

熱素説 (熱量保存則) とエネルギー保存則

—山本義隆氏「熱学思想の史的展開」からの抜粋ノート—

Caloric Theory versus Conservation of Energy

Extracts from “Historical Development of Thermophysics” by Yoshitaka Yamamoto

執筆者プロフィール



吉田 英生
Hideo YOSHIDA

- ◎1983年東京工業大学大学院博士課程修了。東京工業大学工学部助手・助教授を経て、1999年より現職。
- ◎研究・専門テーマは、熱流体工学（伝熱・燃焼）に基礎を置くエネルギー工学
- ◎正員（フェロー）、京都大学教授 大学院工学研究科 航空宇宙工学専攻（〒606-8501 京都市左京区吉田本町 / E-mail : sakura@hideoyoshida.com）

1. はじめに

物理学の中でもエネルギーと直接かかわる熱力学では、長年にわたる大論争があった。「熱素説（熱量保存則）」か「エネルギー保存則」か、いうまでもなく勝ち残ったのは後者で、「熱力学第1法則」とも呼ばれる。しかし、ほとんどの熱力学関連書においては、熱力学第1法則がジュールにより行われた液体中で羽根車を回した実験によって確認されたように紹介されるだけで、そこに到達するまでのただならぬ過程を知る人は少ないと思う。かくいう筆者も学生時代以降けっこう長い間、例外ではなかった。

熱学に関する多数の書の中にあって独り^{きつ}屹立するのが山本義隆氏の大著『熱学思想の史的展開 熱とエントロピー 1, 2, 3（ちくま学芸文庫 2008, 2009）』である。この書は、^{せき}碩学の氏が、熱力学第1法則・第2法則・第3法則が確立するまでの過程を、古今の膨大な文献を読破し、鋭利な洞察力に基づいてまとめ上げた貴重な書である。熱学に限らず物理学を学ぶ者にとって宝であるといっても過言ではない。

したがって、本稿で取り上げるテーマについては山本氏に優る執筆者は考えられないのであるが、それは氏のご多忙もあり実現しなかった。もちろん、標記テーマに関心がある読者は同書と直接に取り組みばよいのだが、内容が凝縮しかつ大部の同書を読み通すのは必ずしも容易なことではない。この論争のもとと複雑な性格も加わって、おそらく一度読み流すだけでは、氏が展開する含蓄ある内容に

迫ることは不可能であろう。反復読書して記憶した事項も徐々に増し、少しずつ全体像に迫っていくのではなかろうか。少なくとも筆者においては、過去にそうであったし、現在もおそうである。

そこで、自分用の読書メモを兼ねて作成した抜粋ノート（文庫本にマーカーペンで印をつけた文章群の中から厳選）を文脈がつながるように整理して皆様にもご提供すれば多少のお役に立つのではないかと考えた。膨大な内容を限られた紙数で紹介するので至らぬ点が多々あることは承知のうえだが、本テーマに初めて接する読者には断片的ながら大まかな流れの把握となることを、また同書を座右において真剣に学ぼうとする読者にはポイントを振り返るノートとなることを願っている。なお、熱力学第1法則と第2法則は本来的には合わせて議論すべきではあるが、本稿では前者に話題を限定する。このため本稿は山本氏の3分冊の1巻と2巻（第1部から第4部）におおむね対応する。

