

「熱力学の実験教材の開発」

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

1.背景

金沢工業大学では2年次の後学期において、熱力学の授業が開講されている。この授業では熱力学の基礎について学習する。しかしながら授業で学習する気体の状態方程式や内部エネルギーの変化など、教科書や黒板で教えて理解したつもりになっていても、現象のイメージが頭の中に浮かばず、実際には数式を覚えて問題を解けるだけで現象そのものを理解できていないという事がある。また、大学の授業で実験器具を使用した現象の再現や解説は行われる機会はほとんどなかった。そこで、授業で学習する現象を実際に再現する事が可能な実験教材を開発し、現象の理解を容易にできる実験が望まれている。

2. 実験目的

今回の実験では気体の状態変化の理解を題材に取り上げる。気体を圧縮・膨張させた際の圧力の変化や、気体に熱を与えた際の圧力の変化や体積の変化は直接目で見て把握することは出来ない。そこで、本実験ではそれらの変化を目で見て容易に把握できる実験装置を用いて実験を行い、気体の状態変化を実際に体験する。

3. 実験装置

3.1 シリンジ¹⁾

本実験において、気体を自在に圧縮したり膨張させたりする事を可能とするため、シリンジを用いるものとする。また、シリンジの材質はポリプロピレン製とする。一般市場に流通しているポリプロピレン製シリンジの中でも容量目盛の精度や機密性が高いと考えられるのは医療用のシリンジである。医療用ポリプロピレン製シリンジは、インターネットを利用した通信販売でも入手が可能である。また、JIS 規格品であれば精度の高さがより望めると考える。実際に JIS T3210 で、医療用シリンジの容量の許容差は 5ml 未満のもので $\pm 5\%$ 、5ml 以上のもので $\pm 4\%$ と定められている。さらに、ポリプロピレンの耐熱温度は 393.15K となっている。本実験ではテルモ(株)製の容量 50ml のシリンジを使用する。以下にシリンジの外観を示す。



図1. テルモ(株)製シリンジ

3.2 温度センサ

温度センサは、気体の温度変化を測定するために使用する。また、気体の状態変化を断熱状態に近い領域で観察できる様に出来るだけ応答速度の速い温度センサを用いる事とする。本実験では(株)アンベエスエムティ製の熱電対を使用する。以下に外観と諸元を示す。



図2. 汎用熱電対 KMG-100-100-100²⁾

表1 汎用熱電対 KMG-100-100-100²⁾

使用熱電対	K型熱電対
応答時間	0.1sec (空気中)
常用限度	300℃
先端線径	100μm
価格	3000円

この熱電対の線径は表1を見ても分かるように 100μm となっている。これは人間の髪の毛よりも少し太い線径である。

3.3 圧力センサ

圧力センサは、気体の圧力変化を測定するために使用する。また、温度センサと同様に応答速度の速いもの(応答速度 5ms 程度のもの)を用いる事とする。本実験では(株)センシズ製の圧力センサ HTV-300KP を使用する。以下に使用するセンサの外観と使用を示す。



図3. 圧力センサ HTV-300KP ³⁾

表2 圧力センサの仕様³⁾

定格圧力	0~300kPa
圧力の種類	ゲージ圧
応答性	5msec 以下
使用温度範囲	-10~80℃

3.4 データロガー

圧力・温度センサからの信号を記録するためにデータロガーを使用する。本実験で使用するデータロガーは(株)キーエンス製の NR-600 シリーズを使用する。圧力測定に使用する NR-HV04 のサンプリング周期は 1ms である。温度計測に使用する NR-TH08 (高精度温度電圧計測ユニット) のサンプリング周期は 100ms となっている。

3.5 ヒーター

気体の状態変化を観察する実験において気体に熱を与えるために使用する株式会社八光様のヒーターを使用する考えている。

3.6 圧縮装置

シリンジの押子を自動で押すことの出来る装置を使用する。この装置を用いることで、何度も操作してもシリンジ内の空気を同じスピード、同じ圧縮比で実験を行えるような再現性を持たせる。圧縮比は可変式とし、条件を変化させる事が可能な実験装置とする。本実験で使用する圧縮装置は自作する。装置はシリンジホルダーとボルヌスライン軸とバネによって構成される。圧縮比の設定はスライドスイッチによって行うものとする。装置の組立図を次に示す。

