

水位, および極微小差圧の新計測法について

深田三夫*・斎藤 隆*・大崎 堅**・田中保弘***

On the New Method for Measuring Water Level and
Small Pressure Difference

Mitsuo FUKADA, Takashi SAITOU, Katashi ŌSAKI
and Yasuhiro TANAKA

Abstract

Some of the elementary principles of water level and pressure difference measurement devices are discussed, and these devices were practically made according to the principle. One of these devices is float-type water level meter equipped with swing-arm mechanism which indicate the water surface elevation after magnification.

On the other hand, two types of difference meter were made for determining very small difference in pressure precisely. These devices are both very simple in principle and in construction.

1. an inverted bell type difference meter
2. an balance type difference meter

by means of these simple devices, the pressure difference was measured very accurately in a different way than ever before, taking note of the weight difference of fluid in manometers rather than the head. These devices, in combination with pitot tube and pitot-static tube, made able to measure local variations of velocity and pressure in the thin flow on the rough wall.

緒 言

現実の水理現象を流体力学的な観点に立って, 見直そうとする立場と, 工学的, あるいは農学的な応用という観点に立って, さらに精度を高めた実用式の確立のための実験, あるいは現場観測に立つ立場があるように思える。熱線流速計などによる乱れ量の測定などは前者のあらわれであり, 最近では, 水理学において前者の立場が大きな比重をしめてきたとあってよいがそれでもなお, 平均流速という考えは, 前者と後者とを結ぶものとして重要な概念である。円管や, 開水路流れにおいて, 壁面粗度が直接の原因となって生ずる流速分布, 特に, 壁面近傍での平均流速分布を知ること, 壁面摩擦を定量的に理解すること, いわゆる, 抵抗則の確立という意味で重要なことである。

平均流速測定には, 通常, ピトー静圧管が使用されており, 総圧, 静圧の差によって, 原理的には平均流速を知ることができる。このため, 測定精度向上には二つの問題を解決しなければならない。ひとつには, 流量の測定精度を上げる(あるいは, ピトー管係数を精度よく定める)こと, ひとつには, ピトー静圧管に接続した, 水位測定用円柱, いわゆるマノメーター内の差圧測定の精度をあげることである。筆者らは, この観点から, 壁面近傍の流れの平均流速測定の精度を高める目的で三つの装置を考案, 製作した。以下, 次の名前で呼ぶことにしよう。

1. 拡大式水位計(流量測定用)
2. 逆沈鐘型微差圧計(流速測定用)
3. 天秤式微差圧計(流速測定用)

特に, 微差圧計 2, 3 は, 測定円柱内への流入液体の重量差に着目した点において, 従来の方法と異なり, 後に述べるように, 平均流速 10 cm/sec までの測定が可能となった。しかし天秤の選択と, ピトー静圧管の仕上げ如何によっては, さらに低流速までの測定

* 土木工学科
** 電気工学科
*** 北九州市役所

が、期待できる。以下に三つの装置の概略と、それを用いての検定結果、測定結果について述べることにしよう。

1. 拡大式水位計

拡大式フロート水位計の概観図を、Fig. 1 に示す。従来より、実験用に使用されてきた、三角堰、四角堰などの越流水深の測定方法は、ポイントゲージによる直接読み取り、マンメーター、傾斜型マンメーター、拡大機構を持たないフロート水位計などによるものであった。しかし、流量の増加に伴う、波の発生などによって、平均水深の読み取り精度の悪化、あるいは、マンメーターによる方法では、管内表面張力の影響によって、測定精度にも限界があった。ここに示した、水位計は、フロートと、フロートの鉛直変化量を、スイングアーム機構によって、拡大して読み取る拡大機構とから成り、上の二つの問題を一挙に解決するものである。また、構造的に簡単で、直線運動をただ単に、回転運動に変えるのみでなく、後に示すように、その変化量の数学的表現は、初等幾何学で示すことができるものである。しかしながら、この機構がもつ、

最も大きな特徴は、広範囲にわたって、フロートレベル変化量と、拡大された量とが、線形な関係をもつところにある。しかも、アームの長さを自由に選択することにより、拡大率は自由にできる。また、フロートレベル変化量と、拡大量とが、近似的にべきで表わされる関係をもつ範囲があり、使用目的によっては、(たとえば、オリフィス、三角堰における水位と流量との関係) 機械工学的リニアライザーとして役に立てることもできるであろう。さてここで、水位計のアーム機構の運動の数学的表現を求めておこう。Fig. 1 を参考にして、簡単に次式が導ける。

$$l_1 \sin \varphi + l_2 \cos \theta = L \quad \dots\dots (1)$$

$$-l_1 \cos \varphi + l_2 \sin \theta = S(\theta, \varphi) \quad \dots\dots (2)$$

ここに、 l_1 : 第一アームの長さ、 l_2 : 第二アームの長さ、 S は水位上昇方向に、 θ は図のように時計回りに正にとするとする。(1)、(2) より S と θ の関係を求め、 L で無次元表示すると

$$S/L = l_2/L \sin \theta \pm \{(l_1/L)^2 - (1 - l_2/L \cos \theta)^2\}^{1/2} \quad \dots\dots (3)$$

この曲線の変域は簡単な計算により、

$$-\cos^{-1}(1/(l_1/L + l_2/L)) < \theta < \cos^{-1}(1 - l_1/L)/l_2/L$$

$$(l_1/L - l_2/L < 1 < l_1/L + l_2/L)$$

$$-\cos^{-1}(1/(l_1/L + l_2/L)) < \theta < \cos^{-1}(1/l_1/L - l_2/L)$$

$$(l_2/L < 1 < l_1/L - l_2/L)$$

$$-\{(l_1/L + l_2/L)^2 - 1\}^{1/2} < S/L$$

$$< \{(l_2/L)^2 - (1 - l_1/L)^2\}^{1/2}$$

$\theta, S/L$ の可動範囲を Fig. 2, Fig. 3 に示す。

さらにこの曲線の極値を求めることによって、特徴が一層はつきりする。

$$d(S/L)/d\theta = l_2/L \cos \theta + (1 - l_2/L \cos \theta) l_2/L$$

$$\times \sin \theta / \{(l_1/L)^2 - (1 - l_2/L \cos \theta)^2\}^{1/2} \quad \dots\dots (4)$$

$$= (S/L \cos \theta - \sin \theta) / (S/L \times L/l_2 - \sin \theta) \quad \dots\dots (4')$$

