

はじめに

Préface

熱力学は独特の魅力を持った理論で、物理学者の基本的素養になっている。熱力学に魅了された物理学者は多い。アインシュタインも熱力学の深い知識を身につけた物理学者だった。「奇跡の年」1905年に発表した論文は、いずれも歴史を変える重要なもので、すべて熱力学に関係していると言ってもよい。

光量子仮説を唱えた論文は、熱輻射の研究から生まれた。ヴィーンの輻射式は、光の粒子が理想気体の分子のように振る舞うことを表わしている、と突き止めた。量子力学への道を切り開いた論文である。ブラウン運動の論文では、混沌とした分子の集合の中で熱平衡がいかに達成されるかを論じ、ゆらぎ－散逸定理の嚆矢を与えた。独立に同じ結果を得たスモルコフスキーとともに、数学の1分野、確率過程の祖になった。

また、特殊相対論は、光速度不変の原理と、慣性系では物理法則は同じ形を取るとする（ガリレイに端を発する）共変性の2つを経験則として、普遍的な結果を導いたもので、2つの経験的主法則、熱力学第1法則と第2法則からすべてを導きだす熱力学と同じ理論的組み立てになっている。10年後には等価原理（慣性質量と重力質量は等価である）と一般共変性（すべての一般座標で物理法則は同じ形を取る）によって一般相対論を組み立て、重力場方程式を発見した。

アインシュタインは『自伝的覚え書』でこう書いている。「理論は、その前提の単純さが著しいほど、それが結びつけるものごとの種類が多様なほど、その応用範囲が広範なほど、より印象深いものである。したがって古典熱力学は私に深い印象を与えた。それは、その基本概念の応用範囲の中で、（原理を疑う人のために特に言うておくが）決して放棄されることがないと確信する普遍的内容を持つ唯一の物理理論である。」

本書の構成を記しておこう。第1章では、具体例を用いず、熱力学第1法則のみから数学的に得られるすべての結果を与えた。熱容量（単位温度上昇させるのに必要な熱量）に並んで、近年は使われなくなった等温潜熱（等温過程で単位体積あるいは単位圧力を増加させるのに必要な熱量）を系統的に駆使する。熱容量比と圧縮率比が等しいとする厳密なレシュの定理を熱力学第1法則のみによって証明した。レシュの定理はいたるところで現れる基本定理である。



図1 熱力学の創始者サディ・カルノー
墓碑

理想気体，ファン・デル・ワールス気体，光子気体を取り上げ，熱力学第1法則のみを用いてその意味を論じたのが第2章である。これら作業物質が違っててもカルノーサイクルの効率は同じになることを確かめてある。

変数が3以上では積分分母存在の数学定理がないのでエントロピーの定義は物理的に証明しなければならない。第3章では，熱力学第1法則と準静的過程のみを用いて，カラテオドリの定理によってエントロピーを定義する。

内部エネルギーおよびエントロピーより熱力学関数を定義し，さまざまな関係式を導いたのが第4章である。難しい理論ではないの

で微分形式の処方も随時取り入れた（微分形式については拙著『ナブラのための協奏曲』，共立出版を参照されたい）。マクスウェルの関係式は熱力学関数から導くのが普通だが，微分形式を使うと熱力学関数の定義に関係なく，積分可能条件が本質的であることがわかる。エントロピーを使ったレシュの定理の証明も数多く取りあげた。現代の教科書でレシュの名は忘れられている。

第5章で熱力学の核心，熱力学第2法則を与える。内部エネルギー極小原理とエントロピー極大原理が同等であることを証明した。内部エネルギーとエントロピー，およびそれらから得られる熱力学関数の安定性についてくどいほど論じた。

第6章では開いた系を主題として論じた。ここでも内部エネルギー極小原理とエントロピー極大原理が同等であることを証明した。

第7章で熱力学第3法則を与えた。ネルンストの熱定理である。アインシュタ

インは固体の熱容量を計算し、絶対零度で 0 に近づくことを発見した（後にデバイがアインシュタイン理論を修正するが絶対零度で 0 に近づくことに変わらない）。アインシュタインの論文に感銘したネルンストはアインシュタインをベルリン科学アカデミー会員、カイザー・ヴィルヘルム物理学研究所所長、講義の義務のないベルリン大学教授に招聘するため尽力する。

次の第 8 章で統計力学に進む。統計力学の基本原理をボルツマンの原理と名づけたのはアインシュタインである。ブラウン運動もこの章で取りあげる。

第 9 章は光子気体で、アインシュタインの発見も論じた。光子気体の状態方程式は非常に単純なベルヌーリの公式でも、相対論、量子論、統計力学による厳密な計算でも結果は同じであるところが面白い。

第 10 章で相対論的熱力学を取りあげた。内外で相対論的熱力学を扱う教科書はほとんどない。アインシュタインが亡くなる少し前 (1952) に温度と熱量の変換則について自説 (1907) を翻したことでわかるように、現在でも論争が続いている。本書ではアインシュタインが意見を変えた後の変換則を証明した。ランダウーリフシッツとも結果的には同じである。また相対論的速度分布、相対論的理想気体、相対論的統計力学を論じた。

第 11 章で宇宙背景輻射を取りあげた。古典理論によってもフリードマン方程式が得られることはよく知られている。ここでは古典理論と熱力学第 1 法則によって、アインシュタインの重力場方程式から得られる 2 式すべてを、定数を除いて導いた。もちろんアインシュタインの重力場方程式も解いてある。定数はこれによって決まる。

第 12 章でブラックホールの熱力学を論じた。シュヴァルツシルトが、アインシュタインの重力場方程式厳密解を得て、後にブラックホールの事象の地平線となるシュヴァルツシルト半径を求めたのは従軍中で、アインシュタインの一般相対論の論文が出て間もなくである。アインシュタインは科学アカデミーでシュヴァルツシルトの論文を紹介し印刷に回した。ブラックホールは熱力学のもっとも簡単な対象である。ウンルー輻射の導出は初学者には難しいので読み飛ばしてもよい。