

# エネルギーとその保存則

## 生活工学のための熱力学序論 II

### Energy and Its Conservative Law

#### Introduction to Thermodynamics for Human Environmental Engineering. II

妹尾学

Manabu SENO

(東京大学名誉教授)

#### 1. はじめに

19世紀の中頃、マイヤー、ジュール、ヘルムホルツらによって熱と仕事の等価性が論じられ、エネルギー保存の法則として提案された。これは後に熱力学第一法則と呼ばれるようになる。現在、エネルギー保存の法則は誰もが知っている非常にポピュラーな法則であり、いつも耳にしているので、ほとんどの人はこれを不思議ともなにも思っていない。しかし、この法則は非常に広く、しかも非常に深い内容をもっている。ファインマンは次のように言っている<sup>1)</sup>。

「数ある保存則のなかでもエネルギーの保存則は最も抽象的で、それだけに一般性もあり役に立つものです。そしてこれは最も難解です。」

難解である理由の一つとして、私達が知っている保存量の多くは単位量の整数倍になっていて、単位量を持つ素子を考えれば、その個数が保存されると言い直すことができる。たとえば質量の保存は質量の最小単位をもつ原子とかそれを構成する素粒子の個数の保存として、また電荷の保存は電荷の最小単位を担う電子とか陽子の個数の保存として理解することができる。しかしエネルギーにはそのような実体はない。量子論において主役を演じるエネルギー素子は、プランクによって熱放射場のエネルギーを担うものとして提案された当時から、常に生成消滅するものであり、その個数保存は決して考えられない。

エネルギーは実にさまざまな形をとる。運動

エネルギー、熱エネルギー、電気エネルギー、光エネルギー、化学エネルギー、核エネルギーなど、私達がふだん口にするものだけでも多くの種類を挙げることができる。これらのことを考えるとき、さまざまな形をとるエネルギーを一つの概念として捉え、それが保存されるとした先人たちの慧眼には、誠に目をみはるものがある。

エネルギーの概念は私達の生活に密着するものであり、私達の生活活動をエネルギーの生産・消費の立場から解析することができる。このように基本的な意義をもつエネルギーの概念がどのように芽生え、その保存が論じられるようになったのか、さらにその概念がどのように発展成長し、現在の自然科学の基礎の一つとして役立つようになったのか、それらのことを論じるのが本稿の目的である。

#### 2. 力学的自然観の支配

まずエネルギー保存則の生い立ちから調べていこう。アメリカの科学史家クーンは、同時発見の例としてエネルギー保存則を取り上げ、

「1842年から47年にかけてエネルギー保存の仮説が、互いに遠く隔った4人のヨーロッパの化学者、J. R. Mayer, J. P. Joule, L. A. Colding, H. von Helmholtzによって発見された」と述べている<sup>2)</sup>。

これら4人の報告は、一般的な定式化と具体的な定量化を結びつけていた点で際だっていたが、同じ頃、S. Carnot (1832以前)、M. Seguin (1839)、

K. Holtzmann (1845), G. A. Hirn (1854) はいずれも独立に、熱と仕事は定量的に相互変換されるという熱力学第一法則の核心に達していた。さらにエネルギー保存という一般的な記述はこの時期の文献の多くにみられ、とくに C. F. Mohr, W. R. Grove, M. Faraday, J. Liebig は、自然の現象はただ一つの力（エネルギー）の現れであり、その力は熱的、力学的、電気的その他多くの形をとるが、どの変換を通してその全量は保存されると述べている。このような事情から明らかのように、「19 世紀の前半、ヨーロッパの知的状況は、感受性の強い科学者を重要な新しい自然観へ導く気運に満たされていた」のである。それぞれの発見の事情に立ち入る前に、まず当時の状況を概観しておこう。前稿 I で述べたように、近代の自然科学はニュートンによりその礎が築かれ、この力学を押し進める形で展開した。ニュートンの創始した力学はオイラーを経て、フランス啓蒙主義の旗手ダランベール、ラグランジュに受け継がれ、ラプラスに到って完成される<sup>3)</sup>。ダランベールは、「力学は自然学の基礎であり、あらゆる自然現象は運動の法則によって規制される」と考え、「力学的世界像」の旗がふられた。ニュートンの“プリンキピア”の丁度 100 年後に記念碑的な二つの著作、ラグランジュの“解析力学”とラプラスの“天体力学”が刊行された。

