

ツクバリカセイキ(株) インターンシップ

2013 年 8 月 13 日－8 月 29 日

多点圧力変換器の性能評価

筑波大学大学院 数理物質科学研究科
電子・物理工学専攻 博士前期課程 1 年
浅野 智顕

茨城大学 理学部
化学コース 3 年
内田 ひかる

埼玉大学 工学部
応用化学科 3 年
鈴木 雄大

筑波大学 理工学群
応用理工学類 3 年
鈴木 大

2013 年 8 月 29 日 作成

監修 ツクバリカセイキ株式会社

目次

要約

1 緒言	-----P 3
1-1 流体における圧力計測	-----P 3
1-2 圧力計測に要求されること	-----P 4
2 テーマと実験方法	-----P 5
2-1 F-312 多点圧力変換器	-----P 5
2-2 圧力ヒステリシスの意味	-----P 5
2-3 ヒステリシス性能の実験方法	-----P 6
2-4 圧力応答性の意味と理論	-----P 8
2-5 圧力応答の実験方法	-----P10
3 実験結果	-----P11
3-1 ヒステリシス性能結果	-----P11
3-1-1 予備実験	-----P11
3-1-2 タンク間の差圧が 0Pa 付近のヒステリシス検証	-----P12
3-1-3 負圧におけるヒステリシス測定結果	-----P18
3-1-4 正圧におけるヒステリシスの検証	-----P21
3-2 ヒステリシス性能評価の考察	-----P24
3-3 圧力応答結果	-----P26
3-3-1 予備実験	-----P26
3-3-2 本実験	-----P33
3-4 考察	-----P41
4 まとめ	-----P41

要約

ツクバリカセイキの代表的な製品であり安価で高速な流体計測システム衰退段階にあるピトー管を成長市場の製品へと進化させるため、F-312 多点圧力変換器のヒステリシス特性と圧力応答性を検証することを目的とした。ヒステリシスは 0.36 Pa 以下で 0.014 %/FS であり、これは加減圧力によらずほぼ一定の値となった。また圧力応答性について、加圧器からセンサーまでの長さが音の波長の 1/4 のときに共振が起こるため、この倍数のとき振幅は大きくなった。応答時間については、チューブ長が 0.5 m ではほぼ 2 m sec 以内で応答することがわかった。

1 序論

1-1 流体における圧力計測

ツクバリカセイキ（株）（以下 TRS）は、流体産業分野における成熟市場をターゲットとした製品を主に扱っている。流体とは液体・気体の総称であり、一般的に流体の流速や流量を直接測定することは難しいが、測定が容易な流体の圧力からこれらを算出することができる。そのため、圧力測定は流体の流速や流量を知る上で必要不可欠となる。静止している流体では、全体の圧力（全圧）は静止流体が持つ圧力（静圧）に等しい。これに対して、流れている流体では、全圧は静圧に流れによる圧力（動圧）を加えた分だけ大きい。圧力測定は大きく分けて 3 種類あり、絶対圧、ゲージ圧、差圧である。絶対圧は真空を基準とした圧力、ゲージ圧は大気圧を基準とした圧力、差圧は系のある点の圧力を基準とした圧力である。水銀柱マノメーターは管内の一方を真空、片方を大気中に開放することで、大気圧を測定している。圧力を流速に変換するには、次のベルヌーイの定理が利用される。

$$\frac{1}{2}v^2 + \frac{P}{\rho} + gH = \text{一定}$$

ここで、 v は流体の流速、 P は圧力、 ρ は流体の密度、 g は重力加速度、 H は鉛直方向の位置である。ピトー管は全圧と静圧の差（導圧）を測る圧力測定装置である。図のような構造をしており、管の先端と側面の穴が開いている。奥で圧力計を隔ててつながっており、流体の流れに平行な圧力（全圧） P_t と垂直な圧力（静圧） P_s の圧力差（動圧）を読み取り、ベルヌーイの式から、速度 v が下のよう求められる。

$$v = \sqrt{\frac{2(P_t - P_s)}{\rho}}$$

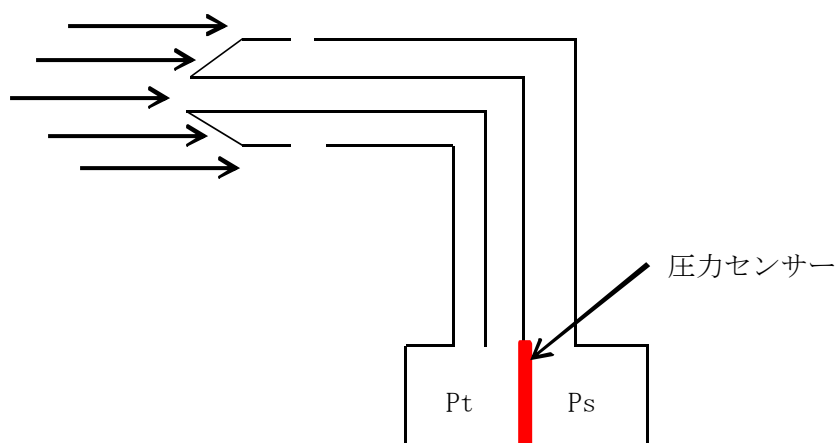


図 1-1-1 ピトー管の構造図

1-2 圧力計測に要求されること

現在主流である PIV による流体計測は、高価であるうえに静圧分布を計測できないなどの欠点がある。ピトー管の場合には、従来の方法では計測に時間がかかり過ぎ、実用的でなかった。圧力計測には高速であることが要求され、高速化のためのシステムで使用する多点圧力変換器の特性を調べる必要があった。

ピトー管はかつて流体計測で広く用いられていたが、その代替品である熱線風速計や粒子画像計測システムの登場により次第にマイナーとなっていった。さらに 20 世紀末より CFD を使用する流体シミュレーションが盛んとなり、ピトー管は製品のライフサイクルとしては、衰退市場の製品に位置付けられてきた。前述の CFD は非線形の流体方程式を単純化して解くため、シミュレーションの正確さに不安が残る。その妥当性を確認するための流体計測システムの市場が存在するが、主に使用されている PIV システムは価格が高いうえに、静圧分布を計測することができないという欠点がある。一方、ピトー管による CFD 実証装置では、風速断面の計測高速化が難しく、使用に耐えなかった。この問題を解決し、ピトー管による安価で高速な流体計測システムを開発することにより、衰退段階にあるピトー管を成長市場へと進化させるためのシステムの一部である多点圧力変換器のヒステリシス特性と圧力応答性を検証することを目的とする。

2 原理

2-1 F-312 多点圧力変換器

本装置は空気用、USB による電源動作可能な圧力変換器である。測定差圧は 8 チャンネル、 $\pm 1250\text{Pa}$ の範囲で測定可能である。アナログ出力ケーブルを A/D コンバーターなどに接続することで計測可能である。大きさは $84\text{mm} \times 34\text{mm} \times 16\text{mm}$ で、接続ポートは $\phi 1.78 \times \phi 1.16$ 、最外径 $\phi 2.12\text{mm}$ である。

外力（圧力）による電気抵抗値が変化する現象（ピエゾ抵抗効果）を利用している。図の圧力をかけていない導体の電気抵抗値は $R = \rho \times L/S$ であり、圧力をかけた状態の導体の抵抗値は $R' = \rho \times (L+l)/(S+s)$ であり、 $R' > R$ と抵抗値が変化する。電気抵抗の変化をブリッジ回路で増幅し、電流の形で検出する。出力電圧の範囲は $0-5\text{V}$ に対し、圧力センサーの出力範囲は $\pm 1250\text{Pa}$ の範囲で $0.25-4.25\text{V}$ であるので、80%の使用率である。実験で使用した A/D は 14bit であることから、圧力変換器の分解能は $1/0.8 \times 2500 \times 1/2^{14} = 0.19\text{Pa}$ となる。

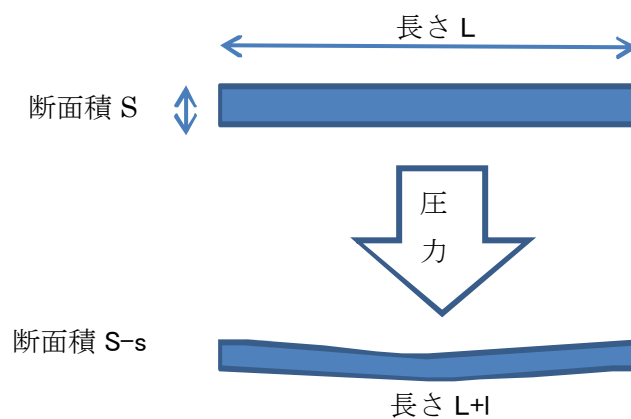


図 2-1-1 ピエゾ素子

2-2 圧力ヒステリシス

ヒステリシスとは、ある系の状態が現在の状態だけでなく、それまでたどってきた変化や経過に依存する減少であり、履歴効果とも呼ばれる。圧力センサーでは図のように、外力（圧力）を変化させた際に、上昇時と下降時で出力値に差が生じる。これが圧力ヒステリシスである。最大の出力値の差をヒステリシス差と呼ばれ、圧力センサーの性能が表される。圧力変換器の分解能が 0.19Pa であるので、ヒステリシスが 0.19Pa 以下であれば検出できない。圧力ヒステリシスは圧力センサーのピエゾ素子や増幅回路に起因するのではないかと考えられる。

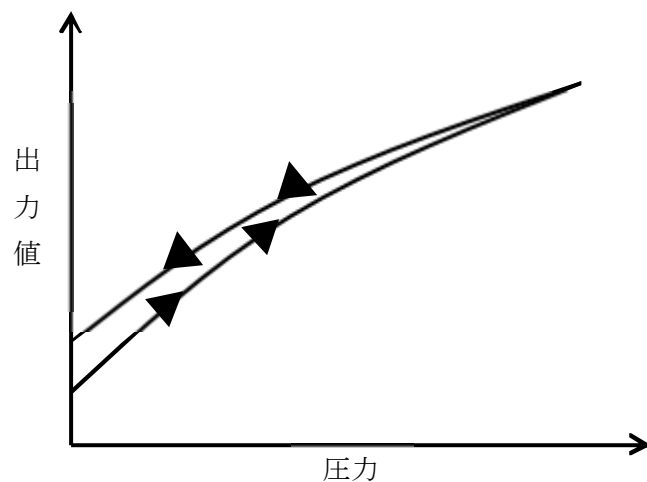


図 2-2-1 圧力ヒステリシス

2-3 ヒステリシス性能の実験法

圧力上昇時の誤差値と圧力下降時の誤差値の差を求め、その絶対値の最大値をフルスケールで割った値をヒステリシスと呼び、単位は%F.S.で表す。ヒステリシスの評価のためのシステムを図 2-3-1 に示す。図中では省略しているが、多点圧力変換器の **High** 側と **Low** 側は図 2-3-2 に示す共通ポートを用いて 8 つ全てのセンサー部に接続している。バッファタンクとして容積 **22.5 L** のポリタンクを用いた。二つのポリタンクはチューブでつながっており、バルブを開放して十分に時間が経ってから、バルブを閉めて測定を開始した。体積を変化させて圧力を加えるために、ポリタンクに注射器を取り付けた。注射器は **1 mL** と **5 mL** のものを用いた。最初に **High** と **Low** の圧力差がない場合(**0 Pa**)において、注射器で **0.1 mL**、**0.2 mL**、**0.5mL**、**1 mL**、**2.5 mL**、**5 mL** 圧縮し、同じ体積だけ戻すことにより、加圧時と減圧時それぞれの圧力変化を測定した。また、**High** 側のタンクに圧力を加え、**880 Pa**、**280 Pa**、**40 Pa** 付近で測定し、同様に **Low** 側のタンクを減圧し、**-20 Pa**、**-110 Pa**、**-1000 Pa** で測定した。温度変化を防ぐため、タンクを断熱材で覆った。

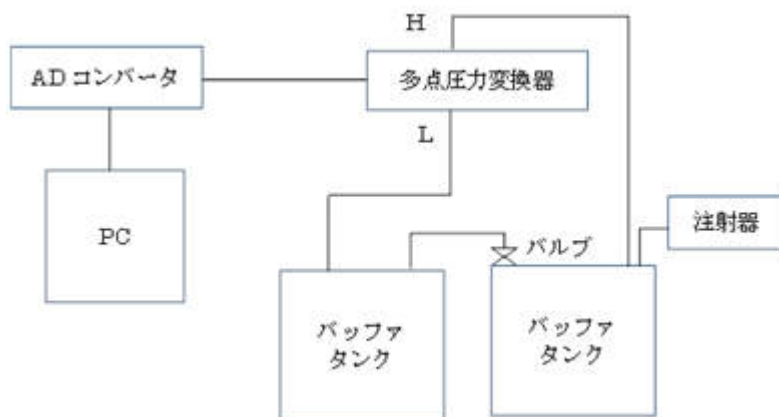


図 2-3-1 計測システム略図

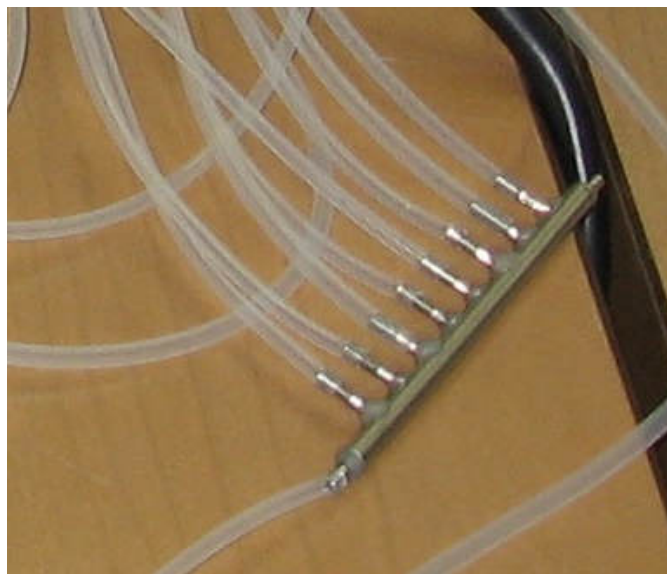


図 2-3-2 共通ポート



図 2-3-3 注射器を取り付けたポリタンク

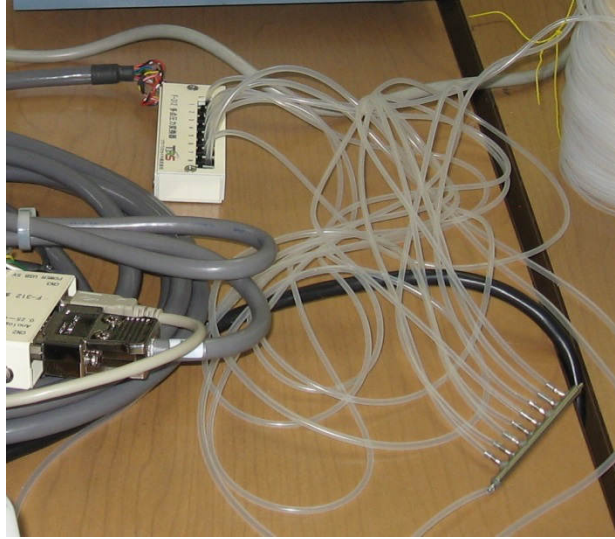


図 2-3-4 多点圧力変換器と共通ポート

2-4 圧力応答

図 2-4-1 のような系を考える。初期条件 $t=0$ で外部圧力が P_1 から P_2 にステップ的に変化する。変換器側の圧力を $P(t)$ とし、 $P(0)=P_1$ である。チューブの両端の圧力差 $P_2-P(t)$ は大気圧と比べ非常に小さいとすると、圧力差により生じる気体流速 u は圧力差に比例する。気体の流れを層流とみなすと、ハーゲンポアズイユの式から、

$$u = \frac{D^2 \pi P_2 - P(t)}{32 \eta l}$$

である。ここで、 η は空気の粘性係数で $1.8 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ である。 dt 時間後に変換器に流れこむ流量を dV とすると、

$$dV = \frac{\pi D^2}{4} dt = \frac{\pi^2 D^4 P_2 - P(t)}{128 \eta l}$$

圧力変化に伴う体積変化は一瞬にして行われ、断熱過程であるので、ポアッソンの式、 $PV^\gamma = \text{一定}$ より、 $dP/dV = -\gamma PV$ となり、先の式と合わせて、

$$dP = -\gamma PV \frac{\pi^2 D^4 P_2 - P(t)}{128 \eta l} dV$$

ここで $P = \text{一定}$ とみなし、 $k = 128 \eta l / \gamma PV \pi^2 D^4$ とおけば、

$$\frac{1}{P_2 - P(t)} dP = -\frac{1}{k} dt$$

上の式を積分し、 $P(t) = P_2 - (P_2 - P_1) \exp(-t/k)$ を得る。

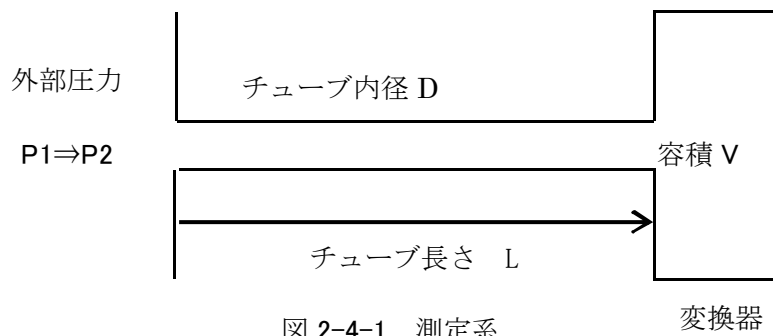


図 2-4-1 測定系

ステップ的に圧力を変化させた場合の圧力応答の様子を図 2-4-2 に示す。圧力が変化し始めるまでの時間は音速による圧力変化による応答で、その後、先に求めた式の通り圧力が変化する。

