

科学史から見る近代（その二）

—近代科学とは一体何なのか？—

高橋 秀 裕

一、はじめに

十七世紀前後の「近代初期」（「近世」）は、近代国家が生まれ、民主主義や資本主義のほぼ今日のような形態が成立をみた時代であり、「西欧」が「西欧」になった時代であるともいわれる。この時代、西欧の国民国家に知的英雄たちが出現し、アリストテレスの体系を、その存在論、認識論、学問論においていわば解体することで近代科学を成立させた。イタリアのガリレオ・ガリレイ、フランスのルネ・デカルト、オランダのクリスティアン・ホイヘンス、そして英国、ドイツのそれぞれアイザック・ニュートン、ゴットフリート・ライブニッツ等々の名前を挙げれば、のちの時代に「天才の世紀」と規定されたことにも一往はうなずける。

前稿（『現代密教』第二十一号所収）では、一七世紀に至るまで知識人が自然を理解するときの基本的な知的枠組みを提供したアリストテレス自然学のうち、運動論についてごく簡単に触れ、その伝統的な枠組みにいわば亀

裂を生じさせ、その崩壊を決定づける口火を切ったガリレオの数学的自然学の構想がいかなるものであったかを概観した。そして、そこに近代自然科学の方法の骨格が現れていることを見た。

本稿では、その続編として、ガリレオを批判するという形で数学的自然学を徹底させ、機械論的自然観を明示したデカルトの自然学を探ることから出発し、ニュートンの力学的世界観を検討する。さらには一八世紀以降から現代に至るまでの展開を概観することを通して、ニュートン力学のパラダイムがどのように整備され拡充・修正され、種々の専門分野が成立して「科学者」集団がどう形成されたかを考察する。

二、数学的自然学の基礎づけと展開

◆物質概念の形成

数学的自然学の構想には物質概念の変更が必要であった。その口火をまずガリレオが切る。彼は、「大きさ・形・数・運動など」を物体の「第一の实在性質」として認め、「匂い・味・音・色など」は感覚主体の中にあるとした。のちにこの区別は哲学者ジョン・ロックによって、それぞれ物体の第一性質、第二性質と呼ばれることになる。こうした物体把握は、アリストテレスとは全く逆であることがわかる。つまりアリストテレスのいう熱・冷・湿・乾の原性質は物体の基本的な在り方を示すものではなく、二次的な感覚的性質とされたわけである。

しかし、ガリレオは第一性質と第二性質のいわゆる線引き基準をはっきりと述べていたわけではなかった。数学的に処理可能な性質を第一性質、そうでないものを第二性質と考えていたと推測されるが、そうしたガリレオの曖昧さを徹底的に取り除こうとしたのがデカルトだったのである。デカルトは「ガリレオは」単に特殊な結果の論拠のみを求め、基礎なしに建築している」とガリレオを批判し、「明晰判明な認識」のみを真理とする原則を

立てることによって、物質概念を分析した。

まずデカルトは物理的自然についての基本概念を打ち出す。それは、幾何学的延長そのものが物体の本質を構成し、空間があるところには必ず物質があるという、「物質即延長説」と称されるものである。彼は『哲学の諸原理』第二部「物質的事物の原理について」の中で次のように述べている。

かように知性のみを用いることによって、物質すなわち普遍的に見られた物体の本性が、固い物・重い物・色ある物その他何らかの仕方で感覚を刺激する物であることに存するのではなく、ただ長さ・幅・深さにおいて延長のある物であることにのみ存することが覚知されるであろう。

物質の本性は三次元的に延長しているということだけである、というわけである。デカルトによれば、幾何学的空間そのものが「神」によって創造され物質と一体となるのであり、空間と物質とは相即的なものである。

このテーゼによって、デカルトはアリストテレス自然学の基礎を否定し、物質に能動性や生命原理を認めるルネサンス自然主義（魔術思想）をも否定した。延長は幾何学の対象であり、物質は自然学の対象であるから、物質即延長のテーゼは数学的自然学の形而上学的基礎を与えるのである。デカルトは続けて言う。「私は自然学における原理として、幾何学や抽象数学における原理以外のものを認めないし、要求もしない。なぜなら、こうしてこそあらゆる自然現象が説明されるのであり、自然現象の確実な論証も与えられうるからである」。

