

ラムフォードの砲身旋削実験に関する歴史的考察

中 川 徹

国立科学博物館 工学研究部

A Historical Consideration on the RUMFORD'S Cannon-Boring Experiments

By

Tohru NAKAGAWA

Department of Engineering, National Science Museum, Tokyo

1. 序

18世紀後半から19世紀前半にかけて、熱の本性を物質、すなわち熱素（カロリック）とみなす見解が多少の疑問を残しながらも一般に認められていた。1798年 Benjamin RUMFORD が大砲の砲身旋削実験を発表し、熱素論に対する反証を与え、熱の本性を運動とする熱運動論を唱えたことは熱学史の上よく知られていることである。しかし、RUMFORD の砲身旋削実験は熱素論への決定的反証となり得ず、19世紀半ばに JOULE, MAYER, COLDING, HELMHOLTZ 等によってエネルギー恒存則が確立されるまで、熱素論が熱学の領域で支配的な地位を保持し続けた。RUMFORD の実験が何故熱素論への決定的反証となり得なかったに関して、RUMFORD の実験結果がオリジナルなものでなかったこと¹⁾や実験そのものが定量的でなかったこと²⁾、あるいは、当時熱素論が全盛期であり十分に種々の熱現象を説明し得たこと³⁾などが指摘されている。

だが、このような指摘は結果論的であり、RUMFORD の旋削実験によって直接的・革命的な概念構造の変換がなされるはずであったという、現在の立場からみた回顧的期待があるように思われる。RUMFORD の砲身旋削実験が熱素論への反証となり得なかった理由を明らかにするには、RUMFORD の実験への当時の反応、特にこの実験によってもたらされた結果、すなわち当時支配的であった熱素論にとって変則的なものとなる結果への反応を分析することが必要である。

本稿は、RUMFORD の砲身旋削実験によって提示された二つの変則的事実（以後 T. KUHN に従って変則性 Anomaly とよぶ⁴⁾）に焦点を合わせ、熱素論が支配的であった状況のなかで RUMFORD の実験がどのような反応を受け、また、その反応がどのように変化していったかを明らかにし、RUMFORD の実験が熱素論を崩壊させるにいたらなかった理由を追求するものである。

2. 砲身旋削実験における二つの変則性

RUMFORD が1798年に発表した砲身旋削実験⁵⁾に関してはすでに多くの論文や書物に報告されているのでここではあらためて述べる必要はないと思われる。この実験によって提示された、通常科学 (Normal Science) としての熱素論に対する二つの変則性とは次の実験結果である。

第 I の変則性： 旋削作業中に発生した摩擦熱は砲身金属の熱容量 (Capacity for heat) の変化によっ

て生じたのではない。

第 II の変則性：摩擦によって発生する熱源は無尽 (inexhaustible) であるようにみえる。

摩擦熱に関して当時一般に認められていた熱素論の解釈は IRVINE や CRAWFORD 等によって提唱されていたもので、金属中に潜在化（あるいは結合）していた熱素の一部が摩擦によって外部へ押し出され、発生するという解釈であった。この解釈では、摩擦熱が発生したとき当然金属に含まれていた熱素の量（熱容量や比熱によって測られた）に減少があるはずであるが、RUMFORD は旋削実験で熱容量が知覚できるほど変化していない⁹⁾ことを確かめたのである。したがって、RUMFORD が旋削実験で確めた、熱容量の減少なしで発生する熱は当時の熱素論の解釈とは相容れない変則的な事実となるのである。

また RUMFORD は“どのように絶縁された物体であれ、物体系であれ、限り無く供給し続け得るものはどうあっても実体であり得ない”⁷⁾と述べ、無限に発生し続ける摩擦熱は熱素論では解釈できないことを明確に認識した。RUMFORD はこの第 II の変則的事実を根拠にして、無限に発生し続けるものは“それが運動である以外考えられない”として熱の本性を運動とみなしたのである。

RUMFORD は第 I の変則性で熱素論を否定し、第 II の変則性に基づいて熱運動論を支持したのである。従って、当時の科学者が第 I、第 II の変則性にどのように反応したかということが重要になる。

