

微差圧計の試作と低レイノルズ数領域における 管摩擦抵抗係数の測定

藤 村 謙 祐*

Trial Construction of Manometer for Small Pressure Difference and Measurement of Liquid Friction Coefficient on Low Re Numbers

Kensuke FUJIMURA

Abstract

In order to measure the pressure drop between near two point in a duct flowing gas with low velocity manometer for very small pressure difference was made on a trial basis. Mechanism of trial equipment are as follows. Two inverted bells are suspended on the free end of two cunti levers respectively, strain gauges are put on the up and under side of near the each fixed end, these gauges are bridged as differential connection and in order to prevent the effect of surface tension a surface active agent was added to sealing water. Output of bridge was input to the DC amplifier and diference of pressure aplyed in both bells are indicated on DC curent meter directly. Pressure drop between two point distance of 750 mm on the 20.3 mm ID vinyl choride pipe flowing air was measured with the trial equipment. Liquid friction coefficient was obtained by revers calculation from measured data. Obtained values of coefficient agreed with theoretical values with-in error of about 10% in the region of 40~1600 of Reynolds number which correspond to pressure difference of about 0.0032~0.13mmH₂O.

1. はじめに

低速度でガスが流れている直線ダクトのなるべく近い2点間の圧力損失を測定するために少くとも水柱0.01mm程度までの差圧を連続測定できる微差圧計が必要となり試作した。検出機構は沈鐘をカンチレバーの自由端につり下げ沈鐘に作用する圧力をカンチレバーの固定端近くに貼付したストレインゲージの出力電圧に変換しストレインメータの出力として読みとる方式とした。試作の初期では0.1mm水柱前後までしか測定できなかったが改良を重ねた結果0.01mm水柱前後まで測定できるようになった。また測定値の信頼性を確認する意味も含めて低レイノルズ数領域における管内流体摩擦抵抗係数の測定を行った結果レイノルズ数が約40の低域まで理論値とよい一致をみたので試作の経過ならびに測定結果について報告する。

2. 微差圧の検出方法と試作微差圧計の構成

現用されている各種マノメータの測定範囲の下限值は大略Table1のごとくである。^{1),2)}したがって1mm

Table1 The lowest limit of measuring range on typical manometer(outline)

Type	lowest limit	
	(Pa)	(≒mmH ₂ O)
U tube	(10)~100	(1)~10
Cistern	(10)~100	(1)~10
Inclined tube	(1)~10	(0.1)~1
Zero method	0.1	0.01
Inverted bell	50	5
Diaphram		
metallic	100	10
non-metallic	10	1
Bellows	100	10

*生産機械工学科

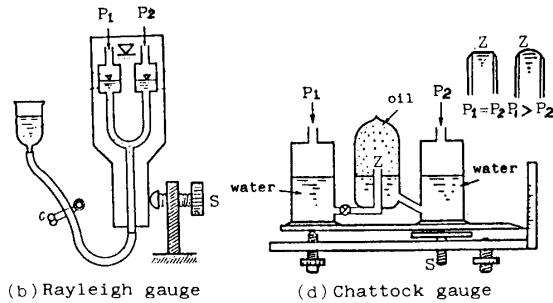
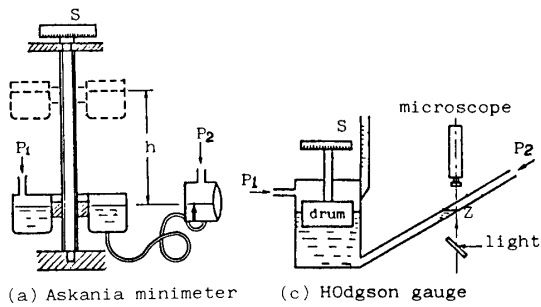


Fig. 1 Example of zero method manometer

水柱（以下 mmH_2O と記す）以下の差圧を測定するには現用方式では零位法のものを使用する必要がある。零位法に属するものには Fig. 1 に例示したように²⁾いろいろな形式があるが測定下限はどれも $0.01\text{mmH}_2\text{O}$ 前後あるいはそれ以下と高い精度をもっている。しかしながらこの方法は使用する際に1回の測定ごとにマイクロメータ（Fig. 1 で S で示す）を操作して参照液面を零位にもどしてその際のマイクロメータの指示目盛から差圧を逆算する必要があり、(1)操作に熟練を要し、(2)刻々に変化する差圧を連続的に検出指示することができず、また(3)製作する際に精密加工が必要である。したがってこの方式は今回の試作には不適当と考え

