

エネルギーと原子論 (アトミスティック)

Energetik vs. Atomistik

執筆者プロフィール



村上 陽一郎
Yoichiro MURAKAMI

◎東京大学教養学部卒業，同大学院比較文化博士課程修了。上智大学理工学部，東京大学教養学部，同学先端科学技術研究センター，国際基督教大学，東京理科大学を経て，2010年4月から現職。
◎研究・専門テーマは，科学史，科学哲学，科学技術社会学，最近は「安全学」に取り組む。
◎東洋英和女学院大学学長（東京大学，国際基督教大学名誉教授）
(〒226-0015 横浜市緑区三保町 32/
E-mail : ypmura@topaz.ocn.ne.jp)

1. はじめに

自然科学の歴史のなかで起こった厳しい論争のなかには，今になってみると，当事者の論争に注いだ熱い思いや激情が，なかなか追体験できないようなものもある。もしかすると，ここで取り上げる論争も，その一つかもしれない。というのも，この論争自体，科学の歴史に関心を持つ人間以外，科学者の間でもあまり深くは知られていない，という印象があるからである。

ここで問題とされる論争は，基本的には19世紀後半のドイツ語圏で，主としてオストヴァルト (F.W. Ostwald, 1853~1932) とボルツマン (L. Boltzmann, 1844~1906) の間で起こったもので，その性格上ドイツ語の Energetik と Atomistik という対立するドイツ語の術語で表現される。

日本語で「原子論」(英語では atomism) と言えば，無論古代インドにもその考え方があるが，一般には，古代ギリシャのレウキッポス (Leukippos, 前5世紀) やデモクリ

トス (Demokritos, B.C.460~370) に端を発し，エピクロス (Epikuros, B.C.341~270) やローマ時代の詩人ルクレティウス (Lucretius, B.C.97~55) の『ものの本性について』 (*De rerum natura* = この言葉は本来「自然学」という意味であり，たとえばアリストテレスの『自然学』 *Physica* のラテン語と考えてよい) を経て，近代にガッサンディ (P. Gassendi, 1592~1655) の手で復活され，ニュートン (I. Newton, 1642~1727) 以降曲折を経て，近代科学の根幹に座ることになる自然哲学の幅広い原理，というよりも，世界観を誰もが思い起こすだろう。さらにそれが具体的に物質に適用されたときの，ボイル (R. Boyle, 1627~1691) からドルトン (J. Dalton, 1766~1844) にいたる近代化学の物質観でもあり得るだろう。

そうした原子論の特徴は，単に物質の究極的な単位として，それ以上分割できないものを想定するに留まらない。原子論は，物質の連続性を否定するがゆえに，その究極的な物質 (つまり不可分割体としての原子) どうしの間に，物質の存在が否定された場所 (言い換えれば「真空」) の存在をも言い立てなければならない。一般に原子論とは，そうした性格のものであると定義できる。

しかし，ここで問題にされる「原子論」(ドイツ語語源の「アトミスティック」) は，無論，その大河のような大きな系譜の外に完全に出るものではないが，もう少し狭い意味で使われる。その内容は，以後明らかにしよう。

2. 熱学の誕生

19世紀になって熱現象に関する科学的な検討が急速に

進み、トムソン (B. Thompson, 1753~1814) の仕事をきっかけに、イギリスのジュール (J.P. Joule, 1818~1889) や、ドイツのマイヤー (J. R. Mayer, 1814~1878) あるいはヘルムホルツ (H. von Helmholtz, 1821~1894) らの手で、まずはエネルギー保存則が浮上してきた。もっともこの段階では、エネルギーという言葉は使われず、一般に「力」が使われていた。ケルヴィン卿 (Lord Kelvin = W. Thomson, 1824~1907) は、この「力」を「エネルギー」と呼ぶことを提案し、ランキン (W. J. M. Rankine, 1820~1872) が、最終的にさまざまな形の「エネルギー」を統合的に扱えることを指摘して (1853)、熱力学の第一法則としてエネルギー論の基礎は固まった。

ほとんど同じころ、クラウジウス (R. Clausius, 1822~1888) は、高温の物体と低温の物体とを並存させることによって、エネルギーを得ることができること、および、外からのエネルギーの消費なしには、孤立した低温の物体の温度を上げることができないことを確かめた。この考え方は、閉鎖系では、現象は常に時間の流れに対して非対称に進む、という意味を持つ。クラウジウスは 1865 年には、それを説明するためのエントロピーという概念の定式化にも成功し (定量的には $\int dQ/T \geq 0$ と表現される、なお Q は熱、 T は温度)、熱力学の第二法則もまた確立されることになった。

3. 気体分子運動論

このころマクスウェル (J. C. Maxwell, 1831~1879) は、熱現象に対する気体の分子運動論的解釈に力を注いでいた。最終的には、この線に沿った研究戦略を、ここで問題にしている「原子論」(アトミスティック) という言葉で呼ぶことになる。つまり、ここでの「原子論」は、先に定義したそれに必ずしも内容的には重ならないのである。

密閉された容器内の気体の分子は、ランダムな熱運動を行うと考え、その運動の速度は直交三軸方向に関して独立であり、その成分の分布は、法則的に記述できる (マクスウェルの速度分布則)。これをもとに、容器内の圧力を導き、ボイル=シャルルの法則を使って、温度との関係に転換すると、結果的に、気体分子の全運動エネルギーを表現することができる。この方法は、一方では原子論的な

原則に従いながら、ニュートン力学のように、個々の要素の運動状態を一意的に追跡するのではなく、膨大な数の要素を確率論的に扱うという、新しい方法論 (それは量子力学の創成にも影響を与えた) を切り開くことになった。

このようなエネルギー現象の取り扱いに基づいて、ボルツマンは熱力学の第二法則を定量的に導くことに成功した (1866)。さらに 1877 年には、「熱力学の第二法則と、熱平衡の諸定理についての確率論的計算の関係について」という論考を公表し、エントロピーと、要素の生起確率との比例関係を明らかにした。この関係こそ、後にプランクの公式として知られるものの原型であった。

4. 原子は仮設的?

