

■

機械系コアテキストシリーズ C-1

熱力学

片岡 勲・吉田 憲司
共著



■

コロナ社

機械系コアテキストシリーズ 編集委員会

編集委員長

工学博士 金子 成彦 (東京大学)

[B: 運動と振動分野 担当]

編集委員

博士 (工学) 渋谷 陽二 (大阪大学)

[A: 材料と構造分野 担当]

博士 (工学) 鹿園 直毅 (東京大学)

[C: エネルギーと流れ分野 担当]

工学博士 大森 浩充 (慶應義塾大学)

[D: 情報と計測・制御分野 担当]

工学博士 村上 存 (東京大学)

[E: 設計と生産・管理 (設計) 分野 担当]

工学博士 新野 秀憲 (東京工業大学)

[E: 設計と生産・管理 (生産・管理) 分野 担当]

このたび、新たに機械系の教科書シリーズを刊行することになった。

シリーズ名称は、機械系の学生にとって必要不可欠な内容を含む標準的な大学の教科書作りを目指すとの編集方針を表現する意図で「機械系コアテキストシリーズ」とした。本シリーズの読者対象は我が国の大学の学部生レベルを想定しているが、高等専門学校における機械系の専門教育にも使用していただけるものとなっている。

機械工学は、技術立国を目指してきた明治から昭和初期にかけては力学を中心とした知識体系であったが、高度成長期以降は、コンピュータや情報にも範囲を広げた知識体系となった。その後、地球温暖化対策に代表される環境保全やサステナビリティに関連する分野が加わることになった。

今日、機械工学には、個別領域における知識基盤の充実に加えて、個別領域をつなぎ、領域融合型イノベーションを生むことが強く求められている。本シリーズは、このような社会からの要請に応えられるような人材育成に資する企画である。

本シリーズは、以下の5分野で構成され、学部教育カリキュラムを構成している科目をほぼ網羅できるように刊行を予定している。

A：「材料と構造」分野

B：「運動と振動」分野

C：「エネルギーと流れ」分野

D：「情報と計測・制御」分野

E：「設計と生産・管理」分野

また、各教科書の構成内容および分量は、半期2単位、15週間の90分授業を想定し、自己学習支援のための演習問題も各章に配置している。

工学分野の学問内容は、時代とともにつねに深化と拡大を遂げる。その深化と拡大する内容を、社会からの要請を反映しつつ高等教育機関において一定期間内で効率的に教授するには、周期的に教育項目の取捨選択と教育順序の再構成が必要であり、それを反映した教科書作りが必要である。そこで本シリーズでは、各巻の基本となる内容はしっかりと押さえたうえで、将来的な方向性も見据えることを執筆・編集方針とし、時代の流れを反映させるため、目下、教育・研究の第一線で活躍しておられる先生方を執筆者に選び、執筆をお願いしている。

「機械系コアテキストシリーズ」が、多くの機械系の学科で採用され、将来のものづくりやシステム開発にかかわる有為な人材育成に貢献できることを編集委員一同願っている。

2017年3月

編集委員長 金子 成彦

本書は、大学や高専の工学系の学生が初めて熱力学を学ぶ際に使用することを念頭に書いたものである。熱力学は、工学においてもっとも基本的な学問分野の一つである。また、熱と仕事という、非常に身近な現象を取り扱うものである。しかしながら、熱力学は、学生にとってあまりなじめない科目の一つであり、わかりにくく、おもしろくない科目の代表である。これは熱力学が非常に洗練された理論体系として築き上げられた結果、初めてこれを学ぶ学生にとっては非常に理解が難しいものになってしまっているからである。

熱力学は、いくつかの法則に基づき、厳密な演繹^{えんえき}と巧妙な数学的手法を用いて組み立てられており、無味乾燥な印象が避けられない。また、エントロピーや自由エネルギーなど、直接測定したり実際の現象と簡単に結びつけることが難しい物理量を取り扱うことが多く、理解に戸惑ってしまう場合が多い。また、微分量や変分量、多変数関数の微分や積分など、かなり高度な数学的知識を必要とされることも、熱力学の不人気さの一因となっている。