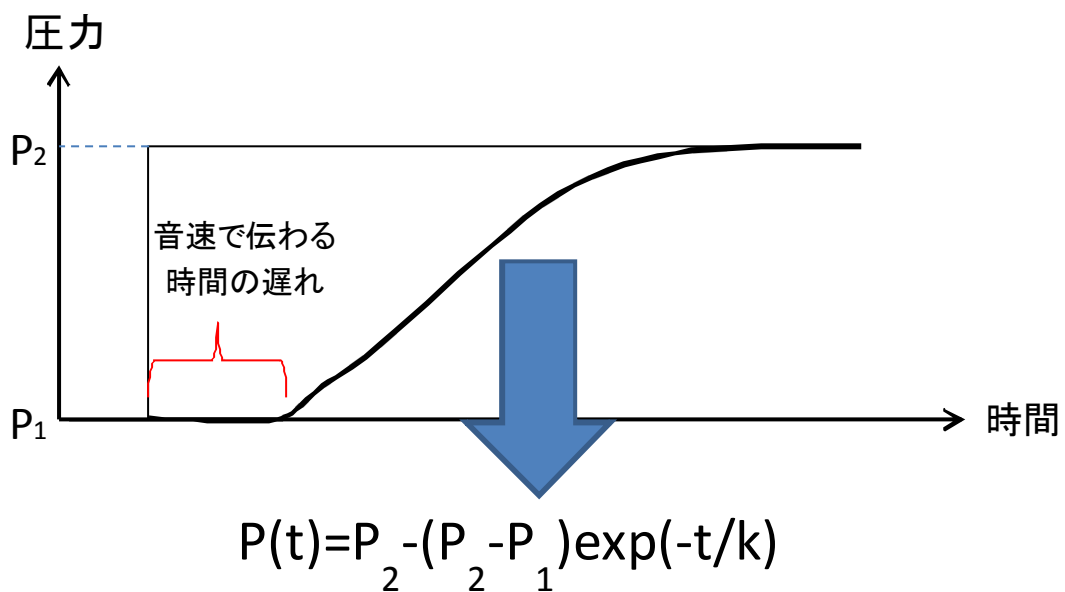


図 2-4-2 ステップ変化による圧力応答

続いて、外部圧力が周期的に変動する場合を考える。外部圧力が $P_2 + P_3 \sin \omega t$ で変化する場合、先の式から、

$$\frac{1}{P_2 + P_3 \sin \omega t - P(t)} dP = -\frac{1}{k} dt$$

$P(t) = P_2 + P_4 \sin(\omega t - \alpha)$ と仮定して代入すると、

$$\frac{\omega P_4 \cos(\omega t - \alpha)}{P_2 + P_3 \sin \omega t - P(t)} = -\frac{1}{k}$$

よって、 $P(t)=P_2+P_3\sin \omega t-k \omega P_4\cos(\omega t-\alpha)$ となる。ここで、 α は位相の遅れを表す。
この結果が実測とどのような関係になるのかは確認していない。

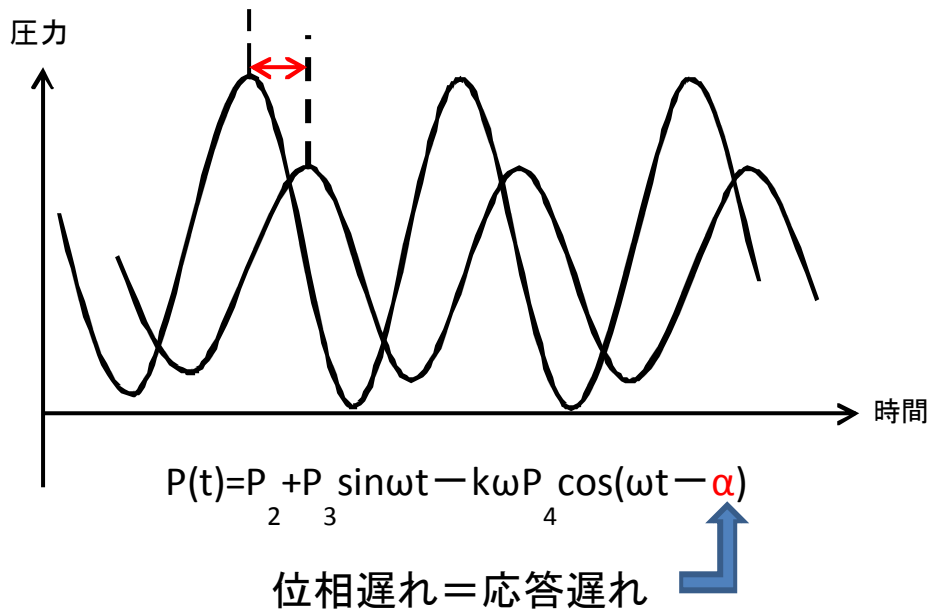


図 2-4-3 周期変化における圧力応答

2-5 圧力応答の実験法

圧力応答の測定も、ヒステリシス評価に用いたシステムを基本としている。8つのセンサー一部と被測定部との距離がそれぞれ等しくなるようにチューブを接続してダイアフラムポンプによる脈動の波形を調べ、それぞれの圧力変換器が同様に応答することを確認した。共通ポートとセンサー部分を接続するチューブの長さを変え、注射器で加圧した場合のそれぞれの長さの圧力応答を調べた。チューブの長さが異なると、加圧してから変換器に圧力変化が反映されるまでの時間に違いが出る。本来検出されるべき圧力の90%の圧力となるのに要する時間を応答時間として求めた。また、ダイアフラムポンプで脈動をかけて、その圧力応答を調べた。検出した圧力変化の波形の長さ0の場合を基準とし、それぞれの長さにおける圧力変化の波形のピークのずれから応答性を調べた。このとき、図2-3-3の注射器をダイアフラムポンプに変えて測定した(図2-5-1)。スピーカーを用いた測定も行ったが、密閉性が悪く圧力変化を検知できなかった。

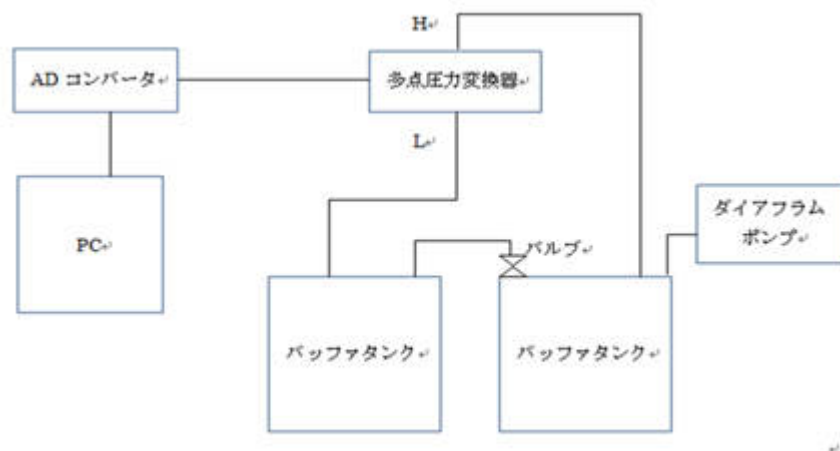


図 2-5-1 ダイアフラムポンプによる脈動の圧力応答計測システム図

3.結果

3-1) ヒステリシス性能結果

3-1-1) 予備実験

22.5 L のポリタンクを二つ用意し、それぞれ F312-08 多点変換圧力器へ共通ポートを用いて H と L 側に接続した。段ボールにそれらタンクをビニール袋にいれた状態で周りを発泡スチロールで覆った。この際の圧力変動の理論値は次のように求められる。

等温変化においてある体積変化 δV (L) が起こった際に伴う圧力変化 δP (Pa) は理想気体の状態方程式から求められる。すなわち、 $PV = nRT = \text{constant}$ を偏微分することにより

$$P \delta V + V \delta P = 0$$

$$\delta P = -\frac{P}{V} \delta V \quad \text{である。}$$

この式に、 $P = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$, $V = 22.5 \text{ L}$ 及び打ち込んだり引き上げたりする体積を代入することで理論的な圧力変化が求められる。よって、 $\delta P = \pm 1.013 \times 10^5 \div 22.5 \text{ L} \times 1 \text{ mL} = \pm 4.50 \text{ Pa}$ となる。実際に行った結果が下図 3-1-1 になる。



図 3-1-1 1m L 打ち込んだ際の測定結果

これにより、1ml 加えた時におよそ 5Pa 上昇し 1ml 膨張させたときに 4.3 Pa ほど下がったことがわかる。

3-1-2) タンク間の差圧が 0Pa 付近のヒステリシス検証

ベースラインが 0Pa 付近において、タンクに注射器をセットし押し込んだり引き上げたりする体積を 0.1 mL, 0.2 mL, 0.5 mL, 1 mL, 2.5 mL, 5 mL と変えた時の測定結果の画面を以下の図 3-1-2 に示す。測定条件は 200 データ数を 2000Hz でサンプリングしているため、データ一個当たり 0.1 sec でサンプリングした。

