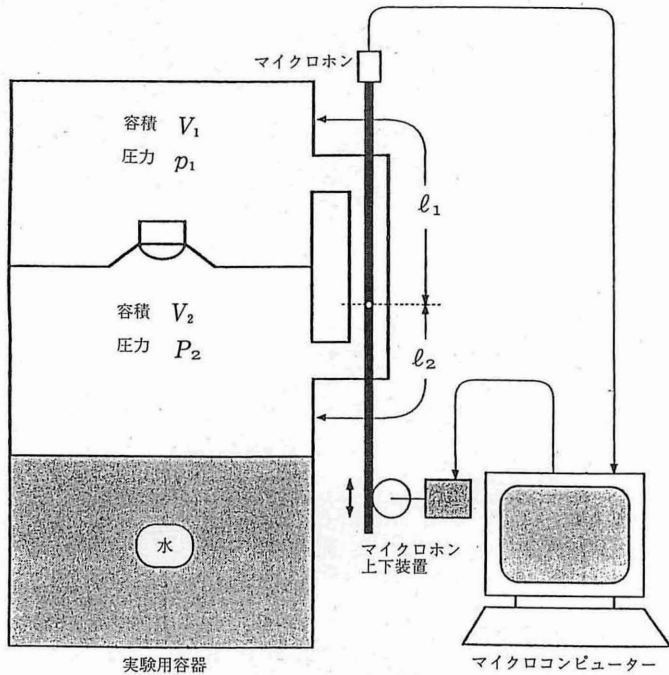


図 I-7 実験装置

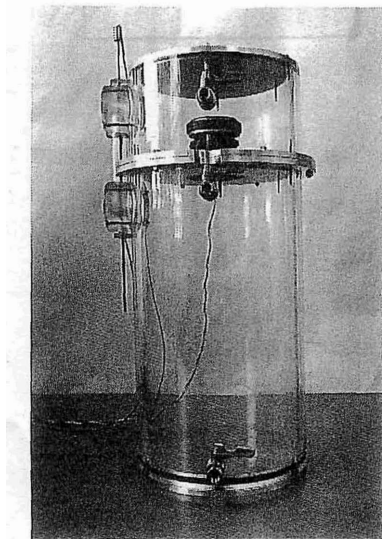


写真 I-1 実験装置。見やすいように、マイクロホン上下装置は取りはずしてある。

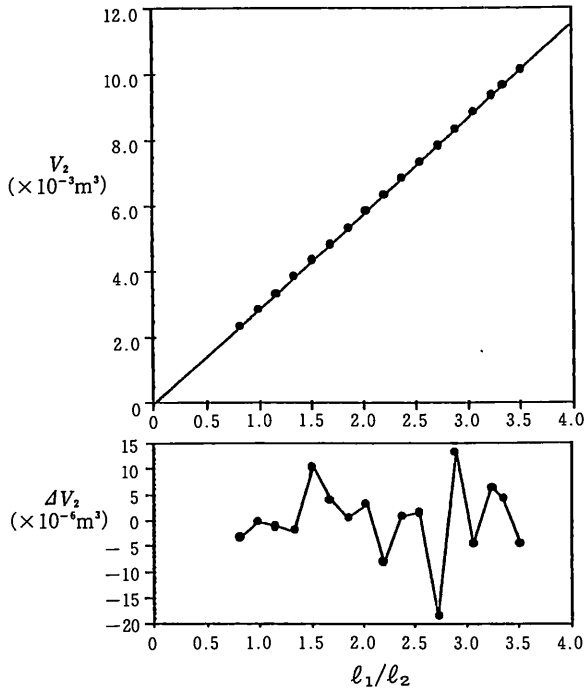


図 I-8 実験結果。下側のグラフは誤差を拡大したもの

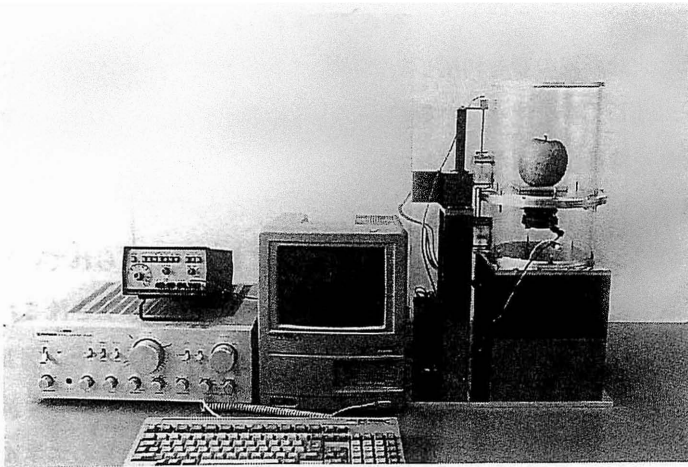


写真 I-2 リンゴの体積の測定

II 音響インピーダンス式流速計

1. 音を用いた流速測定

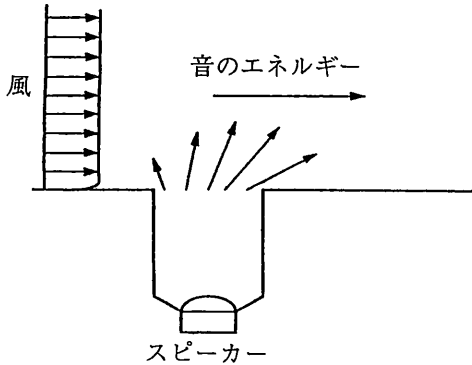
空気・都市ガス・水・油など流体が流れる速度を流速と呼び、流速に流れの断面積をかけた量つまりどれだけの流体が流れたかを示す量を流量と呼ぶ。流速や流量の計測は非常に重要な計測の一つである。一寸周りを見回しても、我々は水道水や都市ガスを毎日使っており、これらをどれだけ使用したかに応じて一すなわち水道水や都市ガスが各家庭に流れ込んだ「流量」に応じて、料金が請求されている。各家庭には、水道水と都市ガスの流量を測定する装置が取り付けられているわけである。この他、気象観測から工業計測まであらゆる所で流速・流量の計測は行なわれている。

