

取扱説明書 / 学習の手引き

熱力学実験器

TD-8565

この取扱説明書をよくお読みのうえ、安全事項・警告内容を
充分ご理解いただき、正しくご使用ください。
いつでもこの取扱説明書が使用できるように大切に保管ください。



株式会社 島津理化

ご使用に際しての安全上の注意事項

ご使用に際しての安全上の注意事項

この取扱説明書および製品には、安全にご使用いただくためのいろいろな絵表示をしています。その内容を理解することなく誤った取り扱いをすることによって生じる内容を次のように規定しています。

この取扱説明書に記載されている内容をよく理解してからご使用ください。

 警告	誤った取り扱いをすると、人が死亡または重症を負う可能性が想定される内容を示します。
 注意	誤った取り扱いをすると、人が傷害を負ったり、物的損害の発生が想定される内容を示します。
注記	装置を正しく使用していただくための情報を示しています。

絵表示の意味

絵表示の意味



この絵表示は、「警告」「注意」を促す事項を示しています。
この絵表示の近くに、具体的な警告・注意内容を表記しています。



この絵表示は、禁止事項を示しています。
この絵表示の近くに、具体的な禁止内容を表記しています。



この絵表示は、必ず実行して欲しい事項を示しています。
この絵表示の近くに、具体的な指示内容を表記しています。

安全上の注意



警告



アームやピストン等の可動部に手を挟まないように十分に注意してください。



注意



本製品は電子回路を組み込んだ精密機器です。取り扱いには十分に注意し、衝撃を与えないようにしてください。



可動部や回路の接続等に不具合をきたす可能性がありますので、分解はしないようにしてください。

もくじ

1. はじめに.....	4
2. 製品構成.....	5
3. 製品仕様.....	5
4. 関連製品.....	6
5. 装置の概要.....	6
6. 校正および換算表.....	8
7. 基礎理論.....	9
実験 1：理想気体の法則.....	11
実験 2：等温変化.....	15
実験 3：断熱変化.....	19
実験 4：完全サイクル.....	24
参考文献.....	28
保証・アフターサービス.....	29

1. はじめに

この度は「熱力学実験器 TD-8565」をお買い上げいただきまことにありがとうございます。

熱力学実験器は、高精度なセンサがシリンダ内部に組み込まれ、Capstone と、850 インターフェースもしくは 550 インターフェースにより、圧縮および膨張中の気体の圧力、温度、体積を連続的にモニタリング、データ採取することができます。

※550 インターフェースのアナログポートは 2 チャンネルであるため、3 つのセンサの内 1 つをアナログアダプタとつなぎ、PASPORT センサポートに接続することでご利用になれます。

ソフトウェア上では付属の解析機能を使用して圧力、温度、および体積のグラフを作成することも可能です。圧力-体積のグラフを作成し、曲線下で積分すると、気体に対する仕事を求めることができます。

熱力学実験器を用いて以下のような学習をすることができます。

- ・ 理想気体において、 $PV/T = nR$ が成り立つことを証明し、気体定数 R の値を導きます。
- ・ 等温変化において、 $PV =$ 一定となることを確認します。
- ・ 気体に対する仕事量は、 $W = \int PdV$ つまり $P-V$ の曲線下の面積として表せることを確認します。
- ・ 断熱気体の法則 ($PV^\gamma =$ 定数) を確認し、気体の比熱比 (γ) を推定します。
- ・ 逆方向のオットーサイクルを観察し、逆オットーサイクルの効率 ξ とオットーサイクルの効率 η_{Otto} を比較します。

2. 製品構成

- ① 熱力学実験器-----1本
 ② ストッパーピン-----2本
 ③ ACアダプタ (9V-1.2A) -----1本
 ④ DINプラグコード-----3本
 ⑤ 校正・換算表 (実験器背面に記載) -----1部
 ⑥ 取扱説明書 / 学習の手引き (本書) -----1部



図1 製品外観

3. 製品仕様

本体寸法	W220×L690×425mm
重さ	約 7.4kg
本体材質	鋼材
シリンダ材質	アクリル樹脂
ピストン材質	アセタール樹脂
シリンダ高さ	195mm
シリンダ内径	45mm (校正・換算表参照のこと)
ストローク	90mm
レバー長さ	630mm
測定用素子	温度：極細ニッケルワイヤ 圧力：ピエゾ抵抗体 体積：ポテンシオメータ
気体交換用ガスコック	2本
入力電圧	9V
出力電圧	0~5V (温度, 圧力, 体積測定用)
付属品	ACアダプタ (9V-1.2A), DINプラグコード, ストッパーピン (2本)

4. 関連製品

- 100-710 850 インターフェース UI-5000
- 100-711 550 インターフェース UI-5001
- 100-823 アナログアダプタ PS-2158 (550 インターフェースとセットでご利用ください。)
- 100-715 PASCO Capstone サイトライセンス UI-5400
- 100-716 PASCO Capstone シングルユーザーライセンス UI-5401

5. 装置の概要

本実験器のピストン (図 2-a) はアセタールプラスチック製で、アクリル製のシリンダ (図 2-b) 内を、手動で上下に動かすことができます。

シリンダ側面には 2 つの真ちゅう製のガスコック (図 2-c) が取り付けられ、単原子のアルゴン、二原子の酸素や窒素、三原子の二酸化炭素や、その他の多原子の気体分子を充填したり、排気したりすることができます。

ピストンの側面には、その位置を計測するためのポテンシオメータ (線形分圧器) (図 2-d) が装着されています。インターフェースの定電圧源からこのポテンシオメータの素子に、5V の電圧がかかります。

整流子のブラシ (図 2-e) から得られる電圧変化をインターフェースに取り込み、ピストンの位置をコンピュータ上に表示します。これによってシリンダ内に密閉された気体の体積が分かります。

シリンダの底部を密閉するアセタールプラスチック製の土台 (図 2-f) には、2 つのトランスデューサが組み込まれています。まず、土台の下側には圧力トランスデューサが密閉されています。このトランスデューサの素子はピエゾ抵抗体で、装置内のブリッジ回路の一部を成します。さらに、土台の上側には、温度センサ (図 2-g) が搭載されています。このセンサは、抵抗の温度係数が非常に高い極細ニッケルワイヤで構成されており、表面对質量率も高いため気体が圧縮/膨張されたときに温度が素早く変化します。このワイヤもまた、装置内のもう一つのブリッジ回路の一部を成します。