- (1) 少なくとも $0.01\text{mmH}_2\text{O}$ までメータ指示で連続測定できること。
- (2) 作動原理が簡単明白であること。
- (3) 構造が簡単で製作および材料の入手が容易であること。

を条件に試作機の構成を検討した。その結果受圧部はオーソドックスな沈鐘（Inverted bell 以下ベルと略記）としこれをカンチレバーの自由端につりさげ固定端近くにストレインゲージを貼付してベルに作用する圧力の大きさをストレインゲージの電気出力として取り出しこれをストレインメータ（直流増巾器で以下）アンプと略記）で増巾しメータに指示させることにした。試作機の構成を Fig. 2 に示す。図において

- A_1, A_2 ; ベル
- B_1, B_2 ; ベルをカンチレバーにつり下げるための糸
- C_1, C_2 ; カンチレバー

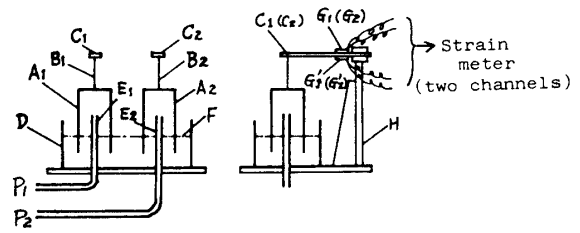


Fig. 2 Constitution of trial equipment.

- D ; 水槽
- E_1, E_2 ; 差圧を測定するふたつの圧力 P_1, P_2 をベル内空間に導くための導管
- F ; 水槽の液面
- G_1, G_1' および G_2, G_2' ; カンチレバー C_1 および C_2 の上下面に貼付したストレインゲージ

である。この構成で導管 E_1, E_2 をふたつの圧力測定口の P_1, P_2 につなぐとカンチレバーの自由端にはそれぞれ P_1, P_2 と大気圧の差によりベルを引き下げる力（または押し上げる力）とベルの自重から浮力を差し引いた力の和が加わりその大きさはストレインゲージを接続したアンプのメータにカンチレバーの歪量として表示される。したがってあらかじめかかる圧力と表示される歪量間の検量線または換算式を作っておけば P_1 と P_2 の大きさがわかるからその差をとれば二点間の差圧を知ることができる。しかしこのままの方法ではふたつの圧力の差をいちいち計算する必要がありこの計算を省略するには2台のストレインメータの出力を電気回路的に引き算することも可能であるが今回はストレインゲージを差動接続する方法をとった。

差動接続とは Fig. 3 の (a) の G_1, G_1' および G_2, G_2' の4枚のゲージを (b) のようなブリッジに接続したものでこれによりベル A_1, A_2 の寸法を等しくしておけばベルの重量および大気圧にもとづくカンチレバーに作用する力はブリッジ内で相殺され差圧にもとづく力のみがブリッジから電圧変化として出力される。したがってこの場合にアンプは一台でよく差圧の大きさに応じた歪量が直接にメータに指示される。

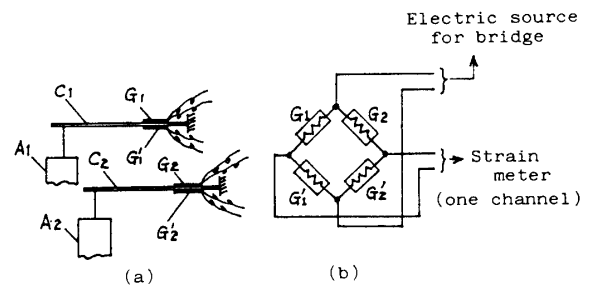


Fig. 3 Differential connection of strain gauges.