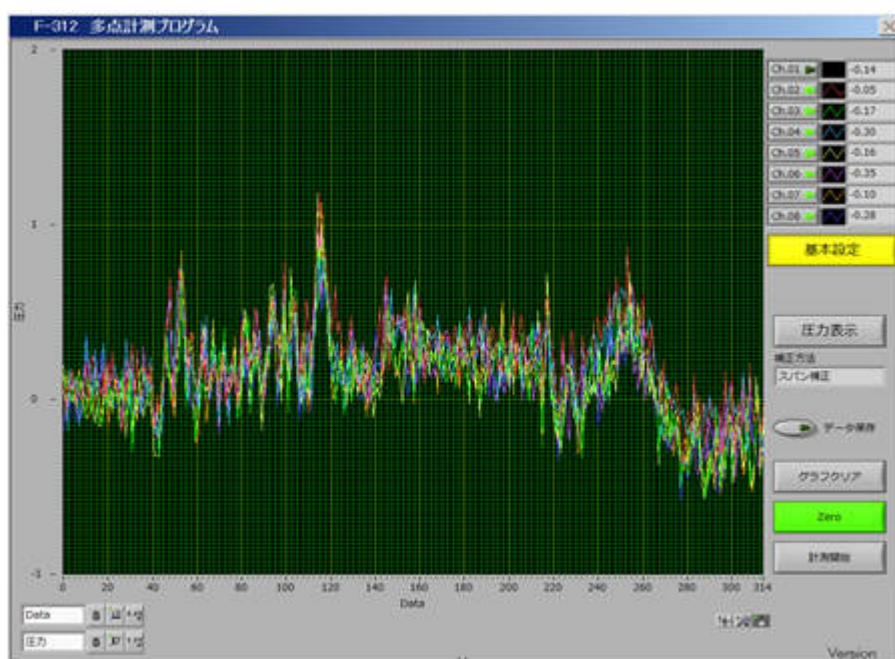


図 3-1-2 0.1 mL 押し下げした際の圧力変化の測定結果

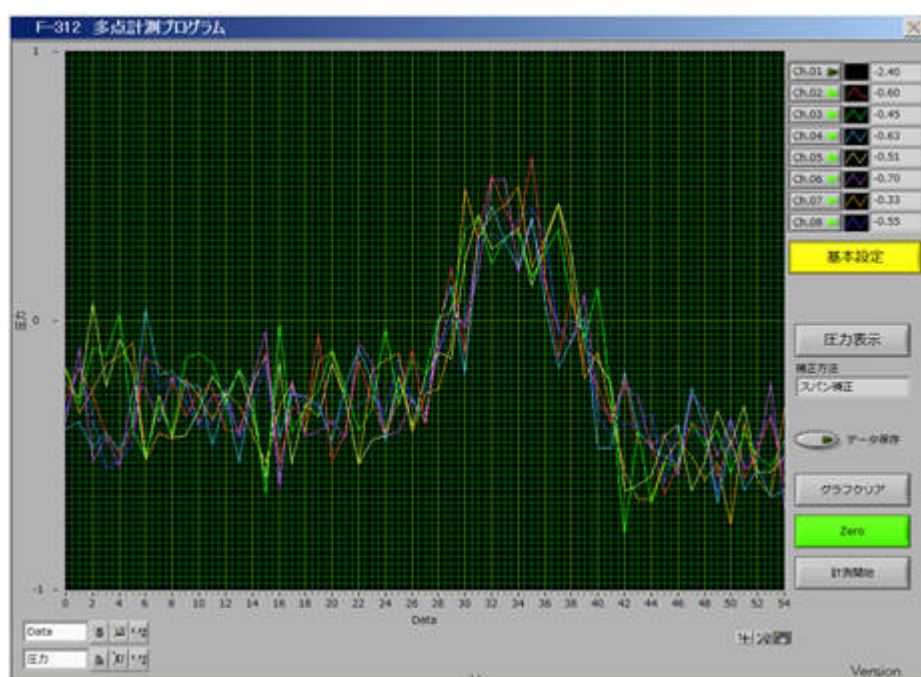


図 3-1-3 0.2 mL 押し下げした際の圧力変化の測定結果

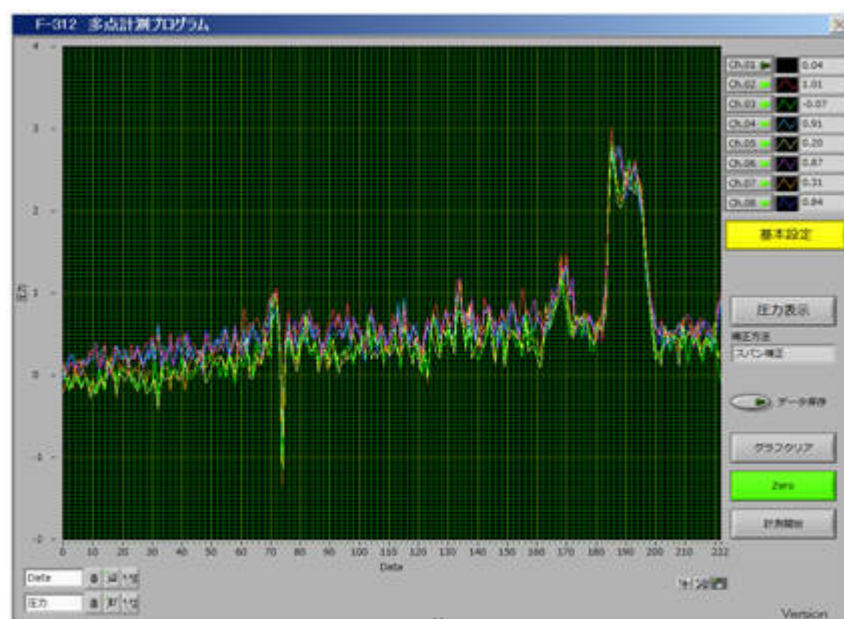


図 3-1-4 0.5 mL 押し下げた際の圧力変化の測定結果

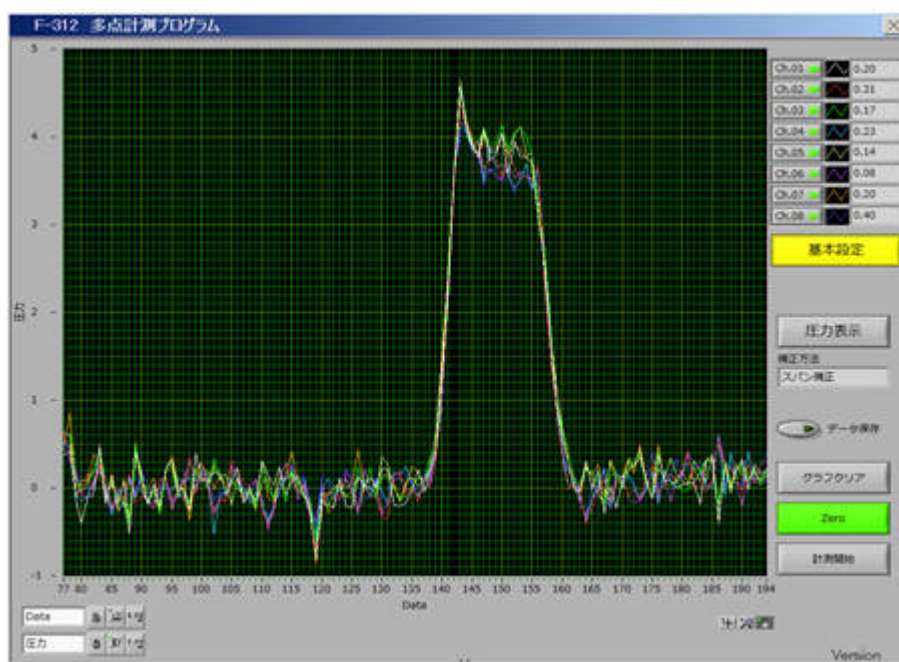


図 3-1-5 1 mL 押し下げた際の圧力変化の測定結果

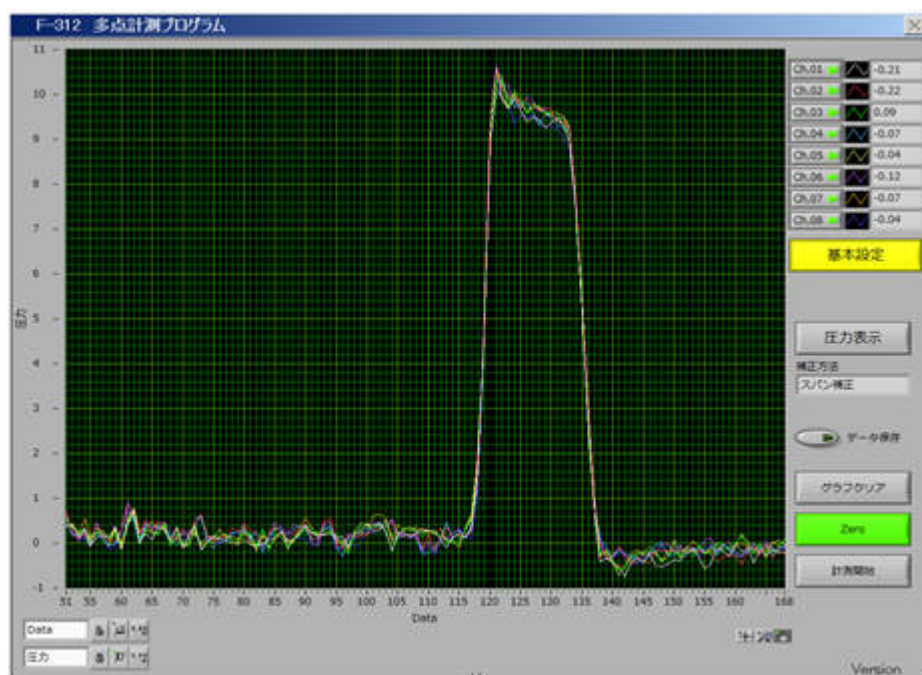


図 3-1-6 2.5 mL 押し下げた際の圧力変化の測定結果

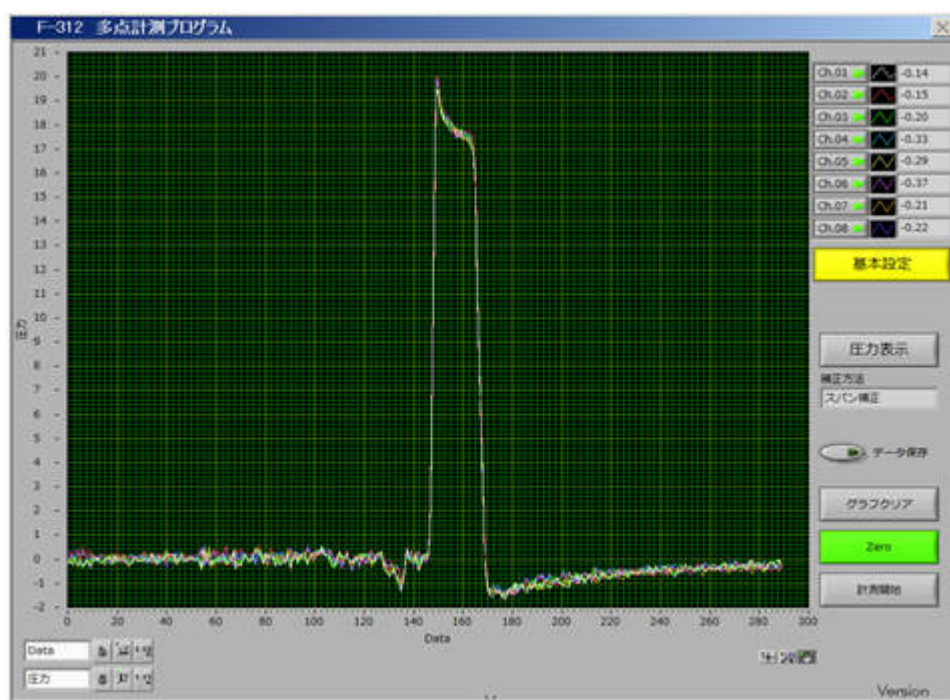


図 3-1-7 5 mL 押し下げた際の圧力変化の測定結果

表 1 0Pa で各体積変化量における実測値と理論値

0.5ml			0.2ml		
1回目 変化前 (Pa)	0.54	1.97	1回目	-0.37	0.32
変化後 (Pa)	2.06	0.13		0.35	-0.52
圧力変化 (Pa)	1.52	-1.84		0.72	-0.84
2回目	0.76	1.78			
	2.00	0.40	2回目	-0.22	0.31
	1.24	-1.39		0.31	-0.44
3回目	0.41	2.16		0.53	-0.75
	2.39	0.32			
	1.99	-1.84	3回目	-0.31	0.31
4回目	0.44	2.32		0.40	-0.48
	2.39	0.35		0.71	-0.79
	1.95	-1.97			
平均値 (Pa)	1.67	-1.76		0.65	-0.79
理論値 (Pa)	2.25			0.90	
加圧と減圧過程での差 (Pa)	-0.08			-0.14	
ヒステリシス (FS%)	0.00			-0.01	
0.1ml			1ml		
1回目	0.06	0.23	1回目	0.25	3.63
	0.47	-0.31		3.89	0.26
	0.41	-0.54		3.63	-3.37
2回目	0.23	0.26	2回目	0.66	3.71
	0.85	-0.13		4.02	0.26
	0.62	-0.39		3.36	-3.45
3回目	0.00	0.49	3回目	0.26	3.68
	0.34	0.12		4.14	0.18
	0.34	-0.37		3.88	-3.50
			4回目	0.00	3.64
				3.77	-0.06
				3.77	-3.70
平均値 (Pa)	0.51	-0.43		3.66	-3.50
理論値 (Pa)	0.45			4.50	
加圧と減圧過程での差 (Pa)	0.08			0.15	
ヒステリシス (FS%)	0.00			0.01	

2.5ml			5ml		
1回目	0.20	9.53	1回目	0.32	16.18
	10.13	-0.33		19.21	-1.87
	9.93	-9.87		18.89	-18.05
2回目	0.27	9.73	2回目	0.37	16.83
	10.40	0.27		18.54	-1.34
	10.13	-9.47		18.17	-18.17
3回目	0.47	9.44	3回目	0.35	17.93
	10.57	0.14		19.42	0.49
	10.10	-9.31		19.07	-17.44
4回目	0.00	9.24			
	9.93	-0.29			
	9.93	-9.53			
平均値 (Pa)	10.03	-9.54		18.71	-17.89
理論値 (Pa)	11.26			22.51	
加圧と減圧 過程での差 (Pa)		0.48			0.82
ヒステリシ ス (FS%)		0.02			0.03

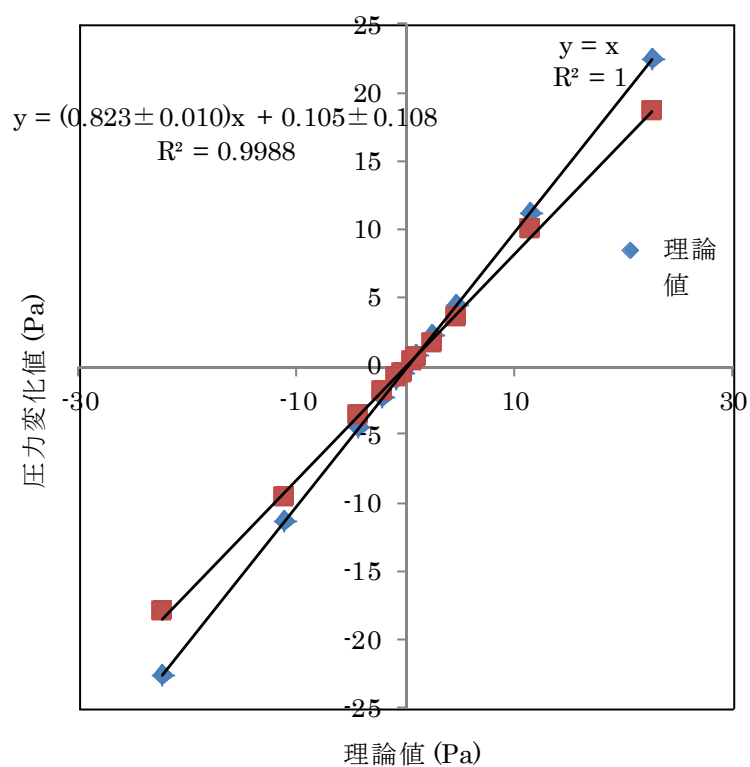


図 3-1-8 差圧が 0Pa における圧力変化の理論値対実測値及び理論値対理論値のプロット

A/D 分解能としては 14bit のものを用いていたので 2 の 14 乗だけ数値を細分化できる。

また、電圧は0～5Vのうち0.25～4.25 Vにより表現しているため $4\text{ V} / 5\text{ V} \times 100\% = 80\%$ を使っている。F312-08 圧力変換器は $\pm 1250\text{ Pa}$ のレンジで計測できるため、結局、 $2500\text{ Pa} / 2^{14} / 80\% = 0.19\text{ Pa}$ の分解能を持っている。すなわち、この条件下では圧力変換器は 0.19 Pa より小さい変化には応答しない。上記の結果から、圧力変動がごく小さい 0.1 ml や 0.2 ml 及び 0.5 ml の体積変化ではヒステリシスを検知できなかった。また、上図から実測値の最小二乗法による近似直線と理論値の直線との間隔は圧力変化が大きいほど開いている。表 1 中で記載した加圧と減圧での圧力変化の差は、最大で 0.82 Pa である。本来ならば体積変化量によらずヒステリシスは一定であるので、表 1 中の各体積の圧力変化の差を見ると、明らかに体積量に依存している。したがって、差の 0.82 Pa というのはヒステリシスというよりベースライン付近のノイズや押し加減などの偶然誤差や温度などの系統誤差によるものと考えられる。

3-1-3) 負圧におけるヒステリシス測定結果

F312 多点圧力変換器を負圧下で 1 mL の体積を注射器で出し入れした。およそ -20 Pa 、 -110 Pa 、 -1000 Pa の負圧で測定を行った。測定画面を以下に示す。