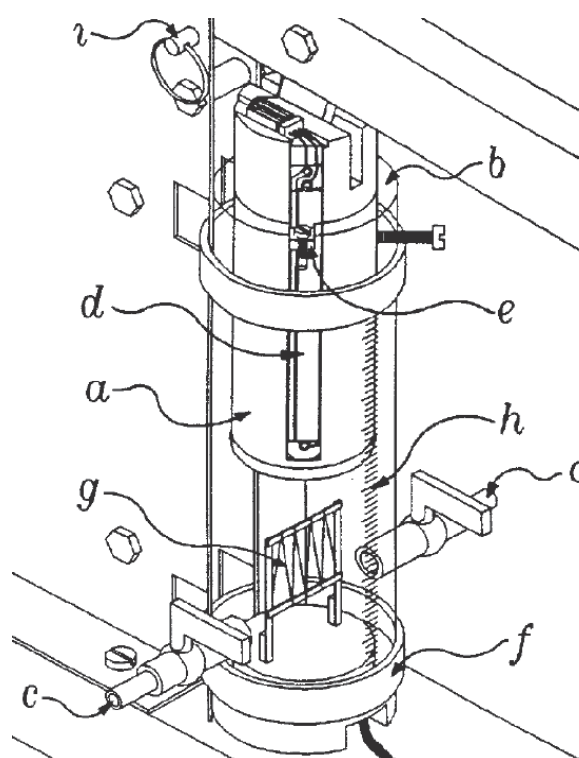



図2 ピストン・シリンダ構造

装置の電子回路は2つの励起電圧供給源と、これら2つのブリッジ回路用の増幅器によって構成されます。増幅器の出力は、それぞれ圧力および温度に比例するアナログ電圧です。回路への電圧は、9VのACアダプタ（付属）から供給されます。

シリンダ前面にある、透明のミリメートルスケール（図 2-h）を使用すると、「気体体積」の最初のピストン位置と最後のピストン位置を目視で測定でき、それをもとに計算を行ったり、体積データを校正したりできます。ストッパーピン（図 2-i）は、ピストンが取り付けられたレバーの動きを制限することができます。

⚠ 注意	温度センサ（図 2-g）や整流子のブラシ（図 2-e）は非常に壊れやすくなっています。通常装置を分解する必要はありませんが、もし分解する必要が生じた場合は、ピストンを取り外す前に、必ずシリンダ上部の整流子のブラシを取り外すようにしてください。また、土台をはずす際には温度センサに損傷を与えないように十分注意してください。
	

6. 校正および換算表

実験器背面に張り付けられている校正・換算表には、圧力、温度、および体積測定における出力電圧の校正值や換算式が記載されています。

- (1) 圧力：圧力トランスデューサは、出荷時に校正済みです。出力電圧は、100 kPa の絶対圧力あたり 1.00 V です。
- (2) 温度：温度トランスデューサは、出荷時に校正済みです。校正に用いた式は校正表に示されている通りです。この式では、温度変化と電圧出力が直線関係であることを仮定しています。校正に使用された 3 つの校正ポイントも示されています。
- (3) 体積：ポテンシオメータの電圧出力をソフトウェア上で体積変化に換算することができます。これ以外にも、シリンダ前面にある透明のスケールを用いてピストンの移動量を読み取ることによって体積を求めることができます。一部の計算には体積比が使用されるので、実際の体積変化の代わりに変位が使用されることもあります。

注 記

ガスコックのポートまたは開口部によって、体積測定時に誤差が発生します。誤差を小さくするには、すべての得られた体積値に 1 cm³ を足すか、ピストンの変位値に 0.06 cm を足します。

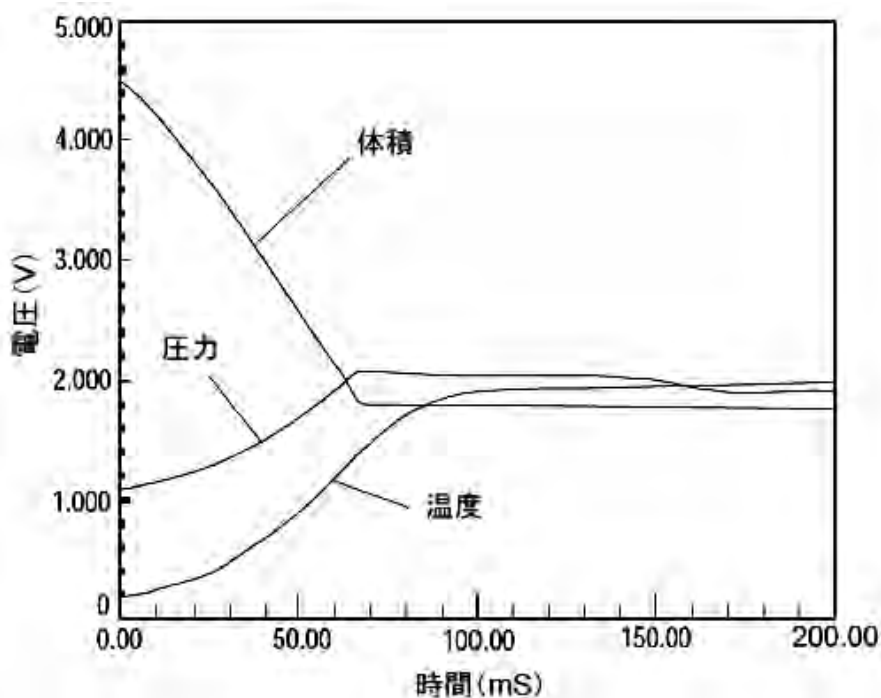


図3 体積、圧力、温度センサからの電圧-時間のグラフ (例)

7. 基礎理論

系内に熱エネルギーが出入りすることなく行われる過程を、断熱過程と呼びます。この過程は、系が完全に熱的に断熱されている場合や、過程が非常に高速で行われるために熱の出入りが限りなく小さい場合に限定されます。

密閉された n モルの理想気体が断熱的に圧縮/膨張したときの圧力 P 、温度 T 、および体積 V の関係を熱力学第 1 法則によって示します。

$$dQ = \underbrace{nc_v dT}_{\text{内部エネルギーの変化}} + \underbrace{PdV}_{\text{仕事}} = 0 \quad (1)$$

c_v は定積でのモル比熱、 T は絶対温度、 n はモル数、そして V は体積を表します。

理想気体については、 $PV = nRT$ が当てはまります。ここで、 $R =$ 一般気体定数 (約 $8.314 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$) を示します。

$PdV + VdP = nRdT$ となりますので、 dT について解くと以下のようにになります。

$$dT = \frac{PdV}{nR} + \frac{VdP}{nR} \quad (2)$$

式(2)を式(1)に代入すると、次のようになります。

$$\begin{aligned} dQ &= nc_v \left(\frac{PdV}{nR} + \frac{VdP}{nR} \right) + PdV \\ &= \left(\frac{c_v}{R} + 1 \right) PdV + \frac{c_v}{R} VdP \end{aligned}$$

両辺に R をかけて

$$\begin{aligned} RdQ &= (c_v + R)PdV + c_v VdP \\ &= c_p PdV + c_v VdP \\ &= 0 \end{aligned}$$