しかしながら、熱力学は、蒸気機関を用いて熱から仕事を取り出すという、きわめて実用的、実際の技術を理論付けるためにできた学問分野であって、決して難解なものではない。また、熱力学の理論体系を完全にマスターしなければ、熱機関などの熱を利用する機械装置を設計することができないわけではない。特に初めて熱力学を学ぶ人にとっては、あまりにも厳密さを求めては、かえって理解が妨げられることになりかねない。

以上のことから、本書では、熱力学を実際の現象に即して、わかりやすく説明することに力をおいた。また、数学の知識はある程度は必要であるが、必要

最小限の知識で理解できるように工夫をしたつもりである。

本書の構成は以下のようになっている。1章で熱力学で用いる重要な物理量である温度、熱、仕事、運動エネルギー、比熱、圧力と単位、熱と仕事の等価性について説明した。2章ではボイル・シャルルの法則から始めて、さまざまな状態や、単位系での温度、圧力、体積を理想気体の状態方程式を用いて計算する方法について説明した。3章では熱力学の第1法則（熱量と仕事の総和の保存）について、さまざまな実例に基づいてわかりやすく説明した。4章では熱力学第2法則について熱機関の最大効率との関係を述べ、エントロピーの概念を説明した。また可逆変化、不可逆変化についてエントロピーを用いて説明した。5章では熱力学の重要な応用の一つであるガスを用いた熱機関であるカルノーサイクル、オットーサイクル、ディーゼルサイクル、ブレイトンサイクルについて、仕事、熱の収支、熱効率の計算方法について解説した。6章では水を中心に相変化の状態図（圧力と体積、温度と体積）について説明し、液相と蒸気相の物性値を与える蒸気表の使い方、気液二相状態（湿り蒸気）の物性値の計算方法についても説明した。7章では相変化に伴う熱の収支と仕事の基礎的事項を説明し、それに基づいて相変化を用いる熱機関であるランキンサイクル、再生サイクル、再熱サイクルについて、熱の収支と仕事のやりとり、熱効率について説明した。8章では冷凍機とヒートポンプの原理を熱力学的に説明し、その熱収支、仕事、および成績係数について説明した。また巻末には、相変化を用いる熱機関において重要な水と蒸気についての物性値を与える蒸気表を掲載した。

本書が工学系の学生がスムーズに熱力学を理解し、熱力学を好きになって、さまざまな技術に応用していく際の手助けになればと考えている。

最後に、本書の執筆に関して大変お世話になりましたコロナ社に感謝の意を表します。

2018年1月

片岡 勲・吉田憲司

1章 熱力学で取り扱う物理量

1.1 熱力学を学ぶこととは 2

1.2 熱量と温度 3

1.3 熱と仕事 4

1.4 気体の膨張による仕事 8

演習問題 12

2章 理想気体の状態方程式

2.1 ボイルの法則とシャルルの法則 14

2.2 理想気体の温度、体積、圧力の関係 15

演習問題 20

3章 熱力学の第1法則

3.1 閉じた系の熱力学第1法則と内部エネルギー 22

3.2 開いた系の熱力学第1法則とエンタルピー 30

3.3 実際の熱機関における熱力学第1法則 32

演習問題 36

4章 熱力学の第2法則

- 4.1 熱機関の最大効率 38
- 4.2 エントロピー 39
- 4.3 可逆変化と不可逆変化 42
- 4.4 状態量としてのエントロピー 49
- 演習問題 50

5章 ガスサイクル

- 5.1 概 説 53
- 5.2 気体の膨張と圧縮に伴う仕事と熱 54
 - 5.2.1 等圧膨張, 等圧圧縮 56
 - 5.2.2 等温膨張, 等温圧縮 59
 - 5.2.3 断熱膨張, 断熱圧縮 61
 - 5.2.4 等積加熱, 等積冷却 65
- 5.3 カルノーサイクル 67
- 5.4 オットーサイクル 70
- 5.5 ディーゼルサイクル 74
- 5.6 ブレイトンサイクル (ガスタービンサイクル) 78
- 演習問題 82

6章 相変化の熱力学

- 6.1 液体と蒸気の状態変化 85
- 6.2 実在気体の状態方程式 89
- 6.3 蒸気表と乾き度 91
- 演習問題 96

7章 相変化を伴うサイクル

- 7.1 相変化に伴う仕事と熱 98
- 7.2 ランキンサイクル 101
- 7.3 再熱ランキンサイクル 106
- 7.4 再生ランキンサイクル 110
- 演習問題 114