2. 次章以下の表記

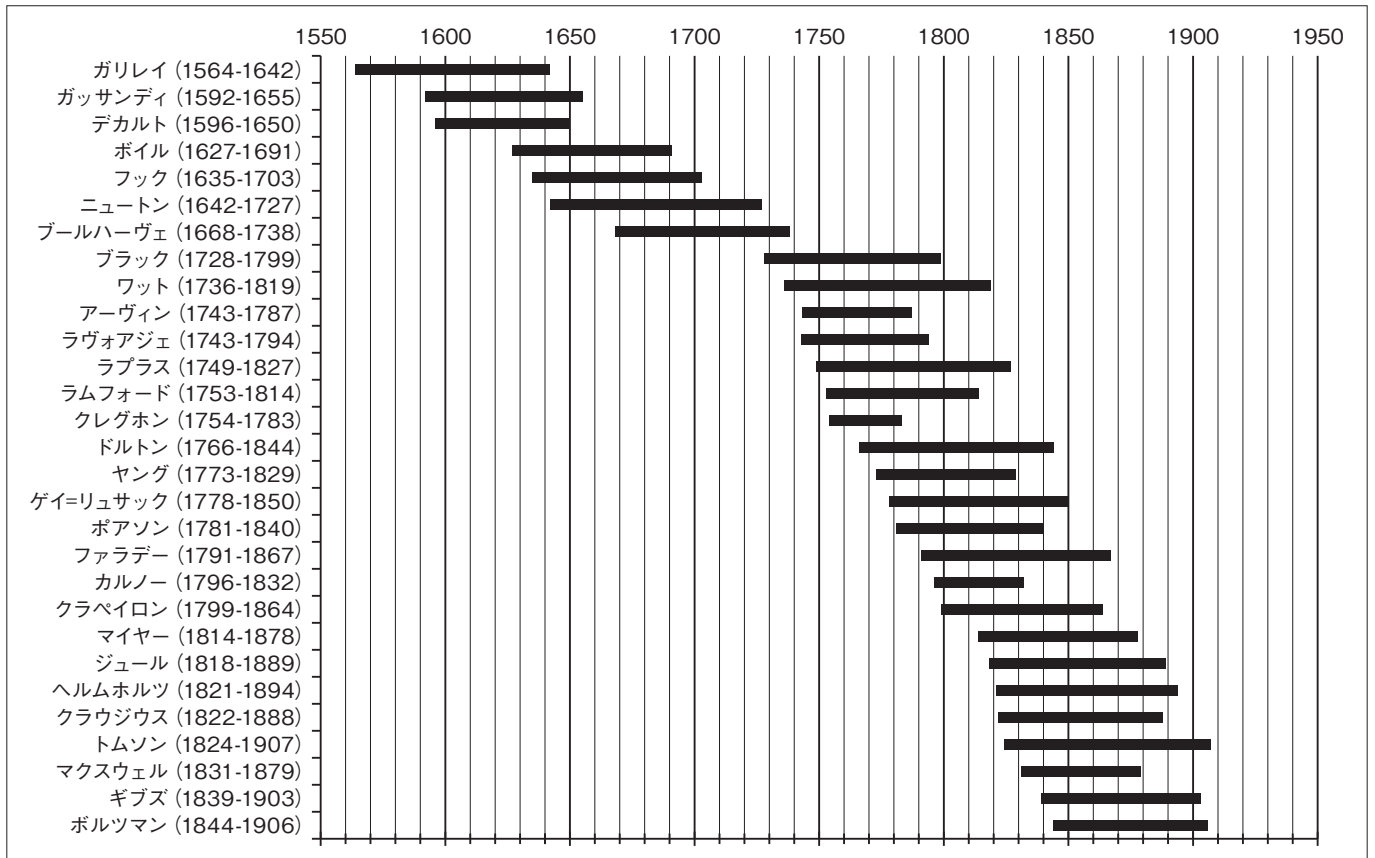
次章以下での表記を次のようにする。まず、引用順は、原則として、原著での順とする。山本氏の著書の中の文章は“ ”で囲って引用し、それぞれの末尾に引用元の章番号と節番号を示す。途中を略す場合は……とする。原文における改行、傍点、文献の番号等は、局所的に引用した文章中では意味が十分に伝わらないと判断して、勝手ながら省略させていただいた。また、人物の生年と没年は省略し、そのかわりに、見出しとした人名のうしろに付記するとともに表1にグラフ化して示した。

3. “まえがき”

まず、読者は「熱」の文字で始まる「まえがき」の第1行目で氏の世界に引き込まれる。

“熱病のような大航海時代を経て全地球的規模での活動を展開するに至った西欧近代は、新しい地球を発見し、地動説と近代物理学を生み出した。近代物理学はガリレオやデカルトによる機械論に始まる。それは、自然的物体を幾何学的形状と運動能力のみを持つものとして均質化することで、質を第一義とするアリストテレス自然学を超えて自

表1 熱素説 (熱量保存則)・エネルギー保存則 (熱力学第1法則)・熱力学第2法則に関連する人物の年代



然の定量化に成功した。……この素朴機械論の限界性を越えたのはニュートンである。彼は、……物質間に働く力という観念を導入した。……しかしニュートンにとっても通常物質は受動的で非活性的であったから、力は通常物質とは区別された能動的な存在としての〈エーテル〉に担われることになる。……世界の活動性の窮極の担い手としてのこの〈エーテル〉が、やがて、……熱物質=〈熱素〉へと発展してゆく。それゆえ18世紀後半の熱素説は、熱運動論にたいする単なるオルタナティブではなく、熱を世界の活動性の窮極の源泉と見る汎熱的世界像を含意していた。……熱素説を単なる誤謬と片付けるには、その遺産はあまりにも大きい。”(まえがき)

ここで、引用順序の唯一の逆転を行って、重要な注を加えよう。

“熱運動論と熱力学第1法則とのよく見られる混同……熱運動論は、もちろんそれだけでは熱力学第1法則(エネルギー保存則)を意味しない。……逆にまた、熱力学第1法則は、なるほどジュールにおける主張では熱運動論にもとづいているが、第1法則それ自体としては、熱と力学的仕事の等価的交換性を主張しているにすぎず、必ずしも熱運動論を前提とするわけではない。”(第17章V)

