

ポテンシャルエネルギー概念の歴史的発展について

中 川 徹

国立科学博物館 工学研究部

On the Historical Development of the Concept of Potential Energy

by

Tohru NAKAGAWA

Department of Engineering, National Science Museum, Tokyo

1) 序

19世紀なかばにエネルギー恒存則が確立されたが、その法則の成立基盤となったのは力学的仕事と熱との相互変換性の承認であった。そしてこれの承認と並行して、熱の本質を熱素（カロリック）であるとする熱素説に替り、熱の本質を物質粒子の運動とみる熱運動論が確立された。従来、エネルギー恒存則の成立史の中ではこの二つの要素、すなわち、力学的仕事 $\leftrightarrow$ 熱の相互変換性ならびに熱運動論の成立過程に注意が集中され強調されてきた。

だがエネルギー恒存則の成立過程を知るには、この二つの要素の基礎になっていた力学エネルギーの二つの形態、すなわち運動エネルギーとポテンシャルエネルギーの概念的、および名称上の変化に注目する必要がある。当時、運動エネルギーは質量 $\times$ (速度)²で表わされ、活力 (*vis viva*) と一般に呼ばれていた。しかし、ポテンシャルエネルギーは引力(重力) $\times$ 作用距離で表わされる力学量として多くの科学者達によって種々の名称を与えられていた。しかも、活力と同様、引力 $\times$ 作用距離で表わされた力学量はエネルギー恒存則の成立には重要な位置を占めていた。

それにもかかわらず、この力学量の歴史的な発展には今までほとんど光が当てられていない。本稿では、今まで余り問題にされていなかった、引力 $\times$ 作用距離で表わされた力学量の質的变化および名称上の変化をふまえながら、ポテンシャルエネルギー概念の発展をたどる。

2) T. YOUNG の上昇力

1807年にT. YOUNGが、それまで活力 (*vis viva*, living force) と呼ばれていた力学量に“エネルギー (energy)”という名称を与えたことはよく知られている。⁽¹⁾ このとき、YOUNGはエネルギーを、従来の活力と同様、物体の質量あるいは重量 (YOUNGは質量と重量を明確に区別していない) と速度の2乗との積で表わした。ところが物体の自由落下において、物体の落下の高さとそこから落下したときの速度の2乗とが比例関係にあることから、活力は高さ $\times$ 重量との積でも表わすことができ、YOUNGはこれを上昇力 (ascending force) と呼んだ。YOUNGの上昇力、すなわち、重量 (重力) $\times$ 高さ (作用距離) は現在では一般に位置エネルギーと呼ばれているが、重力のポテンシャルエネルギーである。

YOUNG が上昇力あるいはエネルギーに関して持っていた概念は、1686 年 G. W. LEIBNIZ が初めて活力概念を導入したときのそれらの定義⁽²⁾とほぼ同じである。しかし内容においては多少の相違がある。LEIBNIZ は活力を運動の量の真の尺度とみなしたのに対し、YOUNG は運動体の質量と速度との積で表わされる運動量 (momentum) を運動の量の真の尺度と考えた。産業革命を目の当たりに見ていた YOUNG は、運動量で測られる運動の量とは異なる、蒸気機関などによってなされる仕事の量や機械的な効果を測るべき尺度が必要であると考え、活力がそれに適することから、改めて活力に対し、エネルギーあるいは上昇力という名称を与え、それが力学上重要な量であることを強調したのである。

YOUNG の場合、上昇力とエネルギー (従来の活力) とは一つの力学量を表わすための異なる表現にすぎなかった。すなわち、質量 m の物体が高さ h から自由落下する場合を考えると、物体が高さ h のところにあるとき物体がもつ仕事の量は mgh (g は重力加速度) で表わされる。この物体が h だけ落下したとき速度が v になったとすれば、物体は mv^2 のエネルギーを持つことになる。このような場合、YOUNG は、この物体が持つ仕事量を mgh で表わしても良いし、 mv^2 で表わしても良いと考えたのであり、上昇力 mgh とエネルギー mv^2 とは単なる表現の相違に過ぎなかったのである。ここには、 mgh という位置エネルギーが mv^2 (現在では $\frac{1}{2}mv^2$) という運動エネルギーに変わるというエネルギー変換の概念が欠けているのである。YOUNG のようにエネルギー (活力) と上昇力とを単に異なる表現としてみる態度は、17 世紀末に LEIBNIZ が活力概念を導入して以来 18 世紀を通して続いできたことである。YOUNG はエネルギーという新しい術語を導入したにもかかわらず、単に活力という名をエネルギーという名に替えただけであり、その中身は依然として 17~18 世紀の古い活力概念から出るものでなかった。

