

講座

ジュールによる熱の仕事当量の測定実験

岡本正志

(受取日：2002年11月5日，受理日：2002年11月12日)

The Experiments on Mechanical Equivalent of Heat by J. P. Joule

Masashi Okamoto

(Received November 5, 2002; Accepted November 12, 2002)

Physics textbooks show Joule's paddle-wheel equipment in 1850 in relation to the law of conservation of energy, but describe nothing about the background of his experiments. Joule had made many kinds of experiments to determine mechanical equivalent of heat for a long period from 1843 to 1878. Unfortunately, academic society had not appreciated his early studies, because the concept of calorique had still prevailed in the middle of 19c. Even after clear evidence was presented, it takes a long time for the society to recognize a new scientific knowledge. This is a social nature of science, which should be emphasized in scientific education.

1. はじめに

エネルギー概念の学習には、ジュール (James Prescott Joule, 1818.12.24-1889.10.11, Fig.1) による熱の仕事当量の測定実験が登場する。この実験は、これによってエネルギー保存則が確立されていく歴史的にも重要な実験であるから、高等学校以降の物理学の教科書には例外なく紹介されている。しかし、その紹介の仕方はまことに単純で、例の羽根車実験の模式図とその説明が付け加えられているだけである。そこにはこうした実験を行った背景やジュールの苦勞など、当時の科学者の営みは全く登場しない。したがってこれを読んだ者は、羽根車実験による測定結果がすぐに認められ、簡単に熱の仕事当量が確定されていったかのように受け取りかねない。良いアイデアを思いつけば、すぐにそれが大発見につながるようなイメージは、長い地道な努力や細かな改善を積み重ねながら営まれる科学の現実の姿とは随分かけ離れたものであり、錯覚だといってもよいであろう。

ジュールは、もともとは電気モーターの効率をあげるた

めの研究を行っていた。そこから電流のジュール効果を見だし、さらに熱の仕事への転化という考え方にたどりつく。その転化の関係 (仕事当量) を精密に調べたいとコツコツと測定実験を行い、結果を地元のマンチェスターや英国科学振興協会 (BAAS) の大会などで報告していたのである。

最初の熱の仕事当量の測定実験は、1843年に発表されたがまったく注目されなかった。教科書によく掲載される羽根車実験の装置 (Fig.2) は1850年の論文に掲載されている図であって、かなり後の装置である。これに至るまでに、誘導コイルを使った実験、圧縮ポンベを使って空気の圧縮・膨張を利用した実験など様々な装置を工夫して、精密な測定データを求め続けていたが、当時の科学界でジュールの研究に注目する者はいなかったのである。

彼の実験は、今日から見ても高い精度を誇る見事なものであるのだから、もっと早く認められても良かったはずである。にもかかわらず認められなかった。いったい何故なのだろうか。また認められるようになったのはいつ頃で、どういう理由だったのだろうか。

こうしたことは、単なる裏話だから余計なことだと思う人がいるかもしれない。しかしここには、科学のある一面、本質的だが普段見過ごされがちな社会的な側面がよく現れていて、科学的な知識がどのようにして確立されていくのかを考えさせてくれるのである。

本稿では、普通の教科書では詳しく紹介されることのないジュールの実験を振り返りながら、この点を検討してみたい。また同時に、巷間に流布する通俗的な熱学の歴史もかなりあやしいものである、ということについても触れておきたいと思う。

2. 熱の運動論的理解に関するランフォードの研究

熱学の歴史に関する通説には、神話化したものも多い。その代表がランフォードの研究に関する「神話」である。じつはやがてジュールも、熱の仕事当量に関する論文の中でランフォードの研究にも触れて、自分の研究はそれをより確かにしたものだ、と述べているので、まずこれに簡単に触れておくことにする。

熱は熱素（カロリック）という小さな元素によるものだ、というのが熱物質説である。かのラヴァジエも彼の元素表

の冒頭に光（ルミエール）と熱素（カロリック）を元素として掲げていた。こうした熱素説はラプラスやポアソンによって数理解的に洗練されたものとなって、19世紀前半にいたるまで熱学の主要な理論となっていた。周知のように、カルノーもまた熱素説に依拠しつつ『火の動力』（1824）を書いているのである。

ところで、こうした熱素説に摩擦熱の現象をぶつけて正面から批判したのがランフォードやデーヴィーらであり、そこから熱運動論が熱学理論の主流となってきた、というのが通俗的な理解であろう。それをランフォード神話¹⁾と言っておく。そこでは、ランフォードが大砲の穴割り作業の観察から、熱物質の存在に疑問をもち、運動論を提唱したことが熱運動論への転機となったとされている。

大砲の穴割り作業では、膨大な熱が発生する。それを見たランフォードは、穴割り作業を水中で行ってみた。それでも熱が発生し続け、冷水が2時間半で沸騰したことや、金属の削りくずの比熱に変化がないことなどを確かめたのである。大量の熱素が金属から移動したことで熱が発生したのなら、削りくずの比熱が変わっているはずだから、熱素の源はそこではない。また、熱はまったく減衰せず発生し続けたのだから、有限な金属筒そのものも熱素の源ではない等々と、まことに明確な実験事実のもとに、ランフォードは、発生する熱の原因は運動そのものにあるのだ、と主張したのである。

ではこのランフォードの研究によって、熱素説は大きな打撃を受け、熱運動論にとってかわられたのだろうか。

このランフォードの研究は1798年に出版されている。したがって、このような通俗的な熱学史によれば、19世紀前半にラプラスやポアソンが熱素説の数理解的理論を創りあげたことも、カルノーが熱素説に基づいて自己の理論を書いたことも、ずいぶんおかしな話になってしまう。後の節で詳しく紹介するが、W. トムソンが1847年にジュールの研究発表を聞いた時、ジュールが間違っているのではな



Fig.1 James Prescott Joule, from the front page of *The Scientific Papers* (1884).