3. 熱運動論者の反応

RUMFORD が砲身旋削実験を発表した翌年 1799 年に H. DAVY もまた摩擦熱についての実験を発表した。DAVY は 2 片の氷を摩擦させて水に溶解する実験や真空中で二つの金属を摩擦させてロウを溶かす実験を行ったのである⁹⁾。RUMFORD と同様、DAVY もまたこの実験によって摩擦熱が物体の熱容量減少や外部からの熱の流入によって生じるのではないことを証明し、結局“熱素あるいは熱物質は存在しない”¹⁰⁾という結論に達した。この時点では DAVY は RUMFORD の実験について言及しておらず、まだ知らなかったと思われる。DAVY は摩擦の実験によって熱素の存在を否定したが、熱の本性に関して、“物体粒子の運動あるいは振動が必ず摩擦や衝撃によって生じる”，それ故“この運動や振動が熱である”¹⁰⁾と結論づけたのである。DAVY は、熱容量の減少がなくても熱が発生するという事実を根拠にして熱素論を否定した点で RUMFORD と同一線上にあるが、熱運動論主張に関しては RUMFORD とは異なり、経験的な現象を根拠にしていたのである。

1802 年に DAVY は熱運動のメカニズムをもつと詳細に述べている。彼が仮定として述べた熱運動のメカニズムは次のようなものである。空間および物質の細孔中に弾性エーテル流体が拡散して存在し、輻射熱は空間でのエーテル流体の波動であり、物体の熱は物体の細孔中のエーテル流体の波動によって起される。そして物体粒子の振動運動がエーテル流体の波動を惹き起こすことができ、逆にエーテルの波動運動は物質粒子を振動させることができるのである。DAVY はこの熱運動のメカニズムに関して仮定されるべき 6 定理を挙げ、これらの定理は“摩擦によって生じる熱について RUMFORD 伯と PICTET 教授の実験によって明確に是認される”¹¹⁾と述べている。しかし、RUMFORD は砲身旋削実験で得た、無限に発生する熱という第 II の変則性から熱運動論を支持したが、熱運動のメカニズムには何ら言及しておらず、熱運動のメカニズムに関しては“人間知性の範囲を越えた自然の神秘”¹²⁾とみなしていたのである¹³⁾。

1801 年 Thomas YOUNG がやはり熱運動論支持の態度を明らかにした。彼は実験的な根拠からではなく、光と輻射熱との類似性から熱運動論を支持した。そのとき彼は、熱運動論を支持している科学者として“RUMFORD 伯、PICTET 教授、DAVY”¹⁴⁾の 3 人の名を挙げている。ここで YOUNG（そして

DAVY も) がその名を挙げている PICTET 教授とはジュネーブ大学の物理学教授で、温度計に綿を巻きつけその上にキャップをかぶせ、キャップを回転することによって生じた摩擦熱で温度が上昇するのを測った科学者である。

RUMFORD の実験に関する YOUNG の反応は 1807 年に出版された「自然哲学講義」の中に明確に述べられている。YOUNG は RUMFORD の実験および DAVY の実験に詳しく言及し、それらの実験が摩擦熱発生に関する IRVINE 流の、熱容量減少にもとづく解釈の困難さを呈示していることを認めた上で次のように結論づけた。すなわち、“摩擦による熱の発生に関して既に述べてきた状況はその学説(熱素論)全体への弁駁できない反論を与えているように思われる”¹⁵⁾。

YOUNG は RUMFORD の旋削実験の第 I の変則性を根拠にして熱素論に反論したのであるが、熱の本性を運動とみる見解を支持した理由は必しも RUMFORD と同じではない。すなわち、YOUNG は、“もしそれ(熱)が無(nothing)から生じるのであるなら、それは物質でも、非物質でも、半物質でもあり得ない”とまず熱の物質性を否定し、次に、“熱が物質でないなら、それは質(quality)でなければならぬ。そしてこの質であり得るのは運動だけである”¹⁶⁾。と述べ、熱の本性を運動とみなした。YOUNG にとって、熱容量の減少も外部からの熱の流入もなく、まさに無から発生する熱は運動とみなさざるを得なかったのである。このように、RUMFORD は摩擦熱が無尽に発生するという根拠にしたが、YOUNG は無から熱が発生するという根拠にして熱の本性を運動とする見解に達したのである。

熱が無尽に発生するという事実や熱が無から発生するという事実は確かに熱を量的に有限な物質とみなした場合に成り立つことではなく、熱素論への反論となるが、一方、熱を運動とみなした場合にも成り立つことではなかった。運動を運動量(momentum)で測ろうが、活力(vis viva)で測ろうが、運動の総量は一定であるという主張が 17 世紀末から 18 世紀にかけて DESCARTES や LEIBNITZ によって唱えられており、当時は一般に認められていたのである。熱あるいは運動が無尽に発生するという変則的な事実が説明されるためには熱と運動の転換という概念が必要であり、1840 年代にエネルギー恒存則が提出されて初めて解決したのである。

