

人工呼吸器用超音波流量計の圧力損失の測定

保 坂 公 樹・茂 木 良 平

Measurement of pressure drop of ultrasonic flowmeter for a respirator

Kouki HOSAKA and Ryohei MOTEGI

(平成20年11月28日受理)

We have studied the pressure drop of an ultrasonic flowmeter. We compared the pressure drop of an ultrasonic flowmeter to those of a hot-wire flowmeter and a cylinder tube to confirm the validity of an the ultrasonic flowmeter. The pressure drop was measured by using U-Tube Manometers. As a result, the pressure drop of an ultrasonic flowmeter was about 1/60 of that of a hot-wire flowmeter.

1. 緒言

1.1 背景

人工呼吸器とは、未熟児や重病人などの自発的な呼吸が行えない人の呼吸を補助する装置である¹⁾。人工呼吸器における流量計の役割は、患者の呼吸量を測定し患者の状態を確認することで、人工呼吸器が患者へ供給する空気の量を制御することにある²⁾。理想的な流量計としては呼吸抵抗が無く応答性の良い物が挙げられる。しかし、従来の人工呼吸器に使用されている熱線式流量計は、応答性は良いものの管の途中に絞りを付ける事で流速を加速させるという構造上から大きな圧力損失が生じてしまう³⁾。そこで、人工呼吸器用の流量計として超音波流量計の導入が検討された⁴⁾。超音波流量計は円筒に枝管が付いた形状をしており、理論的には圧力損失は著しく低減できるとされている⁵⁾。この超音波流量計を人工呼吸器に用いることで、患者の身体的負担を軽減できると考えられる。

1.2 本研究

本研究の目的は、超音波流量計の圧力損失と直管や熱線式流量計の圧力損失とを比較し、超音波流量計の有用性を確認する事である。そこで超音波流量計の詳細なデータを得るため、超音波流量計、熱線式流量計、プラスチック直管の圧力損失を測定した。また、データを詳細に解析するため、解析用の金属管(φ19mm)の圧力損失測定も行った。

そして測定したデータを解析し、算出した数値か

ら各種流量計の圧力損失、本実験における精度、及び改善すべき問題点などを考察した。

2. 実験概要

ここでは、本研究で行った実験の内容を述べる。

2.1 測定原理

測定にはマノメーターを用い、ブロアーから測定試料内に空気の流れを送ることで圧力損失を測定する。空気は流速を変化させながら何度も測定し、複数のデータを取ることでより圧力損失の傾向を調べる。また、マノメーターは傾斜法(マノメーターを傾けることにより読み取り精度を高める方法)を採用することで、より精度の高い数値を求めることができる。

2.2 測定装置

図1に測定装置の概要を示す。測定パーツ部分に被測定デバイスを配置し、これにブロアーから風を送り、それぞれのマノメーター(東京硝子器械(株)型式PWW-500, マノメーター専用液を使用)の値を同時に読み取る。スライダックでブロアーに加える電圧を変えることで風速を調節する。流量センサーの検出電圧は0.4Vきざみで測定していき、3.6V(流速2.76 [m/s]~12.41 [m/s])まで測定した後、被測定デバイスを上流、下流で入れ替えて再び測定をおこなう。なお、この流速範囲は人間の呼吸流量から判断した。表1、図2に流量センサーの検出電

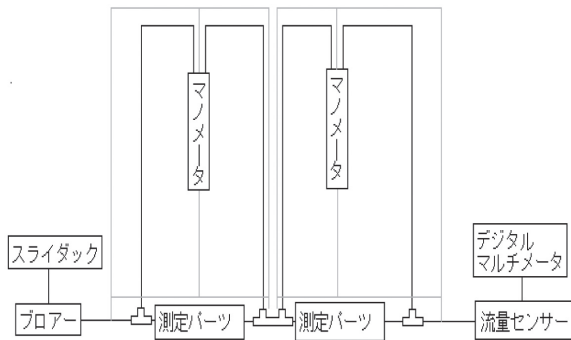


図1. 測定装置

表1. 検出電圧と流速の関係

電圧 v [V]	流量 Q [l/min]	流速 u [m/s]
0.40	21.10	1.38
0.80	42.10	2.76
1.20	63.20	4.14
1.60	84.20	5.51
2.00	105.30	6.90
2.40	126.30	8.27
2.80	147.40	9.65
3.20	168.40	11.03
3.60	189.50	12.41

