

Mayaによるエンジンの理想サイクルの 視覚化

情報科学科 西谷研究室 5681 吉村 佑介

平成21年2月20日

概要

我々は様々な用途でエンジンを利用しているが、エンジンメカニズムは一般に理解されていない。4サイクルエンジンは 吸気 圧縮 膨張 (燃焼) 排気 の4行程を繰り返すことにより運転を継続し、その間にピストンが2往復、クランク軸が2回転する。この4行程の圧力と体積の関係を表したP-V図を見ても、どのようにエンジンが動いているか初学者にはすぐに理解することは容易ではない。よって、エンジンメカニズムだけでなく、エンジンの理想サイクルに関わる圧力・体積・エントロピーなどの熱力学的背景を同時に理解できるように、エンジンの理想サイクルとそれに関わる状態量の関係図の視覚化を行った。

視覚化には3DCG作成ソフト Maya を用いた。Maya を用いた理由は MEL スクリプトという独自の言語を用いて、自分の作成スタイルに合わせて自在にカスタマイズできるので自由度が高いという点と、いくつかの機械系 CAD のデータ形式にも対応しており、実際に自動車メーカーなどの製造業ではデザイン的な要素の強い部品的设计に使用されている点の理由からである。

また、視覚化のアニメーションによって、熱力学の初学者は誘惑され、刺激され、学習へのやる気を起こさせることができる。そのきっかけの一つにでも視覚化は役立つのである。

以上より、本研究の目的は大きく分けると、

- 熱効率の重要性を知る
- エンジンの理想サイクルの視覚化により、理想サイクルを物理あるいは熱力学的背景を含め、初学者に容易く理解できるようにする

という2つの目的がある。

エンジンの理想サイクルと状態量の間を同時に視覚化することで、エンジンの理想サイクルを物理あるいは熱力学背景を含めて容易に理解で

きるようになった。

目次

第1章	緒言	5
1.1	エンジンの理想サイクル	5
1.1.1	ガソリンエンジンの理想サイクル	5
1.1.2	ディーゼルエンジンの理想サイクル	7
1.1.3	カルノーサイクル	7
1.2	熱効率	9
1.2.1	カルノーサイクルの熱効率	10
第2章	手法	11
2.1	Maya とは	11
2.2	MEL Maya に出力	13
2.3	Ruby MEL Maya に出力	13
2.3.1	Ruby	13
2.3.2	Ruby から MEL への変換	13
2.4	Maya の直接操作	14
2.4.1	物体の作成	15
2.4.2	色の変更	16
2.4.3	イメージのインポート	16
2.4.4	アニメーション	17
2.4.5	レンダリング	17
第3章	結果	19
3.1	ガソリンエンジンのアニメーション	19
3.2	カルノーサイクルのアニメーション	23
第4章	総括	27
4.1	考察	27
4.2	今後の展望	27

付録 A 物理的を含んだ状態量	30
A.1 示量状態量と示強状態量	30
A.1.1 示量状態量	30
A.1.2 示強状態量	30
A.2 全微分	31
A.3 熱力学におけるエントロピーの概念	33
A.4 熱力学過程	33
A.5 熱力学における状態量の相互関係	34
A.5.1 理想気体の断熱過程	34
A.5.2 全微分のみによる第 1 法則の表現	35

第1章 緒言

普段我々は自動車やバイク，飛行機など間接的であるが身近にエンジンを利用している．現在，エンジンの熱効率の向上が燃費向上あるいは二酸化炭素ガス排出量の削減対策として，非常に重要な課題である．熱効率をできるだけ高くすることはより多くの仕事を稼ぐことができ，かつ環境への影響を少なくすることができる．エンジンの熱効率の向上と地球環境問題は密接な関係にあるといってもよい．

また，エンジンメカニズムは一般に理解されていない．4サイクルエンジンは 吸気 圧縮 膨張（燃焼） 排気 の4行程を繰り返すことにより運転を継続し，その間にピストンが2往復，クランク軸が2回転する．この4行程の圧力と体積の関係を表したP-V図を見ても，熱力学の初学者にはすぐに理解することは容易ではないだろう．

図と説明を別々に見るだけでは，どのようにエンジンが動いているのかが分かりにくい．エンジンの理想サイクルの物理現象とその状態量の関係を視覚化し，誰でも容易に理解できるようにすることが本研究の目的である．

1.1 エンジンの理想サイクル

1.1.1 ガソリンエンジンの理想サイクル

多くのガソリンエンジンでは燃料は気化器や燃料噴射弁によって吸気管に供給され，かなりの部分が吸気管内で帰化する．4サイクルエンジンの吸気行程では，ピストンの下降によって，燃料と空気の混合気を吸気弁からシリンダー内に吸入する．次の行程のピストンの上昇によって混合気を圧縮し，圧力と温度を上昇させる．この上死点付近における燃焼しやすい状態にした混合気を電気火花で点火し，燃焼を開始させ，火炎伝播によって混合気が燃焼する．このときに発生する燃焼熱が作動ガスの温度と圧力を上昇させ，膨張行程で高圧になった燃焼ガスがピストンを

押し下げ、熱エネルギーを機械的エネルギーに変換する。その後の排気行程では、仕事の終わった膨張したガスをエンジンの外に排出する。

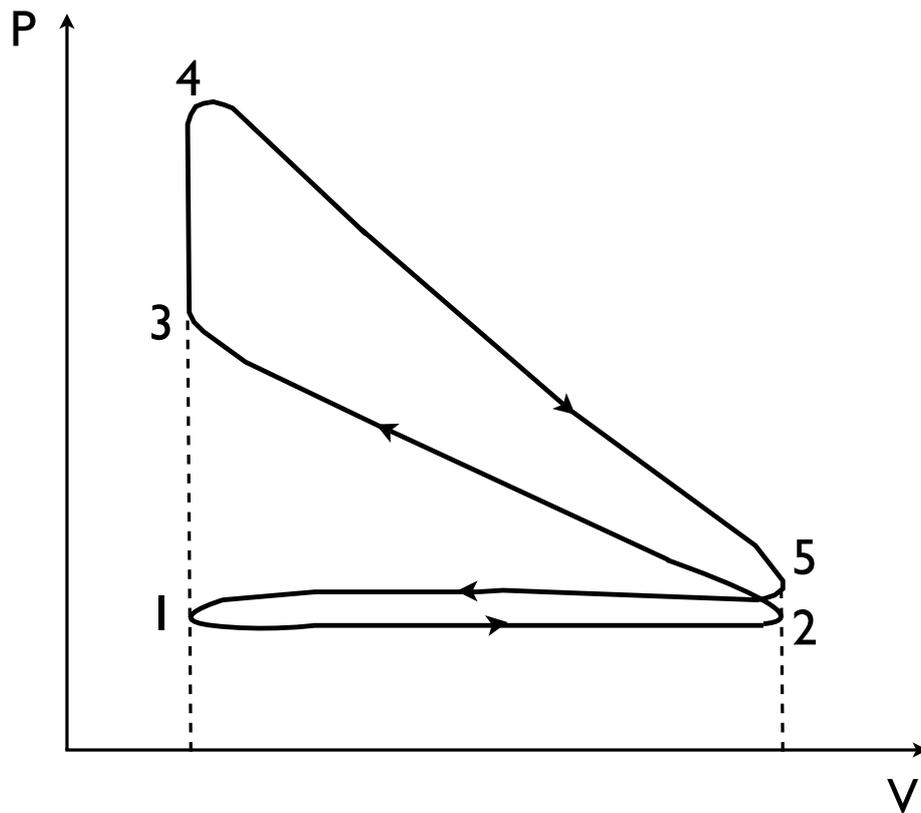


図 1.1: 4サイクルエンジンのP-V図

- 1-2 吸気行程：ピストンが下がり、新しい混合気を吸入する
- 2-3 圧縮行程：吸入した新気を圧縮する
- 3-4 燃焼行程：燃焼して温度・圧力が上がる
- 4-5 膨張行程：膨張して仕事をする
- 5-1 排気行程：ピストンが上がり、仕事の終わったガスを排気する