4. 熱素論者の反応

RUMFORD の砲身旋削実験に対し、熱素論者は当然反駁した。1803 年に *philosophical magazine* に掲載された論文で化学者 W. HENRY は RUMFORD と DAVY の実験に反論し、熱素論を擁護した¹⁷⁾。HENRY は、砲身旋削実験で熱が発生した時“鉄の比熱が減少しなかったことを RUMFORD 伯も確認した”¹⁸⁾、と RUMFORD の実験の第 I の変則性について述べた後、発生した熱の原因を周囲からの熱の伝導によるものであるとした。さらに、たとえ周囲からの熱を完全に絶縁できたとしても、物体中の熱素(Caloric)の絶対量を測る手段がないのであるから、摩擦の前後における物体中の熱素の量を比較できず、“熱の物質性に反対する全ゆる論及は結論的にはなり得ない”と反論した。

このように、HENRY は RUMFORD の実験の不完全さを突くことによって反論したが、周囲からの熱の伝導を完全に遮断してないとした最初の反論は、いくら完全に周囲からの熱を遮断してもその完全さを検証することは実際上不可能であるし、また RUMFORD は実験で水が沸とうするほど多量の熱が発生したことを確かめており、周囲から伝導した熱だけで水が沸とうすることは考えられず、非常に無理な反論であった。そのため HENRY は物体中の熱素の絶対量の決定が不可能であるという第二の反論を持ち出したと考えられるが、この反論は、熱素論の体系内において成り立つものであり、熱の物質性、すなわち熱素の存在を否定しようとする RUMFORD の実験には意味をなすものではなかった。

IRVINE の熱素論を信奉していた J. DALTON も 1808 年の「化学哲学の新体系」の中で RUMFORD の実験を批判した。彼は“RUMFORD 伯は摩擦による熱の発生に関して重要な事実を我々に与えた”と一応評価しながらも、RUMFORD が比熱変化（当時は比熱と熱容量との明確な区別はなかった）を見出さなかったことにふれ、“これは明らかに誤った見解である”¹⁹⁾と批判した。DALTON の第 1 の反論は、旋削実験中の激しい力によって金属全体が多かれ少なかれ圧縮されているということであり、第 2 の反論は、70°(F) から 100°(F) 位の温度上昇では余りに小さすぎて熱容量の減少をとらえ得ないということであった²⁰⁾。DALTON の第 2 の反論は DALTON 自身の根拠のない推量からなされたものであるが、第 1 の反論は当時の熱素論の解釈から出て来たものである。

RUMFORD の砲身旋削実験がなされる以前から、摩擦やハンマーの衝撃などで発生する熱を熱素論の体系内で説明することは困難なことであった。1787 年 E. DARWIN (進化論を唱えた C. DARWIN の祖父) は気体の断熱圧縮の際に発生する熱についての解釈をこの問題にまで拡張できる可能性を示唆した²¹⁾。DALTON は DARWIN の示唆に沿って摩擦や衝撃によって生じる熱を解釈した。すなわち、これらの熱は摩擦や衝撃を受けた物体の“体積の凝縮から、そして結果的には熱容量の減少から……まさに空気の圧縮が熱を生じるのと同じ仕方”²²⁾生じるのであった。この解釈に従って DALTON は、RUMFORD の実験で金属が圧縮され、熱が発生したのであると反論したのである。このように、DALTON は RUMFORD の実験における第 I の変則性を熱素論という通常科学の枠内で解釈したのであり、DALTON にとって RUMFORD の実験における変則性はもはや変則性でなかったのである。

1812 年 DAVY はこのような DALTON の解釈を“非常に粗雑な機械論的概念である”と批判した。DAVY は RUMFORD の実験を根拠にして、適度な摩擦によって金属が長い時間熱さを保持するのであるから、摩擦による体積減少で“もし熱が押し出されるなら、その量は無尽でなければならない”²³⁾と論じた。DAVY はこの議論で RUMFORD の実験で提示された第 II の変則性を持ち出している。DALTON が熱素論の体系内で解釈した問題を DAVY は RUMFORD の実験の第 II の変則性にもとづいて反論したのである。