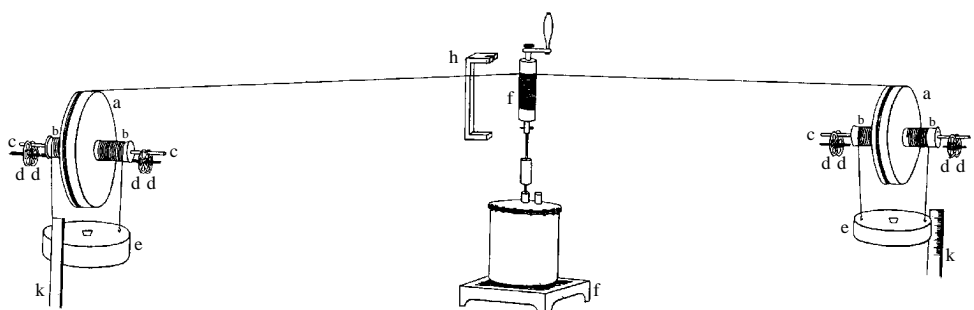


Fig.2 Perspective view of the apparatus of the paddle-wheel experiment (1850).

いか、と思ったのも、トムソンが熱素説の立場に立っていたからであった。

こうしたことを見ると、上に見た通俗的なランフォード神話は、なにやら怪しげであることが見えてくる。ランフォードがそうした主張をしたことは事実であるが、だからといって熱運動論が主要な理論となったわけではなく、むしろそれを克服する形で熱物質説が完成されていたのが歴史的な事実である。一つの実験事実で、既成の主要な理論が転換するなどということは、そう簡単にありえることではないということもしておく必要がある。

ランフォードの研究に対する熱物質派の見解は、静電気現象のアナロジーで考えればわかりやすい。摩擦熱の発生と同じように、静電気も摩擦によって生じる。しかしその解釈は、摩擦による電氣的物質の偏りによって生じる現象だというもので、摩擦という運動に電気現象の本質があるというものではない。

であるなら、摩擦熱もまったく同じように「熱素の偏り」だと考えることができるはずである。むしろ、静電気は電気を担う物質によるのであり、熱は運動だという方が論理的一貫性を欠いていることになるだろう。こうして、熱素説は摩擦熱というアキレス腱に対しても、それを理論的に克服してしっかりと生き延びていたのである。

3. 最初の実験 - 誘導コイルを利用した熱の仕事当量の測定

ジュールによる最初の熱の仕事当量の測定実験は1843年8月21日に、英国科学振興協会大会の化学セッションで発表された。論文はその年の*Philosophical Magazine, Ser. 3, Vol. xxiii* (1843) に3回に分けて掲載されている。²⁾ 論文は2部構成となっていて、第1部は「磁電気の発熱作用について」、第2部が「熱の仕事当量について」である。なぜ第1部があるのだろうか。じつは、これこそ実験の本当の目的だったのである。

ジュールがこの実験を行った理由は、熱がはたして生み出されるものかどうか、を確証したいということであった。先述したように、熱現象を熱素という熱物質で説明する立場（熱素説）と、運動によって生み出されるものだとする立場（熱運動説）とがあったが、当時はまだ決着がついていなかった。

ジュールは、第1節で述べたように、モーターの効率を調べていたので、電流の発熱作用に気づき、そこから発熱量が電流の2乗に比例すること（いわゆるジュールの法則）を発見していた。そうした実験の中で、このような発熱の原因について、もともと電池の中で化学的に生じたはずの熱が、電流に媒介されて形を変えて現れたのではないかと思いつく。それなら、“電池を含む回路中にモーターを入れ

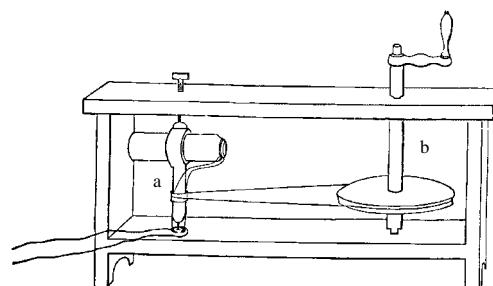


Fig.3 Joule's first experiment on mechanical equivalent of heat by using electro-magnetic induction

ると、その結果、化学変化あたりに発生する熱が減少するであろう。そしてこの減少量は、得られた機械的力に比例するだろう”(1841年1月)と考えていたのである。こうした考えを実証しようとしたのが、この43年8月の実験である。論文は次のように始まっている。