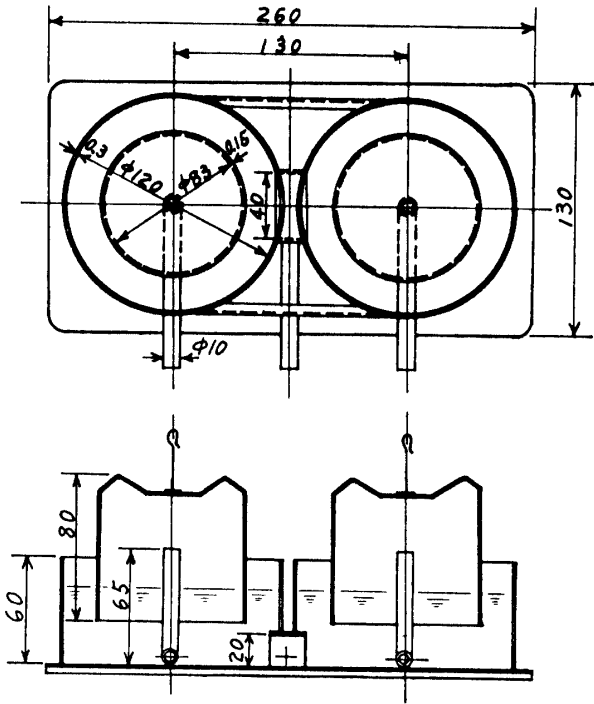


Fig. 4 Details of trial equipment.

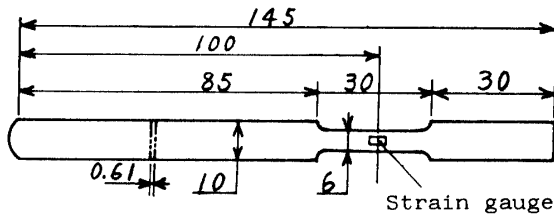
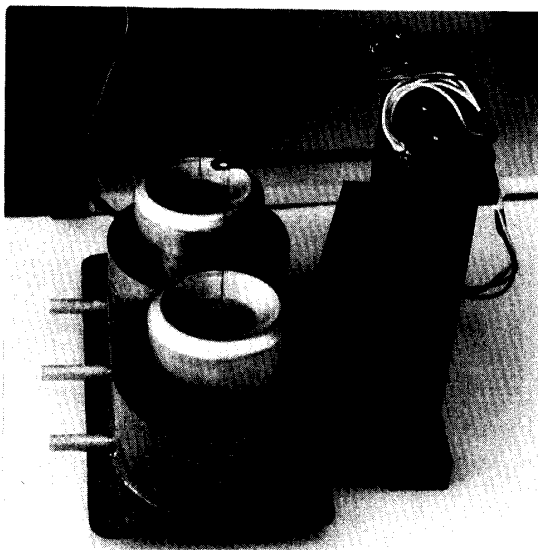


Fig. 5 Size of canti lever.



Phot. 1 The outside appearance of trial equipment.

主要部およびカンチレバーの実際の構造寸法は Fig. 4 および Fig. 5 の如くであり外観を Photo. 1 に示す。材質は水槽は亜鉛引鉄板、ベルは軽量薄肉でかつ寸法が揃っているという条件にかなうものとしてアルミ製の大形缶ビールの空缶、またカンチレバーは金切鋸の刃を加工して用いた。カンチレバーの有効長さは約90mmである。またストレインゲージはゲージ率が 2.1 の標準ゲージとしアンプは市販の IC (オペアンプ) を用いて製作した。測定レンジは 100, 300, 1000, 3000 および 10000 μ (μ は垂量の単位で 10^{-6}) フルスケールの 5 レンジとし表示には 100 μ A の直流メータを用いた。

3. 水の表面張力に対する対策

Fig. 3 に示すようにストレインゲージを差動接続にすれば表面張力による力がベルに作用してもふたつのベル間で相殺されて測定誤差は生じないはずである。しかし実際にはふたつのベルの表面の状態を同じにして全面的親水性を全く同等にすることは困難であるため両者に作用する表面張力は常に等しいとはかぎらず測定誤差の原因となる。この誤差の対策としては

- (1) 水よりも表面張力の小さい液体 (たとえばスピンドル油は水の 43%, メチルアルコールは 31%) を用いる。
- (2) 接液面を硫酸洗滌などにより完全脱脂する。
- (3) ベル表面の親水性をよくする薬剤をシール水に添加する。

などが考えられるが(1)では液体の選定が難しく(2)は装置の材質上無理であるから今回は(3)によることとし界面活性剤を添加した。水に少量の界面活性剤を添加すると表面張力そのものが消滅するのではないがベル表面の親水性がきわめてよくなり水に均一にぬれるので後述の測定例のように表面張力に起因する測定誤差は実用上無視できる程度に小さくなる。なお以下における実験には補助的に単管式マンノメータや傾斜管式マンノメータなどを使用するがこれらにもその指示の正確を期するために使用水には界面活性剤を添加した。

