

振動ピト一管—質量流量の新しい測定法

石 井 泰

Vibrating Pitot Tube—A New Approach to Mass Flow Measurement

By

Yasushi ISHII

Abstract: A new method to measure the mass flow rate of fluid is described. A Pitot tube placed in the flow is vibrated along the direction of the flow with a constant frequency. A small pressure variation having the same frequency is produced at the port of the Pitot tube by the interaction of the velocity of the vibration and that of the flow. This pressure variation is picked up by a condenser microphone attached to the bottom end of the Pitot tube. Using a phase-sensitive detector the output of the microphone is converted to a DC voltage, which is proportional to the flow velocity multiplied by the fluid density. In order to verify the principle, preliminary experiments using the air as the measured fluid were done. Based on the results of the experiments, a measuring device was made and some measurements were taken, which showed the effectiveness of this measuring method.

概 要

この論文で報告されている質量流量の測定法は、流れの中に置いたピト一管に、流れの方向の正弦波の振動を与える、そのときベルヌイの定理によってピト一管の動圧導入孔のところに発生する、振動と同じ周波数の圧力変動から、流体の密度 ρ と流れの速さ U との積、すなわち単位断面積当たりの質量流量 ρU を測定するもので、この値がわかれば、それに流体の流れる管の断面積と管内の流速分布によって定まる係数を乗することにより、全質量流量が求められるというものである。

この振動ピト一管においては、その内部にある流体が振動の加速度を受けることにより、流体密度 ρ に比例した大きさの同じ周波数の圧力変動が同時に発生し、前記の振動速度による ρU に比例した大きさの圧力変動といっしょに、ピト一管の根元で圧力検出器によって検出されるが、これら二つの圧力変動成分はたがいに 90° 位相が異なっているので、検出器の出力信号を同期整流回路で処理することによってたがいに分離され、振動速度による圧力変動成分の大きさから ρU が、振動加速度による圧力変動成分の大きさから ρ がそれぞ

れ独立に求められる。

圧力検出器として音響計測用のコンデンサマイクロホンを用い、空気の流れについて行った実験により、以上の動作原理が成りたつことを確かめ、その結果に基づき専用の測定装置を試作し、二、三の測定を行って好結果を得た。

1. まえがき

今日工業的に用いられている流量計の大部分は、容積流量計のように単位時間に流れる流体の体積 — 体積流量 Q — を測定するものか、あるいはオリフィス流量計のように、流体密度を ρ とするとき、 ρQ^2 に比例した出力を生ずるもののかのいずれかである。流量計測の最終的な目的は、通常質量流量 ρQ を求めることがあるが、これらの流量計においては、流体密度を別に測定し、この値と流量計の出力とから計算により間接的に質量流量を求めるということが行われている。

ここに報告する質量流量の測定法は、流れの中に置いたピトー管を振動させ、そのときピトー管の圧力導入口のところで発生する動圧の変動から、流体密度 ρ と流速 U との積、すなわち単位断面積当たりの質量流量 ρU を直接に測定するもので、この値がわかれば、それに流体の流れる管の断面積と管内の流速分布によって定まるある一定の係数を乗ずることにより、全質量流量 ρQ が求められるというものである。

このようにそれ自身だけで質量流量を測定できる直接形質量流量計としては、熱式のものがガスクロマトグラフなどに広く用いられている。しかしこの熱式質量流量計は流体の比熱や熱伝導率などに依存しているので、流体の組成が変化するようなときには使用できず、厳密な意味では質量流量を測定しているとはいひ難い。流体の組成などにはかかわりなく直接に質量流量を測定する方法としては、流体の流れる 2 つの絞り機構にある一定の体積流量を差動的に与えたときに生ずる差圧を検出する方式 [1][2][3]、流体によって伝達される角運動量を検出する GE 社の方式 [4]、Li-Lee の質量流量計として知られているコリオリの力を利用するもの [5]、あるいは環状の流路を流れる流体のジャイロ効果を利用するもの [6][7][8] などがある。また流れに平行において円板の回転振動の減衰係数の変化を利用する方法 [9] も報告されている(注 1)。しかしながらいずれも、機構的な複雑さなどの点から、実用上決定的な方法とは未だなりえていないという状態にある。

この論文の振動ピトー管も流体の組成などには無関係に直接に質量流量を測定するもの一つであるが、その動作原理は上にのべた諸方法とは異なる。ベルヌイの定理に立脚しているという点では本方式は上記の差圧式質量流量計と共通性があるが、差圧式のように流れの静圧を検出するのではなく、ピトー管を用いて流れの全圧をとりだしているので、差圧式の場合にくらべてより単純にベルヌイの定理が成り立ち、さらに圧力の変動を検出するというところから、マイクロホンを圧力検出器として利用しうるなど種々の利点を生ずる。また機構的にも従来の方法より簡単である。

(注 1) 質量流量は機械インピーダンスと同じ次元を有する物理量であるから、その測定には外部からのなんらかの働きかけが必要である。

管内の流れの流速分布についてはすでに多くの研究がなされているので、 ρU の値から管内を流れる全質量流量を求めるることは既知のことがらと考え、本研究では振動ピトー管によって ρU の値が正しく求められることを確認するにとどめたが、以下この方法の動作原理や実験結果などについて説明する。

2. 動作原理および実験装置

Fig. 1 および **Photo. 1** に示すように、風胴から吹き出す流速 U の空気の流れの中にピト一管を置き、これに流れの方向に $v(t)$ なる速度の微小振動を与えたとすると、これは流速が $U+v(t)$ となることに等価であるから、ピト一管の圧力導入孔に生ずる全圧は

$$p_0 + \frac{1}{2} \rho [U + v(t)]^2 = p_0 + \frac{1}{2} \rho U^2 + \rho U v(t) + \frac{1}{2} \rho [v(t)]^2 \quad (1)$$