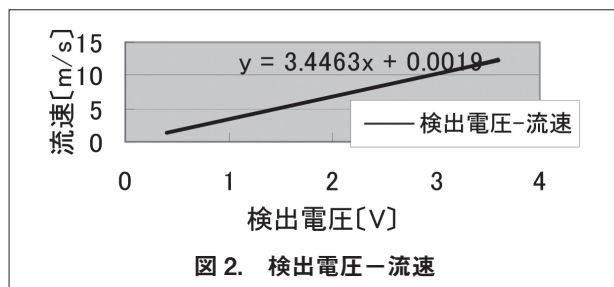


図2. 検出電圧－流速

圧と流速の関係を示す。

2.3 測定対象

次に、主な測定対象について述べる。

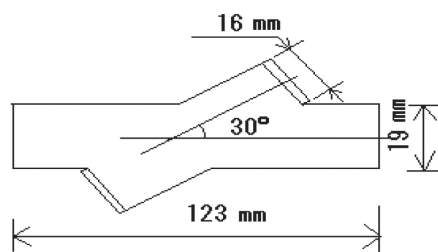


図3. 超音波流量計

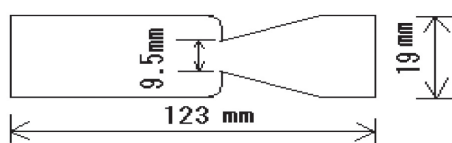


図4. 熱線式流量計

- ・超音波流量計；円筒に2本の枝管が付いた形状をしている。理論的には非常に小さい圧力損失となる。
- ・熱線式流量計；流体の流速を大きくするために絞りが付いている。上下流で非対称な形状なので向きを変えて二度測定した³⁾。
- ・プラスチック直管；円筒状の管で、直径はφ19mmである。圧力損失の比較や流量計特有の圧力損失を算出するために用意した。

2.4 測定範囲（超音波流量計の場合）の詳細

本研究で圧力損失を測定している代表的な測定範囲は図5のようになり、二つのマノメーター接続管 f の間になる。マノメーター接続管と流量計は直径が19mmと同じであり、その間に直径の小さい17mmの金属管を挿入し接続している。そのため、接続部には広がり継ぎ目と狭まり継ぎ目があるので、そこも考慮して解析する必要がある。

a：広がり継ぎ目

b：狭まり継ぎ目

c：超音波流量計

d：金属管（φ17mm）

f：マノメーター接続管

（ここで各部の損失を、 H_a 、 H_b 、 H_c 、 H_d 、 H_f とする。）

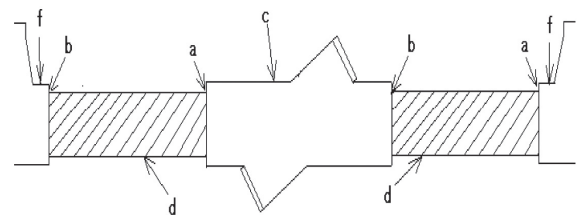


図5. 測定範囲の詳細

2.5 測定計画

本研究は、予備実験と本実験で構成されている。それぞれは、以下のように行った。

予備実験

- ①二本のプラスチック直管を測定パーツの上、下流部分に配置して測定を行い、次に上、下流の位置を交換して行った2回の測定で再現性を調べる。
- ②超音波流量計と熱線式流量計を測定パーツ部に配置して測定し、各流量計の圧力損失の概略を調べる。
- ③水平から30度傾けた傾斜法（30°）を用いて読み取り精度を高めた状態でプラスチック直管2本を測定し、上流、下流で影響が出るかを調べる。

本実験

- ④超音波流量計とプラスチック直管を傾斜法（30°）で、熱線式流量計を鉛直法で測定する。また、熱線式流量計の向きによって圧力損失がどれほど異なるか比較する。

⑤ 流量計の代わりに、直径19mmの長さが異なる（400mm, 500mm, 800mm）金属管を取り付けて傾斜法（15°）で測定し、19mm金属管の圧力損失 H_dL （ L = 管の長さ）を求める。そして、共通部分の圧力損失 $H_X = (2H_a + 2H_b + 2H_{d340} + 2H_f)$ を算出する。この値を差し引くことで、測定④の結果から超音波流量計、熱線式流量計（順向き、逆向き）、プラスチック直管の単独の圧力損失、 H_c , H_e , H_g , H_g' を求める。さらに、金属管（ $\phi 19\text{mm}$ ）の管摩擦係数を算出する。（ここで、 $2H_a$, $2H_b$, $2H_{d340}$, $2H_f$ はそれぞれ、広がり継ぎ目、狭まり継ぎ目、金属管（17mm）、マノメーター接続部を表す。）

3. 予備実験

3.1 プラスチック直管による測定装置の再現性

マノメーターを鉛直に立て、二つのプラスチック直管（それぞれ直管A、直管Bとする）を測定パーツとして入れ、次に上、下流の位置を入れ替えて測定し、直管ごとの平均値がA、Bともに再現できているか、また、上流側と下流側で影響が出るかを確認した。

