

# 流速計量水法の精度におよぼす流速計振動の影響

山崎卓爾\*，鈴木鐸士\*  
三浦誠二\*\*，根本卓明\*\*\*

(1973年9月10日受理)

## The Influence of the Oscillation of the Currentmeter which Violates the Accuracy of the Currentmeter Measurement

Takuji YAMAZAKI\* Takuji SUZUKI\*  
Seiji MIURA\*\* and Takuaki NEMOTO\*\*\*

**Abstract:**— One of the most important problems concerning with the currentmeter for large water quantity measurement is that of the error caused by the oscillation of the currentmeter due to the Karman vortex or pulsating flow.

In this study, the error caused by this oscillation of the currentmeter was examined by oscillating the currentmeter. The values indicated on the oscillating currentmeter were compared with those indicated on the nonoscillating currentmeter.

The results show that the oscillating currentmeter indicates the value including the error which increases with the intensity of the oscillation. When the oscillating currentmeter is used in practical measurement, it is necessary to correct the indicated value according to the intensity of the oscillation.

### 1. 結 言

水力発電所において水車の効率試験等のために行なわれる大流量測定はいかなる方法によつてもかなり技術的に困難を伴うところであり，このため多くの種類の流量測定法が開発され実用に供されている。しかし現地試験において，導水管には多くの場合，曲がり等があり理想的な状態で試験が実施されたいのが実状である。流速計法はこのような大流量測定法の一つとして，多年にわたり主として欧州を中心に採用されている方法であり，わが国でも戦後多くの試験に用いられて来た。しかしこの方法にも後に述べるように測定

\* 茨城大学工学部機械工学科（日立市中成沢町）

\*\* 茨城大学大学院工学研究科機械工学専攻（日立市中成沢町）

\*\*\* 日本楽器製造株式会社

の実際に際してはかなりの問題点があり、その解決が望まれている。この論文ではこれらの問題点のうち流速計自体が流れの方向または流れに直角方向の振動を伴う場合、これが測定精度にいかなる影響を及ぼすかを実験的に検定し、この問題に対し一つの警告を得たと思われるので報告するものである。

## 2. 大流量測定法における流速計法の立場

水力発電所等における流量測定はその流量があまりにも大きい場合、小流量の場合と同様な方法をとることができず、特に大流量の測定に適するように考えられた多くの方法がある。いずれも理論的あるいは技術的にまだ解明されない多数の問題が残っているばかりでなく、測定そのものの誤差も大きくなりがちである。次に述べるような方法は近年において、広く世界的にとりあげられたものである。<sup>(1)~(4)</sup>

a. ピトー管法 b. 流速計法 c. 塩水速度法 d. 塩水濃度法 e. ギブソン法(圧力時間法) f. 熱力学的試験法 g. 超音波流量測定法 h. その他

このうちピトー管法および流速計法は流水断面内の各点の流速をピトー管あるいは流速計を用いて測定し、これを断面全体で積算して流量を求める方法である。ピトー管は流速測定計器として古くから現在に至るまで最も広く用いられている計器であるが、大流量の場合これに適した構造が開発され、また流速計も多くの構造上の改善が加えられているが、両者ともそれなりに問題が多く、必ずしも正確な方法とはいえない。流速計法の問題点については後にやや詳しく述べる。塩水速度法は上流より食塩水を噴射して、これが流水に運ばれて流下するのを下流の電極でその通過時間をとらえて流下速度を算出して流量を求める方法であるが、これには理論的に解明し得ない点と試験の大規模性とのため必ずしもよろこばれていない。塩水濃度法は流水中に上流から一定濃度の塩溶液を一定流量で流し、塩溶液が流水中に十分混合した下流における希釈の度合からもとの流量を求めるものであるが、自然水の塩分濃度の影響を受けやすく高い精度は望み得ない。ギブソン法は管内を流体が流れているとき、管の末端にある弁をゆるやかに閉じて水撃作用を起こさせ、水圧変化を記録して、それより初めの流量を求めるものである。水圧測定に難点がある。熱力学的試験法は水車を通過する前後の水温の精密な測定値より水車の効率を得ようとするもので、流量測定法ではないが、この方法は水温の微小の差を測定することに技術的な難点があり、必ずしも常に正確な効率値を与えるとはいえない。超音波流量測定法は超音波が流体中を伝ばするさい、流体が静止している場合と動いている場合とでは、見かけの伝ば速度が異なることや超音波の進行方向が流れにより曲げられる現象を利用したものであるが流速と音速の大きさに差がありすぎるため測定精度の点に難点がある。