図 3-1-9 -20 Pa 付近におけるヒステリシス測定結果

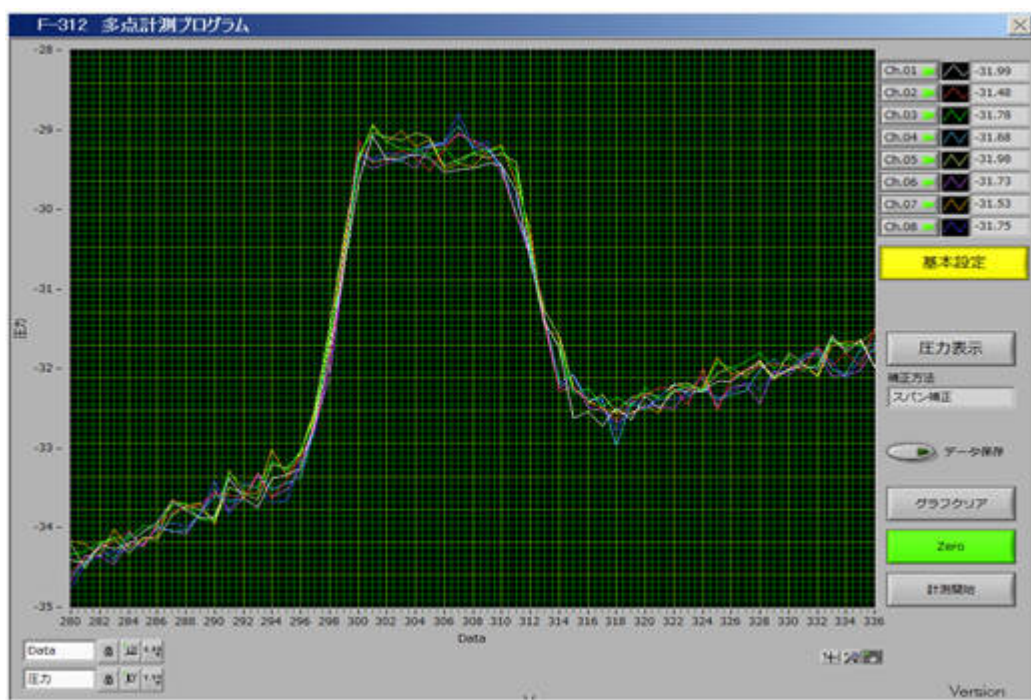


図 3-1-10 -110 Pa 付近におけるヒステリシス測定結果

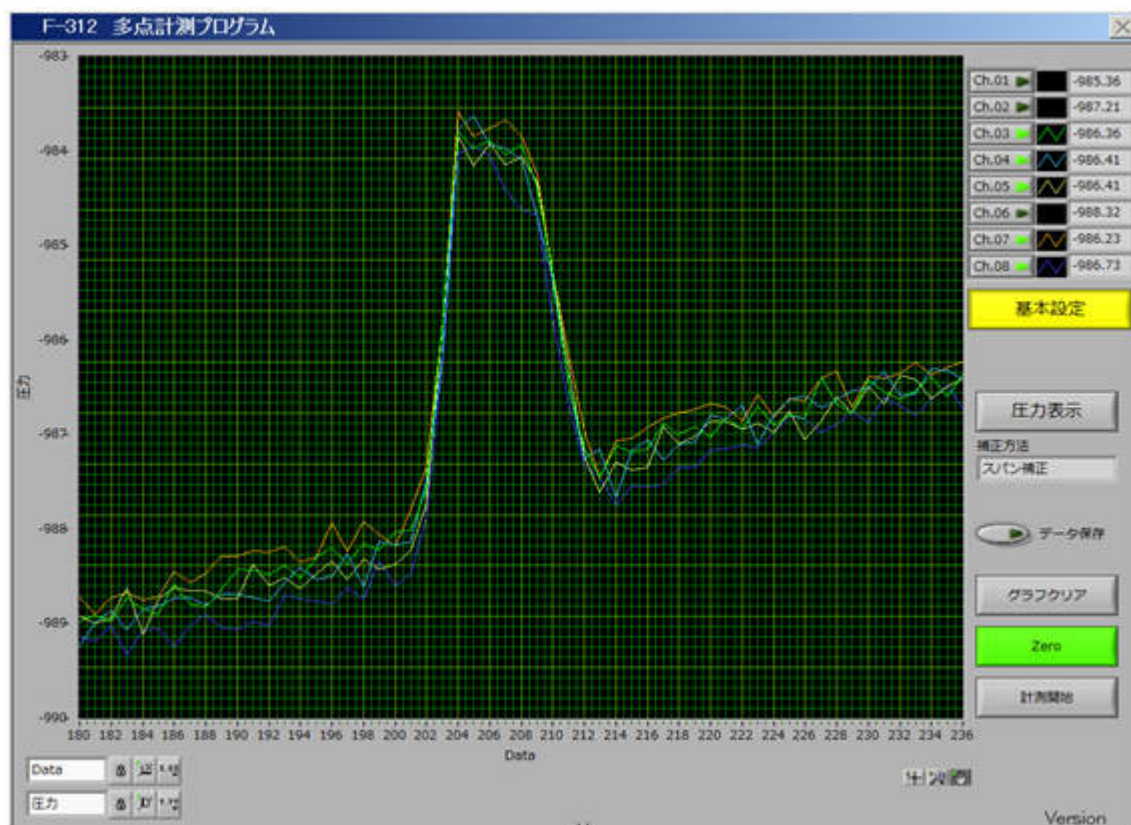


図 3-1-11 -1000 Pa 付近におけるヒステリシス測定結果

画面から読み取った結果を表 2 にまとめた。

表 2 負圧におけるヒステリシス測定結果

	-20Pa 付近		-110Pa		-1000Pa	
	圧力変化 値 (Pa) (加圧)	圧力変化 値 (Pa) (減圧)	圧力変化 値 (Pa) (加圧)	圧力変化 値 (Pa) (減圧)	圧力変化 値 (Pa) (加圧)	圧力変化 値 (Pa) (減圧)
1回目	3.93	-3.17	4.03	-3.44	4.02	-3.48
2回目	3.83	-3.44	3.91	-3.49	3.94	-3.24
3回目	3.76	-3.58	4.08	-3.63	3.57	-3.05
平均値 (Pa)	3.84	-3.40	4.01	-3.52	3.84	-3.26
理論値 (Pa)	4.50	-4.50	4.50	-4.50	4.46	-4.46
加圧と減圧 の差 (Pa)		0.44		0.49		0.58
ヒステリシス (FS%)		0.02		0.02		0.02

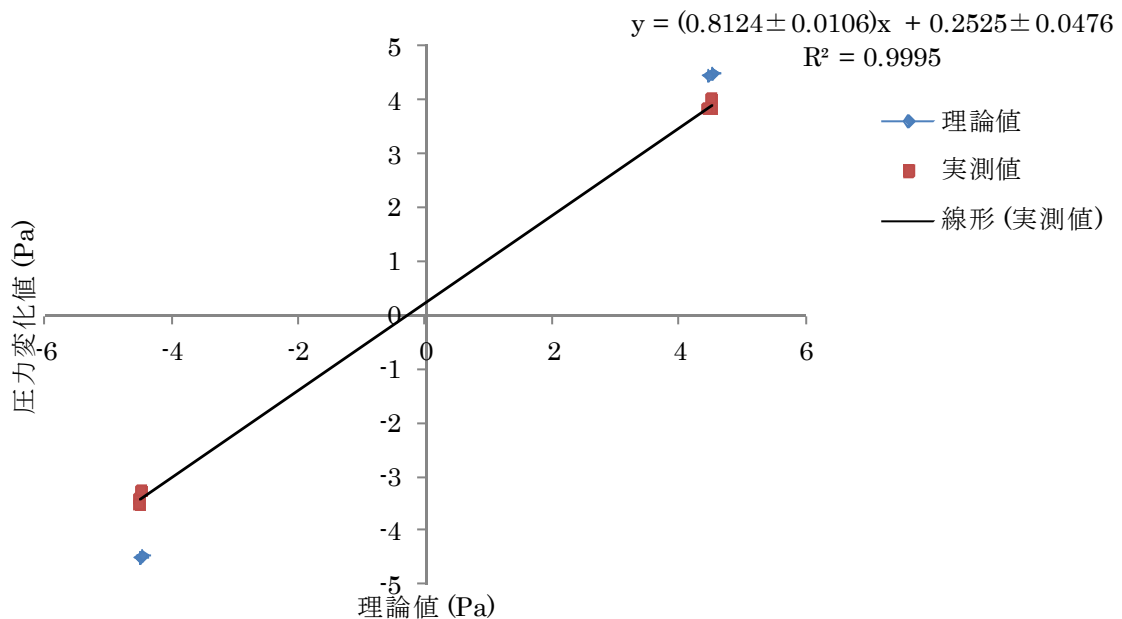


図 3-1-12 負圧における圧力変化の大きさの理論値対理論値及び理論値対実測値のプロット

表 2 から注射針で 1mL の体積を加えたり引き上げたりすると加圧と減圧とでおよそ 0.5 Pa 前後の差が見られた。ヒステリシスの原理としては、0.5Pa がそのまんまヒステリシスということになるが、実際には測定ごとに加圧と減圧の圧力変化の差にばらつきがある程度あることから、このグラフではその差がヒステリシスと誤差(系統誤差と偶然誤差どちらも含む)のどちらであるのかははっきりと区別ができない。

3-1-4) 正圧におけるヒステリシスの検証

正圧(40 Pa,280 Pa,870 Pa)で注射器により 1mL の体積を出し入れした。測定結果を以下に示す。

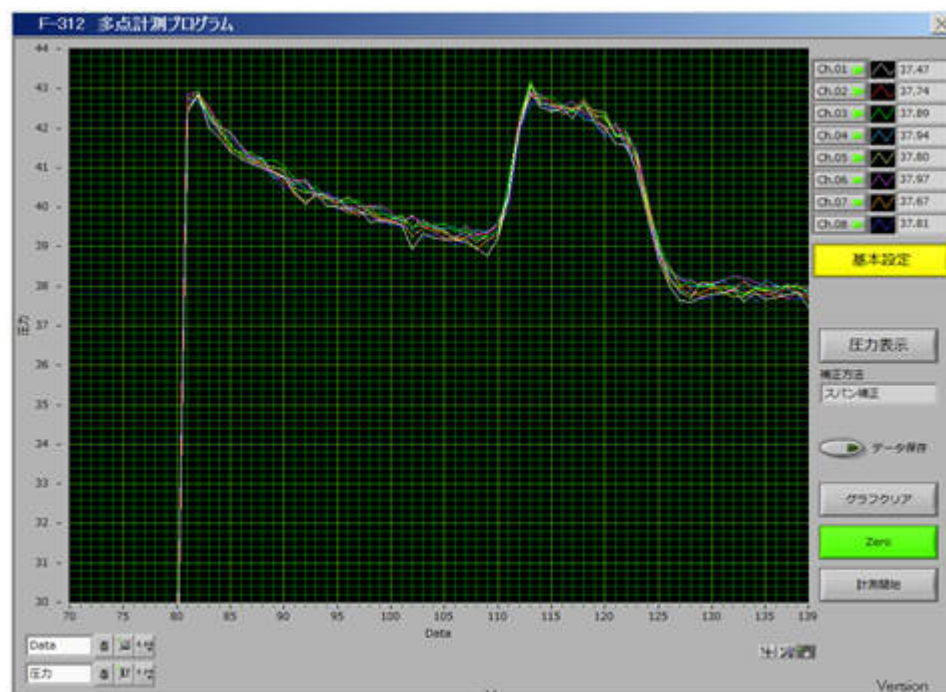


図 3-1-13 40 Pa 付近におけるヒステリシス測定画面

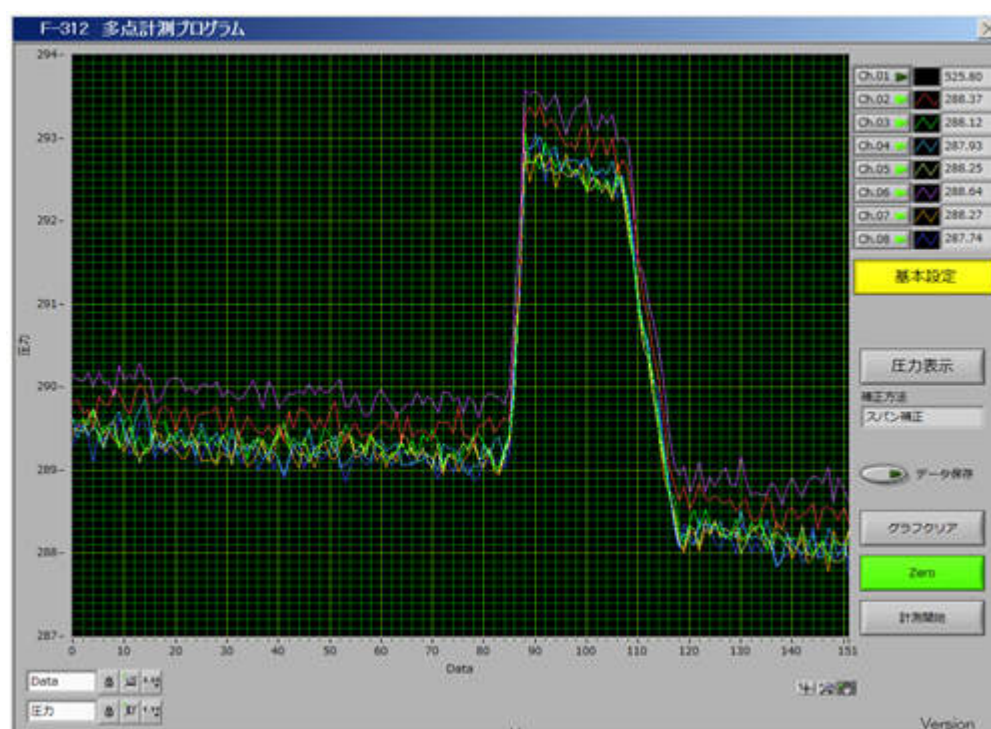


図 3-1-14 280 Pa 付近におけるヒステリシス測定結果

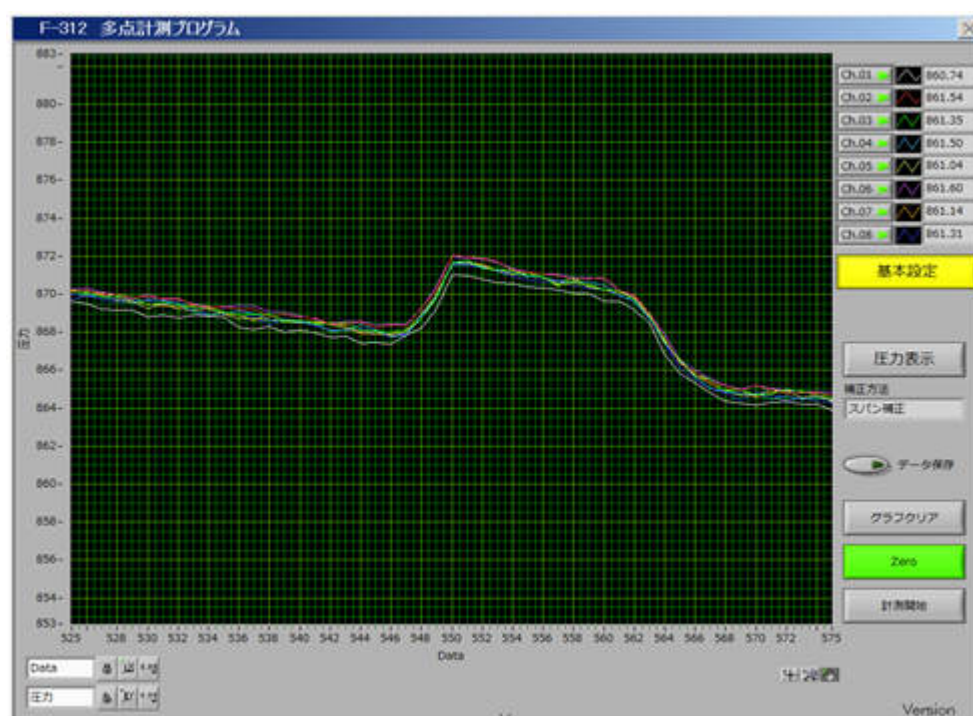


図 3-1-15 870 Pa 付近におけるヒステリシス測定結果

表 3 正圧におけるヒステリシス測定結果

	40Pa		280Pa		880Pa	
	加圧過程 (Pa)	減圧過程 (Pa)	加圧過程 (Pa)	減圧過程 (Pa)	加圧過程 (Pa)	減圧過程 (Pa)
1回目	4.00	-3.54	3.82	-4.31	4.43	-4.30
2回目	4.20	-3.52	4.08	-3.90	4.02	-3.98
3回目	4.29	-3.49	4.08	-3.78	4.21	-3.91
平均値 (Pa)	4.16	-3.52	3.99	-4.00	4.22	-4.06
理論値 (Pa)	4.50	-4.50	4.51	-4.51	4.54	-4.54
加圧と減圧の差		0.65		-0.01		0.16
ヒステリシスFS %		0.026		-0.0002		0.0062