8章 冷凍機とヒートポンプ

- 8.1 概 説 117
- 8.2 逆カルノーサイクル 119
- 8.3 気液二相サイクルを用いた冷凍機とヒートポンプ 122
- 8.4 吸収式冷凍機とヒートポンプ 128
- 演習問題 130

付 録

- 1. 飽和蒸気表（圧力基準） 132
- 2. 飽和蒸気表（温度基準） 134
- 3. 過熱蒸気表 136
- 4. 圧縮水 144

引用・参考文献 146

演習問題解答 147

あとがき 164

索引 166

1 章

熱力学で取り扱う物理量

◆本章のテーマ

本章では、熱力学で用いる重要な物理量である、温度、熱、仕事、運動エネルギー、比熱、圧力等について説明し、その単位について、実用的に用いられているさまざまな単位とその相互の関連について述べる。また、熱力学、熱機関の最も重要な原理である熱と仕事の等価性について解説する。

◆本章の構成（キーワード）

- 1.1 熱力学を学ぶこととは
産業革命、熱力学、熱機関
- 1.2 熱量と温度
温度の測定原理、熱量の定義、比熱
- 1.3 熱と仕事
仕事の定義、運動エネルギーの定義、ジュールの実験、比熱の定義
- 1.4 気体の膨張による仕事
気体による仕事、圧力の定義

◆本章を学ぶと以下の内容をマスターできます

- ☞ 温度と熱量の関係
- ☞ 熱量と仕事の等価性
- ☞ 比熱と熱量
- ☞ 気体の圧力と仕事
- ☞ さまざまな単位系による物理量の表現

1.1 熱力学を学ぶこととは

熱は人間にとって最も身近なものの一つであり、また人間の生活に欠くことのできないものである。人間の置かれた環境の暑さ、寒さ、また身の回りのさまざまな熱を、温度として感じるができる。そして、このことによって人間は環境の中で生存することができる。また、人間は熱を利用するようになってその生活環境を快適なものにしてきた。人類が地球上に出現して以来、火という熱源を用いることによって、食物の調理、暖房、また光源など、さまざまな用途に利用してきた。また、陶磁器など、さまざまな産業においても熱を利用するようになった。特に産業革命以降は、人類は熱を大量に用いることによって大きな動力源を得ることができるようになり、近代文明を築くことができるようになった。

熱力学 (thermodynamics) は、こうした産業革命における**熱機関** (heat engine) の仕組みを理論的に説明するために生まれたものである。したがって、熱力学は実際の技術に即したきわめて実用的な学問であり、決してとっつきにくく難解な学問分野ではない。しかしながら、一方において、熱力学は物理学の一分野としてきわめて洗練された、厳密な理論体系として構築され完成されてきた。

工学においては、熱力学は**熱** (heat) をどれだけ**機械的工作** (mechanical work) に変えることができるか、また**仕事** (work) を用いて熱をどのように移動させるかを正確に把握するための方法である。その意味において熱力学は非常に実際の学問分野であり、決して難解なものではない。

蒸気機関が発明されて産業革命が起こったが、じつはその時点では、まだ、熱力学という学問分野はまったくと言っていいほど確立されていなかった。

ニューコメンの蒸気機関が1709年、ワットの蒸気機関が1788年、本格的なボイラであるコルニッシュボイラが1802年、トレビシクの蒸気機関車が1807年、フルトンの蒸気船が1807年に開発されたのに対し、熱機関としてカルノーサイクルの理論が確立されたのが1824年、マイヤーによりエネルギー

保存則が確立されたのが1842年、蒸気機関としてランキンサイクルの理論が確立されたのはなんと1859年である。

このように、熱力学は産業革命においていろいろな熱機関が発明された後に、これらの熱機関において熱から仕事がどれだけ取り出せるかの、理論的な上限を与えるために作られた学問体系である。その後、理論的にも数学的にも非常に洗練されたものとなり、現在の熱力学という学問分野になっている。

こうした経緯から考えて、技術者として熱力学を学ぶ場合には、あくまで実用的な観点から、熱から仕事をどれだけ取り出せるか、仕事を用いて熱をどれだけ移動することができるかを正確に計算するための手段として利用する立場が重要である。このような立場から熱力学を見ると、非常にわかりやすく実際的な理論であることがわかる。