## 3. 流速計法の問題点

流速計法は測定操作が簡単であり、指示値も記録器によって容易に得られる利点がある。したがって欧州およびわが国では比較的広く採用されているが、現地試験における水車効率の0.1%の差異が問題にされている今日、現在の流速計法では不十分であり、流速計の改善を目指す国際的な研究団体 ICMG (International Current Meter Group) が組織されているが、現在でもなお十分な解決は得られていない。流速計の概観は図1のとおりである。図でわかるように軽く回転する羽根車を備えた流速測定器である。羽根車を流速

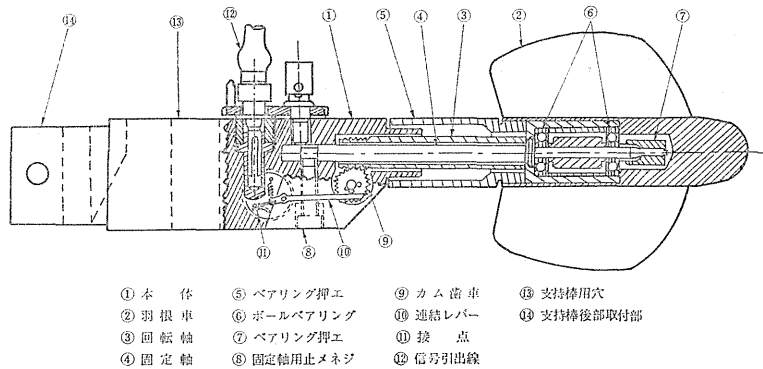


図 1 流 速 計

$v$ [m/s] の流れの上流に正確に向ければ流速  $v$ [m/s] と一定の関係にある回転速度  $n$ [r.p.s.] で羽根車が回転する。この  $v$  と  $n$  の関係はあらかじめ検定試験により羽根車ごとに求めておかねばならない。検定試験は一般に、長い水路内の静水中を流速計を一定速度で進行させることによって行なう。流速計の特性式は一般に

$$v = a + bn \quad \dots\dots\dots(1.1)$$

または

$$v = a + bn + cn^2 \quad \dots\dots\dots(1.2)$$

と表わされるが式(1.1)の形になることが多い。ただし  $a$ ,  $b$  および  $c$  は羽根車固有の定数で、検定により求まる。 $a$  は軸受潤滑油の粘性、軸と軸受の偏心などの影響によるもので  $b$  は羽根の形状、羽根表面の粗度、流速計支持棒の形や大きさなどの影響によるものであるとされている。検定によって流速計の特性式が決定されれば、この流速計を測定すべき流路中に支持棒で設置し、そのときの回転数  $n$ [r.p.s.] を知ればこの回転数から特性式により流速を算出し、この流速を流路の断面積について積算して流量を得る。

流速計を実際に現地で使用する場合それを検定した静水中の場合に現地の流れの状態が十分に近いならば、そしてまた流速計の保守、組立および実験方法等に十分な配慮がなされるならば、安定したかなりの測定精度が期待できる。しかし実際問題として検定状態と流れの状態を同じにすることは不可能なことであり、また流速計の特性はその構造がきわめて精密、微妙であるだけに、種々の影響をうけ微妙な変化をするものと思われる。よって現地での測定結果には常にこれにつきまとう誤差の出ることを覚悟しなければならない。現地流量測定で実際起こる種々の問題は ICMG の諸報告および川本<sup>(5)</sup>等により研究されある程度解明されているものもある。しかしなお多くの問題が残されていることも明らかである。ここで取扱う流速計の振動の影響は上述の報告でもある程度取り上げられているが、結論的な成果は明らかにされているとはいえない。よって次にこれについて考慮してみたい。

今日広く行なわれている鉄管路内での流速計法は図2に示すように1断面内に直交する2直径に沿って差し渡された2本の支持棒上の定められた位置に多数の流速計を取り付け、各流速計の読み(回転数)を時間座標の記録紙上に記録する方法がとられる。また支持棒

の管壁を貫く個所を固定すれば鉄管壁が激しく振動することから、ゆるく支持されることになり、このため支持棒は比較的振動しやすい状態にあるといわなければならない。このような構造から容易にわかるように支持棒はカルマン渦の発生・水圧変動による管壁の振動・脈流などによって流れと直角方向に振動させられると考えられる。また支持棒の断面形状は必ずしも流線形をとるとは限らないため脈流による押圧力の変動・水圧変動による管壁の振動などにより流れの方向にも振動が発生する場合があると考えられる。流れと直角方向に振動が生じる場合は流速計の軸受にラジアル荷重が増加し、また流れは流速計に入るときに直角方向の速度成分を持つことになるからこれが合成されて傾斜した流れになりしかもこれは変動する筈である。流れと平行方向に振動が生じる場合は流速計の慣性のために軸受にスラスト荷重が増加する。またこの場合には平行方向に脈流が生じた状態とみなすことができる。

