

## ボルツマン(Ludwig Boltzmann), 1844~1906, オーストリア

気体分子運動論から、エントロピーの確率  
解釈により、熱力学第二法則を説明した。

さらに動力学的な考えを用いずに、統計により  
熱力学を説明し、統計力学の基礎をつくった。

悲劇の天才物理学者、ルードヴィヒ・ボル  
ツマンは1844年2月20日、華麗なる都ウィ  
ーンに生まれた。父は収税官を努める中流の  
家庭で、ボルツマンは献身的な母親にはげま



水橋高校3年 N. 画

されて、年若い頃から何の心配もなく自分の勉学に専念することができた。ボルツマンが少年時代を過ごしたのはヴェルスとリンツという小さな地方都市であったが、大学はウィーン大学に入った。彼の先生の中にはやがて輻射の研究で名を知られるヨゼフ・シュテファンがいた。ボルツマンの研究は学生時代の気体分子の速度分布を考えたマックスウェルの論文との出会いに始まる。ボルツマンは他に先駆けてマックスウェルを高く評価し、その理論に傾倒し、その理論を発展される研究をライフワークとして始めた。1866年に大学を卒業し、教授職に就いたのは1869年で、グラーツ大学の数理物理学の講座であった。1869年と1871年には、一時ハイデルベルク大学とベルリン大学に滞在して、キルヒホッフやヘルムホルツとともに過ごしたこともある。1873年から1876年まではウィーン大学教授を努めた後、実験物理学の教授としてグラーツに戻った。もうこの頃にはボルツマンの名はよく知られており、ネルンストやアレニウス（後に物理化学の分野を率いる存在となった。）など若手の物理学者たちが彼のもとで研究をしにグラーツにやってきました。1890年にはミュンヘン大学に移った。ここはグラーツよりもずっと大きな都市であったが、ボルツマンの転任はこれで終わったわけではない。1894年にはウィーン大学でシュテファンの後継者となった。その後2年間ライプチヒ大学に行き、最後にもう一度ウィーン大学に戻って、死に至るまでをここで過ごした。

ボルツマンは本来理論物理学者であったが、実験物理学や数学、さらに哲学まで講義を行うなど、広汎な学識を持っていた。彼の偉大さは、すでにその生存中から認められていた。オクスフォードを含めて数々の大学から名誉学位も受けていたし、数多くのアカデミーの会員でもあった。60歳の誕生日には祝賀記念論文集も刊行された。これには、117人もものすぐれた学者（アメリカ、オーストラリア、日本、ロシアなど

も含まれている) から数多くの物理学者たちが論文を寄せたのである。

さて、ボルツマンの理論とはどのようなものなのだろうか。気体の分子運動論を研究した人々の関心事は、熱力学と分子運動論の間に何らかの関係があることを認めていた。熱力学においては、孤立系のエントロピー（無秩序の度合いを示す尺度）は時間とともに増えていき、平衡状態において最大値に達する、という事実が中心に据えられている。この事実の、経験面からの裏づけは、第2種の永久機関が実現不可能であるということ、あるいは、熱伝導に見られるように、時間の矢は一方向に向いているということである。一方、力学現象は、これはすべて時間を逆にたどることが可能である。さてそうすると純粋な力学から自然現象の不可逆性を説明することがはたして可能であろうか？ エントロピーの増大は力学から導き出せるか？ 熱力学の第二法則のような基本的な法則に対して、それを力学に帰着させようとする試みが行なわれるのは当然のことであった。分子運動論的なモデルを考える場合には、熱力学の第一法則は弾性衝突の法則（つまり古典力学）に帰着される。第二法則についても同じようなことをやってみようという気が起こるのは当然のことである。

1866年にボルツマンは、それに向けての試みの第一歩を踏み出した。これで納得のいく結果を得たとボルツマンは考えたが、それは可逆的な過程に限られたものであった。可逆的な過程についても第二法則は成立するが、一般的な場合はどうなるのか。マックスウェルは、1859年に行なった気体中の分子の速度分布の発見に対して、1867年にその証明の改良を試みている。その中でマックスウェルは分子どうしの衝突についての解析を行ない、彼の発見した速度分布は衝突によって変化を受けない、ということを示したのであった。これを受けて1871年にボルツマンは、一つの分子についての時間平均と、多数の分子についての同時刻平均とを区別して考えることを始めた。ボルツマンは、分子に（たとえば重力のような）力が作用している場合についてマックスウェルの法則を一般化することに成功し、有名な「ボルツマン分布」の式を得た。

さてその間にマックスウェルはこういう結論に達していた。熱力学の第二法則は、これまでの物理学に出てきたことのない、新しい類のものだということである。すなわちそれは統計的な法則であり、確率的な議論によってのみ証明が可能になるのである。したがって、たとえばエネルギー保存別のように必ず正しいというものではなく、ただそれが成り立つ可能性がきわめて大きいということにすぎない。

1872年にボルツマンは、今でも統計力学の古典の一つに数えられる重要な論文を書いた。そこでは、単原子分子の集合に対して、位置と速度の任意の分布を考え、その分布が衝突の作用のもとで変わっていく、その変わり方を定める方程式が導か