吸気 圧縮 燃焼と膨張 排気の4行程を繰り返すことにより運転を継続し、その間にピストンが2往復、クランク軸が2回転する。

1.1.2 ディーゼルエンジンの理想サイクル

ディーゼルエンジンは空気だけを吸入し、これをシリンダー内で圧縮して高温・高圧の状態にして、ここに燃料を噴射して、燃料が自己着火することによって燃焼を開始させる。出力は燃料の供給量のみによって制御され、燃料は燃料の供給状態とその後の混合気の形成過程に大きく影響される。

ディーゼルエンジンは圧縮比が高いため熱効率がよく、使用する燃料単価も安いために一般に運転経費は安い。一方、燃料最高圧力が高いためエンジンの強度が必要で、出力に対する重量比は大きい。また、使用できる回転数はガソリンエンジンに比べて低く、その範囲も狭い。このような経済性とエンジンの重量、出力の状態との関係によって、公共用のバスや大量輸送トラック、船舶や定置式の発電機などに多く利用される。

理論サイクルの分類では、低速のものがディーゼルサイクル、高速のものはサバテサイクルとして取り扱われる。

1.1.3 カルノーサイクル

カルノーサイクルとは、熱機関の理論最大熱効率を考察するために、カルノーが直感的に導入した理想的な熱機関であり、熱機関のモデルとしては温度 T_H の高温熱源から熱量 Q_H を取り入れ、温度 T_L 低温熱源へ熱量 Q_L を捨てて外部へ仕事を仕事 L を得る。この熱機関はシリンダ内で熱を発生する内燃機関ではなく、シリンダ内に封じ込めた気体を外から加熱、冷却してピストンを動かす外燃機関である。加熱、冷却するために、高温、低温熱源を交互にシリンダに接触させて作動させると考える。

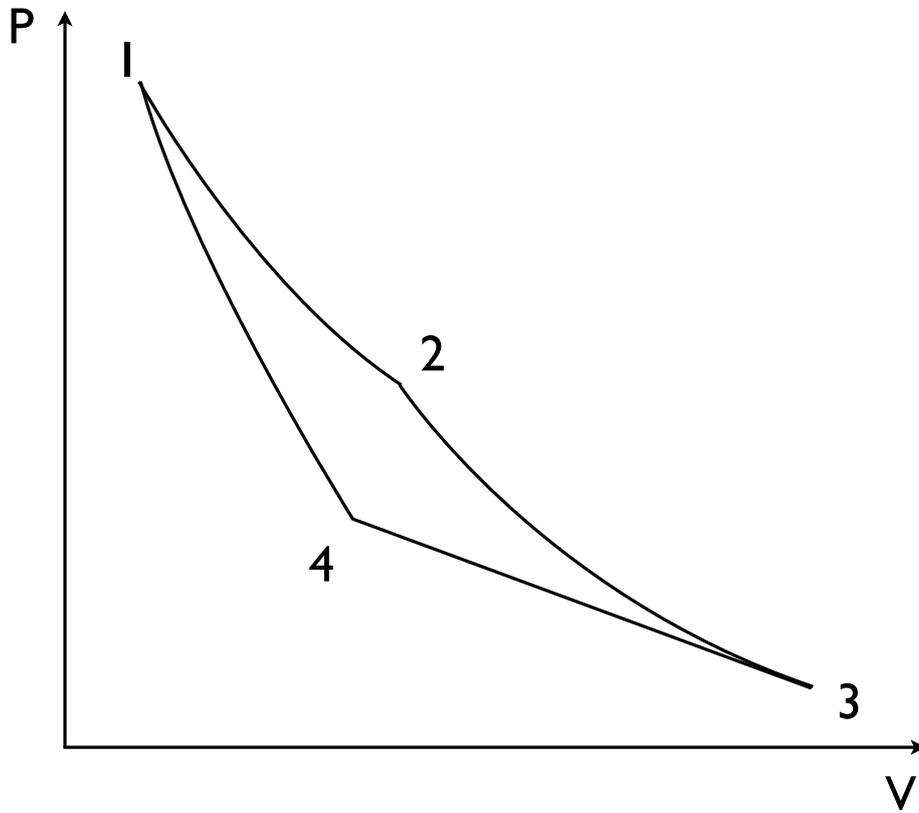


図 1.2: カルノーサイクルの P-V 図

- 1-2 等温膨張：絶対温度 T_H の熱源から熱量 Q_H を受ける
- 2-3 断熱膨張
- 3-4 等温圧縮：絶対温度 T_L の熱源に熱量 Q_L を捨てる
- 4-1 断熱圧縮

カルノーは、熱仕事変換で全く損失がないように考えた。つまり、加熱しても気体の温度は上昇せず内部エネルギー変化をすべて体積膨張に変換できる等温変化に、また、熱機関内の変化はすべて可逆過程で構成され、さらに系外との熱の授受も温度差無限小で行い、系内も周囲もすべて完全な可逆過程とした。また、仕事を連続に取り出すサイクル過程にするため、等温過程と断熱過程を組み合わせ、それらの変化のP-V図上でのこの配の違いを利用して4つの過程を閉じようとしている。さらに、サイクルを行うために低温熱源に熱を捨てていることも重要なことである。

1.2 熱効率

熱効率とは、投入したエネルギーに対して仕事や電力などに変換される割合のことである。熱機関の場合は、熱効率は燃料の化学エネルギーが有効な仕事に変換された割合を示す。熱力学第2法則より、熱機関は熱エネルギーをすべて仕事変換できない。よって、熱効率100%の熱機関は存在しない。

