

天秤式差圧計の平均流速測定への応用について

深田三夫*・斎藤 隆*・岡田武司**・大島久幸***

On the Application of Balance Type Manometer to the Measurement of Mean Velocity

Mitsuo FUKADA, Takashi SAITOU, Takeshi OKADA
and Hisayuki ŌSHIMA

Abstract

New type of manometer was devised for the purpose of measuring small difference in pressure accurately. This manometer is placed on the balance pan, and the head difference Δh can be obtained by weight difference of liquid in manometer ($\Delta h = w/\rho g A$), in place of direct reading of Δh on manometer.

These devices was used in combination with pitot-static tube, and mean velocity profile near the rough wall in sheet flow become clear.

In this paper, the authors report the outlines of these devices, method of calibration, method of measurement, and showed a few results of measurement. According to these results, we evaluate the effect of surface tension which is the largest cause for the error in these experiment.

1. まえがき

水理学においては、開水路や管路内の流れを断面平均流速（単位時間あたりの流量を流水断面積で割った値）で、処理するケースが多く、実際的な要求に対しては、それで十分なケースが多い。

しかし、流れが河床や、構造物壁面に及ぼす影響、いわゆる掃流力や、壁面抵抗の算定には、流体力学立場にたった流れの取り扱いが必要とされてくるが、実際的な観点からは、多くの場合、流れを平均量（平均流速や、平均圧力）とある種の仮定（たとえば、直線的なせん断応力分布など）とから理解しようとする方法がとられており、それがある程度、目的を達しているといってもよい。

一般に流れは、壁面が直接的な原因となって、内部に流速分布を生ずる。ことに壁面近傍および、粗度と同程度の水深を持つ流れ、いわゆる粗面薄層流においては、流れは三次元的様相を呈し、通常の二次元開水

路流れとは異なるが、筆者らは、上述の立場にたっ流れ全体を、二次元的な平均流速分布におきかえ理解しようと努めている。壁面近傍の低流速域において、対数分布則が成立しないことは明らかであり、この領域での速度分布則を明らかにする目的を持つ以上、測定にあたっては、次の事柄が要求されてくる。

- (1) 粗度程度の範囲内の流速分布を求めるのを目的としているため、圧力端子が小さいこと（たとえば、プロペラ型流速計は、3~5 cm/sec の微流速が測定可能だが、大きすぎる）
- (2) 低流速域での測定精度向上
（特に、粗度近傍の低流速域内では、平均速度変化率が激しく、測定精度向上が求められる）
- (3) 流域や、水路勾配などの条件を一定にしたままで速度分布を求めたいため、多点を短時間で測定する方法が必要となる。

このうち(1)については Fig. 1-d に示すような仕上げをした境界層用ピトー静圧管を用いた。本報告は(2)、(3)のために考案、製作された、二つの天秤式差圧計の概要および、検定、実測結果について記すものである。

* 土木工学科

** 大学院 土木工学専攻

*** 中国電力

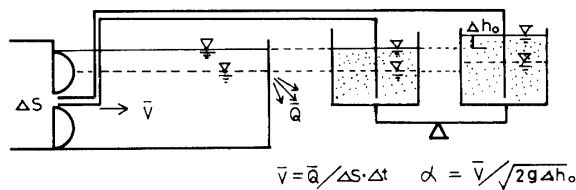


Fig. 1 Schematic of calibration system for balance-type manometer.

2. 天秤式差圧計について

ピトー静圧管に接続したピエゾ水頭測定用マンローターには、通常、U字型、傾斜型、二液型等が用いられているが、いずれも液面の上下の読みを同時にとらねばならず、管の不均一さ、管壁や水の汚れなどによって、表面張力による水面メニスカスの不整など読み取りに誤差を伴い、測定範囲は水頭差 10 mm 以上とされている。天秤式差圧計はこの二本の差圧測定用円柱の外径を大きくし、上皿天秤に載せただけの簡単な装置であり、水位差の直接読み取りを止め、その重量差を測定するように視点を変えたものである。この方法によれば、水位差の直接読み取りによる誤差が、重量差読み取り誤差におきかえられたことになり、(す

なわち $Jh = W / \rho g A$ (cm)), 天秤の感量の範囲内において、差圧 Jh の測定精度をあげることができる。¹⁾ 筆者らが実験の初期に製作し、実測に使用したものは、市販の天秤 (感量 100 mg, 秤量 200 g) に、水位測定用円柱を取り付けたもので、重量の読み取りにはおもりでバランスを取るだけの簡単な方法で行なっていたが、

