

高等学校物理における熱力学等圧膨張装置の開発

Development of an educational tool for the experiment on isobaric expansion in physics of high school level

笠置歩、仲澤和馬

Kasagi Ayumi and Nakazawa Kazuma

〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1 岐阜大学教育学部 理科教育講座(物理学)

TEL 058-293-2245 (Email : ayumikasagi@gmail.com)

要旨

高等学校物理の熱力学を学ぶとき、数式を扱い問題演習をするだけでは、熱が仕事へ変換されることや、作業物質の温度が上昇することをイメージするのは難しい。実験を通して、熱が仕事や内部エネルギーへ変換されていく様子を観察しデータを分析することにより、この分野の問題を考える力や、応用する力が育まれる。そこで熱量・内部エネルギー・仕事の関係を、電子機器によるリアルタイムのモニタリングで可視化するとともに、得られたデータを解析できる教材を開発した。

1. はじめに

現行の高校理科学習指導要領において物理の学習範囲は、(1)様々な運動、(2)波、(3)電気と磁気、および(4)原子と、4つに大別されており、熱力学は(1)に位置付けられている。しかしいくつかの教科書では、(1)の運動から熱力学を取り出して第2編とし、5つに分けている^[1]。本稿では熱力学に関わる学習の教材開発と授業への適用について議論する。

高等学校物理の土台となる中学校理科では、平成30年度にスタートする中学校理科学習指導要領^[2]において、熱力学につながるエネルギーの分野で以下に示す能力を育むことが求められている。

- (ア) 様々なエネルギーとその変換に関する観察、実験などを通して、日常生活や社会では様々なエネルギーの変換を利用していることを見いだして理解すること。また、人間は、水力、火力、原子力、太陽光などからエネルギーを得ていることを知るとともに、エネルギー資源の有効な利用が大切であることを認識すること。
- (イ) 日常生活や社会で使われているエネルギーや物質について、見通しをもって観察、実験などを行い、その結果を分析して解釈するとともに、自然環境の保全と科学技術の利用の在り方について、科学的に考察して判断すること。

これらの要点は、高等学校の次期学習指導要領にも導入されると考えられる。

熱力学に関連する事象は、我々の身近に日常的に存在する。現在、自然科学の課題となっているエネルギー問題の基本を理解するためには、熱力学を学ぶことが不可欠である。しかし高等学校物理における熱力学の授業では、他の分野に比べ演習実験をする機会が少ない。それは、熱力学に登場する多くの数式や定理が、理想気体や断熱変化を要請し、再現することが困難と考えられるからである。また、実験器具メーカーが販売している実験装置の種類は少なく、それらの価格帯も5万円から60万円程度と高額なものが多い。したがって、熱エネルギーの収支が明瞭で、かつ低価格な教材が必要である。そこで、熱力学第一法則を中心に、密封された空気に熱を与えた際の外部への仕事と内部エネルギーの増加を測定できる装置を開発し、教材化を検討した。

2. 実験の原理

熱力学第一法則によると、ある熱機関における断熱変化では、与える熱量を ΔQ [J]、内部エネルギー

一の増加を ΔU [J]、熱機関が外部に行う仕事を ΔW [J]とすると、

$$\Delta Q = \Delta U + \Delta W \quad (1)$$

が成り立つ。ここで作業物質を空気とすると、窒素と酸素の含有率が高いので、二原子分子理想気体と仮定できる。物質量を n [mol]、温度変化を ΔT [K]とし、気体定数 R [N·m/(mol·K)]を用いると、