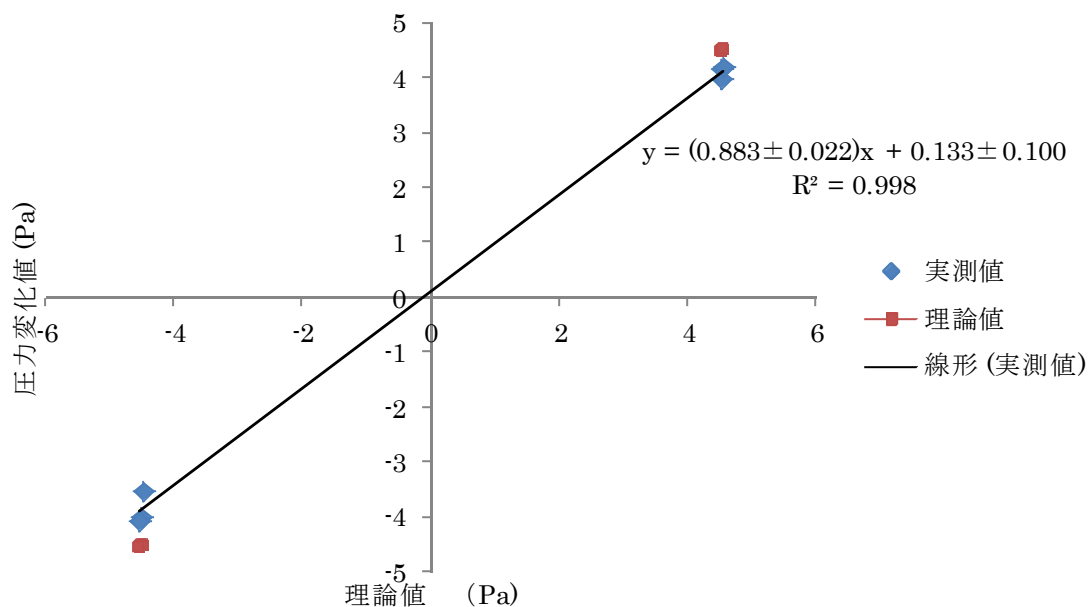


図 3-1-16 正圧における圧力変化の理論値対理論値及び理論値対実測値のプロット

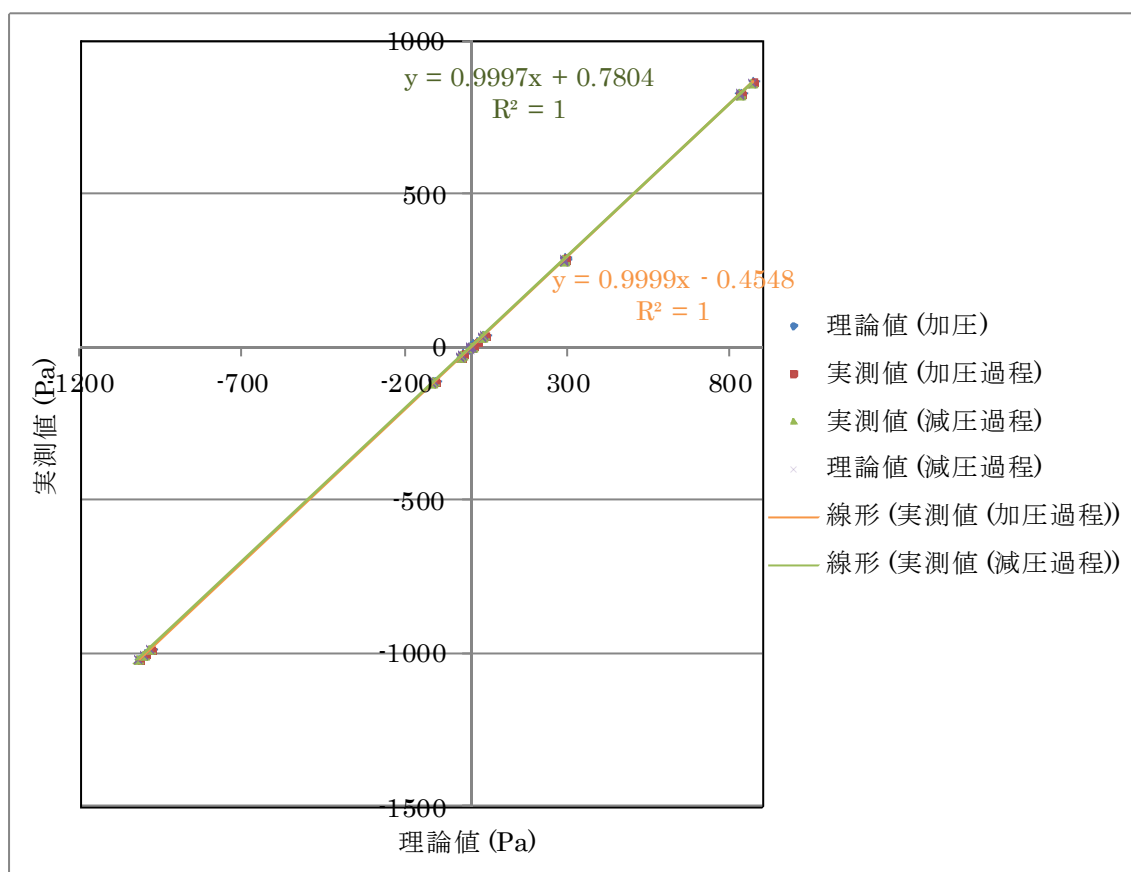


図 3-1-17 フルスケールの理論値と実測値とのプロット

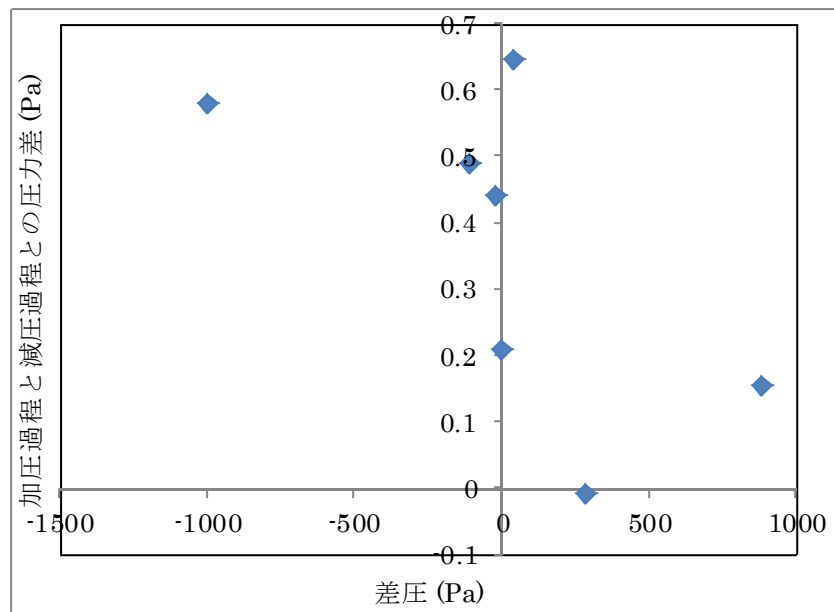


図 3-1-18 フルスケールにおける加圧過程と減圧過程の圧力差

理論直線は等温変化の式にしたがい直線 $y = x$ である。これに対し、加圧過程の近似直線は $y = 0.9997x + 0.7804$ 、減圧過程の近似直線は $y = 0.999x - 0.4548$ であり、理論の直線とほぼ平行になっていることが分かる。このことから、ヒステリシスとしては切片により $0.7804 + 0.4548 = 1.2352$ (Pa)、フルスケールで表すと 0.049 (FS%)と求められた。一方、図 3-1-18 から H 側と L 側の差圧に対して加圧と減圧過程との圧力差はランダムな値となっている。このばらついたデータの平均値は 0.36 Pa であるので、これを採用するとヒステリシスは 0.014 (FS%)である。しかし、このようなランダムなヒステリシスが存在するとは考えにくく、この圧力差はヒステリシスよりも誤差によるばらつきの寄与が大きいと考えられる。

3-2) ヒステリシス性能評価の考察

3-1 の結果から今回の実験ではヒステリシスはリニアリティのばらつきに隠れてしまうほど小さかった。ヒステリシスは 0.36 Pa より小さいということがわかった。すなわちヒステリシスは 0.019 (FS%) より小さい。H 側と L 側の差圧が 0 Pa, 正圧, 負圧いずれについても圧力変化が大きいと理論値からのずれであるリニアリティ誤差が顕著になった。この原因としてはまず、毎回注射器で出し入れする体積を厳密に一定にできなかったことと出し入れする際の力があげられる。理論的には等温変化を仮定すると 0.04 mL の体積変化で

圧力は 0.185 Pa 変化する。注射器としては全量が 1mL のものが一番小さく、その目盛りが 0.1 mL 刻みであるのでそれにより体積を制御したが、出し入れしたい体積±0.04mL 以内に抑えないと検出されてしまう。それに加え、装置に触れるなどして僅かな力でも応答してしまうので、毎回同じ加減で注射器によって加圧と減圧ができなかったこともリニアリティ誤差の大きな原因となっているであろう。

また、圧力変化の理論値を求める際には等温変化を仮定して求めたが、断熱が完全にされているとして理論値を求めることも可能である。その際には、 $PV^\gamma = \text{constant}$ というポアソンの法則として知られる式を P と V で偏微分することで求められる。

$$P \gamma V^{\gamma-1} \delta V + V^\gamma \delta P = 0$$

より、 $\delta P / \delta V = - \gamma P / V$ である。すなわち圧力変化は等温変化に比べて γ 倍になっている。 γ は空気の場合、約 1.4 である。断熱変化であるとする、理論値と実測値とのプロットで、理論値の直線の傾きが急になり実測値とより間隔が離れる。こうなると実験結果を説明するには断熱変化よりも等温変化に近いと考えるほうが都合がよい。実際、本実験では発泡スチロールの伝熱係数は 0 ではないため、断熱が本当に完全ではなく、外界と熱のやり取りができる。外界との熱の移動はフーリエの法則に従い、熱量 q , 伝熱係数 k , 表面積 A , 温度 T , 距離 x とすると、 $q = -kA \frac{dT}{dx}$ で表される。周囲(大気)と十分なじませてから測定は開始したが、温度勾配は必ず生じ、また、20L ポリタンクの表面積も小さくはないため、必ず熱は移動している。

ボイル・シャルルの法則 $PV/T = \text{constant}$ を使えば、温度変化 δT , 圧力変化 δP , 体積変化 δV が起こるとすると、

$$\delta T = \frac{T(P \delta V + V \delta P)}{PV}$$

となる。仮に、 $\delta P = 4.5 \text{ Pa}$, $\delta V = -1 \text{ mL}$ とすると

$$\begin{aligned} \delta T &= 298(\text{K}) \times \frac{(1.013 \times 10^5 (\text{Pa}) \times (-1 \times 10^{-3} \text{L}) + 22.5(\text{L}) \times 4.5(\text{Pa}))}{1.013 \times 10^5 (\text{Pa}) \times 22.5(\text{L})} \\ &= -6.5 \times 10^{-6} (\text{K}) \end{aligned}$$

したがって、1 mL の体積を出し入れし理論値通りの圧力変化を得るにはごく僅かの温度変化も許されない。このように、熱の出入りもあり厳密に断熱ができていないこと、それによりわずかな温度勾配が存在しベースラインも変動するために、加圧過程と減圧過程とで大きな差(負圧での測定や体積変化量が大きい測定など)が表れていたところがあった。したがって、ヒステリシスの測定についてリニアリティの系統誤差によって見えないほど小さかった。

3 圧力応答結果

3-3) 予備実験

まず、圧力応答性の違いは本当に存在するのか。1, 2.5, 5 mL 注射器と 22.5 L ポリタンクを購入し、これを図 3-3-1 のように接続した。データ数 10, 2000 Hz, サンプルング速度 5 m sec, 注射器の体積 1 mL, 1 ch (白線) を 22 m のチューブに、2 ch を約 0.1 m のチューブにして実験を行った。

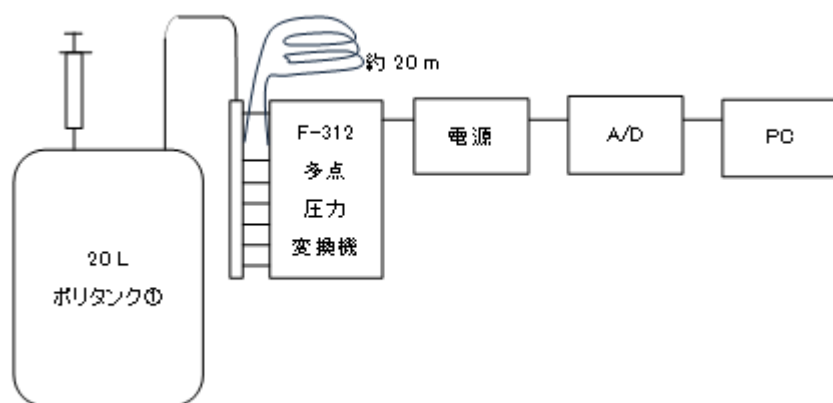


図 3-3-1. 回路図

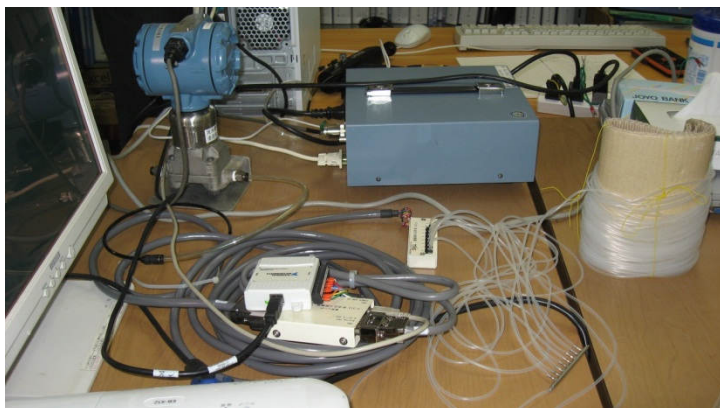


図 3-3-2. 実際に用いた器具



図 3-3-3. 22.5 L タンク



図 3-3-4. 結果 1

これより、長さによって応答性に違いが生じることがわかった。

また、注射器で行うと必ずしも安定しなかったため、決まった sin 派を出すことが可能なダイヤフラムポンプを注射器の代わりに用いて実験を行った。図 3-3-5 は 2 ch のみ 22 m チューブを用い、そのほかのチャンネルは 0.1 m 前後の長さの不均一なものを用いた。

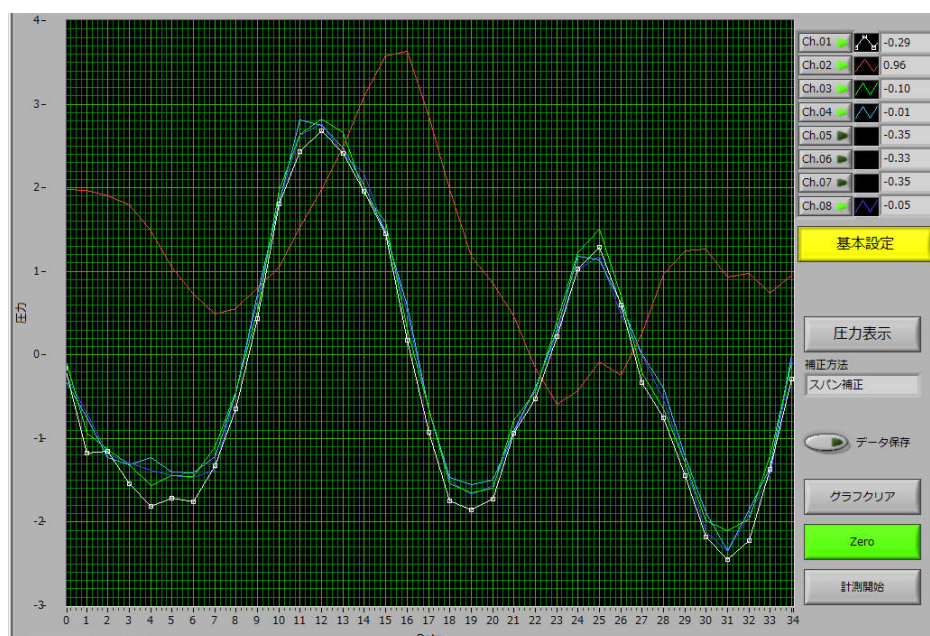


図 3-3-5. 結果 2

これより、ダイヤフラムポンプを用いてもチューブが長いものは応答が遅くなることがわかる。

さて、同時に測定のできるチャンネルは 8 つあるが、これらに応答性の違いはあるか。50 cm のチューブを 8 本用意し、通常で使用する共通ポートの距離による応答性の違いを調べた。最初に共通ポートで、次に樹形図のように分岐した、理論上距離の等しいポート（図 3-3-6）を作成し、応答時間の違いと振幅の違いを見た。50 cm を用いた理由は、実験室でよく用いられる 10 cm ~ 2 m 程度の長さの中で一番汎用性があり、またある程度長さがあるものの方が応答性の違いがよく現れるのではないかという考えからである。

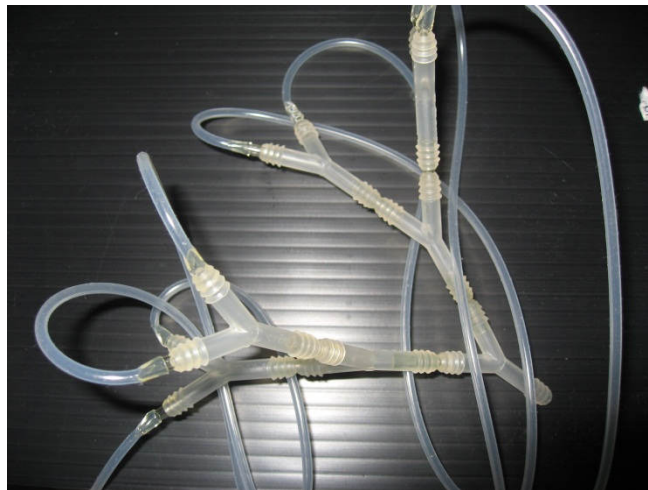


図 3-3-6. 実際に作成した、距離の等しいポート

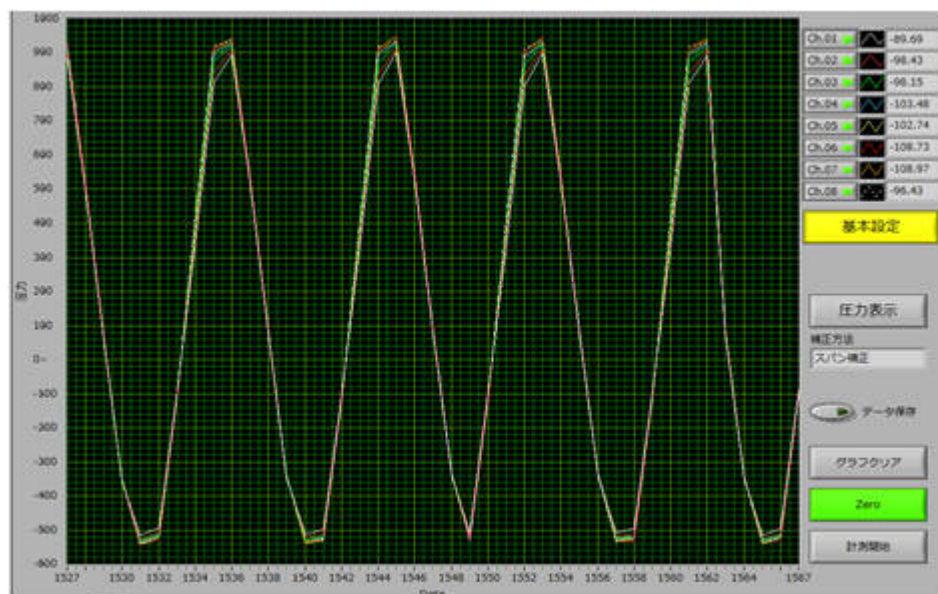


図 3-3-7. 結果 3

これを見るとほぼぴったり一致しているように見え、応答時間はほぼ等しいことがわかる。また、1 ch から 8 ch になるにつれて振幅は大きくなっているが、共通ポートではそれぞれのチャンネルは約 6 mm 離れていたため、チャンネル数が増えるほど距離が延び、