ここで c_p とは、定圧でのモル比熱を示します。 c_p と c_v との関係は $c_p - c_v = R$ で表されます。 c_p 対 c_v の比率は γ (ガンマ) で示します。これらの結果を使用すると、次の式が得られます。

$$\frac{c_p P dV}{c_v P V} + \frac{dP}{P} = 0$$

$$\gamma \frac{dV}{V} + \frac{dP}{P} = 0$$

$$\gamma \ln V + \ln P = \text{一定}$$

$$PV^\gamma = \text{一定}$$

$$P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma \quad (3)$$

この結果が一般的な断熱気体の法則となります。式(3)と、理想気体の法則 $PV=nRT$ から、2つ目の断熱気体の法則を導くことができます。

$$T_1 V_1^{(\gamma-1)} = T_2 V_2^{(\gamma-1)} \quad (4)$$

実験では、気体を断熱的に圧縮しているときのエネルギー消費量、または気体に対する仕事量についても検証します。式(3)は次のように書き直すことができます。

$$PV^\gamma = P_1 V_1^\gamma = k \quad \text{または} \quad P = \frac{k}{V^\gamma}$$

気体を圧縮するための仕事量 W は次のようになります。

$$W = \int_{V_1}^{V_2} P dV = k \left[\frac{V^{(1-\gamma)}}{1-\gamma} \right]_{V_2}^{V_1} = (P_1 V_1^\gamma) \left[\frac{V^{(1-\gamma)}}{1-\gamma} \right]_{V_2}^{V_1}$$

$$W = \frac{P_1 V_1^\gamma}{1-\gamma} (V_2^{(1-\gamma)} - V_1^{(1-\gamma)}) \quad (5)$$

実験 1 : 理想気体の法則

目的

理想気体において $PV/T=nR$ が成り立つことを証明し、気体定数 R の値を導きます。

物理的原理

理想気体の絶対圧力 (P) , 体積 (V) , および絶対温度 (T) について広く知られている関係は、次のように表すことができます。(状態方程式)

$$PV = nRT \quad (1.1)$$

ここで、 n とは試料中のモル数で、 R は一般気体定数を指します。 n が一定の閉じた系では、すべての変数を式の左辺に移項することによって、次のように求めることができます。

$$\frac{PV}{T} = nR \quad (1.2)$$

モル数 (n) は気体の密度 (ρ) , 気体分子の分子量 (M) と体積 (V) によって、次のように表すことができます。

$$n = \frac{\rho V}{M} \quad (1.3)$$






手順

A. 接続

1. AC アダプタを熱力学実験器に差し込み、回路に電圧を供給します。インターフェースと、実験器の Pressure (圧力) , Volume (体積) , Temperature (温度) ポートから取り出した DIN コネクタを順に挿入します。
2. インターフェースの電源を入れ、USB ケーブルで PC に接続します。
3. Capstone を開き、Hardware Setup パネルを開きます。
4. 使用するポートはすべて「Voltage Sensor」を選択し、圧力、体積、温度の出力端子となる電圧センサをそれぞれ認識させます。Capstone の操作方法に関する詳細は Capstone の取扱説明書をご参照ください。

B. 校正および換算

圧力、体積、温度センサから出力される電圧信号そのままでは、圧力、体積、温度を正しく画面に表示させることはできません。実験器背面に記載されている換算式にしたがって、換算した値を表示させる必要があります。

1. ツールパレットから Calculator  を開き、実験器背面の換算式を Calculations 欄に P , V , T それぞれ入力します。
測定値を計算式に組み込むには、Calculator 内の  をタップして、プルダウンされた測定値の中から該当するものを選びます。
*圧力換算では、換算式に $\times 10^3$ を加えて、単位を kPa から Pa に変換します。
2. 同様に $\ln P$, $\ln V$, nR , $1/V$ の数式を入力します。これらは、「 $\ln P=$ 」と手入力して右辺には演算キーから LN を選択、括弧内には  の測定値の中に表示されている P を選びます。
3. 入力が完了したら、Accept ボタン  をクリックします。
4. 再びツールパレットの Calculator  をクリックして閉じます。

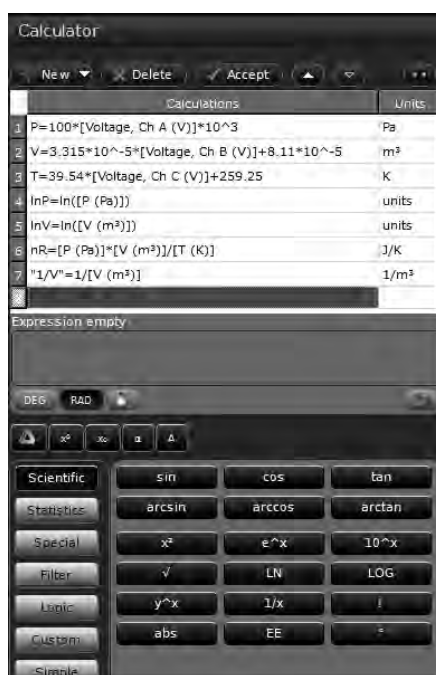





図4 換算式 (例)



C. 実験手順

1. ディスプレイメニュー (右端) のグラフアイコン  を画面中央にドラッグ&ドロップして、グラフ画面を表示させます。
2. グラフの縦軸にある Select measurement をクリックして、プルダウンされた測定値の中から nR を選びます。自動的に横軸は時間に設定されます。
3. ピストンの移動距離を制限するために、ハンドルを留めるピンを上下2箇所 の穴に挿して、ハンドルを勢いよく上下させても、ピストンが最上段や最下段に達しないようにしておきます。
ガスコックが開いた状態でピストンを稼動域の一番高い位置にセットし、両方のガスコックを閉めます。

