

ランフォード著「熱に関する著者の諸実験 についての歴史的回顧」，解説とその抄訳

永 田 英 治

解説－熱運動論の学習とランフォードの研究

「エネルギーとは何か」という質問を小学生や中学生に出すと、「動力、力」、「力のもと」、「燃料、資源」という3とおりの答えがほぼ同数で返ってくることは筆者等の報告⁽¹⁾を含めて、すでに指摘されている。しかもこの傾向は、エネルギーを学習する以前と以降とで差がなかった。この解答の3番目のものは、今日の「エネルギー危機」等の世相の反映でもあるが、子どものもつエネルギーについてのイメージは仕事に集中しておらず多様なものであることを示している。つまり熱や電気的工作にも着目しているわけである。そこで、続いて「熱とは何か」という質問を出すとどういった解答が返ってくるだろうか。「燃料から出てくるもので、あたためたり、ものを動かしたりして生活に役立つもの」という解答が大半を占めるようになる。この時の「もの」とは、「何ものか」= something という意味であるが、いわゆる「物質」とは違うが、資源という「物」からくる「もの」というニュアンスを含んでいる。

これは、エネルギーの移動ことに「熱の移動と保存」あるいは熱平衡を学んだ子どもがいだきやすいイメージである。熱平衡を達成するように熱の移動が起った時、熱量が保存されているということをつかむ学習では、次のような「熱素」説に由来するモデルがしばしば使用され、また直接使用されなくても暗黙のうちに前提されていることが多いからである。

＜AとBという大きさの違う容器に水が入っている。2つの容器を連通させると水位の高い方

から低い方へ水が移動する。この場合の移動した水の量が熱量に対応し、水位が温度に対応する。＞

当モデルは、物質が移動しても物はなくならないという物質の保存（この場合は水量の保存）を利用し、しかも水位が等しくなるまで水が移動するという現象を使っているので、温度と熱量との違いを直観的にしかも定量的にとらえる上で有効である。だからこそ、18世紀、19世紀前半の科学者の多くが、「熱は物質あるいは元素の一種である」とする熱素説を支持していたのである。そのために、物質の三態変化を分子運動論で簡単に説明されても、いぜんとして熱は、重さを持ち空間を占有する「物質」とは違ってはいても、やはりある「物のようなもの」であるという印象をいだき続けることになってしまう。

科学の歴史では、熱素説が姿を消したのは、ジュール、マイヤー、ヘルムホルツ等によって熱の仕事当量という考え方（熱力学第1法則）が確立されてからのことであるようだ。今日の物理学でいう統計力学的な分子運動論が確立される以前のことである。この第1法則は、移動した熱量と仕事量とは等価であることを意味して、論理的には熱が物質でないことを結論づけるが、直観的にはそうはとらえづらい。むしろ同第2法則によれば「熱」を100%「仕事」に変えることはできないのであるから、マクロな意味での「仕事」に還元して「熱」をとらえ、それを運動と結びつけることはなおさら不自然だということになりかねない。

第2法則をつくりだしたカルノー自身も、熱機関を水車におきかえ熱の多動を水に置きかえて、つまり熱素説をよりどころにして「カルノーサイクル」を考え出したことは有名である。

このことは、熱運動論の勝利が、熱学の論理の発展だけによっているのではないことを意味するのではないだろうか。熱を技術に利用するという要請があり、いかに有効な仕事をさせるかという関心をもって熱を追っていたことが、より仕事の概念に直結する運動説を勝利に導びくことになったと思われるのである。私が古典的な熱運動説に関心を持つのは、上述の見方をもっているからである。すると、形式的に難解な統計力学を学習する以前に、もっと直観的にとらえられる熱運動説の学習をする必要がとらえられてよいし、古典的な熱運動説をヒントにして学習をする道があると思えてくるのである。

17世紀の古典的原子論者の多くは、熱は運動に他ならないという考えをもっていた。ロバート・ボイルは、アリストテレスの「熱は同種のものを結びつけ、異種のものを分離する」という定義は本質的なものではないと述べた。「熱の真の純粋な性質は、運動をおこすということであり、それによって物体を諸部分に分解し、さらにそれらが均一であろうとなかろうと微粒子に分けることのように思われる」⁽²⁾と主張したのである。ロバート・フックは、火打石と鋼とを打ちつけて出る火の粉を観察し、それが熱運動説を例証する現象の一つだと言った。火の粉が飛んだ後に残っているものは、顕微鏡で見ると、鋼のカケラそのものであったり鋼のカケラが激しい熱によって融けて丸くなったりしたものであった。つまり、火の粉は、そぎとられた鋼の微小片にしか打撃が伝わらないために、その微小片が激しく運動させられて、熱を帯びたり発光したものに他ならない⁽³⁾のだと。

一方、熱素説を確立したラボアジエは、古典的原子論者の1人であるニュートンの粒子論とブー

ルハーフェ（1668-1738、オランダ）の熱理論とを受け継いだといわれる。⁽⁴⁾ニュートンの粒子論は『光学』（初版は1704）の終わりで展開されたもので、物質の三態変化を粒子論で説明したものであった。つまり、固体がその形を維持するのは、固体の粒子間には引力（凝集力）があるためで、気体が弾性をもつのは粒子間に「斥力」〔正しくは分子運動のこと〕が働くためであると「疑問」という名で仮説を提示した（「疑問」をつけ加えたのは第二版、1717年からである）。ラボアジエは、この付力は、気体をとりまく物質、熱素が一種のクッションとなって生じるのだとした。また、熱素は、流体のように平衡を達成するように移動するのだというのである。この後半部分がブールハーフェに由来しているといわれている。熱素説は、発熱反応をとまなう化学変化をある程度説明できたし、温度と熱量との違いを定量的に区別するのに一役買うことになる。しかも、古典的な原子論を受けついで、物の保存から熱量の保存という理論を生み出したのであるから、近代原子論の父ドールトンが熱素説を支持し、熱を原子の1つに数え入れたのもごく自然ななりゆきだったといえるのである。

その中であって、ランフォード（ベンジャミン・トンプソン；1753-1814）は、有名な「まさつによって生じる熱の起源に関する実験的研究」（1798、いわゆる砲身の中ぐり作業による発熱を扱ったもの）を発表する以前から、熱運動説を確信していた。その事実を、私は渡辺正雄⁽⁶⁾の研究によってはじめて知った。しかも、ランフォードは、後に紹介する訳文にもみるように、ブールハーフェの「火の理論」=熱理論の影響を強く受けていたのである。ランフォードは、熱物質説と熱運動説との中間的な見方から17世紀の古典的な原子論を受け継ぎ、彼の主要な関心事であった熱の軍事・技術的な利用という研究の中で、その運動説を深めていくのである。しかも、皮肉なこと

には、彼の大作の中ぐり実験の発表は、その当時、熱素説に対する反証としては、さほど影響を与えなかった。その結果、ランフォードは、熱素説への反証を彼の技術的な研究成果から次々と提出していくことになるのである。

熱素説に反対して熱運動説を裏づけようとしたランフォードの諸研究は、古典的な熱運動説の学習プランをつくる上で多くのヒントを与えてくれると思うに到ったのである。幸い、彼は「熱に関する著者の諸実験についての歴史的回顧」(1804)という小論を表わしており、彼の熱の諸研究の意図と概要とをふりかえっている。次に抄訳として紹介したのは、この論文である。