- (1) 測定円柱内への水の流量、あるいは流出の状況がつかめない。つまり、定常になるまでの時間が不明である。
- (2) おもりでバランスを取る際に、天秤の指針を直読するため、読み取りの誤差が入る。

などの問題点を残していた。この二点を改良する目的で考案、製作されたのが、荷重計を用いた天秤式差圧計と、自動制御型天秤差圧計である。(写真、および概略図参照)

荷重型天秤差圧計は、(写真 2 a), 天秤の棒の一端を、荷重計に接触させ、差圧 Jh 分の重量が直接荷重計にかかるようにしたものであり、ストレインメーターを通してレコーダーに直接記録させるものである。

自動制御型天秤差圧計 (写真 1-a) の概略は以下のとおりである。天秤の一端にはコイルと永久磁石との組み合わせ、他端には差動変圧器とサーボモーターと

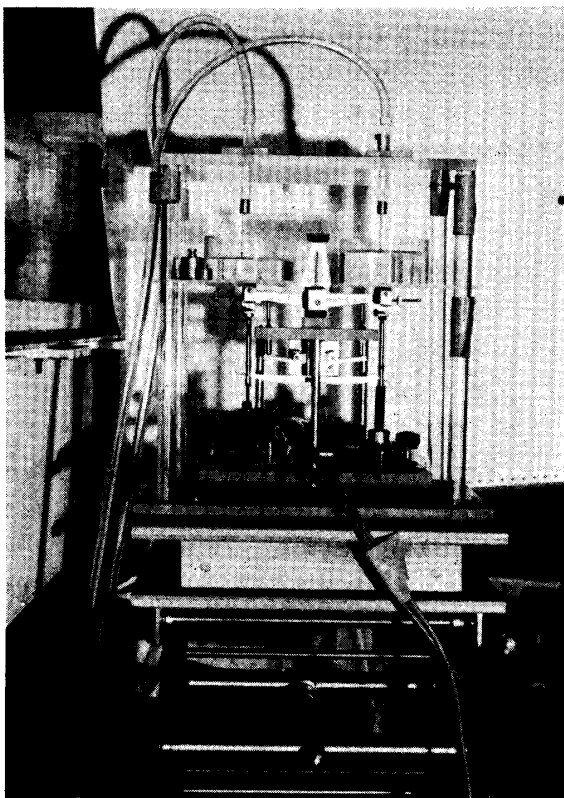


Fig. 1-a

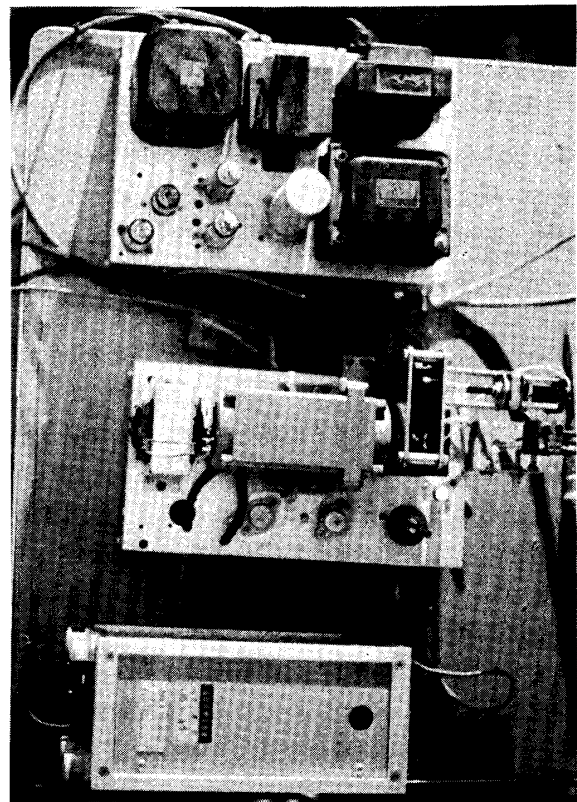


Fig. 1-a'

Photograph of automatic control type balance manometer.

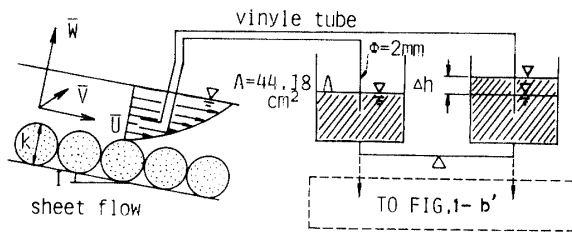


Fig. 1-b Schematic of measurement systems for mean velocity in sheet flow on rough wall.