重要な計測対象であることから、流速・流量にはいくつもの計測法が考案されている。しかし、この事は逆に、一つの万能な方法は無いということでもある。それぞれの方法にはそれぞれの長所・欠点があり、計測の状況に応じて、適切な方法を選ぶということになる。超音波を利用した流速計も広く使われている。超音波式流速計は、超音波が流れの上流から下流へ伝わるときと、下流から上流へ流れに逆らって伝わるときとで、伝わる速さ一音速が異なることを利用して流速を測定している。

本節では、低周波の音を利用した「音響インピーダンス式流速計」について説明する。同じく音を使っているが超音波式流速計とは異なる原理に基づく方法で、新しい特長を持った流速計である。

2. 原理

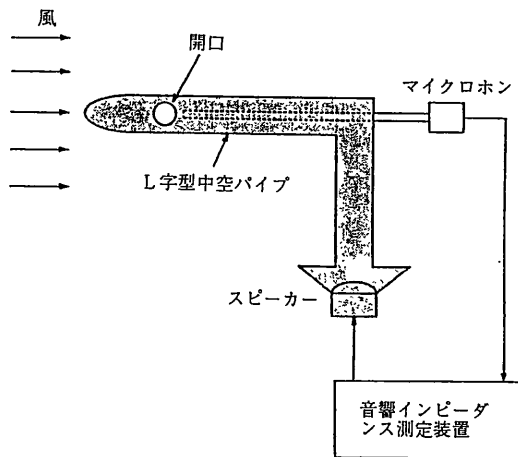
空気や水など音を伝える媒質が流れていると、媒質に貯えられている音のエネルギーも一緒に流される。つまり、音のエネルギーが風で吹き流されるという現象が起こるのである(図Ⅱ-1)。このことを逆に利用すると、図Ⅱ-1の様にスピーカーなどで音を発生させ、この時に音のエネルギーが吹き流される割合から、流れの速度を知ることが可能になる。それでは、音のエネルギーが吹き流される割合はどのようにして測定すればよいのだろうか。これには幾つ



図Ⅱ-1 風にさらされた音響管開口

かの方法が考えられるが、その内の一つがここで採用した「音響インピーダンス」を測定する方法である。音響インピーダンスは、ある場所における空気の振動速度と圧力（音圧）の関係を表す量で、音響インピーダンスから音のエネルギーの流れを知ることが出来る。