ラグランジュはその著作で、完璧に解析的で汎用性のある力学の洗練された形式をつくり上げ、力学から神秘的・形而上学的意味づけを一切そぎ落として、合理的な体系として力学をつくり上げたのである。その中でラグランジュは、運動エネルギー  $T$  と位置エネルギー（ポテンシャル） $V$  を定義し、 $L = T - V$  とおいてラグランジュ方程式

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} = 0$$

( $q$  は一般化座標) を導き、これから保存力に対して、

$$\frac{d}{dt}(T + V) = 0$$

として、力学的エネルギーの保存則

$$T + V = E \text{ (一定)}$$

が成立することを示した。力学的エネルギーの保存則は時間  $t$  を含まない。これは時間の様性の結果であるということもできよう。

力学的世界像、あるいはむしろ力学的神話と呼ぶべきものかもしれないが、これは力学法則という単一の原理が自然を律する原理であることを論理的に宣言するものであり、これは正しく当時人類が到達した知の究極的な姿ともいえるものであった。さらにこの概念を一步押し進め、なかば不動のものとしたのがラプラスである。“確率の哲学的試論 (1814)” 中の次の一文<sup>4)</sup>「いくつかの彗星に関して天文学が示すような規則性がどのような現象についても成り立っていることは、まったく疑いがない。空気や水蒸気のただ一つの分子が描く曲線も、惑星の軌道と同様正確に規制されている。我々が無知だから二つの間には違いがあると思うに過ぎないのである。」は単一の物質観をもよく表している。天体であれ分子であれ同一の運動法則に完全に支配されているという信念、この自然観は後に、デュ・ポア・レーモンによって“ラプラスの魔”と呼ばれ<sup>5)</sup>、当時の人々に人類の知の究極の成果として強く印象づけられた。

エネルギー保存の法則はこのような状況の下で提出され、力学的自然観と妥協する形で受け入れられ、やがて変質していくのである。

### 3. エネルギー保存則の誕生

ここでエネルギー保存則の発見者として代表的な 3 人の活躍を調べることにしよう。マイヤー (J. R. Mayer, 1814-1878) はチュービンゲン大

学で医学を修め、1840 年船医としてジャワ行き  
のオランダ船に乗った。ジャワに到着して、新  
しく来たヨーロッパ人の採血をしたとき、静脈  
血が例外なく驚くほど赤く鮮明であることを見  
出し、注意をひかれた。ラヴォアジエによれば、  
体熱は血液中での食物の燃焼（酸化）により供  
給され、肺で酸素を供給された動脈血に比べて  
静脈血が黒ずんでいるのは酸化の進行（酸素の  
減少）によると考えられ、このことから熱帯地  
方では外気と人体との温度差が小さいため、体  
温を保つための仕事に費される酸素消費が少な  
くてすむと考えた。

このことに端を発する彼の主張は、1842 年に  
発表された論文“無生物界の力についての考察”  
で、次のように述べられる。「無機物的・有機的世  
界双方の現象を、原因と結果の観点から説明す  
ることが自然科学の課題である。すべての現象  
は物質・物体およびそれらの相互的關係が変化  
するという事実に基づき、これらの変化には原  
因があると考えられ、これを力と呼ぼう。」ここ  
で“力” (Kraft) とは現在のエネルギーに相当す  
る、そして、先に述べたような事実から次のよ  
うに結論する。「運動（仕事）と熱は単一の“力”  
に帰着され、定まった規則に従って互いに移り  
変る。運動はそれと逆向きの運動によって消去  
されることによって熱に転化し、生じた熱は消  
失した運動に比例している。逆に、熱は物体を  
膨張させることによって運動（仕事）に転化さ  
れる。」

