

大流量測定法としてのピトー管法に関する諸問題 (第4部)

試験結果取扱上の問題点・補遺・結論

Practical Problems in Regard to Pitot Tube Method for the Measurement of Large Water Discharge (Part IV)

山崎卓爾*

内 容 梗 概

過去6箇月にわたり、ピトー管法についての概要を述べてきたが、最後に試験結果の取扱上の問題点について紹介して、この稿を終ることとした。

ピトー管法では試験測定値はマンメータ指示としてえられ、これより各部の流速を算出して、これを断面上で積算して流量がえられるが、これに関しては平均流速を求めるための算術平均法、 $v^2 \sim v$ 法、 $r \sim rv$ 法などがあり、またシンプソン(Simpson)の法則を用いて流量を求める方法がある。これらの方法はいずれもそれぞれ特長があり、広く利用されているが、そのいずれの計算法を適用するかによつて、測定孔の位置をあらかじめ考慮しておくことが必要であることをあきらかにした。またこれらの方法は手数の上からと、精度上からとで、それぞれことなつた性質のものであり、そのいずれを採用するかは、試験の目標によつて決定すべきことを述べた。

これで一応本稿は終了したが、補遺として今まで述べなかつた水圧鉄管以外の場所でのピトー管による測定について簡単に触れ、またさきに第2部で述べた鉄管内にピトー管を挿入した際におこる管壁上の静圧の変化に関する実験が最近日立製作所日立研究所で行われたので、その1部を紹介した。

以上7箇月間にわたり述べてきた事項は、いずれも問題点を列挙したという程度にとどまり、なんら問題の解決に寄与するところがなかつたことを恥じるしだいであるがこの一文が幸にしてこの方面の将来の進展にいさゝかでも意義があつたとすれば、筆者の喜びこれに過ぎるものはない。

〔I〕 緒 言

本篇では前号まで述べたところによつて求められた測定値から流量を求める、いわば最後の段階の問題に関連して述べる。

ピトー管による流量測定では、ピトー管は単に測定点の流速を指示するのみであり、流量は断面各部の流速分布を知つて、これを積算することにより、はじめてえられるわけである。したがつてピトー管による流速測定的位置は、流量の算定にもつとも便利なように、しかも測定結果が流量の算定に対し、場所による誤差の粗密がないように初めから選ばなければならない。

また流量の算定の方法についてもいろいろの方式が考えられている。こゝではこれらの事項について述べた。

以上により4部にわたる本問題の記述を全部終ることとしたが、最後にさきにふれなかつた点に対し、いさゝか追加する意味で補遺の項を設けて述べ、終りに本論文全体に対する結論を述べて、本論文の全般を完了することとした。

〔II〕 流速測定点の選定法

流速測定点の選定について誰しも考えることは、測定した流速値がその附近の流量を代表するように選ぶことがもつとも合理的であり、また以後の計算にも都合がよいことである。また測定点の数が多いほど正確な結果

がえられることも当然である。さらに鉄管内流速の場合には管壁に接した水の流速は0であることが容認されなければならないから、これと管内の最外周測定点の測定値との間には急激な速度勾配があるわけであるから、この領域についてさらに測定点を増すことが、正確な結果への一歩前進であり、このような方法も考えられている。また中心の流速は流速分布曲線を正確にえがくために必要であろう。これらの諸点を考慮した方法が現在広く採用されているので、つぎにこれらについて取まとめ述べて見た。

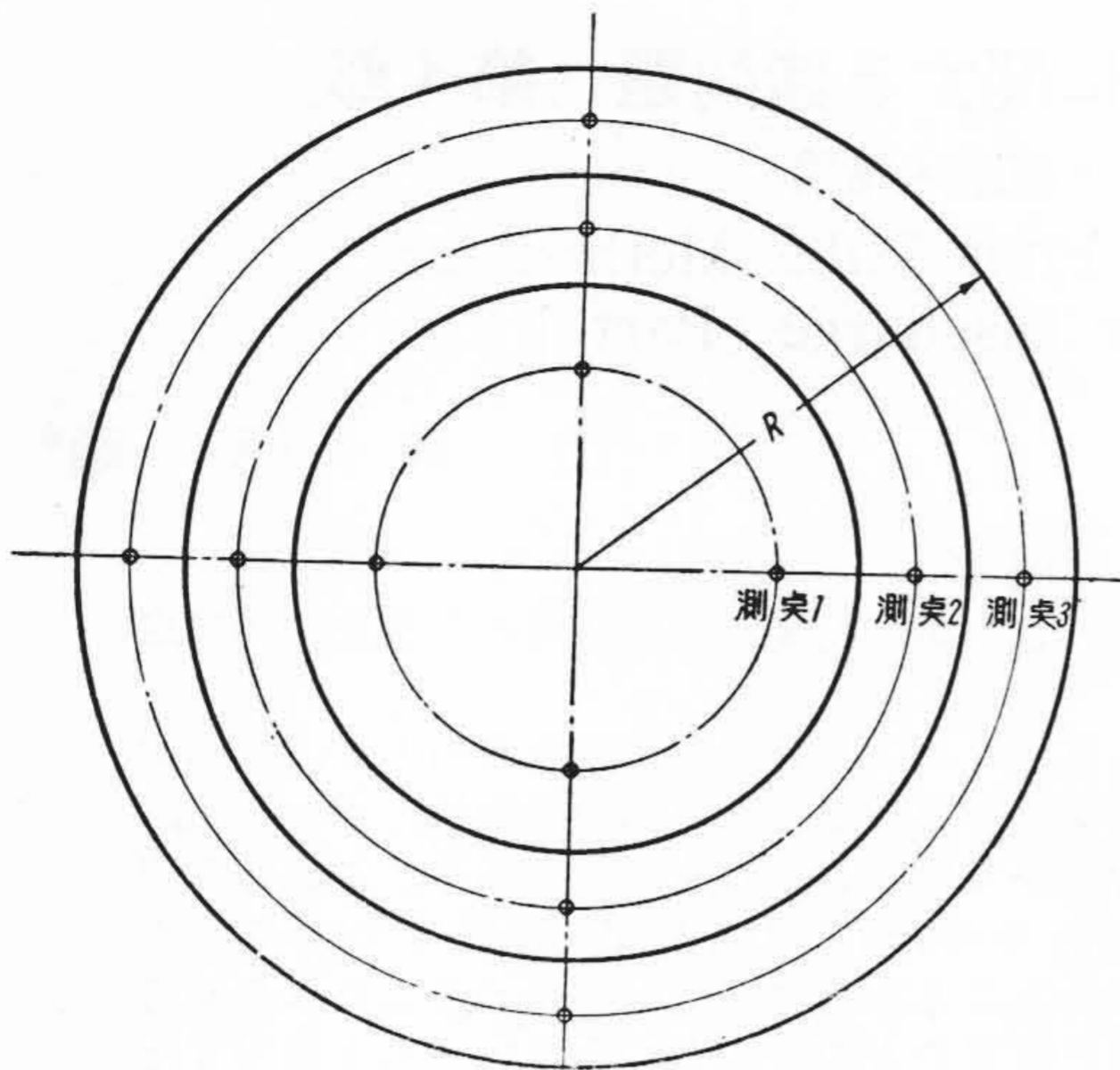
(1) 5点法・10点法

鉄管断面をその一半径上にもうける測定点の数に等しく、同心円によつて等面積となるように分割し、さらにおのおのの円環(中心では円)の面積を2等分する同心円をえがいて、これらと直径との交点を求め、これらの位置に測定点をおけば、各測定点は最初に分割した円および円環面積内の流速を代表する対向する2点の組であると考えてよい。たとえば第1図は半径上に3箇の測定点をもうけた場合を示す。この位置は一般的には容易にわかるようにつぎの式で計算しうる。

$$r_n = \sqrt{\frac{2n-1}{2Z}} R \dots \dots \dots (1)$$

こゝに r_n は鉄管中心から外周に向つて数えた n 番目の測定点位置の半径、 Z は一半径上の測定点の数(したがつて最外周の測定点に対しては $Z=n$ となる)、 R は鉄管半径を示す。

* 日立製作所日立研究所



第1図 ピット管取付位置の説明図
Fig. 1. Positions of Pitot Tube Setting

従来一般には、比較的小径の管では、一半径上5箇(直径では10個)の測定点をもうける場合が多く、この方法を5点法といふ、大直径管では半径上10箇(直径上20箇)をとり、これを10点法と称している。5および10という数は、単に以後の計算上手数を省くため、わずかの計算の労をいとわなければ、幾点でもよいわけで、原理的には多いほどよいのは当然である。

これらの測定点はそれぞれ鉄管断面の等しい分割面積を代表するものであるから、全測定値を加えて算術平均を行えば、簡単に平均流速を知ることができる。これがこの方法の最大の利点であり、測定点数の5および10は算術平均がもつとも簡単なところからえられた数といふことができる。

これらの方法は現在もつとも広く用いられている。

(2) (5+1)点法・(10+1)点法

前記の5点法および10点法では、管壁附近の速度勾配の大きい箇所の測定が十分でない。よつて5点法および10点法の最外周の測定点と管壁との間の環状面積を、さらに同心円によつて2等分し、この円と直径との交点に測定点をもうける方法が行われている。これらの方法では測定点はそれぞれ半径上6点および11点となるが、最後の1点はほかのものと代表する面積がことなる(1/2になつており、しかもこれは5点法または10点法における最外周測定点の代表面積にふくまれている)から、同一の取扱はできない。そのため特に6点法および11点法といわずに(5+1)点法および(10+1)点法と名づけられている。

上述の理由によりこれらの測定値から算術平均によつて平均流速を求める場合には、最外周の追加の1点は除

外しなければならない。すなわちこの場合追加の1点は役立たない。したがつてこれらの方法は、後にのべるほかの方法で計算する場合に必要なものであり、また時に中心に測定点をもうけることが行われるのも、同様な趣旨のものである。算術平均で略計算を行う場合には、これらの外周追加点および中心点の測定値をふくんではいけないことを特に注意したい。

