

熱力学の実験教材の開発
最終報告書

金沢工業大学 工学部 機械工学科
代表者 嶋田恵助
所属先 加藤・小橋研究室

第1章 参考実験

研究室のメンバー数人の協力を得て手動による圧縮実験を行った。

1.1 実験目的

この実験の目的は圧縮時間と圧力変化とポリトロープ指数の関係の理解と、最大圧力とポリトロープ指数による装置の評価を行う事である。

1.2 実験方法

1.2.1 実験装置

以下に今回使用した実験装置の全体図を示す。

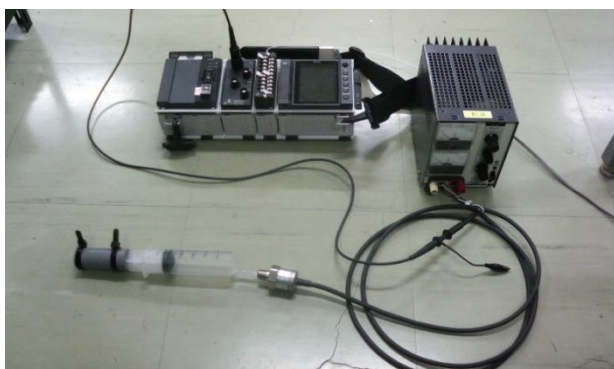


Fig.1.2.1 Overall view of pilot machine

Fig.1.2.1において、シリンジの先には圧力センサが取り付けられている。また圧力センサは安定化電源より電源供給を受け、データロガーにより圧力変化のデータを記録する。圧力の測定はシリンジのピストンにストッパーを設け、任意の容積でピストンが止まるように設定した。以下にシリンジのストッパーの様子を示す。

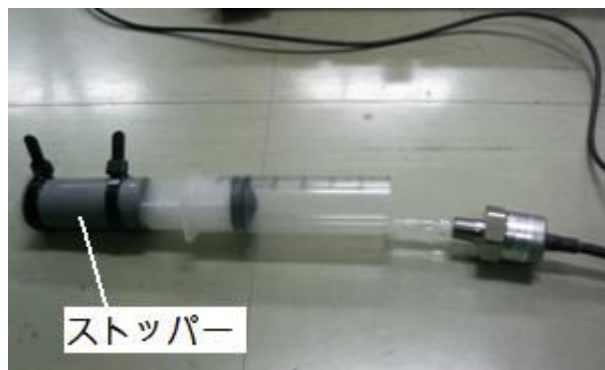


Fig.1.2.2 Stopper installed in piston

1.2.2 実験手順

まず安定化電源の電圧を、圧力センサの起動電圧である12~28VDCに設定する。電圧を設定した安定化電源に圧力センサを接続し、圧力センサにデータロガーのプローブを接続する。圧力センサの計測部はシリンジの先端に接続する。全ての接続が完了したらデータロガーのSTART/STOP ボタンを押してデータ収集を開始し、ピストンを圧縮方向へ移動させる。圧縮が完了したらデータロガーのSTART/STOP ボタンを長押ししてデータの収集を停止する。実験は6回行い、それぞれにおいてピストンを押す速さを変化させて実験データを採集する。

1.3 参考実験の実験結果と考察

1.3.1 圧縮終了時の容積の補正

前節の手順で実験を行った結果、圧縮完了の位置でピストンの先端が変形している事がわかった。ピストンの先端はゴムの部品で構成されていて、部品の内側に空洞がある。この空洞部が圧縮空気の圧力によって押しつぶされてピストンの先端が変形するものと考えられる。そこで、ピストン先端のゴム部品を外し、内側の空洞部の寸法を計測し、空洞部の容積を計算した。計算の結果、空洞部の容積は0.441mlであることが分かった。この値を圧縮終わりの容積に足すことで補正を行う。

1.3.2 実験結果と考察

今回の実験は交代でシリンジのピストンを圧縮方向へ動かす、実験データを採った。行程は51[ml]から32[ml]までの圧縮である。圧縮始めのピストン位置はその都度、実験者が目盛を用いて目視で合わせる。圧縮終わりのピストン位置はピストンに設けられたストッパーによって決まる。実験は計6回行った。圧縮実験によって得られたデータを以下の表に示す。