この最後に述べたことから熱と仕事の等量関  
係が導かれた。気体を定積で温度を  $d\theta$  だけ上げ  
るための熱は  $C_v d\theta$  ( $C_v$  は定積比熱) であるが、  
定圧で温度を  $d\theta$  だけ上げるためには、熱  $C_p d\theta$  ( $C_p$   
は定圧比熱) のほかに仕事  $PdV = R d\theta$  をしなければ  
ならない。熱と仕事とが等価であれば、単位の  
熱量が仕事量  $J$  に等しいとおくと、

$$JC_v d\theta = JC_p d\theta - R d\theta$$

となる。 $J$  は、熱の仕事当量と呼ばれる量で、当  
時知られていたデータを用いて、

$$\begin{aligned} J &= \frac{R}{C_p - C_v} \\ &= 365 \text{ kg 重} \cdot \text{m} \\ &= 3.58 \text{ J/cal} \end{aligned}$$

と見積もられた（正しい値は  $J=4.1840 \text{ J/cal}$ ）。

マイヤーの議論はやや思弁的な色合いをもつ  
が、彼の“力”は質的には変化するが量的には  
保存される非物質的なものであり、変換過程を  
通じて保存されるものとして“力”の種々の形  
態が特定され拡大されていく点で、理念的とい  
うよりも現実的な概念である。前節で述べたよ  
うに、当時力学的エネルギーの保存が広く認識  
されるようになっていた。マイヤーが想定した  
“力”は、狭い意味ではこの力学的エネルギー  
に相当するが、実際にはより広い意味を持ち、  
力学的エネルギーはその一部になる。マイヤー  
はこのことを力学的エネルギーの保存則が成り  
立たない局面において把え、“力”のもう一つの  
形態として熱に注目し、熱を含む“力”の保存  
則を主張したのである。

熱と仕事の等価性の問題をより直接的な形で  
解明したのは、スコットランドの醸造家でアマ  
チュア科学者とでも言うべきジュール (J.P. Joule,  
1818-1889) であり、1840-50 年に行われた実験に  
よって熱と仕事の等価性は単純簡明に示され、  
熱量保存説になお固執する当時の多くの科学者  
の目を開かせることになった。

現在エネルギーとしてきわめて重要な地位を  
占める電気は古くから摩擦電気として知られて  
いたが、実用的な意味をもつようになったのは、  
ヴォルタの化学電池の発明 (1799 年) 以降のこ  
とである。ヴォルタの電堆を使って種々な研究  
が行われ、なかでもイギリスの王立研究所のデ  
ィヴィ、ファラデーの研究が突出していた。1831  
年ファラデーは、電磁誘導の現象を発見し、電

磁誘導による電気がそれまでに知られていた電気—摩擦電気，ヴォルタ電気，熱電気などと全く同じであることを示し，作用因としての電気の普遍性を印象づけた．ジュールが研究活動に入ったのは電気の研究が大きな広がりを見せた頃である．彼が得た第一の成果は，現在ジュールの法則として知られている電流の発熱作用に関する研究である．そして電池による電流と電磁誘導による電流の発熱の比較を行った．彼の研究手法はあくまでも実験主導型である．可能な限り精密な実験で，誘導電流は電池電流と全く同等な熱を生じること，そして誘導電流を生じるコイルの温度は変化せず，熱はコイルから運ばれたわけではないことを示した．この結果は熱物質論を否定し，熱運動論に組するものである．そしていよいよ熱の仕事当量を直接決定するための実験に取り組む．最も有名な実験は，流体中で羽根車を回転させることにより発生する熱量を測定するもので，繰り返し続けられた測定の最終的な結果は 1850 年の論文“熱の力学的当量について”において，

$$J = 4.15 \text{ J/cal}$$

と報告された．この値は後の大規模な追試にも耐え，長い間標準値として使われた．

ジュールは決して単なる実験家ではなく，自分の仕事の意義を十分に認識していた．羽根車の実験より前に，空気の圧縮・膨張による温度変化の測定を行い，圧縮によって温度上昇が，逆に膨張によって温度低下が起こることを認め，これらの結果から仕事→熱の変換過程とその逆の熱→仕事の変換過程で，それぞれの変換率が等価であることを示し，熱と仕事の等価性を論理的にも正しく把握していた．

ここでカルノーの立場について簡単にふれておこう．マイヤーやジュールが活動に入った頃，熱素説（熱物質論）が支配的であったが，その一方で熱機関（蒸気機関）の開発に後押しされ