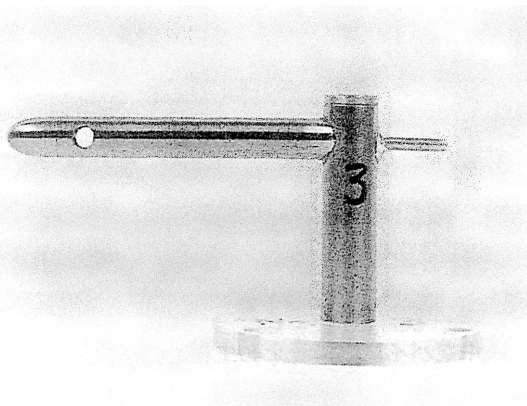
図Ⅱ-2に示すように、スピーカーにより中空パイプ内に音を発生させる。パイプの一端所に開口を穿ち、風の中に置くと、開口からは音のエネルギーが吹き流される。風速が小さければエネルギーの流される割合は小さく、風速が大きければ割合は大きくなる。この時、開口の音響インピーダンスも、風速に対応して変化する。開口の圧力をマイクロホンで検出し、処理を行って開口の音響インピーダンスを測定すれば、風速を知ることが出来る。



図Ⅱ-2 音響インピーダンス式流速計の原理図

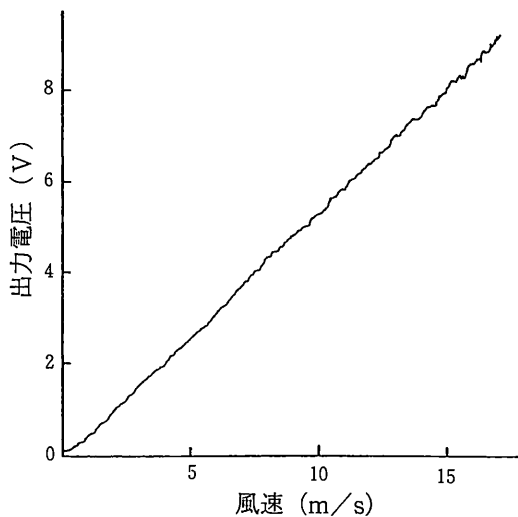
3. 実験およびシミュレーション

理論どおり音響インピーダンスから流速を測定できるか確かめるため、試作装置を作って実験した。写真Ⅱ-1は、作成したL形パイプの写真である。パ



写真Ⅱ-1 L字形音響管

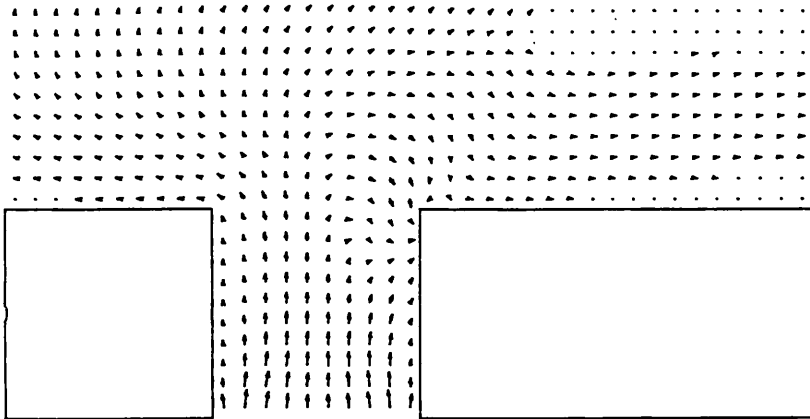
イプ側面に開口が穿たれている。このパイプにスピーカーとマイクロホンを取り付け、風洞内に置いて、音響インピーダンスと流速の関係を調べた。その結



図Ⅱ-3 風速と出力の関係

果の一つが図Ⅱ-3のグラフである。グラフがほぼ直線になっているのは、理論が正しかったことを示すものである。

音のエネルギーが風で流されると言ったが、音のエネルギーは目に見えない。実験結果は、確かにそういう事が起っていることを示しているが、他の手段で確認する事は出来ないだろうか。そこで、コンピューターによるシミュレーションという手法を使って、音のエネルギーを目に見えるようにしてみよう。コンピューターシミュレーションとは、現実の現象の方程式をコンピューターで解き、コンピューターの中で現象を模擬してみる手法である。この方法で音のエネルギーの流れを描いたのが、図Ⅱ-4である。風は図の左側から右向きに流れており、下の溝から出てきた音のエネルギーが、風によって下流に流されている様子がわかる。



図Ⅱ-4 開口のまわりの音響エネルギーの流れ