YOUNG が上昇力と呼んだ重量×高さという力学量は、蒸気機関の仕事量を表わすために当時の技術者達によって実際に使用されていたものである。鉱山などで揚水用に使われていた蒸気機関の仕事量は、その蒸気機関によって駆動された揚水ポンプが坑内からひき揚げる水の重量と高さとの積によって測られたのである。そういう理由で、この重量×高さという量はきわめて実用的な重要性を持っていたのである。

3) 1840 年代における発展

1840 年代にエネルギー恒存則が提唱されたとき、YOUNG が上昇力と呼んだ重量×高さという力学量はもっと広く解釈され、重力だけでなく、物体の分子や原子などの粒子間に働く力や電気力、弾性力などの引力 (斥力) と作用距離との積で表わされる量へと拡張された。そしてこの力学量の活力や熱への変換性が主張され、同時にこの力学量によって熱現象が説明されるようになった。

1842 年、R. MAYER が『無生物の力についての考察』⁽³⁾ という論文でエネルギー恒存則を発表したとき、MAYER は質量×高さで表わした量を“落下力 (Fallkraft)”と呼んだ。MAYER のこの表現には、YOUNG と同様、質量と重量との混同がみられるが、MAYER はこれを YOUNG の上昇力と同じ意味で使っている。しかも、MAYER は“落下力と運動とは原因と結果の関係を有し、一方から他方に変換し得る力であり……”⁽⁴⁾ と、落下力が運動に変換することを明確に述べた。MAYER は運動が活力によって測られると考えていたから、終局、落下力と活力との相互変換性を認めたことになる。すなわち、現在の位置エネルギーと運動エネルギーの相互変換を認めたのである。また、MAYER は落下力と運動とは“同一対称の二つの異なる発現形態 (Erscheinungsformen) である”⁽⁵⁾ と述べている。MAYER は落下力と運動 (すなわち活力) とが現象の現われ方の相違から由来したものであると考えており、それらを単に異なる表現として扱っていた LEIBNIZ や YOUNG よりも実在性を及ぶたものと

したのである。

この落下力という概念を用いて **MAYER** は熱の発生する現象を説明した。例えば、気体の凝縮によって熱が発生するのは、凝縮により気体の容積が減少し、気体粒子が相互に接近するからであり、また水の落下によって水車がまわり、水車の軸に熱が発生するのは、気体の凝縮によって容積が減少するのと同じように、地球が水の落下によって連続的に容積を減少するためであると考えた。**MAYER** のこのような考え方のなかには、物体粒子間の作用距離の減少（すなわち容積の減少）によって落下力が減少し、その減少分は運動に変わり、その運動が熱に変換するという考え方が背後にある。ここには、ポテンシャルエネルギー→運動エネルギー→熱エネルギーという一連のエネルギー変換の萌芽が見られるのである。

この **MAYER** の考え方をさらに明確にしたのが **J. P. JOULE** である。彼は重量×高さという表現を使わないで、さらにもっと一般的に引力×作用距離という表現を用い、これを“空間作用引力 (attraction through space)”と呼んだ。1847 年の講演で⁽⁶⁾、彼は空間作用引力、活力、熱が相互に変換することを明確に述べている。すなわち、“活力は熱に変換するであろうし、熱は活力、あるいはそれに等価な空間作用引力に変換するであろう。これら三つのもの総て、すなわち、熱、活力、空間作用引力は互に変換し得る。”⁽⁷⁾そして **JOULE** は、機械的なものであれ、化学的なものであれ、生命に関するものであれ、自然現象を熱、活力、空間作用引力に基づいて解釈した。例えば、流星が大気圏に突入して燃えるのは、飛行中に持っていた流星の活力が熱に変換することを意味するのであった。また彼は、バネの弾性を、バネに加えられた活力がバネを構成する原子や分子などの粒子間に働く空間作用引力に変換することから生じるのであると説明した。このように、**JOULE** は空間作用引力を単に重力場における現象だけでなく、物質を構成する分子や原子などのミクロな粒子間力の世界にまで適用したのである。

JOULE は、熱運動論の立場から、熱が物体を構成する粒子の活力や粒子間作用引力から起因するものと考え、これらの活力や作用引力に基づいて熱を 2 種類に分類した。一方は物体粒子の活力から成りたっているもので、知覚される熱 (sensible heat) がこれである。他方は粒子間の引力によって生ずる熱で、潜熱 (latent heat) のことである。このように、潜熱を粒子間に作用する引力と距離との関係に基づけることによって、今まで熱運動論で説明困難であった潜熱の現象を説明したのである。