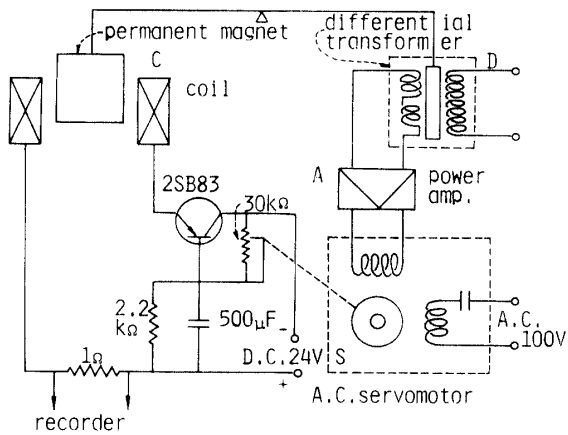


Fig. 1-b' Schematic diagram of automatic control system.

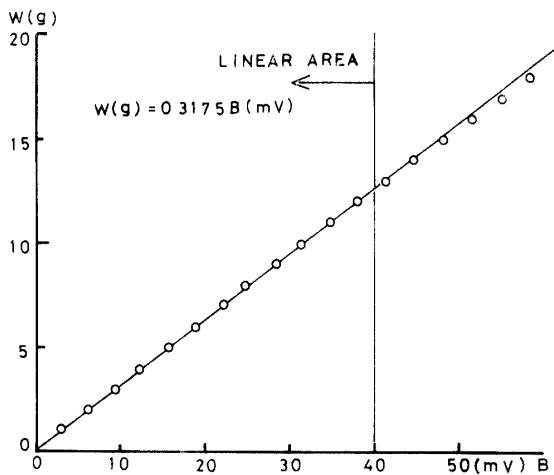


Fig. 1-c Calibration curve of automatic control balance.

の組み合わせを用いている。円柱内に重量変化がおこると、差動変圧器 *D* が変位を検出し、それに対応する電圧変化が生じる。これを *A* で増幅し、サーボモーター *S* の働きにより、他端のコイル *C* のインダクタンスを変化させ、バランスを保つようにするものである。

いずれも差圧を電気量に変換して、レコーダーに指

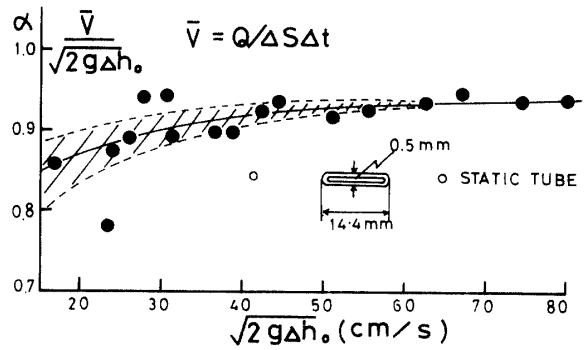


Fig. 1-d Calibration curve of pitot tube coefficient by automatic control balance.

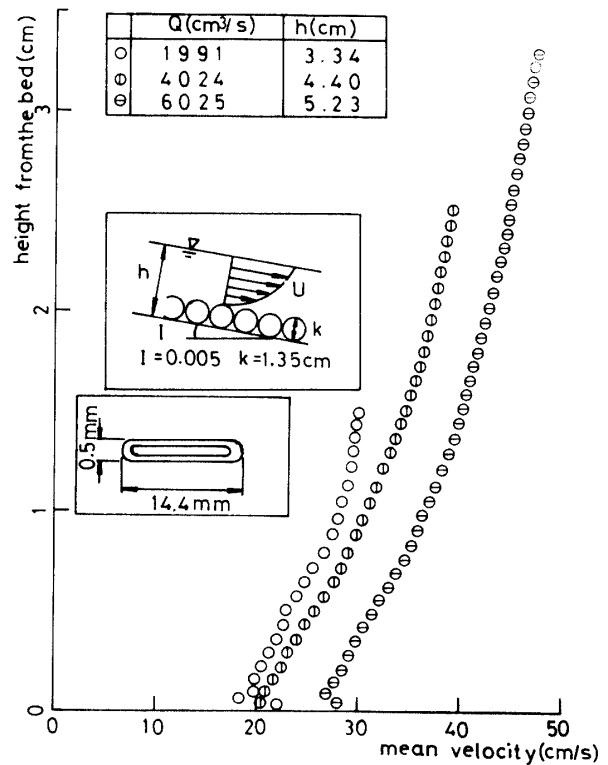


Fig. 1-e Examples of Velocity profiles in sheet flow on rough wall, measured by pitot tube in combination with automatic control balance.