摩擦熱は尽きること無く発生するという RUMFORD の実験の第 II の変則性に対して、1820 年熱素論者の J. B. EMMETT は真正面から攻撃した。EMMETT は、RUMFORD の砲身旋削実験に関して“最大の誤りは、このように発生する熱源が無尽だという前提にあるように思われる”²⁴⁾と述べた後、RUMFORD の実験が不十分な段階で終わったため熱の発生が止むところにまで到達し得なかったのであると反論した。EMMETT は RUMFORD の実験操作そのものを批判することによって第 II の変則性を否定しようとしたのである。このことは RUMFORD の実験の第 II の変則性を熱素論の体系内で解決できなかったことを示している。

RUMFORD の実験の第 II の変則性を解決するためには、旋削作業で消費された動力 (RUMFORD の実験では馬の力) に注目する必要がある。フランスの Sadi CARNOT は、1824~25 年頃に書かれたと言われる覚書の中で、“熱および動力に関して行うべき実験、RUMFORD の旋削実験を、種々の金属、木材、石などでくりかえす。消費された動力 (Puissance motrice) と生じた熱量とを評価し比較する”²⁵⁾と書き残している。しかし、この覚書は Sadi CARNOT の弟 Hippolyte が 1878 年一部をパリの科学アカデミーに寄贈するまで日の目をみることはなかった。Sadi CARNOT は 1824 年に出版した「火の動力に関する考察」の中では熱素論の立場をとっていたが、覚書を書いたときには熱素論を捨てている。S. CARNOT が何故熱素論を捨てたかは現在のところはっきりしていないが、ともかく、RUMFORD の実験で消費された動力に注意を向けたことは注目に値することである。

一方イギリスは、J. W. HERSCHEL が 1832 年に、RUMFORD の実験は“摩擦によって無限の熱供給が

同じ物質からなされるという異常な事実 (extraordinary fact) を確認した²⁰⁾と述べている。J. W. HERSCHEL は熱を“物質の不可秤量体について”と題する章で扱っており、熱を一種の物質とみていた。従って彼は熱素論者であるが、RUMFORD の実験の第 II の変則性を“異常な事実”と認めたことは、熱素論者自身が RUMFORD の実験の結果を、通常科学としての熱素論では解釈できない変則的事実として許容したことであり、重要な進展であった。

5. 二つの変則性の本質

RUMFORD の砲身旋削実験によって提示された二つの変則性の正当な意義が認められるようになるのは、1840年代に熱学が新しい段階に入ってからである。1843年8月ヨークで開かれた英国科学協会の会合で、J. P. JOULE は「電磁気の熱的効果および熱の機械的当価値について」²⁷⁾と題する論文を発表し、熱運動論を支持するとともに、誘導電流による発熱の研究から、機械の仕事と熱との等量関係を明らかにした。JOULE はこの論文に後記を加え、RUMFORD が砲身旋削実験で発生した熱の原因を金属の熱容量の変化によるものでないとした点で“RUMFORD 伯は正しかった”と記している。JOULE は RUMFORD の実験の第 I の変則性を正当なものと認めたのである。

次いで、1847年 J. HERAPATH が彼の著書「数理物理学」²⁹⁾の中で、RUMFORD の実験の第 II の変則性を認めた。熱運動論を支持した HERAPATH は熱素論が包含している困難さにふれ、その困難さとは、“RUMFORD 伯が証明したように、どうして有限の物質量から無限の熱量が引き出され得るかを説明できないこと”であり、“なぜ熱が摩擦によって発生するのか説明困難なこと”³⁰⁾であった。HERAPATH は RUMFORD の砲身旋削実験で提示された変則性が熱素論体系の中では説明不可能であることを正しく認識したのである。

このように、1840年代になって RUMFORD の砲身旋削実験の意義が正しく認識されるようになったのであるが、そのためには熱と機械の仕事との当量関係、すなわちエネルギー転換の概念が必要であった。3章で述べたように、すでに1800年頃に DAVY や YOUNG によって RUMFORD の実験は認められていた。しかし、DAVY にしろ YOUNG にしろ、RUMFORD の実験によって熱運動論を支持するようになったのではなく、DAVY は自分で行った氷片摩擦や金属摩擦の実験にもとづいて熱運動論を主張したのであり、また YOUNG は自分が唱えていた光の波動論を補強するため、光と輻射熱との類似性にもとづいて熱の運動論をも支持したのである。DAVY や YOUNG にとって RUMFORD の実験は彼ら自身がすでに主張していた見解を強めるための傍証でしかなかったのである。