振幅が変動することがわかった。つまり、この数センチの差で振幅は変動することがわかった。

図 3-3-8 は、図 3-3-6 のポートを使用したときの応答性の結果である。拡大してみると約 5 Pa ほどの変動はあるものの、これは微小な温度変化や微風などによる誤差であると考えられるため、無視できる。

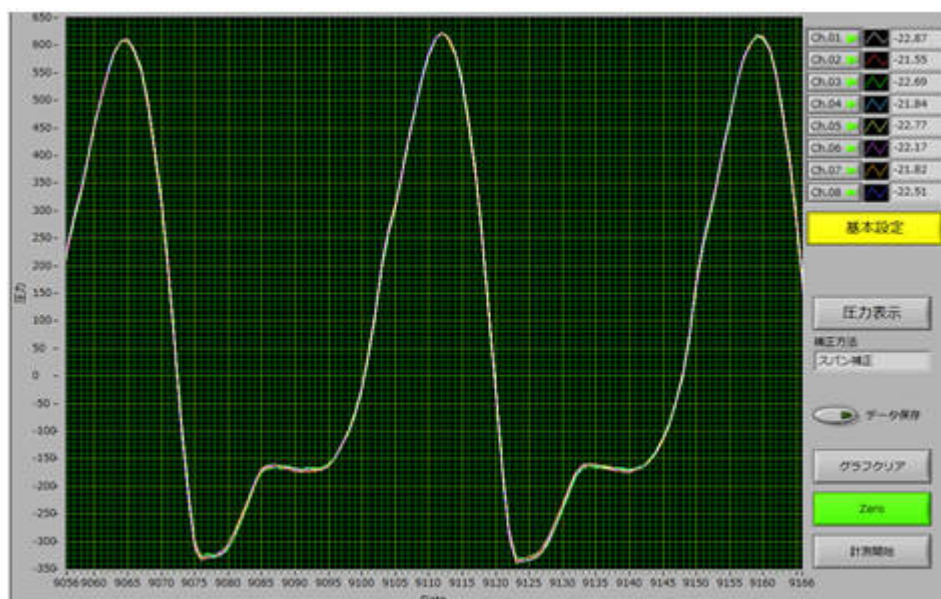


図 3-3-8. 結果 4

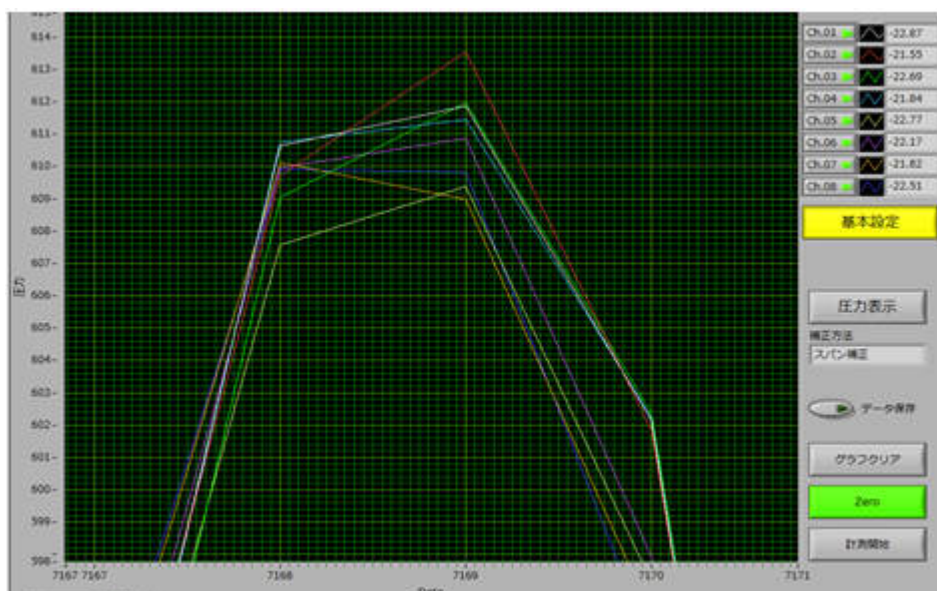


図 3-3-9. 結果 4 のピークの拡大図

図 3-3-10 もダイヤフラムポンプを用いて圧力をかけたものである。2 ch のみ 22 m チュ

ーブを用い、そのほかのチャンネルは 0.1 m 前後の長さの不均一なものを用いた。その他の条件は前述の実験と同じである。周波数は最大 50 Hz である。

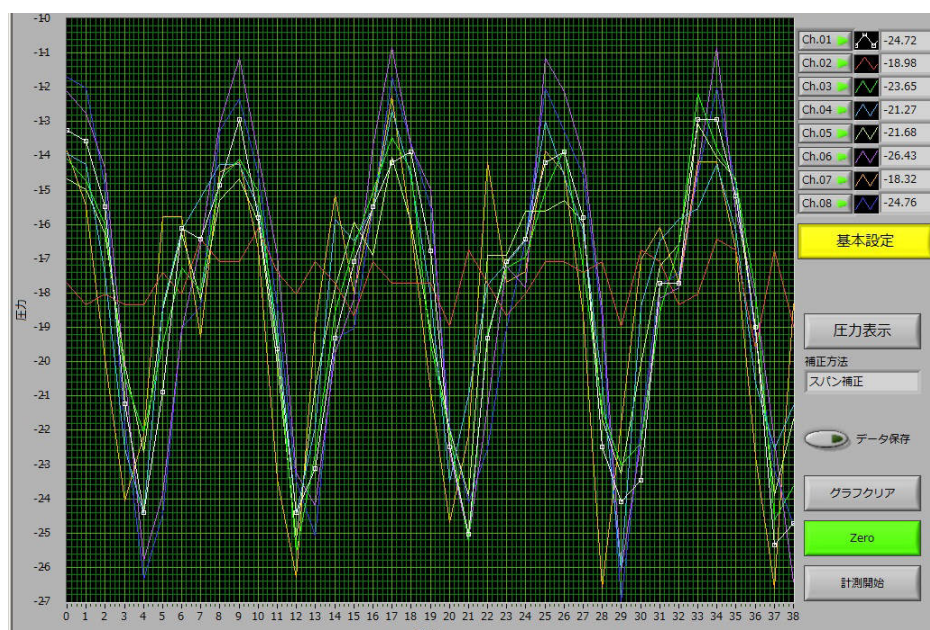


図 3-3-10. 結果 5

この結果から、5 データで 25 m sec (40 Hz)、最大だと 8 データで 20 m sec (50 Hz) であるとわかった。しかしながら、長い管だと 50 Hz でピークを平均化してしまうため、波がはっきり表れないようだ。グラフが滑らかでないのは、サンプリング速度が大きいためである。

ここで、実際にチューブの長さを決定して、圧力の応答時間を調べる。解析したグラフがうまく離散する値を考えて 8 ch 分のチューブの長さを考えた上で、0 (正確には数 cm) , 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 5, 10 m の 8 つに決定した。計算式は上のものを、1 の長さを変えながら行った。測定の際の 1 ch ~ 8 ch はそれぞれ 0, 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 5, 10 m である。このグラフでは 90% 応答までの時間は 0.125 sec, その間のデータ数は 25 である。



図 3-3-12. 結果 6

図 3-3-13 は条件を同じくして行った、2 回目のグラフである。

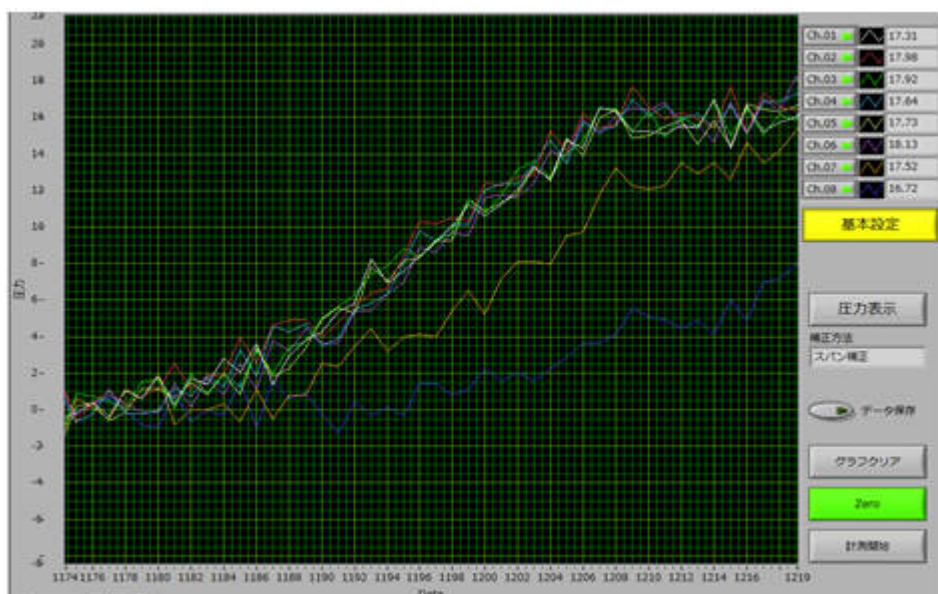


図 3-3-13. 結果 7

5, 10 m は遅れがよく見られたが、0~2 m はうまく差異が得られなかった。この 0~2 m の間の圧力応答の差をうまく見るにはどうすればよいか。

ここで、0~2 m 間の差異を明確にするため、ダイヤフラムポンプやタンクを使わず注射器 2 本のみで空気を注入することを試した (図 3-3-14)。すると図 3-3-4 のような応答図になり、応答が始まったところを拡大してみるとうまくいっているように見えた。

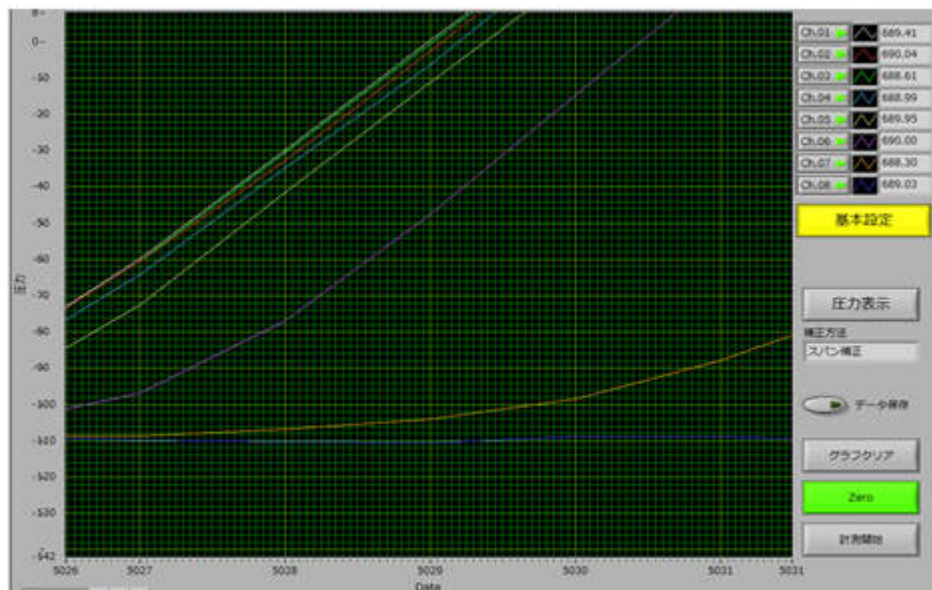


図 3-3-14. 結果 8

この結果を、もう少し説得力のある結果として表すことはできないだろうか。そこで再びダイヤフラムポンプを用いて、タンクを使わず直接測定したところ（データ数 10, 2000 Hz, サンプルング速度 5 m sec）、2 m で 1 m sec レベルの時間の遅れを測定することができた。ピークの高さも 2 m までは、チューブの長さによって大きくなっている。したがって、2 m までは測定に十分利用できるといえるだろう。

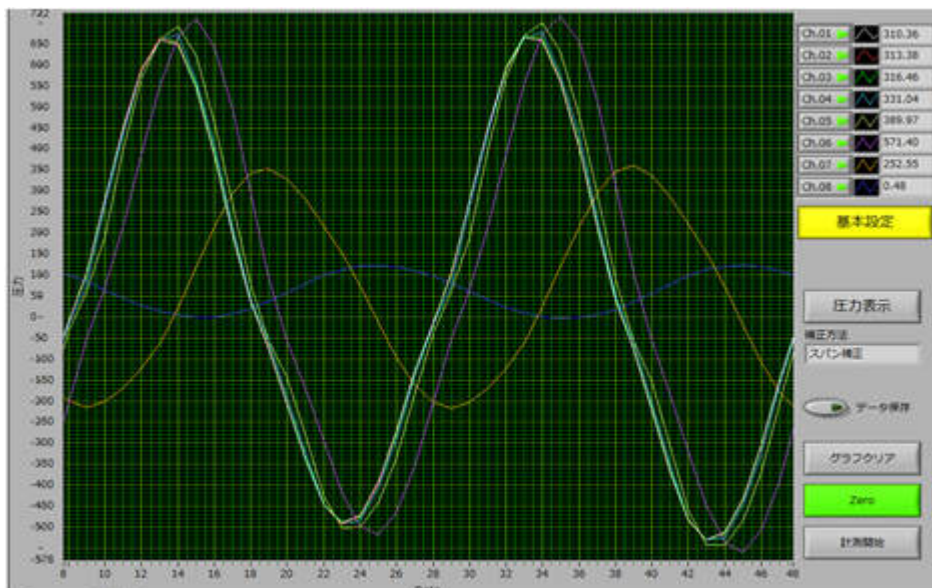


図 3-3-15. 結果 9

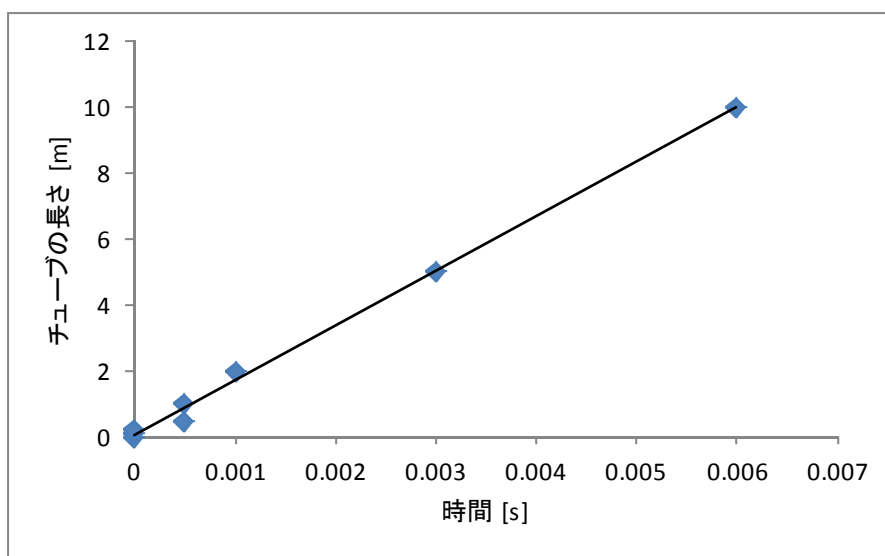


図 3-3-16. 結果 9 の応答時間とチューブ長さのグラフ

スピーカーで一定の周波数に設定してきれいに差が出るような $\sin$ 波を測定することを試みた。100, 50 Hz で計測すると、100 Hz のときの結果は 2 データで 5 m sec だったのでよさそうな結果だったが、形はきれいではなかった。また、50 Hz だとうまく波形が取れなかった。したがって、スピーカーだと予想のようによくいかない。これは、周波数が正確に設定できていなかったためであると考えた。