示、記録させる方法をとったものであり、開水路流れにおける実験条件（流量 *Q*、水路勾配 *I* など）を同一にして、水深方向の流速分布を測定したい場合に、差圧の時間的変化が連続的に取り出せるため、定常状態の判定がしやすい。

実際に製作、測定に使用した差圧計には、次のものを用いた。

- 測定用円柱 アクリル製 内径 7.6 cm
外径 8.0 cm
- 天秤 上四天秤 感量 100 mg
秤量 200 g

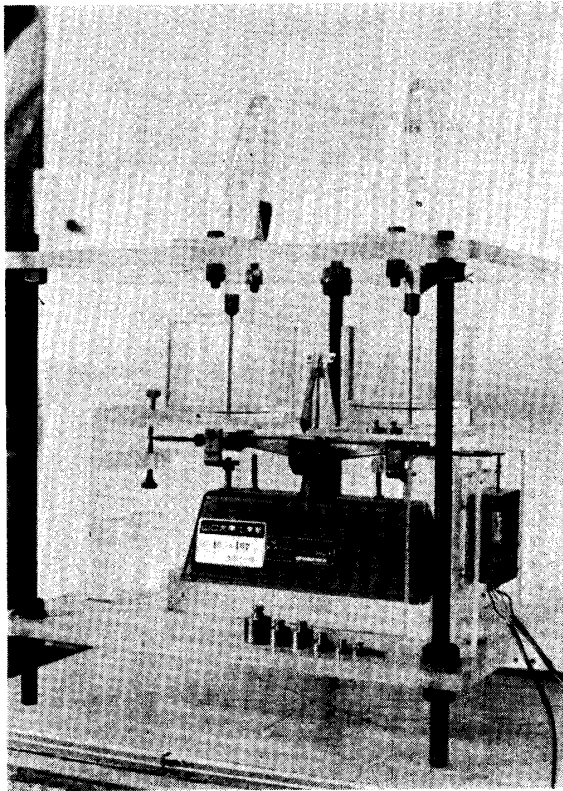


Fig. 2-a Photograph of load cell type balance manometer.

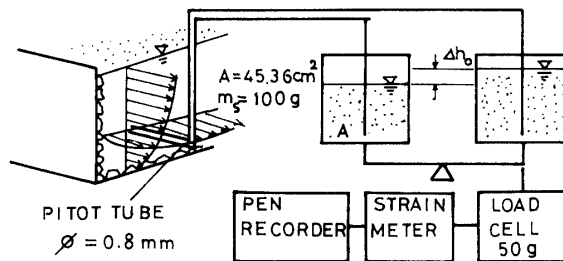


Fig. 2-b Schematic of measurement systems for mean velocity near the corner in open channel.

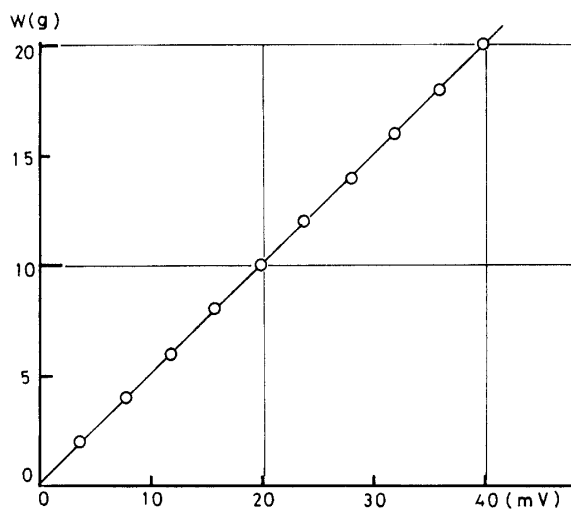


Fig. 2-c Calibration curve of load-cell type balance manometer.

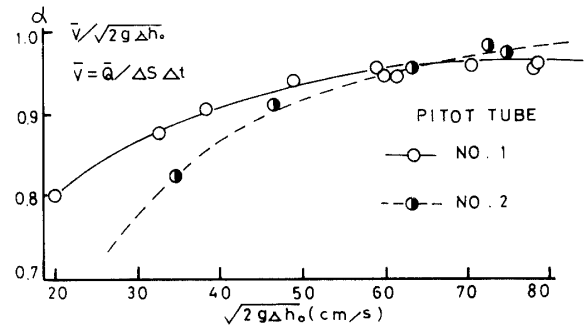


Fig. 2-d Calibration curve of pitot tube coefficient by load-cell type balance.