$$\Delta U = \frac{5}{2}nR\Delta T \quad (2)$$

となる。また、等圧で膨張する際の体積変化を ΔV [m³]、圧力を P [N/m²] (一定) とすると、

$$\Delta W = P\Delta V \quad (3)$$

である。断熱変化の下で、熱量 ΔQ が全て外部への仕事と内部エネルギーの増加のみに使われるのであれば、 ΔT と ΔV の測定により、

$$\Delta Q = \frac{5}{2}nR\Delta T + P\Delta V \quad (4)$$

なる関係が成り立つであろう。単位時間当たりの外部からの熱の供給が一定であれば、内部エネルギーと外部への仕事の増加量： $\Delta U + \Delta W = \Delta Q_{exp}$ は供給する時間に比例するので、熱の供給時間を t [s]とすると $\Delta Q_{exp} = \alpha t = \Delta Q$ (α は定数) となるはずである。しかし実際には、装置からの熱の散逸 (放熱) により、

$$\Delta Q_{exp} < \Delta Q = \alpha t \quad (5)$$

となることが予想される(付録 A1)。

装置開発では、供給する熱量 ΔQ 、温度変化 ΔT 、および体積変化 ΔV を測定し、式(4)が成り立つ時間帯を求めた。

3. 実験装置

開発した装置のサイズは、外形で縦×横×高さ = 120 × 120 × 280 mm³であり、内部は90 × 90 mm²の断面を持ち、図 1(a)では全体像を示し、内部の構造を図 1(b)に示す。

ビニール袋で密閉した空気を、点灯する白熱電球が発する熱で加熱する。この加熱により密閉した空気が膨張する際の体積変化を測り、これを ΔV とする。ビニール袋は、大気圧を受けるピストンによって上から押されているため等圧膨張する。体積変化は、30 秒ごとにピストンの上昇を計測してとらえる。この上昇を、1 mm 刻みの物差しを使い、目視で 0.1 mm の精度で測れば、理想的には 8.1×10^{-7} m³の精度で体積変化が計測される。

ビニール袋の上部に配置した温度センサーで、袋内部の空気の温度変化を測定し、これを ΔT とする。温度変化はセンサーによって 0.01°Cの精度で計測される。

ΔV 、および ΔT から、作業気体が行う外部への仕事 ΔW 、および作業気体の内部エネルギーの増加 ΔU を算出し、供給した熱量 ΔQ との比較が可能となる。

しかし前述のように、実際には実験装置の断熱の不十分さゆえに装置からの放熱が起こるので、 $\Delta Q_{exp} = \alpha t$ の線形近似が成り立たず、熱力学第一法則が成り立っていないように見えることになる。したがって、本装置を用いる授業では線形近似が成り立つ範囲を実験で扱い、発展的な内容として、熱力学第一法則が成り立っていないように見える原因である装置からの放熱を扱うこととする。

図 2(a)~(f)には各部分の詳細を示した。本装置では熱源として 60 W の白熱電球を用いた。また PC ファンは送風によって装置内で温度勾配ができることを防ぐ。

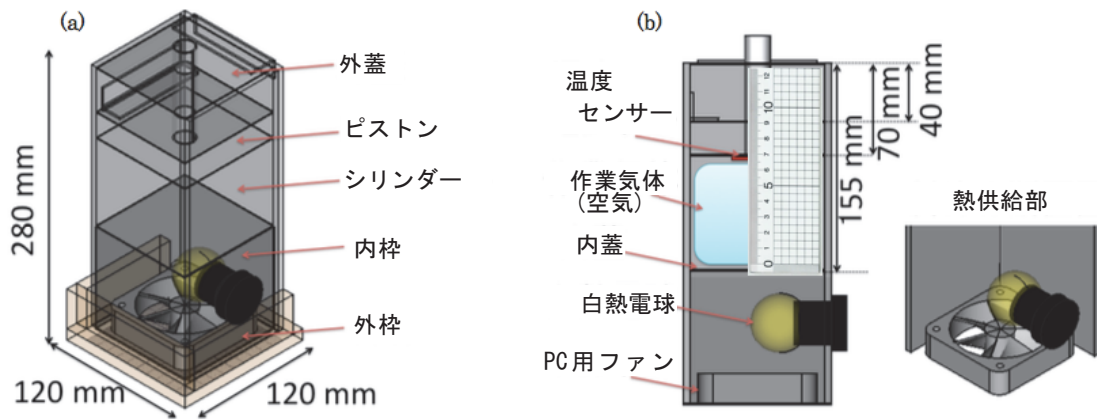


図1 装置の全体像(a)と内部構造(b)