Table 1-3-1 Result of reference experiment

	Compression time[s]	Polytropic exponent in the PV diagram	Maximum pressure[kPa]
The first	0.018	0.959	55.02
The second	0.020	0.949	54.30
The third	0.071	0.960	55.08
The fourth	0.051	0.993	57.42
The fifth	0.551	0.802	44.34
The sixth	1.970	0.736	40.02

Table 1-3-1 において、ポリトロープ指数は以下に示す(1.1)式より求められている。

ポリトロープ変化の関係式より

$$P_1 V_1^n = P_2 V_2^n$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^n$$

$$n = \log\left(\frac{V_1}{V_2}\right) \left(\frac{P_2}{P_1}\right) \quad (1.1)$$

Table 1-3-1 に示した一回目から六回目までの実験結果をグラフとして以下に示す。

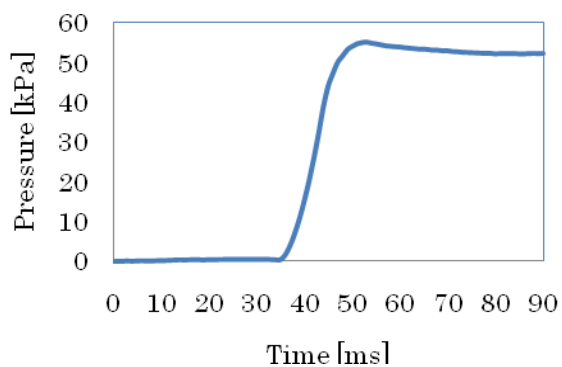


Fig.1.3.1 The first compression experiment

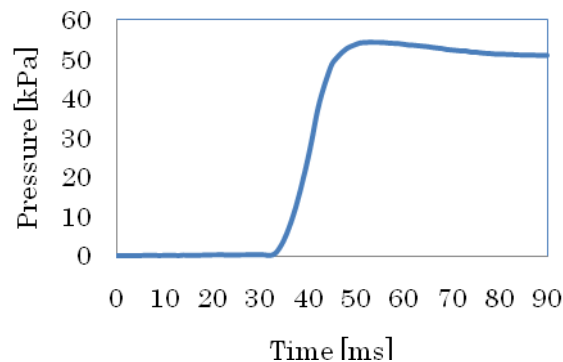


Fig.1.3.2 The second compression experiment

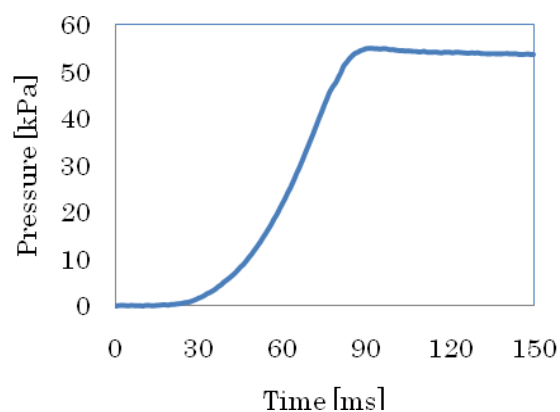


Fig.1.3.3 The third compression experiment

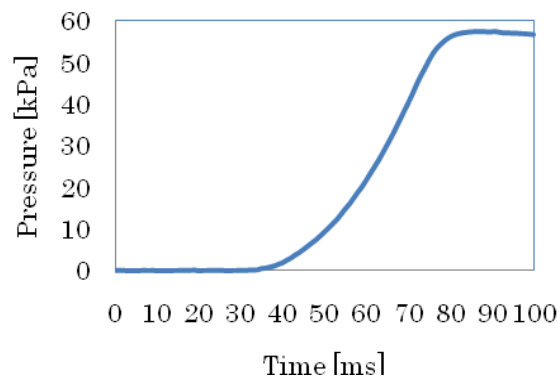


Fig.1.3.4 The fourth compression experiment

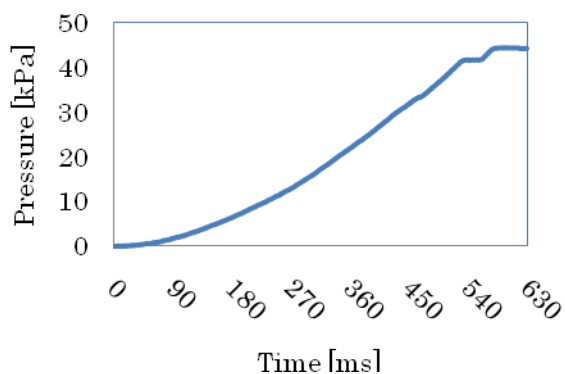


Fig.1.3.5 The fifth compression experiment

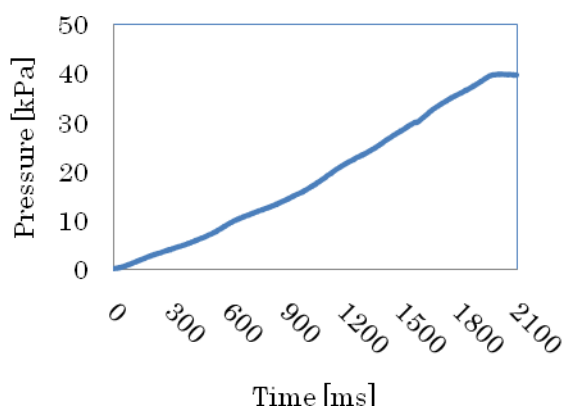


Fig.1.3.6 The sixth compression experiment