となる。ここで p_0 は流れの静圧（大気圧）であるが、いま p_0 および U は一定とし $v(t)$ によって生ずる圧力変動 $p_v(t)$ のみを考えると、 $v(t)$ の2次微小項を無視して近似的に

$$p_v(t) = \rho U v(t) \quad (2)$$

と表わされる（注2）。したがって $v(t)$ が既知であれば、 $p_v(t)$ から ρU の値を知ることができる。

実際にはこのほかに、ピト一管内部において振動の加速度によって圧力変動を生ずる。す

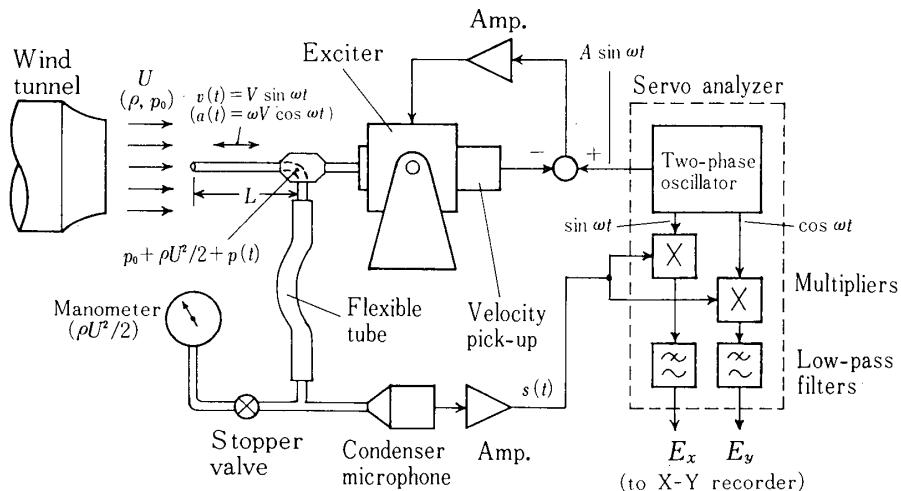


Fig. 1 Experimental setup

（注2）後述するように $v(t)$ が正弦波の場合は、 $[v(t)]^2$ による圧力変動の成分は $v(t)$ による成分と周波数が異なりフィルタ等で分離することができるるので、 $v(t)$ が微小という条件は除かれる。

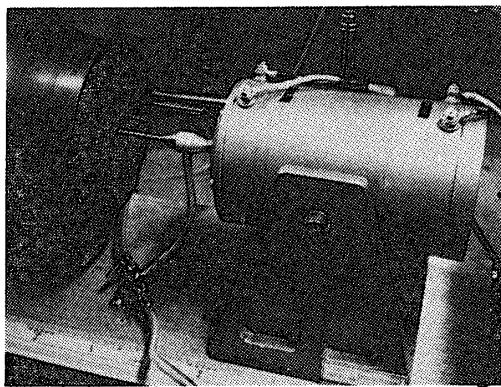


Photo. 1 Vibrating Pitot tube placed in front of the flow outlet

なわち振動加速度を $a(t)$, ピトー管の首の部分の長さを L とすれば, $a(t)$ による圧力変動 $p_a(t)$ は

$$p_a(t) = \rho L a(t) \quad (3)$$

となる. したがってピトー管の根元で検出される圧力変動を $p(t)$ とすると

$$p(t) = p_v(t) + p_a(t) = \rho U v(t) + \rho L a(t) \quad (4)$$

となる. しかし一般に $v(t)$ と $a(t)$ は直交しているから(注3), これら 2 つの圧力変動成分をたがいに分離することは可能である.

Fig. 1においてピトー管は小形加振器にとりつけられているが, 速度ピックアップとパワー増幅器からなるサーボ系の働きにより, 2 相発振器から与えられる一定振幅の正弦波の基準信号 $A \sin \omega t$ と同相同波形の速度

$$v(t) = V \sin \omega t \quad (5)$$

で振動する. ここで V は速度の振幅である. またこのときの加速度は,

$$a(t) = \omega V \cos \omega t \quad (6)$$

である.

ピトー管に生じた圧力変動 $p(t)$ は可撓管(ビニール管)を通して圧力検出器として用いられる音響計測用コンデンサマイクロホンに導びかれる. このマイクロホン(Brüel & Kjaer, Type 4133)はいわゆる 1/2 インチ形のものであるが, 振動板の前面からケース側面を通して背圧室に圧力平衡用の毛細管が通じている. したがって静圧 p_0 や一定流速に対する動圧 $\rho U^2 / 2$ は振動板の表裏で平衡する. 増幅器も含めたマイクロホン系全体の低域カットオフ周波数は後述するように約 20 Hz であるので, 結局数十ヘルツ以上の周波数の振動をピトー管に与える場合には圧力変動 $p(t)$ のみが検出される.

検出された圧力変動は増幅されて電気信号 $s(t)$ となり, 前記の 2 相発振器からえられる $\sin \omega t$ および $\cos \omega t$ の参照信号と掛算され, それらの積は低域フィルタで平滑されて

(注3) 一般に信号 $z(t)$ とその微係数 $z'(t)$ の積の平均はゼロである.