微少の誤差はあるが、プラスチック直管Aとプラスチック直管B、上流側と下流側はそれぞれ近い値を取っている。また、標準偏差と各測定結果の近

表 2. 直管Aと直管Bの圧力損失〔H₂Omm〕

流速[m/s]	直管A	直管B
2.76	1.00	1.50
4.14	2.50	2.00
5.51	4.00	4.00
6.90	6.00	6.00
8.27	9.00	9.00
9.65	11.00	11.00
11.03	14.50	14.00
12.41	17.50	18.00
標準偏差	0.28	0.40

表 3. 上流側と下流側の圧力損失〔H₂Omm〕

流速[m/s]	上流側	下流側
2.76	1	1.25
4.14	2.5	2.25
5.51	4.25	4
6.9	6.25	6
8.27	8.75	8.75
9.65	11.25	11.25
11.03	14.5	14.25
12.41	17.75	18
標準偏差	0.09	0.18

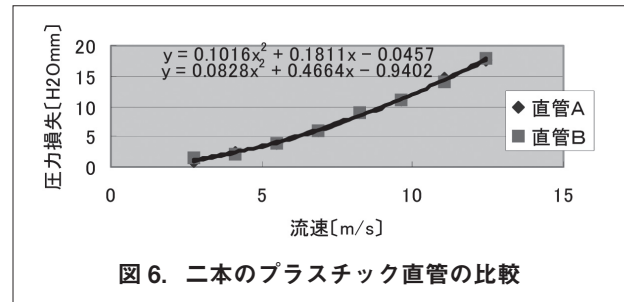


図 6. 二本のプラスチック直管の比較

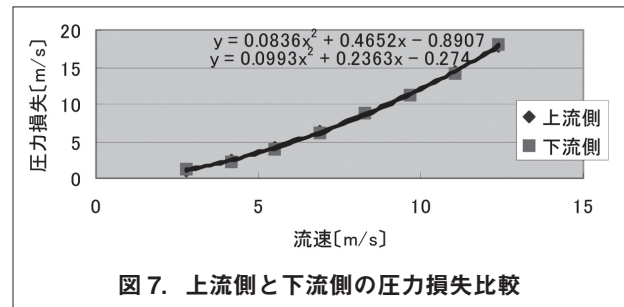


図 7. 上流側と下流側の圧力損失比較

似曲線の式を比較して考えても問題なく測定できていると考えて良い。

3.2 超音波流量計と熱線式流量計の圧力損失

マノメーターを鉛直に立て、超音波流量計と熱線式流量計の圧力損失を測定し、超音波流量計と熱線式流量計の圧力損失にどの程度の差が生じているかを確認する。

熱線式流量計は超音波流量計に比べて4倍程度圧力損失が大きかった。

表 4. 超音波流量計と熱線式流量計の圧力損失比較〔H₂Omm〕

流速[m/s]	超音波流量計	熱線式流量計 (順向き)
2.76	1.00	4.00
4.14	2.00	9.00
5.51	5.00	16.00
6.90	6.50	24.00
8.27	9.00	34.00
9.65	11.50	46.00
11.03	15.00	60.00
12.41	19.00	74.00

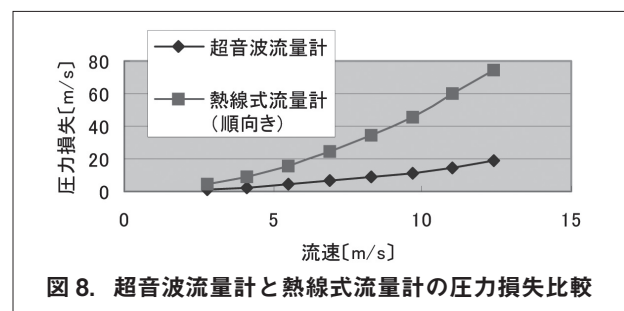


図 8. 超音波流量計と熱線式流量計の圧力損失比較

3.3 傾斜法 (30°) による上流, 下流の影響測定調査

傾斜法 (30°) を用いて読み取り精度を高めた状態で, 二本のプラスチック直管の圧力損失を測定し, 上流側と下流側で測定結果に影響があるかを調べた。

傾斜法によって読み取り精度を高めた状態で上流側のプラスチック直管と下流側のプラスチック直管

表 5. プラスチック直管による上流, 下流の比較(H₂Omm)

流速[m/s]	上流側	下流側
2.76	1.00	1.15
4.14	2.25	2.25
5.51	4.00	4.25
6.90	6.00	6.25
8.27	8.50	8.75
9.65	11.75	11.75
11.03	14.75	15.25
12.41	18.00	19.25