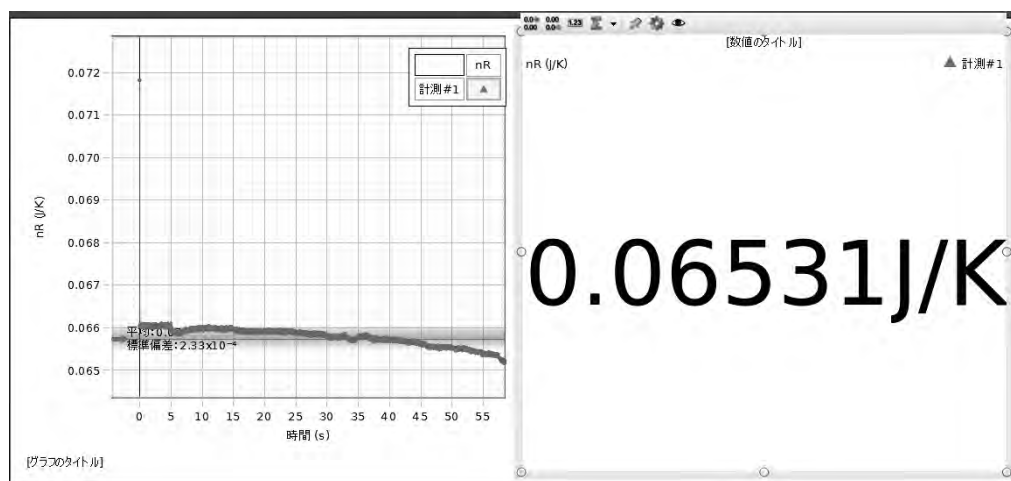
このときのピストンの高さを、ピistonに付いているスケールから読み取って記録します。

$$h_0 = \text{_____ cm}$$

4. サンプリングレートを 1 kHz に設定し、開始ボタンをクリック、数十秒程度時間をかけてゆっくりとピistonを下げます。下げ終わったら停止をクリックします。
5. グラフの上の範囲の選択アイコン  で画面上で処理する範囲を指示します。次に同じツールバーにある統計ツールのプルダウンメニューから「Mean」と「Standard Deviation」にチェックを入れた上で  をクリックし、 nR の平均値と標準偏差を表示させます。

ディスプレイメニューからデジタル数値1.23を画面にドラッグ&ドロップして「Rename」を nR にします。  で「Mean」にチェックを入れ、上の  を押すことによって表示桁を増やした値を表示させることができます。

$$nR_{\text{mean}} = \text{_____ J/K} \quad \text{標準偏差} = \text{_____ J/K}$$



nR -Time グラフ

解析

A. モル数 (n)

最初の高さ h_0 での気体体積を計算します。

$$V_0 = \pi r^2 h_0 = \text{_____ m}^3$$

ここで、 r とはシリンダの半径であり、校正・換算表に記載されたシリンダ直径の半分です。

式(1.3)からガスのモル数を計算します。ここでは、STP（標準温度と圧力）での空気密度は $\rho_{\text{air}}=1.293 \text{ kg/m}^3$ ，体積は V_0 ，そして空気の分子重量は $M_{\text{air}} = (0.8 \times 28 + 0.2 \times 32) \times 10^{-3} \text{ kg/mol}$ です（80%が窒素，20%が酸素と想定）。

$$n = \frac{\rho_{\text{air}} V_0}{M_{\text{air}}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ mol}$$

B. 気体定数 (R)

測定値による気体定数 $R_{\text{obs.}}$ を計算します。

$$R_{\text{obs.}} = (n R_{\text{obs.}}) / n = \underline{\hspace{2cm}} \text{ J/mol} \cdot \text{K}$$

測定値と，一般的に受け入れられている値 ($R=8.314 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$) を比較します。

$$\text{誤差率} = \frac{|R_{\text{obs.}} - 8.314|}{8.314} \times 100\% = \underline{\hspace{2cm}} \%$$

実験 2 : 等温変化

実験 2A : ボイルの法則

目的

等温変化において、 PV =一定となることを確認します。

物理的原理

系が熱源と接触しているなどの状態にあり、温度が一定に保たれる状態変化は、「等温変化」と呼ばれます。このような過程では、圧力と体積は反比例します。

$$PV = \text{一定} \quad (2.1a)$$

式 (2.1a) はボイルの法則と呼ばれ、次のように表すこともできます。(k=定数)

$$\ln(P) = -\ln(V) + \ln(k) \quad (2.2a)$$

$\ln(P)$ - $\ln(V)$ のグラフは、マイナスの傾きを持つ直線であることがわかります。


実験手順

1. グラフ画面を表示させ、縦軸を $\ln P$ 、横軸を $\ln V$ に設定します。
2. ガスコックを開いた状態で、ピストンを一番上の高さ（実験 1.C の 3 で挿した上の方のピンの位置）まで持ち上げ、コックを閉めます。このときの高さを記録します。

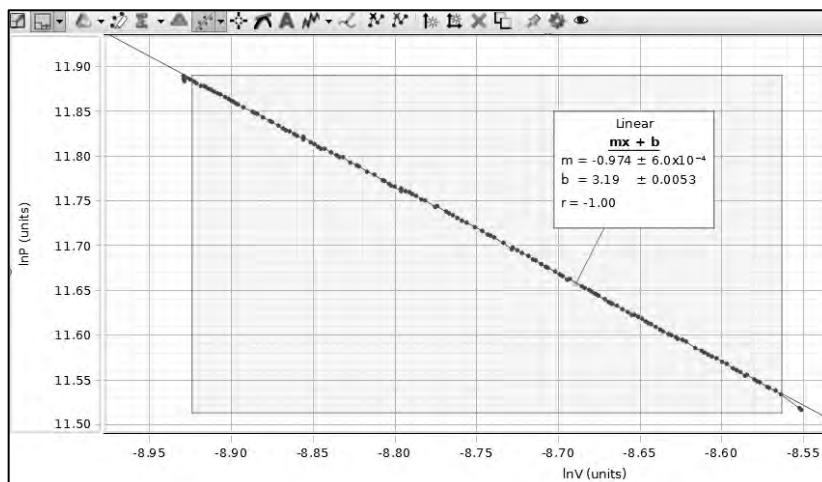
$$h_0 = \text{_____ cm}$$

3. サンプリングレートを 10Hz 程度に設定し、実験ボタンをクリックして 1 分ほどかけてゆっくりと（準静的に）圧縮します。そうすることで、周囲の空気が熱源となり気体の温度を室温（等温）に保つことができます。

解析

- A. グラフの上のツールバーから数式フィット  を利用して一次フィットを行います。傾きが表示されますから、これを、反比例を表す -1.0 と比較します。
- B. 測定したグラフの縦軸を P 、横軸を $1/V$ に設定し、一次フィットを行って傾きを表示、記録します。

$$n R_{\text{obs.}} T = \text{傾き} = \text{_____}$$




ln(P)—ln(V)グラフ

- C. 最初の高さ h_0 での気体体積を計算します。

$$V_0 = \pi r^2 h_0 = \underline{\hspace{2cm}} \text{ m}^3$$

- D. ガスのモル数を計算します。STP（標準温度と圧力）での空気密度は $\rho_{\text{air}} = 1.293 \text{ kg/m}^3$ 、体積は V_0 、そして空気の分子重量は $M_{\text{air}} = (0.8 \times 28 + 0.2 \times 32) \times 10^{-3} \text{ kg/mol}$ です（80%が窒素、20%が酸素と想定）。

$$n = \frac{\rho_{\text{air}} V_0}{M_{\text{air}}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ mol}$$