まず、装置の外枠は木製で、シリンダーを外側から囲うような形となっており、図 2(a)のようである。内枠は図 2(b)で示すようにプラスチック製ケースの上面を切り取ったような形になっており、内部に熱源や PC ファンを内蔵する。シリンダーは、図 2(c)に示すように横幅の異なる亚克力板の 2 枚ずつで構成される。亚克力板は、内枠と外枠とで挟んで仮に固定され、外すことができる。底面と平行にピストンが運動するように 2 枚のガイドを設けた。その一つである外蓋は図 2(d)のようであり、プラスチック板と金属製の蝶番によってつくられている。熱源からの放熱を作業気体である空気が受け取って膨張する際に、図 2(e)に示すピストンがシリンダー内の蓋となって空気が入った袋を押す。袋に加わる圧力は、ピストンが軽いのでその重力に起因するものを無視できるとすると、内部の空気は常に一定の大気圧を加えられながら膨張する。すなわち、等圧膨張させることができる。温度・圧力測定には、BME280 という形式のセンサーを用い、作業気体が封入された袋とピストンの間に設置した。温度の測定可能範囲は -40 から $+85$ °C (誤差: ± 1 °C)、気圧の測定範囲は 300 hPa から 1100 hPa (誤差: ± 1 hPa) である。分解能は、それぞれ 0.01 °C、 0.18 hPa であった。このセンサーが測定した信号をテキストとして、PC に出力するのがマイコンボードの Arduino(互換機)である。Arduino と BME280 の接続回路を図 2(f)に示す^[3]。