“磁電機械の作り出す電気力が、他の原因から生じた電流と同じように回路のいたるところで熱を発生させる性質をもつことは、疑問の余地がないものと、かなり一般的に認められていると思う。また確かに、熱は物質ではなく振動状態だと考えるなら、単なる力学的な作用によって、たとえば銅線でできたコイルを永久磁石の磁極の前で回転させるというようなことによって、熱が作り出されないとする理由は何もないように思える。それと同時に、これまでのところどの実験も、この非常に興味深い問題について決定的な結果を与えていない...これまでの実験はどれも回路の特定の部分だけに注目しており、観察される熱が、生み出されたのか、それとも、磁電気が誘導されたコイルから運ばれただけでコイル自体は冷たくなっているのか、について不確定のままにしているからである。”³⁾ (下線は原文イタリック)

科学史的にはまことに興味深い文章である。この実験は、単に熱の仕事当量を測定するために企てられたものというよりは、熱素説が正しいのか、熱運動説が正しいのかを確定するべく計画された実験であることが明白に分かるのである。

実験は、Fig.3の装置で行われた。考え方の基本は、外部磁界の中で誘導コイルを回転させ、そこで発生した誘導電流による発熱効果を測定しようというものである。

Fig.3のa, bは木製の回転軸。aの上にある横長の筒は中に水を満たしたガラス管で、その中に小さな電磁石を入れる。これが誘導コイルとなる。aの下端には半円形の溝に水銀を入れた整流子が設置してあり、電磁石のコイルから出た導線とガルヴァノメータとがそこで接続できるように工夫されている(図をよく見られたい)。

ガラス管の外側ははず箔でおおい、さらに1インチほどの隙間をあけて円筒形の木片をかぶせてある。その上からさらにフランネルの布を巻き付け、布には十分にワニス塗ってある。こうして、熱放射や、回転中に生じうる空気の対流などの影響を除去して断熱性を高めているのである。はず箔も、ガラス管の方向に一部を切断して隙間をつくって、回転した際にはず箔内に磁電流が生じないように配慮している。

熱の仕事当量の測定はかなり高い精度の実験技術を要する。ジュールの測定は、後には温度で200分の1華氏までの精度を誇っているが、その裏には周到に準備されたアマチュア科学者とは思えない実験技術があることが分かる。

このガラス管を囲むように大きな電磁石を置き、ガラス管を回転させて発生した誘導電流による発熱効果を、水の温度変化によって求めようとしたのが、この実験である。発生した誘導電流はガルヴァノメータで測定するが、メータがこの大きな電磁石の影響を受けないように離れた位置に置かれて、その他あらゆる予防措置をほどこしたとジュールは述べている。

実験は、まずガラス管を装置からはずして、電磁石と水を入れ、熱が均等になるまで水をかき回した後、1/50 Fまで判読できる鋭敏な温度計で水温を調べる。温度計については、この論文ではこれ以上詳しい記述はないが、後に紹介する空気の膨張・圧縮実験論文では、鋭敏で正確な温度計を準備することが大変だったと述べている。水温を測定した後、グリースを塗った紙で何重にも覆ったコルクでガラス管の蓋をし、装置に設置して15分間回転させる。その間、ガルヴァノメータの振れと室温を注意深く記録、最後に先の鋭敏な温度計で水温の変化を検出した。

さらにジュールは電池と外部電磁石の接続を断った実験も繰り返して行い、誤差を補正できるように工夫したのである。⁴⁾ 彼のデータを一部紹介してみると、4月15日午後の測定：電池を接続せずの場合、電磁石の回転数/分 600、電流計の振れ 0°、平均室温 54.69°、平均室温とガラス管内の平均水温の差 +0.19°、水温(回転前 54.90°、回転後 54.85°、0.05°減少)、電池を接続すると、同じ回転数で、電流計の振れ 21°、平均室温 54.67°、平均温度の差 +0.20°、水温(回転前 54.85°、回転後 54.88°、0.03°増加)となっている。こうした実験を何度も繰り返し、そこから補正值を求め、発熱に関するジュールの法則を確認する表が続いている。

ガラス管の回転に必要な仕事量は、回転ハンドルの軸(Fig.3のb)におもりを付けた糸を巻き付け、おもりを落下させて回転させることで測定する(Fig.4)。おもりの重さと落下距離から、力学的な仕事量は測定できる。温度変化の原因は、回転による誘導電流しかないのだから、回転さ

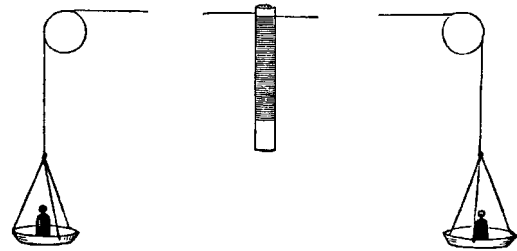


Fig.4 Apparatus for measuring mechanical works.