4. 微圧発生器

微差圧計の調整をするには任意の微小圧力を簡単に発生できる微圧発生器が必要であり Fig. 6 の構造のものを製作した。図において

- A; ベル (亜鉛引鉄板製)
- B; 水槽 (上に同じ)
- C; 水槽の支持駒

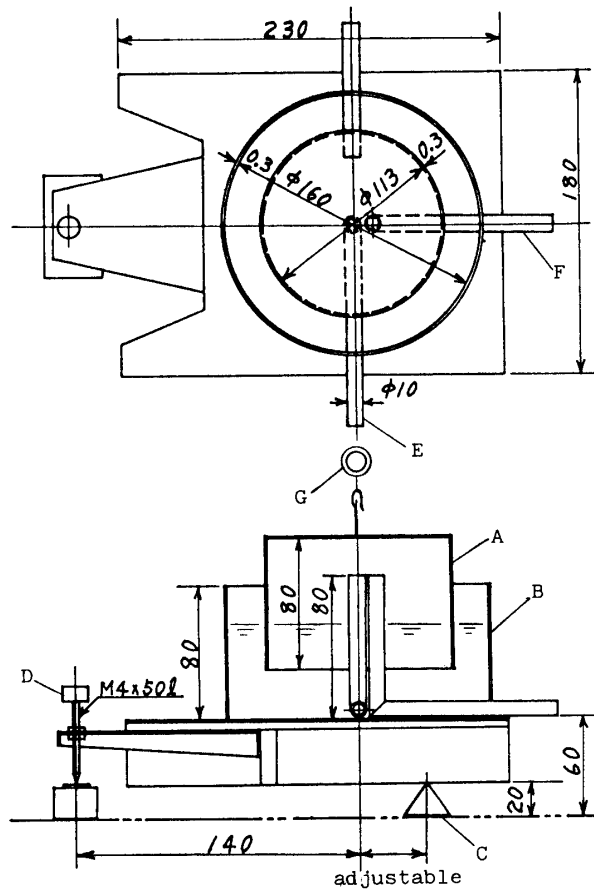


Fig. 6 Low level Pressure generator.

D; 液面上下用の調節ねじ

E, F; ベル内空間と外部の導管

G; ベルをつり下げるための梁（外部に固定）でありつぎのように使用する。

- (1) 導管 E, F のうち一方を検定しようとする微差圧計およびマンノメータなどの基準計器に接続し他方は外気に開閉する切替コックに接続する。
- (2) 切替コックを開いてベル A 内を大気に開放して大気圧にし微差圧計と基準計器を零点にセットする。
- (2) 切替コックを閉じて調節ねじ D をまわして水槽 B 内の液面を下げる（上げる）とベル内の圧力が下がり（上り）りこれは微差圧計と基準計器に伝えられるから両者の指示値を対比する。

調節ねじの 1 回転当りの液面の上下移動量は駒 C を左右に移動させることにより調節できる。なお基準計器として傾斜マンノメータを用いても 1 mmH₂O 以下では誤差が大きくなるのでそれ以下については後述のようにこの微差圧計を用いて塩ビ管に空気を低流速で流した場合の圧損を測定しその値から層流域の管摩擦抵抗係

数を逆算してそれが理論値とどの程度一致するかにより間接的に測定精度を確認する。

5. メータ指示値の差圧への換算

ふたつのベルに交互に 1 g の分銅をのせメータの指示がいずれでも 18.5 μ となるようにアンプのゲインを調節する。両者の指示にちがいがあるときはベルをカンチレバーにつり下げる位置を動かしてレバーの有効長さを調整する。ベルの内径は 83 mm したがって断面積 A は 5.41 × 10⁻³ m² であるから荷重差 1 g に対応する圧力差 ΔP₀ は

$$\Delta P_0 = 1/1000 \cdot 1 / A = 0.185 \text{ kg f/m}^2 = 0.185 \text{ mmH}_2\text{O}$$