〔III〕 流量平均値の計算法

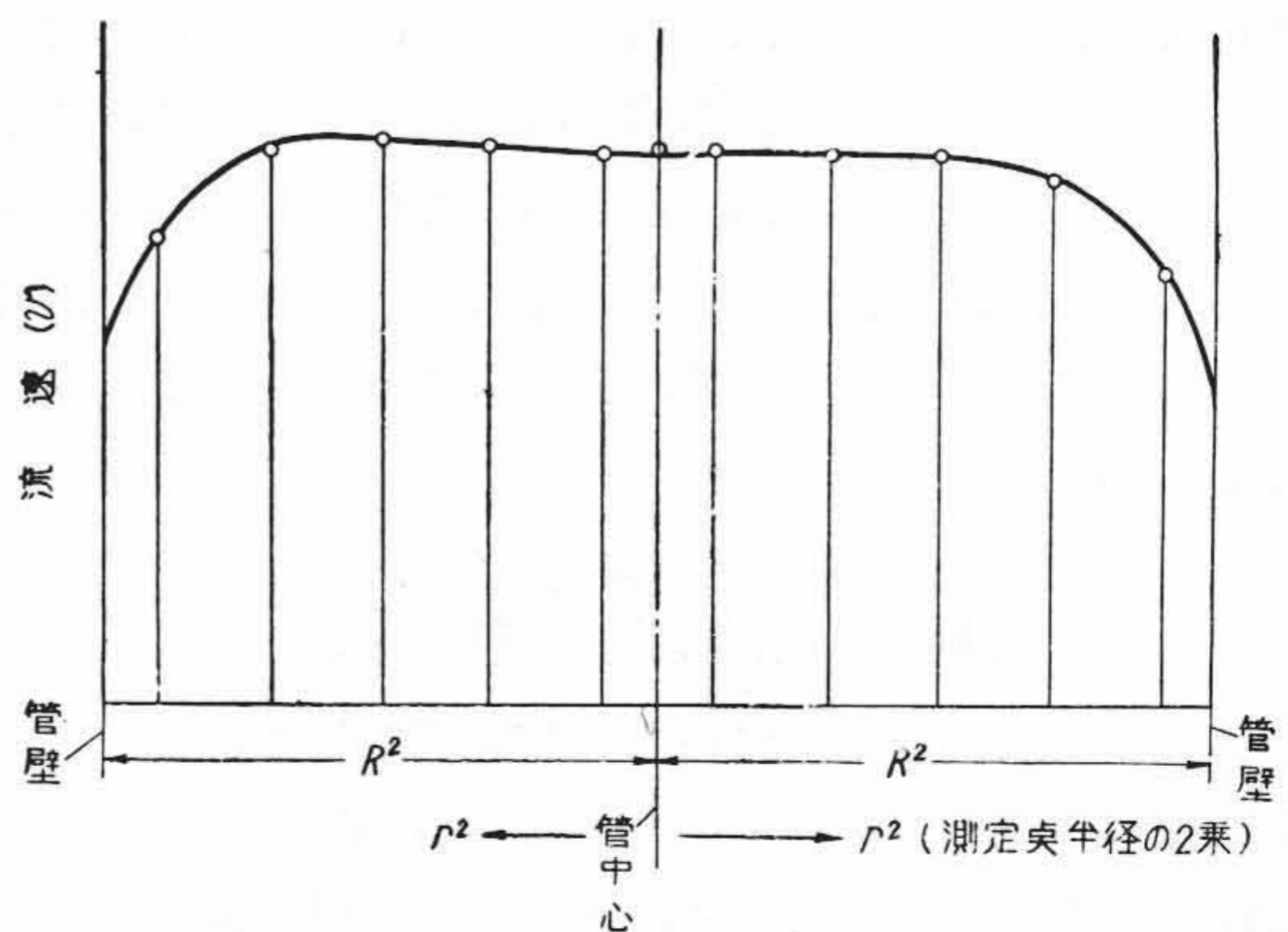
流速分布を知つて平均流量を求めるにもいろいろの方法がある。つぎにこれらについて述べる。

(1) 算術平均法

上述の5点法、10点法の場合のように、各測定点の代表する流水断面積がすべて等しい場合には、すべての流速値を加えて測定点の数で割れば簡単に平均流速がえられ、これに断面積を乗ずることにより、流量が求まる。このような場合5点法、10点法はその測定点数が簡単のため、計算がきわめて容易であるが、ほかの測定点数の場合でも、特にむずかしいことはないので、現在では鉄管径に応じて、適当な数をえらぶことが行われている。このような算術平均法は現地での略計算に使用されるが、正式計算法として採用されることもある。要はその試験の要求する精度に関連して採否が決定さるべきであらう。

(2) $r^2 \sim v$ 計算法

任意の位置の測定値を、その点の半径の2乗の横座標の上にとれば、第2図のようになる。第2図は5点法できめられた等面積の円環面積を代表するように測定点を選んだ場合であるから、各測定点は r^2 座標すなわち面積座標に対して等間隔となつているが、かならずしもこのような点をえらぶ必要はない。今横軸およびたて軸の寸法に対し、長さ1m当りの図面上の長さ L cm、およ



第2図 $r^2 \sim v$ 計算法の作図々形
Fig. 2. Solution with v Plotted Against r^2

び流速 1m/sec 当りの図面上の長さ V cm を定めておけば曲線下の面積をプランメータで測定した面積 A cm² を求めれば、平均流速 \bar{v} は

$$\bar{v} = \frac{1}{LV} \frac{1}{2} \frac{A}{R^2} \dots\dots\dots (2)$$

として求められる。これに管断面積を乗ずれば流量が求められる。

こゝで問題となるのは管壁附近の流速で、前述のように流体力学の見地からは管壁上の流速は 0 であるが、そのきわめて密接した点ではすでに相当の流速をもっているから、実際には最外周の測定値と管壁との間の流速分布曲線のえがきかたに大きい不安が生ずる。管壁附近の流速分布を示す公式としては、有名なカルマン (Kármán) の $1/7$ 乗公式

$$U = U_{\max} \left(\frac{y}{r} \right)^{1/7} \dots\dots\dots (3)$$

がある。ここに U_{\max} は管中心の最大流速、 U は管壁から任意の距離 y だけ離れた点の流速、 r は管の半径である。しかし現実の発電所における管内流速分布は必ずしもカルマンの指摘したものと全面的に一致しているわけではないので、このまゝ適用することはできない。スイスの水車規格 (Swiss Rules for Hydraulic Turbines) では、(3) 式を近似的に管壁附近のみに適用し、その値をつぎのようにとっている。

$$v_x = v_1 \left(\frac{a_x}{a_1} \right)^{1/7} \dots\dots\dots (4)$$

ここに

a_1 = 管壁から最外周測定点までの距離

v_1 = 最外周測定点の流速

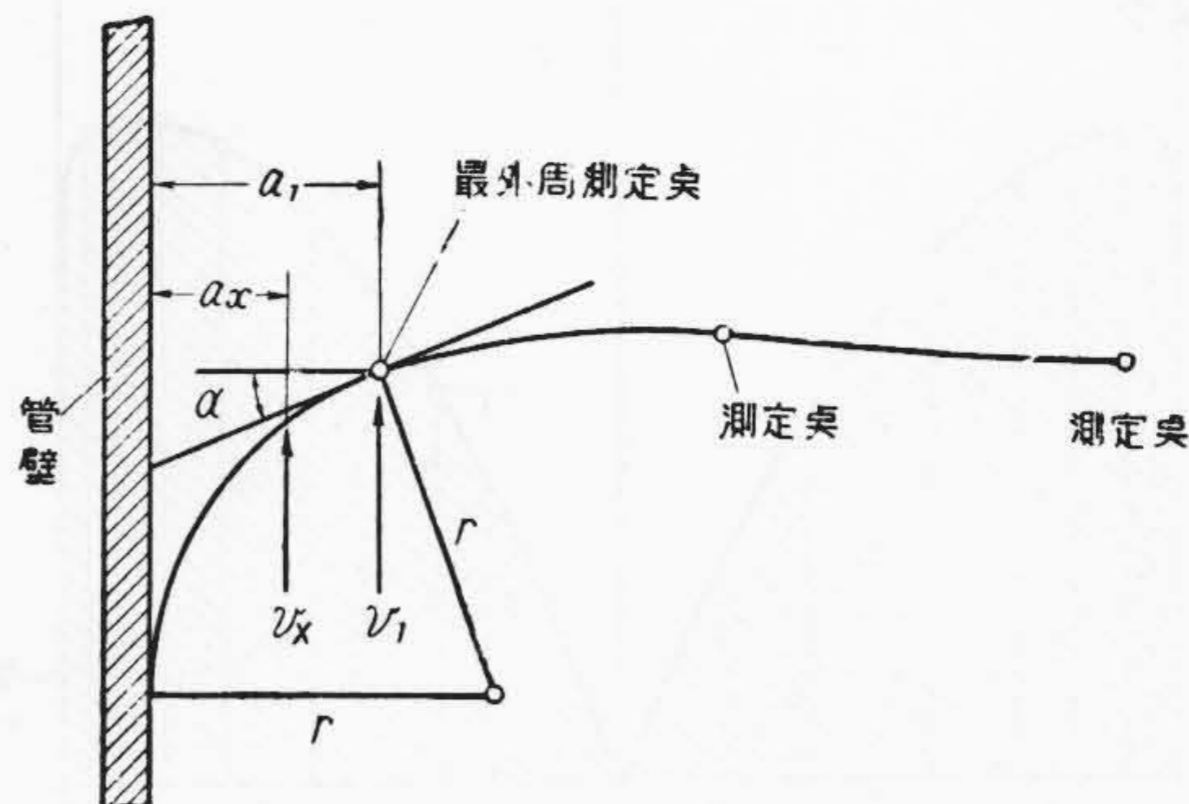
a_x, v_x はそれぞれ考える点についての値

しかしスイス規格ではこの公式をそのまま使用せず、この公式から、近似的に

$$\tan \alpha = \frac{v_1}{7a_1} \dots\dots\dots (5)$$

の関係を見出して、第3図における角 α を決定し、内側の測定点と最外周測定点を結ぶ曲線は、最外周測定点においてこの α なる傾きをなす直線に切するようにえがき、最外周測定点と管壁との間は、前記直線と管壁の両者に切するような円弧をもつて結ぶことを規定している。

以上のスイス規格は、流速計による測定結果に適用しているのであるが、原理的にはピトー管の場合にも準用しえると思われる。実際の場合管壁附近の流速分布の決定には迷うことが多いので特にこゝで紹介したいのである。この画法が實際上よく合うか否かは筆者もまだ経験したことはないが、一つの考えかたとして興味深いものであると思う。