実験装置の製作に使用した材料などの概要を表 1 にまとめ、組み立てた装置での測定の様子図 3 に示す。

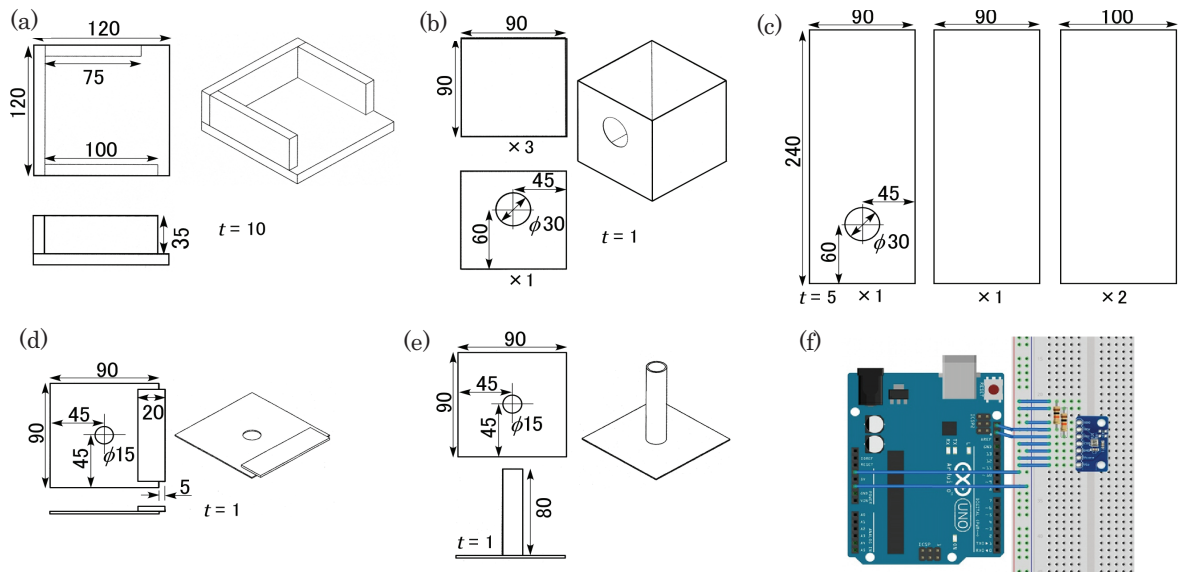


図2. 装置の各部[mm] : (a)外枠、(b)内枠、(c)シリンダー、(d)外蓋、(e)ピストン、(f)BME280 と Arduino の回路図

表 1 装置製作に使用した、材料等名、個数、サイズ、購入先、価格など

材料名	個数	サイズ (縦横高さ mm)	購入先、価格
アクリル板 (シリンダー)	4	240, 100, 5	モノタロウ、2980 円
プラスチックケース (内枠)	3	90, 90, 90	100 円ショップ、324 円
アルミパンチング (内枠の蓋)	1	90, 90, 0.5	モノタロウ、862 円
金属棒 (ピストン)	1	長さ 85 mm 半径 7.5 mm	モノタロウ、249 円
PC ファン (空気循環装置)	1	70, 70, 20	学内、約 1000 円 (参考)
木材 (外枠)	1	140, 120, 10	学内、約 1000 円 (参考)
電球 (熱源)	1	E26(口金) 半径 20 mm	ホームセンター、378 円
ソケット	1	E26(口金) コード 1 m	ホームセンター、1296 円
鉄製蝶番 (固定具)	2	80, 20, 2	ホームセンター、822 円
ブレッドボード (回路)	1	80, 45, 8	Amazon、668 円
ジャンパーワイヤー (回路)	100	ピッチ 2.54 mm 長さ 200 mm	Amazon、680 円
Arduino UNO(互換機)	1	70, 60, 12	Amazon、458 円
BME280(温度センサー)	1	10, 16, 4	秋月電子、1080 円
ジップロック (作業気体の封入)	1	200, 180, 厚さ 0.5	ホームセンター、345 円
断熱シート (装置内部の断熱)	1	900, 1800,	Amazon、1690 円

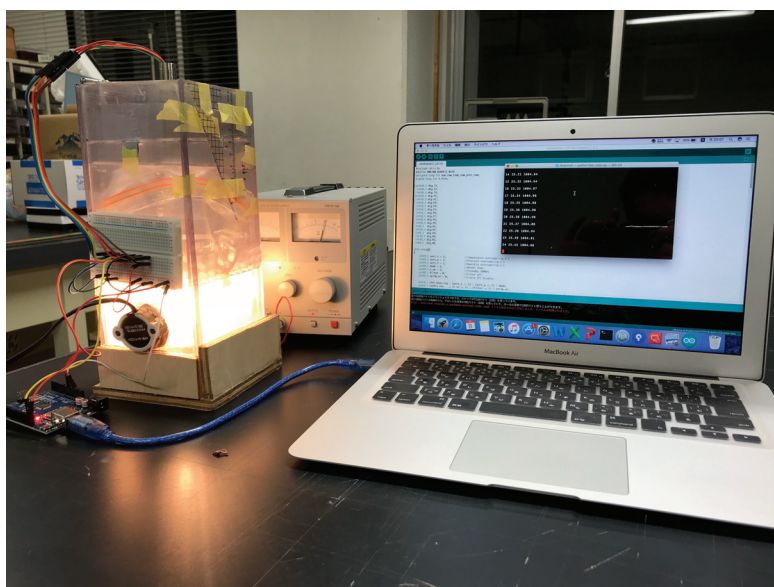


図 3. 組み立てた装置で測定中のようす

4. 教材としての利用

教材として以下のような利用を提案する。

4-1 手順

まず、作業気体として用いる空気をジップロックに封入する。ジップロックは横 18 cm、縦 20 cm 程度の大きさのものを用いる。この袋に空気を 7 割程度入れ、漏れないように口を熱で溶かして圧着し密封する。ここで封入する空気が多すぎると袋が変形しにくくなり、シリンダーの内壁とうまく密着せず、空気の膨張がピストンの上昇へとうまく伝わらなくなる。