また、熱効率を知ることで熱機関のサイクルの評価を行うことができる。熱効率は熱機関の性能を表す最も重要な指標として、次の式(2.1)で表されるを用いる。熱機関は温度 T_H の高温熱源から熱量 Q_H を取り入れ、温度 T_L の低温熱源へ熱量 Q_L を放出して連続的に作動し、外部へ仕事 L を出す装置とする。

$$= \frac{[\text{正味得られる仕事}]}{[\text{入力した熱量}]} = \frac{L}{Q_H} \quad (1.1)$$

また、熱力学第1法則より

$$L = Q_H - Q_L \quad (1.2)$$

が成り立つので、式(2.1)に代入して

$$= \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} < 1 \quad (1.3)$$

となる。

1.2.1 カルノーサイクルの熱効率

カルノーサイクルは同一の高温・低温熱源間で作動する熱機関の最大熱効率である。理論最大熱効率 η_{Carnot} は作動流体の種類によらず、高温・低温熱源の絶対温度 $T_H, T_L(K)$ のみで決まり、以下の式 (2.4) で表される。

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (1.4)$$

第2章 手法

2.1 Maya とは

視覚化には3次元コンピュータグラフィックスのMayaを使用する。Mayaは主にゲームや映画といったエンターテインメント分野向け、とりわけフォトリアリスティックな3次元コンピュータグラフィックス作成を目的として、カナダのエイリアスシステムズ（現在のオートデスクと合併）が開発したソフトである。MEL スクリプトという独自の言語を用いて、自分の作成スタイルに合わせて自在にカスタマイズできるので自由度が高いといわれている。いくつかの機械系 CAD のデータ形式にも対応しており、実際に自動車メーカーなどの製造業ではデザイン的な要素の強い部品の設計に使用されている。

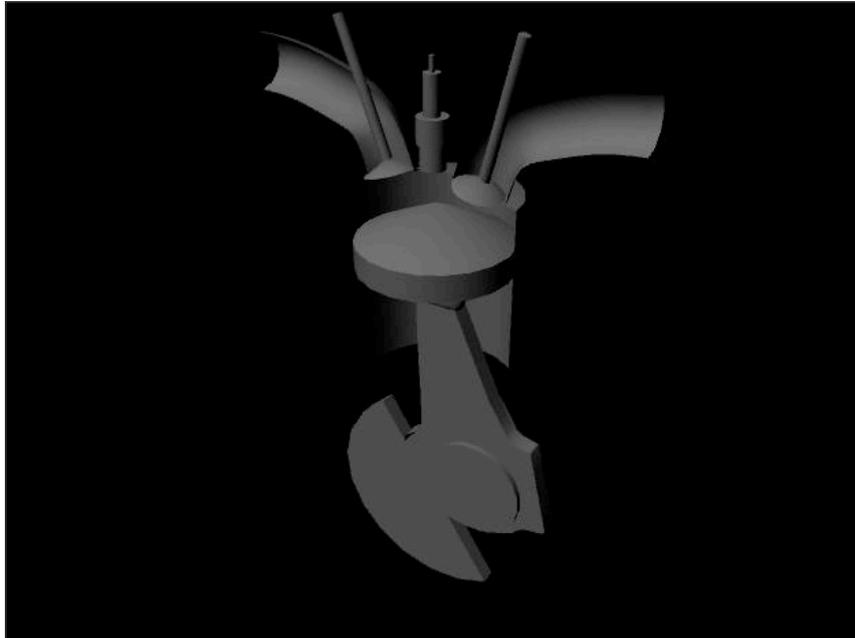


図 2.1: Maya による視覚化

Maya 作成するには、以下の3つの方法がある。

- MEL をコンパイルし、Maya に出力する
- シンプルなスクリプト言語から、グラフィックスに特化した MEL を出力し、MEL をコンパイルして Maya に出力する
- Maya を直接操作する

これら方法で視覚化を行った。

2.2 MEL Mayaに出力

MELは一度実行した後に、さらに違うプログラムを実行した場合、リアルタイムに上乗せされ、同時に再現されるという特徴がある。MELの実行したいところだけを選択し、control + enter コマンドで実行される。その下に、追加したいMELを入力し、選択して実行すると前回の実行結果はそのままに追加される。作成した物は自動的に名前がつくので、その物体を変化させたい場合には名前を指定して変化させる。

2.3 Ruby MEL Mayaに出力

2.3.1 Ruby

Rubyはスクリプト言語である。CやJavaの様なプログラム言語で書かれたプログラムを実行するには、そのプログラムのソースコードを機械命令に翻訳する「コンパイル」という作業が必要になる。「スクリプト言語」の「スクリプト」という言葉は、「プログラム」とほとんど同じような意味で使われているが、スクリプト言語の場合、書いたスクリプトはコンパイルする必要がなくそのまま実行できる。そのため、コンパイルの必要な言語に比べてプログラムは手軽である。スクリプトエディタにEmacsを使用でき、EmacsはMELのスクリプトエディタと違い、高機能でフォントが色分けされるなど、カスタマイズ性の高いスクリプトエディタである。

また、Rubyはオープンソースソフトウェア(フリーソフト)である。1995年にインターネット上で公開され、誰もがRubyを入手して自由に使用することができる。

2.3.2 RubyからMELへの変換

MELはグラフィックスに特化しており、一般的な言語に比べてループや線形代数計算の記述が複雑になる。そこで、本研究ではMELと、よりシンプルなスクリプト言語であるRubyの両方を使用してアニメーションの作成を行った。RubyからMELスクリプトに書き出す手法は、同じ物を多く作成する場合に効率よく計算できる。一方ライトの調節などの微

調整はその後 MEL スクリプトで直接書き足すという形をとることで、両方の特徴を活用できる。

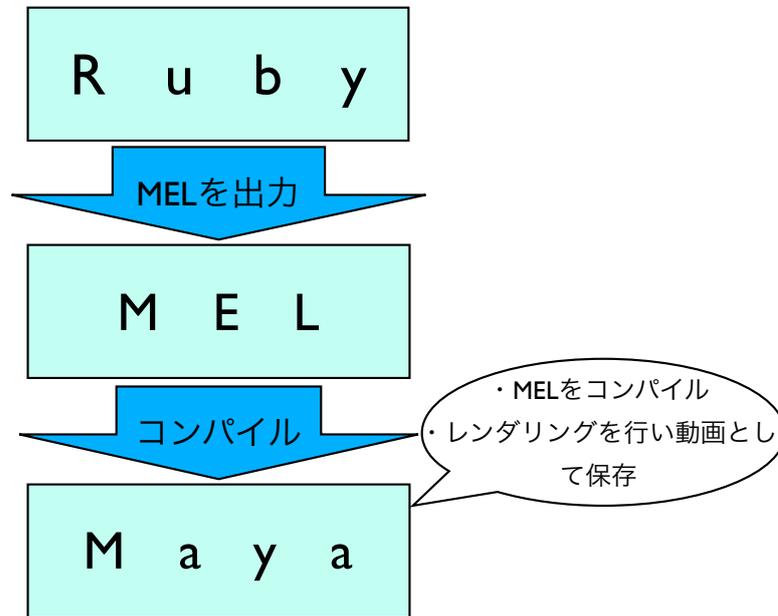


図 2.2: 視覚化の流れ

X,Y,Z 軸の設定や物体の大きさの設定など、すべてを毎回 MEL スクリプトで書いていくのはとても効率が悪い。そこで、Ruby で関数をつくりよく使う設定をつくっておき、使うときにその関数にアクセスする方法でアニメーション作成を行った。これによって、MEL スクリプトで毎回設定を行う手間が省け、スムーズにアニメーションを作成することができた。