- E. 測定データの縦軸を温度 T 、横軸を時間に変更します。 T -Time のグラフに統計ツール  を使用して、平均値（室温）を確認します。

$$T = \underline{\hspace{2cm}} \text{ K}$$

- F. 測定値による気体定数 R_{obs} を計算します。

$$R_{\text{obs}} = (nR_{\text{obs}} T) / n T = (\text{傾き}) / n T = \underline{\hspace{2cm}}$$

測定値と、一般的に受け入れられている値 ($R = 8.314 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$) を比較します。

$$\text{誤差率} = \frac{|R_{\text{obs}} - 8.314|}{8.314} \times 100\% = \underline{\hspace{2cm}} \%$$

実験 2B : 等温プロセスにおける仕事量の算出

目的

気体に対する仕事量は $W = \int P dV$ で、 $P-V$ グラフの曲線下の面積として表せることを確認します。

物理的原理

圧縮が等温下で行われる場合（つまり T が一定）、圧力と体積の関係は次のようになります。

$$P = \frac{nRT}{V} \quad (2.1b)$$

また、 $P-V$ の曲線下の面積は、次の式で導くことができます。

$$W = -nRT \int_{V_i}^{V_f} \frac{1}{V} dV = nRT \ln \left(\frac{V_i}{V_f} \right) \quad (2.2b)$$

実験手順

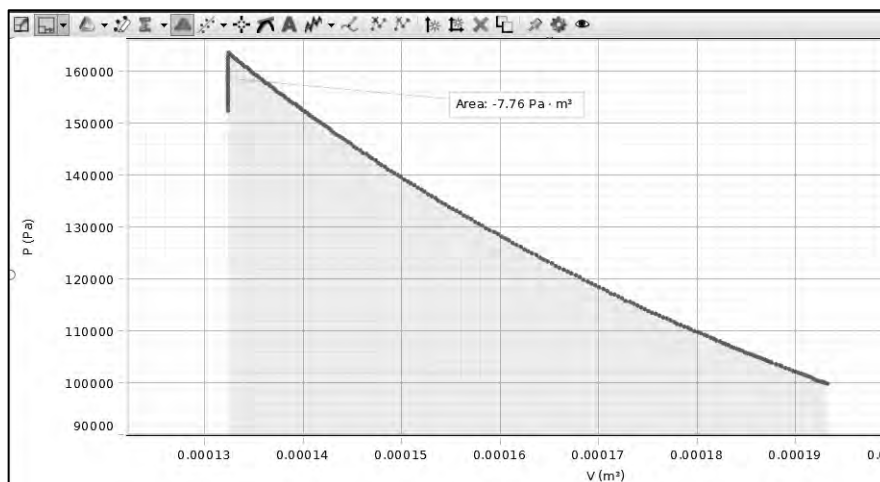
1. グラフ画面を表示させ、縦軸を P 、横軸を V に設定します。
2. ガスコックを開いた状態で、ピストンを一番上の高さまで持ち上げ、コックを閉めます。
3. サンプルングレートを 10Hz 程度に設定し、実験ボタンをクリックして 1 分ほどかけてゆっくりと（準静的に）圧縮します。
4. ピストンの最初の高さと最後の高さを記録します。

$$h_i = h_0 = \underline{\hspace{2cm}} \text{ cm} \quad h_f = \underline{\hspace{2cm}} \text{ cm}$$

解析

- A. $P-V$ のグラフから、 をクリックして、 $P-V$ の曲線下の面積を記録します。


$$\text{仕事量 } W = \text{面積} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ J}$$



P-Vグラフ

- B. STP（標準温度と気圧）での空気密度は $\rho_{\text{air}}=1.293 \text{ kg/m}^3$ ，初期体積は V_0 ，空気の分子重量は $M_{\text{air}}=(0.8 \times 28 + 0.2 \times 32) \times 10^{-3} \text{ kg/mol}$ （80%が窒素，20%が酸素と想定）とし，気体のモル数を計算します。

$$n = \frac{\rho_{\text{air}} V_0}{M_{\text{air}}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ mol}$$

- C. 測定データの縦軸を温度 T ，横軸を時間に変更します。 T -Time のグラフに統計ツール  を使用して，平均値（室温）を確認します。

$$T = \underline{\hspace{2cm}} \text{ K}$$

- D. 最初の高さから最後の高さまでの，仕事量の理論値を計算します。

$$W_{\text{theory}} = nRT \ln\left(\frac{V_i}{V_f}\right) = nRT \ln\left(\frac{h_i}{h_f}\right) = \underline{\hspace{2cm}} \text{ J}$$

$$\text{誤差率} = \frac{|\text{面積} - W_{\text{theory}}|}{W_{\text{theory}}} \times 100\% = \underline{\hspace{2cm}} \%$$

実験 3 : 断熱変化

実験 3A : 断熱気体の法則

目的

断熱気体の法則 ($PV^\gamma = \text{定数}$) を確認し、気体の比熱比 (γ) を推定します。

物理的原理

変化が十分に速く周囲の環境との熱交換が行われない場合 ($Q=0$)、これは「断熱変化」であると考えられます。このような断熱プロセスでは、圧力と体積との関係は、次のように表されます。

$$PV^\gamma = \text{一定} \quad (3.1a)$$

ここで γ とは、定圧/定容での比熱比を指します (空気の場合 $\gamma=1.4$)。

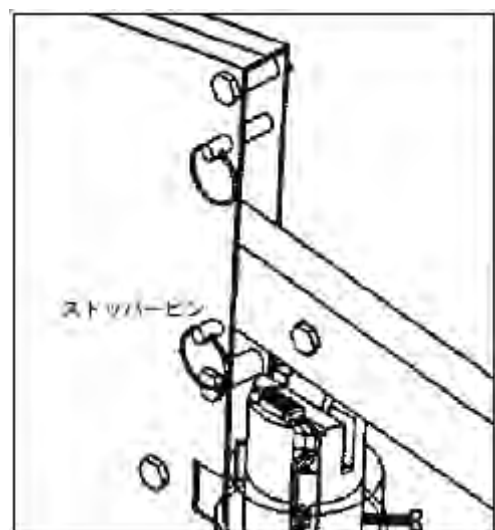
$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} \quad (3.2a)$$

実験的に、圧力と体積との関係を観察して γ を導きます。断熱気体の法則を表す式 (3.1a) は次のように書き換えることも可能なので、 $\ln(P) - \ln(V)$ のグラフは、 $-\gamma$ の傾きを持つ直線でなければならないことがわかります。 ($k = \text{一定}$)


$$\ln(P) = -\gamma \ln(V) + \ln(k) \quad (3.3a)$$

実験手順

1. 実験 3 以降は、近似的に断熱的にするため、気体をできるだけ素早く圧縮します。
ピストン運動を急停止させるため、必ず、右図のようにストッパーピンを挿入します。
2. グラフの縦軸を $\ln P$ 、横軸を $\ln V$ に設定し、サンプリングレートを 1kHz にします。
3. ハンドルを可動域の一番高い位置から一番低い位置まで素早く押し下げます。