となる。したがって任意の差圧 ΔP に対応する歪量を ε とすると

$$\Delta P / \epsilon = 0.185 / 18.5 = 1/100$$

$$\Delta P = 1/100 \cdot \epsilon$$

$$\Delta P; \text{ mmH}_2\text{O}, \epsilon, \mu$$

となりメータの指示値 ε から ΔP への換算ができる。なお上記のようにアンプのゲインはストレインメータとして歪測定をする際の正規の値からはづれた値に設定されるので指示される歪量はカンチレバーの歪量そのものは示しておらずまたカンチレバーの歪量そのものは知る必要もない。したがって以下において ε で表わすメータの指示値はカンチレバーの歪量とは無関係でたんに差圧の大きさを示す数値とみなすことにする。また測定圧力が変化するとベルが水中に没入している高さが増えるからげん密にはベルに対する浮力も変化するがそのための測定誤差は小さい (0.5% 以下) ので無視することにする。

6. 測定結果

差圧 1 mm 以上においては本機の測定結果は傾斜マンノメータなどとよい対応を示し特に問題はなかったのださらに差圧の小さい領域での特性を調べるために塩ビ管内に低速で空気を流した場合のかなり接近した 2 点間の圧損を測定しその結果から管摩擦抵抗係数 λ を逆算して理論値と対比してみた。測定は Fig. 7 のような構成で行い測定結果 Table 2 のようになり、これを Moody 線図³⁾ 上にプロットすると Fig. 8 のようになった。図から本機で測定した差圧から逆算した管摩擦抵抗係数 λ の値は理論値にかなり近く Table 2 と併せ

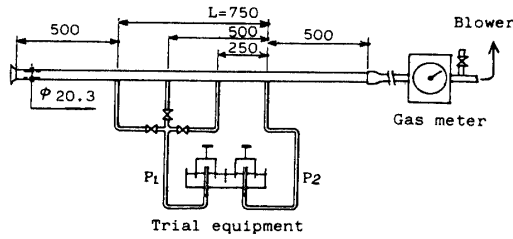


Fig. 7 Layout of instrument measuring Pressure drop in pipe with trial equipment.

Table 2 Examples of measured data with trial equipment

① V=0.867 m/s Re=1060			
L (mm)	250	500	750
ϵ (μ)	2.5	5	11
ΔP (mmH ₂ O)	0.025	0.05	0.11
λ (—)	0.047	0.047	0.069
② V=1.27 m/s Re=1555			
L (mm)	250	500	750
ϵ (μ)	4	8	17
ΔP (mmH ₂ O)	0.04	0.08	0.17
λ (—)	0.035	0.35	0.050
③ V=1.58 m/s Re=1933			
L (mm)	250	500	750
ϵ (μ)	6	13	22
ΔP (mmH ₂ O)	0.06	0.13	0.22
λ (—)	0.034	0.037	0.041
④ V=2.45 m/s Re=2995			
L (mm)	250	500	750
ϵ (μ)	13	30	46
ΔP (mmH ₂ O)	0.13	0.30	0.46
λ (—)	0.031	0.035	0.036

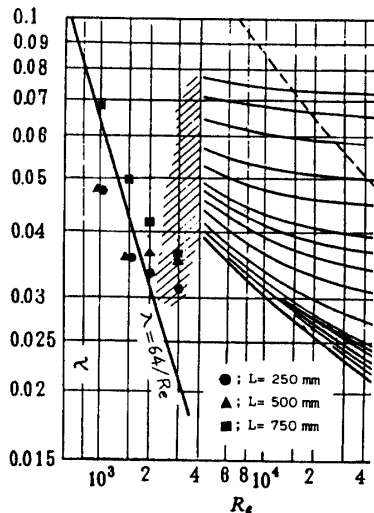


Fig. 8 Plot of measured value of λ with trial equipment on Moody diagram.

検討するとほぼ0.1mmH₂O程度までは測定できると考えられる。

7. 試作機の改造

以上の測定結果からこの微差圧計では約0.1mm H₂Oまでの差圧は測定できることがわかったがこれは目標の0.01mmH₂Oより1桁大きいのでさらに改良することにした。

7.1 改良の内容

この微差圧計の感度を上げるつまり測定レンジの下限を下げる方法としてはつぎの諸点が考えられる。

- (1) ベルの直径を大きくする。
- (2) カンチレバーの断面を小さくする。または有効長さを長くする。
- (3) アンプのゲインを高くする。
- (4) ストレインゲージをゲージ率の大きなものにとりかえる。