それぞれ直流電圧 E_x, E_y となる。要するに2相発振器と掛算器および低域フィルタは同期整流回路を構成しており、マイクロホン出力 $s(t)$ を、速度サーボ系に与えた基準信号 $A \sin \omega t$ に同相の成分とそれと直交する成分に分解してそれぞれの大きさを示すとともに、ピトー管の振動とは無関係な周波数成分を除去して信号対雑音比を向上させるという役割を果している。実際には、これらの信号処理回路は、研究室で試作したクロススペクトル分析計 [10] をサーボアナライザとして働かせることにより構成した。なお可撓管の下端に接続した圧力計は動圧 $\rho U^2/2$ を別途に測定し、その読みによって流速 U を所定の値に調整するためのものである。

Fig. 2 は $E_x - E_y$ 面におまるベクトル図であるが、最初流れのない状態でピトー管を一定周波数で振動させると加速度による圧力変動

$$p_a(t) = \rho L \omega V \cos \omega t \quad (7)$$

が発生し、それに応じてマイクロホン出力の加速度成分 $s_a(t)$ が生ずる。 $s_a(t)$ はベクトル \vec{OQ} で表わされるが、このベクトルは加速度ベクトルの方向、すなわち E_y 軸に対して、マイクロホンと増幅器における位相進み角度 θ^0 だけ進んでいる。この状態において流速 U をピトー管に与えると振動速度による圧力変動

$$p_v(t) = \rho U V \sin \omega t \quad (8)$$

が発生し、それに応じてマイクロホン出力に速度成分 $s_v(t)$ が生じ、全体としては

$$s(t) = s_a(t) + s_v(t) \quad (9)$$

なる信号がえられる（実際にはこれに雑音が加わる）。 $s_v(t)$ は $s_a(t)$ に対して位相が 90° 遅れているので、 $s_v(t)$ に対応するベクトルは \vec{QP} のようになり、結局 $s(t)$ に対応するベクトル \vec{OP} は2つの直交するベクトルの和として

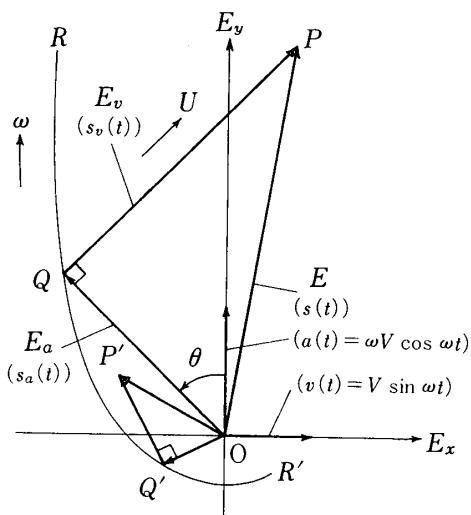


Fig. 2 Vector diagram

$$\vec{OP} = \vec{OQ} + \vec{QP} \quad (10)$$

と表わされる。そしてこのうち \vec{QP} の長さ E_v が $p_v(t)$ の大きさを表わし、それが ρU に比例して変化するということになる。

なお RR' は $U=0$ で振動の速度振幅 V を一定に保ちつつ加振周波数 ω を変えたとき（加速度の振幅は ω に比例して変化する）のベクトルの先端の軌跡であり、前述の場合とは別の振動周波数においては、たとえば直角三角形 $OP'Q'$ で表わされるようなベクトル図となる。

以上にのべた動作原理の説明は、定常流におけるベルヌイの定理が成りたつことを前提条件としたものである。しかし実際にはピトー管は振動しているのであるから、上記の前提条件は厳密には成り立たない。このくい違いがどの程度影響するかについては一応検討しておく必要がある。

ピトー管のような円柱形の物体が、流体中でその軸方向に任意の運動をするときの先端における圧力分布を理論的に求めることは困難であるが、球体については、それが非圧縮性完全流体の中で任意の運動をするときの表面の圧力分布が理論的に与えられている [11]。それを適用すると、流速 U の流れの中でその流れの方向に速度 $v(t)$ (加速度は $a(t)$) で運動する球のよどみ点における圧力 $p_s(t)$ はつきのようになる。

$$p_s(t) = p_0 + \frac{1}{2} \rho U^2 + \rho U v(t) + \frac{1}{2} \rho [v(t)]^2 + \frac{1}{2} \rho r a(t) \quad (11)$$

ここで p_0 は静圧、 r は球の半径である。そこでピトー管の先端の圧力導入孔に、管と径を同じくする球をはめこんだと想定すれば、この式で振動するピトー管の先端の圧力を算出しても大きな誤りはないであろう。

上式の第4項までは(1)式と全く等しい。最後の第5項が定常流におけるベルヌイの定理からのずれの影響であるが、これと(3)式を比較すると、この影響は、ピトー管先端において、 $r/2$ なる厚さの空気層が付加質量として $a(t)$ なる加速度でピトー管といっしょに振動することであることがわかる。いいかえれば、これは単にピトー管の首の長さ L がその直径の $1/4$ だけ実効的に長くなることと同じで、いま求めようとする $\rho U v(t)$ なる圧力変動成分に対してはなんら影響しない。

3. 実験結果

Fig. 3 は電圧 E_x , E_y を X-Y レコーダの入力とし、 30°C , 1 atm の空気 ($\rho = 1.17 \text{ kg/m}^3$) の流れについて実際にえられたベクトルの先端の軌跡の一例で、加振周波数 $\omega/2\pi = 16 \text{ Hz}$, 32 Hz , 55 Hz の3種類について流速 U を連続的に変化させたときのものである。また Fig. 2 の RR' に相当する軌跡も描かれている。使用したピトー管は外径 4 mm の薄肉ステンレス管で作られており、その首の部分の長さ L は 43 mm である。またこの実験例では速度振幅 V は 32 cm/s としたが、 $\omega/2\pi = 55 \text{ Hz}$ の場合の加速度振幅 ωV は 110 m/s^2