任意の点における拡大率は

$$m = l_3 d\theta/dS = l_3 / (dS/d\theta) \quad \dots\dots (5)$$

で表わされる。曲線 (3) の極値は、(4)' から、

$$S/L = \tan \theta, \quad S/L = l_2/L \sin \theta \quad \dots\dots (6)$$

と (3) との交点が、極値の軌跡を与える。 $l_1/L, l_2/L$

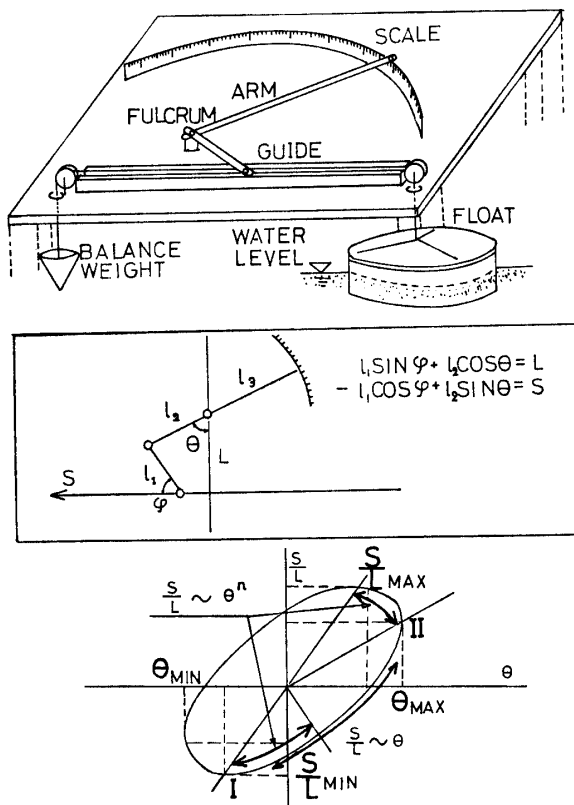


Fig. 1 Schematic views of a float-type water level meter.

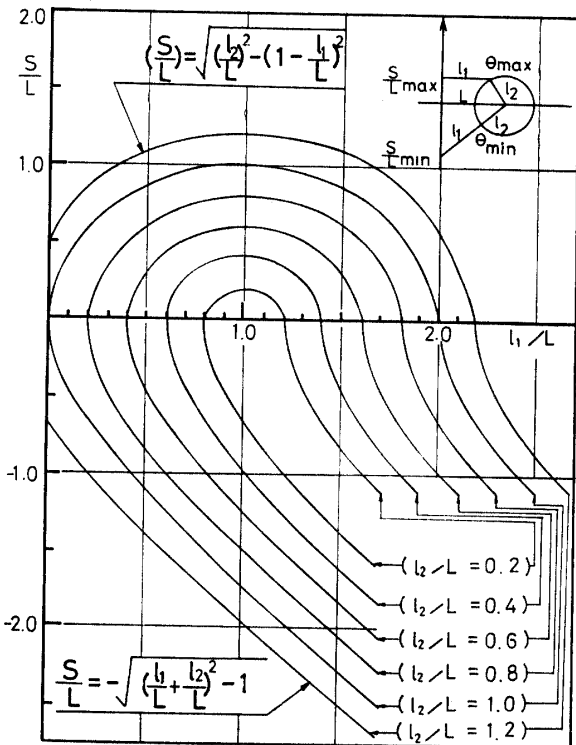


Fig. 2 Movable range of S/L for different values of $l_1/L, l_2/L$.

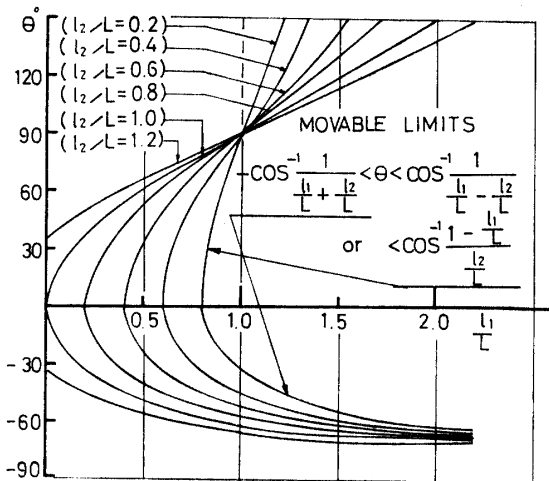


Fig. 3 Movable range of θ for different values of $l_1/L, l_2/L$.

をパラメーターとして変化させた場合の $S/L \sim \theta$ の関係が Fig. 4 に示されている。このグラフからわかるように、 $\theta=0$ を中心にかなりな範囲で直線で近似できることである。いま、この近似式を、Fig. 5 を参考にして次式で表わそう。

$$S/L = (d(S/L)/d\theta)_{\theta=0} \theta + (S/L)_{\theta=0} \\ = l_2/L \theta - \{(l_1/L)^2 - (1 - l_2/L)^2\}^{1/2} \dots (7)$$

この曲線が、 $\theta=0$ を中心に、単調増加曲線であることを利用して、直線近似が、たとえば、5%の精度で成りたつ範囲を求めよう。(4)' よりいまこの範囲を $\theta_1 < \theta < \theta_2$ とすれば、

$$\{(S/L)_{\theta_1} \cos \theta_1 - \sin \theta_1\} / (S/L \times L/l_2 - \sin \theta_1) \\ = (d(S/L)/d\theta)_{\theta=0} \times 0.95 = 0.95 l_2/L \\ \{(S/L)_{\theta_2} \cos \theta_2 - \sin \theta_2\} / (S/L \times L/l_2 - \sin \theta_2) \\ = (d(S/L)/d\theta)_{\theta=0} \times 1.05 = 1.05 l_2/L$$

たとえば θ_2 は、曲線 (3) と

$$S/L = (1 - 1.05 l_2/L) \times \sin \theta / (\cos \theta - 1.05)$$

の交点として定まるわけである。(Fig. 5' 参照)