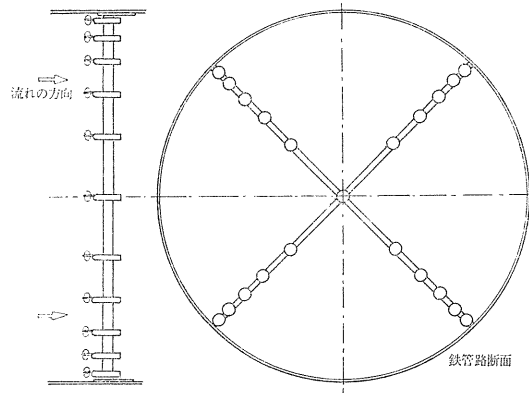


図2 流速計の取り付け

#### 4. 振動による影響の実験的研究

流速計に対する振動の影響の研究は川本<sup>(5)</sup>による脈動中の流速計の特性の研究、現地測定用流速計の型式によって乱流による影響の度合いが異なることを確認した B. Chaix<sup>(6)</sup>の研究、乱流を軸方向と半径方向の振動の合成とみなして、流速計の軸方向、および半径方向に流速計を振動させながら水路中を牽引することにより、乱流状態を模造し、検定時と実際使用時の差を調べた M. Fischer<sup>(7)</sup>の研究などがある。

本研究では脈流およびカルマン渦の発生等によって起こるべき振動を、測定部管外に設けた振動装置によって流速計に強制的に与え、振動の無い場合と比較し、流速計の指示値にどれだけの誤差が生ずるか、またどのような傾向であられるかを実験し、検討してみた。

##### 4.1 実験装置

直角方向振動の実験装置は図3、4の通りである。6インチ鋼管の直管に水を流して実験を行なうことにした。また管路の一部に流速計の羽根を観察できるように透明アクリル樹脂管を使用した。実験区間以外の配管には6インチ塩化ビニル管を使用した。実験を行なう直管部の長さは流速計の上流側に11.69m(内径の75倍) 下流側に6.1m(内径の40倍)をとった。平行方向の振動の場合には図5、6、7のように駆動軸の取付けの関係で上流側10.84m(内径の70倍) 下流側0.9m(内径の5.8倍)となった。駆動電動機や振動部などの台枠は、装置の振動を防ぐためコンクリートで固定した。振動軸は2個のすべり軸受で支持し、振動軸により軸受が振動しても他に伝わらないように、軸受支持台と偏心部とは別々に固定し、また振動軸は質量を小にするためガス鋼管を利用して製作した。実験に

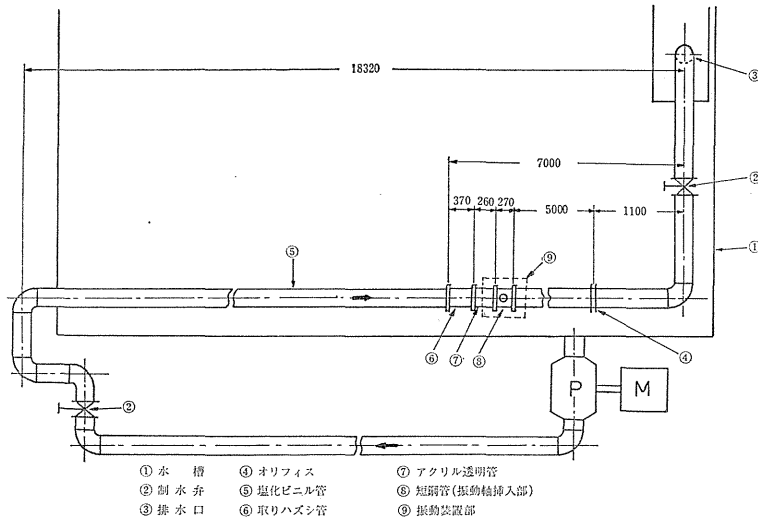


図 3 流れと直角方向振動の配管図

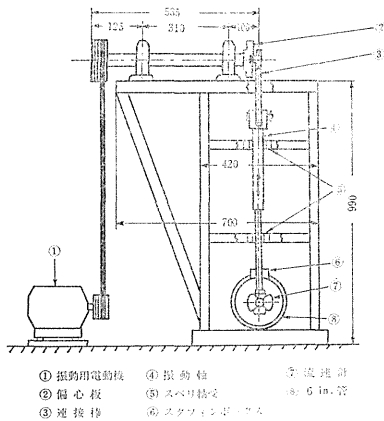


図 4 流れと直角方向振動・振動部

使用した流速計は下記の通りである。

OTT 流速計 TYPE V, Texas R, 直径 100mm instrument Nr. 14987

#### 4.2 実験方法

流れと直角方向の振動実験……振幅の変換は偏心軸の移動によってなされ 2, 4, 6, 8 [mm] の 4 種について実験した。振動数は可変三相電動機の回転数を変えることによって 500~1300 [c.p.m.] まで変化した。