る形で，仕事をする能力として熱の本性に注意が向けられ，やがて熱素説そして熱量保存則は葬り去られる気運にもあった．熱機関の解析に天才的なひらめきを示したカルノー（S. Carnot, 1796-1832）は，1824 年に画期的な研究“火の動力およびこの動力を発生させるのに適した機関についての考察”を出版し，この中でエントロピーの概念の基礎となるカルノーの原理を発表した．ここで熱の動力について論じられているのであるが，熱量の保存が前提とされている．しかしやがてこの矛盾に気が付き，1830 年頃には，

「熱は動力の消費によって生じ，また熱は動力を創り出すことができる」と考え，熱量保存則を捨て，熱と仕事の間の互換性を論じ，“動力”の保存の考えに達していたことが，遺品のノート“数学・物理学その他についての覚え書”から明らかにされている．確かに熱と仕事の等価性の発見という点では，カルノーは，最も早い発見者の一人ではあったが，このノートは，1878 年になって始めて公表されたので，熱力学第一法則の発見に影響を与えることはなかった．

この稿の最後にヘルムホルツ（H. L. F. von Helmholtz, 1821-1894）の貢献について述べておこう．彼はマイヤーと同じ問題意識から出発した．当時ドイツの自然科学は自然哲学の絆を脱しつつあり，彼は若い頃からこの新しい自然科学の知識を学ぶ機会に恵まれていた．そして古くからの問題であった永久機関不能に関する考察から広い意味での力（エネルギー）の保存の考えを次第に抱くようになった．そして彼の師ミュラーが抱く生命力という概念は古い自然哲学の域を出ていないと感じ，むしろラヴォアジェやリービッヒの問題意識，生体の体温や仕事をする能力が物質代謝からどのように生じるのかという問題に関心を持つようになった．

ヘルムホルツは本来力学主義者であり，1847 年に発表した“力の保存について”のはじめで

次のように述べている。「物質的自然科学の課題は、すべての自然現象をその強さが距離のみによる力をもつ物体の運動に帰着させることにある。この課題が解決可能であれば、自然を完全に理解することができるようになる。」そしてさらに考察を進め、自然現象がすべて究極において力学的過程に帰着されるのであれば、力学的永久機関不能の原理はより一般的に諸力の関与する永久機関不能の原理に拡大されるであろうと論じた。そしてこの原理が成り立つのであれば、それから諸力（エネルギー）の保存の原理に達する。さらにこのエネルギー原理を力学（仕事）や熱ばかりでなく電磁気学的過程にまで適用し、その有効性を立証した。

ヘルムホルツの力学的自然観の立場は当時受け入れやすいものであり、このエネルギー原理は着実に浸透していった。そしてまたこの原理は熱物質論と訣別し熱運動論として展開すべき必然性をもっていた。このようにして後に熱力学の成立とともにその第一法則となるエネルギー保存則が誕生したのであるが、これはその後数奇とでも言うべき展開を見せることになる。

#### 4. 熱運動論の確立

力学的エネルギーの保存則を拡大するものとしてエネルギー保存則が多くの人々の承認を得るようになって、熱の力学（運動論）的解釈が進められたのは当然の成行であった。これは当時なお仮説的段階にあったとは言え、ドルトンの化学的原子論によって確かなイメージをもつ原子モデルに基づくものである。

I でも述べたように、熱を原子の運動に帰する考えは、17世紀のフック、18世紀前半のベルヌーイなどによる長い歴史を持つが、長い間熱物質論の陰に隠れていた。ニュートンの権威をかりた分子間斥力をもつ静的気体像が学界を支配してきたからである。熱素説全盛の1820年頃、

イギリスのヘラパス（J. Herapath）は熱素説の立場では熱の諸効果を説明することは難しいことを悟り、熱は熱素という弾性流体の効果ではないと確信するようになった。そして静的気体像ではなくむしろ、気体分子は互いに自由に運動すると考える方が、はるかに容易に気体の諸性質を説明できることに気付いた。しかし彼の報告は思弁的過ぎるとしてほとんど顧慮されなかった。