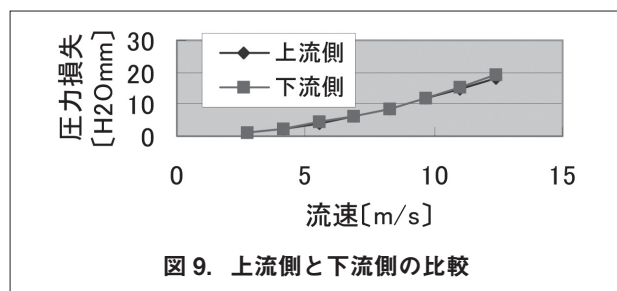


図 9. 上流側と下流側の比較

の圧力損失を比較したところ, 下流側の直管の圧力損失がやや大きくなる傾向がうかがえた。これは最下流に位置する流量センサーに付属している蛇腹管が, 流れに影響を与えている可能性がある。そこで, それぞれの試料で上流側と下流側を入れ替えて, 計 2 回ずつ測定しその平均値を解析に用いる事とした。

4. 本実験

本実験では傾斜法 (30° または 15°) を用いて, 各流量計単独の圧力損失の解析に必要なデータを得るための測定を行う。(ただし熱線式流量計については圧力損失が大きすぎるため傾斜法を用いることができなかった)

4.1 超音波流量計, プラスチック直管, 熱線式流量計の圧力損失測定

解析に使用するデータを得るため, 傾斜法 (30°) を使って精度の高い圧力損失測定を行った。また, 以下の式は測定した圧力損失の内訳を示したものである。

超音波流量計

$$HC = 2H_a + 2H_b + 2H_{d340} + 2H_f + H_c = H_c + H_X \quad (1)$$

プラスチック直管

$$HE = 2H_a + 2H_b + 2H_{d340} + 2H_f + H_e = H_e + H_X \quad (2)$$

熱線式流量計 (順向き)

$$HG = 2H_a + 2H_b + 2H_{d340} + 2H_f + H = H_g + H_X \quad (3)$$

熱線式流量計 (逆向き)

$$HG' = 2H_a + 2H_b + 2H_{d340} + 2H_f + H_g' = H_g' + H_X \quad (4)$$

超音波流量計, 熱線式流量計の順向き, 逆向き, プラスチック直管の圧力損失の測定データを表 6 と図 10 に示す。超音波流量計 HC とプラスチック直管 HE の圧力損失にはほとんど差が無く, 熱線式流量計の圧力損失 HG, HG' はそれに比べて大きい。また, 熱線式流量計は逆向きの圧力損失が順向き (P3. 図 4 に示す向き) の倍程度になっている。このデータはそれぞれの圧力損失の値に共通部分 $H_X = 2H_a + 2H_b + 2H_{d340} + 2H_f$ を含んだものである。これより H_X の圧力損失を除外した各流量計単独の圧力損失 (H_c , H_e , H_g , H_g') を求めていく。

表 6. 超音波, 熱線式, プラスチック直管の圧力損失 (H₂Omm)

流速 [m/s]	超音波流量計	プラスチック直管	熱線式流量計 (順向き)	熱線式流量計 (逆向き)
2.76	1.25	1.00	4.50	7.00
4.14	2.37	2.75	9.00	14.00
5.51	4.37	4.12	16.50	25.50
6.90	6.75	6.37	23.50	39.50
8.27	9.25	9.00	34.50	58.00
9.65	12.62	12.37	47.00	79.00
11.03	16.00	15.25	59.50	102.50
12.41	20.00	19.25	75.00	130.00

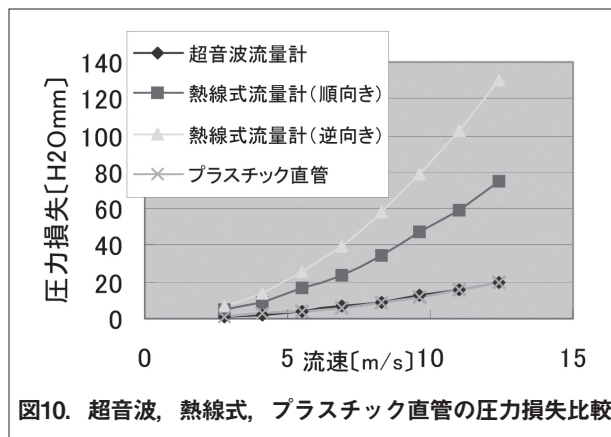


図 10. 超音波, 熱線式, プラスチック直管の圧力損失比較

4.2 金属管（φ19mm）の測定によるHd'Lの算出

これまでの測定パーツとして各種流量計やプラスチック直管を取り付けていたが、そこに長さが800mm, 500mm, 400mm, 直径19mmの金属管を取り付けて傾斜法(15°)で測定する。これは, (800mm, 500mm), (800mm, 400mm), (500mm, 400mm)の組み合わせの3通りの実験を行った。表7に示す値はこれらの値の平均値である。これらの測定結果の差を利用することで, H_x の数値を算出できる。以下の式は, 測定した圧力損失の内訳を示したものと, この管の長さ1mmに相当する圧力損失Hd'lを求め式である。