4. “第1部 物質理論と力学的還元主義”

ガリレオ・ガリレイ (1564-1642)

議論の出発点は、やはりガリレイからだ。

“素朴な機械論的自然観……その創始者の一人はガリレオだが、その自然観のなかに熱現象をはじめて包摂し、また熱現象の定量化の第一歩を記したのも、じつはガリレオ

本人であった。……しかし熱感覚にたいするこのような素朴機械論的把握がストレートに熱運動論へと導いたわけではない。……ガリレオにとって熱とは、すくなくともタテマエ上はあくまでも〈火の粒子〉の偶有性としての運動である。……現代的な意味での熱運動論をむしろ否定してしまう。”(第1章I~V)

ピエール・ガッサンディ (1592-1655)

“ガリレオに大きな思想的影響を受けながらデモクリトスやルクレティウスの原子論を近代に復活させたピエール・ガッサンディ……にとって、物が熱いとは、その物が〈熱の原子〉を数多く含むことを意味していた。……この〈火の原子〉〈熱の原子〉という観念こそが、その後の紆余曲折を経て、1世紀のちにクレグホンやラヴォアジエらの熱物質論として、定量的に法則化される熱学へのひとつの端緒を与えたのである。”(第1章VI)

ロバート・ボイル (1627-1691)

“ボイルは、普遍的物質の運動を第一義的とする「粒子哲学」の理論的帰結として、微視的粒子の無秩序な運動としての熱運動を語る。……—現代から見て正しく—捉えているのだ。……決定的に重要なことは、ボイルが熱運動の担い手を物質一般の構成粒子としたことを踏まえて、熱と運動の交換性を語っていることである。……19世紀に熱力学第1法則とそれゆえ熱運動論が確立された契機は、熱が運動であるという認識ではなく、熱と運動が等価的に転換させられうるという認識であったからだ。……私がボイルを熱運動論の真の先駆者と見るゆえんである。”(第2章V)

ロバート・フック (1635-1703)

“ボイルの法則の理論的根拠づけに最初にチャレンジし

たのは、発見者の一人で実験にも携わったフックであった。フックも機械論哲学の信奉者で、……ボイルとならぶ——いやボイルに先行する——熱運動論の先駆者であった。……このフックの理論は、固体と同様に気体の場合にも構成粒子が安定点近傍で振動しているというモデルであり……気体運動論の立場から見たとき「かなりいい線いっていった」といえよう。”(第3章IV)

アイザック・ニュートン (1642-1727)

“気体の圧力を構成粒子の運動の結果として説明するフック(吉田注:振動運動)やデカルト(吉田注:回転運動)の思想の対極にあるのがニュートンの理論だ。……ニュートン自身はどちらかという熱運動論者なのだが、熱素説は、ほかでもない、ニュートンのこの静止的気体分子および隣り合う粒子間の斥力という観念から、その斥力の担い手としての特殊な物質を考えるという形で生み出されていったのである。”(第3章V)

“気体運動論と熱物質論の対立は、気体を原子論的に捉えるか否かの対立ではなく、気体の圧力を動的な分子の運動による器壁への衝突の結果と見るか、静的な粒子間の斥力の結果と見るかの対立にあったのだ。”(第3章V)

このあと、第4章から第6章まで、ニュートン、デザギュリエといった一元の物質観に言及されるが、筆者には簡潔にして適切な引用文で構成する力がない。ニュートンの影響力は絶大なので本来は非常に重要な箇所であるが、その部分をスキップして先を急ぐことをお許し願いたい。

5. “第2部 熱素説の形成”

ヘルマン・ブールハーヴェ (1668-1738)

“デザギュリエら初期ニュートン主義者たちによる一元の物質観のゆきづまりの中で、18世紀後半には「電気流体」「熱物質」等の不可秤流体がつつぎつつぎ導入されてゆくが、それらの概念の〈エーテル〉にならぶいまひとつの起源は、オランダのヘルマン・ブールハーヴェが提唱した〈火の物質(materia ignis)〉に求められる。”(第7章I)

“ブールハーヴェは、一方でデカルトの機械論とボイルの粒子哲学を認めつつ、他方でニュートンの引力と斥力の概念をも受け入れる。それゆえブールハーヴェは、ニュートンにならって窮極粒子としての不変・不可分割で硬くて微細な「物理的原子」を想定するが、それとともにその原子の結合状態としての「化学的元素」をも措定する。”(第7章II)