Table 1-3-1 の 4 回目～6 回目の数値より、圧縮時間が短い方が圧縮終わりの圧力とポリトロープ指数は大きくなる傾向にある事がわかる。しかし、Table 1-3-1 の 1 回目～4 回目の数値より、圧縮時間の長い実験の最大圧力やポリトロープ指数が圧縮時間の短い実験の数値を上回っていることが分かる。これは実験を複数人で交代しながら行う際に、目盛を読み取る感覚に個人差があるため、圧縮始めのピストンの位置が実験を行う人によって変化し、圧縮比が変更された事によるものだと考えられる。また、この実験を一人で行った場合でも、圧縮初めのピストン位置は目盛を見ながらその都度設定する必要がある。そのため圧縮比が変化する可能性は十分に考えられる。更に、圧縮の作業を行う際にはシリンジは人の手によって保持されている。これにより、圧縮時にシリンジを強く握ってしまい、圧力の変化に影響を及ぼした可能性もある。

Fig.1.31～Fig.1.3.6 より、圧縮時間が短いほど曲線の傾きが大きくなり、圧縮時間が長いほど曲線の傾きが小さくなる事がわかる。

1.4 結論

- ・ ストッパー付きの手動で圧縮を行うタイプの教材では圧縮開始の位置を実験者がその都度目視で設定するため、圧縮比に変化が生じる可能性がある。
- ・ 人の手によってシリンジを保持して実験を行うと圧力の変化に影響を及ぼす可能性がある。
- ・ 圧縮時間が短いほど圧縮終わりの圧力とポリトロープ指数が大きくなる傾向にある。

第2章 シリンジ保持実験

この章では前章と同じ実験装置を用いて、実験者自身が結果に及ぼす影響を調査する。

2.1 実験目的

前章で行った実験は実験者がシリンジを保持して圧縮を行った。1.4節の結論より、人の手でシリンジを保持して実験を行うと、実験のデータに何らかの影響が出ると考えられる。そこで、今回の実験では実験者の体温が最大圧力に影響を及ぼすか確かめる。また、圧縮時間と最大圧力の観点から実験装置の評価を行う。

2.2 実験方法

2.2.1 実験装置

第1章1.2.1項に準ずる。

2.2.2 実験手順

まず安定化電源の電圧を、圧力センサの起動電圧である12~28VDCに設定する。電圧を設定した安定化電源に圧力センサを接続し、圧力センサにデータロガーのプローブを接続する。圧力センサの計測部はシリンジの先端に接続する。

計測の準備が完了したら圧縮を行う前に実験者がシリンジを Fig.2.2.1 の様に持ち、次項の実験条件に示される時間だけシリンジを手で温める。条件に示される時間が経過したらデータロガーの START/STOP ボタンを押してデータ収集を開始し、ピストンを圧縮方向へ移動させる。圧縮が完了したらデータロガーの START/STOP ボタンを長押ししてデータの収集を停止する。実験は5条件行う。なお、ピストンを押す速さは同じ速さで押すように心掛ける。



Fig.2.2.1 Appearance to maintain injection syringe

2.2.3 実験条件

以下に実験の基本条件と変化させる条件を示す。

Table 2-2-1 Basal condition

Room temperature [K]	292
Temperature of hand [K]	305
Compression distance [ml]	51→32