$$H1 = 2H_a + 2H_b + 2H_{d340} + 2H_f + Hd'800 = Hd'800 + H_x \quad (5)$$

$$H2 = 2H_a + 2H_b + 2H_{d340} + 2H_f + Hd'500 = Hd'500 + H_x \quad (6)$$

$$H3 = 2H_a + 2H_b + 2H_{d340} + 2H_f + Hd'400 = Hd'400 + H_x \quad (7)$$

$$H_x = 2H_a + 2H_b + 2H_{d340} + 2H_f \quad (8)$$

$$H_d'1 = (H1 - H2)/300 \quad (9)$$

図11は金属管（φ19mm）の測定結果と、それより算出したHd'lを800倍した数値を載せたものである。なお, Hd'lの数値は流速毎に求めている。それぞれを比較すると, 測定範囲内の全圧力損失のう

表7. 金属管（φ19mm）の圧力損失（H₂Omm）

流速[m/s]	H1 (L=800)	H2 (L=500)	H3 (L=400)	Hd'l × 800
2.76	1.87	1.53	1.27	0.90
4.14	3.74	3.27	3.01	1.25
5.51	6.55	5.70	5.22	2.27
6.90	9.63	8.47	7.96	3.09
8.27	13.90	12.15	11.16	4.69
9.65	18.11	15.88	14.71	5.93
11.03	22.66	19.82	18.44	7.56
12.41	28.68	25.16	23.73	9.40

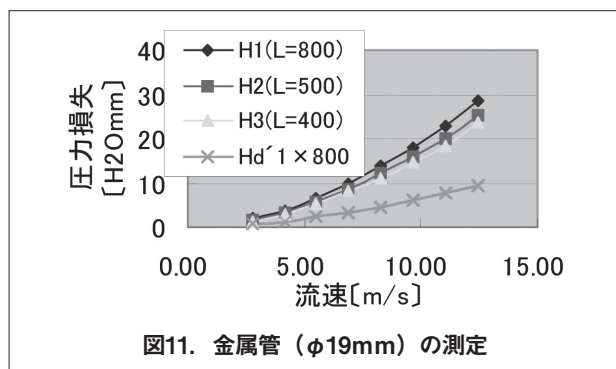


図11. 金属管（φ19mm）の測定

ち, 金属管（φ19mm）の圧力損失が占める割合は半分以下であることがわかる。

4.3 共通部分の損失 $H_x (=2H_a + 2H_b + 2H_{d340} + 2H_f)$ の分析

金属管（φ19mm）の測定結果から H_x を算出した。 H_x は(5)～(7)式から $H_x = H1 - Hd'800 = H2 - Hd'500 = H3 - Hd'400$ の3通りで算出できる。ここではこれら3通りの値を平均して H_x とした。

表8. H_x の算出（H₂Omm）

流速[m/s]	H_x
2.76	0.90
4.14	2.48
5.51	4.20
6.90	6.52
8.27	9.04
9.65	11.99
11.03	14.89
12.41	19.18

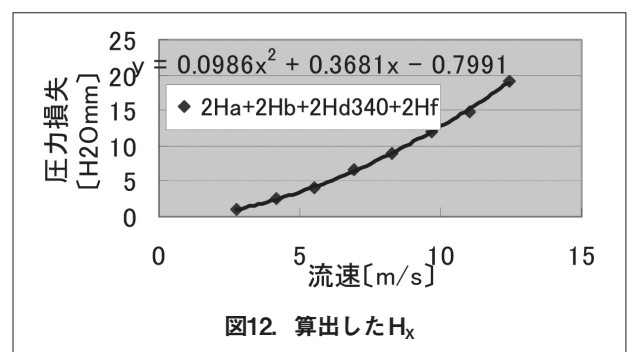


図12. 算出した H_x

グラフの式は H_x の近似曲線を表したものである。今後の解析にはこの近似曲線の式から求めた値を用いる事とする。

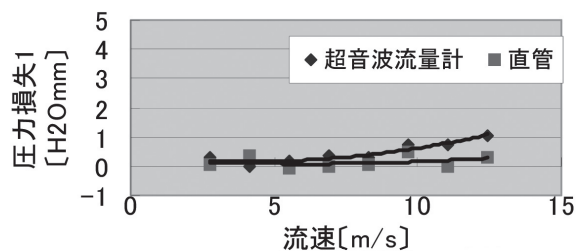
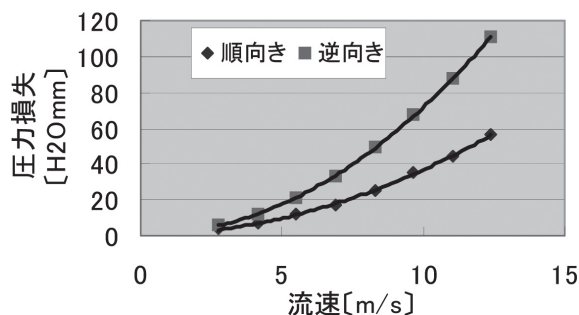
4.4 超音波, 熱線式, プラスチック直管の単独の圧力損失