せるに必要な仕事量との関係がこれで求まるわけである。これは、後に羽根車実験でも使われた方法である。

こうした実験装置によって、彼はまず、誘導電流による発熱が、ガラス管内のコイルにおいても通常電流とまったく同じ原理で生じていることを確認している。したがって、最初に彼が述べた、“観察される熱が、生み出されたのか、それとも、磁電気が誘導されたコイルから運ばれただけでコイル自体は冷たくなっているのか”という問題提起に対して、熱がコイルから移動したのではなく、“生み出された”ことを明らかにしたのである。しかも、それはコイルの回転という力学的仕事によるものであった。それによって熱が発生すれば、熱運動論の証明であり熱素説に対する反論となる。これはジュールにとっても重要な事実であったが、歴史的にも熱運動説を立証する重要な実験の一つとなっているのである。

もっともジュールは、そうした熱の生成を電気が媒介していると考えていたようで、“磁電気のうちに、単なる機械的手段で熱を破壊したり生み出したりできる力(エイジェント)をもっている”⁵⁾と言っている。これも、科学的には興味深い。今日の私たちなら熱運動論が当たり前であるので、このような実験を見ると何の疑問もなく機械の仕事が熱になったとみてしまう。しかし、新しい考えを創り上げつつあった当事者たちは、納得いく説明をするために様々な考えを巡らす。熱運動論が常識ではなかった時代背景を考えてみれば、ジュールのこうした考えが、この実験の解釈として十分に成り立つことを理解しなければならない。

教科書的な説明では、一つの実験から簡単に法則が導き出される。しかし、そうしたことは認識論的には殆どありえない。これは、科学者が新しい理論を創り上げていくときばかりでなく、新しい理論を学ぼうとしている人々にとっても同じである。そうした意味でも科学史を学ぶことが重要なのだが、教科書的な科学史では肝心のこの点が欠け落ちているのである。

さて、こうして力学的仕事によって熱を生み出すことが

ジュールによる熱の仕事当量の測定実験

できることを確認したジュールは、第2部において、この熱と力学的仕事との間に、“一定の比が成り立っているのかどうか”⁶⁾を明らかにする。これが、熱の仕事当量の初めての測定実験である。

測定装置は、先述したようにFig.4である。測定結果は、1ポンドの水の温度を華氏1°だけ上昇させる熱量で、何ポンドの水を1フット持ち上げられるかで表している。

彼は13回の測定を繰り返し、838ポンドという値を求めることができた。現在の単位 $J \text{ cal}^{-1}$ に換算すると、1ポンド = 0.4536 kg, 1フット = 0.3048 m, 英国の重力加速度 $g = 9.8118 \text{ m s}^{-2}$, $1^\circ = 5/9^\circ \text{ F}$ だから

$$\begin{aligned} 838 \text{ フィート} \cdot \text{ポンド} &= \\ (838 \times 0.4536 \text{ kg} \times 9.8118 \text{ m s}^{-2} \times 0.3048 \text{ m}) / \\ (0.4536 \times 1000 \text{ g} \times 5/9) &= 4.511 \text{ J cal}^{-1} \end{aligned}$$

これは、今日の値にかなり近いデータだということが出来る。しかし彼のこの研究は、当時完全に無視されたのである。

なぜ、無視されたのだろうか。一つは、彼が控えめなアマチュア科学者だったからであり、二つ目には当時の科学界の人々が彼の実験そのものを疑ったからである。

ジュールは、マンチェスターの裕福な醸造業者の次男坊として生まれたが、体が弱かったこともあり学校へは行かず自宅で学習している。自宅や工場に実験室をつくり、そこで科学実験を続けた。したがって高度な科学の訓練を受けておらず数学的な力も弱かった。19世紀に勃興しつつある新しい科学の状況は数理的な側面が強くなってきていて、学会で発表しても、時代遅れのスタイルに見えたに違いない。

実験データにも問題があった。この実験で得られた値を見てみると、896, 1001, 1040, 910, 1026, 587, 5回の平均742, 2回の平均860, 全13回の平均838ポンドとなっている。上は1040, 下は587とデータのバラツキが多く、当然、これを単純に平均することへの疑問がある。彼が無名のアマチュアであったために、科学に無知な青年の稚拙な計算だと思われたに違いない。

ジュールは、さらに一ヶ月後、水の摩擦による発熱を利用して同様な仕事当量を求めて、この論文の補遺としている。⁷⁾ この実験装置の図は掲載されていないが、彼の説明によれば、7ポンドの水の入った円筒形のガラス瓶内で、多数の小さな穴をあけたピストンを動かして、発熱を測定したものである。

得られた値は770ポンド ($J = 4.15 \text{ J cal}^{-1}$) これは微妙な値である。誘導コイルの回転による発熱と水の摩擦での発熱という異なった二つの変換過程で、測定された仕事当量がほぼ等しいとすれば、熱と仕事が等価であるというジ

ジュールの見方を支持するデータとなる。しかも、水の摩擦による発熱では電流という媒介を使っていないという点で、熱の生成は純粋に力学的な仕事によるものである。

ジュールは、“この結果は、われわれの以前の結論を非常に強く確証するものと認められるであろう”と述べている。さらに、それに続けて“自然界の重要な諸力は、創造者の命令により不滅であること、そしてまた機械的力が消費される時にはいつでもそれに厳密に等しい量の熱が得られる”⁸⁾と述べて、仕事が熱に変換されることを主張した。補遺の最後では、今一度明確に次のように述べる。