本章では、熱力学で取り扱う物理量について説明を行う。

1.2 熱量と温度

熱力学で取り扱う最も基本的な物理量は、**熱量** (quantity of heat) すなわち熱の量である。熱力学の多くの教科書では、まず熱とは何かという難しい説明から入る場合が多い。そして熱とは分子や原子の運動であるという説明がある。しかしながら、熱とはそのようなややこしい説明を受けなくても、私たちが経験的によく知っているものである。つまり、熱とはものを温めるものである。ストーブをつければ部屋が暖まり、鍋の水をガスコンロにかければ温まってお湯になる。これが熱である。

実用的な熱力学においても、熱とはこのような定義で十分である。ただ、ものの長さや体積と同様、熱についてもそれを測る物差しが必要である。熱が多いか少ないかの量のことを熱量という。熱量はものが温まる度合いで測ることができる。ものの温かさ冷たさを測る物差しは言うまでもなく**温度** (temperature) である。したがって、熱量は、一定の量の物質が一定の温度上昇する量として定義することができる。

温度は**温度計** (thermometer) で測ることができる。今はほとんどがデジタルで表示されているが、温度は、液体や気体の膨張の度合いで測ることができる。もっとも普通に用いられているものは、アルコールの熱膨張を利用したアルコール温度計である。これはガラス管中に赤で着色した（青の場合もある）アルコールを入れ、目盛りをつけたもので、水が氷る温度を 0°C 、水が沸騰する温度を 100°C としてその間を 100 等分し目盛りをつける。この一目盛りが 1°C である。

熱量は、水 1 グラムが 1°C 上昇する量として定義され、これを 1 カロリー (1 cal) とする。この定義は私たちに最も身近な水と温度計を用いて定義され、熱量を実感できる定義である。以下に述べるように国際的な約束により熱量の単位は別のものを使うが、基本的は熱量をこうした身近に実感できる量として把握したほうがわかりやすく、熱を利用する機器を設計する際には都合がよい。

ものの温まり方は物質によって異なる。同じ熱量が加わっても、鉄や銅、アルコールなど物質が異なると、温度の上昇が異なる。これを**比熱** (specific heat) と呼ぶ。水の比熱が基準となり 1 である (単位を付ければ $1 \text{ cal}/(\text{g}\cdot^{\circ}\text{C})$)。鉄の比熱は $0.11 \text{ cal}/(\text{g}\cdot^{\circ}\text{C})$ 、銅の比熱は $0.092 \text{ cal}/(\text{g}\cdot^{\circ}\text{C})$ 、アルコールの比熱は $0.577 \text{ cal}/(\text{g}\cdot^{\circ}\text{C})$ である。このようにして、まず、熱というものと温度をいうものをしっかり定義することが熱力学の基本である。

1.3 熱 と 仕 事

1.1 節で述べたように、熱力学は**熱を仕事**に変換したり、仕事を熱に変換したりする場合の、その量的な計算をする手段である。したがって、つぎに必要なものは、仕事の定義である。仕事も、私たちが身近で実感できる単位で把握しておくのが工学的には望ましい。仕事はある力である距離を動かすことで定義され、仕事量は力と距離をかけたものである。最もわかりやすい単位は、1 kg の重さのものを 1 m 持ち上げる仕事である。これを $1 \text{ kgf}\cdot\text{m}$ と書く。こ

ここで f という記号は、1 kg の質量に働く力ということをはっきりを表すために書く。

この力と仕事の単位には別の表し方がある。力は、ニュートンの第二法則によって物体を加速する量として定義され、1 kg の物質を 1 m/s^2 加速する (1 秒間で 1 m/s 分の速度を増やす) のに必要な力を 1 N (ニュートン) で表す。

物質の重さは物質が地球の引力によって引っ張られる力であり、1 kg の物質の重さ 1 kgf は 9.8 N である。大まかには重さを 10 倍したらニュートンの単位となる。ニュートンの単位で表された力はなかなか実感しにくいですが、1 N は大まかに 100 g の重さと思えばよい。ニュートンの単位で表された量のおおよそ $1/10$ が kg の重さとなる。