次にアクリル板の一边を外し、シリンダー内の内蓋とピストンとの間に袋を入れる。アクリル板を元に戻し、周りをマスキングテープ等で貼り付けてシリンダーを固定する。そしてピストンを上から手で押さえ、空気の入った袋をシリンダーの内壁と密着させる。この時、図 1(b)のようにシリンダーの外壁に貼り付けた定規により、内蓋からピストンまでの距離を測り h_0 [mm] とする。 h_0 の目安は 80 mm から 90 mm 程度である。 h_0 とシリンダーの底面積 S [m²] から、気体の初期体積 V_0 [m³] を算出し、気体の物質質量 $n = V_0/0.0224$ [mol] を求める。

その後、センサーの配線や、PC ファンと電源装置を配線し、PC を立ち上げてデータの読み取りが可能かテストする。ここで、教室内(装置外)の温度 T_0 と大気圧 P [N/m²] を測定し、記録しておく。

センサーの読み取りを開始させた後に熱源の白熱電球を点灯させ、その直後から 30 秒ごとに 300 秒までピストンの位置 h [mm] の値を記録する。センサーからの空気の温度情報 T [°C] は PC に記録され、これとピストンの位置 h から、 $\Delta V = S(h - h_0) \times 10^{-3}$ [m³]、 $\Delta T = T - T_0$ [K] を算出することができる。

表計算ソフト等を用いて、結果をまとめると良い。 $\Delta W = P\Delta V$ 、 $\Delta U = \frac{5}{2}nR\Delta T$ に従って計算し、気体が受け取ったと測定される熱量 ΔQ_{exp} を算出する。参考に、 $h_0 = 87.5$ mm、 $P = 1.020 \times 10^5$ N/m²、 $S = 8.1 \times 10^{-3}$ m²、 $n = 0.032$ mol、 $T_0 = 19.90^\circ\text{C}$ で測定した際の結果、および加えた熱量を表 2 に示す。

表 2 測定結果と加えた熱量

時間 t [s]	T [°C]	h [mm]	ΔV [m ³]	ΔT [K]	ΔW [J]	ΔU [J]	ΔQ_{exp} [J]	ΔQ [J]
0	19.90	87.5	0	0	0	0	0	0
30	20.34	87.9	3.24×10^{-6}	0.44	0.330	0.289	0.620	0.5
60	20.91	88.1	4.86×10^{-6}	1.01	0.496	0.664	1.160	1.0
~~中略~~								
240	24.18	83.7	11.34×10^{-6}	4.28	1.157	2.840	3.970	4.0
270	24.64	83.6	12.15×10^{-6}	4.74	1.239	3.181	4.355	4.5
300	25.09	83.0	14.58×10^{-6}	5.19	1.487	3.471	4.898	5.0

4-2 考察

経過時間と ΔQ_{exp} のデータから図 4 に示すようなグラフが得られる。本装置では付録 A3 で議論するように、300 秒までの測定で線形近似が成り立つことがわかっている。したがって、グラフの原点を通りより多くの点との距離が小さくなるような直線を引けば、熱量 ΔQ_{exp} が得られる。一方で、本装置の熱源の電球は 60 Wh なので、ここから供給された熱量 ΔQ との比較が可能である。表 2 および図 4 から、熱力学第一法則の式(1)がよく成り立っていることがわかる。またグラフの傾きから、単位時間当たりのエネルギー収支の議論も可能である。