“「ブールハーヴェは、結局はラヴォアジエとその後継者が単純で不可秤の物体のように考えた熱流体の仮定にまさに達しようとしていた(メツツジェ)と言うことができる。こうして、18世紀後半の熱素説(熱物質論)への道が敷かれてゆく。……ここに「熱素(calorique)」はラヴォアジエの造語とされるが、そのcaloriqueにたいする「古い名称」としてラヴォアジエは「火(Feu)」「火の物質(Matière du feu)」「火の流体(Fluide igné)」等をあげている。ラヴォアジエのこの「熱素」がブールハーヴェの〈火〉を継承したとまでは言えないにしても、借用した、ないし転用したものだと見るのは、無理ではない。”(第7章II)

“ブールハーヴェの〈火〉の物質理論を、それまでの「分類学的物質論」と分かちものは、保存と平衡の概念である。”(第7章V)

ジョーゼフ・ブラック (1728-1799)

“ジョーゼフ・ブラックが熱学史上ではたした役割はきわめて大きい。……定量的で数学的な熱学の形成のためには、ブラックによる「熱容量」と「潜熱」という概念装置の創出と、それにもとづく熱量概念と熱量測定法の確立が不可欠であった。”(第9章I)

“ブラックの功績は、温度——温度計の指示値——が内包量であることを明らかにし、その上で熱容量という概念を導入することによって、あらためて外延的な(extensive: 示量性の)量として熱量を定義しようということを示したことである。”(第9章IV)

ウィリアム・アーヴィン (1743-1787) と

ウィリアム・クレグホン (1754-1783)

“アーヴィンの理論は……当初は……ブラック理論のひとつの解釈と受け取られていたようだ。……この両者における理論構成の決定的な相違を見抜いたのがクレグホンであり、しかも彼は、アーヴィン理論に与する立場を表明した。問題の所在とクレグホン自身の立場は、次の一節に明快に表されている。……ブラックは、流動性と蒸気の状態はこの潜在〈火〉(latent fire)に負っているという見解であった。しかし……アーヴィンは、ブラックの方法によって物体中の〈火〉の相対量を見出そうとさまざまな試みを行い、同一の物体は異なる状態では〈火〉にたいする異なる傾向の比例性を示す〔比熱が異なる〕ことを実験によって示した。”(第11章V)

“18世紀末から19世紀初頭にかけての熱学論争は、熱が物質か否かではなく、熱物質論を前提とした上でこの両パラダイムをめぐって展開されてゆくことになる。比熱・潜熱派の指導者はラプラスとラヴォアジエであり、比熱変化に与したものは、クロフォードそしてドルトンとアヴォガドロであった。”(第11章V)

アントワヌ・ローラン・ラヴォアジエ (1743-1794)

“近代化学史上に最大の足跡を遺したのがアントワヌ・ローラン・ラヴォアジエだという点では、後世の評価は一致している。……彼の理論形成にとって、「燃素(Phlogiston)」の追放と「熱素(calorique)」の導入は表裏一体であり、彼は「熱素」を導入することによってはじめて「燃素」を追放することができたのである。”(第12章I)

“ラヴォアジエの熱素理論が燃焼＝酸化理論を生み出したことは、気体化学への関心を通して気体の熱理論への関心を高めるとともに、化学の新理論の承認と抱き合せに熱素説の承認を促すことになった。”(第12章VII)

6. “第3部 熱量学と熱量保存則”

ピエール・シモン・ラプラス (1749-1827)

“18世紀末に熱量学(カロリメトリー)の基礎を作り、熱物質論への流れを決定づけたラプラスとラヴォアジエの共同研究は、『熱についての論考』(以下『論考』)の標題で1783年6月に発表され、翌84年に印刷された。”(第13章I)

“ラプラス自身の熱にたいする見解について、これまでの多くの歴史書ではラプラスを単純に熱運動論者と捉えている。しかしフォックスは、すくなくとも1803年以降はラプラスが熱物質論に転向したとしている。実際ラプラスは、19世紀に入ってから熱素説の強力な学派を形成し

領導するようになった。”(第13章III)

“熱物質論か熱運動論かという熱の本質をめぐる「自然科学者の間の分裂」とは、83年の時点ではラヴォアジエとラプラスの間の分裂であったかもしれないが、彼らは共同論文の執筆にあたっては、この分裂を進めることをせず、逆に「われわれはこの二つの仮説のいずれを採用するかを決めないでおこう」と語り、問題を棚上げにしてしまった。そして「熱の本質についてはこの二つの仮説以外には作れないのだから、それらに共通する原理を採用しなければならない」という立場から、彼らが「共通の原理」として提唱したのが、《熱量保存則》であった。”(第13章IV)

ジョセフ・ルイ・ゲイ＝リュサック (1778-1850) と
ジョン・ドルトン (1766-1844)