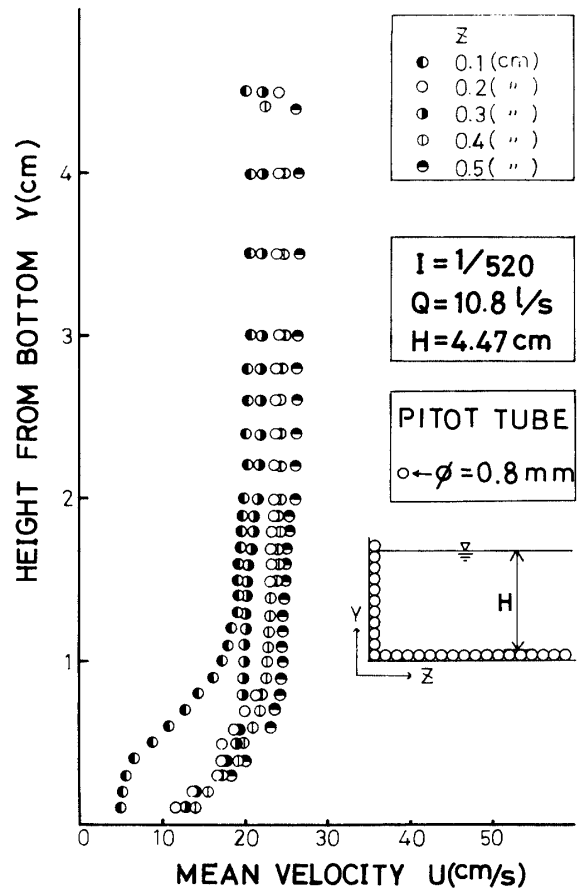


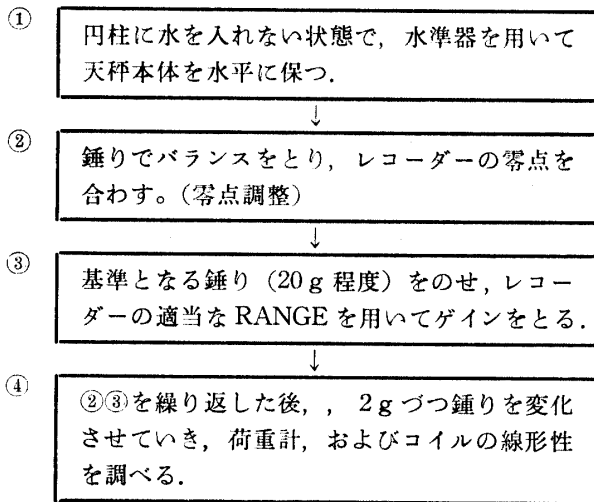
Fig. 2-e Examples of velocity profiles near the corner in the open channel flow measured by pitot tube in combination with load cell type balance.

3. 検定方法, および使用方法について

天秤式差圧計の使用にあたっては

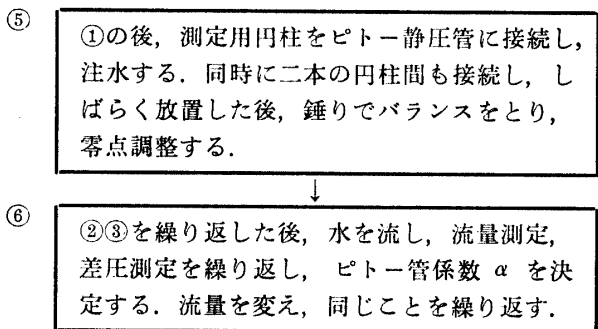
1. 天秤の検定
2. ピトー静圧管の検定

の二つの段階を経たうえで, 使用しなければならない以下の流れ図に従って説明する.



以上の検定曲線は Fig. 1-c, Fig. 2-c に示されている.

ピトー静圧管の検定は, 実測用水路とは別の検定用水路 (ノズル断面積 $4S=34.15 \text{ cm}^2$ の噴流発生装置) Fig. 1 において, 天秤式差圧計に接続して行ない, ピトー管係数 α を定める. ($\alpha = \bar{V}/2g\Delta h_0$)^{1/2}, $\bar{V} = \bar{Q}/4S \cdot \Delta t$) この際差圧測定と同時に流量測定の精度も上げる必要性が生じてくる. この方法については前報に載せている.¹⁾



なお, 実測の段階では, 静水状態にするには, 手間がかかる場合が多いので, 流水状態のまま, 静圧管を二本の円柱につなぎバランスをとってもよい.

4. 検定結果および実測例について

Fig. 1-c, 2-c, Fig. 1-d, 2-d には荷重計式天秤差圧

計と自動制御型天秤差圧計の検定曲線および両差圧計を用いて行なったピトー静圧管の検定曲線を載せている. 接続したピトー静圧管はそれぞれ目的を異にして製作されたので, 形状は異なる. (Fig. 1-e, Fig. 2-e 参照)

Fig. 1-e, Fig. 2-e に二つの差圧計を用いての開水路の平均流速分布の実測例を示す. 荷重計式天秤差圧計は内径 0.8 mm の総圧管との組み合わせにより開水路測壁効果の測定用として用いられ, 特に測壁近傍の平均流速分布が細かくとられ, 等流速線分布が明らかにされた.