これらのうち(1)は感度を10倍にするには直径を3倍強にする必要がありあまり装置が大きくなりすぎる、(2)はカンチレバーの発生応力が過大となり永久歪を生じたり折損する恐れがある、また(3)はもっとも簡単に実施はできるが従来からの経験ではゲインをあげればノイズも大きくなり実質的には感度の上昇とはあまりならない可能性が強い。一方(4)の方法は特に問題点も見当らないのでこの方法で改造することにした。

ストレインゲージはこれまでは前述のごとくゲージ率が2.1の標準型であったのでそれよりもできるだけゲージ率の大きいものを検討した結果ゲージ率が102の半導体ゲージ(共和電業KSN-2-E4-11)を用いることにした。したがって感度は一挙に $102/2.1 \approx 50$ 倍に上昇するはずであるが安全を期するためにブリッジ供給電圧を5Vから3Vに落したために実際には約30倍となった。したがって片方のベルに1gの分銅をのせたときのメータの指示値が

$$18.5 \times 30 = 555 \mu$$

となるようにアンプのゲインを設定すると ϵ から ΔP への換算式は

$$\Delta P / \epsilon = 0.185 / 555 = 1/3000$$

$$\Delta P = 1/3000 \cdot \epsilon$$

$$\Delta P; \text{ mmH}_2\text{O}, \epsilon; \mu$$

となる。

7.2 測定結果

改造前のときと同様に塩ビ管における圧損の測定を行ったがその前にシール水に界面活性剤を添加しない場合とした場合の微差圧計の特性を傾斜マノメータの指示値を基準に測定した。Fig. 9は添加前の特性を示し微差圧計の指示値は μ を mmH_2O に換算してある。図からわかるようにこの場合はかなり大きなヒステリシスがありかつ直線性も悪い。またこの図は一例であり測定をくりかえすごとにちがったパターンになる。添加後の特性はヒステリシスは殆んどなくなり昇圧時と降圧時の値がグラフ上では書き分けられないので数値をTable 3に示す。

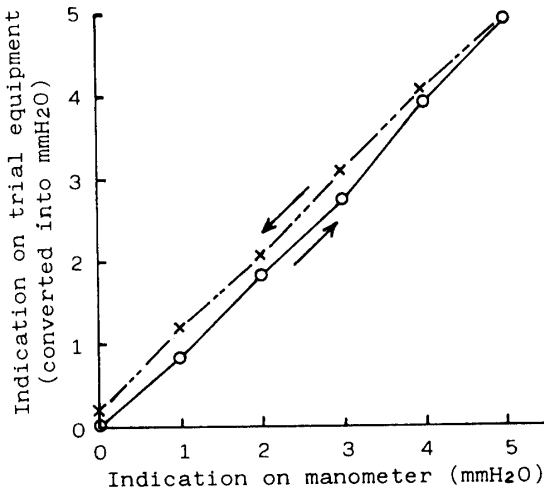


Fig. 9 Example of hysteresis character (Surface active agent is not added to seal water).

Table 3 Comparison of measured pressure by trial equipment with value of inclined manometer

manometer (mmH_2O)	Improved trial equipment (converted into mmH_2O)	
0	0	0
0.2	0.200	0.198
0.4	0.400	0.400
0.6	0.600	0.604
0.8	0.804	0.804
1.0	1.004	1.006
1.2	1.204	1.204
1.4	1.412	1.404
1.6	1.602	1.602
1.8	1.802	1.806
2.0	2.020	

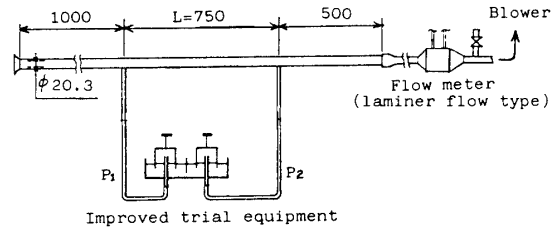


Fig. 10 Layout of instrument measuring Pressure drop in pipe with improved trial equipment.