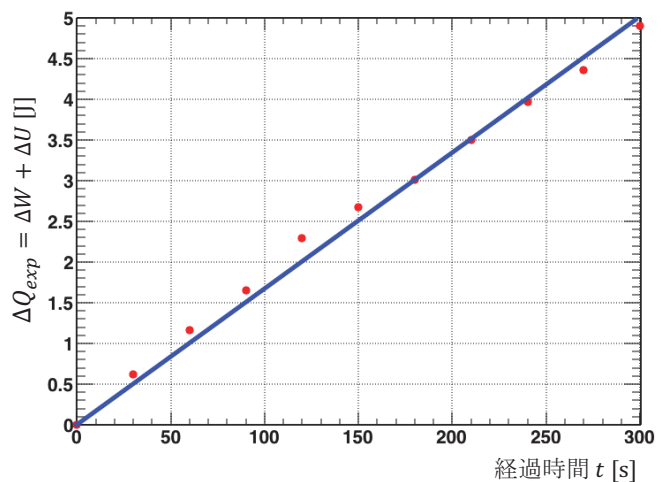


図 4. 30 秒ごとに 300 秒まで測定した仕事と内部エネルギー、およびその近似直線

4-3 発展

発展的な内容として、放熱を本実験装置で扱うことができる。測定開始 300 秒までは放熱を無視できるが、さらに長時間測定すると無視できなくなることがわかる。

300 秒を超えて測定した結果から、熱源が加えた熱量 ΔQ と作業気体が受け取ったと考えられる熱量 ΔQ_{exp} との差の時間経過を図 5 に示す。高温になる（すなわち外気との温度差が大きくなる）につれて放熱が盛んになることがわかる。また、300 秒までの測定で成り立っていた一次関数による近似が、実際の熱機関において常には成り立たないことに気づき、発電機や車のエンジンなど身の回りに存在している熱力学第一法則が成り立たないように見える原因を追求するきっかけとなることが期待される。

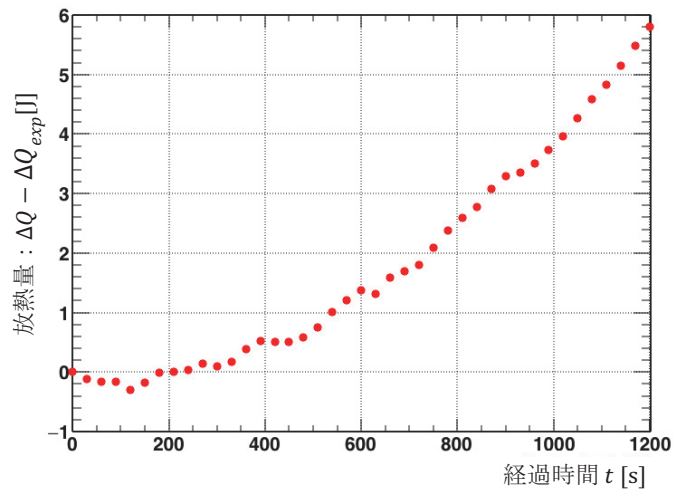


図 5. 放熱量と時間経過

5 まとめ

本装置を用いた実験では、温度センサーによる温度の測定とピストンの上昇による膨張体積の測定により、間接的に作業気体に与えられた熱量を求めることができた。理論に基づくと、与えられた熱量は時間に比例するが、実際には実験装置外部への放熱により、測定から得られる作業気体への熱量 ΔQ_{exp} は指数関数的に変化する(付録 A2)。しかし、実験開始から 300 秒程度の範囲であれば放熱が無視でき、線形近似により作業気体に与えられる熱量を算出することができる。したがって、本装置を用いた授業では 300 秒間の測定とそこから得たデータの解析により、単純な熱機関で実際に熱が仕事や内部エネルギーに変換されるようすを、視覚的かつ数値とともに確認することができる。そのため、熱力学を学ぶ高校生にとって、教科書の数式や問題と現実世界をつなぎ、理解を深めることが期待できる。

さらに、本装置の開発費用は約 1 万円であり、各実験器具メーカーが販売している熱力学実験装置比べて低コストであるため、複数個の導入も可能となる。演習実験用としてだけではなく、グループに 1 つずつ準備できれば、生徒が自ら測定したデータで解析する力をつけることができる教材である。