“今は思い切って、もっと明確にこう言おう。電流の強さを、したがって発生する熱の量を決定するのは、正確には親和力なのではなく、むしろ原子がお互いに接近する時に消費される機械的力なのである、と。”⁹⁾

しかし当時の多くの科学者は、二つの値(838ポンドと770ポンド)をほぼ等しいとは評価しなかった。先述したように、彼の実験は完全に無視されたのである。したがって、ジュールは更に実験を重ねて正確なデータを取らなければならなかった。

4. 空気の圧縮・膨張による測定実験

1844年(論文45年¹⁰⁾)には、空気の圧縮・膨張を利用した測定実験を行っている(Fig.5) この実験は、仕事への熱への転化の際の当量ばかりでなく、その逆の過程、すなわち熱の仕事への転化の際の当量をも測定し、両者が同じ値であることを示した重要な実験であった。しかも、熱素説をも決定的に反証した実験でもあった。

空気の圧縮実験は、圧縮ポンペ(R)とピストン(C)を、

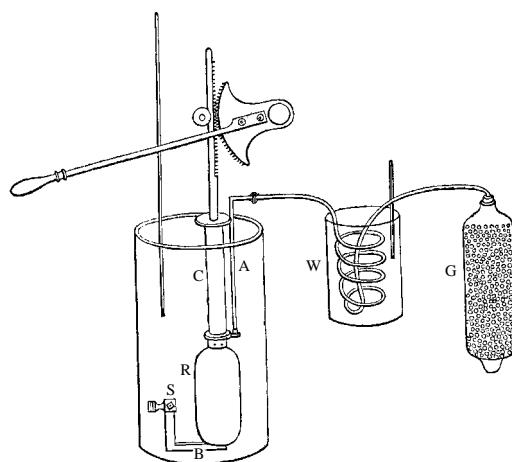


Fig.5 Experiment for expansion and compression of the air.

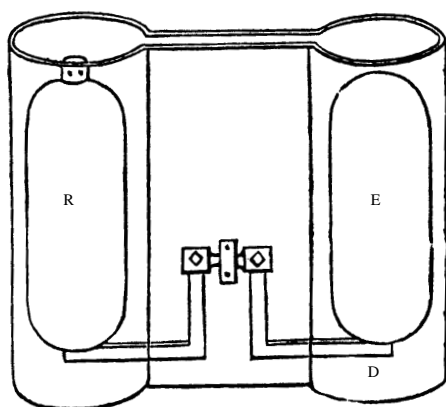


Fig.6 A pair of copper reservoir of the air.

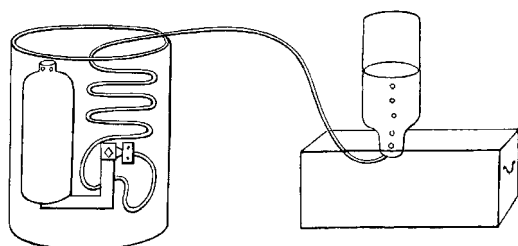


Fig.7 Apparatus to rarefy the air into the water.

水を入れた熱量計の中に入れて、ピストンで空気を圧縮すると温度が上がる。圧縮前の水温と圧縮後の水温を測定することで、発生した熱量を知ることができる。

図のWは定温水槽、Gは乾燥剤の塩化カルシウムを入れた容器で、圧縮する空気を良好な状態にするように配慮されている。しかし空気の温度変化を水に伝えて、水の温度変化として読みとるのは、ずいぶん大変である。空気の温度が上がっても、水の比熱がかなり大きいためになかなかその変化が現れない。精密な温度測定技術を持っていて初めて可能となる実験である。先に述べたように、彼はこの測定のための水銀温度計を準備するのに非常に苦労している。そのために、マンチェスターのDancer氏に作ってもらった道具を使って製作したと述べている。¹¹⁾ こうして作った温度計を他の温度計と比較してテストした後に測定に使っている。彼は練習の結果、裸眼によって温度計の1目盛りの20分の1を読み取れるようになったので、200分の1度まで温度測定できたという。¹²⁾

空気圧縮のための仕事量は、水銀柱で空気の圧力を測定することで求めている。こうして、得られた熱の仕事当量の値は823ポンド(= 4.43 J cal⁻¹)であった。

膨張の実験は、圧縮ポンペをバルブsを介して同体積の真空容器につないで行い、あるいは空気中や水中に放出したりして行っている。

Fig.6は同体積の容器につないだ状態、Fig.7は水の中に圧縮空気を放出するための装置である。この場合、ポンペに鉛製の管コイルをつなげ、やはり水の入った熱量計に入れて水温を測定している。これで得られた値は820ポンド(= 4.41 J cal⁻¹)である。

彼は、こうした空気の圧縮・膨張実験を何回か繰り返し、823, 795, 820, 814, 760ポンドの値を得た。ジュールは最後の三つが、誤差がもっとも少ないとしてその平均値798ポンドを求めている。

山本義隆氏は、この1845年論文こそ熱学史において重要な意義をもつものだと高く評価している。¹³⁾ それは、一つには、この実験で断熱変化に対する熱素説が最終的に否定されたからである。