次に $S/L \sim \theta$ が、他の関数関係、たとえば、べき関係で近似できないか調べよう。この関係を持たせるには、Fig. 1 で示した、極値点まで原点を平行移動しなければならない。I 点まで原点を移動した場合の $(S/L) \sim (S/L)_0$ と $\theta - \theta_0$ の関係を両対数にプロットした。(Fig. 6)。II 点まで移動した場合には Fig. 7 に示されている、線形な範囲に比較して、範囲は狭くなるが、べき関係をもたすことができる。領域 I では、上の例の場合 $S/L \sim \theta^2$ 、領域 II においては $S/L \sim \theta^{1/3}$ で近似できるだろう。このことを利用すれば、 S/L に水位変化を、 θ に水理量(たとえば、オリフィス、三角堰、四角堰からの流出量)を対応させれば、リニアライザーとして利用できる。

—実際の製作、使用にあたっての問題点について—

製作は主に、三角堰、四角堰からの流量の精密測定を目的として行なわれた。実際に製作した四つの水位計は、いずれも、フロート・アーム部をアクリル板につくった。緒元は次のとおりである。

1. 熱線流速計、ピトー管検定用三角堰

$$Q \sim 3l/sec \quad l_1=11cm \quad l_2=7cm \quad l_3=20cm \quad L=7cm$$

2. ダム模型実験用流量測定用四角堰

$$Q \sim 70l/sec \quad l_1=20cm \quad l_2=16cm \quad l_3=40cm \quad L=20cm$$

3. 鉛直噴流実験用三角堰

$$Q \sim 50l/sec \quad l_1=10cm \quad l_2=8cm \quad l_3=20cm \quad L=10cm$$

Fig. 8 に 3 の水位計の針の特性曲線とその検定曲線を示す。検定曲線にばらつきがみられるのは、摩擦を避けるために、水路に直接、ガイドなしでフロートを浮べたために、流量の増加に伴いフロートが押し流されて、指針の読み取り精度の悪化を招いたためである。

拡大率は、近似的に、(3) と (7) を用いて、 $m = L \times l_0/l_2$ で表わされる。第3のアームの長さによって、拡大率は任意に定められることになるが、アーム

の重量の増加に伴って、支持が必要となり、摩擦力が加わるため感度が低下する。このため、フロートの径を大きくするなどの工夫が必要となる。一方、流量が

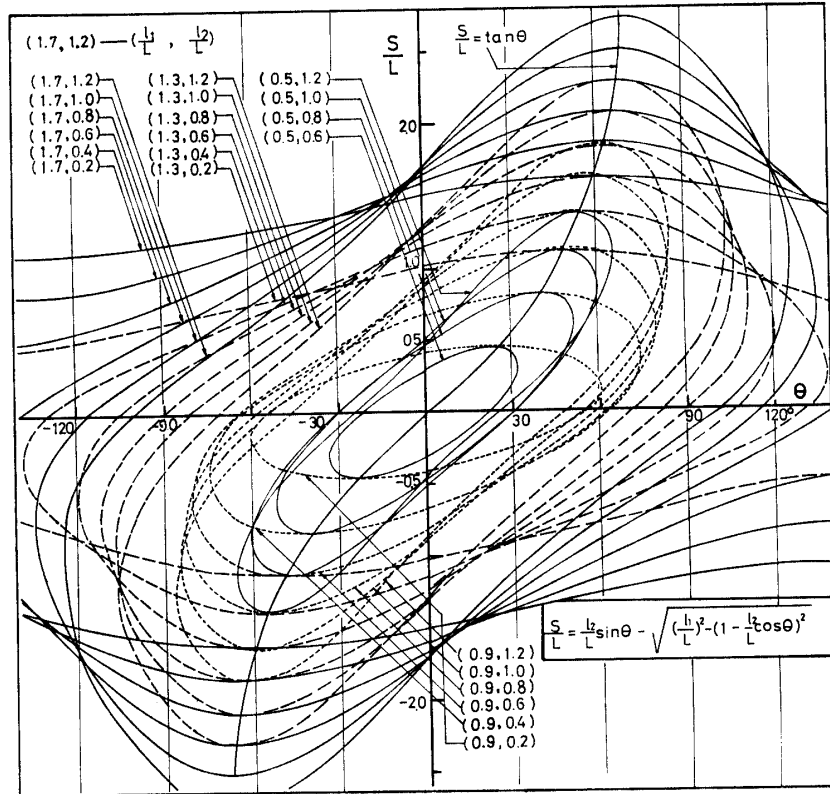


Fig. 4 A function of S/L and θ .

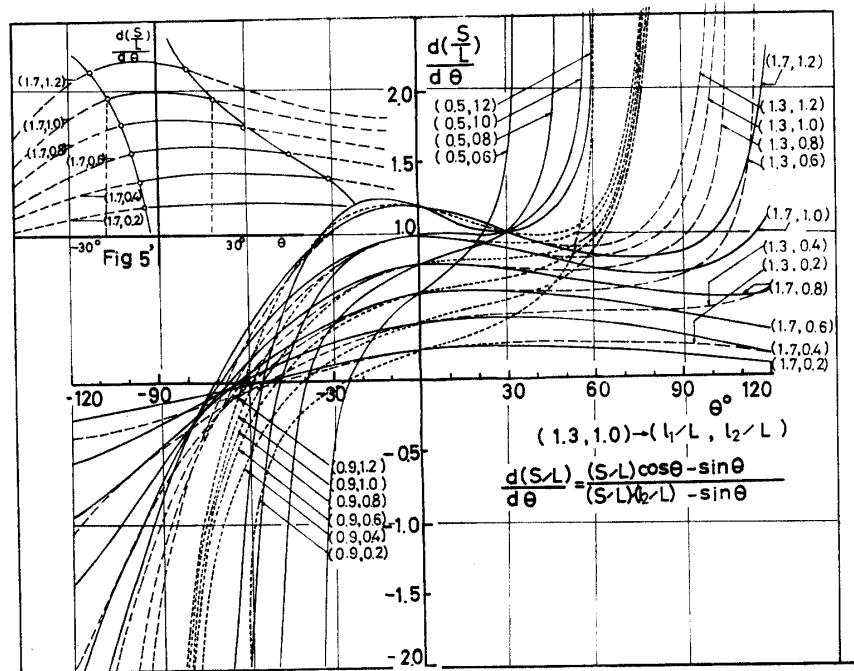


Fig. 5 A function of $\frac{d(S/L)}{d\theta}$ and θ .