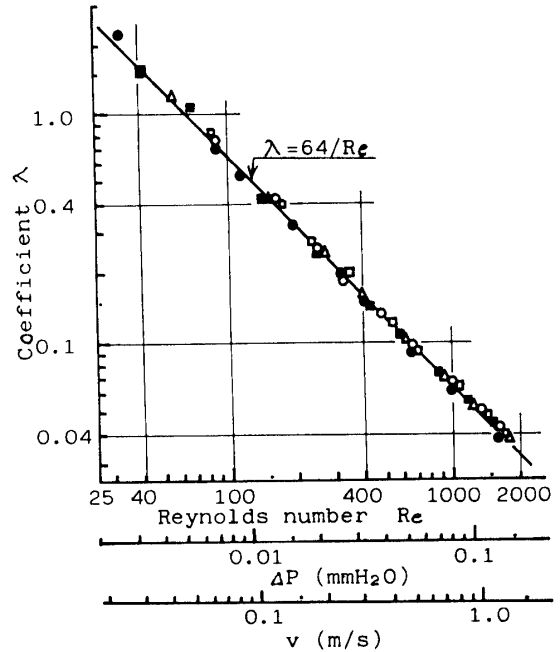


Fig. 11 Plot of measured value of λ with improved trial equipment.

塩ビ管における圧損の測定は装置の構成を若干変更し Fig. 10のようにした。Fig. 7とことなる点はずの如くである。

- (1) 流量計をガスメータから層流流量計(司測研, LFE-150 LM)に変更した。これはより小流量まで正確に測定するためである。
- (2) 助走区間を500mmから1000mmに延長した。
- (3) 差圧測定点間の距離は750mmのみとした。

測定結果の一例をTable 4に、管摩擦抵抗係数 λ を Re 数に対してプロットした結果をFig. 11に示す。なお図中の点が○や□など書き分けてあるのはこの微差圧計の測定値の再現性を確認するために日をかえて数回測定した結果を識別するためである。この図から改造後の差圧の測定結果から逆算した λ の値は少なくとも Re 数が40あたりまでは理論値とかなりよい一致を示していることがわかる。この場合の Re 数40は検出差圧

Table 4 Examples of measured data with improved trial equipment

Pipe size; ID=20.3mm L=750mm λ_{th} ; theoretical value of λ (=64/Re)						
V(m/s)	Re	ϵ (μ)	ΔP (mmH ₂ O)	λ	λ_{th}	λ / λ_{th}
0.031	41	10	0.0034	1.56	1.55	1.008
0.050	66	18	0.0060	1.09	0.969	1.122
0.106	140	32	0.0107	0.428	0.456	0.939
0.201	266	64	0.0212	0.239	0.241	0.992
0.313	415	100	0.0333	0.153	0.154	0.994
0.492	652	160	0.0533	0.0991	0.0981	1.010
0.760	1007	250	0.0833	0.0649	0.0635	1.022
0.903	1197	300	0.1000	0.0552	0.053	1.032
1.190	1577	405	0.1350	0.0429	0.0406	1.058
1.408	1866	500	0.1667	0.0379	0.0343	1.104

値に換算するとほぼ0.0032mmH₂Oであり最初の目標値である0.01mmH₂Oを十分にクリアできた。

8. 今後の課題

以上の如く試作した微差圧計は目標の0.01mmH₂Oの測定は可能となったが測定をくりかえしているうちにつぎのような不備な点があることがわかってきた。すなわち水槽が上部開放になっているために

- (1) ベルに少しでも風があたるとメータの指示がふれる。したがって測定は窓をしめ切り、無風状態で行わねばならない。
- (2) ふたつの圧力 P_1 , P_2 の差圧を測定するといっても P_1 , P_2 はふたつのベルに別個に作用しベルの外は大気圧であるから実際にベルに作用しているのは大気圧と P_1 , または P_2 の差圧である。したがって P_1 と P_2 の差は小さくても P_1 , P_2 と大気圧との差が大きければベルにはその差に応じた大きな力が

かかる。

このような場合は測定精度が低下したりまた P_1 , P_2 が大気圧よりあまり低いときにはカンチレバーの撓みが大きくなりベルの下端が水槽の底に当り逆に大気圧より高いときはベルが浮き上がって測定不能になる。したがってこれらの欠点を除いてより高精度で使いやすい微差圧計とするには完全密閉型とする必要があり今後この方向でさらに改良を進める予定である。

参 考 文 献

- 1) 日本機械学会編：機械工学便覧，改訂第6版，第6編，日本機械学会（1976）P. 6—27
- 2) 榎本進一：計量管理技術双書(9)圧力，コロナ社（1982）P. 20
- 3) 日本機械学会編：機械工学便覧，改訂第6版，第8編，日本機械学会（1976）P. 8—12

(昭和61年4月15日受理)