第3図 管壁附近の流速分布
Fig. 3. Velocity Curve in the Peripheral Zone

つぎに第2図の面積の測定にはプランメータを使用するが、プランメータは一般に図形の大きさおよび形状によつてその機械に特有の誤差を示すものであるから、測定前に、同じ程度の形状および大きさの標準図形によつてよく検定しておかなければならない。

(3) $r \sim rv$ 計算法

上述の方法では横軸にそれぞれの担当断面積をとり、たて軸に流速をとつたが、その意味は担当の円環面積をとつていのであるから、円環を円になおした場合の半径を r' とすれば、 $\pi r'^2 v$ を図的に表わしたことになる。したがつてこれはまた $\pi r' \cdot r' v$ として表わすことができる。しかるにもし鉄管半径そのままを横軸にとるとすれば、測定点の担当するおのおのの円環の幅は、その部の半径に対する面積の平方根に逆比例して小さくなつて行く。以上の両者を関連して考えれば、鉄管半径そのままの座標 r の上に rv のたて座標をとれば、担当断面積は r の位置によつて、その平方根に逆比例して減つていくから、結局前記 $r'^2 v$ に相当したものがえられることになる。

このような原理にもとづいて計算を行うための図形をえがけば、第4図のようになり、曲線下の面積 A_1, A_2 をプランメータで測定すれば

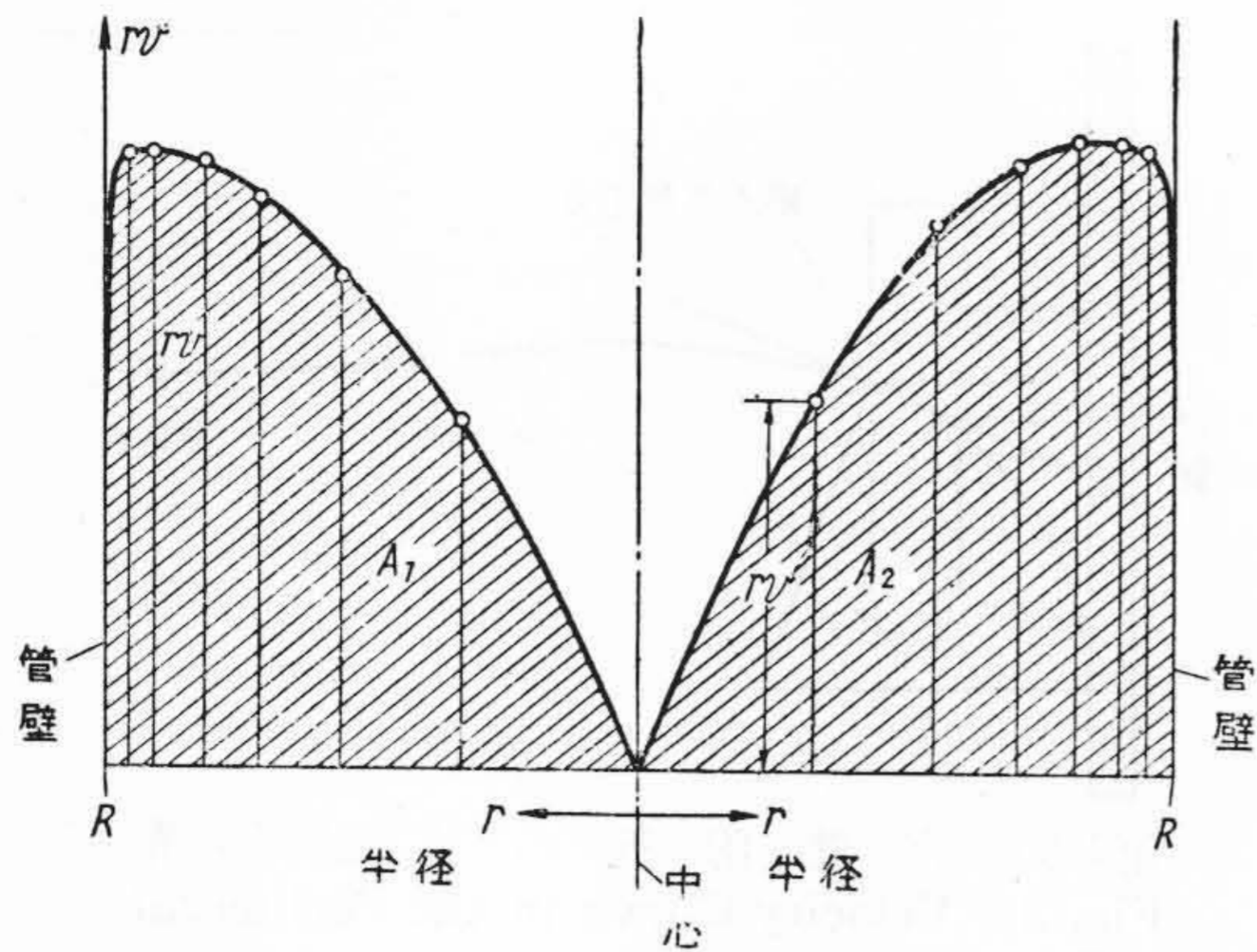
$$\bar{v} = \frac{1}{LV} \frac{(A_1 + A_2)}{R^2} \dots\dots\dots (6)$$

として平均流速が求まる。

以上のように $r^2 \sim v$ 法と $r \sim rv$ 法とは図形積分方式がことなるため、まったく同一の値はえられないであろうが、大きい差を示さないことは当然である。スイス規格では両方法によつてえられた流量が互に 1% 異なることがない場合のみを採用し、その平均値をもつて流量値と決定する方式をとっている。

(4) シンプソン (Simpson) の法則を利用する方法

図形面積をプランメータで測定する上述の 2 方法では、図形の不正確や、プランメータ固有の特性からくる



第 4 図 $r \sim rv$ 計 算 法 の 作 図 々 形
Fig. 4. Solution with rv Plotted Against r

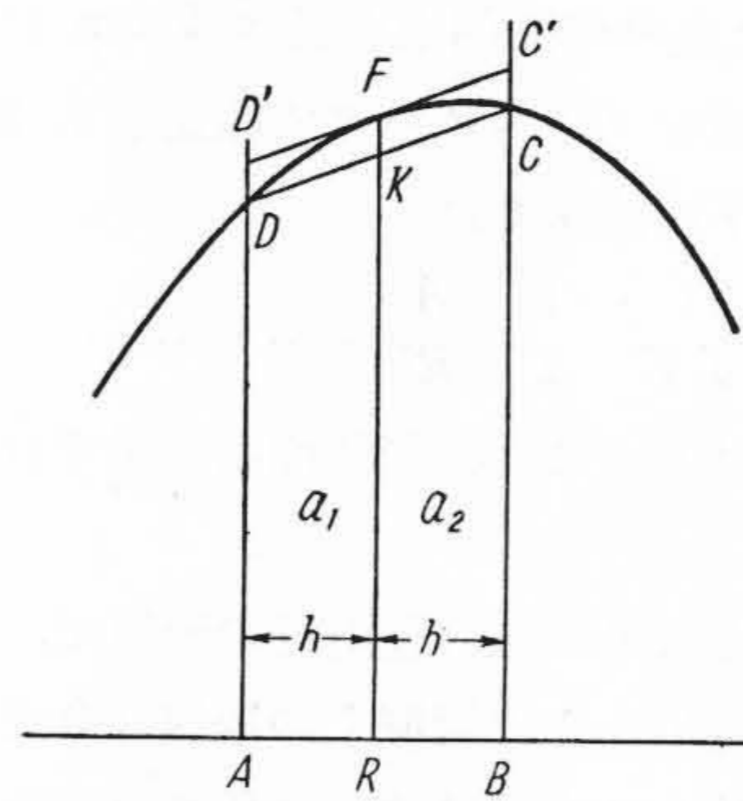
誤差が入ることはさげられない。このような場合図形によらずに、直接測定値を使用して数値計算を行う方法がある。しかしこの場合は測定値をそのまま計算に入れてしまうから、測定上の不備から矛盾した値を知らないで取扱うことがあるので、この場合といえども一応流速分布曲線をえがいて見て、全部の測定値が信頼すべきものであることをたしかめる必要がある。

数値計算法としてもつとも簡単で、しかも比較的正確な方法としては、有名なシンプソンの法則をあげることができる。

(A) シンプソンの法則 シンプソンの法則には第一、第二両法則があるが、第一法則は $1/3$ 法則、第二法則は $3/8$ 法則と呼ばれている。数学的な検討の上からは、第一法則は非常に正確な値を与えるが、第二法則はそれに比して精度が劣っているから実用しない方がよいといわれている。⁽¹⁾

ピトー管による測定値の計算に対しては、法則の示す結果のみあれば十分であると思われ、また専門的には特にここにのべるほど奇異なものではないが、実際使用上誤解を起さないために、最小限の解説を加えることは、測定実務者にとっては有意義であると思われるので、つぎに簡単に利用価値の多い第一法則を紹介しよう。

この法則は曲線の小部分を抛物線と見なして計算する方法である。すなわち第 5 図において曲線 DFC を考え、これを抛物線と見なし、 CD を結び、これに平行に曲線に切する切線 $C'D'$ をえがくと、抛物線の性質として曲線 DFC にかこまれた $DFCKD$ なる面積は、平行四辺形 $DCC'D'$ の面積の $2/3$ に等しいことは容易に証明される。よつて今面積のわけかたを偶数箇に等分しておけば (図では a_1, a_2 の 2 つに分けてある)、面積を区画する標線の数はそれより一つ多くなる (図では AD, RF, BC