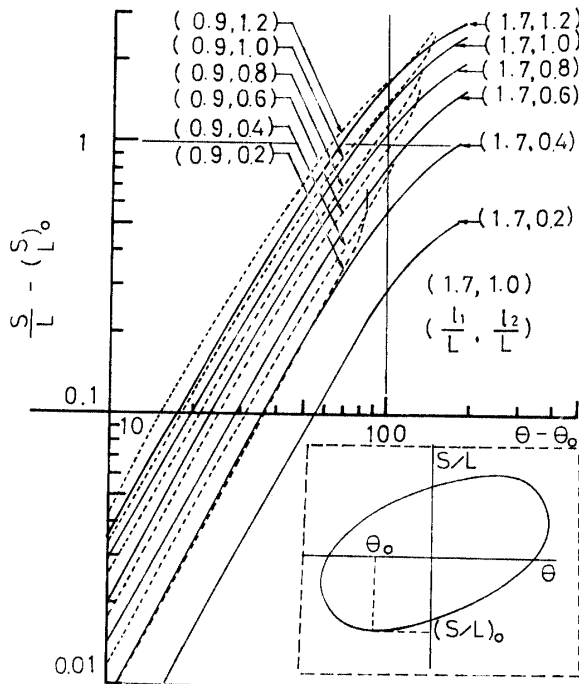


Fig. 6 Figure of the logarithms of $S/L - S/L_0$ and $\theta - \theta_0$.

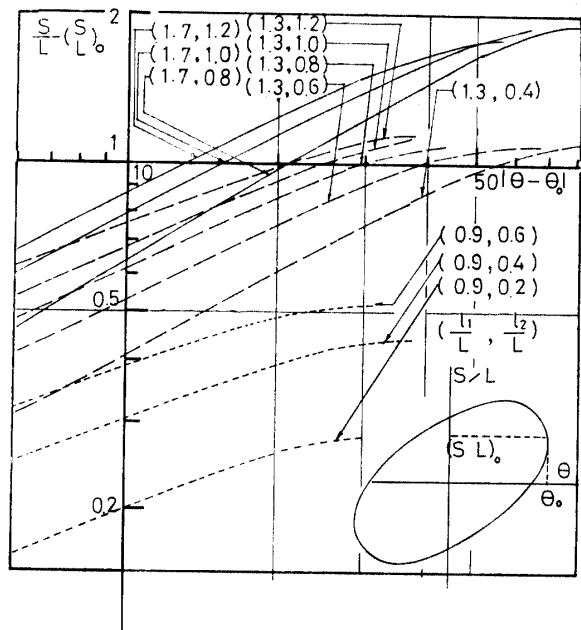


Fig. 7 Figure of logarithms of $S/L - S/L_0$ and $\theta - \theta_0$.

増加した場合, 流れに押し流されないためのガイドの工夫, もしくは, 別に静水槽を設けてフロートを浮かす工夫などが必要であろう. その他の注意事項としては, バランスウェイトは糸にわずかな張力を持たす程度にとどめること. 滑車部分の摩擦を少なくすることなどである.

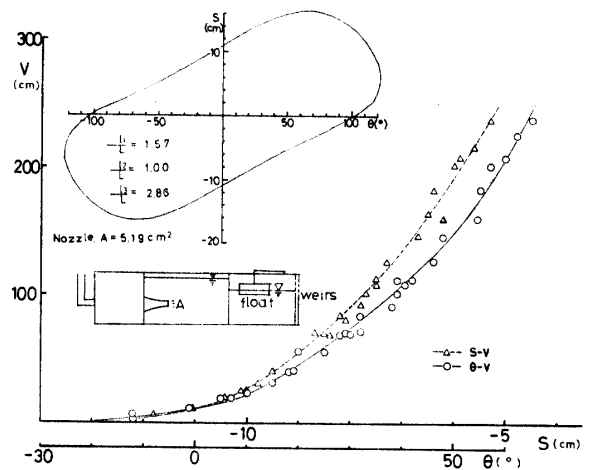


Fig. 8 Characteristic curve and calibration curve of float-type water level meter.

2. 逆沈鐘型差圧計

Fig. 9 にこの差圧計の原理の説明, Fig. 10 に, 実際に製作した差圧計の概観図を示す. 原理的には簡単でアルキメデスの原理にもとずいている. 静水槽に, 薄い肉厚壁をもつ, 半径 D の円筒型容器を浮かべ, その中に総圧を導くだけのものであって, 総圧がかかり, 液体が流入してくると, それとバランスするための浮力の増加分が, 容器の体積分によって補われるのである. 後に述べるように, 流速測定のため, ピトー静圧管と接続して用いる場合には, 静水槽内水位と, フロート内水位とを同一水平面にした上で使用しなければならない (Fig. 9). このため円筒容器全体の重心が高くなり, 自作の場合は容器を完全な対称形につくることは困難ということもあって, 完全に鉛直に浮かすことは困難で, このためガイドを入れることになる. 装置はこのため, やや複雑になる. Fig. に従って説明しよう. フロートの内断面積, 外断面積, 高さ, 材質の密度をそれぞれ, A_1, A_2, L, ρ としよう. 総圧をかけない状態, かけた状態でつり合いの式をたてると,

$$\left. \begin{aligned} A_1 h_1 \rho_w g + (A_2 - A_1) L \rho g &= A_2 h_1 \rho_w g \\ A_1 h_1 (h'_1 + \Delta h) \rho_w g + (A_2 - A_1) L \rho g &= A_2 (h_1 + h'_1) \rho_w g \end{aligned} \right\}$$

ここで ρ_w は液体の密度である. 両式より

$$\Delta h = (A_2 - A_1) / A_1 h'_1 = (1 - A_1/A_2) / A_1/A_2 \times h'_1 \quad \dots\dots (8)$$