埋もれていたヘラパスの論文を見出し、これを正当に評価したのはジュールである。彼は1844年気体の真空中への膨張に関する有名な実験を行っているが、このとき既に、「熱は分子の活力（運動エネルギーに相当する）および分子間の引力・斥力（相互作用エネルギー）よりなり、希薄な弾性流体（気体）では熱はもっぱら分子の活力よりなり、後者はほとんど無視できる」と述べている。小さな相互作用エネルギーの寄与を評価するのが、1852年に行われたジュール・トムソンの実験であり、気体を断熱的に高圧部から低圧部に流す過程に伴われる温度変化を測定する実験で、水素以外の気体では僅かではあるが、断熱膨張による温度降下が認められた。このことは体積膨張に僅かではあるが仕事を必要とすることを示し、これにより気体分子間に弱い引力が働いていることが明確に示された。この発見は明らかにニュートン以来の静的気体像に反するものであり、これを最終的に葬ることになった。

気体分子運動論は、1857年クレーニッヒ（A. K. Krönig）とクラウジウス（R. J. E. Clausius）によって独立に洗練された理論として提出された。クレーニッヒは、「気体分子は器壁に衝突するまで直線運動し、壁に弾性衝突する。気体分子の運動は全くランダムであり、その集合体としての挙動は確率論的に考察される」と論じている。このようにして、気体分子の運動エネルギーの

総和が気体の（内部）エネルギーの実体であり、温度は気体分子の運動の激しさを表す尺度であることが明示された。

これらの結果は、力学的エネルギー保存則を拡張する形で導かれたエネルギー保存則に由来する大きな成果の一つであり、熱の本性は物質の構成粒子の運動によることを示したものである。この考え方は現在でも広く行われているのであるが、当時より実証的な立場を固守しようとする人にとっては、思弁的な段階にある仮説に過ぎなかった。

## 5. 力学的自然観とエネルギー的自然観の交錯

さて、力学的自然観が支配するなかで、エネルギー保存則が生まれたのであるが、1930 年プランクは次のように述べている<sup>6)</sup>。「18 世紀は力学的自然観の最盛期であった。これは最初の大きな衝撃をエネルギー保存の法則の発見によって受けることとなり、発見当初にはしばしば力学的エネルギー保存則とエネルギー保存則は同一視されることさえあった。」これは興味深い指摘であり、もともとエネルギー保存則は力学的エネルギー保存則に基づいて導かれたのであるが、この発見は一方においてエネルギー保存則がその破れを知らないという意味で広く包括的な自然法則としての地位を占めていくのに対し、他方力学的エネルギー保存則は単にエネルギー保存則の一事例に過ぎず、ただ限られた条件でのみしか成り立たない矮小な地位へと落ちていく分岐点となったことを意味している。

ここでもう一度ヘルムホルツにもどると、彼の著書“力の保存について”の序文で、「エネルギー保存則の導出には二つの出発点のどちらかをとることができる。一つは、自然界の物体をどのように組み合わせても、それから無制限に仕事を取り出すことは不可能であるという命題

であり、もう一つは、自然界におけるすべての作用はその強さが空間的配置のみによる引力・斥力に帰着されるという命題である。」後者は、力学的エネルギー保存則であり、これは既に保存力に対する力学的定理として証明されている。これに対して前者は現在第一種永久機関不能の原理と呼ばれている全く経験的な原理である。このようにヘルムホルツはこの分岐点を明確に意識していた。

そしてヘルムホルツは強い関心の的であった生命現象について、次のように論じる。「我々は生命体を同じ視点から考察し、その視点が生命体に対しどのように保たれるか吟味しなければならない。生命体を蒸気機関と比較するならば、十分な対比を行うことができる。」そして彼は、エネルギー保存則に則って長く信じられてきた生氣論を鋭く攻撃し、力学的自然観は生命体をも包含すると考えるようになった。その根拠はエネルギー保存則の力学的解釈にあったのであり、ヘルムホルツにあっては力学的自然観とエネルギー的自然観の交錯は著しい。

一方、エネルギー保存則の発見者の一人マイヤーは力学的自然観に把われなかった。彼にとって熱と仕事の互換性は、原因としての力（エネルギー）が質的に変化しても、量的には不変に保たれることを主張するものであり、いわば現象論的な立場に立って、運動、重力、熱、電気など種々な質的に異なる力（エネルギー）の諸形式を認めている。