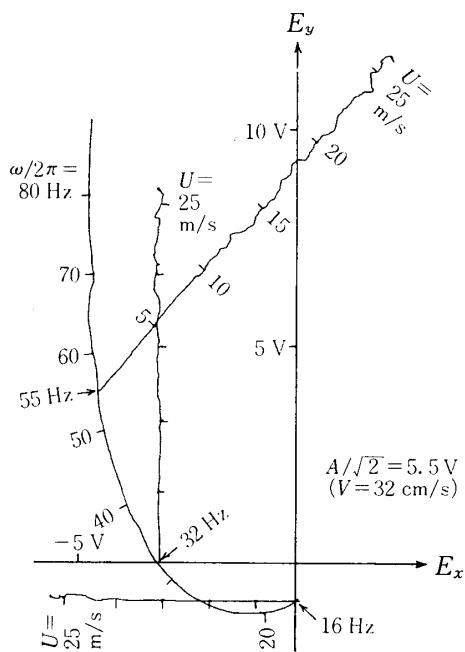


Fig. 3 Vector locus

(約 $11 g$), 变位振幅 V/ω は 0.9 mm である。

Fig. 4 は Fig. 3 のベクトル軌跡から、振動速度による成分のベクトルの長さ E_v を読みとてグラフにしたもので、 E_v が U に比例して増加することを示している。点線は 1000 Hz の音に対するマイクロホン単体の感度から理論的に計算したものである。既知の大きさの正弦波圧力変動を与えて別に測定した、增幅器を含むマイクロホンの周波数特性は **Fig. 5**

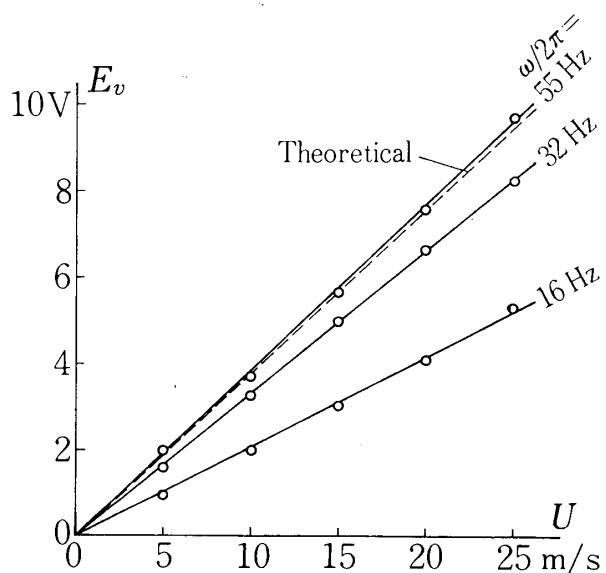


Fig. 4 Relation between flow velocity and the magnitude of the component due to the vibration velocity

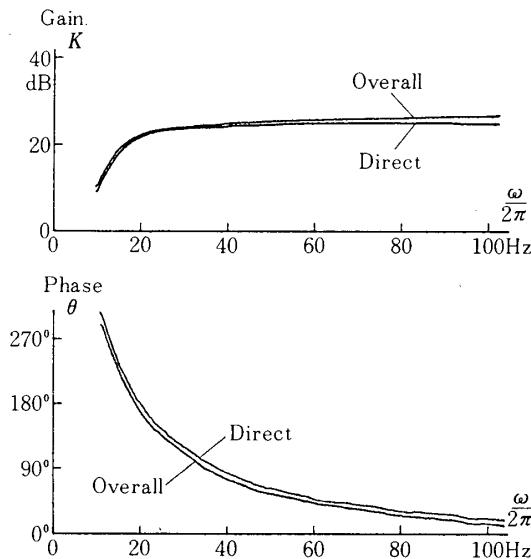


Fig. 5 Frequency characteristics of the condenser microphone
 (Direct—Mic. +Amp.
 (Overall—Pitot tube +Flex. tube +Mic. +Amp.))

に示すとおりであるが、Fig. 4において $\omega/2\pi = 32 \text{ Hz}$ および 16 Hz のときの E_v の値が理論値より小さくなるのは、低周波域におけるマイクロホンと増幅器のゲインの低下による。 $\omega/2\pi = 55 \text{ Hz}$ の場合にはゲイン低下もなく、また後述するようなピトー管の圧力導入孔からマイクロホンまでの管の共鳴の影響も小さく、マイクロホン本来の感度がえられている。Fig. 3 と Fig. 4においては、マイクロホン単体の感度を用いて換算したとき、 1 V の電圧が 1 Pa (水柱約 0.1 mm) の振幅の正弦波圧力変動に対応するようになっている。 $\omega/2\pi = 55 \text{ Hz}$ の場合についてみると $U = 25 \text{ m/s}$ で E_v は 9.7 V であるが、 55 Hz ではほぼ理論値通りの大きさのマイクロホン出力がえられていることからすれば、これは振動速度による圧力変動 $p_v(t)$ の振幅 ρUV が 9.7 Pa であることを示している (このときの動圧 $\rho U^2/2$ は 366 Pa)。この例からも明らかのように、ピトー管の振動によって生ずる圧力変動はきわめて微弱で、通常の圧力変換器ではほとんど検出不可能であるが、音響用マイクロホンにとってはこれは十分な大きさである。ちなみに 9.7 Pa の圧力振幅は音圧レベルで約 110 dB (注4) である。