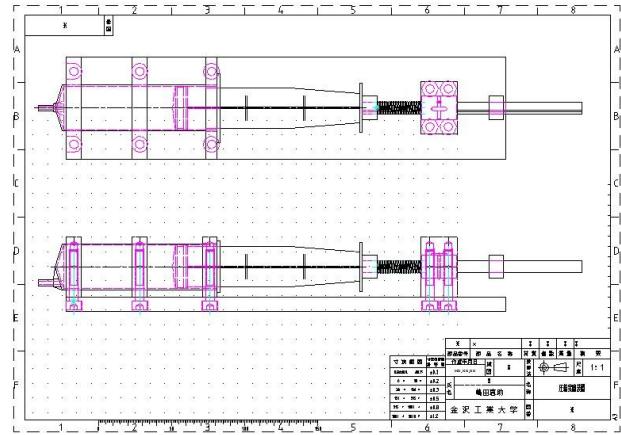


図4. 圧縮装置組立図

4. 実験内容

本実験では以下の内容について実験を行い、現象を体験する。

4.1 理想気体の状態方程式⁴⁾

理想気体の状態方程式は物質量 n [mol] の気体の圧力を p [Pa], 体積を V [m³], 温度を T [K] とすると次式の様に表すことが出来る。

$$pV = nR_0 T \quad (4.1)$$

4.2 断熱変化⁵⁾

断熱変化は系と周囲との間に熱の出入りが無い変化である。また、断熱変化はポアソンの法則に従って変化が起こる。以下にポアソンの法則を示す。

$$pV^\kappa = \text{一定} \quad (4.2)$$

$$TV^{\kappa-1} = \text{一定} \quad (4.3)$$

(4.2)式において、 p は気体の圧力、 V は気体の体積、 κ は気体の比熱比である。(4.3)式において T は気体の温度、 V は気体の体積、 κ は気体の比熱比である。断熱変化は気体を圧縮すれば気体の圧力 p と温度 T は上昇し、気体を膨張させれば気体の圧力 p と気体の温度 T は下降する現象である。本実験では気体を圧縮または膨張させ、断熱変化と実際の測定値との比較を行う。

5. 実験結果

当初の予定では 3.6 節で示した実験装置を使用して圧縮・膨張の実験を行う事となっていた。しかし、膨張の自動化を行う事が難しく、圧縮のみの装置に変更したが実験装置がまだ完成していない。また、温度センサに関しては応答速度の速いセンサとサンプリング周期の速いアンプがなかったため、今回は圧縮における圧力変化のみを測定した。

圧力の測定はシリンジの押し子にストップバを設け、任意の容積で押し子が止まるように設定した。以下に今回の実験の全体図とシリンジのストップバの様子を示す。

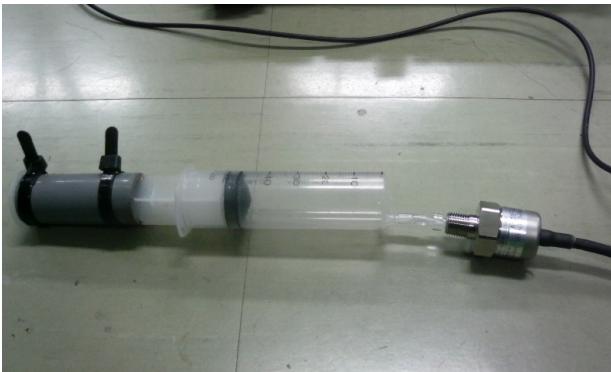


図5. 押し子に設けたストップバ

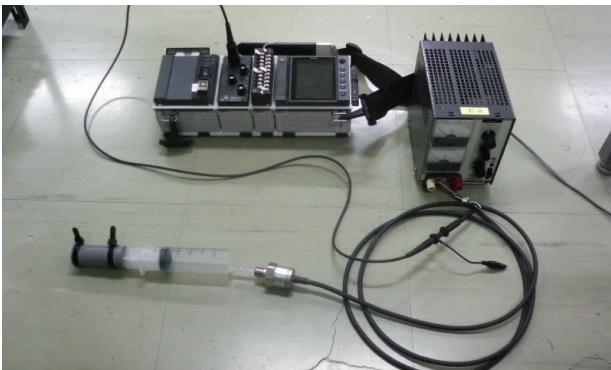


図6. 実験の全体図

図6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。また圧力センサは電圧計とデータロガーに接続されている。

5.1 実験から得られたデータ

今回の実験は複数人に協力してもらい、交代でシリンジの押し子を圧縮して実験データを探った。行程は51[ml]から 35[ml]までの圧縮である。圧縮実験によって得られたデータをグラフとして以下に示す。