2.4 Maya の直接操作

Maya は球やシリンダなどの図形を直接操作・作成することができる。

2.4.1 物体の作成

物体を作成する際には Maya のメニューバーから「作成」をクリックし、作成したいものを選択する。本研究では、主にポリゴンで物体を作成した。ポリゴンで作成したモデルは多数の面で形成される1つのジオメトリになるという理由からポリゴンモデリングは非常に普及している。従ってポリゴンモデルを変形しても、NURBSの場合とは異なり、パッチがバラバラに離れる心配がない。しかしポリゴンはディテールの面で限界があり、クローズアップまたはスケールアップした画面ではギザギザが目立つ可能性がある。そのメリット、デメリットをふまえて物体を作成するときに NURBS かポリゴンかを選択する。

キーボードの1キーから4キーでアイソパラムの密度を選び、5キーで色付けする。物体を選択した状態で、Wキーで移動、Eキーで回転、Rキーで大きさを変更できる。またはアトリビュートエディタ (ctrl+A) からでも変更できる。

アイソパラムやフェースの選択は F8 キーをクリックし、ステータスラインからラインコンポーネントやフェースコンポーネントを選択する。

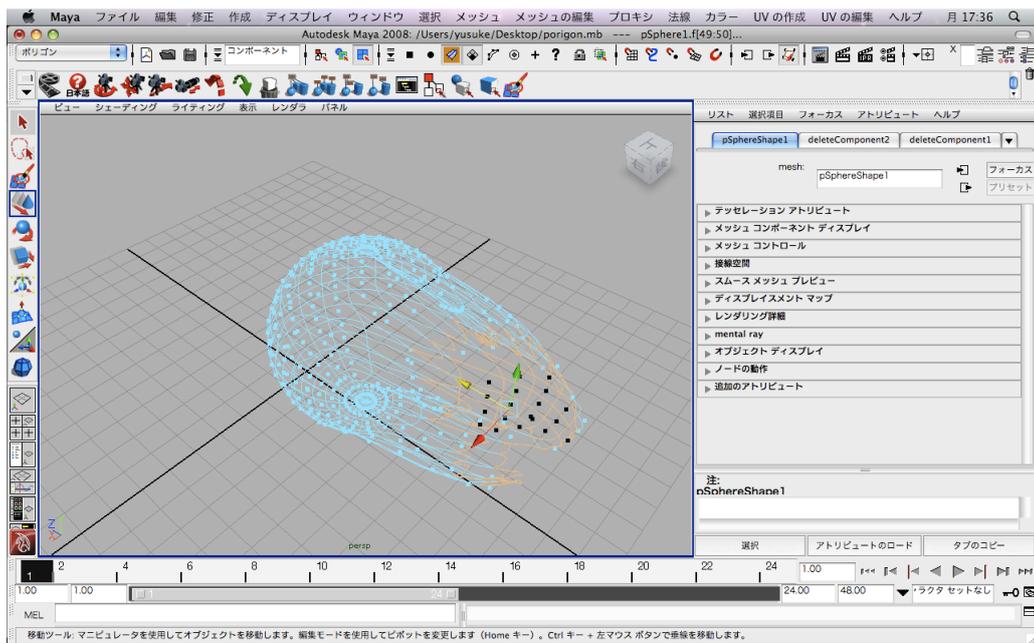


図 2.3: ライン , フェースの選択

2.4.2 色の変更

物体の色を変更するにはウィンドウ レンダリングエディタ ハイパーシェードをクリックする．そしてハイパーシェードウィンドウの左側にある「Maya ノードの作成」パネルで Lambert シェーダをクリックする．作成したシェーダはハイパーシェードウィンドウの上下に表示される．アトリビュートエディタが開くので，カラーをクリックし，色を変更する．

色を変更したい物体を選択し，ハイパーシェードの下の段の lambert2 の中央の逆三角をクリックしながらドラッグし，「マテリアルを選択項目に割り当て」を選択する．

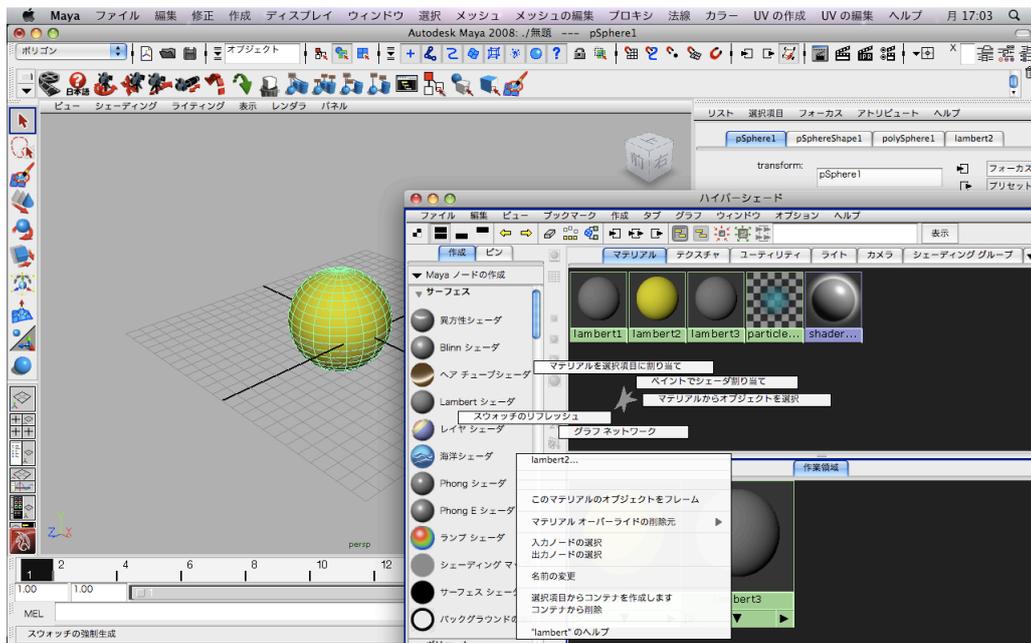


図 2.4: 球の色づけ

2.4.3 イメージのインポート

Maya を作成するにあたって，イメージ（画像）を参照して作成することは多々ある．そこで必要なことがイメージのインポートである．

ビュー イメージプレーン イメージのインポートからイメージを作成できる．イメージを消すときや半透明にするときなどはビュー イメー

ジブレン イメージプレーンアトリビュートを選択する .