Photo. 2 はマイクロホン出力 $s(t)$ の波形の一例であるが、これをみると 55 Hz の信号成分にそれと同程度の大きさの雑音が重畠していることがわかる。この雑音の一つの成因は風胴から吹き出す流れの不規則な乱れである。この乱れによる流速変動を $u(t)$ として、熱線風速計によってその絶対値の平均 $|u(t)|$ を測定して平均流速 U との比をとってみたところ、 U の大きさにかかわらずほぼ 1.5% であった。流速変動 $u(t)$ はピトー管の振動速度 $v(t)$ と同等で、その影響は $v(t) = V \sin \omega t$ に不規則な振動速度 $u(t)$ が重畠したことに等価である。したがって $|u(t)|$ が U にはほぼ比例することを考え合せれば、 U が大きくなれば $|u(t)|$ も大きくなる。

(注4) これは乗用車の警笛を 1 m の距離で聞いたときの音の強さにはほぼ相当する。

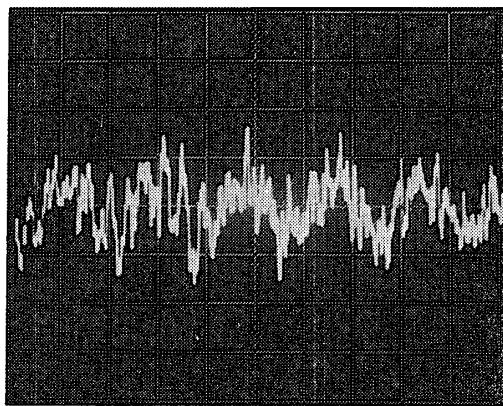


Photo. 2 Waveform of $s(t)$: Horizontal—10ms/div.
($U=20\text{m/s}$, $V=32\text{cm/s}$, $\omega/2\pi=55\text{Hz}$)

なるにつれて $s(t)$ の信号対雑音比は小さくなることになる。Fig. 3において、 U の大きいところでベクトル軌跡が乱れているのはこれによるものである。この実験においては Fig. 1 の同期整流回路の低域フィルタの時定数は 1s であるが、この平滑時定数を大きくすれば上記の軌跡の乱れを小さくすることはできる。しかしそれは一方で測定器としての応答性を悪くすることになるので、両者のかね合いが必要である。

Fig. 6 は $s(t)$ のパワースペクトルで、条件は Photo. 2 の場合と同じである。A で示したスペクトルのピークは 55 Hz の信号成分である。C および D のピークは風胴のファンの周期的な回転騒音である。流速変動 $u(t)$ による圧力変動は本来なだらかな形の広帯域スペクトルを有すると考えられるが、ピトー管の圧力導入孔からマイクロホンに至る管の共鳴によって、ある特定の周波数の成分のみが強調される。この管の全長はほぼ 40 cm であるが、音の波長を λ とすると、この音響径路の全長が $\lambda/4, 3\lambda/4, 5\lambda/4, \dots$ となるような周波数の音に対しては管内に定在波ができる共鳴する。その周波数は 210 Hz, 630 Hz, 1050 Hz, ……と計算される。実際の共鳴周波数は、音響径路の途中にストップバルブへ至る側管等が存在するために上記の計算値とは若干異なるが、いずれにせよ B および E のピークはこの共鳴による音響系の周波数特性を表わしているものと考えられる。

実験はこのほかに、振動の速度振幅 V を変えた場合と、ピトー管の首の部分の長さ L を

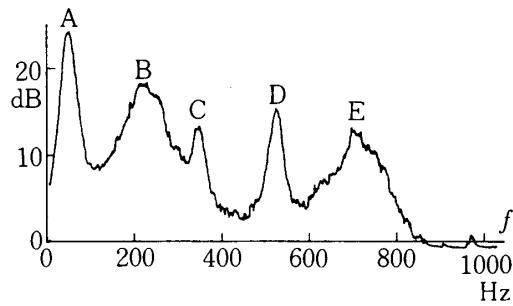


Fig. 6 Power-spectrum of $s(t)$

変えた場合についても行ったが、いずれも予想どおりの結果がえられた。加振周波数 $\omega/2\pi$ を 55 Hz で一定に保ち、2相発振器から加振器の速度サーボ系に与える基準正弦波信号の振幅 A を変えて速度振幅 V をえた場合のベクトル軌跡は **Fig. 7** に示すとおりであるが、この場合には Fig. 2 の三角形 OPQ が相似形を保ったまま V に比例してその大きさを変える。ピトー管の首の部分の長さを変えた場合については、Fig. 3 および Fig. 7 の場合には $L = 43\text{ mm}$ であったが、そのほかに $L = 13\text{ mm}$, 73 mm のもの（外径はいずれも 4 mm ）について実験した（注5）。その結果 **Fig. 8** に示されているように、マイクロホン出力の加速度成分 $s_a(t)$ の大きさは L にほぼ比例して変化し、また速度成分 $s_v(t)$ の大きさは L にほとんど影響されないことが確認された。なお流体密度 ρ をえたときの実験については次節で説明する。

4. 測 定 裝 置

Fig. 1 の実験装置は信号の変化の様子を調べるなど現象の解析には適しているが、 ρU の値を求めるには X-Y レコーダで描かれた軌跡の上でいちいちベクトルの長さを測らなくてはならない。そこでデモンストレーションもかねて、 ρU の値をメータで直読できる **Photo. 3** に示すような測定装置を試作した。またこの装置では、マイクロホン出力の加速度成分 $s_a(t)$ の大きさを測定して (7) 式の振幅 $\rho L \omega V$ を求め、これから流体の密度 ρ も ρU と一緒にメータで表示するようにした。