この間の事情をドイツの物理化学者オストワルド（W. Ostwald）は著書“エネルギー”（1912）の中で、次のように論じている<sup>7)</sup>。「二つの可能性が存在した。一つはヘルムホルツ、ジュールおよびそれに続く人々により選択されたもので、古い力学的自然観を非力学的分野にまで拡張しようとするものであり、そこでは普遍的なエネルギー則は、力学的性質の帰結として現れると

みなされる。これに対する第二の可能性はマイヤーによって見出されたものであり、原理的に新しい道を提示する。すなわち、力学的現象はエネルギー保存則に従うエネルギー変換の特別な場合に過ぎないとみなすことである。」

勿論、現在エネルギー保存則は後者の意義をもち、その内容はたとえば次のように述べられる。エネルギーは仕事をしうる潜在能力で、閉じた系では常に保存されるという意味で最も基本的な物理量の一つである。エネルギーは種々の形態をとり、よく知られたものとして力学的エネルギー、内部エネルギー（熱エネルギー）、化学エネルギー、電気・磁気エネルギー、光エネルギーなどがあり、これらの形態の間で変換が起きるが、エネルギーの総和は時間の経過に関係なく一定に保たれる。

## 6. エネルギー一元論

ここでエネルギー概念の歴史で有名な一つの挿話にふれておこう。先述したオストワルドはファント・ホフやアレニウスとともに物理化学の創始者として知られ、1909年化学平衡と反応速度に関する研究でノーベル化学賞を受け、主著“Lehrbuch der allgemeinen Chemie” (1885-87) は長い間標準的な教科書として使われ、またわが国の草創期の物理化学を指導した池田菊苗、大幸勇吉らの師でもあった。オストワルドは研究の進展とともにエネルギー一元論 energetics の立場を強めていった。エネルギーの担い手としての物質・物体を認めず、「物体はつまるところエネルギーの凝集したもの、エネルギーの複合体の表象であり、その背後にある無エネルギー的、したがって必然的に無性質な担体など考える必要はない」と主張した。そしてただ無生物界における現象ばかりでなく、生命をも論じ、さらに精神的現象に及び、「力学的世界観においては機械的としての物理的現象と精神的現象と

の間に架橋し得ない裂け目が存在したが、エネルギー論的世界観においては、最も単純な機械的エネルギー活動と最も複雑な心理学的エネルギー活動との間にも連続的な関連がある」と論じ、人が集ってつくる社会も一つの有機体であり、社会学的エネルギーについても同じ規範に則ってその本質を解明し尽くすことができるはずだと断じた。

オストワルドのこの姿勢は悲劇的様相を呈している。理論への仮借なき信念あるいは陶醉に根ざしているからである。エネルギー一元論のような包括的理論はその内部から崩壊することは決してないという強靱さをもっている。後にポパーは科学的理論は反証可能性をもたなければならぬと論じたが<sup>8)</sup>、完結した理念的理論体系はいわばイデオロギーであり、自己完結型で発展性をもたない。

19世紀末のウィーンに君臨したマッハ (E. Mach) は、デカルト以来の長い歴史をもつ物心二元論を批判して直接的経験へ帰るべきだと主張し、世界は物的でも心的でもない感性的諸要素から成り立ち、物体や自我は実体ではなく諸要素の複合体に外ならないとした。そして、原子論を形而上学的仮定として排し、力学的物理学ではなく物理学的現象学と称し、科学の役割は諸要素の関数的諸関係を思考経済の原理に従って縮約的に記述することにあると主張した。オストワルドの立場はこのマッハの主張に沿うものであった。

その頃ウィーン大学でボルツマン (L. Boltzmann, 1844-1906) は、気体分子運動論の立場から次章で論じる予定の熱力学第二法則、すなわちエントロピー原理の統計論的解釈に苦闘していた。マッハ達は、この努力を架空の業績として批判し続けたのである。20世紀に入り、1908年ペラン (J. B. Perrin) はブラウン運動の解析から分子の実在性を証明し、また物質の微細構造の具体