ランフォードの経歴については詳しいものはいくつか出されているので、ここでは彼の熱についてのおもな研究発表歴をあげるに留めたい。

1781・火薬についてのいくつかの実験

1786・色々な物質における熱の伝播について

1792・色々な物質における熱の伝播について、
パート2

1797・火薬の爆発力を決定する実験

・液体中における熱の伝播について

1798・まさつによって生じる熱の起源に関する実験的研究

1799・熱がもつとされている重さに関する研究

1804・熱の反射

・熱の本性とその伝達様式とについての研究

・熱に関する著者の諸実験についての歴史的回顧

1805・最大密度の水の温度についての研究

1806・熱についての新実験小論

・熱の研究—小論その2

なお、本抄訳のもとにしたのは、“*The collected works of count Rumford vol.1*” (1986)、443—496 べ、
‘Historical Review of the Various Experiments of the Author on the Subject of Heat’であり、当訳は原論文の約半分にあたる。また、訳文中<>に付した小見出しは訳者が原論文を節に区切り標題を付したものである。最後に、ランフォードの研究をとりあげる意味について、板倉聖宣氏から多くの示唆を受けたことを記しておきたい。

<注>

- (1) 岩崎敬道『新しい理科教育のカリキュラム—熱現象によるエネルギー概念の導入』東京学芸大学提出修士論文、1977、42—45 べ
森隆『中等理科教育におけるエネルギー概念について』国際基督教大学大学院委員会提出修士論文、1977、43、44 べ
- (2) ロバート・ボイル著大沼正則訳『懐疑的な化学者』河出書房新社、1963、43、44 べ
- (3) 永田英治「顕微鏡観察におけるロバート・フックの科学の方法」『教育』*№*376、1979、122 べ
- (4) 高村泰雄等編『異端の科学史』中「熱も元素である—ラボアジエの熱素説—」北大図書刊行会、1979、107 べ(これには、ラボアジエの『化学要綱』1789の抄訳が含まれている。
なお、ランフォードの「まさつによって生じる熱の起源に関する実験的研究」は：同刊行会による同一シリーズの『近代科学の源流—物理学篇Ⅱ—』(1976)に抄訳がある。
- (5) ニュートン著阿部良夫・堀伸夫訳『光学』岩波文庫1991、333、334、351、352 べ
- (6) 渡辺正雄『近代科学史』南窓社、1965、93 べ

ランフォード伯爵（ベンジャミン・トンプソン）著「熱
に関する著者の諸実験についての歴史的回顧」（1804）抄訳

<はじめに>

重要でかつまた困難であるような主題についての研究に大衆の注意をむけさせる著者というものは、大衆に聞かせる権利を与えられているというその理由を、はじめに述べることを許されるにちがいありません。また、「究理学者というものは、その学説が、みずからの労働と骨のおれる正確な観察と、細心の注意を払って計画され行われた実験とに基づいている場合にのみ、彼が学識ある人だという信頼と認可を勝ちえる」ということも真実であります。

熱に関する実験にたずさわることは、私にとっていつも、もっとも気のりのすることでありました。その主題は、私が17才の時に、ブルハーフェのすばらしい〔著作〕「火について」⁽¹⁾を読んだ時から、すでに私の注意をかきたて始めました。その後、実際には、他の事で熱の問題に没頭することをしばしば妨げられはしましたが、わずかのひまを見つけては、また新たに熱の問題にとりくんで、そのたびにさらに大きな興味を抱くのであります。

その研究対象は、今だに大きな感心を寄せているもので、私がもろもろのことで急がしくとも、熱の問題に少しでもかかわりをもつと、私はすぐにそれに好奇心を高じて注意をそちらへむけてしまうのです。何年もの間、継続するというこの習へきによって、私は、その主題についての実験のほとんどすべてを達成することができました。そして、その継続という力によって、小耳にはさんだ熱とその作用とに少しでもかかわるような現象を、そのおのおのについて熱心に探究し解明してきたのです。

<注>

(1) *elementa chemiae* (1732) の1節と思われる

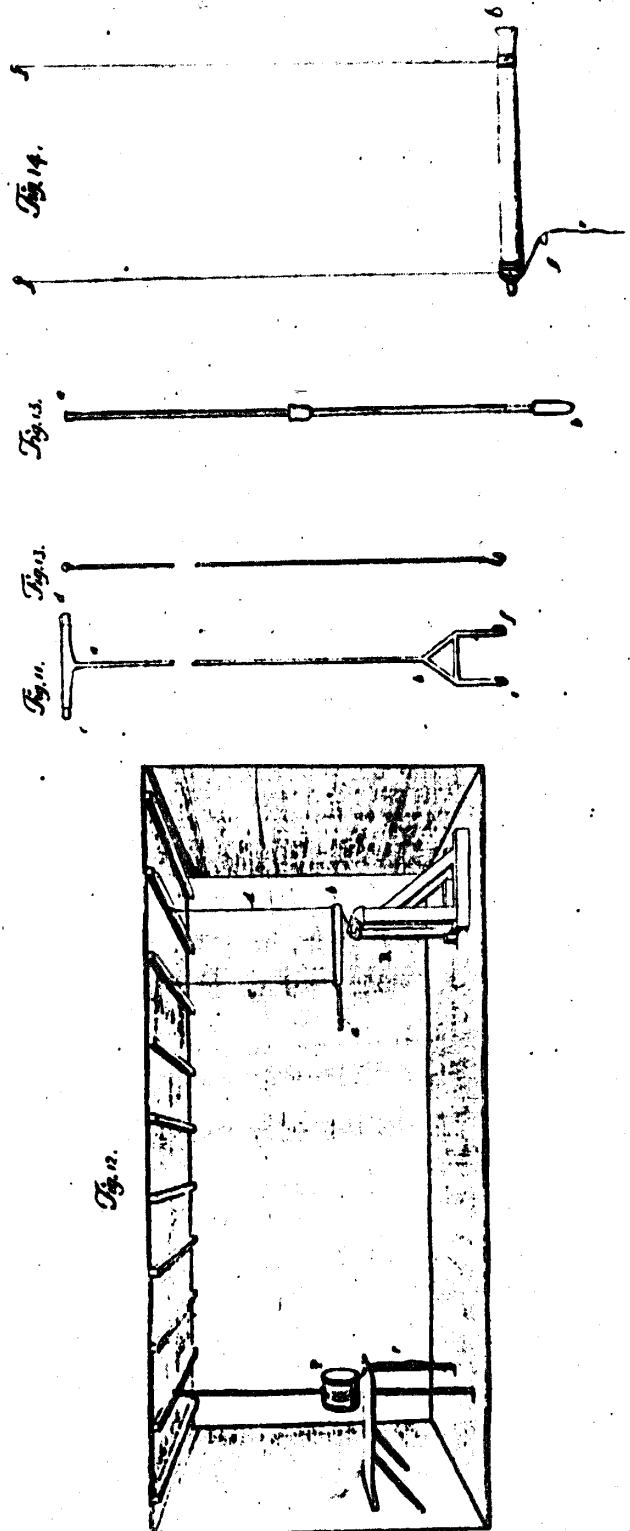


図1 ランフォードが火薬の研究に使った装置
〔fig14はfig12と左右反対に描いてある〕

る。なお、'a new method of chemistry'と題して英訳が出ている。

<火薬の研究について>

1778年に、私は、火薬の力と弾丸が砲身からうち出される速さについて研究しました。（「火薬についてのいくつかの実験」1781『理学会報』に発表）その目的を果たすために、私はマスケット砲を装填して色々な方法で何回も発砲してみました。その際砲身は2本の鉄のつり棒でつりました。（つまり、台座を使わずに）、砲身は水平に地面から4フィート〔約1.2m〕上に置かれ、自由に動くようにしたのです。これは、とても印象深い観察となりました。〔図1参照〕

その実験は、おもに砲身の〔発砲による〕反動から弾丸が発射する際の速さを決定しようとしたもので、まずはじめは「弾丸を発射させる火薬がいったいどれだけの分量でその反動をひきおこすか」を見きわめることが必要でした。そのことを解きあかすために、私は数種の実験に成功しました。一それは、ある場合には、弾丸をこめずに弾薬をつめ、他の場合には、2個、3個、あるいは4個もの弾丸をこめて次から次へと発砲させるというものです。