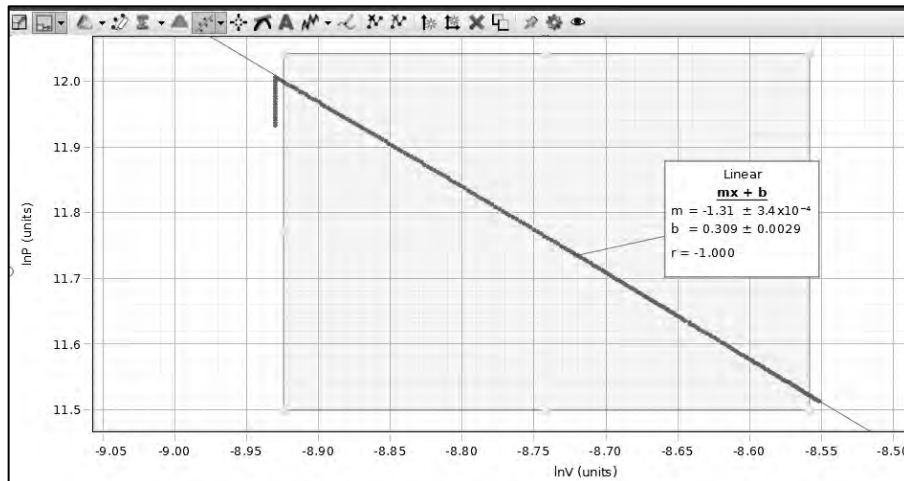


解析

グラフの上の範囲の選択アイコン  で画面上で処理する範囲を指示します。グラフに一次フィットを行い、傾きを記録します。

傾き = $\gamma =$ _____

気体が空気であれば、 $\gamma = 1.40$ であるため、1.40 と測定結果を比較します。



$\ln(P) - \ln(V)$ グラフ

実験 3B : 断熱変化による仕事量

目的

気体に対する仕事量は $W = \int PdV$ つまり $P-V$ の曲線下の面積として表せることを確認します。

物理的原理

定圧で気体が圧縮されると、系の仕事量は、力 F と変位 Δy の積となります。 A をシリンダの断面積とすれば、仕事量は次の式で表されます。

$$W = -F\Delta y = -PA\Delta V = -P\Delta V \quad (3.1b)$$

圧縮に伴って圧力が変化する場合、気体に対する仕事量は次のように積分となります。

$$W = - \int_{V_i}^{V_f} PdV \quad (3.2b)$$

これは、圧力-体積の曲線下の面積のマイナス値に相当します。

圧縮が断熱的に行われると、周辺環境との熱交換が発生しないので ($Q=0$)、熱力学の第 1 法則により、内部エネルギーの変化は気体に対する仕事量に相当することになります。

$$\Delta U = Q + W = W \quad (3.3b)$$

つまり、気体が断熱的に圧縮された時には、 $P-V$ の曲線下の面積を測定し、それを内部エネルギーの変化として捉えることができます。

$$\Delta U = \frac{f}{2} nR\Delta T \quad (3.4b)$$

これは、自由度が f の理想気体に該当する式です。二原子の空気 ($f=5$) については次のようになります。


$$W = \text{面積} = \frac{5}{2} nR\Delta T \quad (3.5b)$$

実験手順

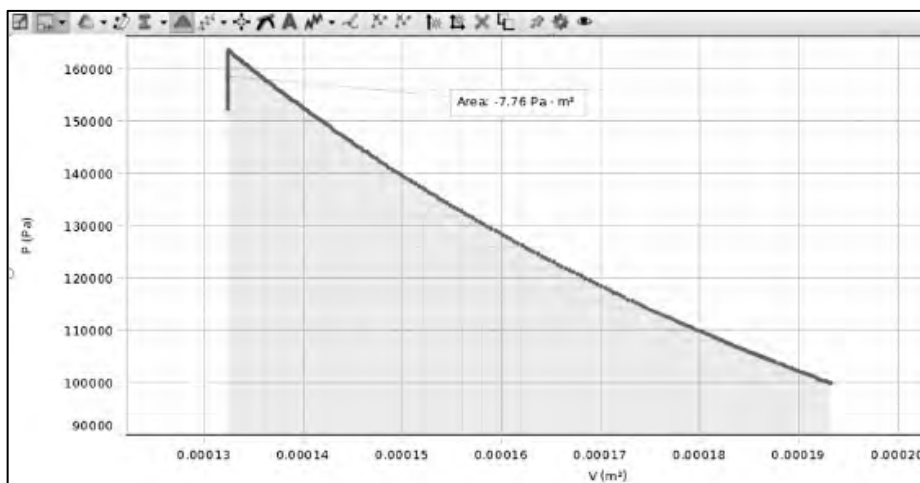
断熱気体の法則の測定手順（実験 3A）に従います。

1. グラフの縦軸を $\ln P$ 、横軸を $\ln V$ に設定し、サンプリングレートを 1kHz にします。
2. ガスコックを開いた状態で、ピストンを一番上の高さまで持ち上げ、コックを閉めます。
3. ハンドルを可動域の一番高い位置から一番低い位置まで素早く押し下げます。

解析

- A. 圧力-体積のグラフを作成します。測定後、統計ボタン  をクリックして $P-V$ 曲線下の面積を記録します。

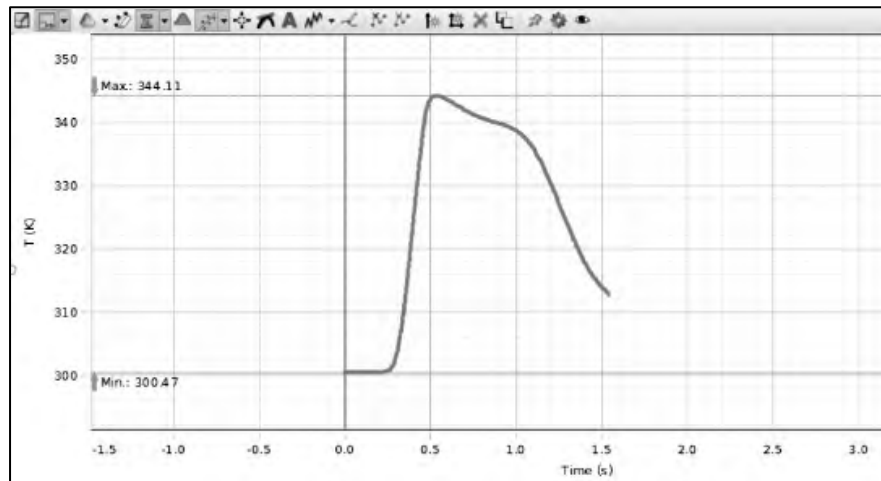
面積 = _____ J



$P-V$ グラフ

- B. 測定データの縦軸を温度 T 、横軸を時間にし、 T -Time のグラフに統計を使用して最低温度と最高温度を記録します。また、温度の変化を計算します。

$T_{\min} =$ _____ K $T_{\max} =$ _____ K $\Delta T =$ _____ K



T-Time グラフ

C. モル数 (n)

式 (1.3) からガスのモル数を計算します。ここでは、STP (標準温度と圧力) での空気密度は $\rho_{\text{air}}=1.293 \text{ kg/m}^3$, 体積は V_0 , そして空気の分子重量は $M_{\text{air}} = (0.8 \times 28 + 0.2 \times 32) \times 10^{-3} \text{ kg/mol}$ です (80%が窒素, 20%が酸素と想定)。