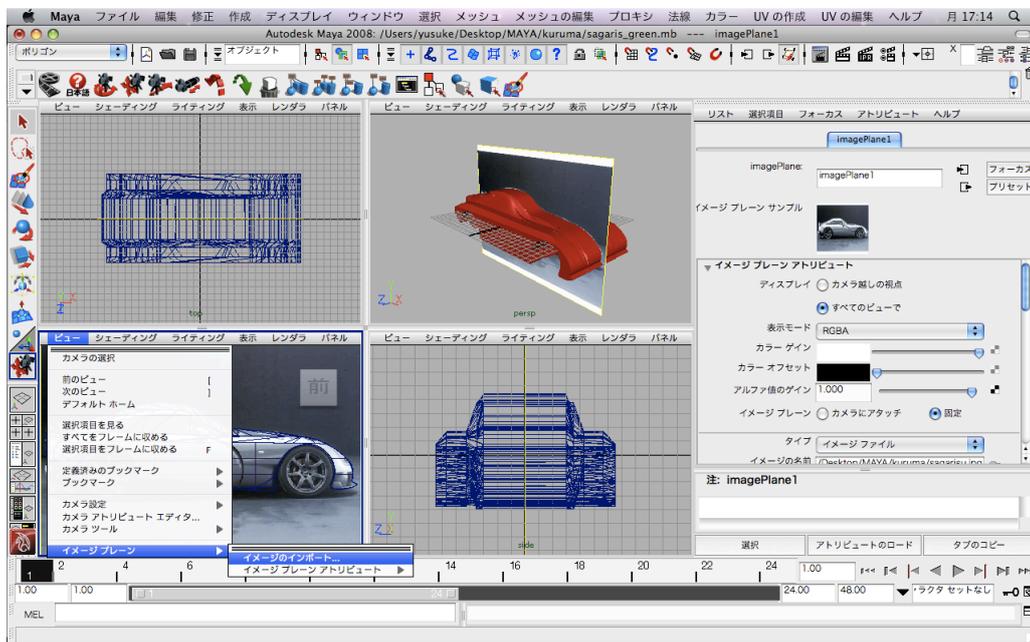


図 2.5: イメージの参照

2.4.4 アニメーション

アニメーションの設定は、動かす物体を選択し始点のフレームにタイムスライダを動かす。そして、S キーを押す。終点のフレームにタイムスライダを動かす、物体の移動・回転・スケールを設定し、S キーを押す。アニメーションを再生すれば物体は始点から終点へ動く。グラフエディタからもアニメーションの設定を行える。

2.4.5 レンダリング

すべての CG のシーンは最終的なイメージまたはムービーファイルにレンダリングする必要がある。レンダリングはコンピュータがシーン内のすべてのエレメントをどのように表示するかを計算するプロセスであ

る .

ステータスラインの Render Globals のアイコンをクリックするとレンダラー設定のウィンドウが開く . レンダラー設定の共通をクリックし , ファイル名を指定 , ファイル名の書式を名前.#. 拡張子へ変更し , 開始・終了フレーム , レンダリング可能なカメラを選択する . そしてレンダラー設定の Maya ソフトウェアをクリックして , 制度をカスタム , エッジのアンチエイリアシングを最高精度に設定する .

ステータスラインのドロップダウンメニューからレンダリングを選択し , メインメニューバーのレンダラー バッチレンダラーをクリックする . するとレンダリングが始まる .

レンダリングが終了すれば , メインメニューバーのファイル シーケンスの表示 で先ほど指定した "ファイル名.1.iff "を開く .

そして , ファイルムービーとして保存をクリックし , ファイル名 , 保存先を指定して保存する .