同じ頃、**H. HELMHOLTZ** は **MAYER** や **JOULE** などの見解をもっと一般的な定式化された形で表現した。1847 年の『力の恒存について』⁽⁸⁾の中で、**HELMHOLTZ** は φ という保存力が距離 R と r との間で働くとき、その間の総ての力の強さを $\int_r^R \varphi dr$ と表わし、これを“張力 (Spannkraft)”と呼んだ。張力 $\int_r^R \varphi dr$ という表現は現在のポテンシャルエネルギーの数学的表現と一致するものであり、本質的には保存力×作用距離を積分で表わしたものである。**HELMHOLTZ** はこの張力を単に重力だけでなく、電気力や分(原)子間力などにも適用し、電気現象や熱現象を説明したのである。

HELMHOLTZ もまた活力と張力とに基づいて二種類の熱を説明した。すなわち、**JOULE** が知覚でける熱と呼んだものを“自由熱 (freie Wärme)”と呼び、熱運動の活力に起因するものとし、潜熱 (latente Wärme) を物質原子の配置変化によって起る張力の変化から生じるものであると説明したのである。**HELMHOLTZ** のこの解釈は **JOULE** の解釈とほとんど同じものであり、二人は同じ時期に熱の本質に関して同じ解釈に到達したのである。

HELMHOLTZ は活力と張力との相互変換性を認め、それに基づいてエネルギー恒存則を次のように表わした。“距離にのみ関係する引力または斥力を受けている自由質点の運動の総ての場合において、張力の消失は活力の取得に等しく、前者の取得は後者の消失に等しい。すなわち、存在する活力およ

び張力の和は常に一定である。我々是我々の法則をこの最も一般的な形において、力の恒存の原則と呼ぶ”(9)。ここでは“力”という言葉で表わされているが、内容においては現在のエネルギーを意味しており、ここにはエネルギー恒存則の明確な表現が与えられているのである。特に、保存力場におけるエネルギー、すなわち、ポテンシャルエネルギー (HELMHOLTZ の場合は張力) と運動エネルギー (HELMHOLTZ の場合は活力と呼び、 $\frac{1}{2}mv^2$ で表わしている) との相互変換が認識され、ポテンシャルエネルギー+運動エネルギー=一定の公式化がなされたのである。

4) エネルギー術語の成立

以上にみてきたように、1840 年代に今日の運動エネルギーやポテンシャルエネルギーの概念的な枠組みと数学的表現はほぼ完成し、それらのエネルギー間の相互変換性が認識された。しかし、1807 年に YOUNG が導入した“エネルギー (energy)”という名称は科学的術語としてまだ使用されていなかった。MAYER や JOULE, HELMHOLTZ はいずれも、現在の運動エネルギーに相当するものを活力と呼び、一方ポテンシャルエネルギーに相当するものに関しては、MAYER は落下力, JOULE は空間作用引力, HELMHOLTZ は張力と、各自が別々の呼び方をしていた。それらの呼び方はニュートン力学的な意味の“力 (vis, force)”と非常にまぎらわしいものであった。

1850 年代になると、W. THOMSON や W. J. M. RANKINE によって“エネルギー (energy)”という名称が使われはじめ、エネルギーという名称は科学的術語となり、種々の形態のエネルギーの名称も整理されるようになった。

1851 年に THOMSON は“力学エネルギー (mechanical energy)”という名称を使い翌年この力学エネルギーの源を二つに分けた。(10) 一つは、運動体、光や輻射熱の波動空間、物体の熱運動などで、これをダイナミカル (dynamical) なものと呼び、他の一つは、ある高さにある重量物、帯電体、燃料などで、スタティカル (statical) なものと呼んだ。

翌年、RANKINE は『エネルギー変換の一般的な法則について』(11) という論文を発表し、その中でエネルギーを二種類に分けた。一つは“アクチュアルエネルギー (actual energy)”あるいは“センスイブルエネルギー (sensible energy)”と名づけたもので、測定可能で、伝達可能、可変的な形態であり、これには運動体の活力、輻射熱、光、化学作用、電流が属するとしている。他のエネルギーは、状態の変化と抵抗力との積によって測られるもので、これを“ポテンシャルエネルギー (potential energy)”または“潜在エネルギー (latent energy)”と名づけた。ここに初めてポテンシャルエネルギーという名称が登場したのである。RANKINE は、このエネルギーの数学的表式が数学におけるポテンシャル関数 (potential function) になるところからその名をつけたのである。(12) 彼は、このエネルギーには、重力や弾性力、化学親和力、静電気や磁気などによる力学的仕事ははいるとしている。