したがって微小差圧 Δh を読むかわりに, h'_1 を読めばよい. その拡大率は

$$m = h'_1 / \Delta h = A_1/A_2 / (1 - A_1/A_2) \quad \dots\dots (8')$$

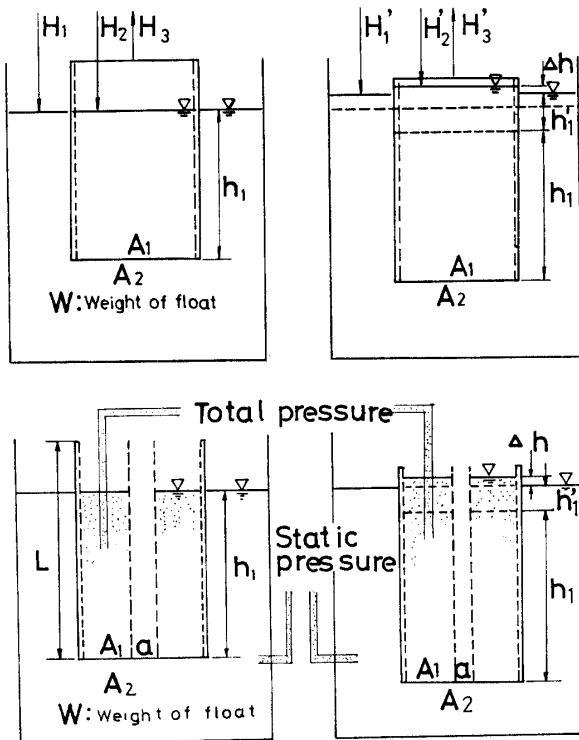


Fig. 9 The fundamentals of structure of an inverted bell type difference meter.

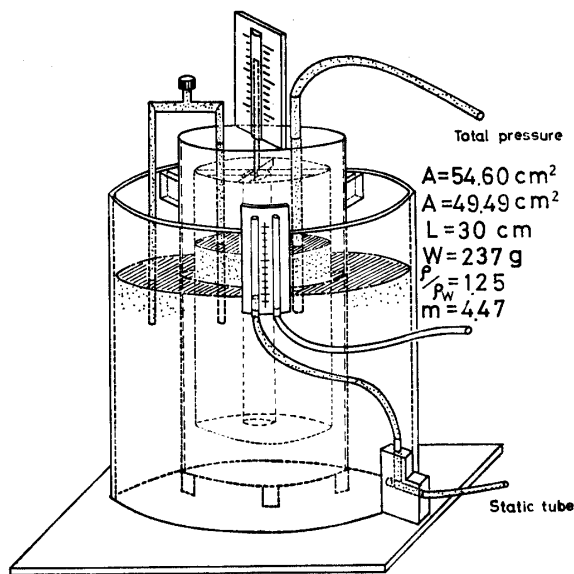


Fig. 10 Schematic view of an inverted bell type difference meter.

ただし、この状態では、容器が、浮ばなければならないという条件 $h_1 < L$ より $\rho/\rho_w < 1$, すなわち、比重が 1 より小さな材料で製作しなければならない。かけることのできる差圧の最大値は、 $L - h_1 > h'_1 + \Delta h$ と、 $h_1 = \rho/\rho_w \times L$ と $h'_1 = A_1/(A_2 - A_1) \times \Delta h$ とを用いてで $\Delta h < L(1 - A_1/A_2)(1 - \rho/\rho_w) = L(1 - \rho/\rho_w)/(1 + m)$ (9)

ある。実際の製作にあたっては、 $\rho/\rho_w < 1$ の材質で、一様な内径の、円筒容器を探すのは容易でない。このため、フロート内に、中空部分を設けることになる。(Fig. 9) この場合も同様につり合いの式をたてると、中空部分の断面積を a として、総圧がかからない状態においては、

$$(A_2 - A_1)\rho g L + (A_1 - a)\rho_w g h_1 = A_2 h_1 \rho_w g$$

これより

$$h_1 = (A_2 - A_1)/(A_2 - A_1 + a) \times \rho/\rho_w \times L$$

フロートが浮ぶ条件 $0 < h_1 < L$ より

$$\rho < (1 + a/(A_2 - A_1))\rho_w$$

総圧がかかった状態において

$$(A_2 - A_1)\rho g L + (A_1 - a)\rho_w g (h_1 + h'_1 + \Delta h) = A_2 (h_1 + h'_1) \rho_w g$$

これとはじめの式より

$$h'_1 = (A_1 - a)/(A_2 - A_1 + a) \times \Delta h \quad \dots\dots (10)$$

拡大率は次式で与えられる

$$\begin{aligned} m &= h'_1/\Delta h = (A_1 - a)/(A_2 - A_1 + a) \\ &= (A_1 - a)/A_2 / (1 - (A_1 - a)/A_2) \\ &= \xi/A_2 / (1 - \xi/A_2): \quad \xi \equiv A_1 - a \quad \dots\dots (10') \end{aligned}$$

測定可能な差圧の最大値は $L - h_1 > h'_1 + \Delta h$ より

$$\begin{aligned} \Delta h &< L(1 - A_1/A_2 + a/A_2) \\ &\times \{1 - (1 - A_1/A_2)/(1 - A_1/A_2 + a/A_2) \times \rho/\rho_w\} \end{aligned}$$

or

$$\begin{aligned} \Delta h &< L/(1 + m) \\ &\times \{1 - (1 - A_1/A_2)/(1 - A_1/A_2 + a/A_2) \times \rho/\rho_w\} \\ &= L/(1 + m) \{ (1 - A_1/A_2)/(1 - \xi/A_2) \times \rho/\rho_w \} \\ &= L \{ 1 - (1 - A_1/A_2) \times \rho/\rho_w \} - L\xi \end{aligned}$$

or

$$\Delta h/L < 1 - (1 - A_1/A_2) \times \rho/\rho_w - \xi/A_2 \quad \dots\dots (11)$$

Fig. 11 に中空フロートの場合の拡大率の変化と測定可能な差圧の最大値が示されている。

—実際の製作上の留意点、および検定方法について—
浮体につきものの、安定性の問題については、浮体が理想的に、対称形である場合、次式を満たせば、安定である。 y_G を容器のみの重心と底面との距離として、

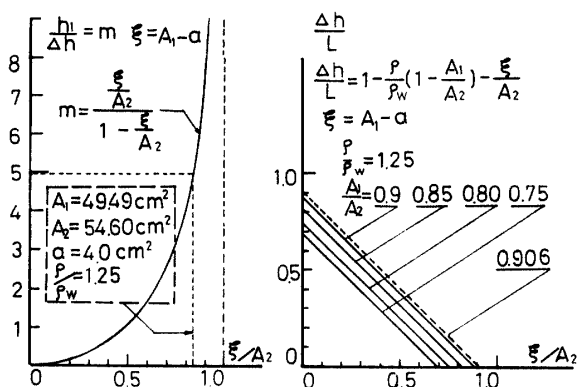


Fig. 11 Magnifying power m and measurable range of head difference $\Delta h/L$.