“フランス革命は、……その新しい支配層は意欲的に科学と技術の結合と振興をはかることになった。……革命政府は王立科学アカデミーを廃止し、かわりに学士院を創設しただけではなく、1794年には科学者・技術者養成のための中央公共事業学校(翌年「エコール・ポリテクニク」に改名)を立ち上げている。……エコール・ポリテクニクで教育された若い俊才たちが、19世紀のはじめの3分の1の間にフランスの科学——数理学——をヨーロッパの最先端に押し上げてゆく。……本章で論じるジョセフ・ルイ・ゲイ＝リュサックは、その先頭に位置する。……解析学を駆使して古典力学(天体力学)と重力論をほぼ完成させたラプラスが、フランス科学界きっての名声を手に入れたことはよく知られている。……ラヴォアジエ亡きあとに彼が有能な実験家の協力相手ないし助手として選んだのがゲイ＝リュサックであり、その最初のテーマが、気体の熱膨張であった。……気体の熱膨張は、ゲイ＝リュサックとほぼ同時に、イギリス人ジョン・ドルトンによって独立に測定された。……ジュールは一時期ドルトンの生徒であった。……ゲイ＝リュサックとドルトンの研究を契機に、熱学研究の趨勢は気体論へと収斂してゆく。”(第14章II～VII)

シモン・ドニ・ポアソン (1781-1840)

“19世紀になってフランスで断熱変化がにわかに脚光を浴び始めた理由は、ひとつには、1800年にドルトンがはじめて断熱変化の定量的測定を試み、またそれをアーヴィンとクロフォードの《比熱変化理論》から説明しようとしたことにある。……いまひとつは、フランスでは、1802年にビオが、のちにはポアソンが、ニュートンの理論ではうまく説明できなかった音速の問題(5-V)を、ラプラスの示唆にもとづき、断熱変化と結びつけることによって解決しうる可能性を明らかにしたことであった。”(第15章I)

“ゲイ＝リュサックは……ドルトンの《比熱変化理論》の結論を否定する。……19世紀はじめに《比熱変化理論》と《比熱・潜熱理論》の対立が煮詰まり、その解決の鍵が気体比熱の精密な測定にあると考えられるようになった。……しかし学士院——ベルトローとラプラスの領導するフランス科学界の中核——の真意は、どちらが正しいかを判定するというよりは、むしろアーヴィンの《比熱変化理論》を葬り去ることにあった。……フランスにおいては《比熱変化理論》はほぼ歴史の舞台裏に退くことになった。……他方で、《比熱・潜熱理論》にもとづく熱素説そのものは、いよいよ確かなものとして受け入れられ、権威づけられてゆくことになった。……現在では気体の熱現象の中では

もっとも力学的で、それゆえ熱と力学的仕事の互換性をもっとも直截に表すものと思念されている断熱変化現象が、熱素理論の確立とそのもっとも洗練された定式化への踏み台となったのだ。物理学史における最大の皮肉といえよう。こうして次の10年間で、熱素説はその絶頂期を迎える。”(第15章III・IV)

ラプラスとポアソン (つづき)

“熱素説を「解析的热量学」として数理物理学のレベルに引き上げ、一個の体系に仕上げたのはラプラスとポアソンであった。その理論は、いくつかの試行を経てのちほぼ1821～22にでき上り、23年に大著『天体力学』の最終巻(第5巻)に全面展開される。カルノー論文の出る1年前のことであり、いわば熱素説の絶頂といえよう。”(第16章I)

熱量保存則の問題点に関する詳細な理論展開は割愛するが、“間違った前提から正しい結果が得られた理由について、……「誤りが相殺された」というような偶然的な事情ではなく、むしろ微小変化で「2次の微小量を無視しうるから」なのである。このことは、後述(§V)のように、熱量保存則と熱力学第1法則の矛盾が熱関数 Q の2階導関数ではじめて顕在化するということに対応している。……しかしこれらの一致は、根拠のない理論と不正確な測定値の間の偶然の一致にすぎぬ。……ともあれこの偶然の一致は、熱素説——とりわけ熱関数の存在——への確信をより一層強めさせることになった。”(第16章III～V)

カウント・ラムフォード (1753-1814)

“1798年の……ラムフォードの実験は……ミュンヘンの兵器工場で彼が大砲の砲身の中ぐり工程で発生する多量の熱に目を留めたところから始まる。そこでラムフォードは、この中ぐりを水中で行い、熱が減衰することなく発生し続けること、……他方、金属の削り屑の比熱には変化が見られないこと等を見出した。”(第17章II)