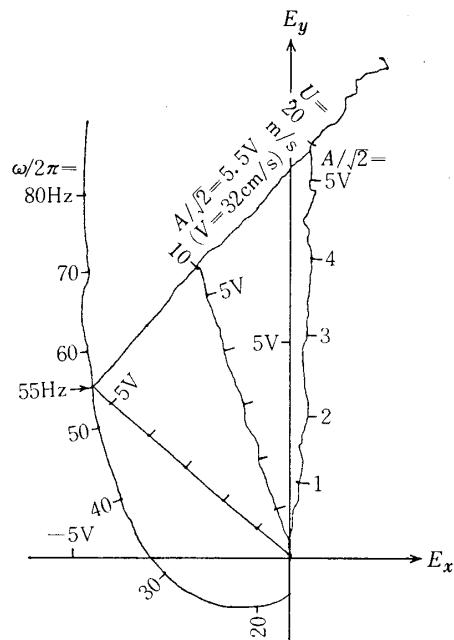


Fig. 7 Vector locus for the change of the vibration amplitude

(注5) ここでは、前節の最後に説明した L の実効長が少し長くなることは考慮に入れていない。

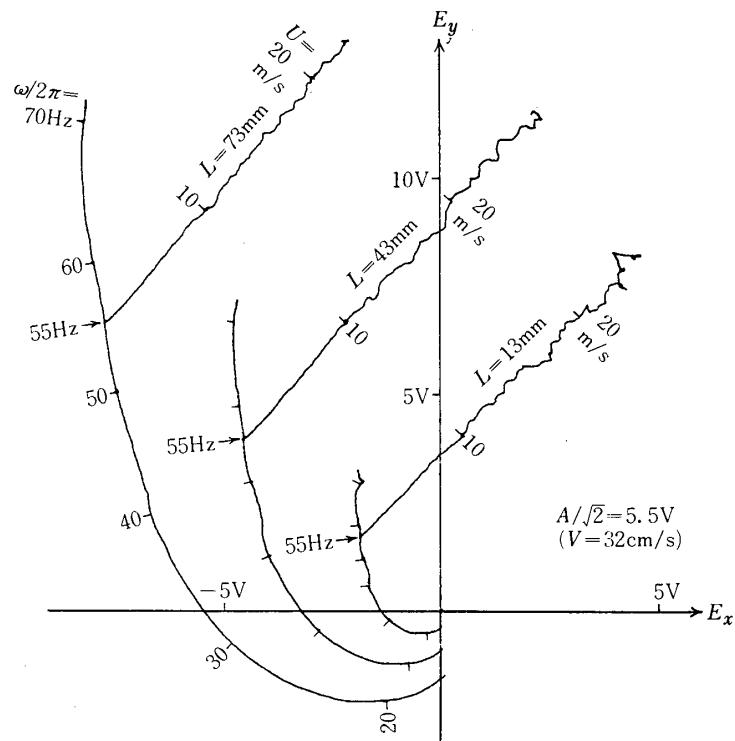


Fig. 8 Vector loci for various length of the Pitot tube

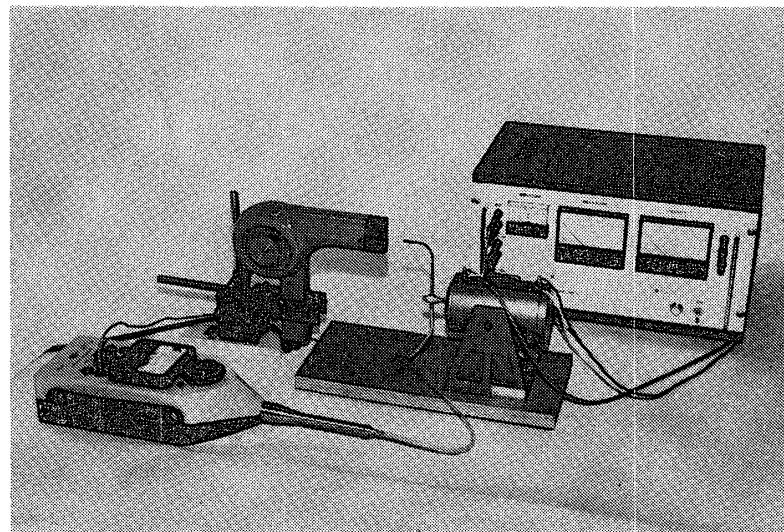


Photo. 3 Measuring device

測定装置の回路図は **Fig. 9** であるが、この装置では加振器はパワー増幅器を使用せずに電源周波数の低電圧交流で直接駆動するようにした。したがって加振周波数は 50 Hz に固定されている。そして速度ピックアップからえられる振動周波数の正弦波信号を移相回路に通して θ° および $\theta^\circ + 90^\circ$ だけ位相を進めてそれぞれ $s_v(t)$ および $s_a(t)$ と同相の信号にして 2 つの掛算器の入力とし、マイクロホン出力 $s(t)$ との掛算を行う。掛算器の出力は時定数約 2 s の低域フィルタで平滑されるが、これらの平滑された電圧は $s_v(t)$, $s_a(t)$ の大きさを表わしており、それぞれ電圧計により ρU および ρ の値として表示される。これらの電圧はまた、出力端子からとりだして記録計などに接続できるようになっている。なお速度ピックアップからえられる正弦波信号を、移相回路の入力とするのとは別に、二乗検波し電圧計で表示して振動の速度振幅を監視するとともに、この電圧を割算器に入力してマイクロホン出力 $s(t)$ を除することにより、電源電圧変動などによる速度振幅の変化の影響を補償するようにしてある。コンデンサマイクロホンやその増幅器などそのほかの部分は Fig. 1 と同じである。