$$y_G < (h_1 + h'_1) + 1/2 \Delta h$$

今、考えているフロートの場合、この式を満たしているが、中空の容器を自作する場合、完全に対称形につくることは困難で、このため浮体は傾くことになる。このため、フロートを鉛直に保つためのガイドが必要となり、ガイドとの間に摩擦が生ずることになる。このため、微差圧測定には限界が生ずることになる。この摩擦の大きさの評価は、作製した、個々のフロートについて異なるので、定量的評価はし難い。実際に作製した二個のフロートは、完全に対称形につくられていなかったため、比較的、大きな差圧に対しては、計算結果に近い倍率を示したが 1 mm 以下の差圧に対しては（流速に換算して 15 cm/sec 以下）作動しなかった。フロートの製作に充分注意を払うことが今後の課題であろう。検定方法は、Fig. 9 に示したように、フロート内へ水を注入し、 $H_1, H_2, H_3, H'_1, H'_2, H'_3$ を測定することによって行なうことができる。平均拡大率 m は $|H'_2 - H_2| - |H'_1 - H_1|, |H'_3 - H_3| + |H'_1 - H_1|$ を最小自乗直線近似することによって得られる。検定

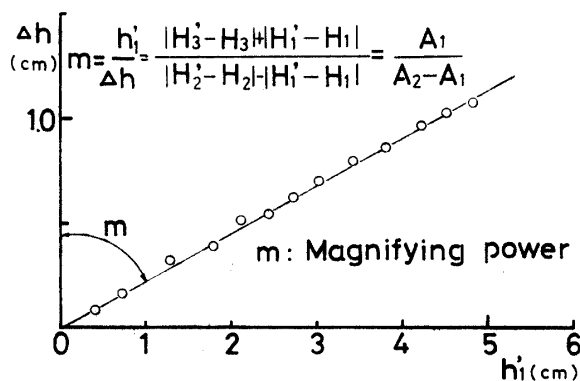


Fig. 12 Calibration curve of a practically made difference meter.

によって $m=4.47$ 倍の拡大率が得られた。(Fig. 12)

$$\bar{m} = (|H'_3 - H_3| - |H'_1 - H_1|) / (|H'_2 - H_2| - |H'_1 - H_1|) \dots (12)$$

3. 天秤式微差圧計

2 の逆沈鐘式微差圧計は、フロート本体の材料の選択および、内径、外径比、 A_1/A_2 、フロート長 L の選択如何によって、5 倍以上の拡大率が得られる。しかし、装置がややかさばるということ、ガイド部との摩擦によって、微小差圧部で感度がおちることなどから、実際の製作、使用にあたっては、用途は限られてくるだろう。この他にも、微差圧 Δh の測定精度を高めるために、傾斜型マンノメーター、液槽 U 字マンノメーターなどが使用されているが、その読み取りは、表面メカニカスの不整、円柱内液体の表面張力の影響で、1 mm 以下の精度は、期待できない。このことは、たとえば、開水路流れの平均流速分布を測定しようとした場合に、測定流速範囲にも、また、流れの中の測定

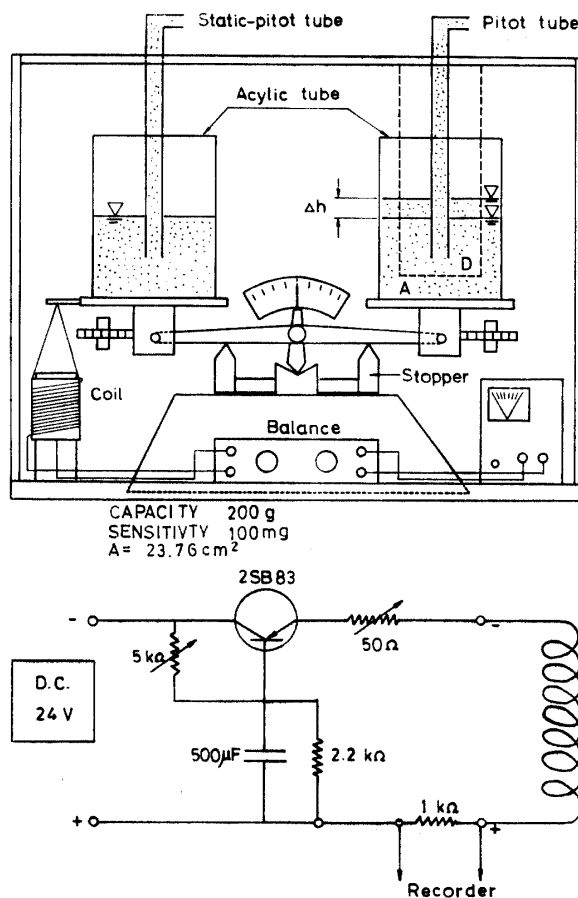


Fig. 13 Schematic illustrating use of balance meter for measurement of small pressure difference.

位置間隔にも、限界があることになる。任意の測定点において、差圧 h がかかっているとしよう。流れに垂直方向に測定点を移したとしよう。そこでの差圧を $(h+h')$ とする。平均流速差は

$$\begin{aligned} \Delta \bar{v} &= \bar{v}_2 - \bar{v}_1 = \alpha_2(2g(h+h'))^{1/2} - \alpha_1(2gh)^{1/2} \\ &\approx \alpha_1(2gh)^{1/2} \times h'/2h \end{aligned} \quad \dots\dots (13)$$

となり、 h' の測定に限界があることから、低流速域になる程、測定精度は急激に悪化するわけである。このことは、開水路滑面流れはともかく、平均流速分布が壁面粗度に大きく影響されるような、粗面上薄層流などにおいては、従来の差圧計では、実験によって、平均流速分布を定量的に理解することは、困難といわねばならない。

筆者らが、考案した方法は、水頭差 Δh ではなく、総圧測定円柱内の流入重量 $\rho \times g \times \Delta h \times A$ に視点を換え、これを天秤で測定することによって、 Δh の測定精度をあげたものである。原理は簡単で、総圧円柱内、静圧円柱内の液体の重量差 ΔW グラムを測る。円柱の断面積 A がわかっているから、

$$\Delta h = \Delta W / A \text{ (cm)} \quad \dots\dots (14)$$

この差が、ピトー静圧管に、接続したことによる結果であれば、流速は

$$v = \alpha(2g\Delta W/A)^{1/2} \quad \dots\dots (15)$$

ここに α はピトー管係数で、流量検定によって定めることができる。ここでいくつかの天秤による、流速測定可能範囲、最小流速差を(14)、(15)式に従って求めてみよう。感量を m_s グラムとすると

$$\begin{aligned} \Delta h_{\min} &= m_s / A, \\ v_{\min} &= \alpha(2gm_s/A)^{1/2} \\ \Delta v_{\min} &= \alpha(g/2)^{1/2} \times m_s / A \times 1/(h)^{1/2} \end{aligned}$$