〔砲撃の時には〕いつもすることですが、私は、発砲を終えるごとにすぐに砲身を左手でぐっとおさえました。それは、（大砲に弾薬や弾丸を込めるための）込め矢にとりつけてある粗麻ロープで砲身をふき終えるまで、砲身をしっかりと固定するために行うことです。その際に、私は、次のことに気付いてびっくりいたしました。それは、「1つ、あるいはそれ以上の弾丸を込めた時よりも、火薬だけを装填した空砲の時の方が、つねに砲身がずっと熱くなる」ということです。

私は、その時まで「砲身は、発砲させる際の火薬の燃焼によって生じた熱が直接の原因となって、熱くなる」ということに、まったく疑いをはさんだことがありませんでした。しかしながら、もはや上に述べた実験結果からは、その仮定はまった

く根拠がないと確信するにいたったのです。

というのは、もしも「問題の大砲が実際に火薬の炎によって熱せられる」という考えがあっているならば、「砲身から突出する炎は、火薬しか込めない〔で空砲を撃つ〕時よりも、等量の火薬を込めて1つあるいはそれ以上の弾丸を押し出す時の方がはるかに多いため、前者よりも後者の場合の方が砲身ははるかに高い温度に達する」という結果にならなければいけないからです。ところが、すでに述べた実験は反対の結果となりました。問題とする砲身を加熱するのは、火薬の燃焼が原因ではなくて、砲身内での衝撃で起きた振動と火薬の燃焼によって生じた弾性流体がいっしゅんの勢いで作用することによる⁽¹⁾ということを示しています。

「強く打撃するのは、弱く打つのよりもより効果的に熱を生じる」という事実を知らない人は誰もいません。そこで、もしも「熱は固体粒子が相互に絶え間なく急速に振動することに他ならない」という仮説が十分にうちたてられれば、その現象は容易に説明できます。

「火薬の燃焼によって砲身内に起こる衝撃は、上の実験では、弾丸を込めずに点火された時の方が、燃焼によって生じた弾性流体が広がる余地を戦いとるためにかなり重い弾丸をゆっくりと押し出さなければならない時よりもずっと振動するしはげしい。」と言う事は確かな事であります。注意深く考察すれば、この事情が問題としている実験の結果を十二分満足に説明している、と思われまます。もちろん、私は、熱素 (caloric) に関して展開されてきた仮説に満足したことはまったくありませんでした。

<注>

- (1) 今日流に説明すると、火薬の燃焼によって生じたエネルギーは、空砲の時にはそのほとんどが砲身を熱するのに使われ、弾を込めた場合には、弾を飛ばす仕事にその多くが使われるためであると考えられる。

＜比熱その他について＞

上述のできごととは、私にとってたいへん印象ぶかかったので、熱の性質と熱の作用のしかたとに関して、しかるべき結論に到達しようとして、必要な器具を調達しおわるのを待てずに、熱についての一連の実験にとりかかりました。

何はともあれ、私は、それまで物体の「比熱」⁽¹⁾と呼ばれてきたものについて色々の実験しようと企てました。その目的のために、ロンドン、ニューボンド街に住むフレイザー氏（今は、イングランド王御用達の物理・数学器械製造業者であります）から、きっかりと同一直径1インチにつくったかなりたくさんの固体球をとり寄せました。そのいくつかは金製であり、いくつかは銀製であります。つまり、それはすべて、施盤で一種の金属や数種の固体物質を「球に」しあげたものです。その球のそれぞれは、細い絹糸でぶらさげられるようにしてあり、私は、それをある液体につけて望む温度にまでして、冷やした一定量の水の中に投げ込む実験を計画しました。そこで、私は次の結論を下しました。つまり、「固体球が一定量の水に伝えた温度〔固体球が失った熱量とすべきところ〕は、温度計が示すように、固体球とそれと等量の水とを同温度にするのに必要な熱量の比例計算から得られる値を、〔比熱の概念を使わなければ〕、はるかに越えている」ということです。

私は、その一連の実験をすでに着手していたのですが、それを終える前に、戦争〔米独立戦争〕のためにアメリカへおもむくことになりました。そのため研究は何年かの間中断してしまいました。1783年の和平の後、英国にもどりました。その時、私が計画した実験は、すでにスウェーデンのウイルキンが精密に行ったことを聞かされました。私には、その究理学者が行った実験の精度を試す機会をもちあわせなかったもので、結局、自分の研究のために計画した装置を役立てることなく放っておくことになりました。

翌年、私は英国を去りババリアへむかいました。そこで後の「バイエルン」選定侯に仕えることになったのです。そこで、先述した実験装置を含むいくつかの器具を持っていきました。それらは今でも、ミュンヘンにある兵学校の陳列場にかざられております。

その実験を計画したことやそれがウイルキンの結果と一致することを、私は20年間以上も、著作で触れたことはありませんでした。それは、単に、他人の発見を盗用したがる人間の性へきを嫌ったからであり、また嫌い続けてきたからであります。今、私は、虚栄心からではなく、当主題に長い間私が思いを寄せていたことを皆さんに知っていただくために、この事情をお話ししておきます。

＜注＞

(1) 比熱と潜熱とについては、ジョーゼフ・ブラック（スコットランド：1728－1799）とヨハン・カルル・ヴィルケ（独：1732－1796）とによって1760年前後に独立に発見されていたが、後年「束縛された熱」と「自由な熱」という形で論じられ、熱も物質であるとする熱素説を支持するものとして受け入れられていった。

＜熱は真空中をも伝わることを証明した実験＞

ミュンヘンでの宮仕えと、またそこで知識を増進させることに多大の関心を寄せていた王子に親しくお仕えしたことは、⁽¹⁾4年もの間、私がほとんど何のじゃまもなく物理研究を遂行するための、莫大な時間を与えてくれました。熱に関する実験を行うのに、かなりその時間を利用したのです。

1785年と1786年には、熱が色々な物質を通過し、熱をさらに他のものへと伝える様子について研究することに専心していました。その実験の詳細については、ロンドン王認学会の『理学会報』にのった2つの論文⁽²⁾に見るとおりであります。

はじめのものは、同会誌の76巻、もう1つは83巻〔82の誤記〕にのりました。後者の論文では、同会が毎年授与することになっていた金メダル⁽³⁾を獲得しました。

1785年の夏に、私は、「熱は『トリチェリの真空』の中を伝わる、つまり熱は真空中でも励起されることが可能である」ことを発見しました。〔前述の論文「色々な物質における熱の伝播について」の中で報告された〕

その発見は、熱の本性に関して私がそれまで採用してきた見解を強固にするのに少なからず貢献いたしました。従って、疑う余地のない事実を確立したその実験の説明を、細かにここで述べておくことは決してよけいなことではないでしょう。その実験は次のように行われました。

マンハイムに住む、アルタリアという名の熟練した職人になって、直径が半インチ〔約1.3cm〕ある水銀温度計の球状部を、直径が1.5インチ〔約3.8cm〕ある他のガラス球の中央にしっかりととりつけることに成功しました。その温度計球状部の外面とガラス球の内面との間〔の空間〕は、細い中空の管つまりガラス球から外へ突き出した先端に密着してとりつけた〔水銀〕気圧計の管を使って水銀を満たしてあります。なお、その突出部は、ガラス球にとりつけた温度計が通常的位置にある時は下へとび出しています。

ガラス球の内側と温度計球状部の外側との空間を、気圧計の管（36インチの長さ〔約91cm〕）とともに水銀で満たすとすぐに、管のはじを水銀溜につけます。そこで管をさかさまにして直立させて、中に温度計をとったガラス球が上になるように固定します。

装置は、そのように本当の気圧計にとりつけてあるため、ガラス球と気圧計の管上部との中にある水銀は、その上面が水銀溜の水銀上面から28インチ〔約71cm〕の高さになるまで下がってきます。水銀はそこで外の空気の圧力によってその