まず管内を定常状態で水を流し、流速計を無振動状態で管の中央に置き、ある一定の流速計羽根の回転数に対する所要時間を求め、それより 1 秒間当りの流速計羽根の回転数を求める。同様に中央

点から振幅区間である上方に 8 mm, 下方に 8 mm を 2 mm ごとに 8 点について無振動状態で流速計羽根の回転数を求める。この 8 点を  $X_8, X_6, \dots, Y_2, \dots, Y_8$  と名づける(図 8)。これらの値より管内の流動状態の傾向がわづかならうかがえる。管内の流量は制水弁で調節し、オリフィスによって測定する。

羽根の回転数に対する所要時間の測定は羽根の 20 回転ごとに豆電球が点燈する回路(図 9)を設置し、この豆電球が点燈した瞬間からあらかじめ決められた回転数を経過した後豆電球が点燈する瞬間までの所要時間をストップウォッチで測定する。無振動状態で中央(0 点)における羽根回転の所要時間を基準所要時間と名づけ、基準所要時間より求めた 1 秒間当りの羽根回転数 ( $n_0$ ) を基準回転数と名づける。これらを誤差を算出する基準

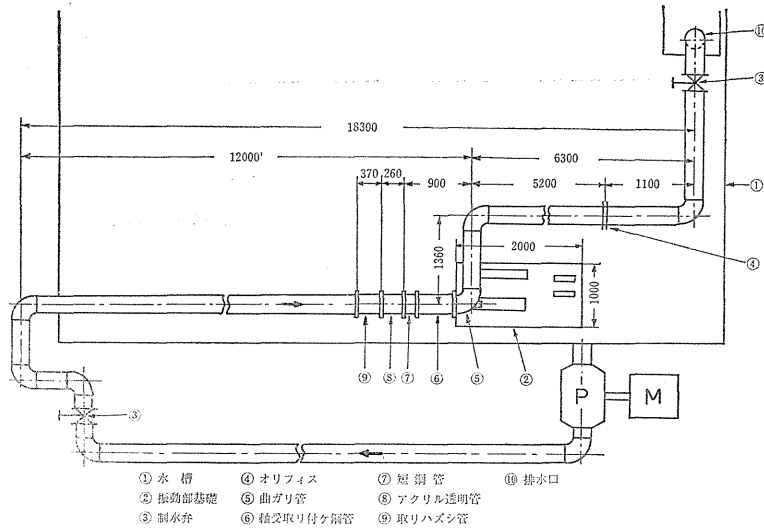


図 5 流れと平行方向振動の配管図

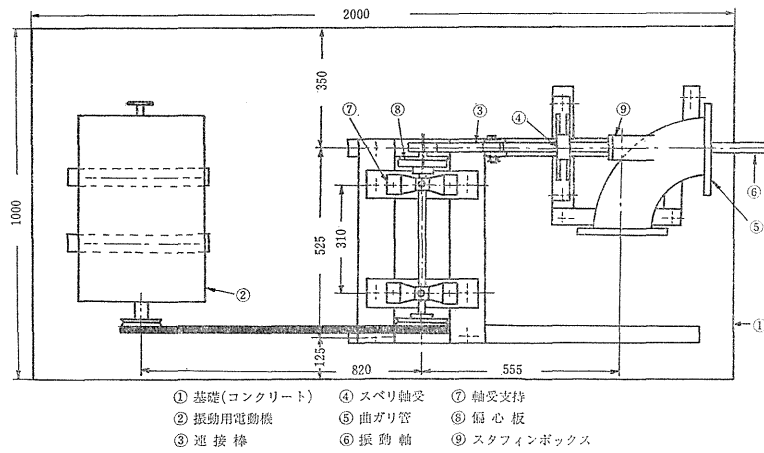


図 6 流れと平行方向振動装置

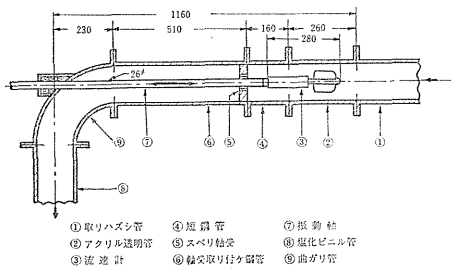


図 7 流れと平行方向振動・振動部

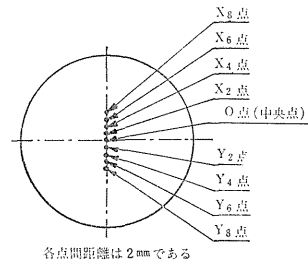


図 8

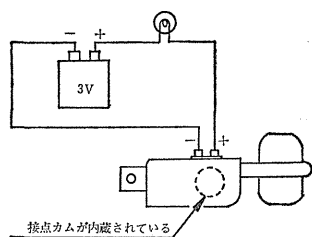


図 9 信号受信回路

とした。誤差  $\Delta n/n_0$  は次のようにして求める。

$$\text{誤差} = \Delta n/n_0 = (n - n_0)/n_0 \dots\dots\dots(4.1)$$

ここで  $n$  : 振動状態時の 1 秒間当りの流速計羽根の回転数

$n_0$  :  $n$  と同じ流速時の中央 (0 点) における無振動状態での 1 秒間当りの流速計羽根の回転数 = 基準回転数

また基準回転数を基とし、実験で使用した流速計の特性式を使って求めた流速を基準流速と呼ぶ。実験に使用した流速計の特性式は次式である。