算出した H_x を用いて, 超音波流量計, 熱線式流量計, プラスチック直管の単独の圧力損失 H_c , H_e , H_g , H_g' を求めた。

図13は超音波流量計とプラスチック直管の圧力損失を示す。超音波流量計の圧力損失はプラスチック直管のそれよりも若干大きい, 数値自体は非常に小さい。また, 数値が小さいので, ばらつきが目立つ。測定結果の標準偏差を算出したところ, 超音波流量計では0.13, プラスチック直管では0.23であった。それに対して超音波流量計の圧力損失の近似曲線の変化範囲は0～1.0, プラスチック直管のそれ

表 9. 超音波，プラスチック直管，熱線式の圧力損失算出 (H_2Omm)

流速 [m/s]	超音波 流量計	プラスチック 直管	熱線式流量計 (順向き)	熱線式流量計 (逆向き)
2.76	0.28	0.03	3.53	6.03
4.14	-0.04	0.34	6.59	11.59
5.51	0.15	-0.10	12.28	21.28
6.90	0.31	-0.06	17.06	33.06
8.27	0.26	0.01	25.51	49.01
9.65	0.69	0.44	35.07	67.07
11.03	0.74	-0.01	44.24	87.24
12.41	1.05	0.30	56.05	111.05

図13. 超音波流量計，プラスチック直管の圧力損失 (H_c , H_e)図14. 熱線式流量計の圧力損失 (H_g , H_g')

は0~0.3程度である。超音波流量計の変化範囲は標準偏差よりも明らかに大きいので、 H_c の流速依存の傾向を表していると思われる。しかしプラスチック直管は近似曲線の変化範囲と標準偏差に大きな違いはなく、近似曲線に有意性は無い。したがって、超音波流量計の圧力損失はプラスチック直管のそれよりやや大きくなると思われる。

図14は熱線式流量計の順向き，逆向きのグラフである。圧力損失が非常に大きなものとなっており，順向きは超音波流量計の約60倍の圧力損失を起こし，逆向きではさらにその倍ほどとなっている。なお標準偏差は順向きで0.61，逆向きで0.48となった。したがって，ここではばらつきの問題は無視して良いだろう。

4.5 金属管 ($\phi 19mm$) の管摩擦係数の算出

金属管 ($\phi 19mm$) の圧力損失の平均値 $H_d'1$ から，この金属管 ($\phi 19mm$) における管摩擦係数 λ を求めた。

$$\text{損失ヘッド } H \text{ を求める式 } H = \lambda \ell v^2 / 2gd \quad (10)$$

ℓ : 測定区間長さ v : 流速 d : 内径

g : 重力加速度

(10) 式を変形すると，管摩擦係数 λ を求める式は

$$\lambda = 2gd H_d' \ell / \ell v^2 \quad (11)$$

表10，図6 は金属管 ($\phi 19mm$) の測定結果から管摩擦係数 λ を求めたものである。ここでは Re

表10. 金属管の管摩擦係数算出

流速 V [m/s]	レイノルズ数 Re	管摩擦係数 λ
2.76	3400	0.0435
4.14	5200	0.0387
5.51	6900	0.0335
6.90	8700	0.0319
8.27	10400	0.0321
9.65	12100	0.0297
11.03	13900	0.0269
12.41	15600	0.0279