RANKINE が与えたポテンシャルエネルギーという名称は直ちに THOMSON によって受け入れられ(13)、以後多くの科学者達によって使用されるようになった。しかし、RANKINE によってアクチュアルエネルギーと名づけられた今日の運動エネルギーの方は従来通り活力と呼ばれることが多かった。1860 年代なかばになって、THOMSON と P. G. TAIT がアクチュアルエネルギーの替りに“運動エネルギー (kinetic energy)”(14) という名称を用いはじめ、今日の名称となったのである。こうして、力学エネルギー、ポテンシャルエネルギー、運動エネルギーという今日のエネルギー術語が成立したのである。

5) 結 語

19 世紀の初め, YOUNG によって重要な量とみなされた, 重量×高さという力学量は, その後のおよそ半世紀の間に今日のポテンシャルエネルギーへと発展した. その半世紀の間に, 最初重力のポテンシャルエネルギー (位置エネルギー) だけを意味していた, この力学量は, 弾性力やミクロな分子 (原子) 間力や電気力のポテンシャルエネルギーにまで拡張された. そしてエネルギー恒存則の成立において, 活力, 熱と並んで重要な役割を果たしていたのである. また, その名称も, 上昇力 (YOUNG)→落下力 (MAYER), 空間作用力 (JOULE), 張力 (HELMHOLTZ)→スタティカルエネルギー (THOMSON), 潜在エネルギー (RANKINE)→ポテンシャルエネルギー (RANKINE) といろいろ変化し, 今日のポテンシャルエネルギーという名称になったのである.

Summary

The development of potential energy has not been much noticed of in most papers about the history of science. But the quantity which corresponds to today's potential energy has played an important role in the establishment of the principle of conservation of energy.

In 1807, the product of weight of a body and the height from which it must have fallen was called "ascending force" by T. YOUNG. Though this "ascending force" was the equivalent of *vis viva* (energy), Young did not consider the conversion of ascending force into *vis viva*.

In 1842, R. MAYER called the product of mass of a body and the height "Fallkraft (falling force)". Though Mayer did not distinguish between weight and mass, he used the quantity in the same meaning as today's gravitational potential energy. In 1847, J. P. JOULE used the term of "attraction through space" to express the potential energy not only of gravitational force but also of the force between particles of which matter consists. In the same year, H. HELMHOLTZ called the product of attraction (or repulsion) and the distance between two points "Spannkraft (tension)", and applied it to electrical force further.

When MAYER, JOULE and HELMHOLTZ individually put forward the principle of conservation of energy, it was always emphasized that "Fallkraft", "attraction through space" or "Spannkraft" respectively were convertible into *vis viva* or heat.

After the concept of potential energy had been established, the nomenclature of "potential energy" was introduced by W. J. M. RANKINE in 1853, and received by W. THOMSON in that year. As we have seen above, the concept and nomenclature of potential energy were established in the middle of the 19th century.

参 考 文 献

- 1) YOUNG, T., 1807. A Course of Lectures on Natural Philosophy and the Mechanical Arts. 1-796 pp. London, Joseph Johnson.
- 2) ILTIS, C., 1971. Leibniz and the Vis Viva Controversy. *Isis*, **62**: 21-35.
- 3) MAYER, R., 1842. Bemerkungen über die Kräfte der unbelebten Nature. *Annalen der Chemie*

und Pharmacie. **42**: 233–240.

- 4) MAYER, R. *ibid.* p. 235.
- 5) MAYER, R. *ibid.* p. 235.
- 6) JOULE, J. P. 1884. The Scientific Papers of JAMES PRESCOTT JOULE. 1–657 pp. London, Taylor and Francis.
- 7) JOULE, J. P. *ibid.* pp. 270–271.
- 8) HELMHOLTZ, H. 1847. Über die Erhaltung der Kraft. 1–72 pp. Berlin, G. Reimer.
- 9) HELMHOLTZ, H. *ibid.* p. 17.
- 10) THOMSON, W., 1852. On a Universal Tendency in Nature to the Dissipation of Mechanical Energy. *Phil. Mag.* **4**: 304–307.
- 11) RANKINE, W. J. M., 1853. On the General law of the Transformation of Energy. *Phil. Mag.* **5**: 106–111.
- 12) RANKINE, W. J. M., 1859. On the Conservation of Energy. *Phil. Mag.* **17**: 250–254.
- 13) THOMSON, W., 1853. On the Restoration of Mechanical Energy from an unequally heated space. *Phil. Mag.* **5**: 102–106.
- 14) TAIT, P. G., 1864. On the History of Thermo-dynamics. *Phil. Mag.* **28**: 288–292.