Table 2-2-2 Condition of changing

Experimental run number	Time to grip injection syringe beforehand [s]
1	10
2	20
3	30
4	40
5	50

Table 2-2-1 に示した圧縮工程は、前章の実験と同様に圧縮始めのピストンの位置を実験者がシリンジの目盛を用いて目視で合わせる。圧縮終わりのピストン位置はピストンに設けられたストッパーによって定められている。

2.3 実験結果と考察

以下に、実験より得られた数値を表にして示す。

Table 2-3-1 Result of experiment

Experimental run number	Compression time [s]	Polytropic exponent in the PV diagram	Maximum pressure [kPa]
1	0.045	1.082	63.96
2	0.039	1.075	63.48
3	0.039	1.026	59.82
4	0.042	0.974	56.10
5	0.044	1.013	58.86

Table 2-3-1 より、実験番号3と実験番号4の最大圧力を比べてみる。Table 2-2-2 より、圧縮の前に予めシリンジを保持して実験者の手の熱をシリンジへ与えた時間は実験番号4の方が長い。ところが実験番号4の最大圧力の方が低いことが分かる。また、実験番号1と実験番号5の結果を比べても同じことが言える。つまり、実験者の手の温度程度の熱であれば、最大圧力に大きな影響を与える事は無いと言える。しかし、シリンジの材質に銅やアルミニウムなどの、ポリプロピレンよりも熱伝導率の高いものを使用していれば最大圧力に対する影響は大きくなる可能性がある。

2.2.2 節の説明にもあるように、今回のそれぞれの実験ではピストンを押す速さは同一条件になるように心掛けた。その結果は Table 2-3-1 の圧縮時間より分かる。しかし、それぞれの実験における最大圧力には差が生じている。特に実験番号1と実験番号4の差は大きい。以下に、それぞれの実験における最大圧力をまとめたグラフを示す。

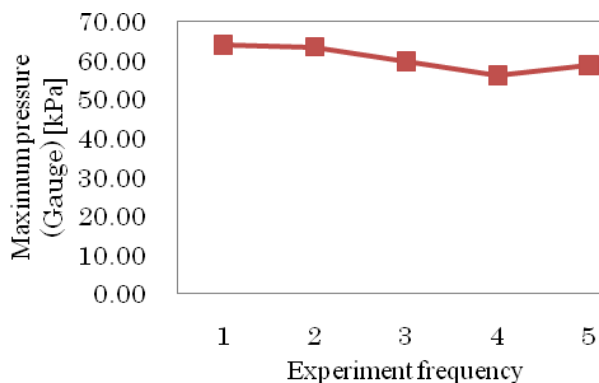


Fig.2.3.1 Result of maximum pressure

Fig.2.3.1 より、最大圧力のバラつきが大きいことが分かる。これは、第1章の結論で既述したように、圧縮開始のピストンの位置を実験者が目視で設定するため、圧縮比に変化が生じて起きたバラつきであると考えられる。これより、ストッパー付きの、圧縮を手動で行うタイプの実験教材は再現性が乏しいと言える。

2.4 結論

- ・手動で実験を行う場合、シリンジを持つ手の温度は無視できる。
- ・シリンジの材質の熱伝導率が高ければシリンジを持つ手の温度が最大圧力に影響する可能性がある。
- ・ストッパー付きの、圧縮を手動で行うタイプの実験教材は再現性が乏しい事が裏付けられた。

この章では実際に作製した装置を使用して圧縮実験を行い、得られた実験結果の考察と圧縮装置の評価を行う。

3.1 実験目的

自作した実験装置を用いて実験を行い、データの整理を行う事によって実際の熱力学の授業で装置がどのように役立てられるかを検証する。また、最大圧力やポリトロップ指数より、装置の評価を行う。