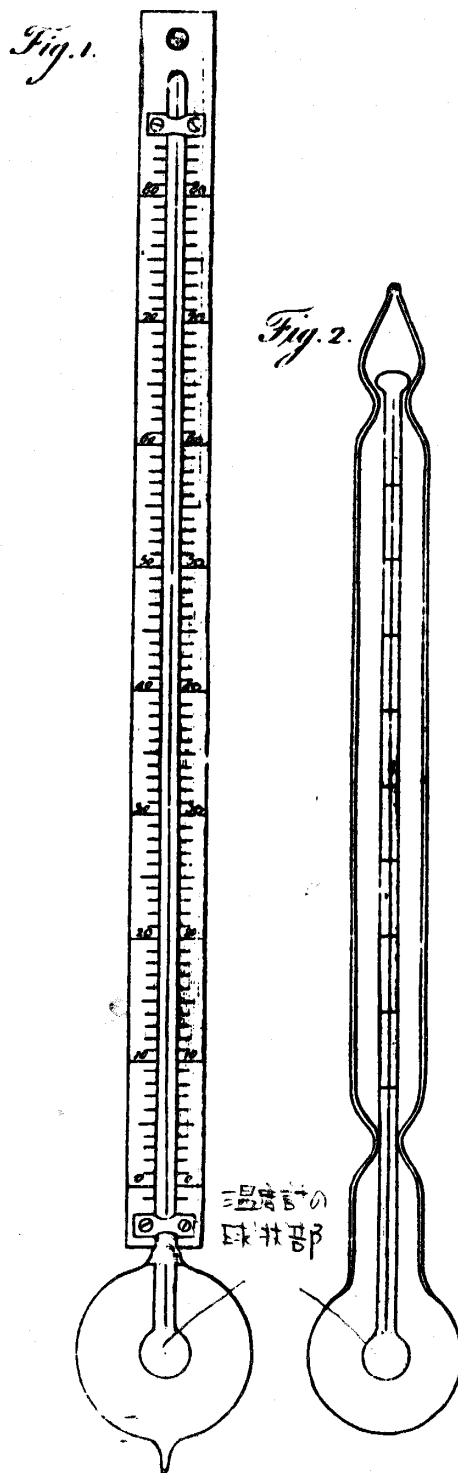


図2 「色々な物質における熱の伝播について」で発表したランフォード考案の温度計

高さに保たれ静止します。それから、火をともしたろうそくをとって、気圧計の管にさしこんだガラス球の管上部へもっていきます。そこは、あらかじめ管の直径を細くしておいたところで、吹

管を使ってその部分をとかして閉じるように炎をあてます。

熱のためにガラスが柔かくなると、外の空気の圧力ですぐにその管壁はつぶされます。それで処理はうまくいきます。

気圧計の管
をはずすと、
温度計の球状
部はその全面
を真空でおお
われているこ
とになります。
その様子は右
の図〔図3〕
のとおりです。
温度計に水銀
を入れ、目盛
をそなえつけ
ると、私はそ
こで短気をお

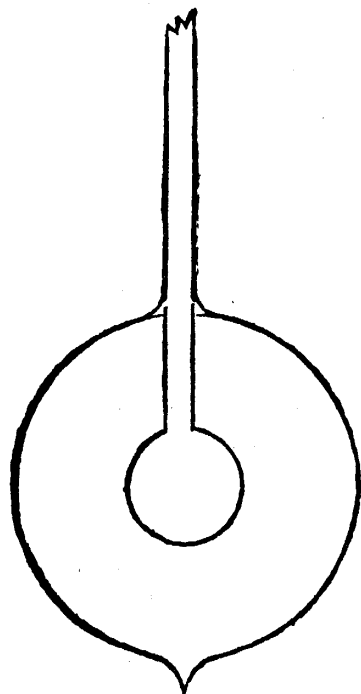


図3 「研究の回顧」にのせた
略図

なり、この真空を熱が通過するかどうかを試す時
を待っていることができなくなりました。

そこで装置を列氏18度〔22.5℃：列氏＝レオ
ミュール、René Antoine Ferchault de
Reaumur, 1683－1757、1730年に列氏
温度計－水の融点0度・沸点80度－を考案〕の
水を満たした容器の中に入れて、真空中の水銀を
満たした球状部が列氏18度に達するのを、（装
置にとりつけた目盛で）確かめるまでつけておき
ました。そして、容器から装置をとり出し、下
からランプで沸騰させ続けている熱湯の中に何分
間かつけておきました。

温度計の水銀は、ゆっくりとではありましたが、
管をのぼりはじめましたので、もはや「煮湯の熱
は本当に真空を通過して温度計の球状部に達した」

ということを疑うよりははありません。

温度計中の水銀は次のように上昇しました。「装
置を煮湯の中に1分半の間つけておいた後では、
水銀は列氏18度から27度〔22.5℃から33.8℃
〕になりました。4分を経過すると44.9度〔56.1
℃〕となり、5分たつと48.2度〔60.3℃〕とな
りました。」

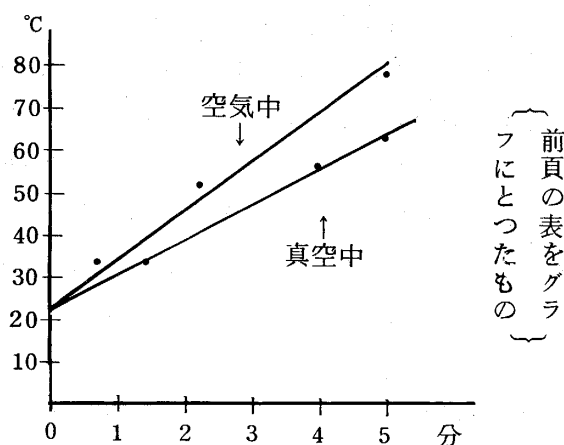
熱が真空中と空気中とで通過する速さの違いを
幾分正確に判定するために、ガラス球の下側にと
りつけた細くとがった管のはじを破って空気を球
の中へ入れてやりました。それから、もう一度管
をローソクで融かし〔てふさぎ〕ました。そこで、
この装置を水の中へ突っこんで冷して列氏18度
〔22.5℃〕にし、それから再び熱湯の中へ入れま
した。すると、水銀は、前の実験のときよりもず
っと早く上昇しました。

両者の実験で温度が漸次に上がっていく様子は、
次の表にみるとおりであります。

	(実験1) トリチェリの真空中	
	経 過 時 間	得 た 熱*
煮湯の中へ入 れる時の温度		22.5℃
煮湯の中へつ けておいた後 の 温 度	1 分 3 0 秒	33.8℃
	4 0	56.1
	5 6	60.3
	実験2 空気に囲まれている時	
	経 過 時 間	得 た 熱*
煮湯の中へ入 れる時の温度		22.5℃
煮湯の中へつ けておいた後 の 温 度	0 分 4 5 秒	33.8℃
	2 1 0	56.1
	5 0	76.1

表 トリチェリの真空中と空気中の熱の伝わり方
の違い〔*は上昇温度とすべきところ。なお列
氏は摂氏に直してある〕

その実験結果から、「温度計の球部が空気にと
りかこまれている時は、真空中にある時のほぼ
2倍〔1.5倍〕の速さで熱が増す〔温度が上昇す



る]。』ことは明らかであります。

後には、上述した事と同じ発見をした別な実験も行いました。それをここで述べるにははるかに時間とスペースを費すことになります。それらは、私の記憶によると『理学会報』にのった、私の8番目の論文に見る〔「色々な物質における熱の伝播について—パート1—」〕ことができます。

続いて、実験をくり返して修正するために、私は同種のいくつかの装置をつくりました。時には、その装置が冷えるのに要する時間を、時には、熱がその装置に浸みこむのに要する時間を観察しました。また、時には、空気中で実験し、ある時には水中で行いました。それらの実験はみな、同じ結果をもたらしました。つまり、「真空中にある温度計の球部は、それが空気にとりまかれている時に対して、いつも同一温度変化を生じるのにほぼ2倍の時間を要するということだけが異なっている」ということであります。