第3章 結果

3.1 ガソリンエンジンのアニメーション

ガソリンエンジンは 吸気 圧縮 膨張（燃焼） 排気 の4行程を繰り返すことにより運転を継続し，その間にピストンが2往復，クランク軸が2回転する．

吸気行程，圧縮行程，燃焼・膨張行程，排気行程を図5.1～図5.4に示す．

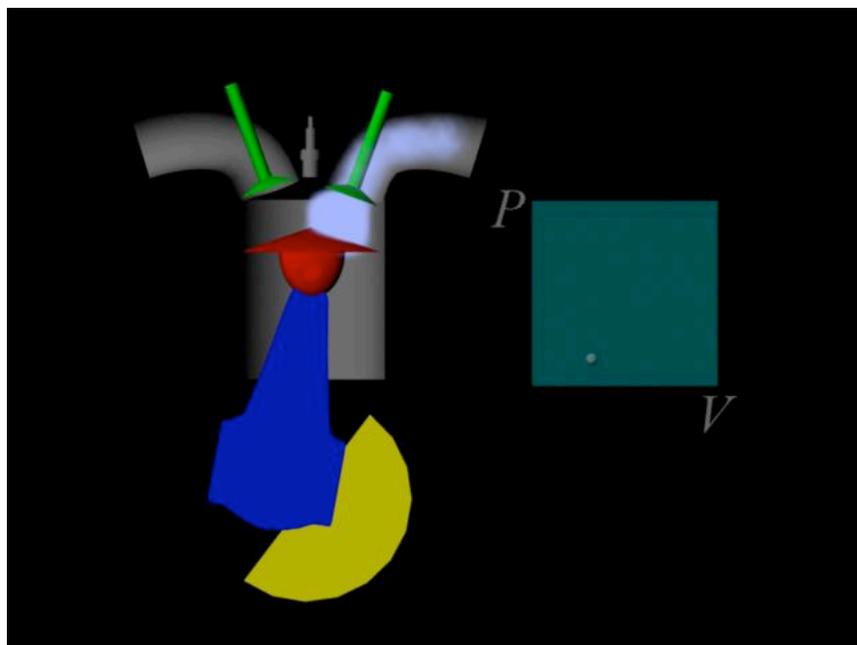


図 3.1: 吸気行程

右の吸気弁が開いて吸気管から新しい空気と燃料の混合気を吸気し，ピストンが下がる．圧力 P はほぼ一定だが，体積 V は増える．

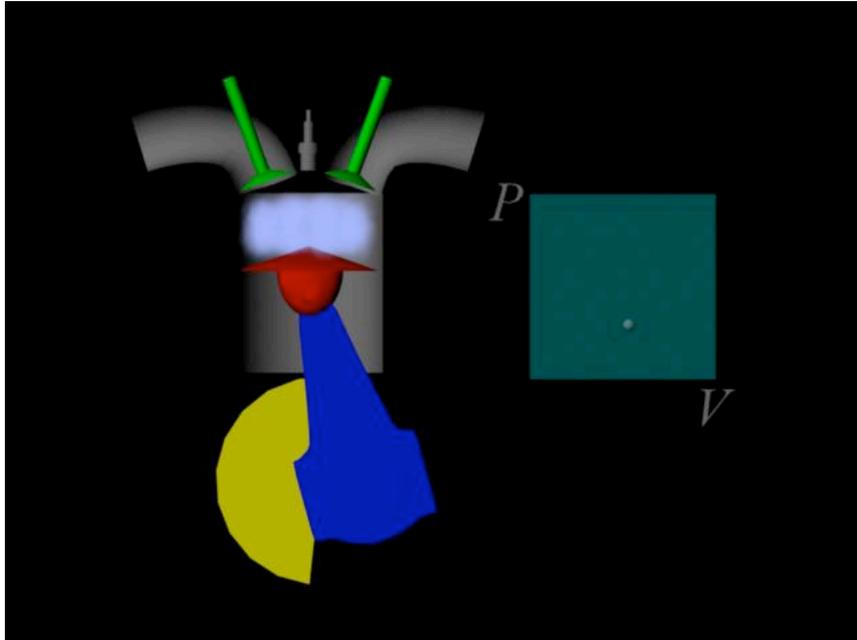


図 3.2: 圧縮行程

吸入した新しい混合気を圧縮する．吸気弁は閉じ，ピストンがあがる．
体積 V は減少し，圧力 P が増える．

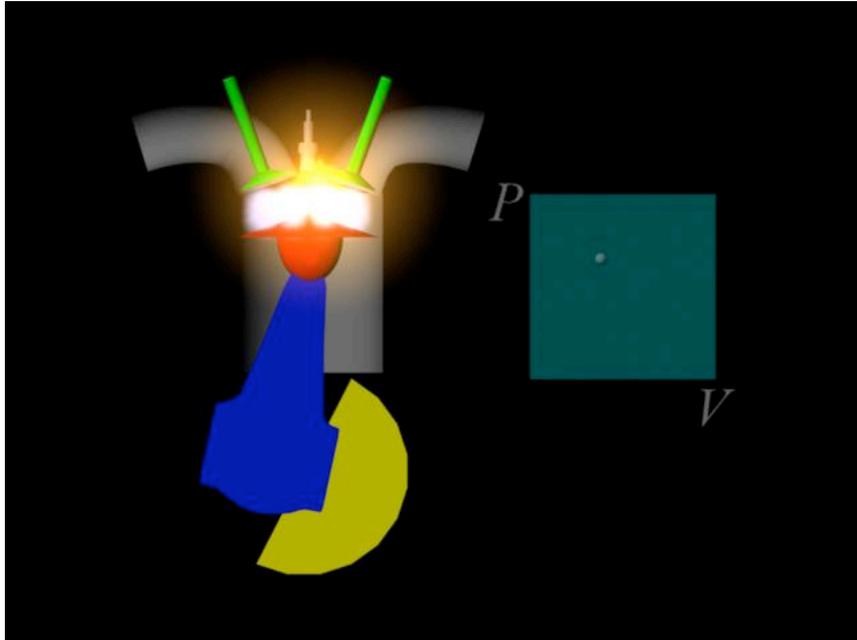


図 3.3: 膨張（燃焼）行程

混合気が圧縮され，激しく乱れた流れのもとで点火し，極めて急速な火炎伝播により燃焼する．燃焼によりピストンが下がり始めるまで，体積 V は一定で圧力 P が上昇する．ピストンが下がり始め，体積 V が増加し膨張して仕事をする．

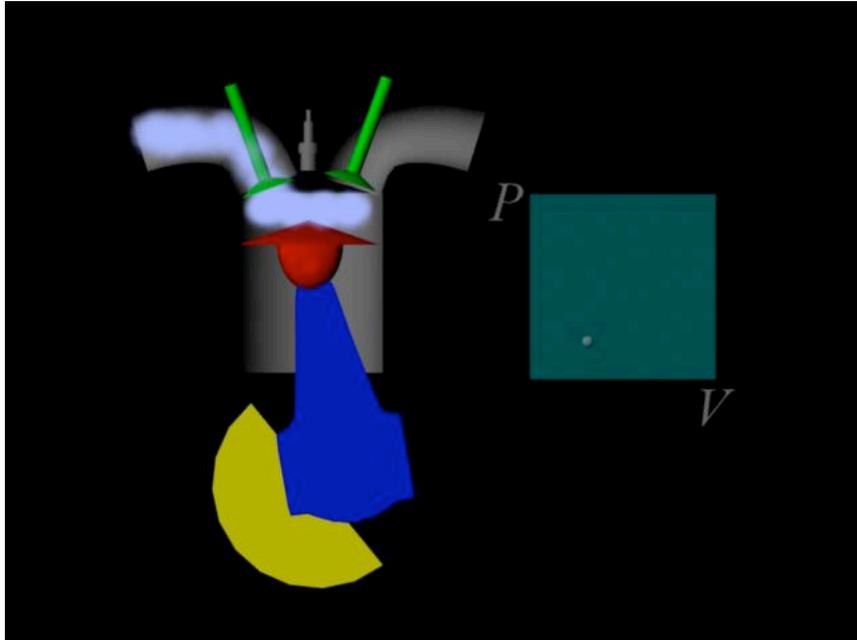


図 3.4: 排気行程

ピストンが上がり，仕事の終わったガスを排気する．圧力はほぼ一定だが，体積 V は減少する．

3.2 カルノーサイクルのアニメーション

カルノーサイクルは、仕事を連続に取り出すサイクル過程にするため、等温過程と断熱過程を組み合わせ、それらの変化の P-V 図上でのこの配の違いを利用して4つの過程を閉じようとしている。さらに、サイクルを行うために低温熱源に熱を捨てていることも重要なことである。