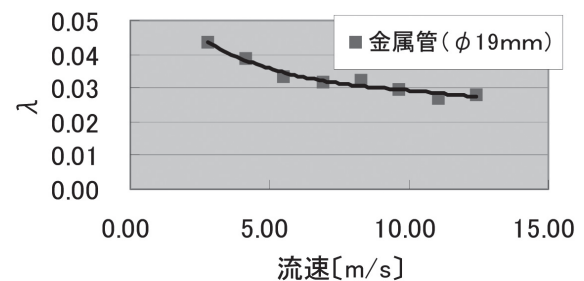


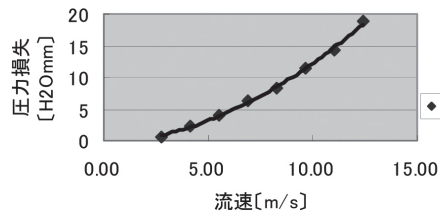
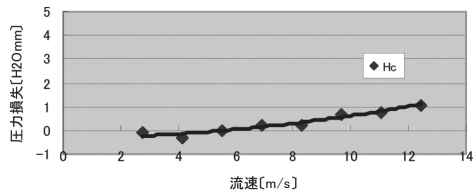
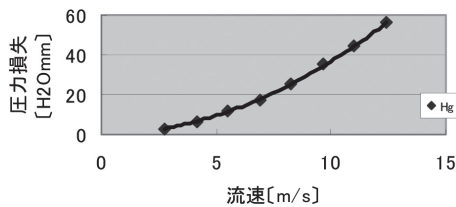
図15. 管摩擦係数の算出

$= \nu d / \nu$ (Re : レイノルズ数 ν : 動粘性係数) より，流速12.4 [m/s] でレイノルズ数は約15000である。この数値からムーディー線図⁶⁾での ε/d (ε : 管壁粗さ) を読み取ると， ε/d は0.006~0.008となり，管壁粗さは11 μm ~15 μm 程度と算出できる。この値は金属管の管壁粗さとしては妥当な値だと考えて良いだろう。このことから， $H_d'1$ は問題無く算出できていると言える。

5. その他の考察

5.1 $H_d'1$ の求め方の影響

$H_d'1$ を求めるにあたり， $H_d'1 = (H1 - H2) / 300$ を

図16. H1－H3より算出した H_x 図17. H1－H3より算出した H_c 図18. H1－H3より算出した H_d

用いたが、 $Hd'1 = (H1 - H3)/400$ で求めた $Hd'1$ で解析を行った場合、以下のような結果となる。

本実験の解析で $Hd'1 = (H1 - H2)/300$ を用いた理由は、短い管よりも長い管の方が乱流の定常化が進むと考えられるためである。図18の熱線式流量計では圧力損失が大きいと算出結果に影響が見られないうが、図17の超音波流量計では流速の小さい部分で圧力損失が負になっており、 $Hd'1 = (H1 - H2)/300$ によって算出した図13の H_c に比べてやや直線的な近似曲線となっている。理論的には流体の圧力損失は二次関数となるので、図13の H_c の方が超音波流量計の圧力損失の傾向を表していると考えられる。

5.2 測定結果のばらつき

金属管（φ19mm）の圧力損失の測定について、測定した日が違うとH1とH3の圧力損失の値として、異なる結果が得られた。

$$H1 = 2H_a + 2H_b + 2H_{d340} + 2H_f + Hd'800 = Hd'800 + H_x \quad (5)$$

$$H3 = 2H_a + 2H_b + 2H_{d340} + 2H_f + Hd'400 = Hd'400 + H_x \quad (7)$$

表11. 測定状況によるH1 (L=800)のばらつき(H₂Omm)

流速[m/s]	測定 1	測定 2
2.76	1.87	2.40
4.14	3.74	4.39
5.51	6.55	7.87
6.90	9.63	11.08
8.27	13.90	16.15
9.65	18.11	20.50
11.03	22.66	26.16
12.41	28.68	33.35

表12. 測定状況によるH3 (L=400)のばらつき(H₂Omm)

流速[m/s]	測定 1	測定 2
2.76	1.27	1.73
4.14	3.01	3.47
5.51	5.22	6.01
6.90	7.96	8.80
8.27	11.16	12.82
9.65	14.71	16.70
11.03	18.44	21.24
12.41	23.73	27.01

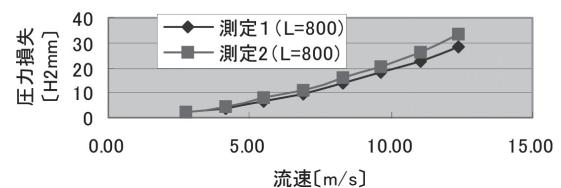


図19. 測定状況によるばらつき (L=800)