3.2 実験方法

3.2.1 実験装置

以下に今回使用した実験装置の全体図と圧縮装置の外観を示す。



Fig.3.2.1 Overall view of pilot machine

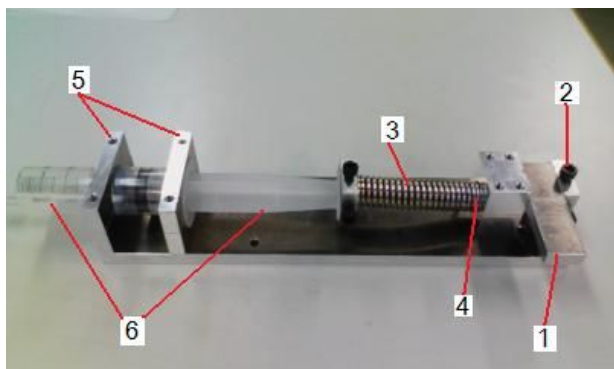


Fig.3.2.2 Appearance of compression equipment

Fig.3.2.2 に示した圧縮装置の仕様と各部名称を以下に示す。

Table 3-2-1 Specification at spring constant 3.08N/mm

Compression time [s]	0.018
Size [mm]	70×365×55
Weight [g]	1100
Price [¥]	10925

Table 3-2-2 Each part name of machine

1	Spacer
2	Stopper
3	Spring
4	Ball spline
5	Injection syringe holder
6	Injection syringe

部品番号4のボールスプラインの外観を以下に示す。



Fig.3.2.3 Appearance of ball spline

シリンジホルダーはシリンジの固定位置を2段階に調整できる。また、ボールスプライン軸を固定しているパーツもその位置を3段階に調整する事が可能であり、全長の違うバネを使用する際に容易に調整が行える構造となっている。さらに、スプライン軸に取り付けられたストッパーも任意の位置で調整する事が可能であるため、圧縮比の変更も行う事が出来る。

前章の参考実験ではシリンジのピストンの先端が変形する事から、容積の補正値を計算して圧縮終わりの容積を補正した。本実験では容積の補正は行わず、ピストンの先端が変形しないように構成部品に改造を施した。改造の内容は、ピストン先端部のゴム部品の内側に設けられた空洞部を厚紙で埋めるという簡単なものである。以下に、厚紙をゴム部品の空洞部の形状に合わせて取り付けの様子を示す。この改造によってピストンの先端はほとんど変形しなくなった。



Fig.3.2.4 Remodeling of piston top

3.2.2 実験手順

まず安定化電源の電圧を、圧力センサの起動電圧である 12~28VDC に設定する。電圧を設定した安定化電源に圧力センサを接続し、圧力センサにデータロガーのプローブを接続する。圧力センサの計測部はシリンジの先端に接続する。全ての接続が完了したらデータロガーの電源を入れ、START/STOP ボタンを押してデータ収集を開始する。

データの収集が開始されたら圧縮装置に挟まれた、目標ストローク分の幅をもつスペーサーを引き抜く。それにより圧縮されたバネが開放され、ピストンが圧縮方向へ移動する。圧縮が完了したらデータロガーの START/STOP ボタンを長押ししてデータの収集を停止する。実験は一つの条件に対して 6 回行う。

3.2.3 実験条件

以下に本実験の実験条件を示す。

Table 3-2-3 Experimental conditions

Room temperature [K]	296
Humidity [%]	27
The atmospheric pressure [hPa]	1017

3.3 本実験の結果と考察

本実験では、4 種類のバネを使用してそれぞれのバネ定数において圧縮実験を行い、データを収集した。以下に実験の結果を示す。

Table 3-3-1 Experimental results

Spring constant [N/mm]	Compression time [s]	Polytropic exponent in the PV diagram	Maximum pressure [kPa]
4.23	0.018	1.089	43.58
3.08	0.018	1.081	43.21
2.66	0.020	1.080	43.12
2.33	0.020	1.078	43.06

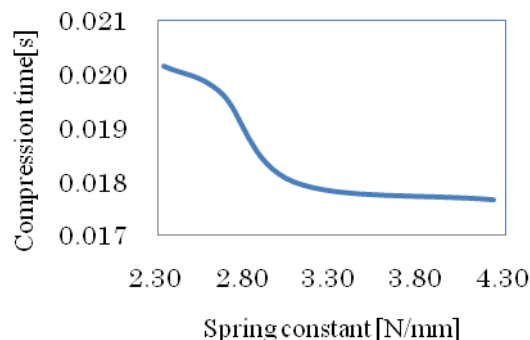


Fig.3.3.1 Relation between constant of spring and compression time

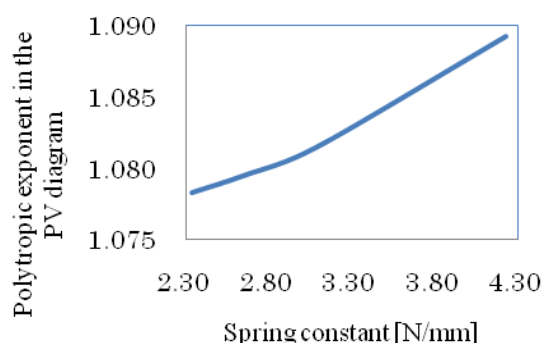


Fig.3.3.2 Relation between constant of spring and polytropic exponent in the PV diagram