「熱が真空中を通過する」ということは、熱の本性を研究する上で重要な事実であり、それを疑いの余地のない実験によって確かめたかったのです。

管球の中にそう入してある温度計の管部は、ガラス球に接差してありました。そこで、「温度計の管部の一部は、装置を熱したり冷やしたりする空気や水に触れているために、熱の一部がその管部を伝わって、真空にとり囲まれた温度計の球部

に入る」という心配が生じます。その場合にも、十分納得がいくように、「温度計がその管部まですっぽり入るガラス球の中にとっても細い絹糸で温

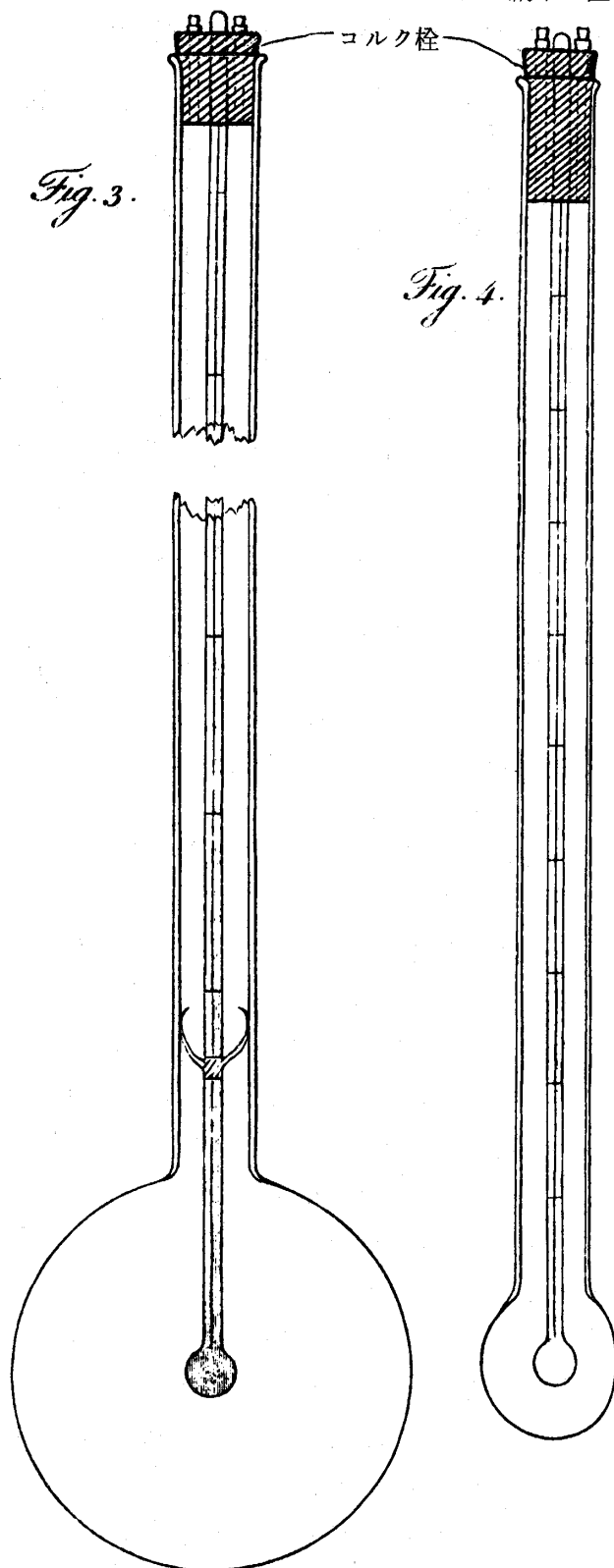


図4 温度計全体が真空の中に入るようにした装置

度計をつるして実験をくりかえす」ことを思いつきました。「この装置と同じ目的でつくったものを「色々な物質における熱の伝播について」から写しておいた。一図4」このガラス球も水銀を使って空気を追い出しました。

新しい装置を使って行った実験の結果は、先述した装置で行ったものとほとんど違いはありませんでした。それ故に、「熱はトリチェリの真空中を伝般する」という事実は、まったく疑いなく確認されたのであります。

その結果は、「今では」学会に十分知れわたっています。そこで、「果たしてこの結果は、今日受け入れられている“熱素”に関わる理論と整合させうるか」という疑問が生じます。「たとえばどんなにそれを望もうとも、熱が互いにまったく異なる2つの方法で伝播しうるなどとは考えられないために、整合できるとは思えない」と告白しなければなりません。

究理学者は、これらの研究結果にほとんど言及しませんでした。私は、その沈黙について不平をいおうとは思いません。たとえ私が、彼らがしたように、そのことをほとんど述べなくても、私が沈黙している理由は、容易に想像できるからです。少なくとも、実験結果から生じた疑問を、私が十分平易に指摘したことは認められるでめしょう。

<注>

- (1) ミュンヘンでの公の仕事の一つは、軍隊の近代的な改造を指導することにあつた。そのために武器の研究や防寒軍服の研究等も行った。
- (2) 「熱についての新実験—色々な物質における熱の伝播について—、天然および人造の衣服が暖かい理由を研究するために行ったたくさんの新実験の報告」ロンドン王認学会『理学会報』76巻273—304頁、1786、82巻48—80頁、1792。
- (3) 王認学会が与える賞の1つで、1709年に死んだG・コブレイの遺志で同学会に寄贈された100ポンド

の基金をもとに設けられたもの。

1736年に現金贈与からメダル授与に代わりコブレイメダルと呼ばれる。最初のメダリストはJ, T, デザギェリエである。

<熱の色々な物質における伝導率>

その後、私は多くの他の実験を手がけました。それは、温度計が、普通の空気すなわち大気や、蒸気を飽和した空気、炭酸ガス、色々な密度の空気〔気体〕に囲まれた時、熱が水銀へ移動する速さの度合を正確に決定しようというものでした。

1787年には1792年の『理学会報』にのせた一連の実験を行いました〔「色々な物質における熱の伝播について、パート2」のこと〕。

Fig. 1.

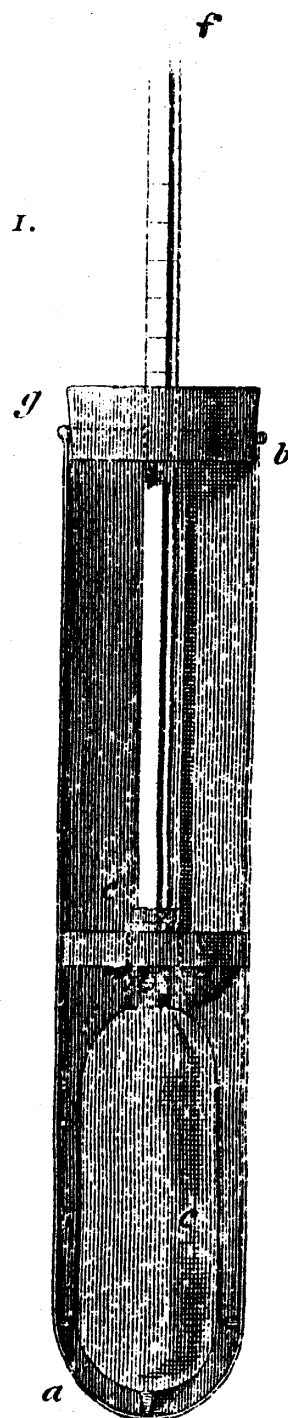


Fig. 2.