本装置では、作業気体を入れる袋の密封を優先しているため、コードをつなぐ必要のあるセンサーは袋の外部にある。無線センサーを導入すれば、密閉した袋の中にセンサーを入れることができるため、気体そのものの温度を測ることができるようになる。この費用は、追加で 1 万円程度が必要になる。センサーの内部への設置が可能となれば、装置の耐久性、袋の耐久性と密封が高まると同時に、等圧変化と等積変化を比較するなどの応用も実現し、高校物理で登場する熱力学の事象を観察しながらさらに幅広い理解を促す教材とすることができる。

＝付録＝

A1.1 一次関数による近似

装置外への放熱を考慮せず、時間に比例すると考えたとき、1200 秒までの測定結果を 1 次関数で近似したグラフは図 6 のようになる。3 回の測定はそれぞれ独立である。よって加重平均を用いると、熱と時間の関係は以下ようになる。

$$\Delta Q_{exp} = (12.7 \pm 0.2) \times 10^{-3} t + (2.5 \pm 0.2)$$

算出される作業気体に与えられた単位時間当たりの熱量は $(12.7 \pm 0.2) \times 10^{-3}$ [W]、グラフの切片は 2.5 ± 0.2 となった。熱源から 60 Wh の熱を与えていると仮定すると毎秒与える熱量は 16.7×10^{-3} [W] であり、実験値と熱源の供給量との相対偏差は $\frac{(16.7 - 12.7) \times 10^{-3}}{16.7 \times 10^{-3}} \times 100 = 23.95$ となり 24% である。

したがって、1200 秒間の測定結果を 1 次関数で近似すると、近似式の切片は、 $\Delta Q_{exp} = 0$ を測定誤差の 3 倍以内に含まない。したがって 1200 秒間の測定全体を見ると、線形近似では表現できず、時間と熱量の比例の関係、 $\Delta Q_{exp} = at$ が見出せないことがわかる。

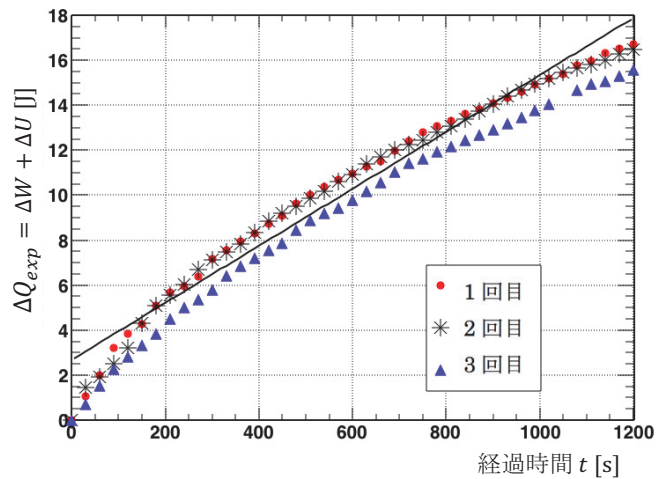


図 6. 与えられた熱量（仕事と内部エネルギー）の 1 次関数による fitting

A2. 指数関数による近似

1 次関数で近似した図 6 を確認すると、データ点が直線的に並んでいない。これは放熱量が外部との温度差に正の相関を持つので、時間の経過と共に袋の中の気体の $\Delta W + \Delta U$ で測定される熱量の増加が減少する。

そこで、水が 100°C で沸騰しそれ以上高温にならないように、外部への放熱により装置内部の温度はやがてある温度で一定になると考えて、指数関数 $\Delta Q_{exp} = a[1 - \exp(-bt)]$ により測定データを近似すると、図 7 のようになり、各パラメータは次のように得られた。近似には、3 回測定の加重平均を用いた。