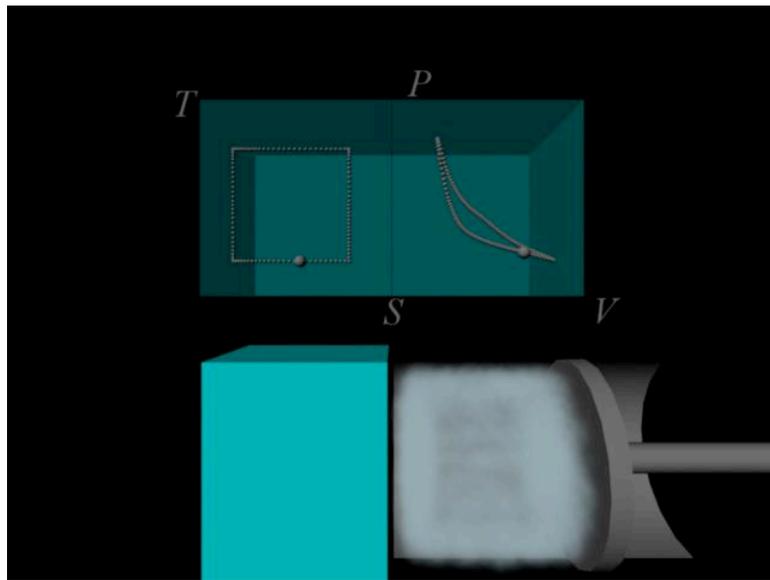


図 3.5: 等温圧縮

等温圧縮では絶対温度 $T_L(K)$ の低温熱源に熱量 Q_L を捨てる。温度 T は一定である。

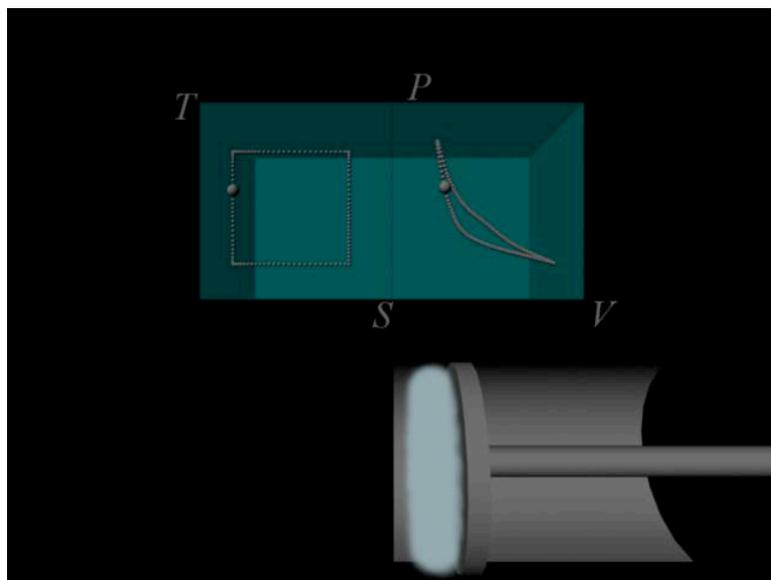


図 3.6: 断熱圧縮

低温熱源が取り除かれ，断熱圧縮が始まる．エントロピー S は一定である．

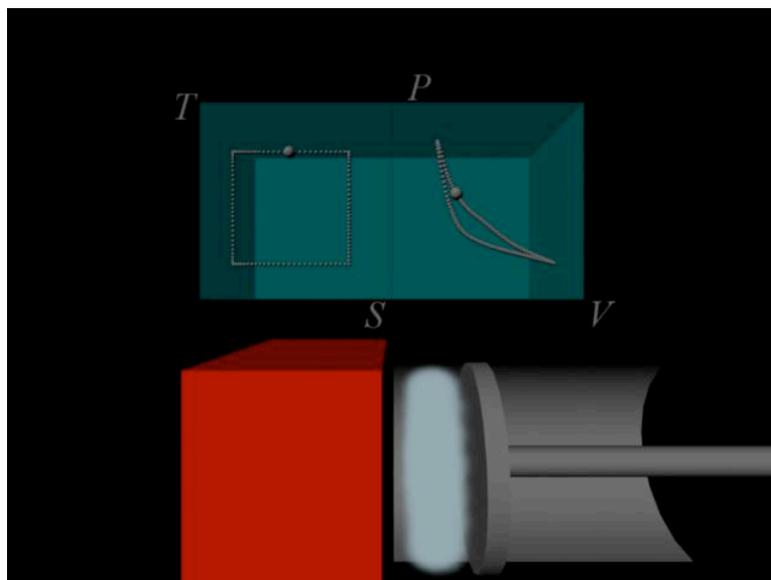


図 3.7: 等温膨張

絶対温度 $T_H(K)$ の高温熱源から熱量 Q_H を受ける．温度 T は一定である．

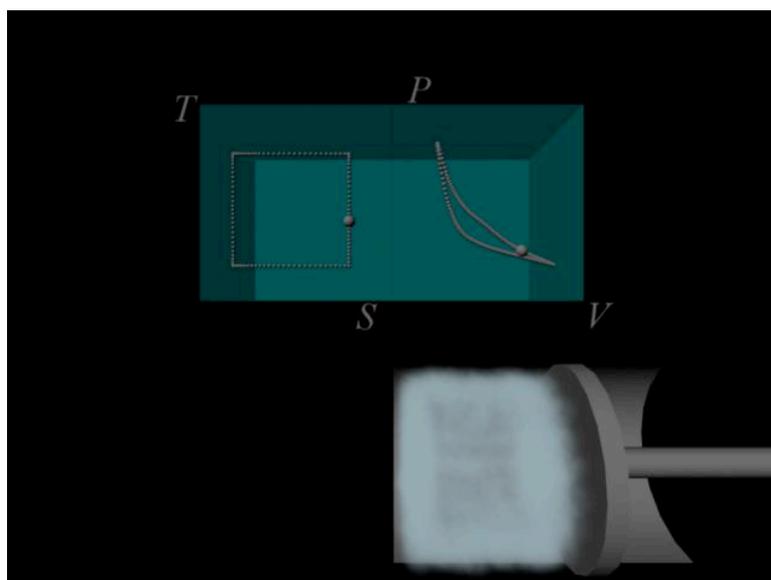


図 3.8: 断熱膨張

高温熱源が取り除かれ，断熱膨張が始まる．エントロピー S は一定である．

第4章 総括

4.1 考察

理想サイクルの視覚化により，非常に効率よく熱力学を学びやすくなった．今まで参考書で理想サイクルから熱力学を学習する際には説明とP-V図，もしくはP-V図とS-T図のみが記載されていて，エンジンの動きが記載されていない．本研究でエンジンの動きと状態量の変化のそれぞれ対応させたものを視覚化したことにより，熱効率，圧力，体積，温度，エントロピーなど熱力学における重要な要素の理解までの時間短縮とより深い理解を得られるようになった．

また，Mayaはゲームや映画などのエンターテインメント分野向けで，フォトリアリスティックな3次元CGを作成できるので，エンジンの理想サイクル視覚化は，熱力学の初学者だけでなく多くの人々にとって興味が引き立てられるものである．Mayaの視覚化により，熱力学の初学者の脳は誘惑され，刺激され，学習へのやる気を起こさせられるのではないかと考える．

4.2 今後の展望

今後は様々な熱機関の理想サイクルの熱効率の比較できるようなアニメーション作成することが望ましい．熱効率の比較を行えば熱機関のサイクルの評価の比較ができ，様々な熱機関のサイクルの知識を得ることにより有意義な学習になるだろう．

参考文献

- [1] 西谷滋人 著,『固体物理の基礎』,2006,森北出版株式会社.
- [2] 『熱力学』,2002,日本機械学会.
- [3] 田坂英紀 著,『内燃機関』,2005,森北出版株式会社.
- [4] 為近和彦 著,『熱・統計力学』,2008,森北出版株式会社.
- [5] 阿部知弘 著,『MEL 教科書』,2004,株式会社ボーンデジタル.
- [6] Dariush Derakhshani 著,『3D ビギナーのための Maya』,2005,エイリアスシステムズ株式会社

謝辞

本研究を遂行するにあたり，終始多大なる有益なご指導，及び丁寧な助言を頂いた西谷滋人教授に深い感謝の意を表します．

また，本研究を進めるにつれ，西谷研究室員の皆様にも様々な知識の供給，ご協力を頂き，本研究を大成する事ができました．最後になりましたが，この場を借りて心から深く御礼申し上げます．

付録 A 物理的を含んだ状態量

ここでは、エンジンメカニズムを物理あるいは熱力学背景とともに理解するために状態量の説明を示す。

系の状態がつり合っていて温度を含むすべての量が変わらないときを熱力学的平衡状態という。系の現在の状態を記述しようとした場合、一般にはその系がどのような変化をたどって現在の状態に至ったのかを考える必要がある。たとえば非平衡状態にある系を考える場合に、現在の状態には過去の履歴が深く関係しているであろう。しかし、熱力学的平衡状態にある系に関しては現在の状態で定義される物理量のみで表すことが可能である。このような物理量を状態量という。