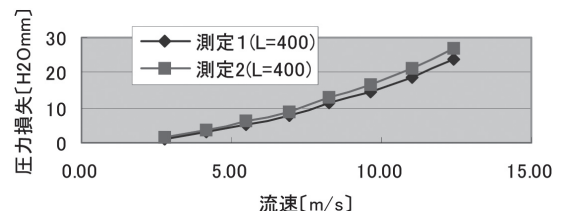
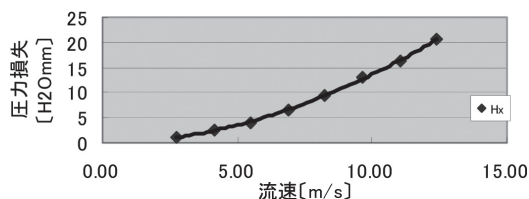
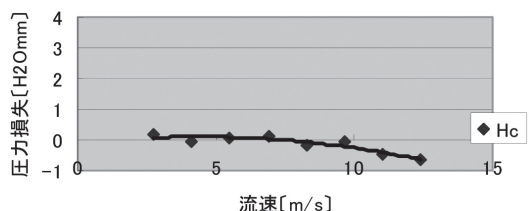
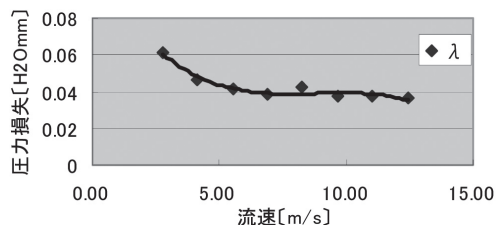


図20. 測定状況によるばらつき (L=400)

測定1、測定2はそれぞれ別の日時に測定したデータである。同じ組み合わせで行った測定であるが、全体的に測定1よりも測定2の方が圧力損失は大きい（流速10[m/s]付近で2～2.5[H₂Omm]程度大きい）。なお、測定1と測定2ではスライダックによる電圧設定が異なっており、測定1の方が約二割少ない電圧で測定を行うことができた。すなわち、配管系全体の圧力損失は測定1の方が少なく設定されていたと考えられる。したがって、余分な圧力損失の少ない測定1のデータを前章までの解析に使用した。ちなみに、測定2のデータで解析を行うと図21、22、23のようになる。

図21. 測定2から算出した共通部分の圧力損失 H_x 図22. 測定2から算出した超音波流量計 H_c 図23. 測定2より算出した管摩擦係数 λ

超音波流量計単独の圧力損失では、測定1（図13）と比べ、共通部分の圧力損失 H_x は大きくなっており、 H_c の値が負になるなど合理的な値ではなくなっている。さらに、管摩擦係数もレイノルズ数が約15000の時に $\lambda \approx 0.036$ と大きくなっている。これらの原因として各測定時の状況を考慮すると、接続部の圧力損失は管の支持性のわずかな違いにも強い影響を受けている可能性が高い。また、測定1は測定2に比べて圧力損失が小さいが、測定1から算出した超音波流量計単独の圧力損失にも若干の影響が含まれていると考えられる。この改善は今後の課題である。

6. 結論

- 1) 本研究に用いた実験装置では、熱線式流量計についてはマノメーターを鉛直に立てた状態で高い再現性を示した。超音波流量計、プラスチック直管、金属管については傾斜法で測定し、ほぼ妥当な値が得られた。

- 2) 超音波流量計の圧力損失は直管よりもやや大きくなるが非常に小さく、熱線式流量計の圧力損失の約60分の1程度に抑えられていることが分かった。
- 3) 熱線式流量計は向きによって圧力損失が大きく変わる。これは管が狭まっているか広がっているかで損失の仕方が変わるためと考えられた。
- 4) 金属管（19mm）の管摩擦係数は、レイノルズ数が約15000の時、 $\lambda \approx 0.028$ だった。この数値をムーディー線図を用いて管壁粗さに換算すると約 $11\mu\text{m} \sim 15\mu\text{m}$ である。これは金属管の管壁粗さとしてはやや大きい妥当な数値であり、金属管（19mm）の圧力損失は問題なく算出できていると言える。

今後の課題

- 5) 微小の圧力損失を求める場合に測定結果にばらつきが認められた。これは、最下流に位置する流量センサーに付属している蛇腹管や装置の組み換えによって生じる接続部の差異が、流体の流れや圧力損失のばらつきに影響を与えている可能性があった。
- 6) 今回 $\phi 19\text{mm}$ の金属管では長い管が準備できなかった。より精度の高い H_{d1} を算出するためには長さ1600mmの金属管（ $\phi 19\text{mm}$ ）を用意し、測定した方がよい。
- 7) また、接続部の圧力損失の測定値がばらつかないようにするために管の平行性を高い精度で保てる治具の作製を行う必要がある。

参考文献

- 1) 道又元裕，人工呼吸ケアの全てがわかる本，照林社（P12），2001.9.10
- 2) 沼田克雄，人工呼吸療法，秀潤社（P4. P26），1991.2.15
- 3) TSI Mass Flow Transducers Application Notes and Specifications MODEL 800630/800635
- 4) 小倉一郎，超音波流量計の試作，医用電子と生体工学第20巻 第5号 P65-66（Sept. 1982）
- 5) 社団法人 日本計量機器工業連合会，流量計の実用ナビ（P126～），2005.3.25
- 6) 中山泰喜，流体の力学，養賢堂（P106），1998.3.20