$$n = \frac{\rho_{\text{air}} V_0}{M_{\text{air}}} = \text{_____ mol}$$

次のように, 空気の内部エネルギーの変化を計算します。

$$\Delta U = \frac{5}{2} n R \Delta T = \text{_____ J}$$

内部エネルギーの変化と, $P-V$ の曲線下の面積を比較します。また, 曲線下の面積と, 式 3.5b の予測を比較します。

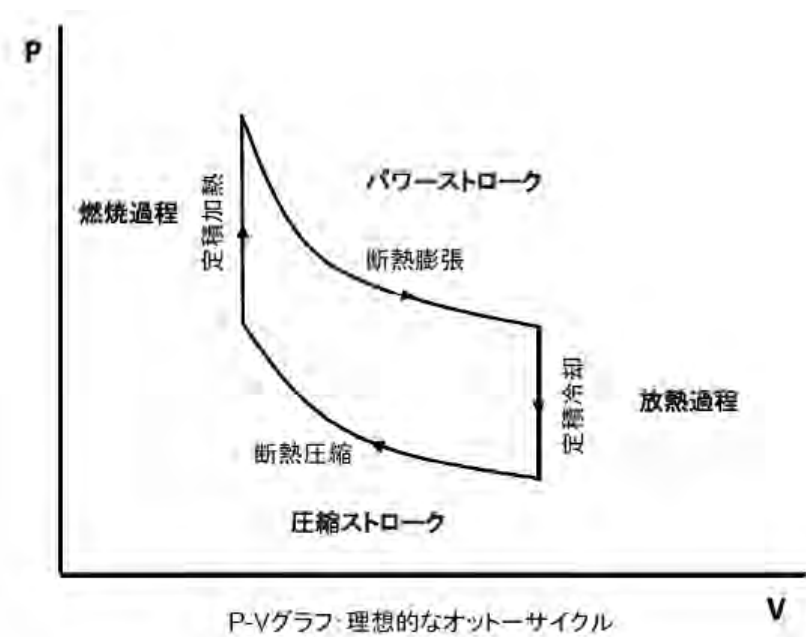
実験 4 : 完全サイクル

目的

逆方向のオットーサイクルを観察し、逆オットーサイクルの効率 ξ とオットーサイクルの効率 η_{Otto} を比較します。

物理的原理

理想的なオットーサイクルは、4サイクルのガソリンエンジンの動作をモデル化し、以下の $P-V$ 図に示すストロークが含まれます。



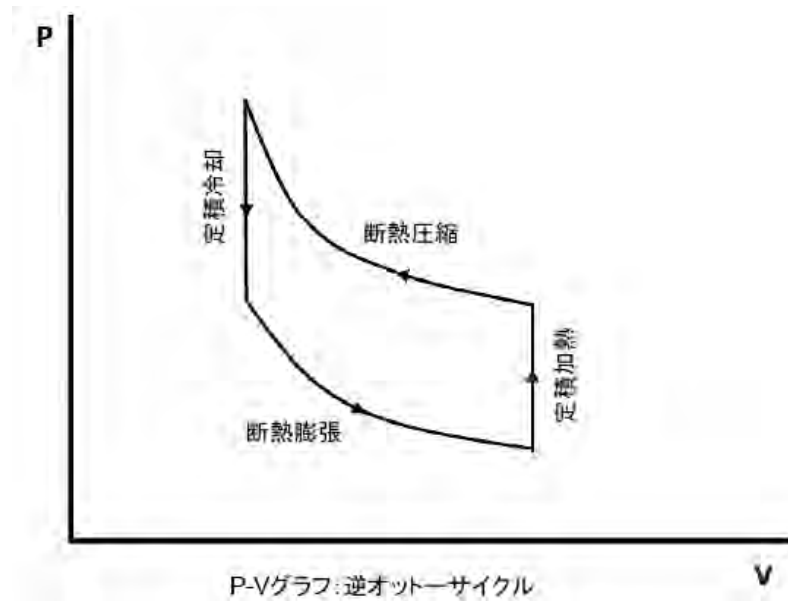
熱機関の効率は、次のように定義することができます。

$$\eta = \frac{\text{外にした仕事}}{\text{受け取った熱量}} \quad (4.1)$$

これは、 $P-V$ の曲線下の正味面積をシステムに取り込まれる熱で除算した数値に相当します。実際にはオットーサイクルの仕事量は、2つの断熱ストローク間の面積であり、熱は等体積燃焼ストローク時にシステムに取り込まれます。

この実験では、オットーサイクルを逆方向から再現します。

この過程は、断熱圧縮から始まります。一番上の曲線下の面積は、気体に対する仕事量 (W) を表します。気体は、等体積で元の温度まで冷却され、 $Q_{\text{in}} = W_{\text{in}}$ の式が成立します。その後気体は断熱膨張し、等体積加熱が行われます ($Q_{\text{in}} = W_{\text{out}}$)。



この過程は熱エンジンではありませんが、ガスに対する正味仕事量 W_{net} と放熱 Q_{out} から、逆オットーサイクルの効率 ξ を求めます。

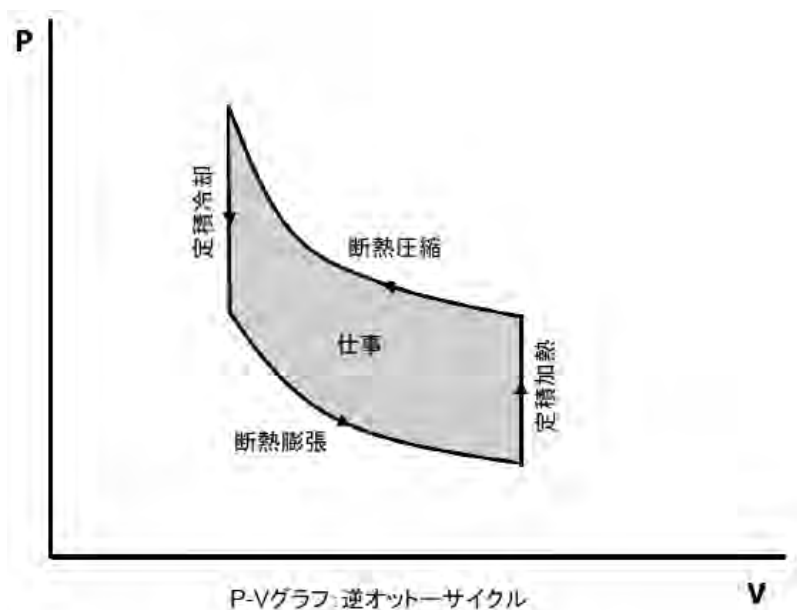
$$\xi = \frac{W_{\text{net}}}{Q_{\text{out}}} = \frac{W_{\text{in}} - W_{\text{out}}}{W_{\text{in}}} \quad (4.2)$$