れている。また、分布関数に依存するある表式が書き下され、これをボルツマンは  $H$  と呼んだのであるが（ここから、後で  $H$  定理という名前がつく）、その  $H$  は、時間とともに減少するか、一定にとどまるかのどちらかしか起こりえない、ということが示されている。分子の衝突の仕方としてはいろいろな場合が考えられるわけであるが、ボルツマンはそういういろいろな衝突の仕方を掘り下げて解析し、それらの対称性を研究した上に、骨の折れる計算を重ねてその結果を導いたのであった。マックスウェル分布に対しては  $H$  は定常値となり、それ以外の分布に対してはいつも  $H$  は減少する。最後にボルツマンは、この  $H$  がエントロピーの符号を変えたものであるということを示した。こうして彼は熱力学を力学に結びつけたわけであるが、それは  $H$  定理という回り道を通じてのことであった。ところが、ここには深い論議を要する重大な問題点があり、それは、その証明にはいわゆるエルゴード仮説が含まれていることであった。

1877年に至ってついにボルツマンは、自分の分布則の表式、およびそれに対する証明として本質的に統計的な性格をもち、動力的な議論をほとんど用いないものを出した。この種の議論をするにあたっては、速度と座標についての分布ではなく、運動量と座標について、すなわち、いわゆる位相空間における分布を考える必要がある。言い換えれば、それらの代表点は位相空間内を非圧縮性流体のように動いていくわけである。その上、エネルギーが保存されるので、代表点のいる場所はエネルギーが一定の超曲面上に限られることになる。 $H$  定理を通じてのボルツマンの苦心の探究は、その副産物としてボルツマン輸送方程式を生み出した。これは分布関数の時間変化を与えるものである。そしてその方程式こそ、粘性、拡散、熱伝導についてのいろいろな問題を解くための正しい方法であることが明らかとなった。

ボルツマンの講義は「水晶のように明晰だ」と言われた。講義での表現の仕方は生き生きとして、明快でしかも魅力があり、機知とユーモアに満ちていた。正規の学生のほかに一般の人まで聴きに来たものもあった。旅行には方々に出かけており、1905年のカリフォルニアへの旅の折には、生き生きとしてユーモアのあふれる旅行記を残している。これは彼の3度目のアメリカ旅行であるが、当時としてはこの3回という数字は珍しかった。また、ボルツマンには芸術家的な気質があり、並はずれて優れた文章を書いた。ドイツの詩人の中では誰よりもシラーを好み、シラーなくしては精神的な意味での自分の存在はありえない、とまで言ったほどである。音楽も好きでベートーヴェンに傾倒し、ブルックナーからもレッスンを受けた。ピアノも上手で、ウィーンのボルツマンの家にはアマチュア音楽家たちが日を決めて集まっていたし、ウィー

ンの国立歌劇場には家族全部のための席を常時借り切っていた。シラーやベートーヴェンへの傾倒は、彼の闘志に燃えた不屈の精神を端的に表現している。

彼はひどい近眼であるという点で不利な条件を負っていた。後年になると肉体的な健康が悪化した。重い喘息と頭痛に悩まされ、またそれと同時に視力が衰えてものを読むには人を雇わなければならないほどになった。居場所を次々と変えていったことから、ある程度察しがつくことであるが、彼はふさぎの虫に取りつかれており、これが時として本物の憂鬱症にまで昂じることがあった。彼は当時の主要な物理学者の1人に数えられていたのであるが、自分では折々、学問の世界から見捨てられて孤立していると思ひ込むことがあった。しかし彼の理論は、当時は全く理解されなかった。原子や分子の存在を示す直接的な実証が欠けていたため、原子論反対者のマッハやオストバルトらの激しい反論にあう。熱力学やエネルギー保存の法則があればよけいな原子論は必要ないと言って攻撃された。論争に疲れて「最後の原子論者」と呼ばれた。彼はライプチヒにいた頃に一度自殺を図っているが、この時は命をとりとめた。しかし1906年9月5日、トリエステの近くのドゥイノで休暇を過ごしている時に、ついに自ら命を絶ったのであった。

彼の業績は死後に高く評価されることになる。1905年にはアインシュタインのブラウン運動の理論が出された。これは、物質が原子論的な構造をもつことの直接的証拠だった。エントロピーの概念は様々なところ（情報理論や経済学まで）で応用されている。また、現在の物理学の柱である量子力学は、プランクによる輻射法則の研究のなかで、直接ボルツマンの統計力学に関連して端を発したのであった。さらに、普遍定数として知られるボルツマン定数  $k$  は物体の巨視的性質である温度と、分子の微視的な運動とを関連づける大切な数値となっている。

ボルツマンはベートーヴェンなど楽聖らとともにウィーン中央墓地に眠っている。ボルツマンの美しい胸像のある記念碑像のうえに、一つの公式が書かれている。ボルツマンの偉大な科学的業績の結晶、統計力学の魔法はすべてこの式のうちに集約されているのである。

$$S = k \log W$$

エーレンフェストは、言った。「この記号を書き記したのは、神であろうか？」と。

<参考文献>

「古典物理学を創った人々」エミリオ・セグレ著、久保亮五ほか 訳、みすず書房

「物理を発展させた人々」稲葉 一、竹中 旬治 著、大衆書房

「ボルツマン」E. ブローダ著、市井三郎ほか 訳、みすず書房