第 5 図 シンプソンの法則の解説
Fig. 5. Graphical Show of Simpson's Rule

の 3 つ)。この場合求める面積 $ABCFD$ は四辺形 $ABCD$ と弧形面積 $CFDKC$ の和となる。そして

$$ABCD = \left(\frac{AD + BC}{2} \right) AB$$

$$CFDKC = \frac{2}{3} AB (RF - RK)$$

$$= \frac{2}{3} AB \left\{ RF - \frac{1}{2} (AD + BC) \right\}$$

この両者を加えると

$$ABCFD = AB \left[\frac{AD}{6} + \frac{2}{3} RF + \frac{BC}{6} \right]$$

今標線間距離を h , $AD = y_1$, $RF = y_2$, $BC = y_3$ と書きかえれば

$$\text{面積 } ABCFD = \frac{h}{3} (y_1 + 4y_2 + y_3) \dots \dots \dots (7)$$

今この結果を利用して第 6 図を計算するに、左から順に 2 区間ずつについて適用すれば

面積

$$A_1 = \frac{h}{3} [y_1 + 4y_2 + y_3]$$

$$A_2 = \frac{h}{3} [y_3 + 4y_4 + y_5]$$

$$A_3 = \frac{h}{3} [y_5 + 4y_6 + y_7]$$

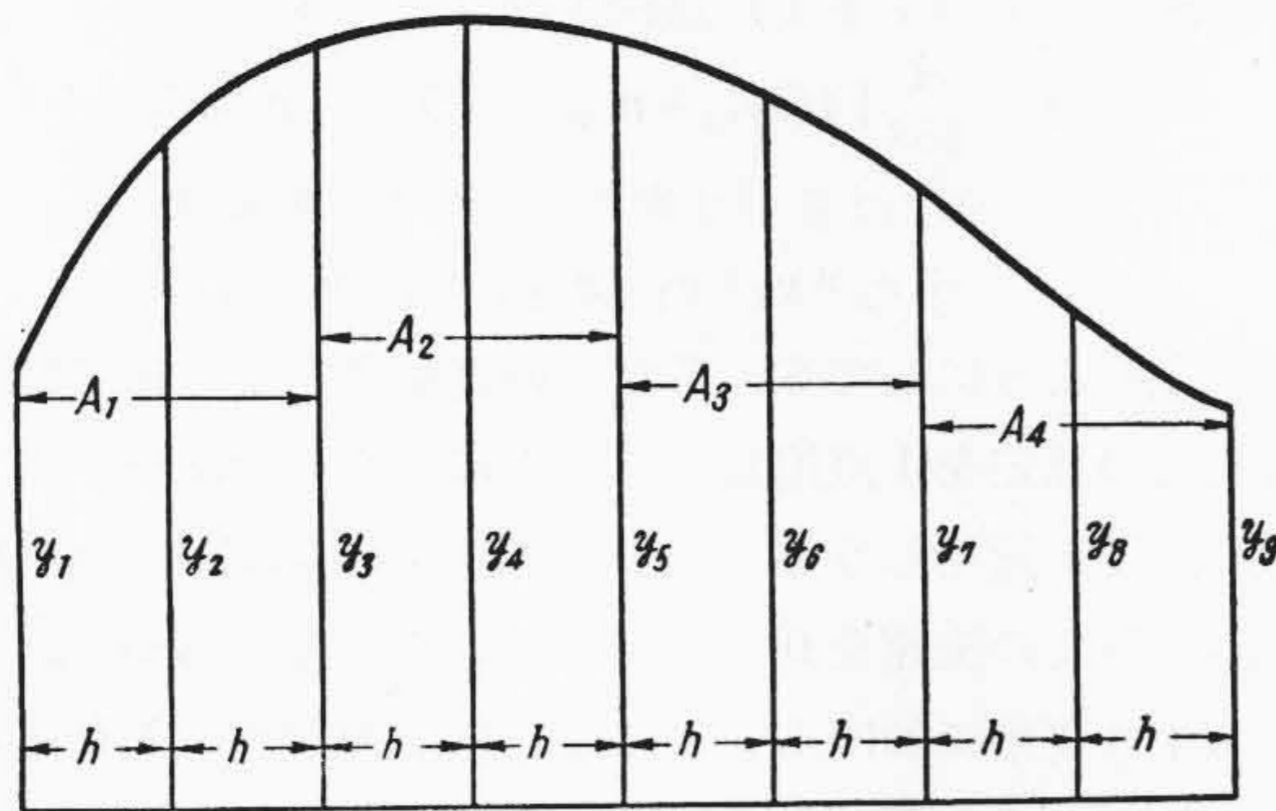
$$A_4 = \frac{h}{3} [y_7 + 4y_8 + y_9]$$

よつて

$$A = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 = \frac{h}{3} [(y_1 + y_9) + 4(y_2 + y_4 + y_6 + y_8) + 2(y_3 + y_5 + y_7)]$$

となり、一般には

$$A = \frac{h}{3} [(y_1 + y_{2n+1}) + 4(y_2 + y_4 + \dots + y_{2n}) + 2(y_3 + y_5 + \dots + y_{2n-1})] \dots \dots \dots (8)$$



第6図 シンプソンの法則の適用例
Fig. 6. Application of Simpson's Rule

注意すべきはこれらの標線間の距離は等間隔であることを要し、したがって測定点は5点法, 10点法の場合のように面積等分点に選んでおくべきことである。また等分面積区間がかならず偶数個 (したがって標線すなわち測定点の数はそれに1を加えた奇数箇) でなければ, この計算は行えないことである。したがっていかなる場合にでもシンプソンの法則を適用するというわけには行かない筈で, その場合でも何らかの形で近似的に計算することはできるであろうが, その場合の誤差についてはあらかじめ検討しておく必要がある。

上にはシンプソンの法則を図形上から説明したが, 数学的にはつぎのように説明できる。

第7図において x_0 をきわめて小さくして, 曲線 CD を拋物線と見なして式を立てれば

$$y = \alpha + \beta x + \gamma x^2 \dots\dots\dots (9)$$

したがって

$$\left. \begin{aligned} AD = y_0 &= \alpha - \beta x_0 + \gamma x_0^2 \\ 0E = y_1 &= \alpha \\ BC = y_2 &= \alpha + \beta x_0 + \gamma x_0^2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

となるから

$$y_0 + y_2 = 2(\alpha + \gamma x_0^2) \dots\dots\dots (11)$$

一方

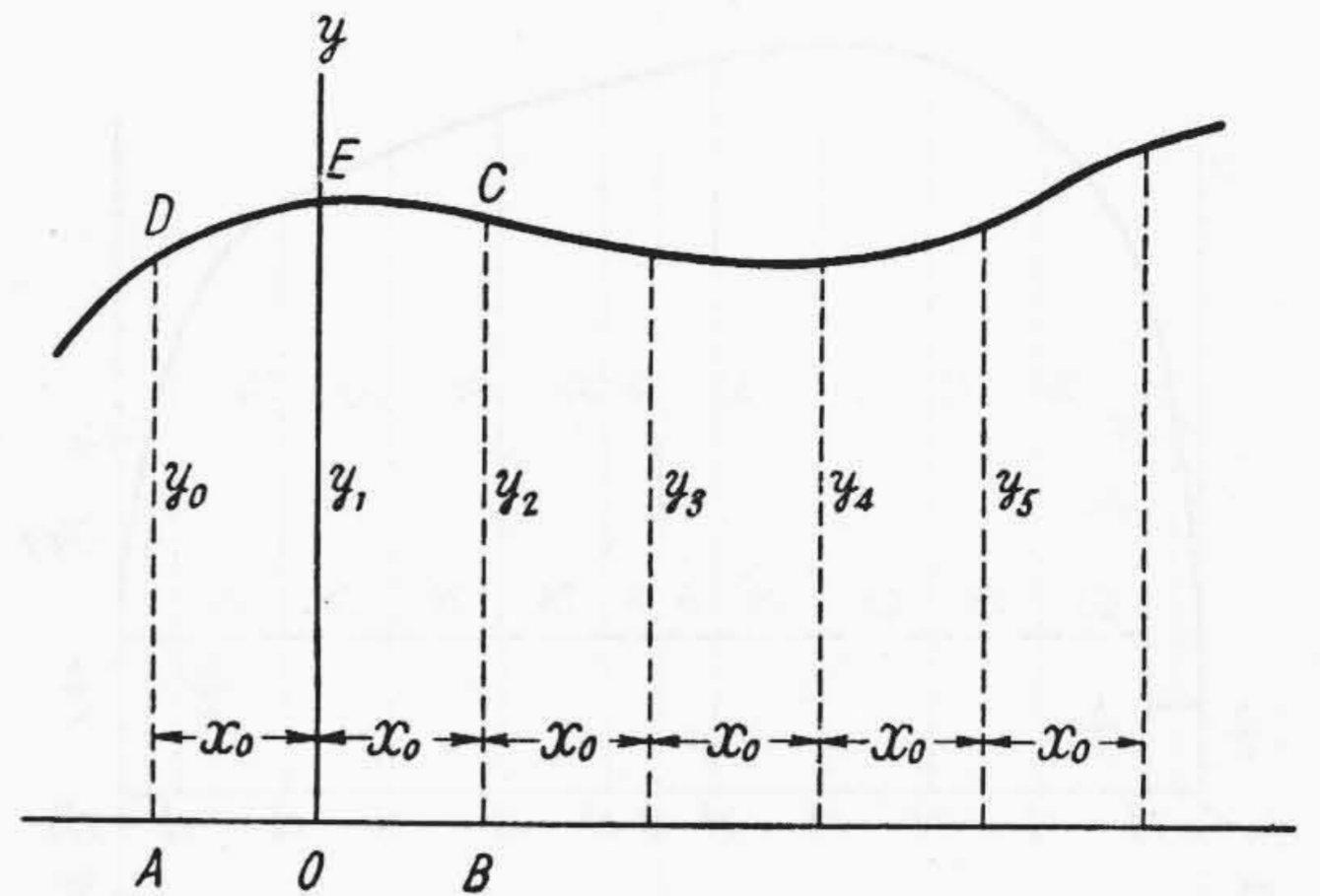
$$\begin{aligned} \text{面積 } ABCD &= \int_{-x_0}^{x_0} (\alpha + \beta x + \gamma x^2) dx \\ &= \frac{x_0}{3} [4\alpha + 2(\alpha + \gamma x_0^2)] \end{aligned}$$

これと (11) 式とより

$$ABCD = \frac{x_0}{3} [y_0 + 4y_1 + y_2] \dots\dots\dots (12)$$

となり, (7) 式がえられる。

上記の第一法則は前述のように, 分割区間の数あるいは標線 (測定点) の数に一定の制限があるので, 適用しえない場合があるが, 第二法則にはこのような制限はない。ただしその精度が劣るといわれているので, 適用をすすめるものではないが, 参考のためここに結果のみを記しておく。