この単位を用いて仕事量が定義される。1 N の力で 1 m 動かすときの仕事を、1 J (ジュール) と定義する。すなわち

$$1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (1.1)$$

この単位を用いると、1 kg の物質を 1 m 持ち上げる仕事量は 9.8 J 、おおよそ 10 J となる。

上の例はものを持ち上げる仕事であったが、実際の仕事としては、車が走ったり、機械が回転したりする運動の仕事である。これは**運動エネルギー** (kinetic energy) と呼ばれる。質量が m [kg] の物体が速度 v [m/s] で動いているとき、その物体の運動エネルギー e は次式で与えられる。

$$e = \frac{1}{2} m v^2 \quad (1.2)$$

運動エネルギーの単位も、仕事と同じく

$$\text{kg} \cdot (\text{m/s})^2 = \text{kg} \cdot \text{m}^2 / \text{s}^2 = \text{N} \cdot \text{m} = \text{J} \quad (1.3)$$

でジュール [J] の単位をもつ。蒸気機関では、石炭が燃える熱が仕事に変わる。また、車のブレーキをかけた場合に車を動かす仕事は摩擦熱に変わる。したがって、仕事と熱は相互に変化できる量であり、その単位は同じで換算できるはずである。この換算の割合は図 1.1 に示すジュールの実験によって調べられており、つぎのようになる。

あ と が き

以上、熱力学の基本法則から、気体の状態方程式や相変化の基本的な性質について述べ、ガスサイクルと気液二相サイクルを用いた熱機関と冷凍機とヒートポンプについて、その特性を説明した。

ここで述べたことは、工学系の学生、特に機械工学の分野の学生が初めて熱力学を学ぶ際に必要な事項である。またその内容については、熱から仕事を取り出す熱機関や、仕事を用いて冷凍や暖房を行う冷凍機やヒートポンプへの応用に力点をおいて、解説を行った。

熱力学は非常に洗練された学問領域で、厳密な論理構成と高度な数学的手法を用いて種々の熱的な現象を解析することができる。しかしながら、実際の技術への応用において、熱機関や冷凍機、ヒートポンプを設計する場合には、それほど高度な数学的手法を使う必要はなく、簡単な数学で、熱と仕事の収支を計算すればよい。このことは、本書のガスサイクルや気液二相サイクルの熱効率や成績係数を説明する場合に述べたとおりである。

また、熱力学の基本法則は決して難しいものではなく、私たちが日常経験している熱に関わる現象から本質的な原理を抽出して、それを厳密に述べただけである。熱と仕事の総量は変わらないとか、熱は暖かいところから冷たいところへ流れるといった、普通に経験することを定量的に表しただけで、何か日常では経験しない特殊な理論を述べたものではない。

熱機関や冷凍機、ヒートポンプでの仕事を計算する場合には、多少面倒な積分などを用いることがあるが、本書を見てもわかるように、そのような煩雑な計算は必ずしも必要はなく、熱の収支バランスから仕事の量が自然に求められる。

熱力学で重要なことは、細かな計算や難解な数式の取り扱いではなく、私たちの普通に経験している熱に関する自然現象から、蒸気機関や自動車のエンジン、エアコン、冷蔵庫といったものが巧みに作ることのできる原理を理解する

ことである。

本書を読んで熱力学への入門をスムーズに終え、より高度な熱力学を学ぶための基礎を理解するとともに、熱力学を用いてさまざまな新しい装置を作り出す技術者としての基本を身につけてもらえば幸いである。

2018年1月

片岡 勲・吉田憲司

索引

【あ】

圧縮液 compressed liquid	87
圧縮機 compressor	123
圧縮水 compressed water	87
圧縮比 compression ratio	72
圧力 pressure	8, 14
圧力比 pressure ratio	80
アボガドロ定数 Avogadro constant	16

【い】

一定圧力 constant pressure	98
一定温度 constant temperature	98
一般気体定数 universal gas constant	16