以上に説明した測定装置の ρ と ρU の目盛を常温において既知の流体密度と流速によって較正したのち、これを用いてヘアドライヤの吹出口における ρU の測定を行った。吸込口の開度を変えることによって吹出す空気の温度と流速を変えることができるが、**Fig. 10** はその結果の一例である。図の横軸は動圧 $\rho U^2 / 2$ 、サーミスタ温度計で測った流体温度およびそのときの大気圧から計算した ρU の値であり、縦軸は測定装置の ρU の読みであるが、この結果から温度が変って密度 ρ が変化した場合にも正しい ρU の値がえられることがわかる。なお **Fig. 11** はヘアドライヤ吹出口における温度と流速を時間経過とともに変え

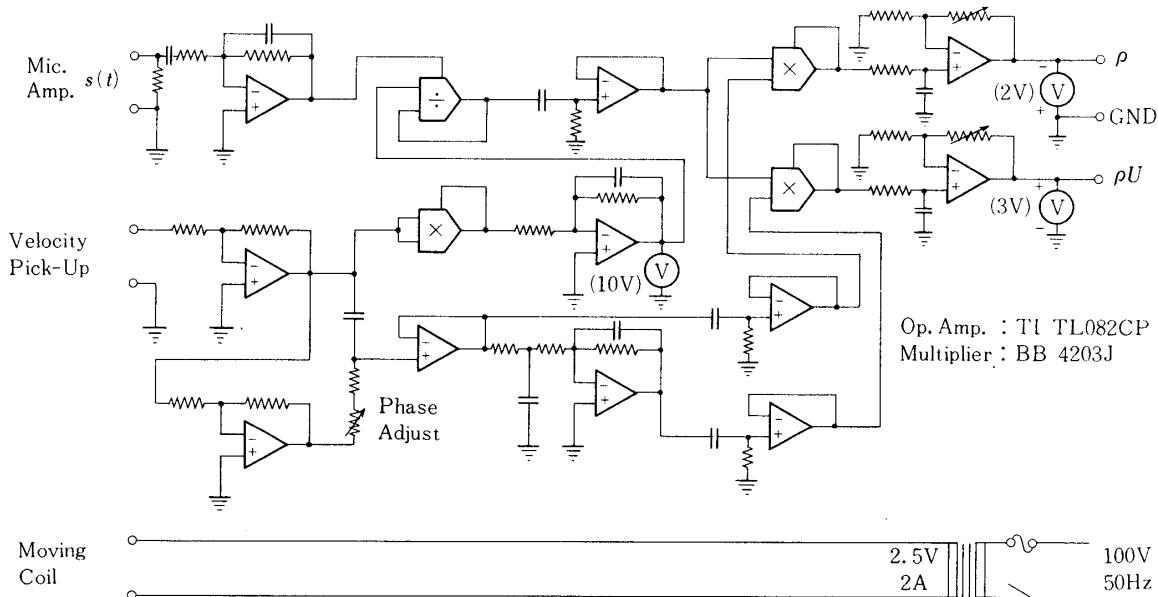


Fig. 9 Circuit diagram of the measuring device

たときの測定装置の出力電圧の記録である。

振動ピトー管の動作原理と実験結果は以上のとおりであるが、これを実際に使用するときに考慮すべき点などについて一、二つけ加えておく。

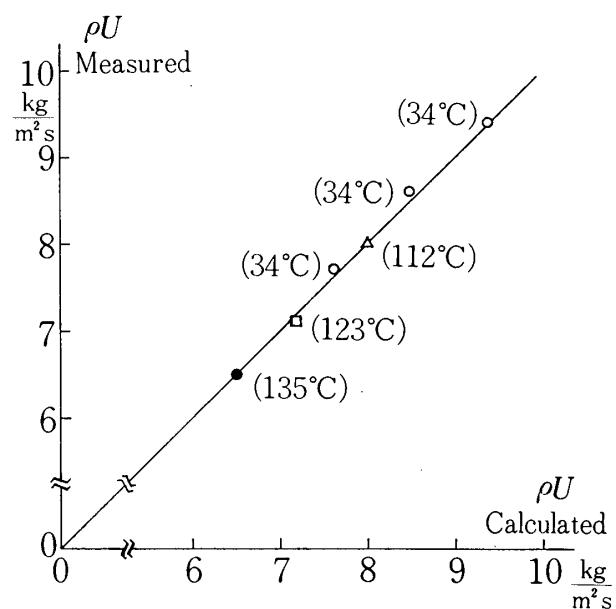


Fig. 10 Output of the measuring device for the air flow of various temperature

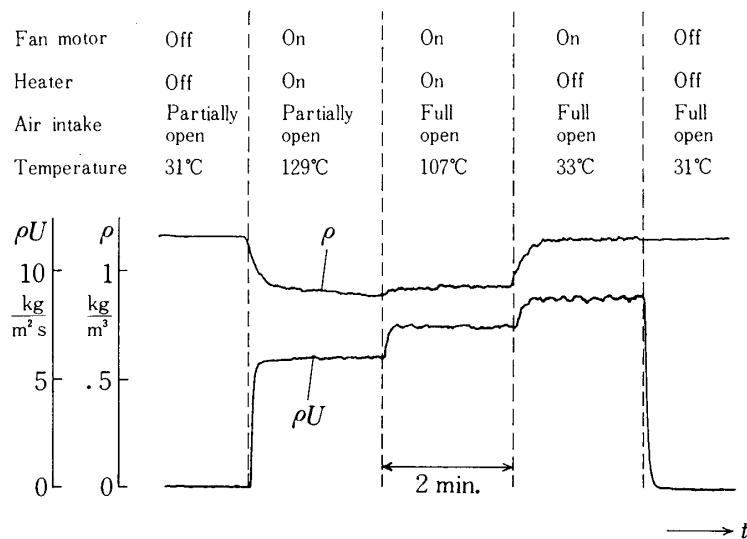


Fig. 11 A record of mass flow rate of the hot air flow of a hairdryer

振動ピトー管では ρU のみならず ρ の値も同時に求められるが、その一方で、これらたがいに直交する成分を同期整流回路によって分離しているので、マイクロホン増幅器などの位相特性の変化がただちに ρU や ρ の値の誤差となって現われるという欠点もある。この点を改善するには、たとえば Fig. 12 のような形のピトー管を用い、加速度による圧力変動を除去すればよい。すなわちこの場合には、振動による圧力変動は速度による成分のみとなるから、狭帯域フィルタによってマイクロホン出力 $s(t)$ の中の振動周波数の成分を抽出し、それを通常の方法で整流平滑して ρU の値を求めるという方法を探ることができ、マイクロホン増幅器などの位相特性の変化に対しては不感となる。ただしこのとき ρ の値も同時に測定したいというのであれば、加振器は一つのものを共通に使うとしても、 ρ を測定するための振動管やマイクロホン等からなる装置を ρU のそれとは別に設ける必要がある。

この実験で圧力検出器として用いたコンデンサマイクロホンは、直徑約 12 mm, 厚さ $4 \mu\text{m}$ のニッケルの振動板を有し、振動板と約 $20 \mu\text{m}$ の間隔をへだてて背極が設けられており、この間に約 200 V の直流電圧がかけられている。このような微細な構造になっているのは小さな音の検出に必要な感度を確保するため（マイクロホンとしての測定範囲は音圧レベルで 40 ~ 160 dB）であるが、反面その感度の安定性の点では問題がある。しかしこの点はもともと音響計測用に作られたものを流用したために生じたものである。振動ピトー管では音圧レベルに換算して 100 dB 前後の大きさの圧力変動を検出するのであるから、マイクロホン感度は現在の 1/100 程度にしてもなお十分であり、その場合には振動板と背極との間隔も広くとれるので、感度の安定性は格段に向上するものと思われる。

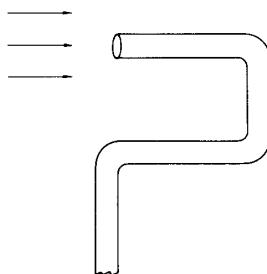


Fig. 12 A form of Pitot tube to eliminate acceleration component

5. あとがき

ピトー管は最も基本的な流速測定手法の一つとしてすでに 250 年の歴史を有するが、この研究においては、そのピトー管を振動させるという新しい方法により ρU の値が直接測定できることを確かめ、また関連する問題についても種々の検討を行った。実験は空気を用いた場合にのみ限られているが、他の流体についても気体、液体を問わず、ベルヌイの定理が成り立つ限りにおいては少くとも原理的には本方式を適用できる。