タンクに 10 L 水を入れ、タンクの体積を小さく変えることで波長の大きさを変化させた。データ数 2, 2000 Hz, 1 m sec である。なお、このとき水の重量を測ると 10.7 kg であった。

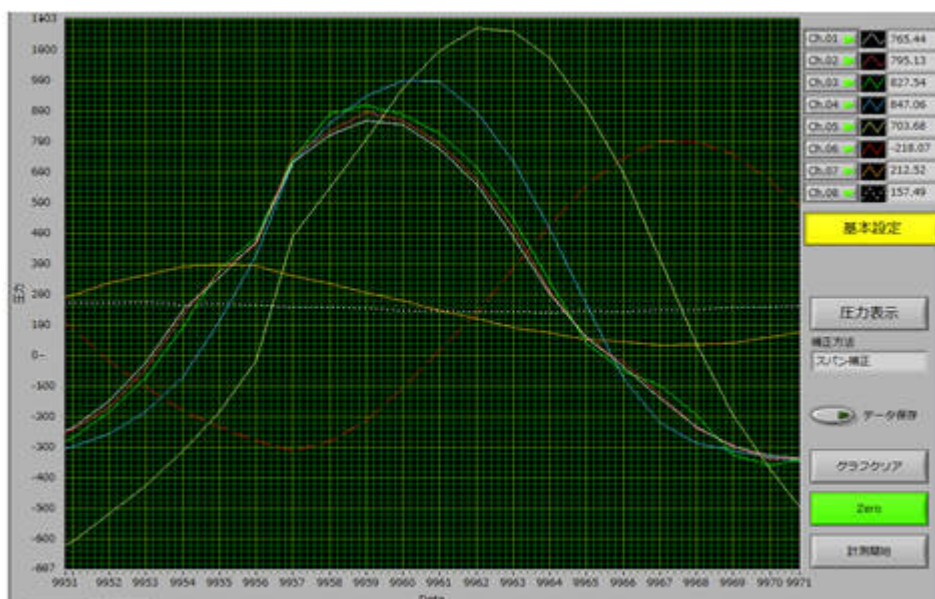


図 3-3-18. 結果 11

5 ch (1 m, 黄色) と 6 ch (2 m, 赤色) のチャンネルだけ 1 m sec だと約 25 Hz で振幅の変化が生じる。しかし安定はしなかった。これは波の干渉ではないかと考えた。そこで、周波数を変えて測定した。そうすれば波長が変わるので振幅は再び変わるはずである。

5 ch (1 m, 黄色) と 6 ch (2 m, 赤色) のチャンネルだけ 1 m sec だと約 25 Hz で振幅の変化が生じる。しかし安定はしなかった。タンク内の水面での干渉が原因ではないかと考えた。また、1 m チューブの振幅の大きさは最も大きい値となった。

ここで 7 ch を 3 m に 8 ch を 5 m に変えて測定し直した。

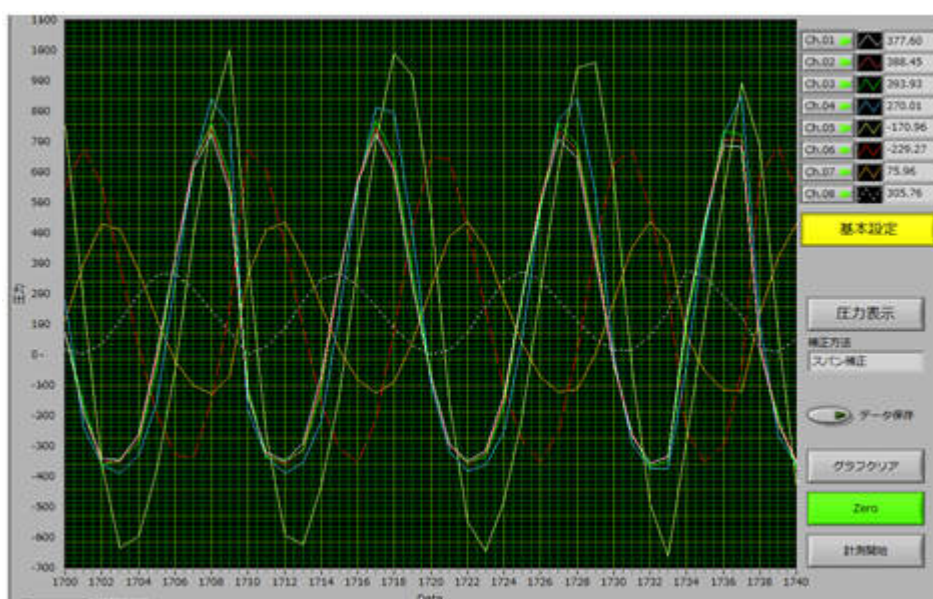


図 3-3-19. 結果 12

1, 2, 3 m は同じ幅くらいで現れた。ここでも 1 m チューブの振幅の大きさは最も大きかった。

1 m チューブの振幅が大きくなってしまった理由として、実際のチューブの長さが 1 m よりも大きいのではないかと考え、もう 1 本 1 m のチューブをつくって今までの 1 m と比較するため、1 ch に今までのものを、5 ch に新しく用意したチューブをつないだ。

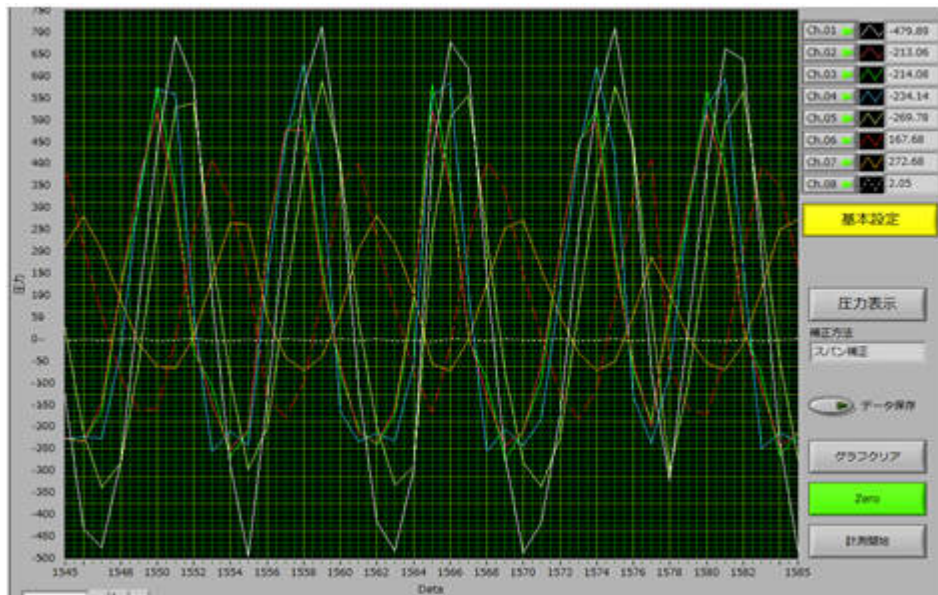


図 3-3-20. 結果 13

すると新しく用意した 1 m チューブでは振幅が理想的なものになった。しかし、応答性は今までのものの方が早くなってしまった。応答性は同じにならなくてはいけない。

ここで、波の干渉について考える。1 m が最も振幅が大きいことについて、50 Hz ダイアフラムポンプから変換器までの距離を測ると 2.4 m 程度であった。圧力は音速で伝わるため、

$$\frac{340[\text{m/s}]}{50[\text{Hz}]} = 1.7[\text{m}]$$

がチューブを伝わる音の波長である。2.4+1=3.4 [m]はこの倍数であるため、干渉で最も大きい点となる。ゆえに振幅は大きくなったのだと考えられる。

これを実証するため、チューブ長さを 1 ch から順に、0, 1, 2, 3, 4, 5, 1, 1 m に設定し、どのチャンネルでも 1 m が最も大きいことを証明する。1 ch, 7 ch, 8 ch のピークが大きいのは全チューブ長が 3.4 m になるからである。

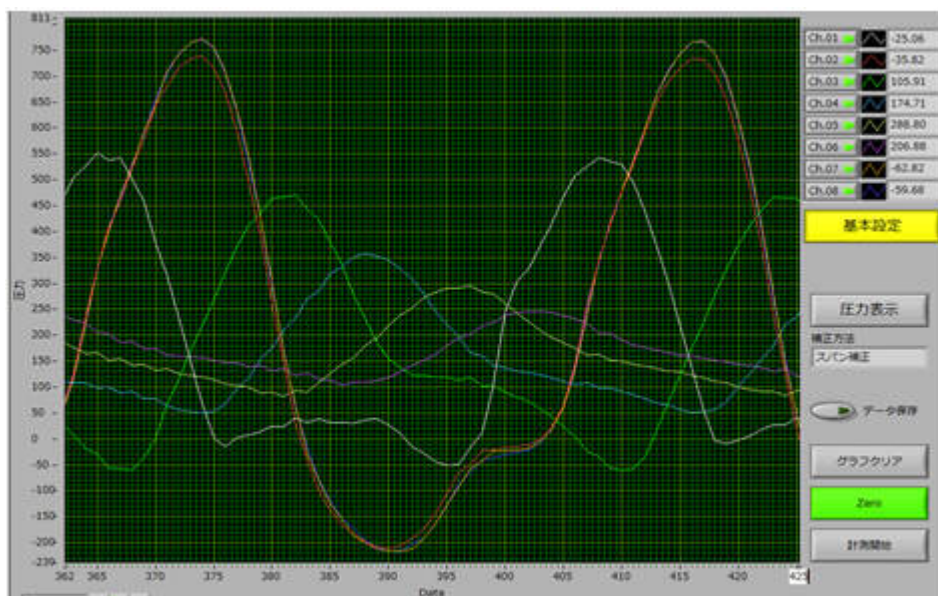


図 3-3-21. 結果 14

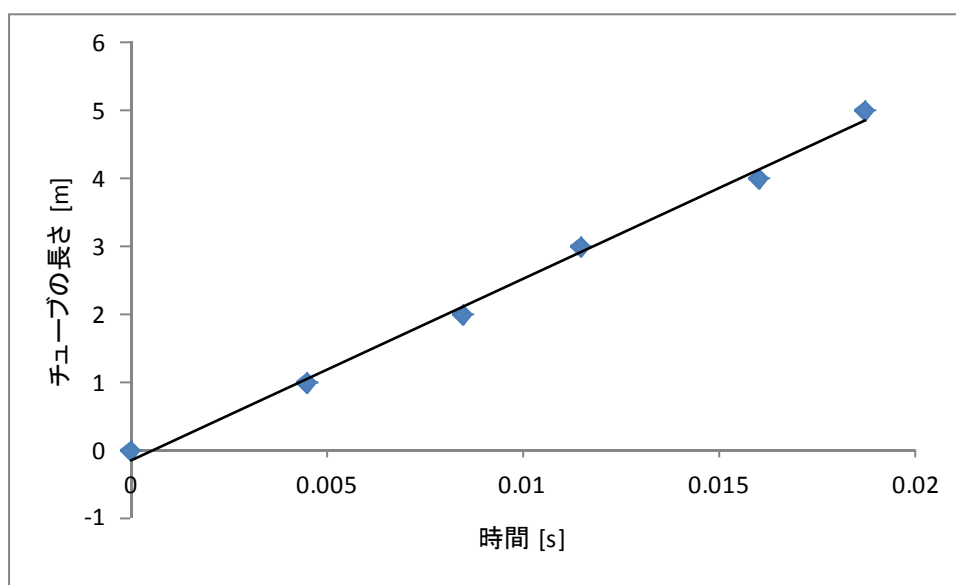


図 3-3-22. 結果 14 の応答時間とチューブ長さのグラフ

1 ch と 7 ch を飛ばして、3 ch から 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0 m である。上と条件は同じである。2 枚目はこれを拡大したものである。ピークでの応答時間の差は、長いチューブが早く応答したりしているため、丸い部分（データ数 751 をゼロとした）での応答時間も見た。読み取りによるグラフのひし形のマーカーの方がピークの応答時間とのデータで、正方形のマーカーの方が丸い部分の応答時間とのデータである。