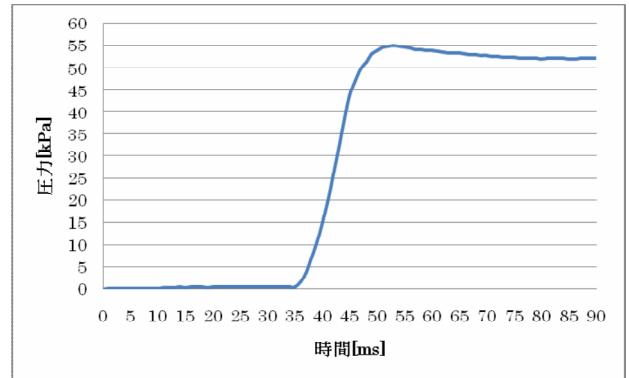


図7. 圧縮実験①

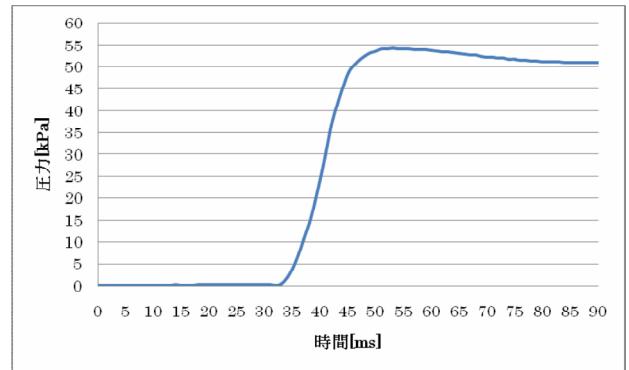


図8. 圧縮実験②

図7と図8を見ると分かるように実験①と実験②では圧縮開始から完了まで約 15[ms]の時間がかかっている。さらに、それぞれの実験において、最高圧力は約 55[kPa]となっている。

6. 考察

今回行った圧縮実験は断熱圧縮と仮定している。断熱変化は(4.2)式で表すことが出来る。この式において κ は気体の比熱比である。また、(4.2)式は以下の様なポリトロープ変化の式として表す事が出来る。

$$pv^n = \text{一定}$$

$$p_1 v_1^n = p_2 v_2^n$$

$$p_2 = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^n \times p_1 \quad (6.1)$$

これより、圧縮終りの圧力を計算する事が出来る。断熱変化であれば $n=1.4$ となるので、 $P_1=101.3[\text{kPa}]$ として今回の実験の理論値を計算すると

$$p_2 = \left(\frac{51}{35} \right)^{1.4} \times 101.3 \\ = 171.6[\text{kPa}]$$

となる。今回の実験で得られたデータはゲージ圧なので、上記の値から大気圧を引くと

$$P_G = 171.6 - 101.3 \\ = 70.3[\text{kPa}]$$

となる。これより、理論値と実験値には約 15[kPa]の差が生じている事が分かる。つまり今回の実験が断熱圧縮と仮定されていて、断熱圧縮が行われたわけではない事がわかる。さらに、実験より得られた圧縮終りの圧力に理論値を漸近させていくと $n=1.15$ となり、計算したゲージ圧は 54.88[kPa]となった。

7.結論

温度センサについて

- 一般的に流通している熱電対では応答速度が遅く、温度のデータから考察をする事は難しい。
- 圧力センサと同等の応答速度の熱電対で実験を行おうとすると高コストとなる。
- 熱電対の応答速度を速くするには線径を細くする必要があるが、線径が細すぎると取扱いが難しくなり、学生が使用する実験装置には向かない。

圧力センサについて

- 圧力センサは応答速度が速く、比較的低コストで実験を行う事が出来る。
- 今回使用した圧力センサは応答速度が 5[ms]のものであるが、データロガーのサンプリング周期が 1[ms]であるので、より応答速度の速いものを使用すれば圧力の計算結果は大きな値を示す可能性がある。
- 今回の実験のような圧縮速度であれば圧力センサの応答速度は 5[ms]で十分である。

圧縮装置について

- 圧縮を自動で行う装置があれば、実験の再現性が高くなる。
- 実験装置があることで、学生が圧力の変化と容積の変化と圧縮スピードの関係性を身近に体験する事が出来る。
- データロガーを用いることで、実験をしたその場でデータを整理し、視覚的に熱力学を学習することが容易となる。

8.今後の計画

今後の計画として、現時点で未完成となっている圧縮装置を完成させ、実験を行いデータを得る。また、圧縮スピードの速さから熱電対から有効なデータは得ることは出来ないと考えるが、参考のために温度のデータを採る予定である。さらに今回手動による圧縮実験で参考となるデータを得ることが出来たので、これを基に自動圧縮装置を授業で実際に使用できるような装置に仕上げる。

参考文献

- 日本規格協会、JIS ハンドブック医療機器□、日本規格協会、2008 年、p69～p80
- 株式会社アンベエスエムティ、
(<http://www.anbesmt.co.jp/index.html>)
- 株式会社センシズ
(<http://www.sensez.co.jp/>)
- 小口幸成ほか、熱力学、朝倉書店、2006 年、p37
- 門田和雄、長谷川大和、熱工学がわかる、株式会社技術評論社、2008 年、p99～p109