“要するに彼の三段論法は、熱は無尽蔵に発生する、他方、物質は保存する、したがって熱は物質ではないというもので、熱については、むしろ非保存性が強調されているのだ。そしてこの点こそ、当時の熱素説の認め難いところであった。当時の熱をめぐる真の争点は、そしてまた、熱素説と熱力学第1法則の真の対立点も、熱が物質か運動かにはなく、熱は保存するの否かにこそあった。……保存則が一見破れるかのように見える事態に直面するごとに、保存則を満たすように潜熱概念を拡張することによって、理論は適応範囲をむしろ拡大していった。”(第17章VI)

“かくして熱素説は、熱が物質か否かという議論をとめないながらも、熱量保存則にかわる指導原理としての熱力学第1法則(汎通的エネルギー保存則)が確立するまでは、舞台裏に退くことはなかった。逆にまた熱量保存則は単に否定されたのでもないし、熱素説は熱が運動であることが明らかにされたことによって終焉したのでもない。熱量保存則がより広い保存則(エネルギー保存則)に包摂され、その広い関係性の中で熱量保存則の意義と限界がともに明らかにされてゆくことによってはじめて、熱素説は乗り越えられていったのである。”(第17章VI)

7. “第4部 熱の動力——カルノーとジュール”

サヂ・カルノー (1796-1832)

“カルノーが『火の動力』を書いた1824年は、ラプラス

とポアソンによる熱力学の完成の翌年、つまり熱素説の絶頂期にあたる。熱素説、なかんずく《比熱・潜熱理論》はパラダイム形成に成功していた。……カルノーは、すくなくとも『火の動力』では熱素説と比熱・潜熱パラダイムを受け入れ、それを前提に論じている。……むしろ決定的に新しく、それゆえカルノー論文の理解を妨げたのは、彼の設定した問題それ自体にあった。熱素の作用能力にはいかなる原理的制約があるのかという問題である。……そもそも、熱の作用能力の原理的制約を問うことはもちろん、熱を「動力」源として捉えること自体、言うまでもなく火力機関（蒸気機関）の発展に促され工学技術上の要請に触発されたものである。それは、それまでの言うならば「自然哲学」——なかんずく化学——を出自とする熱学——とりわけ実体的熱素説——の伝統にとっては、きわめて外在的で異質な問題であった。カルノーをそれまでの熱素説と分かち決定的な点はどこにある。……熱と「動力」の定量関係を問うということは、……同じ熱素説の立場であってもコペルニクス的転換であった。”（第18章II）

“たいていの歴史書は、Aの比熱・潜熱パラダイムとCの熱量保存則とを不可分のもののように扱っているが、歴史的にはそうであっても論理的にはそうでない。……カルノーの議論の大部分は比熱・潜熱パラダイムだけを前提にすれば導けるのであり、必ずしも熱量保存則を必要とはしない。熱量保存則が成り立たなくても、じつは無限小サイクルで論じているかぎり

$$\oint dq = 2 \text{ 次の微量量} \equiv 0$$

となる。それゆえ熱量保存則を前提にしたとしても、実質的には熱力学的に見ても正しい式を使っていることになる場合が多い。”（第20章I～V）

トーマス・ヤング (1773-1829)

“熱素説は、1823年のラプラスとポアソンの断熱変化理論と24年のカルノー論文によってその絶頂を迎えるが、その直後より急速に衰退してゆく。しかし、だからといってすぐさま熱運動論にとってかわられたのではない。熱素説にたいするオルタナティブとして1820年代に登場したのは熱波動論であり、その後しばらく両者の共存状態が生まれ、またそれにならんで、熱の本質は問わないとする実証主義的不可知論も台頭する。……熱を何と捉えるかは、光にたいする見方と密接に相関することになる。……しかしこのような熱と光の波動論は、18世紀後半には顧みられなくなる。というのも、一方ではフックやホイヘンスの光の波動論にたいしてニュートンの光の粒子論が勝利を収め、他方で熱理論においてはニュートンの〈エーテル〉論の発展として熱素説が主流を占めたからである。……それゆえ熱の波動論が19世紀に登場するためには、それに先だって光の波動論の復活を必要としたのであり、その先鞭をつけたのが、他でもない、ヤングのこの1800年の論文であった。……ヤングの熱と光の波動論は、イギリスでは黙殺ないし冷笑されたようだ……ヤングの熱波動論が受け入れられる——すくなくとも広く議論の対象となる——ためには、それに先だち光の波動論が提唱され受容されることを必要としたが、そのこと自体容易ではなかった。1815年にフレネルは、ホイヘンスとヤングの光の波動論を復活させ、干渉理論を緻密化し、さらにそれまでの波動論の難

点であった回折を説明するのに成功した。フランスにおいてラプラスの権威を揺さぶり、ラプラスの影響力凋落の引き金になったのが、フレネルのこの光の波動論であったと言われる。……ともあれ1820年代には光の波動論は、光の粒子論が説明したことをすべて説明したばかりか、定量的側面では粒子論に勝ることが明らかになっていた。……光の波動論のこのような普及は、……熱の波動論を同時に浮上させ、それまでの熱素説への確信を揺るがせてゆくことになった。”（第21章I～III）