こうしてデカルトの形而上学は、コギトを中心とした観念論的体系ではなく、結局は、「神」の存在を頂点とする形而上学を構成することになる。デカルトにおいては、神の存在証明が彼の新たな数学的自然学を基礎づける

ためには不可欠であったのである。

しかし、ここで急いで注意しておかなければならないのは、デカルトが論じる神は、キリスト教の神学において扱われる神ではなく、われわれが誰しも生まれながらにしてもっている「自然理性」によって扱われる神であり、聖書によることなく哲学によって論じられる神である、ということである。神学というものを広くとって言えば、デカルトが論じる神は、聖書に基づき啓示の真理を扱う啓示神学の立場によるものではなく、自然理性に基づく自然神学の見地から理解される神であった。したがって、デカルトの神の存在証明を理解するのに聖書や啓示の真理が前提される必要はなく、それはあくまで自然理性によって哲学的に理解できるというわけである。

◆自然法則の理念

デカルトは『省察』において神の存在証明を展開し、神の存在から「神の誠実性」を根拠に「私が明晰判明に理解するものほすべて必然的に真である」という「明証性の規則」を確立する。もしわれわれが明晰判明に理解するものに関して誤るとすれば、それはわれわれの作者である神は誠実でないということになってしまふ、というわけである。

それでは、神の存在証明が果たされ、「明証性の規則」が確立されたところで、デカルトの形而上学は新たな数学的自然学の構築ということにどうかかわるのだろうか。

彼は確信された神にあらゆるものが依存しており、数学的真理のような明晰判明な知識の確実性や真理性そのものも、実は、神を作者（創造者）とすると明言している。「明証性の規則」自体が神の創造に根拠づけられるのである。ここに数学的真理をも創造したとする「永遠真理創造説」の神が確立されることになる。

このことは、神の存在証明が果たされ、神の誠実性に基づく明証性が設定されることにより、「物質的事物（物理的対象）の本質」を数学的に規定できるということを意味する。第一に「明晰判明に認識するもの」ということでデカルトが考えているのは、純粹数学の対象（数論や幾何学の対象、特に幾何学的延長）ということであり、第二に、それが「真である」というのは、彼の場合、そのようなものを神は現実に物理的自然に創造しうる、ということだからである。われわれが知性によって明晰判明に理解する数学の対象は、物理的自然を構成するものとみなしてよいというわけである。

このようにデカルトの永遠真理創造説による自然学の基礎づけという構図は、神が数学的真理を創造し、それを一方で人間知性のうちに刻印し、他方でそれによって物理的自然の法則を構成した、というものであった。それゆえ、人間は、自らの知性に与えられた数学的对象の觀念にしたがって、物理的自然の構造の探究に邁進してよいということなのである。

すでに述べたように、ガリレオは運動の中に数学的規則性を発見したが、それは自然界においては近似的に成立するものであると考え、厳密に成り立つことの根拠は与えなかった。一方、デカルトは、宇宙を創造した神が立法者として破ることを許さない掟・法律を自然界に課したのであると考えた（永遠真理創造説）。その掟が自然法則に他ならない。法則にしたがって自然は成立するというわけである。物体は能動性を一切剥奪されたため、運動そのものを物体が生み出すということはありえない。したがって、神こそが「運動の第一原因」であり、その神の不変性により「宇宙のうちに常に同一の運動量を保存している」ことになる。

こうしてデカルトは、神の不変性を根拠とする「全運動量の保存」という大原則を掲げて、三つの自然法則を提示する。第一の自然法則として「状態の保存」（慣性概念）という考え方を提出する。外的原因が加わらなければ