ただし、測定用円柱を $A=23.76 \text{ cm}^2$ とし、ピトー管係数を1として計算してある。測定用円柱の断面積を大きくすることによって、微差圧の測定感度はあがるわけであるが、同時に、容器重量の増加、定常状態に

なるまで時間がかかるといった問題が生じてくる。測定時間の短縮化は、次のような工夫することによって達成することができる。Fig. 13に示すように、総圧測定用円柱内に、外部に固定した、円柱を入れることによって、液体の流入部分の断面積を減らすことができる。外部の系に固定しているため、流体は浮力の反作用として、液面下の体積の水の重さに相当する力を受け、この円柱がない場合と同じ結果を、天秤は指示することになる。中の円柱の径によっては、いくらでも、液体の流入部分の体積を減らすことができ、時間の短縮化が可能のはずであるが、ここに新たな問題が生じてくる。この天秤式差圧計は、二つの円柱内の液体の重量差を読む。このため、二つの円柱内の状態が同じである限り、(たとえば、内壁面を、いったん、ぬらした上で使用する)表面張力の影響は、打ち消し合うことになる。しかし、いったん、外部に固定した円柱をいれると、この円柱表面による表面張力の効果は、無視できなくなる。いま、内部円柱の外径を D (cm) 表面張力を σ (g/cm)、接触角を θ とすると、表面張力による上向きの力は

$$\sigma \pi D \sin \theta \text{ (g)}$$

となり、この分だけ感度が低下することになる。よって内に入れる円柱の大きさにも限度があることになる。それは次式を満たすような D を選択しなければならない。

$$\sigma \pi D \sin \theta < m_s \text{ or } D < m_s / (\sigma \pi \sin \theta)$$

挿入円柱として、きれいなガラス管を使用した場合 $\theta=90^\circ$, $\sigma=0.075 \text{ g/cm}$ (15°C), $m_s=0.1 \text{ g}$ とし、許容最大径は $D_m=0.42 \text{ cm}$ となる。開水路流れの平均流速分布を測定するような場合に、 1 cm/sec 以下の速度変化が測定されなければならない。このことを考えると、この表面張力の影響は無視できるものでなく、実際、速度変化があるはずなのに、天秤のバランスは、全然変化がないといったことが生じてくる。ことに測定時刻の経過に伴い、円柱の表面、流入水のごれが、目立つようになると、この効果は飛躍的に大

Table 1 Measurable range of flow velocity, or head difference by various balance

秤量 (g)	感量 (mg)	$\Delta h_{\min} \sim \Delta h_{\max}$ (cm)	$v_{\min} \sim v_{\max}$ ($\frac{\text{cm}}{\text{s}}$)	Δv_{\min} ($\frac{\text{cm}}{\text{s}}$)
100	50	$2.10 \times 10^{-3} \sim 4.21$	2.03~90.8	0.046
200	100	$4.21 \times 10^{-3} \sim 8.42$	2.87~12.9	0.093
500	200	$8.42 \times 10^{-3} \sim 21.0$	4.06~203	0.186
1 k	500	$2.10 \times 10^{-2} \sim 42.1$	6.42~287	0.465

きくなって来る。このことを考えると、ことに低流速域 (50 cm/sec 以下) での測定の際は、円柱を入れない方が望ましい。よって測定時間の短縮化は無理であるが、安定するまでの時間がどの位か調べたのが Fig. 14 である。これはあとに述べるように、差圧を電氣的に取りだし、これをレコーダーに記録させる方法で調べたものである。ほぼ 50 cm/sec の流速域で、流れに垂直な方向に、ピトー静圧管を 1 mm, 3 mm, 5 mm 移動させ、新しい測定点において、流入量がなくなり、定常的な状態を示すまでの時間を、レコーダーの記録紙から読みとったものである。筆者らが、実験を進めている粗面薄層流れの、平均流速分布測定 (10 cm/sec~100 cm/sec) には、0.3~1.5 mm 間隔で、流速を測定しているが、20分程度で、定常状態に達するようであったが、このことは上のグラフからも確認される。

—実際の製作、および測定結果について—

Fig. 13 には、概観図が示されているが、粗面薄層流れの平均流速測定に使用した初期のものは、感度

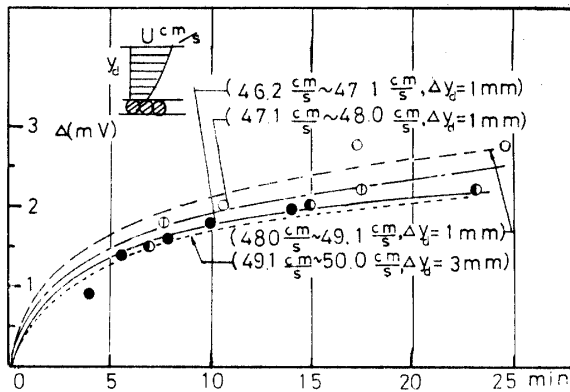


Fig. 14 The time required until the pressure difference obtain equilibrium.

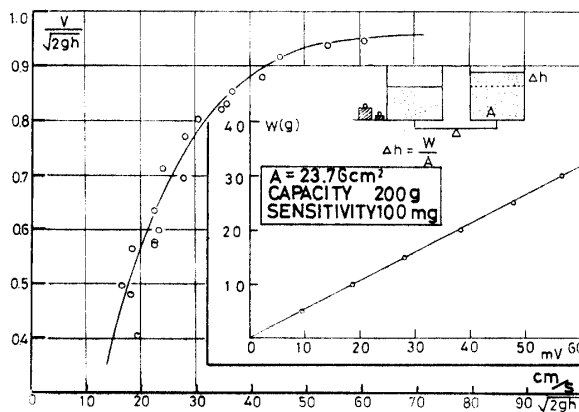


Fig. 15 Calibration curve of electrical balance meter and pitot coefficient $v/\sqrt{2gh}$.