その結果を、次の式で表されるオットーサイクルの効率 η_{Otto} と比較します。

$$\eta_{\text{Otto}} = 1 - \frac{1}{r^{r-1}} \quad (4.3)$$

ここで r は圧縮比を指します。

$$r = \frac{V_{\text{max}}}{V_{\text{min}}} \quad (4.4)$$




実験手順

実験 3 (断熱気体の法則) と同様に設定します。

1. 圧力-体積のグラフを作成し、サンプリングレートを 1 kHz 程度に設定します。
2. ガスコックを開いた状態で、ピストンを一番上の高さまで持ち上げ、コックを閉めます。
3. 開始ボタンをクリックし、断熱圧縮ストロークで気体を素早く圧縮します。
4. 圧力が低下しなくなるまで (30 秒間以上) ハンドルを下げておきます。圧力変化が終了後、停止ボタンをクリックします。
5. 再度開始ボタンをクリックし、断熱膨張ストロークで気体を素早く膨張させます。ストロークの一番上の位置でハンドルを保持します。
6. $P-V$ 曲線のサイクルが完了するまで、ハンドルを上げたままにしておきます。圧力変化が終了後、停止ボタンをクリックします。

解析

- A. データサマリーツール  を使用し、最新と、ひとつ前のデータにチェックを入れます。
- B. 統計ツールを使用し、高圧の断熱曲線下および低圧の断熱曲線下の面積を算出します。

$$W_{\text{in}} = \text{area}_{\text{upper}} = \text{_____ J}$$

$$W_{\text{out}} = \text{area}_{\text{lower}} = \text{_____ J}$$

- C. 逆オットーサイクルの効率を計算します。

$$\xi = \frac{W_{\text{in}} - W_{\text{out}}}{W_{\text{in}}} = \text{_____}$$

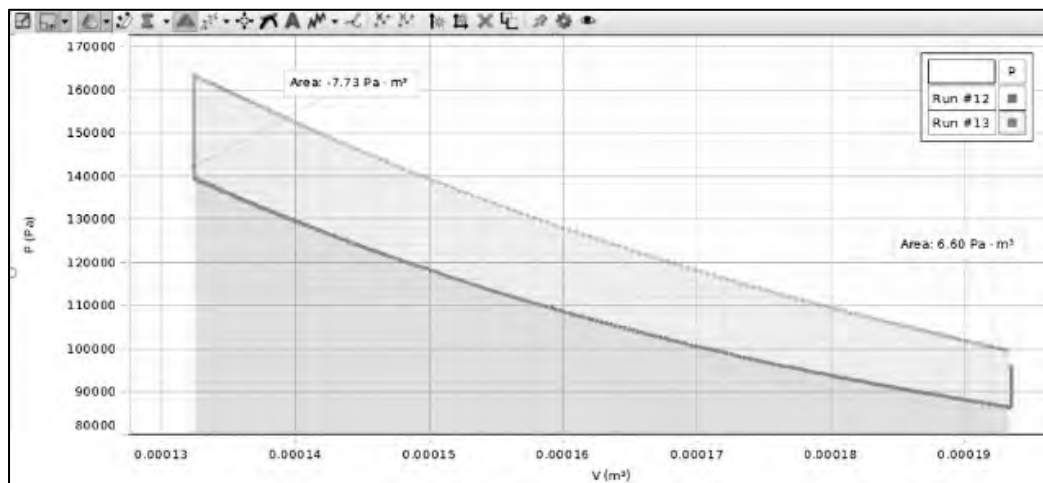
D. 最大シリンダ高さと最小シリンダ高さの比率から、圧縮率を計算します。

$$r = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} = \frac{h_{\max}}{h_{\min}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

E. 次のようにして、オットーサイクルの効率を計算します。

$$\eta_{\text{Otto}} = 1 - \frac{1}{r^{r-1}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

逆オットーサイクルの効率と比較します。



P — V グラフ (逆オットーサイクル)

参考文献

1. McNairy, William W. Isothermal and Adiabatic Measurements, *The Physics Teacher*, vol.24, 178 (1996).
2. Gill, Stanley J.; West, Earl M. The Indirect Determination of Heat Capacity, C_p of a Liquid, *Journal of Chemical Education*, vol. 43, 557-559 (1966).

保証・アフターサービス

保証書（別添）

- 保証書は、お買上げの販売店または弊社支店・営業所からお渡しします。「製品名、形式、機体 No.（記載のあるもののみ）、お買上げ日」の記載をお確かめのうえ、大切に保管してください。製品名、形式、お買上げ日が記載されていない場合は保証の対象外となりますのであらかじめご了承ください。
- 保証期間は、お買上げ日より 1 ヶ年間です。保証書の記載内容により、無償で修理いたします。但し、下記の部品は保証の対象外となりますのであらかじめご了承ください。
 - ・ AC アダプタ
 - ・ DIN プラグケーブル
- 保証期間経過後の修理については、お買上げの販売店または弊社支店・営業所にご相談ください。修理によって機能が維持できる場合は、お客様のご要望により有償で修理いたします。

修理を依頼される時

- 万一、異常が発生しましたら、ただちに使用を中止して電源スイッチを切り、電源プラグを抜いて、お買上げの販売店または弊社支店・営業所までご連絡ください。
- ご連絡いただきたい内容
 - 製品名
 - 製品の形式
 - 機体 No.（記載のあるもののみ）
 - お買上げ日
 - 故障の内容（できるだけ詳細に）

保証書または本器に貼付されている
銘板などをご参照ください。
- 保証書は必ずご提示ください。

株式会社 島津理化

〒136-0071 東京都江東区亀戸6丁目1番8号

TEL (03)5626-6600

URL : <http://www.shimadzu-rika.co.jp>

本製品の技術のお問合せは、コールセンターまで

フリーダイヤル 0120-376-673

受付時間 平日9：00～12：00, 13：00～17：00

e-mail : soudan@shimadzu-rika.co.jp Fax : (03)6861-9419