他方、本来化学者であったオストヴァルトは、しかし、物質の変化を追究するに当たって、個々の「物質」から離れ、全物質に適用可能な自然法則、という抽象的な理念を追究する「一般化学」という概念を提唱した。そして、原子や分子は、仮設的な存在でしかないものとし、ときあたかも、エネルギーの定量的な把握が可能となりはじめたことから、エネルギーこそが、そうした「一般化学」の核となるべきである、と主張した。「自然は、時空のなかで変化する一連のエネルギー現象」として把握すべきである、というのが彼の主張になった。それを「エネルギー一元論」(エネルギーテイク) と呼ぶ。

エネルギー一元論は、当時ヨーロッパできわめて有力な学者で、反原子論者であったマッハ (E. Mach, 1838~1916) という強力な同調者を得た (むしろオストヴァルトのエネルギー論は、マッハの反原子論に導かれたと言うほうが正確だろうが)。マッハはボルツマンらの理論を、「原子論的」として批判し、激しく否定する論陣を張った。ヴイーン大学を経てライプツィヒにいたボルツマンは、エネルギーテイクの主唱者オストヴァルトが同じライプツィヒにいるのが耐えられずに、1904 年には当地を去った。20 世紀に入って、実は原子の実在性は、次第に確かなものになっていたのだが、ボルツマンは、マッハ=オストヴァルト陣営からの批判に、すっかり自信を失ってしまい、敗北者を自認したうえで、1906 年には自殺という悲惨な最期を遂げることになる。



5. 論争から何を学ぶか

現在の眼から見れば、原子や分子の「実在性」を疑うものは科学者の間ではもはやいないから、マッハやオストヴァルトの原子論批判は成り立たない、と言えるが、その反面、たとえば宇宙論のビッグバン説では、原子（あるいは素粒子）は、エネルギーから生じたことになっている。自然の原初は確かにエネルギーであったとも言えるだろう。さらにアインシュタイン (A. Einstein, 1879~1955) の $E = mc^2$ の定式化においては、物質の属性である質量と、エネルギーとの間の互換関係が主張されている。結局、量子力学のなかに謳われている「相補性」の理念からも教訓を得られるように、20世紀物理学の展開のなかで、「原子論」か「エネルギー一元論」か、という二者択一的対立は、雲散霧消したとも考えられる。

ただ、それでは、この論争が原子という概念が確立される前の、過渡的な時代に咲いた徒花に過ぎなかったか、と言え、必ずしもそうとは言い切れない。それを、自然をどのように見るか、という哲学的な立場の対立と見れば、「要素還元主義」(reductionism) と、反還元主義との選択という、今日でも解消されているわけではない問題であることに留意すべきであろう。

「還元主義」の英語は reductionism であるが、この語は本来 reduce つまり「削減する」に由来する。したがって「削減主義」とも訳すことができる。では還元主義においては、一体何が「削減される」のか。私たちの感覚に訴える「世界」は、さまざまな性質に満ちている。「花は紅、柳は緑」というように、色、匂い、味などなど千変万化である。そうした性質をすべて捨て（削減し）て、抽象的で無味乾燥な質量と運動という概念によってのみ規定される原子で、「世界」を描こうとするのが、還元主義であり、広い意味での原子論である。しかも、物質世界は、化合物、分子、原子、(素粒子) というような、明確な階層構造のなかで捉えられる。

近代哲学は、もともとアリストテレスに遡ることのできる、感性的な性質（色、味、匂いなど）と悟性的な性質（形、大きさ、重さなど）の区別を再確認し、後者に重きを置く

（第一性質とする）習慣を立てたが、方法論としての原子論は、言わば第一性質のみで勝負をしようとする姿勢を示したものと言える。

他方エネルギー一元論も、すべての現象をエネルギーに差し戻して理解する、という点では、「還元主義的」な性格を備えているが、しかし、そこでは現実の光や熱など、感性的経験の世界でとらえられる現象に直接つながる理論構成を持っているところが、アトミスティックとは違っているとも言える。

その意味では、エネルギー一元論とアトミスティックの論争は、領域としても熱現象に、また時代としても19世紀末に、それぞれ限局された性格のものではあるが、その背後には、世界をどのようにとらえようとするのか、という優れて哲学的な姿勢の相違があったと考えられる。

言うまでもなく物理学の歴史は、上の意味では第一性質のみで現象解析を貫こうとする試みであるといえるが、量子力学の進展とともに、ストレンジネスとか、フレーバーなど、不思議な性質を登場させて、無味乾燥な第一性質の世界からの離脱という遊びを行ったことは、付け加えておいてよいかもしれない。

(原稿受付 2010年2月22日)