自動制御型天秤差圧計は, まえがきにも述べた粗面薄層流の平均流速分布を明らかにする目的で, 幅を広くした境界層用ピトー静圧管との組み合わせにより, 使用されている. いずれも図に示すように, ほぼ連続的な曲線が実測されており, 粗面近傍の微小な流速分布 (二次元的) が明らかにされている.⁴⁾⁵⁾

5. 測定精度についての一考察

二つの天秤式差圧計は, いずれも測定円柱内の重量変化を電気量に変換し, さらに増幅したうえで, レコーダーに記録させる方式をとっているため, レコーダーの RANGE の選択如何によって, 天秤の感量 100 g, あるいは, それ以上の精度の測定が可能と予想されがちである. 天秤の検定の段階でのように, 単に錘りだけの場合ならそうもいえる. しかしながら, 実際には, ピトー静圧管と一体で使用するため, 実測の段階では円柱内の水はたえず (特に総圧管を通じて) 流入, 流出を繰り返す. この時機械摩擦など天秤本体の以外の要因が誤差の原因となる. 以下それを列記してみると,

- (1) 管径の不均一さによるもの
- (2) ピトー静圧管, 特に総圧管の先端部, および静圧孔の仕上げの不備
- (3) 接総ビニール管の特性の不明
- (4) 表面張力によるもの

などによって, 低流速域になる程, 再現性は失われていく. 検定曲線も 20 cm/sec 以下になるとかなりのばらつきが生じてくる. ここでは (4) の表面張力による影響について考察を加えてみる.

一般に二本の液注の差圧を読む場合に, 表面張力は相殺され, 精度は失なわれないとされている. ところが今の場合にはそうでない. すなわち, 実測の前に, 同じ天秤差圧計を用いてのピトー管係数の決定という別の段階を経ていることに注意してほしい. 測定対象と

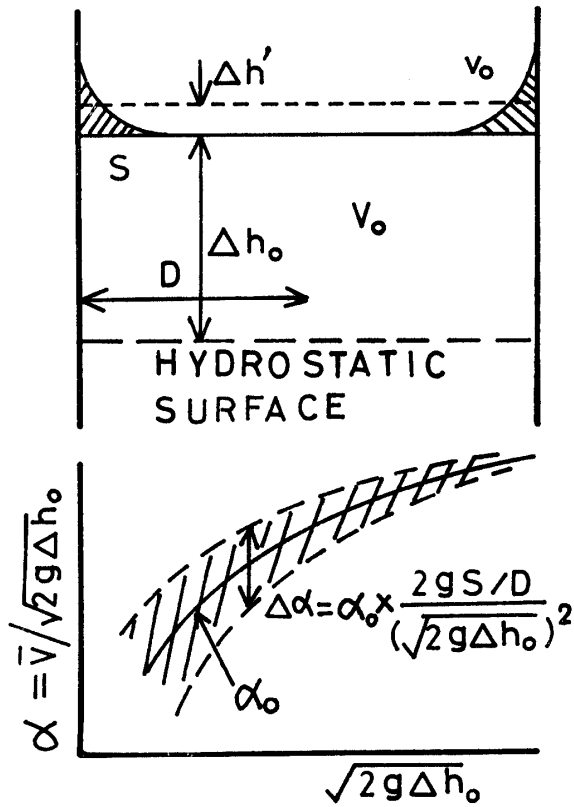


Fig. 3 Schematic of effect of surface tension.

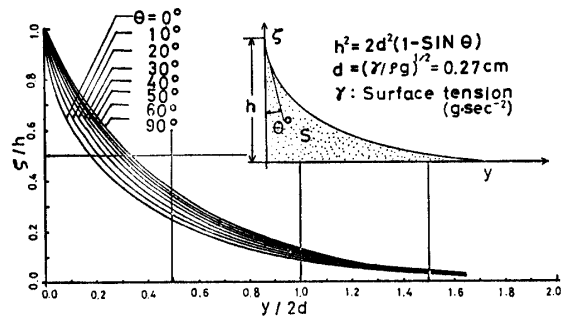


Fig. 4 A free liquid surface due to surface tension.