一方、4章で述べたように、熱素論者は RUMFORD の実験に対して様々な反論をした。それらの反論は、RUMFORD の実験の結果を是認した上で熱素論の体系内で解決するという形でなされたのではなく、RUMFORD の実験そのもの、すなわち、実験の不完全さや不十分さを攻撃するという形でなされたものである。単に実験の不完全さや不十分さだけが問題であるなら、不完全な点を修正して再実験を行えば、それらの反論に対して反駁できるはずである。だが、RUMFORD の実験で得られた結果、すなわち二つの変則性はそのような反駁のできないような性質のものであった。

RUMFORD の砲身旋削実験で提示された第 I の変則性は、摩擦熱が熱容量の減少によって生じるのではないという否定的結果を意味したものである。否定的結果は定量的に扱うことができず、しかも実験上の条件が完全に満たされているという保証があってはじめて正当性を主張できるものである。(肯定的結果の場合、数量的に扱うことができ、その結果自身が実験上の条件が完全に満たされているかどうかの目安となり得る。) 周囲の熱的絶縁が不完全であるとか、70°F から 100°F 位の温度上昇では熱容量の減少は見出され得ないという HENRY や DALTON の反論は、RUMFORD の実験において実験的

条件が完全に満されているという保証がないところを突いたものであり、それらの反論に対して、否定的結果を包含している RUMFORD の実験は何ら対応できないものであった。

また RUMFORD の実験の第 II の変則性は、摩擦熱は尽きることなく生じるというものである。この第 II の変則性に関して D. S. L. CARDWELL が指摘したように³¹⁾、RUMFORD が二時間半の実験で永久時間にまで外挿したのはまさに大胆なことであった。何故なら、無尽に生じることを実験的に立証するためには無限時間を要するのであり、実際上不可能なことだからである。熱素論者の EMMETT が、RUMFORD は熱の発生が止むまで実験を続けなかったと批判したのに対し、RUMFORD がそれに反駁するためには実験を永久に続けるしかなかったのである。(もちろんそれは不可能なことである)。第 II の変則性は、旋削機を回転する動力、すなわち、機械の仕事が熱エネルギーに転換したという解釈が成立してはじめて正当なものと認められるものであり、第 II の変則性それ自身は立証も検証もできないものである。従って、立(検)証不可能なところを突いてきた EMMETT の批判に RUMFORD の実験は何ら対応できなかったのである。

6. 結 論

以上に述べてきたように、RUMFORD の砲身旋削実験は熱運動論者と熱素論者の双方から論じられた。RUMFORD の実験の対象であった摩擦熱は、ハンマーで金属を叩く時や車輪の軸など日常生活の中でよくみかける現象であったし、また RUMFORD と同じ頃 DAVY や PICTET などによっても実験されており、対象としては新しいものではなかった。しかし、当時熱素論者が反論や批判したのは、RUMFORD の実験の独創性などに関してではなく、実験の実際的な操作や仕方などに関してであった。だが、RUMFORD の実験で得られた結果は定量化できない否定的結果と立証・検証不可能な結果であったため、熱素論者の反論や批判に何ら対応できなかったのである。RUMFORD の実験におけるように否定的結果や立証・検証不可能な結果が提示された場合、それを認めるか認めないかだけが問題となり、その選択は各科学者の任意的な都合に委ねられることになる。HENRY や DALTON、EMMETT のような熱素論者は熱素論の体系に入らない変則的な結果を当然認めなかったし、DAVY や YOUNG のような熱運動論者は自分の主張の傍証としてそれを認めたのである。

RUMFORD の砲身旋削実験の正当性が認められるためには、まず(J. W. HERSCHEL のように)熱素論者がその実験結果の変則性を認め、ついでその変則性が熱と機械の仕事との転換という概念によって説明されることが必要であり、RUMFORD の砲身旋削実験だけでは熱素論者の反論に対応することも、熱素論を覆すことも不可能であったのである。

Summary

The writer argues why RUMFORD's cannon-boring experiments could not disprove the caloric theory, concentrating his attention on the two anomalous results (he calls 'Anomaly') which RUMFORD's cannon-boring experiments afforded. The two anomalies are as follows. Anomaly I; The heat by friction is not in consequence of a change of the capacity for heat, and Anomaly II; The source of heat generated by friction appears to be inexhaustible.