第7図 Simpsonの法則の一般的解説
Fig. 7. General Explanation of Simpson's Rule

求める面積は, 中央の標線 (標線数が偶数の場合には中央の2つ, 奇数ならば中央の1つ) と両端のものを除いたほかのすべてのたて線の和の3倍と, 両端の標線の和, および中央 (さきに除いた2または1のもの) 標線の2倍との和に, 各標線間の距離の $\frac{3}{8}$ 倍を乗じたものであらわされる。第6図について適用すれば

$$\begin{aligned} \text{面積 } A &= \frac{3h}{8} \{y_1 + y_9 + 2y_5 \\ &\quad + 3(y_2 + y_3 + y_4 + y_6 + y_7 + y_8)\} \dots\dots\dots (13) \end{aligned}$$

もし標線が y_{10} まであれば

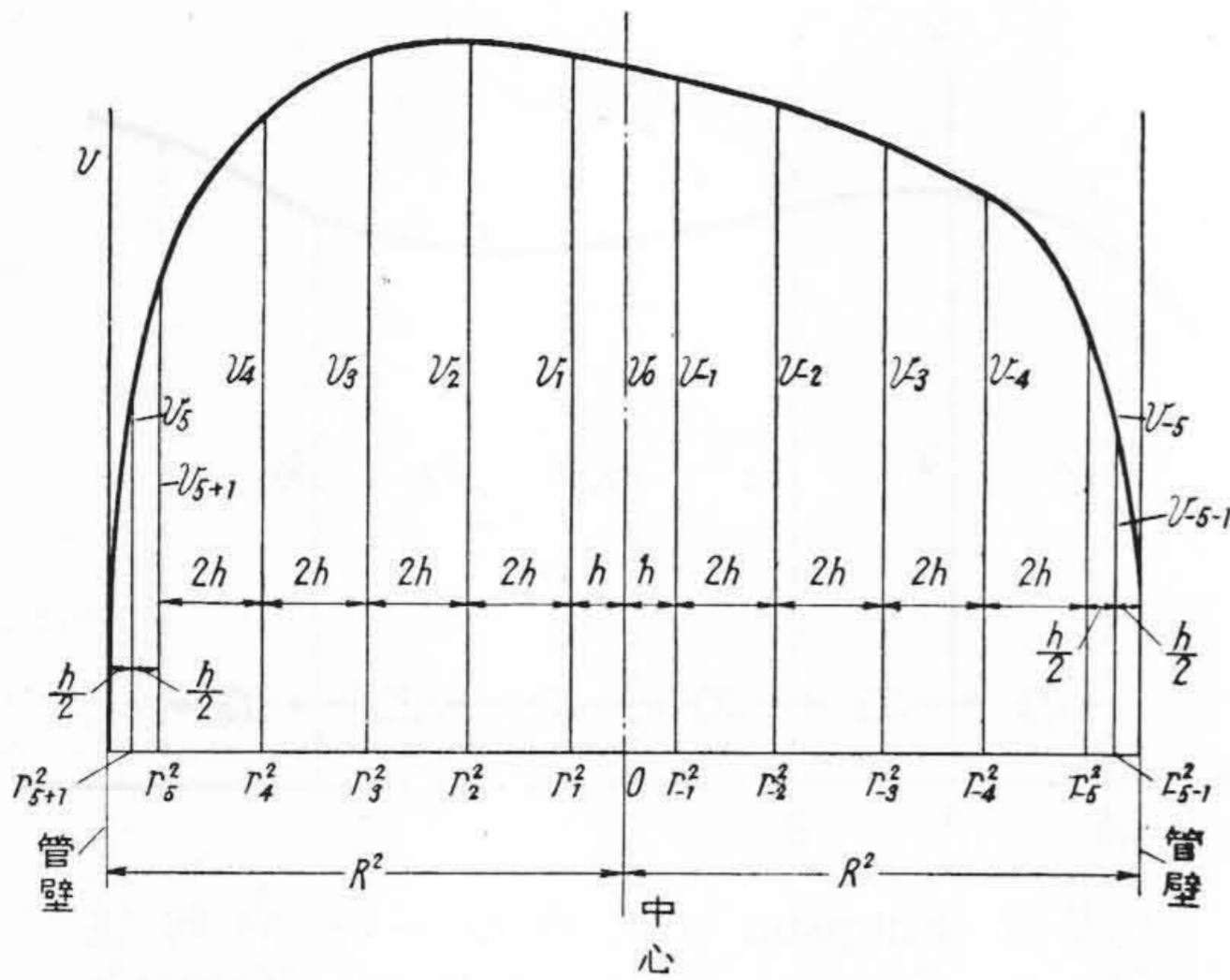
$$\begin{aligned} \text{面積 } A &= \frac{3h}{8} \{y_1 + y_{10} + 2(y_5 + y_6) \\ &\quad + 3(y_2 + y_3 + y_4 + y_7 + y_8 + y_9)\} \dots\dots\dots (14) \end{aligned}$$

となる。

(B) 流量計算へのシンプソン第一法則の適用 さて上述のシンプソンの第一法則を流量測定に適用することを考えよう。すでにのべたように流速測定点のとりかたに種々あり, そのうちにはこの法則を適用しうる場合と適用しえない場合がある。これらについてのべる。

(i) (5 + 1) 点法の場合

この場合はシンプソンの法則が理想的に適用できる。第8図は (5 + 1) 点法における測定値にシンプソンの法則を適用するための説明図である。測定点は円環面積の代表点であるから, 測定点の半径の2乗を横軸にとれば $v_1 \sim v_5$ 間は等間隔となり, また最外周の (5 + 1) 点目は v_5 の測定点および管壁との間の2等分点である。もし図のように管中心に測定点を1箇追加してその速度を v_0 とすれば, u_0 と v_1 との間隔は $v_1 \sim v_5$ 間のそれぞれの間隔の $\frac{1}{2}$ となる。すなわち $v_0 \sim v_1$ 間を h とすれば $v_1 \sim v_2, v_2 \sim v_3, v_3 \sim v_4, v_4 \sim v_5$ 間はそれぞれ $2h, v_5 \sim v_{5+1}, v_{5+1} \sim$ 管壁間はそれぞれ $\frac{h}{2}$ となる。横軸は r^2 すなわち面積に相当するものであるから, 管総断面積 A はこの図では



第8図 (5+1)点法におけるシンプソンの法則の適用

Fig. 8. Application of Simpson's Rule to the Case of (5+1) Point Method

$$A = (2h \times 8) + (h \times 2) + \left(\frac{h}{4} \times 4\right) = 20h \dots\dots\dots (15)$$

となる。

この図にシンプソンの法則を適用するには、[管壁~v₅間], [v₅~v₁間], [v₁~v₋₁間], [v₋₁~v₋₅間]の5箇の区間において行えば、それぞれの区間数は偶数(標線の数は奇数)であるから、正確に適用しうる。

管壁~v₅間

$$A_1 = \frac{h}{2} [0 + 4v_{5+1} + v_5]$$

v₅~v₁間

$$A_2 = \frac{2h}{3} [v_5 + v_1 + 4(v_4 + v_2) + 2v_3]$$

v₁~v₋₁間

$$A_3 = \frac{h}{3} [v_1 + 4v_0 + v_{-1}]$$

v₋₁~v₋₅間

$$A_4 = \frac{2h}{3} [v_{-1} + v_{-5} + 4(v_{-2} + v_{-4}) + 2v_{-3}]$$

v₋₅~管壁間

$$A_5 = \frac{h}{2} [v_{-5} + 4v_{-5-1} + 0]$$

したがって総面積はこれら全部を加えて

$$A = \frac{h}{6} [4(v_{5+1} + v_{-5-1}) + 5(v_5 + v_{-5}) + 16(v_4 + v_2 + v_{-2} + v_{-4}) + 8(v_3 + v_0 + v_{-3}) + 6(v_1 + v_{-1})]$$

しかるに(15)より $h = \frac{A}{20}$ であるから、これを上式に入れれば、流量 Q は

$$Q = \frac{A}{120} [4(v_{5+1} + v_{-5-1}) + 5(v_5 + v_{-5}) + 16(v_4 + v_2 + v_{-2} + v_{-4}) + 8(v_3 + v_0 + v_{-3}) + 6(v_1 + v_{-1})]$$

となる。

同様にして(7+1)点法では

$$Q = \frac{A}{168} [4(v_{7+1} + v_{-7-1}) + 5(v_7 + v_{-7}) + 6(v_1 + v_{-1}) + 8(v_5 + v_3 + v_0 + v_{-3} + v_{-5}) + 16(v_6 + v_4 + v_2 + v_{-2} + v_{-4} + v_{-6})]$$

以上のようにして5, 7などの奇数箇+1点法では中心流速の測定を1点追加することにより完全にシンプソンの法則が適用しうる。ここで注意すべきは以上の計算では管壁での流速を0と仮定していることであつて、もしスイス規格におけるようななんらかの数値をあたえたとすれば、その項が上の計算に入ってくることになる。

(ii) 5点法の場合

この場合は第8図においてv₅₊₁およびv₋₅₋₁の測定値がないから、両端の計算は原則として不能になる。

上の2つの場合について第二法則の適用を考えてみよう。第二法則は区間数や標線の数には無関係であるから、特に(奇数箇+1)点法にしなくて適用でき、また中央における測定値がなくともさしつかえない。ただ管壁の附近のみはどうしても適用できず、シンプソンの法則を使用する場合にはかならず、+1点法としなければならないであろう。すなわち管壁附近の $\frac{h}{2}$ 間隔(第8図)のところには第一法則を、中心測点があればその附近の間隔のところも第一法則を、ほかの2h間隔の部分および中心測点のない場合はそれをも含めて、第一または第二法則を適用すれば求めうる。しかし第二法則を使用する場合にはあらかじめその誤差を検討しておく必要がある。

(iii) 10点法および(10+1)点法の場合

さきにのべたようにシンプソンの法則は(奇数箇+1)点法の場合は中心測点を追加することにより、完全に適用しうるが、10点法では管壁附近が適用不能となり、(10+1)点法では管壁附近には適用できるが、そのほかの部は適用不能となる。しかし(10+1)点法の場合は第二法則を適用することができるだけ利点がある。

近來種々の試みによつて、このような場合の計算法が考えられているようであるが、いずれにしても理想的な適用に比して、多少とも近似的にならざるをえないため、その際起りうる誤差に対して十分警戒を要するであろう。