熱素説では、気体の断熱膨張を説明するために、気体の含む全熱量の一部は気体分子に束縛され、残りは自由であって、この自由熱素の多少が温度を決定していると考えられていた。気体を断熱膨張させると、膨張に伴って気体分子に束縛される熱素が増えて自由熱素が減少する、そのため温度が下がると説明していたのである。この場合、束縛される熱素が潜熱となっていくわけである。ところが、ジュールのこの実験では、全体として温度は下がらなかった。Fig.6の場合、ポンペRから真空にしていたポンペEに気体を膨張させると、Rの温度は下がるがEの温度は上昇する。そうして全体としては、体積は2倍になったが温度は変化しなかったのである。これに対するジュールの解釈は、“力学的仕事をともなわずに膨張させても、温度変化は生じない”¹⁴⁾というものである。それゆえ、こうした熱素説による説明そのものが破綻していることが明らかにされたと山本氏は評価するわけである。

じつは、Fig.6の実験は、ゲイリュサックが1806年に行った実験と同じものである。ジュールはそれとは知らずに実験して、熱素説で未解明であったこの実験を、熱運動論の立場から解明したのである。

また、山本氏は、ここで初めて「熱 仕事」の変換係数の測定がなされて、「仕事 熱」の場合の仕事当量と同一の値が得られたことで、熱と仕事の真の互換性が実証された実験になったとも指摘している。¹⁵⁾ 圧縮ポンペ内の空気を空気中に放出すれば、大気圧下での体積増加によって、外に対してした仕事量を求められる。一方でポンペ内の温度低下が生じているから、これは熱がなした仕事だと認められるわけである。そうして求めた仕事当量の値は、820であり、逆の場合(823)とほとんど一致していた。ジュールのこの実験は、歴史的にきわめて重要な実験だったわけ

ある。

しかし、それでも彼の実験は無視され続けた。

5. 羽根車による熱の仕事当量の実験

第1節で述べたように、ジュールによる熱の仕事当量の測定実験といえば羽根車実験、と言われるほど有名な実験である。水の中に羽根車を入れて攪拌し、その摩擦熱による温度変化を精密に測定したことは周知の事柄であろう。羽根車の回転に要した機械的工作量は、おもりの落下によって得られる。前にみた誘導コイルの回転の時と同じ原理である。1845年に最初の羽根車実験を行ってから1878年まで何度も繰り返しこの実験を行っている。

水を攪拌して生ずる温度変化を測ろうとすれば、きわめて精密な実験を行わなければならないことは容易に想像できる。装置の断熱性においても、温度測定においても高い実験技術がなければできないものではない。

第4節でみた1845年の実験では、温度計は彼が製作したように書いていたが、この論文では温度計については、2本をDancer氏に造ってもらい、1本はパリのFastré氏の製作によると明記している。¹⁶⁾ それぞれ非常に正確で、3本を比較した結果100分の1華氏の範囲で一致したという。彼はここでも20分の1目盛りまで裸眼で読めるようになったので、200分の1°Fまで読めると述べている。¹⁷⁾

この実験で得られた仕事当量の値は、890ポンド (= 4.79 J cal⁻¹)であった。

こうして、誘導コイル、細管による水の摩擦、空気の圧縮、羽根車と、種類の異なった実験による測定結果が集まった。それぞれ838, 770, 798, 890という値である。

ジュールは、論文の結論として、このような極めてデリケートな実験では、これ以上のデータの一致を期待することは無理だと述べたが¹⁸⁾ やはりまったく無視された。

したがって、さらに正確な値を目指して実験を続けねばならなかったのだが、これほど高い精度の測定が実際に可能だとは、当時の人々にはとても思えなかったことも、彼の測定結果が認められなかった理由の一つである。

6. W. トムソンとの出会い

彼のこうした仕事が多く科学者に認められるようになるのは、W. トムソンがその重要性に気づいてからのことである。トムソンによって注目されたのは1847年6月であった。この年ジュールは、英国科学振興協会化学部会での発表を断られ、数学・物理学部会での発表することになった。司会者は彼に発表を簡単に要約して済ますように促し、コメントなしで次に移ろうとした。その時、会場で一人の若者が立ち上がって彼の発表に興味を持った旨の発言をした。それがW. トムソンであった。W. トムソンはその時の模様

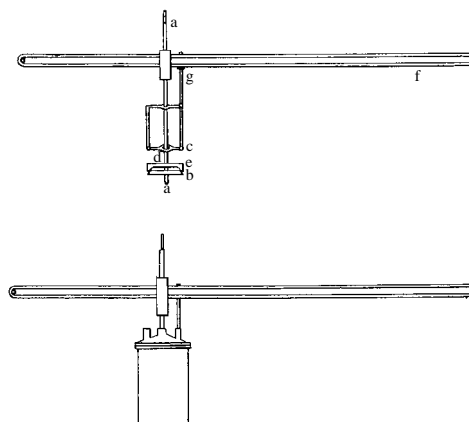


Fig.8 Experiment on the heat of friction of irons.