サザ・カルノー (つづき)

“しかし、じつはすでにカルノーは——大半の熱波動論者と異なり——熱波動論を運動と熱の変換という観点から捉え、熱力学第1法則に到達していた。……カルノーは、熱運動論を次のように表現している。熱力学第1法則の歴史上はじめての表明である。熱は動力、または、むしろ形を変えた運動に他ならない。熱は物体の粒子のある種の運動である。動力の消滅があれば、消滅した動力の量に正確に比例する熱量が必ず同時に発生する。逆に、熱が消滅するところでは、必ず動力の発生がある。したがって自然界の動力はその量において不変である。……熱理論にもとづいて私（吉田注：カルノー）が作ったいくつかの観点によれば、単位量の動力を生ずるためには2.70単位の熱を消費しなければならない。カルノーがこのように熱の仕事当量Jの値を求めていることによって、カルノーを熱力学第1法則の最初の発見者と認めることができる。”（第21章V）

ローベルト・マイヤー (1814-1878)

読者には申しわけないが、マイヤーの仕事に関しては、筆者の理解はきわめて浅い。マイヤーの論文自体が抽象的であるためマイヤーについて書かれた山本氏の記述も、筆者にとって難解であった。そのようなわけで、短く的確にまとめることが全く不可能である。表面だけでも比較的的理解しやすいと思われる事項をいくつか引用させていただき、お許しを請う次第である。

“熱学の歴史においてカルノーも孤立した天才であったが、ドイツ人ローベルト・マイヤーはそれに輪をかけた特異点と言えよう。……1814年に南独ハイムプロンに生まれたマイヤーは、チュービンゲンの大学で医学を修め、1840年2月に船医としてジャワ（現在のインドネシア）行きオランダ船に乗り込む。そのときまで彼は、物理学にたいする特別な関心も目立った才能も示していない。だが、同年夏の熱帯における船医としての次のような経験から、彼のインスピレーションは突然掻き立てられてゆく。「1840年の夏にジャワにおいて私は、新しく到着したヨーロッパ人から瀉血したときに、その腕の静脈血が例外なく驚くほど鮮やかな赤色をしていることを見出した。この現象は私の注意を引いた。」（第22章I）

“かくしてマイヤーは1841年6月……最初の論文『力』（吉田注：原語ではKraftであることが後述される）の量的規定と質的規定』（以下41年論文）を書き上げた。……ついで1842年に『無生界の力』についての考察』（以下42年論文）……1845年の『有機体の運動と物質代謝とその関係』（以下45年論文）……50年に彼の理論の集大成として『熱の力学的当量について』（以下50年論文）が書かれ、これまた51年に私的に印刷された。しかしいこうに認められることはなく、逆に地元では嘲笑され、やが

て精神に異常を来たしたマイヤーは50年に突発的に自殺をはかり精神病院に収容され、こうして彼の創造的な研究生活は事実上終る。……彼の業績が認められだしたのは、ジュールとの先取権論争でイギリス人ジョン・チンダルが『フィロソフィカル・マガジン』に一連の論文を書いて彼を擁護した1863年頃からである。”(第22章I)

“いうまでもなくこの〈力〉は、やがて19世紀後半に「エネルギー」として物理学に確たる位置を占めるようになる。したがってそれは、現在の力学でいう「加速度の原因としての力」とは異なる。ここで〈 〉で囲んだゆえんである。”(第22章II)

“ともかくも、〈力〉は保存するという要請と、2物体の非弾性衝突において運動が消滅しようという事実と、わけのわからぬ議論から、マイヤーは突然次の結論を引き出す。

運動と熱とそして後述するつもりだが電気は、単一の〈力〉に帰すことのできる現象であり、きまった法則にのっとりたがいに移行しあう(ineinander übergehen)。運動は逆向きの運動ないし固定点〔との衝突〕によって中和されることにより熱に転化する。そのさい産み出された熱は消滅した運動に比例している。他方で熱は、物体を膨張させることによって運動に転化される。(41年論文)”(第22章II)

“マイヤーの創見は力学的エネルギー(〈力学的効果〉)を〈力〉の特殊な顕現形態と見て、それゆえ力学的エネルギー保存則をも汎通的な〈力〉の保存則の特殊事例にすぎないと捉えたことにある。これは、後に見るようにすべてのエネルギーを力学的エネルギーに還元しようとしたヘルムホルツと決定的に異なる点であり、ここに19世紀後半のエネルギー論と原子論の対立のひとつの萌芽が作られてゆく。”(第22章III)