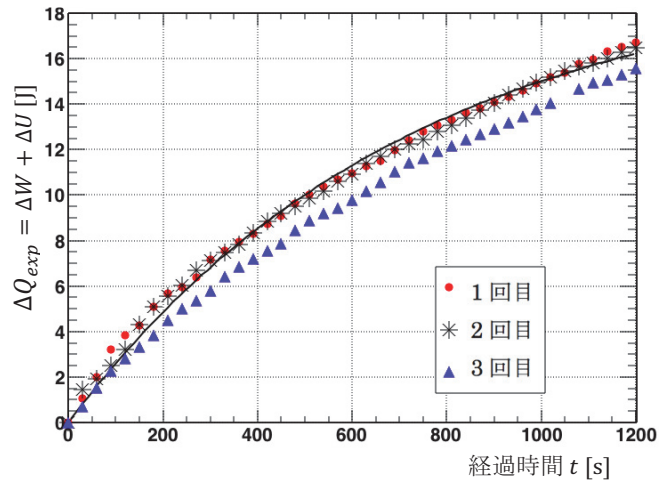


図 7. 与えられた熱量（仕事と内部エネルギー）の指数関数による fitting

$$\Delta Q_{exp} = (19.9 \pm 0.3)[1 - \exp\{(-1.3 \pm 0.4)10^{-3} t\}]$$

$$a = 19.9 \pm 0.3, b = -1.3 \pm 0.4$$

得られた指数関数は、全データ点をよく再現しているように見える。いずれにしても、実際の熱機関では与えられた熱量のすべてが内部エネルギーや仕事へ変換されないこと、それが指数関数で表現が可能であることがわかる。

A3. 1 次関数での近似が成り立つ測定時間帯

本装置では、単純な熱機関で熱力学第一法則が成り立つことを示したい。すなわち、加熱時間と作業気体の受け取った熱量が比例関係になるような、測定時間見出すことにする。

作業気体が受け取ったと測定される熱量と時間とが比例関係、すなわち $\Delta Q_{exp} = at$ で表されるとき、グラフの切片は 0 となる。そこで測定データを 1200 秒から 30 秒ずつ減らし、1 次関数で近似した際の切片とその誤差の 3 倍を調べると図 8 のようになる。測定後 300 秒付近までは、誤差の 3 倍の範囲で切片が 0 となることことがわかり、近似的に放熱を無視できる。

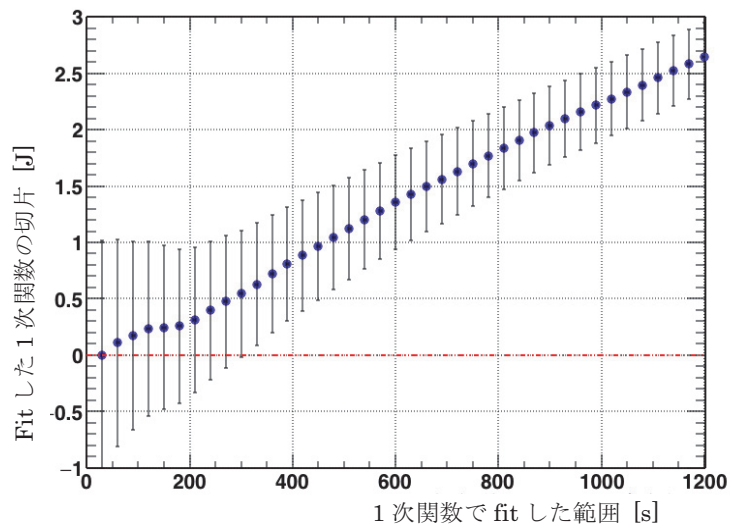


図 8. fit した範囲とグラフの切片、その誤差を測定誤差の 3 倍で表す

参考文献

- [1] 物理 高等学校理科用、文部科学省検定済教科書；数研出版(物理/304)、東京書籍(物理 301)
<http://www.chart.co.jp/goods/kyokasho/30kyokasho/rika/butsuri/>
- [2] 中学校学習指導要領解説 理科編 http://www.mext.go.jp/component/a_menu/education/micro_detail/_icsFiles/afieldfile/2017/10/13/1387018_5.pdf
- [3] BME280 搭載 温湿度・気圧センサモジュールの使い方 スイッチサイエンス
<https://trac.switch-science.com/wiki/BME280>