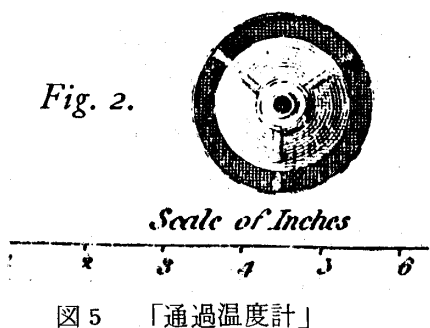


図5 「通過温度計」

その主なねらいは、色々な物質、ことに衣服としてよく使われている物質の熱伝導率を研究することにあります。その実験用に考案した温度計は、「通過温度計」〔「色々な物質における熱の伝播について、パート2」よりコピーした図5参照〕と名づけましたが、先に記したものとはずかに異なるものであります。

〔この節は、以下9ページ続くが省略〕

＜「熱素の重さ」について＞

ここで、色々な時期に私が行ったさまざまな実験のことについて少し付記しておきましょう。それは、長い間究理学者がやっきになって論争してきた「熱の物質性」という問題に、（もしもそれが方法上可能ならば）決定的な解答を与えるためのものであります。

熱を物質とみなすならば、必然的に「熱は重さをもつ」と仮定しなければなりません。今もしも、物体が熱くなるのが物体の中で「熱物質」を蓄積するためであるならば、当然物体は、冷たい時よりも暖かい時の方が重くなければなりません。この点に決着をつけようと、何人かの究理学者が追求してきました。しかしながら、私が行った実験⁽¹⁾以上に確定的な実験は誰も行ってはいなかったと確信しています。

私は、労力も費用も惜しまずに、すばらしい器具を調達して実験によって確かな結果を勝ち得ようとしてしました。その時得た結果を手短かに述べると次のようになります。

純金製の球をとって、それが完全に冷たい時に重さを測り、次にそれを融点〔約1064℃〕まで熱して重さを測りました。さらに、かなり多量の水をフラスコの中に入れてろうで密閉し、まず液体の状態で、次に融けかけている氷の状態で、さらに完全な氷状態で、そしてまた、もとの温度で、それぞれ重さを測定しました。そのすべての実験は、物体の重さは熱によっていささかも変化しないということを確認させました。

さて、その実験結果から、私は、他のたくさんの自然現象が提供してくれる「熱素の存在に対する疑問」をいっそう強めたのでありますが、またそれでも、いかながらその争点は先の実験結果から得られるものとはかなりかけ離れているとも思いました。熱素説の擁護者は、「それでも、熱素は、今日使われているはかりでは重さが測れないほど微小である」と反対するであらう。

（し、実際に彼らはそういいました）

＜注＞

- (1) その主題に対する実験を詳細に述べた論文は、1999年の『理学会報』〔「熱によって生じる重さについて」〕に見ることができる。

＜大砲の中ぐり作業にまつわる実験＞

興味あるこの問題から、完全な「決定実験」によって疑問をまったくとり去ろうと長い間もくろんできたすえに、その決定実験をととう見出したと思いました。また、今でも、それを決定実験だと考えています。

「もしも熱素が本当に実在するなら、1つの物質や個物質がいくつかあつまって1つの物体となったものが、そのまわりの色々な物体へ熱素をたえまなく伝えて、しかもその物体が減りもしなければなくなってしまうこともない、ということは絶対にありえない」ということを、私は論じました。

海綿を水で満たして、それを乾燥した室の中央に糸でつるしておく、湿気は空気へ伝わりますが、すぐに水は蒸発してしまい、スポンジはまわりへ湿気を与えることができなくなります。それに反して、鍾は、たたくと間断なく音を出し、人が望むだけの音を提供してしかもごくわずかな消もうも認められません。湿気は物質であって、音は物質ではないのです。

固体を2つ、互いにこすり合わせると多量の熱を生じることはよく知られています。それで、固

体がしまいにはなくなってしまうことがないように熱を発生させ続けることができるでしょうか。実験結果によってこの問題を解きあかしましょう。

その重要な論争問題に確たる仕方で答えを出そうと私が実行した実験を、こと細かにここで述べるのはあまりにもたいくつなことになるでしょう。それは、私の論文「まさつによって生じた熱の起源」に見るとおりです。1798年の『理学会報』に印刷されました。そうはいうものの、その実験は、後の熱の研究にあまりにも密接なかわりを持っていますので、読者の皆様に、実験のアイデアと結果とをわかっていただけるようにするのはぶくわけにはいきません。

その研究に使用した装置は複雑で、ここでは説明しきれませんが、略図〔図6〕によって実験の原理と結果とをつかんでいただくのはむづかしいことではないでしょう。

Aはシンチュー製心棒の縦断面で、その直径は1インチ〔約2.5cm〕、がんじょうな台盤Bに垂直に固定してあります。その心棒の上部はどっしりしたシンチュー製半球にしてあり、半球直径は3.5インチ〔約8.9cm〕にしてあります。Cは同じ心棒で、同じく鉛直にし下部が半球にしてあります。両方の半球は、双方の心棒が鉛直線上にまっすぐ立つようにして、重ねて固定します。

Dは、直径12インチ〔約30.5cm〕の球状金属容器の縦断面で、それには、3インチ〔約7.6cm〕の長さで直径 $3\frac{3}{4}$ インチ〔約9.5cm〕の筒状の首がついています。心棒Aは、その容器の底の穴を貫通して、支持棒として容器を適当な位置にハンダでとりつけてあります。

2つの半球をおしつけてできている中心の球は、球容器の中央にくるようになっていきます。それで、容器を水で満たすと、水はシンチュー製心棒とともに、その半球をおおうようになります。

そこでもしも、その半球を互いに強くおしつけて同時に心棒Cをその軸を中心にしかるべき装置

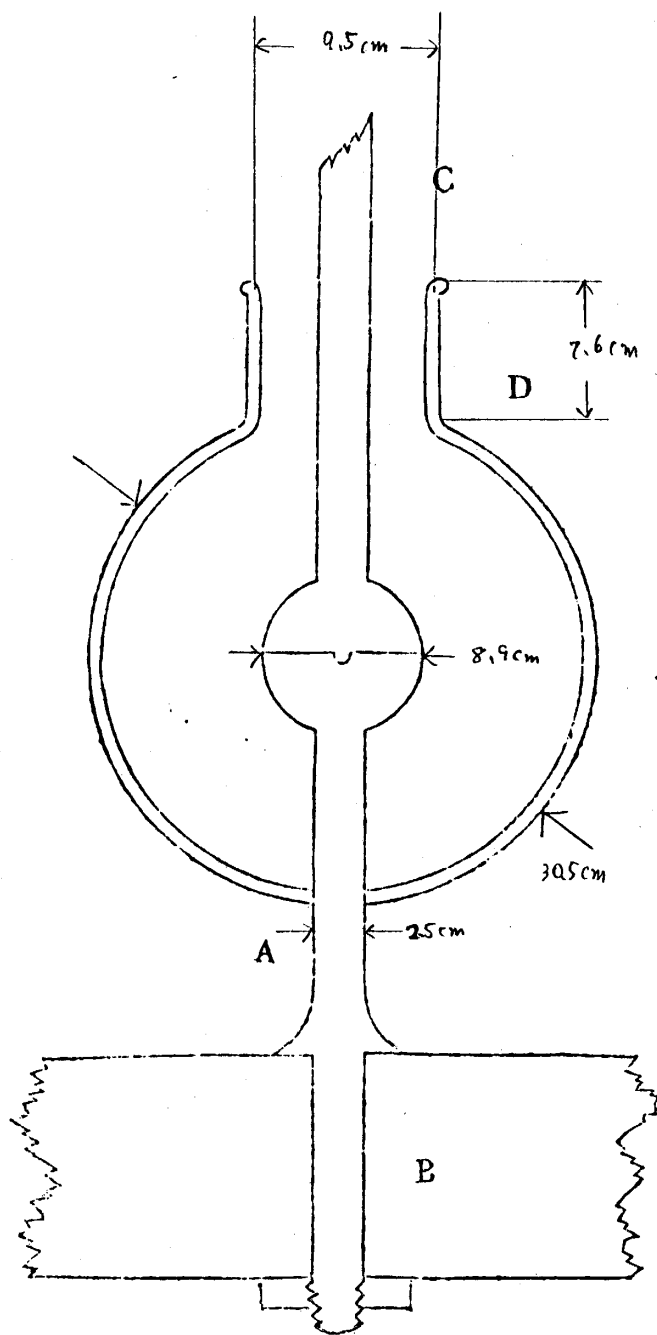


図6 大砲の中ぐり作業についての実験一略図

で回転してやると、2つの半球の平面上のまさつによってかなりの熱を生じます。

この方法で発生する熱の量は、2つの半球平面を互いに圧する力とまさつの速さ〔心棒Cの回転の速さ〕とに正確に比例しています。圧する力が1万ポンド〔約4.54トン〕で心棒を回転させる速