$$\begin{aligned} v &= 0.2389n + 0.024 \quad (n \leq 0.88) \\ v &= 0.2560n + 0.009 \quad (n \geq 0.88) \end{aligned} \dots\dots\dots(4.2)$$

ここで  $v$  : 流速 [m/s]

$n$  : 回転数 [r.p.s.]

流れと平行方向の振動実験……流れと直角方向の振動実験の場合とほとんど同じ取り扱いである。測定は管の中央で行なっている。

### 4.3 実験結果

実験結果は図10～17に示されているが、これらは振幅 2, 4, 6, 8 mm それぞれのもとで横軸に基準流速を、縦軸に誤差をとり振動数を 500～1300c.p.m. まで変化させた振幅一定・振動数—誤差関係図である。

## 5. 実験結果の検討

### 5.1 実験管内の流速分布について

無振動状態における  $X_0, \dots, Y_0$  の点の羽根の回転数を比較すると中央部の 0 点が他の点より 1 秒間当りの回転数が多い。すなわち 0 点が他の点より流速が速いといえる。誤差を算出した基準を 0 点にとると流速分布が完全に一様である理想的な状態での実験よりこの実験は誤差がやや負の方向へずれて出る傾向にあるといえる。しかし  $X_0, Y_0$  のほとんどの点が 0 点に比較すると  $-1.0\%$  以内であるので特に数値的な補正は行なわなかった。

### 5.2 直角方向振動について

実験した基準流速 0.248～4.009 [m/s] の流速範囲ほとんどで負の誤差が出た。低流速の場合流速計は無振動では滑らかに回転したが、振動を与えると回転が不安定になることがわかった。図10～13によれば 1 [m/s] 以下では負の誤差が著しく 1.7 [m/s] ぐらいから誤差は  $-3\%$  以内におさまってくる。2.8 [m/s] 以上では  $-2\%$  以内におさまってくる。さらに 3.3 [m/s] 以上では誤差は  $-1\%$  以内におさまっている。このことは流速が大になれば振動の影響は少なくなる傾向にあることを示している。またこれらの図は振動数が大であっても振幅が小であれば影響は少ないことを示している。

### 5.3 平行方向振動について

実験した基準流速 0.245～4.047 [m/s] の流速範囲ほとんどで正の誤差が出た。図14～17によれば 1.0 [m/s] 以下では正の誤差著しく、2.0 [m/s] ぐらいから誤差は  $+3\%$  以内