を次のように回想している。

“その時ある分科会で私は、ごく控えめな若い人が論文を発表するのを聞いたのであった。その人の態度には、これから発表することが偉大な考えであることを意識している様子は見られなかった。ところが、私はその論文からとつもない衝撃を受けた。初めのうち私は、それは正しいはずがないと思った。なぜならそれはカルノーの理論とは食い違っていたからである。論文の発表が終わった直後に、著者のジェームズ・ジュールと少し言葉を交わした。”¹⁹⁾

トムソン自身はクラペイロンを通じてカルノー理論を学んでおり、熱素説の立場で熱の保存を信じていたから、熱が消費されて仕事になるとは到底信じられなかった。しかし、液体の摩擦によって熱が発生したことを重要な発見だとみなして、ジュールの実験に興味をもち評価したのである。彼は、7月1日に父に送った手紙の中で次のように述べている。

“私は、ジュールは多くの点で間違っていると確信しています。しかし、いくつかの非常に重要な事実を発見したように思われます。たとえば、熱が液体の摩擦で生成されるなどということです。”²⁰⁾

こうしてトムソンとの出会いによって、ジュールの研究が注目を浴びるきっかけが生まれたが、重要なのは、彼がその後トムソンと共同研究を行い、科学者社会の他のリーダー達とも交流することができるようになったことである。

トムソンは、ケンブリッジを優秀な成績で卒業した俊英で、その当時22歳であったがすでに26本の論文を刊行していた。ジュールは彼と知り合えたことにより、当時の科学界のリーダーたちと自分の実験について議論する機会を持つことができたのである。

羽根車による攪拌実験は、45年1回(水)、47年3回(水、鯨油、水銀)、48年1回(水)、50年2回(水、水銀)と合

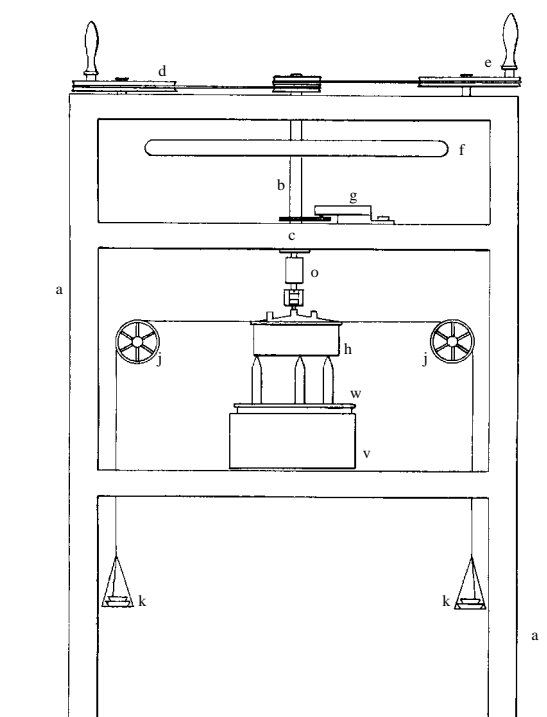


Fig.9 The last paddle-wheel experiment by Joule.

計7回繰り返されているが、ひとたび注目を浴びようになると、それまで不信心をもたれていた測定精度は、逆にすばらしい精度だと評価されるようになった。

彼が無名の間は、あまりに高すぎる精度が不信心を呼ぶ原因の一つとなっていた。ところがいったん評価が変わると、この精度の高さは賞賛的となり、すばらしい実験だと見なされるようになる。ほとんど同じ精度のデータが示されていたにもかかわらず、こうした正反対の評価が下されたことが興味深い。精密なデータが必ずしも理論形成に反映するわけではなく、科学者集団の認識論的な文脈の中でデータが読み込まれることをよく示している。

7. 固体の摩擦による発熱実験

Fig.2の有名な実験が報告された1850年論文の最後に、鉄の摩擦による発熱実験が紹介されている。

羽根車による水の攪拌実験を行った後、ジュールは水を入れていた同じ鉄製の容器に水銀を入れて、水銀の攪拌実験に拡張している。まったく同じやり方で水銀の攪拌による熱の仕事当量を測ったのである。得られた値は774.083ポンドである。そしてさらにそれから発展させたのが、この鉄の摩擦による測定実験である (Fig.8)

水銀を入れた鑄鉄製の容器内に回転する円板e、bを入れ、

外部レバーによって接触させて、摩擦熱を発生させる仕組みである。図の上は容器の内部、下は容器の外側の図を示している。

この実験でも様々な影響が考慮されているが、特に鉄が接触して摩擦する際に発する音のエネルギー損失まで計算されているのである。計算は、チェロの弦で、この時の音と同じ高さの音を発生させることで求めている。

全部で20回の実験を繰り返し、得られた仕事当量の値は、774.987ポンドであった。

8. 最後の羽根車実験

ジュールは、1867年に電流による発熱で仕事当量の値を求めてから、しばらくこの実験から遠ざかっていたが、1878年になって、ふたたび羽根車実験を行い、仕事当量の値を求めている。これは、英国科学振興協会の電気抵抗の標準に関する委員会の要望に応えてのことである。ジュールが、1850年に求めた仕事当量の値772.6と、1867年に電流の発熱によって求めた値782.5との差異に困って、より正確な値を求めることになったのである。