なる流れと（例えば薄層流），検定水槽での流れ（噴流）とは，流体力学的にみて同じ構造なのか（特に静圧測定に響くと思われる）という本質的な問題は別にして検定段階では，流量や水位（すなわち，測定円柱内の水面位置（Fig. 1 参照）は，たえず変化しており，測定点はかなり離散的にならざるを得ない。このために，Fig. 1-d, Fig. 2-d に示す検定段階のそれぞれのデータには表面張力によって微小な重量変化がおこり，このための誤差が含まれていると考えてよい。しかし実測の段階では，底面より測定を始めて，ほぼ連続的に測定点をずらしていく。このため表面張力は相殺されていると考えてよい。以下にその評価を行

なってみる。ピトー管係数は次のように決定する。

$$\begin{aligned} \bar{V} &= \bar{Q} / \Delta S \times \Delta t & \bar{Q} &: \text{平均流量} \\ \Delta S &: \text{検定水槽ノズル断面積} \\ \alpha &= \bar{V} / (2g\Delta h_0)^{1/2} & \Delta t &: \text{測定時間} \\ & & \alpha &: \text{ピトー管係数} \end{aligned}$$

今簡単のために，上とは逆に考え， Δh_0 は検定段階での差圧の平均値で十分な精度でとられているとする。次に，実測段階に入って，表面張力による誤差が入ってきたとすれば，それによる差圧変化は $\Delta h' = \rho g v_0 / A$ (v_0 : 表面張力による体積増加量) (Fig. 3) したがって各測定点における流速のばらつきは，次のように評価することができる。

$$\begin{aligned} \Delta \bar{V} &= \alpha' \{2g(\Delta h_0 + \Delta h')\}^{1/2} - \alpha(2g\Delta h_0)^{1/2} \\ &\approx \alpha(2g\Delta h_0)^{1/2} \times \Delta h' / 2\Delta h_0 \\ &= \bar{V} \times \Delta h' / 2\Delta h_0 = \rho g v_0 / A / 2 \times \rho g V_0 / A \times \bar{V} \\ &= \bar{V} \times v_0 / 2V_0 = 2D\pi S / 2D^2\pi \times \Delta h_0 \\ &= \bar{V} \times (S/D) / \Delta h_0 \end{aligned} \quad \dots\dots (1)$$

あるいは次のように考えてみる。検定段階で表面張力による誤差が入り，ピトー管係数 α に誤差が入るとする。その誤差は，

$$\begin{aligned} |\Delta \alpha| &= |\alpha' - \alpha| = |\bar{V} / (2g(\Delta h_0 + \Delta h'))^{1/2} \\ &\quad - \bar{V} / (2g\Delta h_0)^{1/2}| \\ &= \bar{V} / (2g\Delta h_0)^{1/2} \times \Delta h' / 2\Delta h_0 \\ &= \bar{V} / (2g\Delta h_0)^{1/2} \times (S/D) / \Delta h_0 \\ &= \alpha_0 \times 2g(S/D) / (2g\Delta h_0) \end{aligned} \quad \dots\dots (1)'$$

$$\alpha_0 = \bar{V} / (2g\Delta h_0)^{1/2}$$

α_0 は最確値とする。(Fig. 3) これは (1) と同じものである。例えば，使用した差圧計の場合にこれをあてはめると (S として接触角 $\theta = 0$ の場合の値を用いた)

$$\Delta \alpha = 35.3 \times \alpha_0 / (2g\Delta h_0) \quad \dots\dots (1)''$$

となる。Fig. 3 においてこの概略を示し，実際ピトー管の検定曲線 Fig. 1-d に (1)'' のあてはめを行なった。

流体力学の教科書を参考にすれば表面張力による水面形は次式で与えられる。(境界面を平板と仮定)

$$\begin{aligned} y/d &= \cosh^{-1}(2d/\zeta) - \cosh^{-1}(2d/h) \\ &\quad + (4 - h^2/d^2)^{1/2} - (4 - \zeta^2/d^2)^{1/2} \end{aligned} \quad \dots\dots (2)$$

Table 1 Values of h, S correspond to θ

θ (°)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
h (cm)	0.382	0.347	0.310	0.270	0.228	0.185	0.140	0.094	0.047	0.00
S (cm ²)	6.87 $\times 10^{-2}$	6.79 $\times 10^{-2}$	6.49 $\times 10^{-2}$	6.01 $\times 10^{-2}$	5.32 $\times 10^{-2}$	4.47 $\times 10^{-2}$	3.48 $\times 10^{-2}$	2.38 $\times 10^{-2}$	1.21 $\times 10^{-2}$	0.00 $\times 10^{-2}$

ここに $h^2 = 2d^2(1 - S/n\theta)$
 $d = (\gamma/\rho g)^{1/2} = 0.27\text{cm}$ (標準温度)
 γ : 境界面単位面積あたりの表面張力
 θ : 接触角