的解明が次々と進められるようになった。このときになってようやくオストワルドらも原子の存在を認め、原子論に基づく力学的自然観は確たる勝利を得たかにみえたのである。

## 7. エネルギー観の変遷

現在、私達の生活はエネルギー源として電気エネルギーに大きく依存している。電気エネルギーの本性を探る道も熱エネルギーの場合と同じように険しかった。電気エネルギーをつくるものとして電子や陽子など電荷をもつ粒子がある。静止した荷電体のまわりには静電場が、運動する荷電体のまわりには電磁場がつくられることは、既にファラデーによって見出されていた。一方、導体の中を電子が流れると、電場が電子にする仕事はまず電子の運動エネルギーになるが、電子と導線をつくる原子との衝突によって運動エネルギーの一部は熱に転化する。これがジュール熱の発生であり、これらの像はエネルギーの力学的解釈を支持するようにみえる。

しかし問題はそれほど単純ではない。たとえば簡単な例として平行板コンデンサーを考えよう。一方の極板から少しずつ電荷を取って他方の極板に移しコンデンサーを充電するとき、なされた仕事量に等しいエネルギーが両極板の間に蓄えられる。このとき両極板の間に働くクーロン力はこのエネルギーをもつ電場を媒介として働くと考えられる。すなわち一方の極板上の荷電粒子はその位置で電場と相互作用して電場の変動を起こし、この変動が次々と伝播して他方の極板上の荷電粒子と相互作用する結果、力が働く。平行する導線を流れる電流の間にアンペール力が働くが、これも導線のまわりにつくられる電磁場を介して働く。これらの力をもたらずエネルギーは電荷や電流がもっているのではなく、それらの力を媒介する空間に蓄えられている。

空間的に離れた物体間に働く力は、ニュートン以来物体間に直接働く遠隔作用と考えられてきた。場の理論はこの考えを覆し、場を媒介として間接的に働く近接作用によると考える。この考えは万有引力（重力）や物質間の相互作用を無理なく説明できて、現在基本的な力は本質的に場を媒介とする近接作用で、遠隔作用は近接作用の結果として説明されると考えられている。

簡単に歴史的経過を辿っておくと、1864年マクスウェル（J. C. Maxwell）は電磁波理論を定式化し、1871年には光が電磁波であることを提唱した。1888年になってヘルツ（H. R. Hertz）は電気振動から発生する電磁波の存在を確かめ、かつこれが光波と全く同じ性質を持つことを実証し、マクスウェルの電磁波理論に確固とした実験的証拠を与えた。やや歴史を遡るようであるが、19世紀後半の最大の物理学者といわれ、熱力学第二法則の創始者の一人であるケルヴィン卿（Lord Kelvin, W. Thomson）は電磁現象の運動論的解明を企て、弾性流体の力学的運動状態としてモデル化するために、光の伝播の媒体としてエーテルの概念を用いた。マクスウェルもエーテルで充満した真空を想定して、近接作用として彼の理論を構築した。しかしその後エーテルの実在性について種々の議論が行われたが、その努力は無為に終り、1887年のマイケルソン・モーリーの実験は絶対静止のエーテル像を否定した。これは力学的、運動論的自然観の敗退を告げるものであり、力の概念は場の概念によってとって代われることとなった。力学的表象としてのエーテルが完全に粉碎され、場の理論が最終的に認められたのは、1905年アインシュタイン（A. Einstein）の特殊相対性理論によってであり、さらに1916年の一般相対性理論によって重力が空間そのものの性質として説明された。

このように閉じた系で保存される基本的な物



理量としてのエネルギーはなおその地位を保ち続けているが、その内容は種々変貌してきた。エネルギーは種々の形態があり、それらの分類は様々な視点で行われるので、それら様々なエネルギーの内容を一般的に説明するのはかなり難しい。敢えて概括的に表現するならば、たとえば次のようになるであろう。物質は静止状態においても場に起因するエネルギーをもつ。重力場における位置エネルギーはその例である。運動状態にあれば余分のエネルギーをもち、これは運動エネルギーとよばれる。保存力に対して位置エネルギーと運動エネルギーの和は保存され、これが力学的エネルギー保存則である。荷電粒子系においては、それらがおかれている媒質内の電磁場エネルギーとして表される電磁相互作用をもつので、電磁場エネルギーと運動エネルギーの和に対して保存則が成り立つ。