(5) 各種計算法の精度

測定点数が多ければ多いほど結果が正確にえられることはいうまでもなく、この意味ではたとえば5点法よりも10点法がよりのぞましいことは当然である。しかし測定点数が多ければそれだけ実験操作が複雑になり、実験上の失敗の機会も多くなるから、ただ測定点数を多くすればよいと考えることは危険である。

しからば5点法と10点法でなにゆえに実験精度がこと

なつてくるかというに、全般的な問題もたしかにあるが、もつとも結果に大きい影響をあたえるのは管壁附近の流速を詳細にすると否とにあるといつてよい。この意味において(5+1)点法または(10+1)点法が、それぞれ5点法または10点法よりもはるかにすぐれているといふことができる。

なお管壁における流速を0とするか、スイス規格のようにある値を仮定するかによつても多少の違いが生じてくる。

これを要するに計算結果が特に大きい差を示すすれば、はなはだしい異常流速分布でないかぎり、主として管壁附近の値の正確さと精密さの程度によるものであり、計算方法独自の誤差は決して大きいものではないと考えてよいであろう。したがつて流速の算術平均を行うことが、多くの場合行われてもさしつかえなく、ただこの場合最外周の点が、その部の担当面積内の流速の平均値を示すか否かを検討すればたりと考へられる。もちろんそれだからといつて、誤差の大きいままでよいというのではなく、できるだけ正確な値をうるよう努力するのは当然であるが、結局はそのときの試験目標のおかれた条件によつて計算法が決定さるべきであろう。

〔IV〕 総 括

以上のべたように、測定値の計算法には種々の方法があり、そのいずれを採用するかによつて測定点の位置の選定が考慮されねばならない。計算法として普通にとられる方法は、もつとも使用度数の多いものとして算術平均法があげられるほか、 $r^2 \sim v$ 法、 $r \sim vr$ 法およびシンプソンの法則を適用する方法がある。いずれの計算法をとるにしても各測定点が流量の算定に対して同等の責任を持つためには、その代表する面積がなるべく同一である方がよく、等面積同心環の面積中心に測定点をもうける方法がもつとも妥当であり、現在この方法がもつとも多く採用されている。

しかし流量の算定上もつとも誤差を惹起しやすい部分は管壁附近の流速分布の決定であり、この点についてのみさらに詳細な測定が行われるのは当をえた策である。

また上述の各計算法のいずれを採用するかによつても当然えられる流量値がことなるが、特に異常な流速分布を示す場合でないかぎり、大きいくいちはないはずで、ただ前述の管壁附近の流速分布をどのように取扱うかによるちがいが大きくあらわれてくることになる。この意味において測定点数の多いことがのぞましいが、同時に実験操作が複雑になり、また失敗の度数も多くなることを覚悟しなければならない。

シンプソンの法則の適用はプラニメータなどの使用を

必要としないので計算法としてもつともすぐれていると思われるが、理想的な適用の場合がかぎられる欠点があり、はじめから測定点位置を検討して、計算しうるようきめておかなければならない。

〔V〕 補 遺

以上7箇月にわたつてのべたところにより、筆者のいわんとすることを一応尽したつもりであるが、ピトー管使用の一つの場合として上水槽、放水路などにおけるピトー管の使用について一応紹介するのが妥当であると思われる。また原稿執筆中実験中であつた研究結果の一部を紹介することも有意義と考え、これらの点について、こゝに補遺としてのべることにした。

(1) 上水槽、放水路などにおけるピトー管の使用

現在大流量測定にピトー管を使用する場合、ほとんど水圧鉄管内で行われるが、その理由はピトー管の測定では流れがよく整流された方向をもつ必要があり、またある程度以上の流速を必要とすることによるやむをえざる制限によるものがある。したがつてこのような点に十分な注意をはらえば、そのほかの場所でも測定できる。

筆者らは昭和電工赤松発電所において直線放水路を利用して標準ピトー管群による流量測定を行い、好結果をえた。⁽²⁾ こゝでのべておきたいことは、水圧鉄管内では流速が5 m/secにも達する場合がめずらしくなく、したがつてマンメータ指示が十分大きくえられる利点がある反面、流速が大きいために標準ピトー管のような構造的によわい型のものでは、どうしても補強支持管を必要とし、この影響が測定値におよぼすという不安はさげられない。これに反し上水槽、放水路などでは、流速が比較的小さいので、マンメータ指示が小さく、わずかの原因が大きく測定値を左右する不安があると同時に、測定部附近に特別な支持管をもうける必要がなく、標準ピトー管などではその特性が損われることがないという利点がある。このように考えれば、マンメータ指示の小さいことに対し十分な考慮を払えば、かならずしも水圧鉄管内の測定にひけをとるものではないと考えられる。

前記赤松発電所での経験では、マンメータ指示が小さいため、マンメータおよびその導管の全部が透明で、内部に空気泡が全然含まれていないことを確認することが第一条件である。このことは鉄管内の測定に対しても同様であるが、鉄管の場合には空気の混入の機会是比较的少く、また水は圧力を持つているから水中よりの気泡の遊離も少く、少しく注意すれば容易に空気泡の介在をのぞきうるが、放水路や上水槽では測定箇所水面近くの圧力しかないので、マンメータの読取りのためには水面上ある程度の高さまで持ちきたさなければならず、当然

真空ポンプをもつてマンメータ中の水を吸上げ、測定に都合のよい位置まで水柱面を上昇させなければならない。このためマンメータおよび導管中の水面より上の部分はある程度の真空度をたもつことになるから、水中の含有空気が放出されて気泡となり、マンメータおよび導管の1部を占めて誤差の原因となる。なお多くの場合測定位置が屋外であるため、日射があり、また水温よりも気温が高いことも多いので、マンメータ内の水がよけい空気の放出に都合よくなり、そのほかマンメータ内の水温上昇による水の膨脹による誤差も入るので、つねに導管およびマンメータ内部の空気泡の存在に注意しうるよう、かならず透明管を使用しなければならない。

このように、放水路・上水槽におけるピトー管による測定は、測定技術上熟練者による実施が必要であり、かつ経験によれば、特別な工夫を施さないかぎり、流速 0.5 m/sec 以下のところでは失敗することが多いと思われる。

前記赤松発電所では流速は 2~1 m/sec 程度であつて、この点まことに理想的であつたので、好結果がえられたが、四国電力松尾川第二発電所での試みは、平均流速 0.25 m/sec 程度であつたため、ついに正確な値をうることができなかつた。やはり流速の小さいところでは、ピトー管の測定は失敗することが多いことを示している。しかしこれは上記のような意味において、ピトー管そのものが決してわるいのではなく、回転部分などがなければ、測定手段に一段と考慮をほらえば、十分な精度がえられるはずで、今後の研究問題として取上げらるべき十分の価値があるものと考えられる。

筆者の経験によつても、戦前に行われた日本軽金属富士川第二発電所所内水車の流量、戦後行われた東北電力猪苗代湖畔安積揚水場揚水ポンプの流量、茨城県上野村灌漑用ポンプの流量、前記赤松発電所流量の測定そのほかなどいずれも成功しており、ひとり松尾川第二発電所の場合のみが失敗に終つていたのであつて、この方法にピトー管の使用が不適當であるとは考えられない。相当な小流速の場合でも測定しうるよう、測定装置の工夫をこらすことによつて、決して鉄管内の場合にひけをとることはないことを信じて疑わない。

(2) ピトー管の挿入による静圧の変化の状況

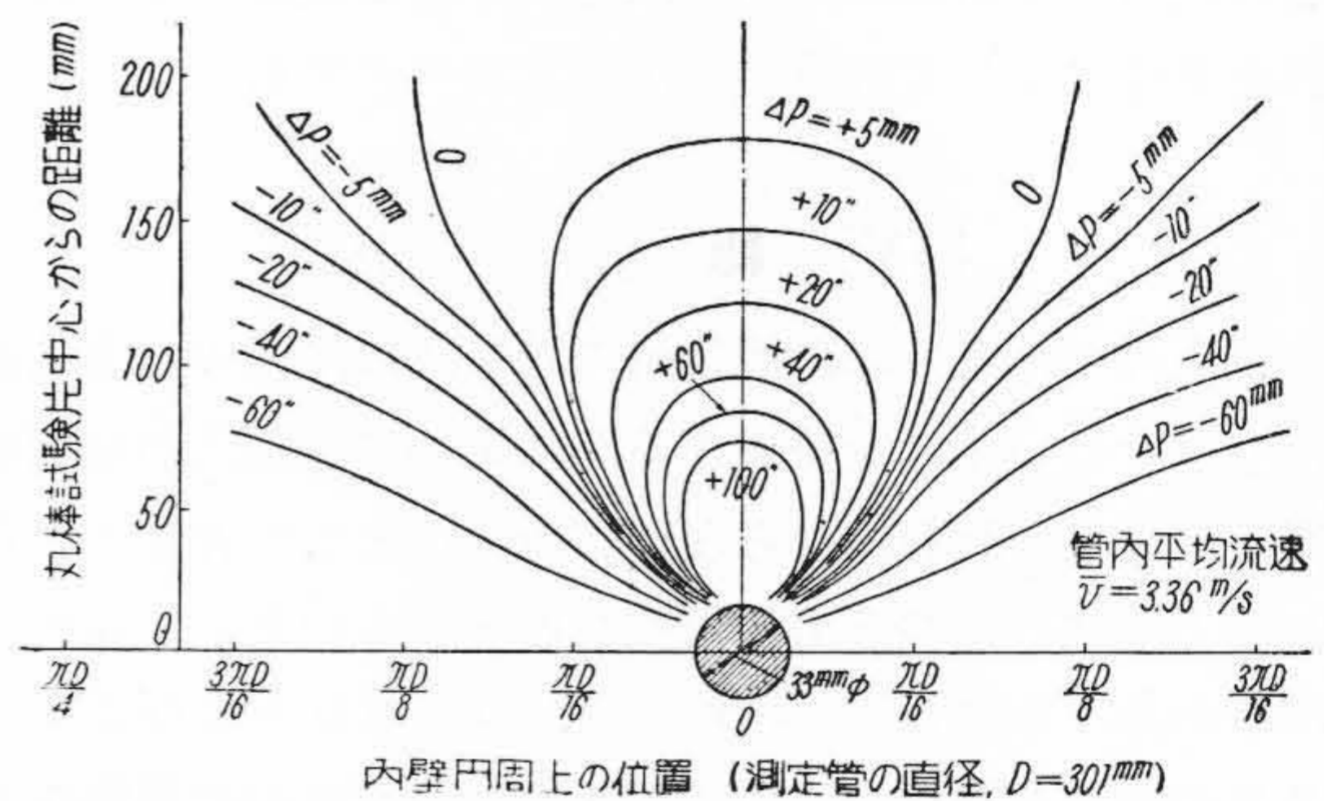
水圧鉄管内でのピトー管による流量測定では、その静圧の測定にもつとも問題があることは、第2部において述べた。一般には静圧は管壁またはその附近で測定される方式が行われており、これについてはすでに述べたように二三の重要な研究が行われている。筆者などもこの点に着目して研究を行つているが、この問題について本稿を執筆していた当時まだ実験が十分に行われていなか