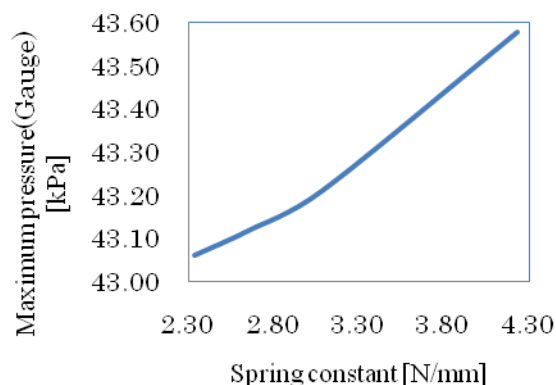


Fig.3.3.3 Relation between constant of spring and maximum pressure

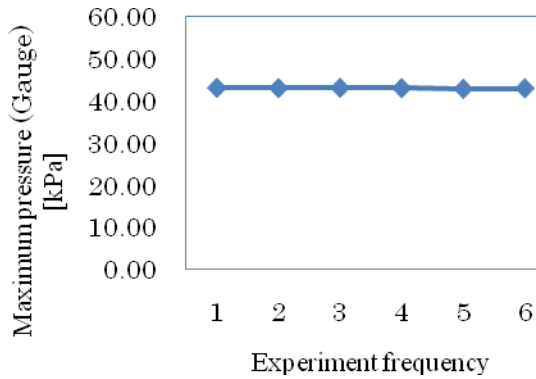


Fig.3.3.4 Reproducibility of experiment on spring constant 2.33N/mm

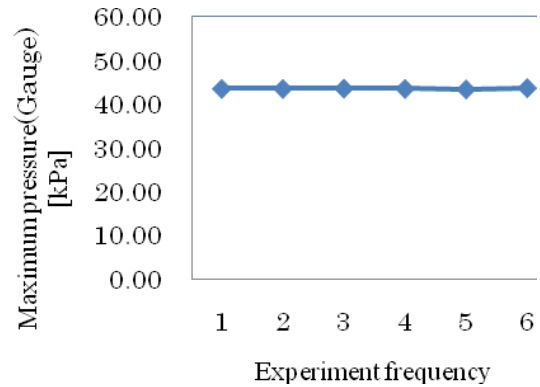


Fig.3.3.7 Reproducibility of experiment on spring constant 4.23N/mm

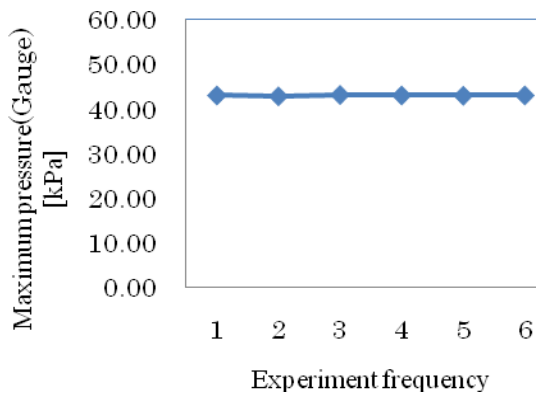


Fig.3.3.5 Reproducibility of experiment on spring constant 2.66N/mm

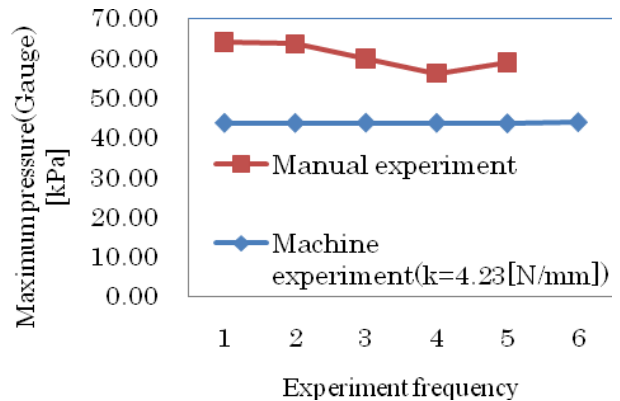


Fig.3.3.8 Comparison between manual experiment and machine experiment

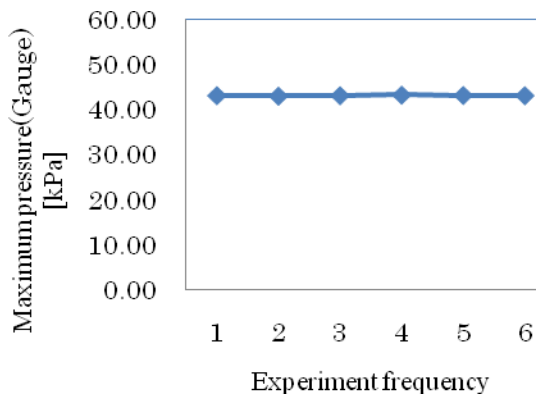


Fig.3.3.6 Reproducibility of experiment on spring constant 3.08N/mm

Table 3-3-1 に示す条件毎の値は平均値である。Table 3-3-1 と Fig.3.3.2 と Fig.3.3.3 より、バネ定数が小さな値になるほど、ポリトロープ指数と最大圧力も小さな値となっている事が分かる。これはバネ定数が小さくなった事により、圧縮完了までの時間が長くなったことが原因していると考えられる。バネ定数と圧縮時間の関係は Table 3-3-1 と Fig.3.3.1 に示す。圧縮完了までの時間が長くなったために、圧縮された空気の熱がシリンジの外へより多く放熱したと考えられる。この実験教材に温度センサが取り付けられていれば温度変化の観点から考察が可能になると考えられる。しかし今回選定した温度センサでは応答性が 100ms であるために、圧縮時間が 100ms に満たない実験の温度計測を行う事は困難である。