それぞれある空間を占有する系の間でのエネルギーの移動は仕事および熱の形で起こる。仕事には力学的、電磁氣的など種々の形態があるが、仕事と熱はエネルギーとして等価であり、それらを含めた全系のエネルギーは保存される。これが熱力学第一法則として知られるエネルギー保存則である。エネルギー移動機構としての熱伝達には熱伝導、熱対流、熱放射がある。熱伝導は熱運動の移動、熱対流は物質移動に伴われる移動、そして熱放射は電磁波としての移動である。

本稿の最後にエネルギーと質量の保存則について簡単にふれておく。高エネルギー加速器を用いる物質の構造研究が熱心に行われているが、光速に近い速さになると粒子は非常に加速しにくくなる。これは粒子の質量が大きくなるためと考えられる。特殊相対性理論によると、静止しているときの質量が  $m_0$  の粒子はある座標系でみた速度が  $v$  のとき、

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

という質量  $m$  をもつ ( $c$  は光速)。すなわち物体は静止しているときでも  $m_0 c^2$  という静止エネルギーをもち、運動しているときには質量の増大による増加分  $(1/2)m_0 v^2$  が加わる。これが運動エネルギーに相当する。

静止エネルギーの存在は、静止したままの物体になんらかの方法でエネルギーを加えれば、それに相当する分だけ質量が増大することを示唆する。エネルギーを  $E$  だけ加えたとき質量の増加は  $\Delta m = E/c^2$  になるであろう。すなわちエネルギー  $E$  と質量変化  $\Delta m$  との間に、

$$E = c^2 \Delta m$$

の等価関係が成り立つ。これはエネルギー保存則はエネルギーと質量の和に対する保存則として一般化されることを示している。等価関係を表す比例係数  $c^2 = 9 \times 10^{16} (\text{ms}^{-1})^2$  が非常に大きいことから、小さいエネルギーに対しては質量変化はほとんど認められないが、原子核反応のように放出されるエネルギーが非常に大きいとき、確かに質量変化が起こることから、この等価性は確実に成立していることが確かめられる。

## 8. おわりに

最後に本稿の簡単なまとめをしておこう。エネルギーの概念ははじめ力学のなかから芽生えた。そして保存力の中では力学的エネルギーの保存則が成り立つことが示された。力学的エネルギーが保存されない場合、その一部は熱として散逸する。この熱を含めて新たにより一般的なエネルギー概念が提出され、熱と仕事の量的等価性を主張する形で、エネルギー保存則（熱力学第一法則）が成立した。

エネルギーは力学的自然観のなかから生まれたのであるが、それはより広い概念であり、その内容は対象の広がりとともに変化し深化され

ていった。とりわけ電磁気エネルギー、光エネルギーの本性の究明において、力の概念は場によって置き換えられ、場を媒介とする近接作用による場のエネルギーとして理解されるようになった。さらに相対性理論の展開によって、重力は空間の性質として説明され、また質量とエネルギーの等価性が論じられ、エネルギー保存則はエネルギーと質量の和に対する保存則として一般化された。

エネルギーに対する考え方は、私たちの自然観の深化を強く反映するものである。

#### 参考文献

- 1) R. P. ファインマン (江沢洋訳), “物理法則はいかにして発見されたか”, p. 100, 岩波現代文庫 (2001)
- 2) T. クーン (安孫子誠也, 佐野正博訳), “本質的緊張”, p. 89, みすず書房 (1987)
- 3) この間の事情は, 山本義隆, “重力と力学的世界”, 現代数学社 (1981) に詳しい。
- 4) P. S. ラプラス (内井惣七訳), “確率の哲学的試論”, p. 12, 岩波文庫 (1997)
- 5) デュ・ポア・レーモン (坂田徳男訳), “自然認識の限界について, 宇宙の七つの謎”, p. 34, 岩波文庫 (1928)
- 6) 文献3), p. 376 からの引用
- 7) W. オストワルド (山県春次訳), “エネルギー”, p. 130, 岩波文庫 (1938)
- 8) K. R. ポパー (大内義一, 森博訳), “科学的発見の論理”, 恒星社厚生閣 (1971)