“結局マイヤーは、「〈力(エネルギー)〉の保存」という前提から熱と〈運動〉の変換関係の普遍性を論理的に導き出したわけだ。ちなみに、次章に述べるジュールは、逆に、変換関係の普遍性を実証的に示すことによって、「〈力〉の保存」を導き出すことになる。(第22章IV)”

“マイヤーが熱力学第1法則の発見者の一人に数えられるのは、42年論文で熱の仕事当量(J)のこの値(吉田注： $J=3.58 \text{ J/cal}$)を書き遺したことにある。……それは前章に見たカルノーの計算とほぼ同一だが、ちがいはマイヤーが計算の物理的根拠を明らかにしたことだ。……普遍定数 J の発見は、熱と力学的仕事(動力)の間の——カルノーの定理とはまったく異なる——新しい定量的関係の発見である。”(第22章V)

ジェームス・プレスコット・ジュール(1818-1889)

“マイヤーとならんで独立に熱の仕事当量を見出したジェームス・プレスコット・ジュールは、1818年生まれだからマイヤーより4歳若い。そして彼の創造活動も、マイヤーと同様、実質的には20代のほぼ10年間——1840～50年——に限られている。”(第23章I)

“なるほどマイヤーは、天才的なひらめきで熱の仕事当量という観念に到達したが、しかし彼の形而上学的で癖のある議論は同時代の他の科学者たちを納得させることはできなかった。通説となっていた熱量保存則に固執する当時の科学者を改心させたのは、他でもないジュールの具体的な実験データと哲学じみた注釈をとまなわなない単純明快なその解釈にこそあった。”(第23章I)

“ジュールが研究活動に入る直前までの物理学と化学の状況の特徴づけるのは、何とんでも電磁気学における前線の拡大と、それを媒介にした物理と化学の諸分野の関連の緊密化にある。……これらの一連の発見は、電気・磁気・熱・化学親和力・運動がたがいに密接に関連しあっていることを鮮明に印象づけるものであった。それもただ単に物理学と化学の諸分野の関連が顕在化しただけではない。とりわけ電気〔電流〕が特別の役割をはたし、いくつもの現象が電気を仲立ちに関連づけられているのではないかという見方をきわめて自然なものにした。”(第23章I)

“ジュールの実験としてどの教科書にも記されているのは、液体中で羽根車を回したときに生ずる摩擦熱から熱の仕事当量を求めたものである。たしかにその実験は、精度において彼の最高の到達地点であるが、実験の着想とその結果そのものはそれ以前の彼の思想と成果の再確認と緻密化でしかない。熱の仕事当量についての彼の研究の出発点は、電池電流の発熱と誘導電流の発熱の比較にあった。”(第23章III)

8.

むすび：熱学の本質にかかわる新たな問題の芽生え

山本氏の大作のほぼ3分の2を駆け足で通り過ぎるといって無謀を犯してしまったことを、あらためてお詫び申し上げます。その最後を、ルドルフ・クラウジウスとともに熱力学第2法則を完成させたウィリアム・トムソンに関する記述で、締めくくらせていただきます。

“1847年のトムソンとジュールとの出会いは、熱学にとってはさらに重要事件であった。ジュールの側からすれば、前章で見たとおりトムソンに注目されたのを契機に認められてゆくようになったのだから、何はともあれめでたしということになろう。しかしトムソンはジュールの研究の重要性を認めたものの、その結論にすぐさま同意したわけではない。ずっと後——1893年——になってトムソンは、ジュールとの出会いを「私は、その〔ジュールの〕論文に激しい衝撃を受けた。私は、最初はそれが正しいはずはないと思った。というのも、それはカルノー理論と異なっていたからである。……(吉田注：これは吉田が挿入した中略記号ではなく原文中のもの)〔その夜ジュールと言葉を交して〕私はそれまで思ってもみなかった考え方を知らされた」と回顧している。トムソンは、熱が仕事に変わるなど思ってもいなかったのであり、その後もジュールの理論をなかなか受け入れようとはしなかった。……このようにトムソンの問題意識と柔軟さは真っ先にジュールを認めさせたが、彼の慎重さと洞察力は最後までジュールに批判的でもあった。そしてこのトムソンの矛盾、ジュールの実験結果に直面してトムソンに生じた新たな問題意識にこそ、熱学の本質にかかわる問題が秘められていた。”(第24章I)

謝辞

本稿を筆者は最善を尽くしてまとめさせていただいた。しかし、山本義隆氏のお立場からは不十分な箇所が多々あることは、今さら申すまでもない明白なことである。にもかかわらず、本稿に特に注文をつけることもなくそのままの形で発行を許してくださった氏のご寛容に感謝申し上げます。次第である。

(原稿受付 2010年3月3日)