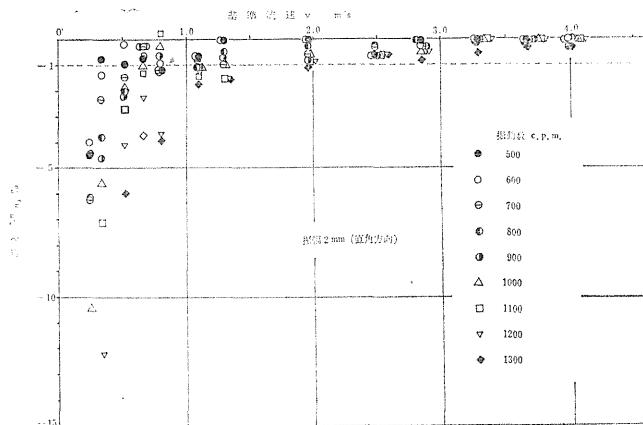


図 10

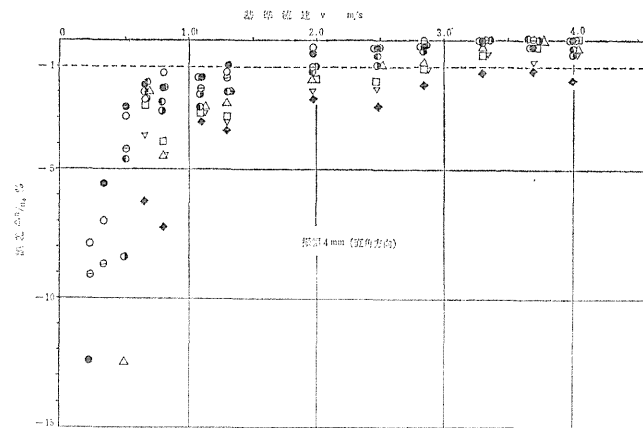


図 11

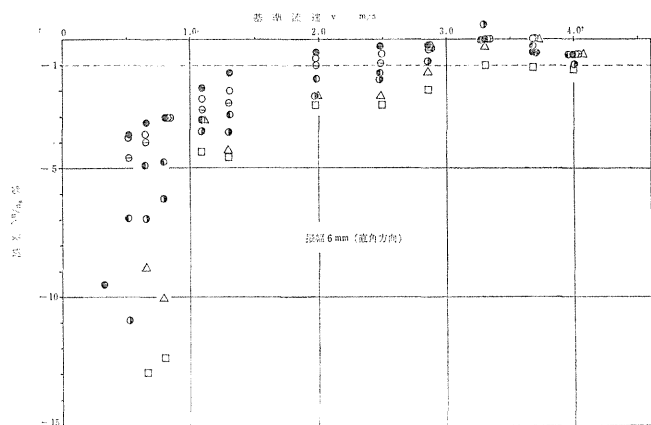


図 12

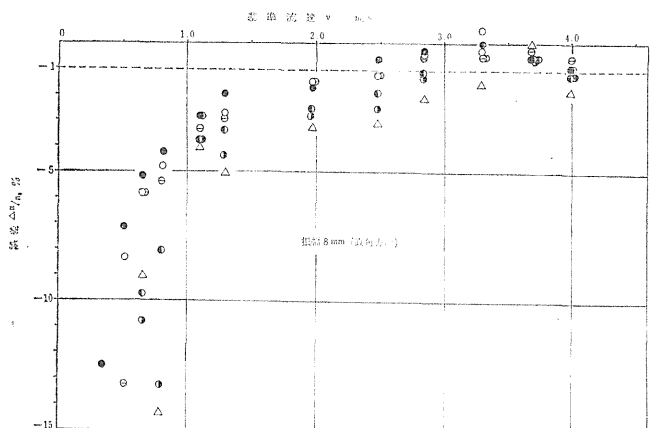


図 13

図10~13 振幅一定・振動数一誤差関係図(直角方向)