【う】

運動エネルギー kinetic energy	5
---------------------------	---

【え】

液体 liquid	86, 98
エンタルピー enthalpy	26, 31, 103
エントロピー entropy	39

【お】

オットーサイクル Otto cycle	70
------------------------	----

温度 temperature	3, 14
温度計 thermometer	4

【か】

外燃機関 external combustion engine	53
開放型ガスタービン open-cycle gas turbine	78
可逆過程 reversible process	22, 100
可逆変化 reversible process	42
華氏温度 Fahrenheit temperature	11
下死点 bottom dead center	70
ガスサイクル gas cycle	53
ガスタービン gas turbine	78
過熱液 superheated liquid	90
過熱器 superheater	102
過熱蒸気 superheated steam	87
過熱度 superheating	87
カルノーサイクル Carnot cycle	67
過冷却蒸気 supercooled vapor	90
乾き蒸気 dry steam	87
乾き度 vapor quality, steam quality	93

【き】

気液二相サイクル gas-liquid two-phase cycle	98
気液二相状態 gas-liquid two-phase state	87, 94
気液二相流 gas-liquid two-phase flow	94
機械的仕事 mechanical work	2
希釈熱 heat of dilution	129
気体定数 gas constant	17
気体の膨張 gas expansion	8
逆カルノーサイクル reversed Carnot cycle	119
吸収式ヒートポンプ vapor-absorption heat pump	128
吸収式冷凍機 vapor-absorption refrigerating machine	128
給水ポンプ water pump	102
凝縮器 condenser	123

【け】

ゲージ圧 gauge pressure	10
------------------------	----

【こ】

高温熱源 hot source	43
--------------------	----

【さ】

サイクル cycle 53
 再生ランキンサイクル regenerative Rankine cycle 110
 再熱器 reheater 106
 再熱ランキンサイクル reheat Rankine cycle 106
 サブクール液 subcooled liquid 87
 サブクール水 subcooled water 87
 サブクール度 subcooling 87

【し】

塩 salt 128
 自己着火 auto-ignition 74
 仕事 work 2, 4, 32
 実在気体 real gas 89
 湿り蒸気 wet steam, wet vapor 87, 93, 98
 シャルルの法則 Charles's law 14
 自由膨張 free expansion 47
 準静的過程 quasi-static process 22
 蒸気 vapor, steam 85, 86, 98
 蒸気圧縮式ヒートポンプ vapor-compression heat pump 124
 蒸気圧縮式冷凍機 vapor-compression refrigerating machine 124

蒸気機関 steam-operated heat engine 85
 蒸気サイクル steam cycle, Rankine cycle 98
 蒸気タービン steam turbine 102
 蒸気表 steam tables 91
 上死点 top dead center 70
 状態方程式 equation of state 16
 状態量 property, quantity 49
 蒸発 vaporization 87
 蒸発器 vaporizer 123
 蒸発潜熱 latent heat of vaporization 99
 シリンダー cylinder 70

【す】

水蒸気 steam 85

【せ】

成績係数 coefficient of performance 35
 摂氏温度 Celsius temperature 11
 絶対圧 absolute pressure 10
 絶対温度 absolute temperature 11

【そ】

相変化 phase change, phase transition 85, 98

相変化を伴う膨張と圧縮 expansion or compression with phase change 100

【た】

体積 volume 8, 14
 タービン turbine 78
 断熱圧縮 adiabatic compression process 54
 断熱膨張 adiabatic expansion process 54

【て】

定圧比熱 specific heat at constant pressure 26, 27
 低温熱源 cold source, cold sink 42
 定積比熱 specific heat at constant volume 23, 27
 ディーゼルサイクル Diesel cycle 74

【と】

等圧 isobaric 100
 等圧圧縮 isobaric compression process 54
 等圧膨張 isobaric expansion process 54
 等温 isothermal 100
 等温圧縮 isothermal compression process 54
 等温膨張 isothermal expansion process 54