さが1分間に32回の時は、絶えまないまさつによって生じる熱の量は膨大なものです。その量は、中ぐらいのローソクが9本燃え終るまでに放つ熱の量に相当しています。

このようにしてきめられた時間内に生じる熱の量は、球形容器Dを水で満たして2つの半球を水の中でまさつしようとも、球容器に水を入れないで単に空気の中で半球をまさつしようとも、明らかに等しくなります。

この装置によって生じる熱の量は〈無尽蔵〉であります。心棒Cを回転させる限り、熱は当装置によって常に同じ量だけ生じるのです。

もしも球形容器Dが水で満たされていれば、この水はだんだんと熱くなりしまいには沸騰しはじめます。このようにして、私はかなりの量の水を沸騰させました。

もし、この実験を冬の気温が氷点そこそこの時に行つて、容器Dを水と砕いた氷とを混ぜたものでいっぱいにしておけば、ある決まった時間内に2つの半球平面をまさつして生じる熱の量は、氷がとける量で正確に表わすことができます。

当装置は、たえまなく常に等量の熱を供給しますから、望むだけの量の水をとかすことができます。

でも、この熱はどこからくるのでしょうか。これが、この実験の本当のねらいを果すべき問題であります。

「熱は水の分解からくるものでもなければ空気の分解からくるものでもない」ということは確かなことであります。この点に関して、私が『理学会報』に詳細に書いた色々な実験は、疑問をこえた十二分に確かな事実であります。

〔また、〕「半球を構成している金属の熱容量がまさつによって変化してそこからきた」ということもありえないでしょう。このことは、まず第一に、熱がたえまなくしかも一様に生じることによって示されます。第二には、この点を直接支持

する実験によって示されます。それは、金属の熱容量は、〔まさつの前後で〕ほんのわずかな違いも生じていないことを確かめたものです。

〔さらに、〕「半球とつながっている心棒からくる」ということもありえません。というのは、その心棒は半球から熱を伝えられて暖まっているからです。

「半球をじかにおおっている空気や水からくる」ことは、さらにありえないことです。というのも、装置は、休みなくどちらの流体にも熱を伝えているからです。

それでは、この熱はどこからくるのでしょうか。また、熱とはいったい何ものでありましょうか。

「熱は、物体の微粒子間に起こる振動運動に他ならない」という仮説にもとづくとても古い学説に手を借りる以外に、かような実験結果を説明するのは不可能であると認めざるを得ません。

鐘を打つと、同時に音を発し、その振動によって起こされた空気の振動は、空気と接している物体を振動させます。他方、水をいっばいに含ませた海線は、いつでも海線そのものの湿めりけを失わずにまわりの物体に湿気を与えることはできません。

＜ベルトレ閣下の反論＞

著名な究理学者であつて、幸いにも私に親しくしていただき、私もつねづね尊敬の念を抱いてやまないベルトレ閣下〔C.L.Berthollet：仏1748—1822〕は、名著『化学的静力学論』（1803）において、私の研究結果を説明して、それを熱素説と析衷しようとしてしました。

〔この節は、以下3頁半続くが省略、ベルトレは、「際限のない熱の供給は、金属の熱容量が変化するために起こるが、ランフォードは熱容量が変化するまで実験を継続しなかったのだ」と述べた。〕

＜ベルトレ閣下の反論に対する反論＞

〔この節、3頁省略〕

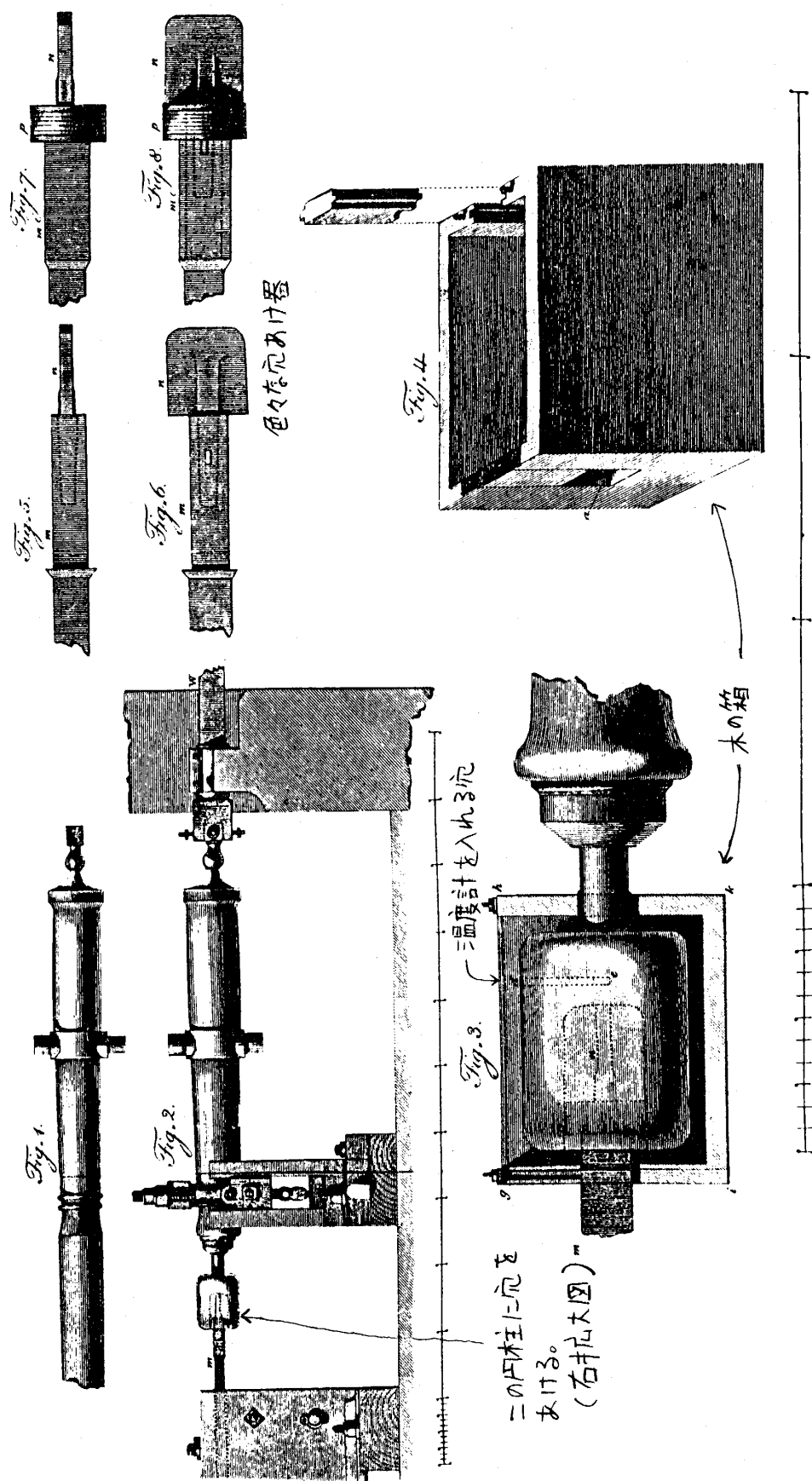


図7 「まさつによって生じた熱の起源」に掲載された図版

＜冷たい物質の熱輻射＞

その他の熱についての私の研究を説明しましょう。

1800年の夏に私はスコットランドを訪ね、その機会に数ヶ月をエジンバラで過ごしました。

そこにある大学〔グラスゴー大学〕は、「50年以上の間有名な学者がたえず席を占めていた」ことで名高いものです。

ある日私は、（あの有名なブラックの後任）ハウプ教授とプレイフェア教授、スチュワート他数人の人達と座を共にしました。その時、ピクテー〔Marc August Pictet：スイス、1752－1825〕が行った冷たい物体の冷氣による空氣の凝縮、収縮を量定するための実験を追試しました。それは、熱に対する私の見解がはじめて公に流布したことを意味していました。