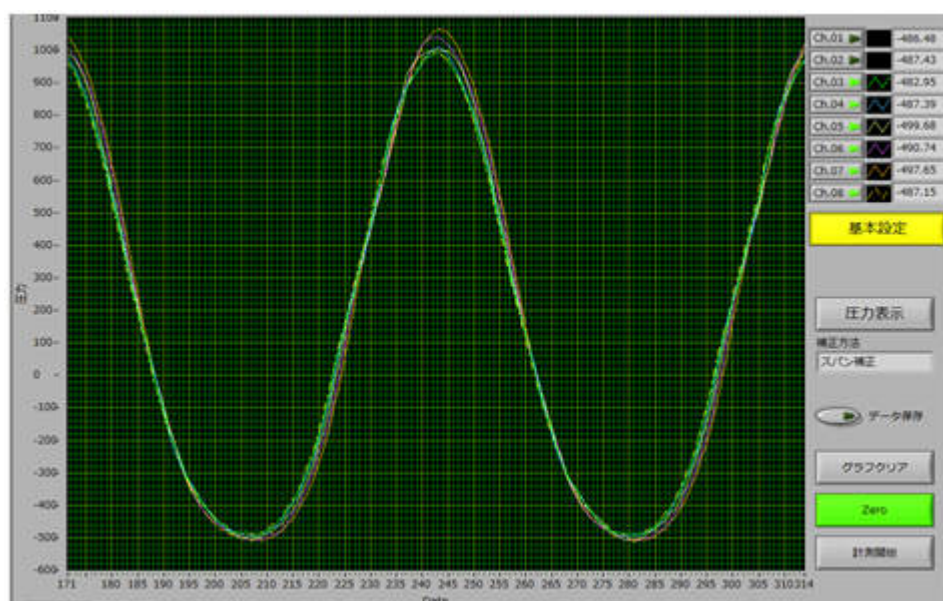


図 3-3-23 結果 15

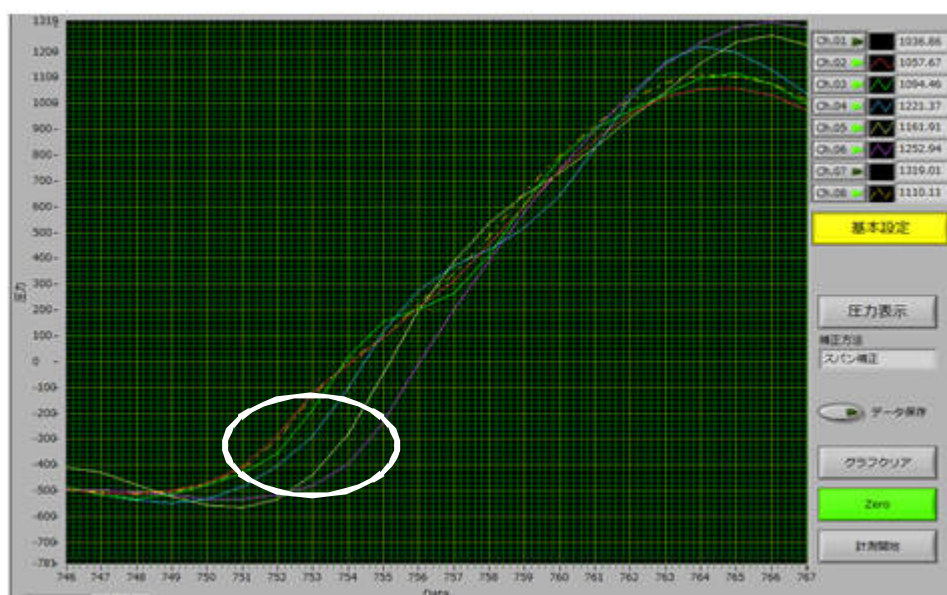


図 3-3-24. 結果 15 の拡大図

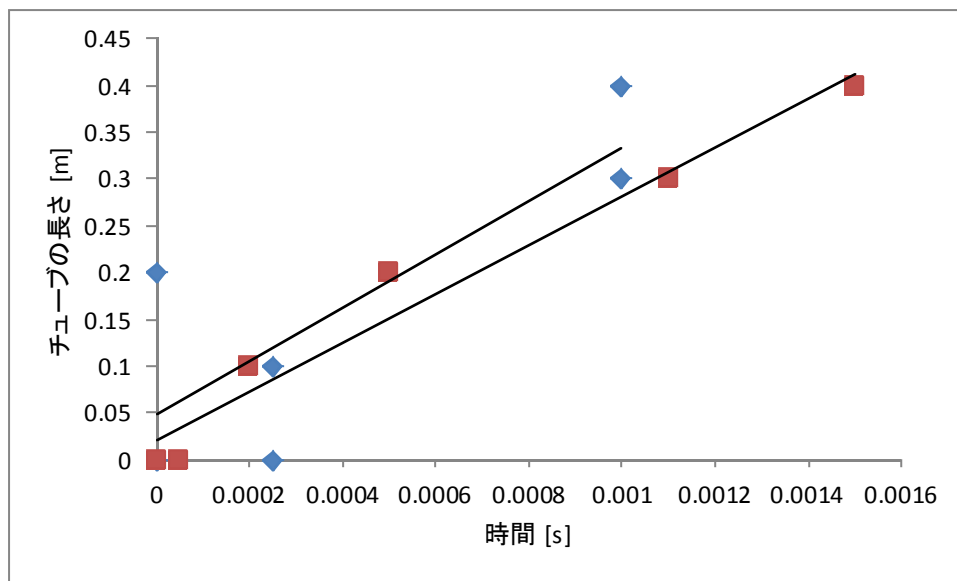


図 3-3-25. 結果 15 の応答時間とチューブ長さのグラフ

1 ch から順に 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0, 0, 0 m である。

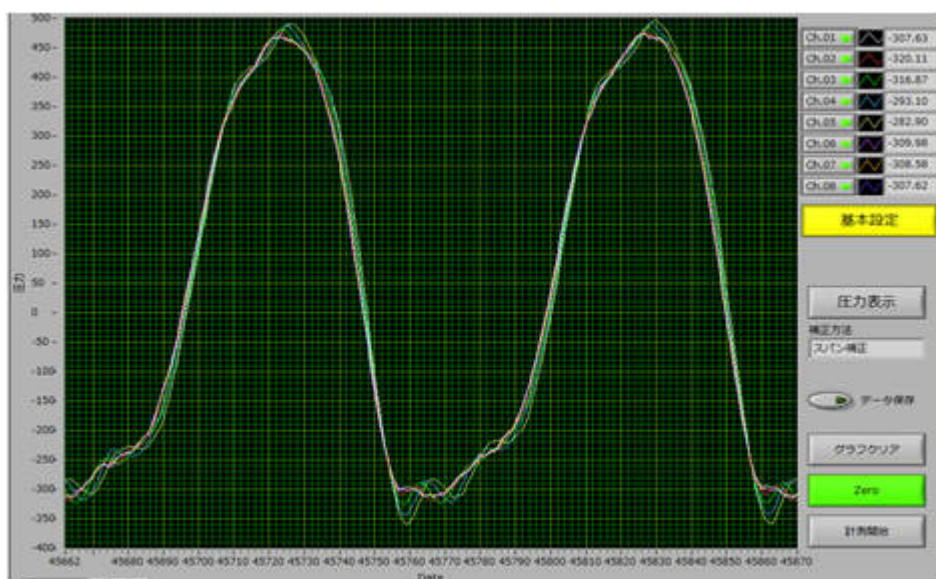


図 3-3-26. 結果 16

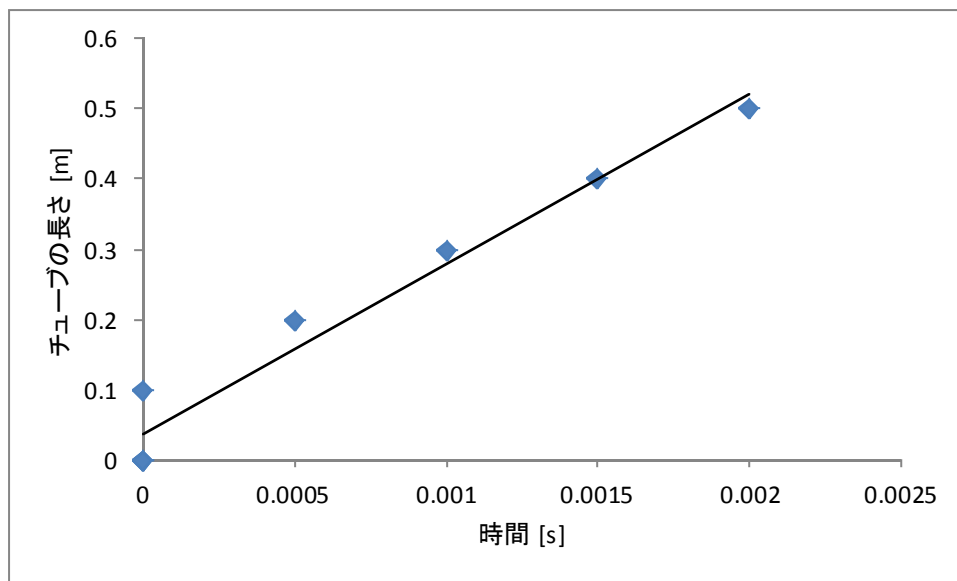


図 3-3-27. 結果 16 の応答時間とチューブ長さのグラフ

1 ch から順に 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 m である。

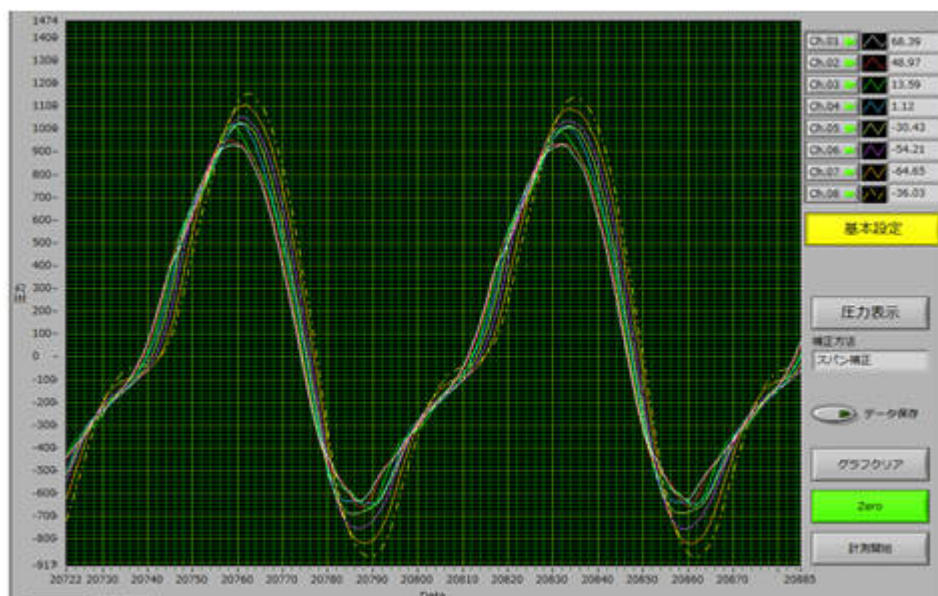


図 3-3-28 結果 17

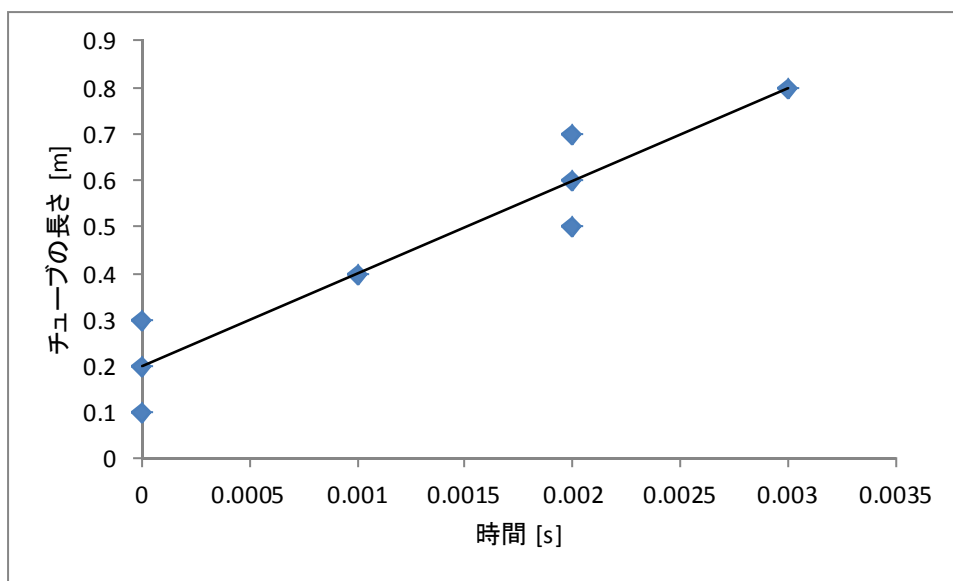


図 3-3-29 結果 17 の応答時間とチューブ長さのグラフ

0.3~0.6 m の範囲での圧力応答を、ダイヤフラムポンプを用いて測った。1 ch から、0.6, 0.4, 0.45, 0.49, 0.5, 0.51, 0.55, 0.3 m である。途中に出ている小さなピーク (楕円で囲んだ) を見て応答時間を決定した。

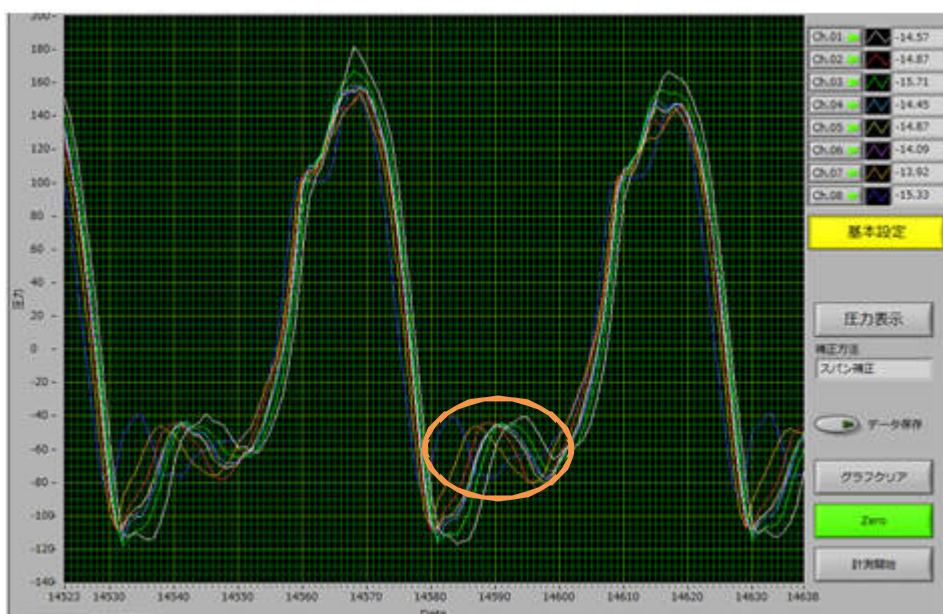


図 3-3-30. 結果 18

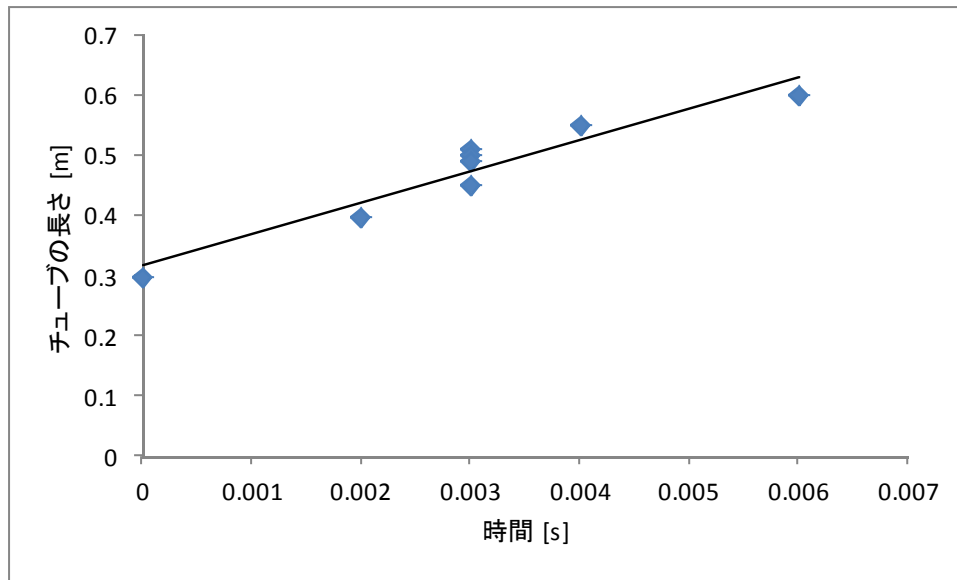


図 3-3-31. 結果 18 の応答時間とチューブ長さのグラフ

3-4) 考察

全チューブ長が 1.7 m の倍数になったとき、チューブ内で音の干渉が起こり、振幅が増大する。これは、圧力応答器の時間応答にはあまり関係ないが、振幅が小さすぎるとピーク位置がわからなくなってしまうため、正確な応答時間を求めることができない可能性がある。

応答時間は結果的にばらつきが生じてしまった。このばらつきとして挙げられるのは、応答時間の読み取りミスである。今回、サンプリング速度は最高で 0.5 m sec であったため、解析で算出できる応答時間は 0.0005 の倍数になってしまうため、正確な値が得られないだろう。また、読み取りのミスにより計算ミスが生まれてしまった可能性がある。しかしながら、50 cm チューブにおいてはほぼ 2 m sec 以内で応答することがわかった。室温の微小変化や人の移動により生じる微風の影響も、値のばらつきに関与すると推測する。

4 まとめ

今回、F-312 多点圧力計のヒステリシス特性と圧力応答性の検証を行った。ヒステリシス特性は 0.36Pa、0.014%/FS 以下であることが分かった。リニアリティ誤差に隠れてしまったともいえる。圧力応答性では、0.5m で 2ms 以下の応答遅れで高速な応答が可能であることが分かった。圧力センサーまでの距離が圧力変動の波長の 1/2 となった際に共振が起こり、出力値が高く検出されてしまった。これらを踏まえ、F-312 多点圧力変換器が高速流体計測システムに利用可能であることが示唆された。

改善点

使用した道具について

問題点

ポリタンク 1. 正確な容積がわからない

水を入れてその重さを量ったが、ポリタンクの形が歪なため、容器を完全に水で満たすことは難しい。また、水の重さを量るのに使った体重計は細かい値を量るのに適していなかった。そのため、容積の正確な値を求めるのは難しかった。

2. 熱の遮断が不完全

断熱材として発砲スチロールを用いたが、どうしても隙間が空いてしまうため、完全に断熱できていたとは言えない。温度が数 mK 変化しただけで圧力に影響があるため、今後の測定の際に考慮する必要がある。

3. 容器の体積が変わってしまう

室温やその他の要因でポリタンクの容積が微妙に変化してしまう可能性がある。バッファタンクとして使用する容器を体積が変化し難いものにする。

注射器

毎回同じ容積だけ打ち込めるような工夫が必要

注射器で打ち込んだときの圧力変化をみる実験で、例として 1 mL の注射器で mL 打ち込むとき、目で目盛を読み取り、手で操作して 0.1 mL だけ打ち込んでいる。この過程で誤差が生じていた可能性は非常に高い

共通ポート

センサー部と接続するための 8 つの孔それぞれの距離の違いが測定結果に大きな影響をもたらすため、導管の長さを考慮すべき計測の場合は、それぞれの孔の距離が等しくなるようにしなければならない。

以上