つたが、こゝにある程度の進行を見たので、その1部をこゝで紹介して参考に供する。

この研究はピトー管の流量測定への応用について広範囲の研究を目指すものであるが、こゝでは静圧の変化についての結果の概略のみをのべるにとどめ、後日さらに検討を加えた上別の機会に発表する予定である。

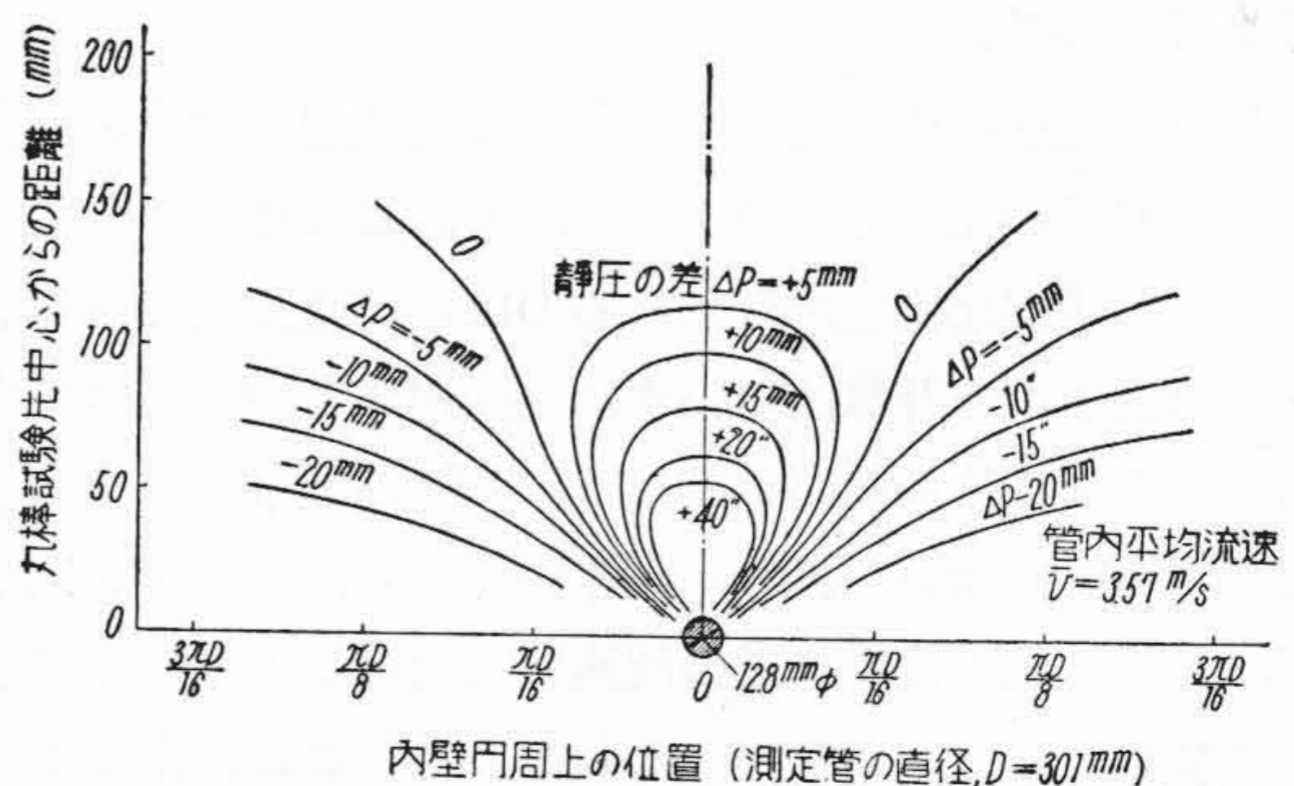
実験は直径 301mm の円管流路内を十分に整流された流速 4~0.5m/sec の水を流し、その途中に一直径に沿うて円筒形ピトー管体に相当した種々の直径の丸棒試験片を挿入し、管壁における静圧の、棒の存在による影響をたしかめたものである。

こゝではそのうちピトー管を代理する丸棒試験片として、直径 33mm および 12.8mm の2種類をえらび、流速約 3.5m/sec の場合の一実験を示す。第9図および第10図は丸棒が管壁を貫通する位置を基準に左右にそれぞれ 90° の範囲の測定値を平面に展開して、その等圧線図を示したものであり、第11図および第12図はピトー管より上流側にとつた一定間隔ごとの断面内の管壁における静圧分布の状況を示すものである。測定数値は丸棒を挿入



第9図 直径33mmの丸棒試片上流の等静圧線図 (管壁上)

Fig. 9. Equi-Static Pressure Lines on the Pipe Wall at the Upstream of Cylindrical Test Piece (33mmφ)



第10図 直径12.8mmの丸棒試片上流の等静圧線図 (管壁上)

Fig. 10. Equi-Static Pressure Lines on the Pipe Wall at the Upstream of Cylindrical Test Piece (12.8mmφ)

しないときと挿入したときの同一場所における静圧測定値の差で示されている。

これらの結果によれば管壁での静圧にはかなり大きい影響が生じており、静圧孔選定には慎重を要することを示しているとともに、静圧の変化はピトー管体(ここでは丸棒)の直径が大きいほど大きい影響があることを示している。静圧測定孔の位置の選定に対し、筆者がピトー管径と関連して決定すべきことを強調したのは、このことをおそれることが最大の関心事であつたのである。

以上は管壁についての実験であるが、この影響は単に管壁のみにとどまらないことは当然で、程度の差はあるであろうが、なんらかの影響は存在すると考えるべきであろう。このように考えるとピトー管を挿入したために水圧鉄管内の静圧が変化する区間内で、総圧と静圧を別々に測定することにはかならず静圧の差による誤差がつきまとい、結果の正確を期することはできないであろう。また丸棒を支持管としてこれに衝撃管をとりつける方法では第11図および第12図の中央部の急変した静圧内に衝撃管をもうけることになり、衝撃管の長さにより、当然ことなつた値を示すことになろう。標準ピトー管のような連成型ではほとんど同位置で総圧および静圧の差を求めるから問題はないが、連成型以外の型式ではかならずなんらかの影響を示すことになると考えられる。

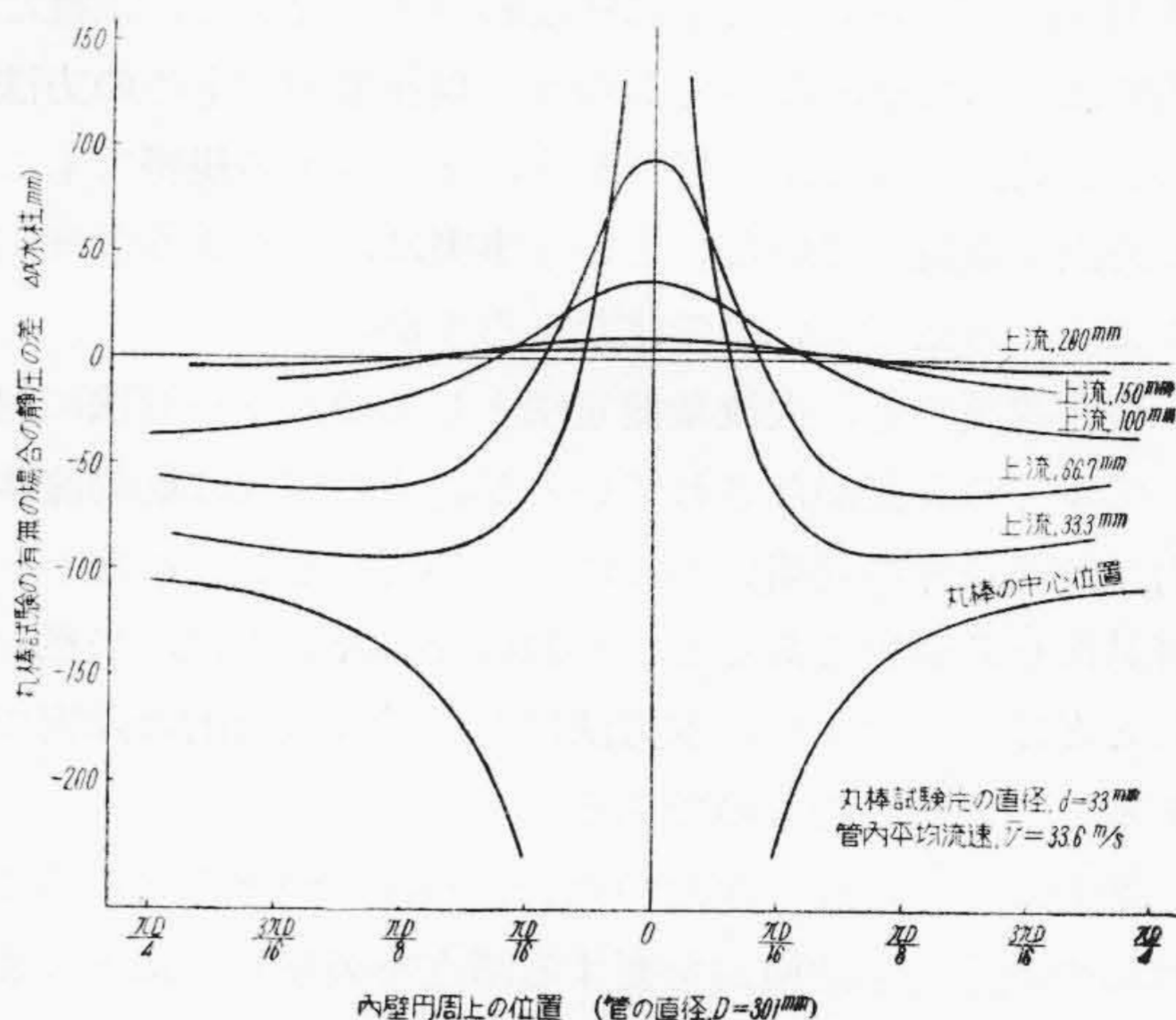
以上に関しては今後さらに実験をつづけ、その影響をあきらかにしたいと考えているが、興味ある問題であると考え、ここに1部分を紹介したいのである。