A.1 示量状態量と示強状態量

A.1.1 示量状態量

示量状態量は系内の物質の質量に依存する。たとえば体積 V とエネルギー E などがある。不均一な系の示量状態量はそれぞれの示量状態量の和となる

A.1.2 示強状態量

示強状態量は系内の質量に依存しない。たとえば温度 T と圧力 P などがある。示強状態量は系の各相の状態量の和とはならない。示強状態量は局所的に定義でき、空間的な変化があってもよい。

A.2 全微分

状態量はそれぞれ独立に変化するものでなく，それらには一定の関係がある．独立に変化する状態量を x, y ，第3の状態量を z とすれば， z は x, y の関数であるから次の式のように表すことができる．

$$z = z(x, y) \quad (\text{A.1})$$

いま物質の状態に微小変化が生じて， x, y, z がそれぞれ $x+dx, y+dy, z+dz$ になったものとする， dz は次の式のように表すことができる．

$$dz = Mdx + Ndy \quad (\text{A.2})$$

ただし M と N は一般に状態量の関数である． x のみが増加して y が一定 ($dy=0$) のとき， $dz=Mdx$ となり，また y のみが増加して x が一定 ($dx=0$) であれば， $dz=Ndy$ となる．この関係は熱力学においては

$$M = \left(\frac{z}{x} \right)_y, \quad N = \left(\frac{z}{y} \right)_x \quad (\text{A.3})$$

と表され，したがって式 (3.2) は次のようになる．

$$dz = \left(\frac{z}{x} \right)_y dx + \left(\frac{z}{y} \right)_x dy \quad (\text{A.4})$$

式 (3.3) の M, N をそれぞれ y, x について偏微分すると

$$\left(\frac{M}{y} \right)_x = \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y}, \quad \left(\frac{N}{x} \right)_y = \frac{\partial^2 z}{\partial y \partial x} \quad (\text{A.5})$$

数学的には z が連続関数であれば，式 (3.5) の右辺の2階微分は等しいことにより次の式 (3.6) が得られる．

$$\left(\frac{M}{y} \right)_x = \left(\frac{N}{x} \right)_y \quad (\text{A.6})$$

式 (3.6) は数学的にいえば dz が全微分であるための条件である．熱力学

的に z は状態量であるための条件式であり，ある量が状態量であるかどうかを確かめることに用いることもできる．

ある過程に要する仕事と輸送された熱とは，系の最初および最終の状態だけでなく，その過程にもよるという日常的経験がある．このことは，仕事や熱では巨視的な状態を一意的に記述することはできないということを示している．

$$\begin{aligned} dz &= Mdx + Ndy \\ dz &= (\partial z / \partial x)_y + (\partial z / \partial y)_x \end{aligned}$$

全微分の条件

$$(\partial M / \partial y)_x = (\partial N / \partial x)_y$$

図 A.1: 全微分の条件

A.3 熱力学におけるエントロピーの概念

エントロピーとは物や熱の拡散の程度を表す示量状態量である。系に熱が入るとエントロピーは増大し、逆に系から熱が放出されるとエントロピーは減少する。

可逆サイクルの間に、温度 T で熱 Q を気体と交換するいかなる他の物質においても、積分はゼロでなければならない。言い換えれば、全微分が Q/T であるような状態量が存在しなければならない。この示量状態量がエントロピー S であり、

$$dS = \frac{Q_{rev}}{T} \quad (\text{A.7})$$

という微分方程式、あるいはそれを最初の平衡状態 1 から最後の平衡状態 2 まで積分すれば、

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{Q_{rev}}{T} \quad (\text{A.8})$$

によって定義される。

エントロピーが高いということは、エネルギーの利用可能度合いが小さく、利用しにくいことを意味し、エントロピーが低いということは、エネルギーの利用度合いが大きいことを意味する。つまり、エントロピーを利用することでサイクルの評価ができる。

A.4 熱力学過程

様々な条件の下で起こる状態変化を示す。

- a 定積過程：体積 $V = \text{const.}$
- b 定圧過程：圧力 $P = \text{const.}$
- c 等温過程：温度 $T = \text{const.}$
- d 断熱過程：エントロピー $S = \text{const.}$

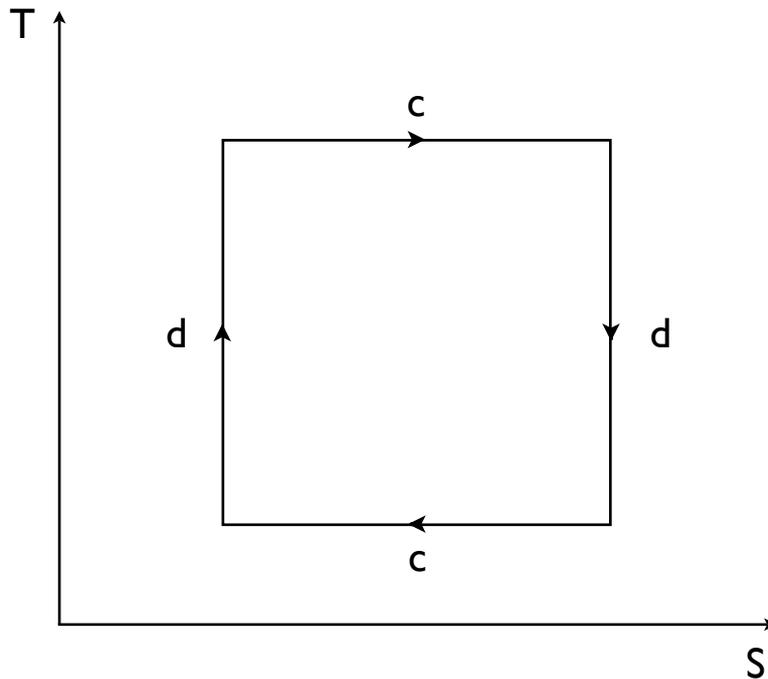


図 A.2: カルノーサイクルの T-S 図の等温・断熱過程

A.5 熱力学における状態量の相互関係

A.5.1 理想気体の断熱過程

理想気体を考える場合，3次元単原子分子や3次元2原子分子など自由度によって比熱が変わる．これらを総称してD次元の理想気体と呼ぶ．また，初期状態 (T_0, P_0, V_0) から終状態 (T, P, V) 間で変化する理想気体の断熱過程の V と T ， P と V ， P と T との関係を示す方程式は，

$$\left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{D}{2}} = \frac{V_0}{V} \quad (\text{A.9})$$

$$\left(\frac{V_0}{V}\right)^{\frac{D+2}{D}} = \frac{P}{P_0} \quad (\text{A.10})$$

$$\left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{D+2}{2}} = \frac{P}{P_0} \quad (\text{A.11})$$

となる .

これに適当な値を入力すれば , P,V,T の図を作成できる .

A.5.2 全微分のみによる第 1 法則の表現

可逆過程に対する熱力学第 1 法則はエントロピーを用いて ,

$$dE = Q_{rev} + W_{rev} = TdS - PdV \quad (\text{A.12})$$

この式よりエントロピーが , 局所的に定義できる示強状態量 (T,P) の影響下での内部エネルギーの変化を記述する示量状態量のひとつであることがわかる .