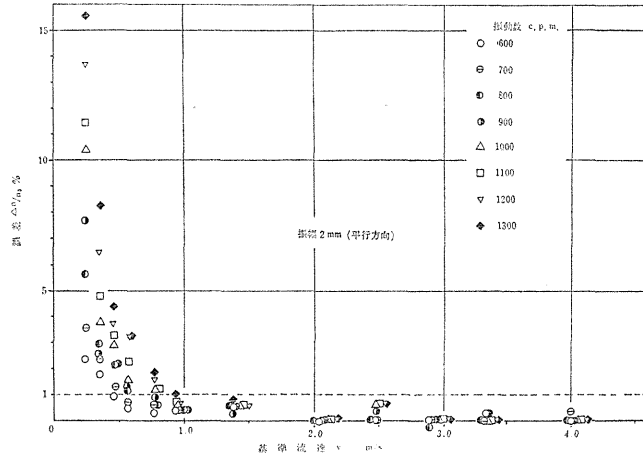


図 14

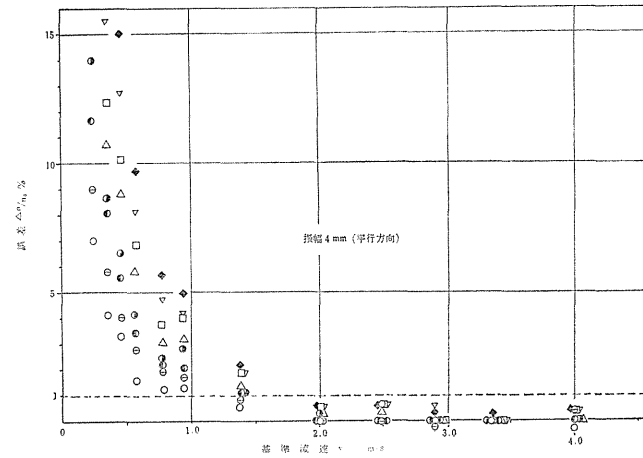


図 15

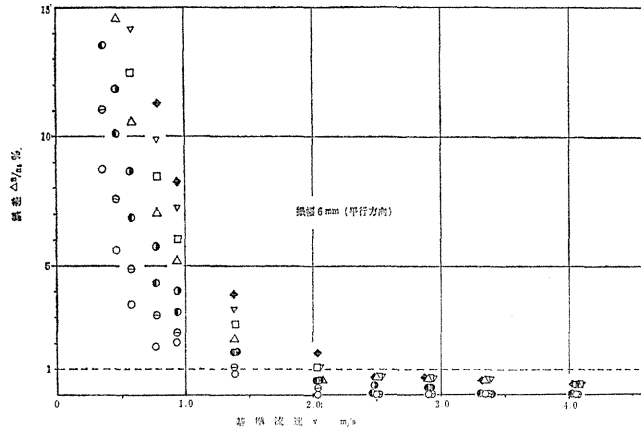


図 16

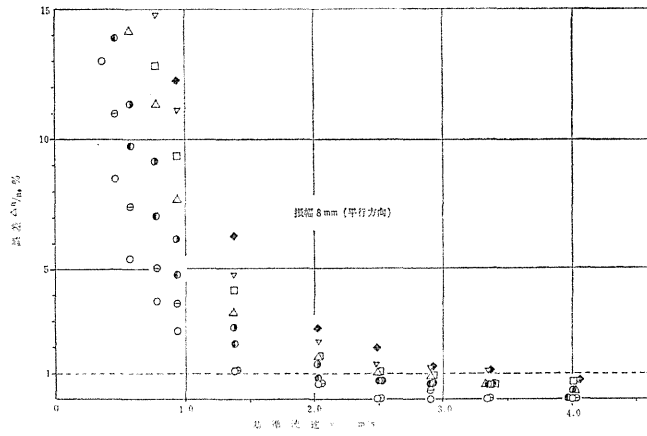


図 17

図14~17 振幅一定・振動数一誤差関係図(平行方向)

におさまってくる。2.5 [m/s] ぐらいからは+2%以内に、3.0 [m/s] 以上では+1%以内におさまっている。流速が大になれば振動の影響は少なくなる傾向にあることを示している。振幅や振動数についても直角方向と傾向は似ている。正の誤差しか出て来なかったということは実験で使用した流速計の羽根の形状が流れに向かって動いた場合に回転しやすく、流れと同方向に動いた場合には回転しにくい形状であるとも考えられる。また、3で述べたようなことも影響して、振動数や振幅が大の場合には実際の値より大きく測定する可能性があると思われる。

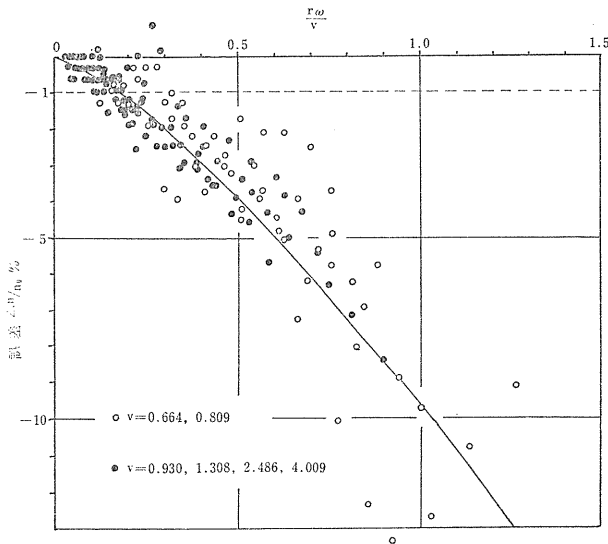


図18 誤差と  $\frac{r\omega}{v}$  の関係 (直角方向)

いて関係をとってみると

$$\Delta n/n_0(\%) = -9.4(r\omega/v)^{1.3} \quad \dots\dots(5.1)$$

となる。図19は平行方向の場合であるが実験した流速の全域でさほど大きなばらつきが見られなく

$$\Delta n/n_0(\%) = 9.0(r\omega/v)^{1.8} \quad \dots\dots(5.2)$$

というおおよその関係がみられた。ここで  $r\omega/v$  とは定義こそ異なっているけれども Chaix<sup>(6)</sup> や Fischer<sup>(7)</sup> の用いている軸に垂直な変動の強さ ( $\sqrt{\omega^2/c}$ )、軸方向の変動の強