[VI] 全篇に対する総合結論

本年3月以降7箇月にわたつてのべたところにより、現在我国においてもつとも多数実施され、またそれだけでもつとも水車関係者との関連の深いピトー管法について、目下問題となつている事柄を中心に、筆者のいわんとするところを一通りのべたつもりである。

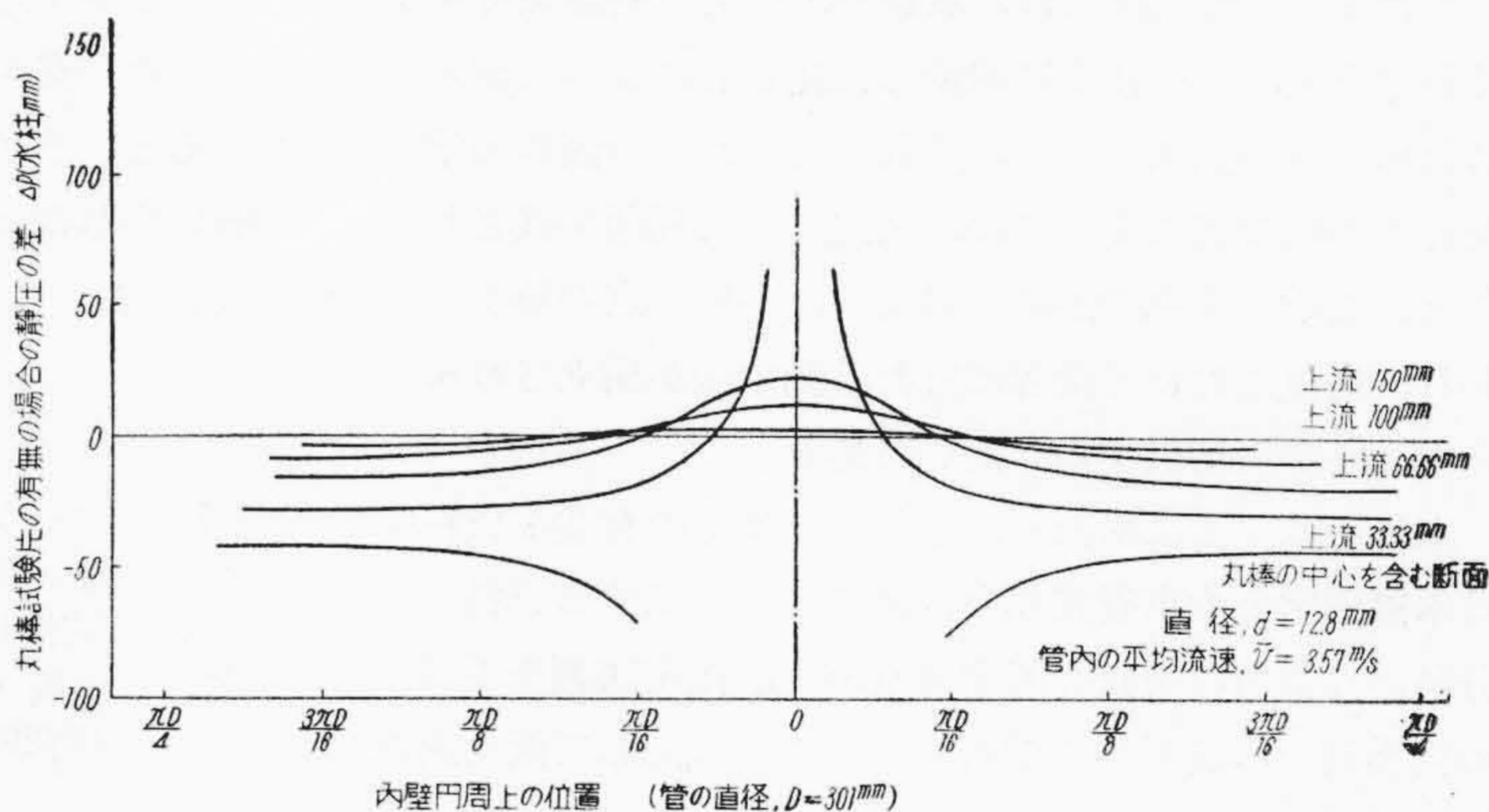
この方法はその性質上、管内の水の流動に関する流体力学的な検討を要する部分がきわめて多く、したがつていかなる場合にも十分な精度をもつて適用しうるだけの確定した基礎がなく、それだけ結果の精度に疑わしいものがあると考えられる。

以上のような基礎的な問題を別とすれば、この方法は装置も比較的簡単であり、実験操作の熟練も比較的容易



第11図 直径 33mm の丸棒試片上流距離と静圧変化

Fig. 11. Change of Static Pressure at Several Upstream Positions from 33mm ϕ Cylindrical Test Piece



第12図 直径 12.8mm の丸棒試片上流距離と静圧変化
Fig. 12. Change of Static Pressure at Several Upstream Positions from 12.8mm ϕ Cylindrical Test Piece

であるから、試験結果としてなんらかの結論をうることはむずかしいことではない。これが我国においてこの方法がもつともさかんに行われるにいたつた一つの大きい原因であると考えられる。もちろん技術的な実験方法自体にも問題はあるが、それらは正当な考えかたのもとに少しく訓練すれば、さほどむずかしいことではないので、この点についてはそれほど憂慮すべきものはないと考えられる。

このように考えると、やはりこの方法の難点は流体力学的な基礎的な面にかゝつていると見なければならぬ。水力発電所の水圧鉄管はその条件が多様であるため、これに対する流体力学的な見地からの適確な判断をなさずして試験が行われた場合、往々にしてはなだしく常識はずれの結果がえられることのあるのは当然である。したがつてこの方法に対しては、特にこのような判

断力が操作の熟練とともにそなわつていないと、正確な結果は決して望めないであろう。現在米国でもこの方法による試験がほとんど行われず、またスイス規格でもこの方法を重視していないという事実は、このような理由によると考えてよいのではなからうか。

現在我国でも、大流量測定法としてのピトー管法に対して多くの研究がなされているが、その完成は結局流体力学的諸条件の究明いかんにかゝつてくることになり、容易ならぬ道程であるといわねばならないのは、当然なこととはいいいながら、本方法にとつては致命的な障害であることを惜しむものである。

筆者がこゝに述べきたつたところは、つまるところこれらの流体力学的検討を要する諸点を列挙したにとゞまり、これに対するなんらの解決をもあたえておらないのは、まことに慚愧にたえないしだいであるが、同時にこの点が現代ピトー管法の最大の欠点であることを信じて疑わないものである。

したがつて現段階では、試験の流体力学的諸条件をよくわきまえ、かつ測定に熟練した測定者によつて測定された値のみが意味があり、それでもなおかつ流体力学的条件の不明な点に関しては、依然として問題が残されることとなる。すみやかにこのような不明な点の解明が行われ、窮極において世界に冠たる測定法が樹立されることを、心から切望するしだいである。

本稿を草するにあたり、きわめて多くの有益な資料を日本機械学会水車研究部会（後に水車に関する資料調査分科会）、電力技術研究所主催水車効率測定法調査委員会の両委員会の資料から借用した。ここに記して深く謝意

を表すしだいである。また種々の機会になにかとこれに関する御教示にあずかり、また文献を通じて教えられることの特に多かつた、東北大学沼知福三郎先生、東京大学兼重寛九郎先生、東京電機大学池谷武雄先生、東京工業大学板谷松樹先生、東京電力川崎毅技師殿、天野慎一氏、名古屋大学生源寺順先生、ならびに同学井伊谷鋼一先生の諸先生に心からなる感謝の辞を捧げるものである。

なお現地発電所に関する多くの資料は国内九電力会社をはじめ昭和電工株式会社、日本軽金属株式会社、そのほかの諸会社に関連するものであり、こゝに引用させていただいたことを厚く御礼申上げるしだいである。

筆者がその任でもないのに、多くの資料や提案に対し、忌憚のない批判を行つたことを、自ら恥じるとともに、あるいは筆者の非才のため多くのあやまちを冒していることをおそれるもので、この点深くおわび申上げるとともに、各位の御寛容と今後なお御教導を賜わらんことを切望するしだいである。

この一文が、将来のピトー管法に対しいささかでも益するところがあつたとすれば、筆者の小さな努力は十分酬いられたといつてよく、よろこびこれにすぐるものはない。

参考文献

- (1) マージナウ・マーフィー著、佐藤・国宗訳：物理と化学のための数学（Ⅱ）（共立社）P. 494. (昭29)
- (2) 山崎・栗須：日立評論 36巻10号 P. 1462~1467 (昭29. 10)

日立造船技報

Vol. 17

No. 3

目次

- ◎通電式酸洗い方法
- ◎旋削仕上法と仕上面あらさに関する研究
- ◎工具に関する窒化の研究
- ◎ステンレス鋼の応力腐食について
- ◎メカニカルシールの研究
- ◎パウダーカッティングの研究
- ◎大形煙突の振動について

本誌につきましても御照会は下記発行所へ御願致します。

日立造船株式会社技術研究所
大阪市此花区桜島北之町60

日立

Vol. 18

No. 9

目次

- ◎お部屋に一台づつ
- ◎秋の訪れと共に
- ◎家庭の夢の実現
- ◎ブラウン管のできるまで
- ◎テレビの放送から受像まで（1）
- ◎モートルと生活（3）
- ◎新しい照明施設（4）
- ◎ショールーム：掃除機
- ◎明日への道標：3,200 HP 圧縮機
- ◎日立だより

誌代 1ヵ月 ¥60 (〒12)

日立評論社

東京都千代田区丸の内1ノ4(新丸の内ビルディング7階)