実験の基本的な考え方は1850年と同じで、羽根車によって水を攪拌し、発生した熱量を求めるものである。しかし羽根車の回転をおもりを落下させて行う仕組みにはなっていない (Fig.9)。図の二つのおもりは熱量計外側の溝に絹糸で巻き付けられているだけで、羽根車の回転は、おもりの高さが一定になるように調節しながらハンドルを操作して行う。w、vは水圧支持台 (hydraulic supporter) で、wとvの間に水を入れて、熱量計の重さを支えている。²¹⁾

水を満たした熱量計の質量をはかり、回転軸に取り付けた後、絹糸をかけておもりに結ぶ。水の温度を測ってからハンドルを回して羽根車で水を攪拌し、温度を測定するという手順である。

実験は1~5として、各実験で20回も行うという念の入った測定である。これで得られた値は772.55ポンドであった。

9. おわりに

科学・技術の社会的な影響が大きくなった今日では、科学や技術の営みについて深く理解することが求められている。しかしわが国の学校教育では、これまでそうしたことにあまり重点が置かれてこなかった。そのためか、科学史的な事柄について正しく触れられることがあまりなく、熱に関する科学史的な事柄についても必ずしも正確に伝えられていない。本稿で紹介してきたジュールによる熱の仕事当量の実験も、羽根車の回転による水の攪拌実験以外はほとんど触れられることがない。

しかし、見てきたように、熱の仕事当量の測定実験は、

ジュールによる熱の仕事当量の測定実験

実験の方法や回数、個々の実験に対する周到な配慮など、通常語られない部分にこそ、ジュールの誠実でねばり強い科学者としての営みが現れている。この実験のためにジュールがいかに苦勞し努力したか、そうした点にも科学の歴史から学ぶことが大きいのではないだろうか。

また、ジュールが当時としては最高のレベルの精密な測定を行っても、まったく無視されていたことなどは、科学の営みと科学的知識の社会的性格が如実に反映されていて、科学をメタレベルで理解する上でも興味深い点である。

ともすれば、科学は一人の天才の孤独で数奇な営みだと捉えられるが、現実の科学は、むしろ集団的で社会的に営まれている。たとえ素晴らしい発見をしたとしても、それが社会的に認知されなければ、知識として成立することはない。社会的に認められるためには、学会で発表し論文として公刊し、多くの人に自らの説を説得力をもって示さなければならない。科学の知識は、そうした集団的な営みの中で鍛えられ発展しているといえる。ジュールの業績をたどってみると、一人のアマチュアがやがて科学者集団の中で認められ、歴史に残る科学者となっていったことがよく分かる。こうしたことを同時に学んでこそ、科学への興味が増し、深い理解につながるのではないだろうか。

もっとも、残念ながら日本語で読めるジュールの本格的な伝記さえまだないのが、わが国の科学史の状況である。熱学を志す多くの方が、科学史にも興味を持って下さることを願いたい。

【註】

本稿の図版とジュール論文については、すべてジュールの科学論文集、*The Scientific Papers of James Prescott Joule*, Vol.1, The Physical society of London, Taylor and Francis, 1884を使った。

文 献

- 1) 山本義隆、『熱学思想の史的展開』、現代数学社、p.232 (1987).
- 2) On the Calorific Effects of Magneto-Electricity and on the Mechanical Value of Heat. 「磁電気の発熱作用について、および熱の仕事当量について」邦訳が『近代熱学論集』(朝日出版社、1988)に収録されている。
- 3) *The Scientific Papers*, pp.123-4. 邦訳『近代熱学論集』p.335.
- 4) *Ibid.*, p.127. 邦訳 p.338.
- 5) *Ibid.*, p.146. 邦訳 p.355.
- 6) *Ibid.*, p.149. 邦訳 p.358.
- 7) *Ibid.*, pp.157-9. 邦訳 pp.365-7.
- 8) *Ibid.*, pp.157-8. 邦訳 p.366.
- 9) *Ibid.*, p.158. 邦訳 *ibid.*
- 10) On the Changes of Temperature produced by the Rarefaction and Condensation of Air, *Phil. Mag.* ser.3, 1845. 「空気の希薄化と圧縮により生じる温度変化について」
- 11) *The Scientific Papers*, pp.174-5.
- 12) *Ibid.*, p.175.
- 13) 山本義隆, 前掲書, p.345.
- 14) *The Scientific Papers*, p.182.
- 15) 山本義隆, *op. cit.*
- 16) *The Scientific Papers*, p.302.
- 17) *Ibid.*, p.303.
- 18) On the Existence of an Equivalent Relation between Heat and the ordinary Forms of Mechanical Power, *The Scientific Papers*, p.204.
- 19) Alex Wood, *Joule and the Study of Energy*, G. Bell & Sons. Ltd., p.54 (1925).
- 20) D. S. L. Cardwell, *James Joule: A Biography*, Manchester U.P., p.85 (1989).
- 21) *The Scientific Papers*, p.650.



岡本正志 Okamoto Masashi
京都教育大学教育実践総合センター教授
Center for Educational Research and
Training, Kyoto University of Education
Tel.075-644-8806, Fax. 075-644-8339
e-mail: okamoto@kyokyo-u.ac.jp
研究テーマ：電磁気学史におけるマクス
ウェリアンの役割、科学史からみた科学
教育および総合学習論
趣味：囲碁。古民家修理。農村アカデミ
ーの立ち上げを計画中。