仮に温度計測を行ったとしても温度の観点からの考察や評価は難しい。より細い線径の応答性が 2ms 以下の温度センサは存在していて、圧縮時間に対応した適切な温度計測が期待できるが、本実験で使用したデータロガーの温度計測ユニットの最速サンプリング周期が 100ms であるので、現状で

は変化に応じた温度の計測は不可能である。より速いサンプリング周期をもったユニットが存在すれば正確な温度計測が期待できる。しかしながら、ポリトロープ変化においては圧力値を得る事が出来れば、ポリトロープ指数を求めて考察を行う事が出来るため、温度計測の重要性は薄いと云える。

Fig.3.3.4～Fig.3.3.7 は実験の再現性を示している。それぞれの条件において、6回の計測を行ったが、それらの値はほぼ水平な線となる。また、Fig.3.3.8 は圧縮を手動で行った第 2 章の実験結果とバネ定数 4.23N/mm のバネを使用した本実験の結果を比較したものである。これより、圧縮の作業を自動的に行ったことが実験の再現性に大きく貢献していると考えられる。

さらに、これまでの実験において、データロガーから得た圧力数値をパソコンに取り込み、筆者が自らデータ整理を行ってきた。データ整理を行う際にはポリトロープ指数の関係式や(5.1)式を使用した。これにより、関係式の理解や現象の理解が深まった。筆者が行ったデータ整理の過程を実際の授業で学生に体験してもらう事で、現象や関係式の理解への貢献が期待できる。

第4章 結言

本研究では、実際に実験教材となる装置を製作し、実験を行った結果以下の結論を得た。

- (1) バネ定数の増加と共にポリトロープ指数も増加する。
- (2) 実験の結果を数値データとして得る事により、実験値に基づいた考察が可能となった。
- (3) 実験装置に温度センサがあれば考察の視点が增える。
- (4) 正確な温度計測を行うためには、より速いサンプリング周期のユニットが必要である。
- (5) ポリトロープ変化においては、圧力値が分かればポリトロープ指数を計算して考察する事が出来るため、温度計測の重要性は低い。
- (6) 圧縮を自動的に行う事で再現性に優れた実験を行う事が出来た。
- (7) データロガーより得たデータを学生自らが整理する事により、現象や関係式の理解に役立つ事が予想される。