上述の平均流速測定においてたとえば、 $n\%$ の精度を期待するならば、次式を満たさねばならない。

$$|\Delta \bar{V}/\bar{V}| = |S/(D \times \Delta h_0)| < n/100$$

$$\therefore D \times \Delta h_0 > 100 \times S/n \quad \dots\dots (3)$$

また前報¹⁾で示しているように、検定の段階において天秤の感量の範囲内におおて差圧 Δh_0 が求められるとすれば、

$$\Delta h_{min} = m_s/\rho g A = m_s/\rho g D^2 \pi$$

$$\therefore D \times m_s/\rho g A < 100S/n$$

$$\therefore D > m_s \times n/\rho g \pi \times 100 \times S) \quad \dots\dots (3)'$$

の管径を用いる必要がある。参考までに(2)式であらわされる表面張力による水面形を接触角をかえた場合について、Fig. 4に表わしておいた。また表1には、各々の場合の面積 S と h の値を表わしておいた。

実際に製作、測定に使用した天秤について(3)式をあてはめてみると、 $n=5\%$ 、接触角 $\theta=0^\circ$ として、 $h=0.382\text{ cm}$ 、 $S=6.87 \times 10^{-2}\text{ cm}^2$ 、 $D=3.8\text{ cm}$ で $\Delta h_0=0.36\text{ cm}$ となる。これを流速になおせば、ほぼ 25 cm/s となる。したがって天秤の感量の範囲内で Δh の測定精度の向上は、使用にあたって二つの段階をふまなければならないということから、これに表面張力が大きく影響し、再現性には疑問が生じてくる。単純な仮定をいれ、限界の条件を示したのが(3)式であるが、これによれば、管径 D を大きくすればよいということになる。その場合、装置そのものが大きくなり、測定には長時間かかるといった別の問題が生じてくることになる。いずれにせよ、天秤式差圧計の使用にあたっては、検定時において測定回数を増やし、ピトー管系数の最確値を求めておく必要がある。現在、実際に使用中の天秤については、平均流速 20 cm/sec を $7\sim 8\%$ の精度で測定できるといえる。二種の天秤式差圧計を用いての実測例を Fig. 1-e, Fig. 2-e に示しているが^{4), 5)} 流速変化率を明確にしたいため、測定はほぼ

0.2 mm おきにとり、ほぼ流れ全域にわたって測定を繰り返している。

6. あとがき

以上、二種の天秤式差圧計の説明と、測定上の主要な誤差のひとつである表面張力について評価を行ない式³⁾を導いた。それによればこの差圧計は当初予想していた(前報参照¹⁾)数 cm/sec の流速測定を高精度では望めない。しかしながら実測データ Fig. 1-e に着目すると、流速が(1)をみたく 20 cm/sec 以上ということもあるが、流速の微小な変化が測定されている。これは実験条件(流量、勾配など)を保ち、ピトー静圧管を流れの中でほとんど連続的に変えていきさえすれば、天秤の感量(今の場合は 100 mg)分の速度差には、天秤は追従していくことを示している。すなわち、この天秤型差圧計は、低流速域において、流速の絶対値には、表面張力の影響で誤差が大きく入ってくるが、速度変化率には信頼性があるといえる。この差圧計の使用にあたっての注意点を与え、まとめとする。

- (1) 据え付けにおいて、天秤全体のバランスをとる(水準器で行なう)
- (2) 3で述べた零点調整、ゲイン調整を繰り返す。
- (3) 常にきれいな水を使用し、円柱内の壁面も洗剤で洗い、きれいな状態で使用する。
- (4) 測定用円柱内の水面位置(特に静圧管の方)が同じ場所で測定する(断面積の変化による誤差、表面張力の影響を少なくする)

最後に、自動制御式天秤差圧計の設計、製作に多大な協力を頂いた本学電気工学科大崎堅氏に深く感謝します。また本実験については、本学卒業生、宮村考司君(現戸田建設)の協力で行なわれたことを記し、感謝します。

参 考 文 献

1) 深田, 齊藤ら: 水位, および極微小差圧の新計測法について, 山口大学工学部研究報告, **31**, 179 (1980)

2) 谷他：流体力学実験法，岩波書店

3) G. K. Batchelor: An introduction to fluid dynamics,
Cambridg Univ. Press (1967) p. 67

4) 大島久幸：広矩形断面水路の側壁効果に関する研究，山

口大学工学部卒業論文 (1980)

5) 宮村孝司：粗面上の薄層流れに関する研究，山口大学工
学部卒業論文 (1980)

(昭和 56 年 4 月 15 日 受理)