直径15インチ〔約38.1cm〕、焦点距離15インチの2つの金属製〔凹面〕鏡を16フィート〔約4.9m〕離して、向かいあわせておきました。その時行ったような冷たい物体（たとえば、水と砕いた氷とをつめたガラス球）を鏡の1つの焦点に置いて、他の鏡の焦点に感度の良い空氣溫度計を置いてやると、その溫度計はすぐに溫度の下降を示します。もしも、溫度計を焦点に置かず一方へわずかばかりずらすと、さきの場合に冷たい物体が溫度計を冷やした冷却能力はもはや認められなくなりました。

ところが、その問題は、ピクテーが述べた実験を単に追試するにとどまらずに、問題となっている事実を、もっとも説得力あるしかたで説明して疑問をとり除くような変形実験を行うきっかけとなりました。

私は、その実験結果に対して次のような言葉で見解を述べました。－「熱素が実在するということとはありえない。熱の伝達と音の伝達はまったく類似している。焦点に置いた冷たい物体は、他の焦点に置いた暖かい物体（溫度計）の“調べを変

化させる”」と。

そこで使った表現を逐語的にここで紹介するのは、その議論が特別な状況のもとで行われているために、適切ではなく、また有効でもないでしょう。

それよりもかなり以前に、私はすでに、熱輻射に関わる一連の実験を計画していました。そして、火の管理と燃料の経済とについて扱った6番目の論文（1797年にロンドンで刊行された）において、すぐにも着手しようとしていたその論題を公にしておきました。

〔この節は、以下2頁続くが省略：要約－冷たい物質の輻射に関する実験装置は、1801年頃にいちおう完成したが、1802年の初めにババリアへもどる命が下り、実験を開始した5月にはロンドンを出発することになった。しかし、装置はもって帰ることができず、同じ道具を調達できなかったので別の装置を使った実験を考えた。〕

＜暖かい物質の熱輻射＞

それからすぐに着手した第一番目の実験で、暖かい物体（たとえば熱せられたストーブ）が出す目に見えない熱線が太陽からくる光線と同じ性質をもっているのかどうかを決定しようともくろんだことがあります。そのために、薄くて柔かい木でつくった直径4.5インチ〔約11.4cm〕、高さ3インチ〔約7.6cm〕の上部があいている筒上の箱を3つ用意しました。

それぞれの箱の中には、底から $1\frac{1}{4}$ インチ〔約3.2cm〕のところの金属製円板で、厚さが $\frac{1}{4}$ ライン〔約0.05cm〕で、直径が箱の内径と同じものをはめました。その円板は、箱の中である種の光学的スクリーンとなっていて、箱の側面から短い木くぎでしっかりととめてあります。

箱の底の中央には、円形の口を設けてあって、その直径は $\frac{3}{4}$ インチ〔約1.9cm〕でコルク栓で閉じてあります。

そのコルク栓には、直径3ライン〔約0.64cm〕

の孔があけてあって、そこに卵形の水銀溜がついている細い温度計をぴったりとさしこんであります。目盛は温度計の管にきざんであります。コルク栓によって温度計は球状部が箱の軸にあたる所で、底と金属製円板との間の空間中央部にくるようにさし込みます。その空間は熱の収積槽としてもうけたもので、古い銀モールからほぐしとったある量の平な銀系をつめてあります。

1つの箱は、金属製円板がしんちゅう製で、2つめのものはスズめっきした鉄、3番目のものはふつうの鉄板製です。

図〔図8〕は、その1つの箱を水平に置いたものの断面図を表わしています。栓は、斜線で示し、温度計の適切な位置を示しています。

また、箱の底と側面とで起る熱の損失を減らすために、それぞれ板の内外の面に紙をはり、ニスをはり、3回塗ってあります。これに加えて、実験中には毛皮の包みでおおいます。

その箱の1つを一定の時間陽光の中に置いて、金属板に垂直に光線が降りそそぐようにしてやると、同じ時間には、同じ量の熱がひき起されます。しかも、この熱は金属系のおかげで、箱の中に一様に分散するために、熱の様々な度合いを正確に観察することができます。もし、3つの箱を同時に陽光下に置くならば実験に使用した異なる3つの金属表面で引き起される熱量の違いを正確に決定する事が可能となります。「黒い色のみがいてない鉄板を使った方が明るい色をつけたものとみがいた〔金属〕板を使ったものとよりも、一定時間で光線はより多く熱を引き起こす」という結果を見い出しても当然の事と思いました。ところが、太陽に熱せられた器具を冷やしている間にぐう然気づいた まったく予期しなかった事柄にびっくりして、注意をそちらの方へ引きとめられてしまいました。

3つの箱を並べてそれぞれが最高温度に

達するまで太陽光の下にさらしておいた後、それぞれの箱をたてかけておいた窓からとり去って、室の隅にある冷たいテーブルの上に、それぞれ底を上にもめて置いておきました。

15分ほどたって、たまたまそのテーブルへ行って、さかさに置いた箱から垂直に突き出た温度計をちらっと見ました。すると驚いたことには、もっとも多く熱を吸収していた箱（鉄板のもの）が、今度は3つの中で最も冷たくなっているのです。

「その箱は他のものに比べて熱を受け入れるのに十分な空間をそなえていなかったわけではないのに早く冷えた」ということを確信していましたから、大変驚いたのです。というのは、実験をはじめの前に銀の系の配分を等しくするように骨を折って、その実験は、「箱」に依存することを十分に知っていたからです。

〔以下3頁半続くが省略〕

<輻射現象の発見のプライオリティをめぐって>

〔5頁省略〕

<当回顧を終えるにあたって一昨年と今年の日記的メモ>

〔3頁略〕

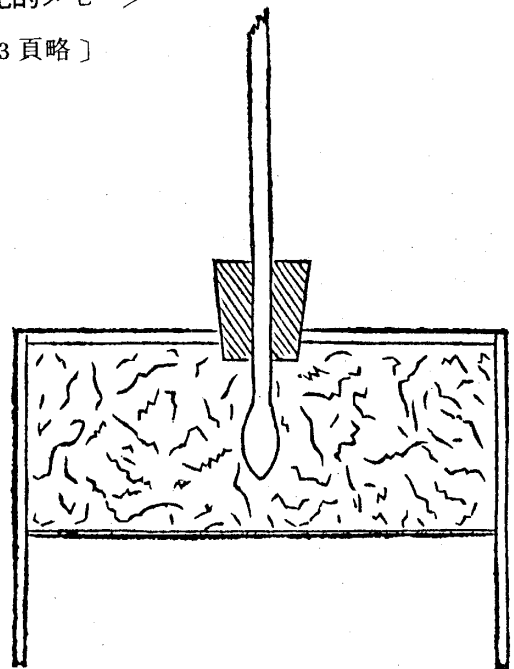


図8

〔以上訳出終り〕