等積加熱 isochoric heating process	65	燃焼ガス burned gas	70	沸騰 boiling	86
等積冷却 isochoric cooling process	65	【は】		ブレイトンサイクル Brayton cycle	78
閉じた系 closed system	30	背圧 back-pressure	105	分圧 partial pressure	19
ドルトンの分圧の法則 Dalton's law	19	【ひ】		噴射比 cut-off ratio	76
【な】		ピストン piston	70	【ほ】	
内燃機関 internal combustion engine	53	ヒートポンプ heat pump	117	ボイラー boiler	102
内部エネルギー internal energy	23	——の成績係数 COP of heat pump	121	ボイルの法則 Boyle's law	14
【ね】		比熱 specific heat	4	膨張弁 expansion valve	123
熱 heat	2, 4, 32	比熱比 ratio of specific heats, adiabatic index	28	飽和圧力 saturation pressure	87
熱機関 heat engine	2, 32, 53	火花点火 spark ignition	70	飽和液 saturated liquid	87
熱効率 thermal efficiency	33	非平衡状態 non-equilibrium	22	飽和温度 saturation temperature	87
熱平衡状態 thermal equilibrium	22, 87	標準状態 standard state	16	飽和蒸気 saturated steam	87
熱力学 thermodynamics	2	標準大気圧 standard atmospheric pressure	9	飽和蒸気表 saturated steam table	92
熱力学温度 thermodynamic temperature	41	比容積 specific volume	10	飽和水 saturated water	87
熱力学第1法則 the first law of thermodynamics	22, 25	開いた系 open system	31	【ま】	
熱力学第2法則 the second law of thermodynamics	38, 39	【ふ】		マイヤーの関係式 Mayer's relation	27
熱力学的サイクル thermodynamic cycle	53	ファンデルワールス式 van der Waals equation of state	89	【み】	
熱量 quantity of heat	3	不可逆変化 irreversible process	42	水 water	85
燃焼 combustion	70	復水器 condenser	102	密度 density	10
		沸点上昇 boiling point elevation	129	密閉型ガスタービン closed-cycle gas turbine	78
				【も】	
				モリエ線図 Mollier chart	126

【ゆ】		【り】		臨界比容積 critical specific volume 91
融解熱 latent heat of fusion	24	理想気体 ideal gas	16, 17	【れ】
【よ】		——の状態方程式 ideal gas law	16	冷凍機 refrigerating machine 117
予混合気 premixed charge gas	70	臨界圧力 critical pressure	90	——の成績係数 COP of refrigerating machine 121
【ら】		臨界温度 critical temperature	90	冷媒 refrigerant 118, 121
ランキンサイクル Rankine cycle	101	臨界点 critical point	88	
【P】		【T】		
p - V 線図 p - V diagram	54	T - S 線図 T - S diagram	54	

— 著者略歴 —

片岡 勲 (かたおか いさお)

1973年 京都大学工学部原子核工学科卒業
1975年 京都大学大学院工学研究科修士課程
修了(原子核工学専攻)
1975年 京都大学助手
1984年 工学博士(京都大学)
1992年 京都大学講師
1994年 京都大学大学院助教授
1997年 大阪大学大学院教授
2015年 大阪大学名誉教授
2015年 福井工業大学教授
2017年 福井工業大学工学部長
現在に至る

吉田 憲司 (よしだ けんじ)

1995年 大阪大学工学部産業機械工学科卒業
1996年 大阪大学大学院工学研究科博士前期課
程修了(産業機械工学専攻)
1999年 大阪大学大学院工学研究科博士後期課
程修了(産業機械工学専攻)
博士(工学)(大阪大学)
1999年 大阪大学大学院助手
2005年 大阪大学大学院学内講師
2006年 大阪大学大学院特任助教授
2007年 大阪大学大学院特任准教授
2009年 大阪大学大学院准教授
2016年 広島工業大学准教授
2017年 広島工業大学教授
現在に至る

熱 力 学

Thermodynamics

© Isao Kataoka, Kenji Yoshida 2018

2018年3月28日 初版第1刷発行

検印省略

著 者 片 岡 勲
吉 田 憲 司
発 行 者 株式会社 コロナ社
代 表 者 牛 来 真 也
印 刷 所 新日本印刷株式会社
製 本 所 有限会社 愛千製本所

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発 行 所 株式会社 コロナ社
CORONA PUBLISHING CO., LTD.
Tokyo Japan

振替00140-8-14844・電話(03)3941-3131(代)
ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-04534-5 C3353 Printed in Japan

(高橋)



JCOPY <出版者著作権管理機構 委託出版物>

本書の無断複製は著作権法上での例外を除き禁じられています。複製される場合は、そのつど事前に、出版者著作権管理機構(電話 03-3513-6969, FAX 03-3513-6979, e-mail: info@jcopy.or.jp)の許諾を得てください。

本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられています。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めていません。落丁・乱丁はお取替えいたします。