質量流量計という見地から離れ単に流速計としてみても本方式はいくつかの特長をもっているが、静圧の検出が不要であるということもその一つである。一般に流れの全圧はどの

のような形状の圧力導入孔を用いてもかなり正確に検出できるのに対し、流れの静圧を正しく検出することは非常に難しく、静圧の導入孔が附近の流線を変えないようその形状などに細心の注意が必要であるが、この点で本方式は非常に有利である。また流速に比例した出力を生ずるということから、他の直接形質量流量計と同様に、脈動流に対して正しい平均流速がえられることはいうまでもない。

流れに関連した事象において ρU^2 に比例した力または圧力を生ずるものは非常に多い。ベンチュリ管やオリフィスに生ずる圧力をはじめ、流れの中の物体の揚力や抗力もこの範ちゅうに入る。また受圧板に衝突する流れも、その運動量変化により ρU^2 に比例した力を受圧板に与える。振動ピトー管はこれらの事象に対しても同様の方法を適用しうるのではないかということを示唆するものもある。

なおこの論文では附隨的に扱われているが、振動加速度による圧力変動から流体の密度を求めるということ自体も一つの新しい方式であり、特に気体密度の測定法として興味深い。しかしこの密度測定については別途実験を行い、あらためて報告することとした。

本報告をまとめに際し、運動する球体の表面圧力分布につき貴重な示唆を与えた、東京大学工学部、岡野光治教授に謝意を表します。

1980年12月22日 計測部

参考文献

- [1] D. Brand, L.A. Ginsel: The mass flow meter—A method for measuring pulsating flow, Instruments, 24-3, 331/335 (1951)
- [2] B. Fishman, G. Bloom: An orifice meter that measures true mass flow, Print of 17th Annual Instrument-Automation Conference and Exhibit, 15/18 (New York, Oct.1962)
- [3] 芝、一瀬、土井：差圧式質量流量計、応用物理, 37-4, 334/338 (1968)
- [4] V.A. Orlando, F.B. Jennings: The momentum principle measures mass rate of flow, Trans. ASME, 76-6, 961/965 (1954)
- [5] Y.T. Li, S.Y. Lee: A fast-response true-mass-rate flowmeter, Trans. ASME, 75-5, 835/841 (1953)
- [6] C.M. Halsell: Mass flowmeters, ISA Jour., 7-6, 49/62 (1960)
- [7] M.M. Decker: The gyroscopic mass flowmeter, Control Eng'g, 7-5, 139/140 (1960)
- [8] Mass Flowmeter MODEL L25A, Micro Motion Inc. (1978)
- [9] J.J. Rusnak, E.R. Wuori, M.R. Minell: Linear momentum mass flowmeter design and performance, Proc. of Flow Symposium—Flow, its measurement and control in science and industry, 871/883 (Pittsburgh, May 1971)
- [10] 石井：クロススペクトル分析計、宇航研報告, 16-4A, 1267/1282 (1980)
- [11] L.D. Landau, E.M. Lifshitz: Fluid Mechanics, Chap. 1, § 10, Pergamon Press Ltd. (1959)