100 mg, 秤量 200 g の上皿天秤の上皿部を改良し、測定用円柱 ($A=23.76 \text{ cm}^2, l=15 \text{ cm}$ のアクリル製円筒), および、ストッパーを取り付けただけの簡単な構造のものである。これと境界層用ピトー静圧管 (Fig. 16a)

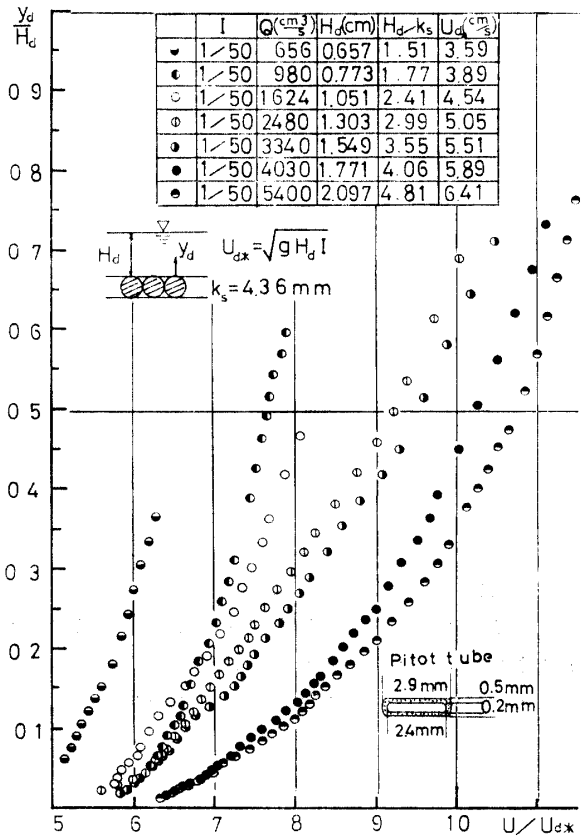


Fig. 16 (a)

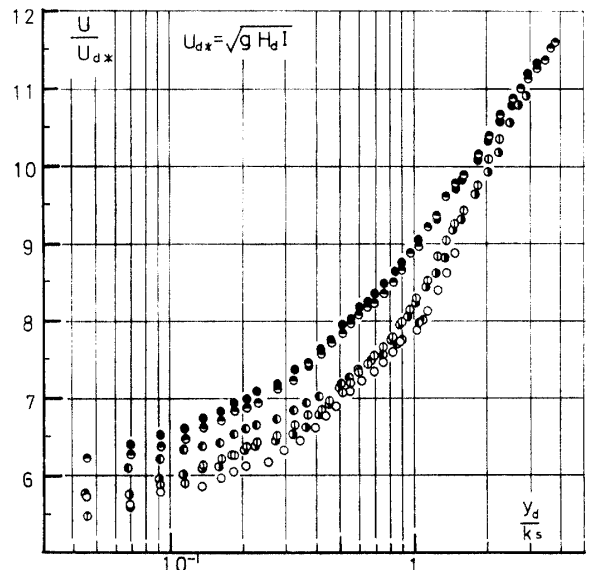


Fig. 16 (b)

Fig. 16 Velocity profiles in the thin flow on rough wall which were measured by pitot tube in combination with balance meter.

との組み合わせによって、壁面近傍の平均流速分布が明らかになった。この測定結果を Fig. 16a, 16b に示す。結果は粗度平均上端面を基準とした水深を用いた摩擦速度 U_{d*} で無次元化して表示してある。山地急勾配河川における掃流力や、降雨時における急斜面からの土砂の流亡量などの定量的な予測の基礎となる抵抗則は、今まで対数速度分布則に基礎をおいてきたデータが示すところによれば、壁面粗度と同程度の流れにおいて、壁面近傍では、対数則は完全に姿を消しているといつてよく、このような薄層流れの抵抗則は、今後、検討し直さなければならない。このための基礎となるデータが天秤式差圧計によって得られた。なおこの天秤式差圧計の感度を更に高める目的で、測定円柱内の流体の重量変化を電氣的に取り出す工夫がなされた。Fig. 13 に示されているように、コイルに電流を流し、インダクタンス変化をレコーダーに記録させる。あらかじめ、重さと電圧変化の検定曲線をつくっておけば、レコーダーを読むことによって重量変化を知ることができる。この検定曲線と、これを用いたピトー静圧管の検定曲線を Fig. 15 に示す。ただ、バランスを取る場合には、以前の方法と変わりがないため、低速域で測定にばらつきがみられる。しかし、これによって、測定円柱内への液体の流入量が定常的になるまでの時間が容易にわかるようになった。今後、改良すべき点としては、電氣的にバランスを取る方法の考案などである。

ま と め

以上、拡大式水位計と二つの微差圧計について、その原理と、実際に製作した、測定器について、検定結

果、および、2, 3の実測値について述べた。

ここでは二つの微差圧計は、低流速の測定用（ピトー管に接続して使用する）として考案され、製作されたが微小な水位変化の測定用としても使用できることを付け加えておこう。たとえば、粗面薄層流れにおいて、その抵抗則を知る上で、平均流速分布、および、乱れ量の測定と共に、水深の測定精度をあげることが必要であり、ことに、粗度と同程度、あるいはそれ以下の水深をもつ流れでは、表面は、粗度の影響を大きくうけ、波打つ、このような場合に、ポイントゲージでの測定精度は悪化する一方である。このような微小な水深測定に、二つの微差圧計は使用できる。その他、密度流実験における、微小な水面勾配の測定、浸透流実験において、透水体両端に微小な水頭差を与えた際の Darcy 則の適用限界の確認などにも使用できると思われる。なお、逆沈鐘型微差圧計の、中空円筒フロートの安定性、摩擦力の評価は、今後の課題として残された。

測定器の製作、および検定にあたっては、昭和54年度水理研究室卒業研究学生諸氏の協力をいただいた。

図面の作成には、本学大学院 岡田武司君の協力を得た。ここに謹んで謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) J. P. Holman, W. J. Gajda, Jr.: Experimental method for engineers. McGraw-Hill Book (1978) p. 194
- 2) V. L. Streeter, E. B. Wylie: Fluid mechanics McGraw-Hill Book (1975) p. 38-44
- 3) 谷他 流体力学実験法 岩波書店
(昭和55年4月15日 受理)