He examined the reactions which vibrationalists such as H. DAVY and T. YOUNG, and calorists such as W. HENRY, J. DALTON, and J. B. EMMETT gave for or against RUMFORD' experiments, and he came to the following conclusions: Anomaly I re-

presents the negative result which can not be quantitative and would be meaningless unless all of the experimental conditions are perfectly satisfied. Anomaly II represents practically unprovable or unverifiable result. Therefore the results of RUMFORD's experiments were easily refuted from calorists, though vibrationalists admitted them in corroboration of their own assertions.

In order that the rightness of RUMFORD's experiments might be admitted, first, it was necessary for calorists to recognise the results of RUMFORD's experiments as anomalous (as J. W. HERSCHEL declared them to be extraordinary), then the anomalous results had to be explained by the new concept such as the conversion of mechanical work into heat.

参考文献および注

- 1) Fox, R., 1971. The caloric theory of gases from Lavoisier to Regnault. xiv+378 p. Oxford, Clarendon Press. p. 102.
- 2) 広重 徹, 1973. カルノー・熱機関の研究. ii+138 p, 東京, みすず書房. p. 3.
- 3) 渡辺正雄, 1972. 近代科学文化史, 181 p. 東京, 南窓社, p. 120, あるいは Fox, R. op. cit. (1) p. 4.
- 4) KUHN, T. S., 1962. The structure of scientific revolutions. xii+210 p. Chicago, Chicago uni. press.
- 5) RUMFORD, B., 1798. An inquiry concerning the source of the heat which is excited by friction. *Phil. Trans.*, **88**: 80-102.
- 6) RUMFORD, B., *ibid.* p. 87.
- 7) RUMFORD, B., *ibid.* p. 99.
- 8) DAVY, H., 1799. An essay on heat, light, and the combination of light. Collected works of Sir Humphry Davy (1840 London, Smith, Elder and Co.) Vol. II. pp. 5-86.
- 9) DAVY, H., *ibid.* pp. 13-14.
- 10) DAVY, H., *ibid.* p. 14.
- 11) DAVY, H., *ibid.* p. 391.
- 12) RUMFORD, B., op. cit. (5) pp. 99-100.
- 13) GOLDFARD は, 1802 年の DAVY の熱理論は RUMFORD の熱理論を代弁したものであるが, 1804 年に RUMFORD が発表した熱理論が DAVY の影響を受けたものであると解する方が自然である. cf; GOLDFARD, S. J. RUMFORD's theory of heat: A reassessment. *Brit. J. Hist. Sci.*, **10**: (1977) 25-36.
- 14) YOUNG, T., 1802. On the theory of light and colours. *Phil. Trans.*, **92**: 32.
- 15) YOUNG, T., 1807. A course of lectures on natural philosophy and the mechanical arts. xxxiv+796 p. London, Joseph Johnson. Vol. I-3. pp. 653-654.
- 16) YOUNG, T., *ibid.* p. 654.
- 17) HENRY, W., 1803. A review of some experiments which have been supposed to disprove the materiality of heat. *Phil. Mag.*, xv: 45-54.
- 18) HENRY, W., *ibid.* p. 45.
- 19) DALTON, J., 1808. A new system of chemical philosophy. vi+357 p. London, Henderson & Spalding. p. 98.
- 20) DALTON, J., *ibid.* p. 99.
- 21) DARWIN, E., 1787. Frigorific experiments on the mechanical expansion of air. *Phil. Trans.*, **77**: 43-52.
- 22) DALTON, J., op. cit. (19) pp. 97-98.
- 23) DAVY, H., op. cit. (8) Vol. IV. p. 66.

- 24) EMMETT, J. B., 1820. Researches into mathematical principles of chemical Philosophy. *Ann. Sci.*, **16**: 137–145.
- 25) 広重 徹, op. cit. (2) pp. 100–101.
- 26) HERSCHEL, J. W., 1832. Preliminary discourse on the study of natural philosophy (1966, New York, Johnson Reprint Co. lvi+vii+372 p.) p. 313.
- 27) JOULE, J. P., 1843. On the calorific effects of magneto-electricity, and on the mechanical value of heat. *Phil. Mag.*, **xxiii**: 263–435.
- 28) JOULE, J. P., *ibid.* p. 433.
- 29) HERAPATH, J., 1847. Mathematical physics: or the mathematical principles of philosophy. (1972, xl+372 p, New York, Johnson Reprint Co.)
- 30) HERAPATH, J., *ibid.* p. 215.
- 31) CARDWELL, D. S. L., 1971. From Watt to Clausius. xv+336 p. London, Heineman. p. 101.