直角、平行方向どちらにおいても流速計の型による特性というものが大きく影響していると思われる。感度の高い流速計ほどその反応も鋭いであろう。

測定データを整理する手段として  $r\omega/v$  なる無次元値と誤差  $\Delta n/n_0$  との関係をみてみた。ここで  $r$ : 振幅,  $f$ : 振動数,  $\omega: 2\pi f/60$ ,  $v$ : 基準流速である(図18, 19)。直角方向の場合で  $v=0.664, 0.809$  [m/s] の場合、図18のようにばらつきが大きいが  $v=0.930$  [m/s] 以上ではそれほど大きくはない。ちなみに図18にお

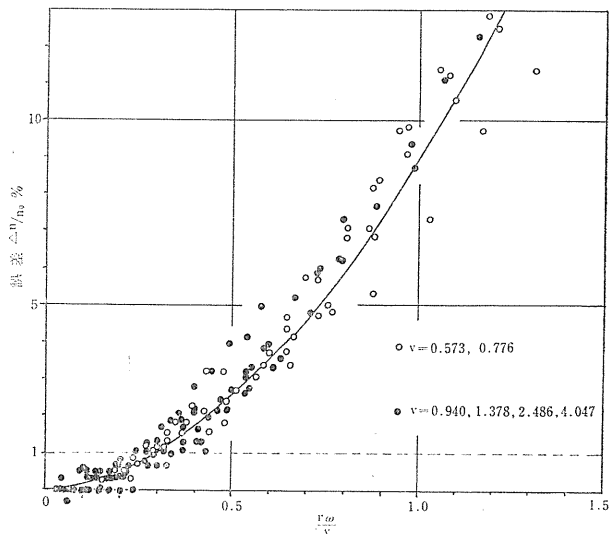


図19 誤差と  $\frac{r\omega}{v}$  の関係 (平行方向)

さ ( $\sqrt{\bar{u}^2/\bar{c}}$ ) と性質の同じものである ( $\bar{c}$ : 平均流速  $\bar{w}^2$ : 軸に垂直方向の変動速度の 2 乗平均値  $\bar{u}^2$ : 軸方向の変動速度の 2 乗平均値)。彼等は論文中で、乱れが大きくなればそれだけ誤差が大きくなると大まかに述べているが、上式 (5.1), (5.2) は  $rw/v$  が大きくなると誤差はそれに伴って大きくなるという類似の傾向を示している。本実験では単に直角と平行の振動の特殊な場合のみを扱ったのだが実際の使用においては振動は常に直角方向または平行方向と、1 方向だけに限られているのではなく、これらの組み合わせであり複雑なものであろう。

## 6. 結 言

この研究は OTT 流速計 TYPE V, Texas R を狭い円断面の管路に設置しての実験であるため実際の使用状態とは異なっているが、特性の比較という意味ではある程度傾向を把握し得たと思う。流れに直角方向と平行方向の振動を流速計に与えて得た結果は、 $rw/v$  についておおよそ式 (5.1), (5.2) のように整理されるが、具体的に要約すれば次の通りである。

この型の流速計で流速を測定する場合、流速が 3 [m/s] 以下で振動が生じると  $\pm 1\%$  以上の誤差が出る可能性がある。流速 1 [m/s] 以下では著しい誤差の出る可能性が大であるが 4 [m/s] 付近になると誤差はほとんど出なくなってくる。流れと直角方向に振動する場合は負の誤差を生じ、平行方向に振動する場合は正の誤差を生じる。したがって振動が起こることがあらかじめ予想される場所でこの型の流速計を使用するならば、振動数と振幅について流速計におよぼす影響を確かめて、測定値を補正しなければならない。あるいは測定値に幅をもたせて解釈すべきである。これらの実施なしで、この型の流速計を用いて流速を測定することは危険である。

終りにあたり、44, 46年度の卒業研究で、実験装置の製作、予備的な実験にあたられた露木、山本、中野間の諸君に、また心よく装置の製作に御協力下さった実習工場の皆様、および有意義な御討論を戴いた流体力学研究室の皆様にご感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- (1) 電気規格調査会: JEC-157 水車の効率試験方法 (1963)
- (2) 工業計測技術大系編集委員会: 流量 (下), 日刊工業新聞社 P99
- (3) 石井: 水車とポンプ水車, 電気書院 P185
- (4) 山崎: 大流量測定法としてのピトー管法に関する諸問題, 日立評論, 第38巻第3~9号, 1956
- (5) 手島, 川本: OTT 流速計の流水中の特性, 機械学会日立地方講演会論文集 1964-10 P1-16
- (6) B, Chaix: *Tests Concerning the Influence of Turbulence on Various Flowmeters in the Laboratory and in the Field* ICMG-Reports No. 6 1962-2.
- (7) M, Fischer: *Versuche über den Einfluss der Turbulenten Strömung auf Hydrometrische Flügel durch Nachahmung der Turbulenz im Schlepptank* ICMG-Reports No. 19 1966-5.