ば、物体の形・静止・運動はその状態を変えない。ここで重要なことは、運動が「状態」とされたことであり、「いったん動かされたものはいつまでも運動し続ける」こと、つまり、慣性運動が確立されたことである。第二の自然法則として、慣性運動の直線性を主張する。すなわち、慣性に従う基本運動は直線運動であるというものである。それは各瞬間ごとに状態を保存する神（連続的創造）の単純性によって根拠づけられている。ガリレオの「円慣性」に対して、ここに「直線慣性運動」の概念が成立する。

この法則から、デカルトは円運動の分析を試み、円運動を接線方向の慣性運動と円の中心からの遠心力によって合成しようとした。このことから、円運動しているものは常に中心から遠ざかろうとする傾向があると結論されることになった。しかし、その遠心的傾向を数学的に定式化する仕事は、ホイヘンスやニュートンに残された。さらに第三の自然法則として、デカルトは運動量の保存則に基づく二つの物体の間の「衝突の法則」を展開する。物質即延長のテーゼによれば、真空は存在せず、物体は常に他の物体と衝突していることになる。したがって、衝突論は自然の基本的振る舞いを理解する上で、極めて重要な場面を提供したことになるが、デカルトの提出した七つの衝突規則は、最初の一つを除いて、すべて不備なものであった。しかし、三つの自然法則のうち、第一と第二の法則は一つにまとめられ、近代力学の根本法則としての「慣性の法則」が成立することになるのである。まさに、法則に律せられた自然という観念を仕上げたデカルトの貢献は大きかったと言える。

三、機械論的自然観の形成

◆巨大な機械時計としての世界

デカルトの自然学の体系は、それ以前に支配的であったアリストテレスの自然学を決定的に解体するとともに、

その後の自然学を方向づけ、近代の自然観を定めることになった。物理的宇宙体系が、秩序ある有機的宇宙ではなしに、幾何学的延長のもとでのみ理解される、まさに等質の無機的宇宙とみなされることになったわけである。デカルトによれば、神が無から自然法則と物質を創造し、物質に運動を与えた。その後、構成された自然法則に従って世界は動いてきたのである。世界は巨大な機械になぞらえられる。神という時計細工師が材料をすべて取りそろえ、世界時計を造り、そのネジを巻いて動かした。この時計は、与えられた規則に従って、与えられたゴールに向かってひたすら自動的に動き続ける。

思惟する存在である人間を唯一の例外として、犬などの動物も精巧にできた機械に他ならない。機械論的自然観とは、このように自然を機械とみて、物質と運動の二つだけから説明しようとするものであり、そこには神秘的なものは一切存在しないとするのである。

天体の運行は巨大な渦巻運動の結果であるとされ、重力というものもそれ自体が存在するのではなく、付近の物質との遠心的傾向の差とみなされた。光とは、光の粒子のスピンのことであり、そのスピン運動の大小に応じて、色に名前が付けられ、色そのものがモノの側に存在するわけではないのである。ルネサンスにおいて魔術的なものとされた磁気現象は、物質同士の「共感」や「反感」によって生ずるのではなく、微小な「右ネジ粒子」と「左ネジ粒子」の運動の違いに由来すると考えられた。このようにデカルトは、すべての自然現象を物質と運動とで説明するプログラムを創始したのである。

◆ニュートンの力学的世界観

ガリレオとデカルトの影響を受け、数学的自然学を完成したのがニュートンであった。ニュートンは、科学史

上最高傑作の一つとされる主著『自然哲学の数学的諸原理』（通称、『プリンキピア』、一六八七年初版刊行）の第一巻冒頭で、物体の運動理論に関する基本概念について説明している。そこでは、まず八つの定義（物質量、運動量、内在力、加えられた力、向心力、向心力の絶対的量・加速的量・運動的量）を述べた上で、以下のような三つの「公理または運動の法則」を提示する。

法則一 あらゆる物体は、加えられた力によってその状態を変えることを強いられない限り、その静止あるいは直線上の一樣運動の状態を維持する。

法則二 運動の変化は加えられた運動力に比例し、その力が加えられる直線にそって生じる。

法則三 作用に対して、反作用はいつも反対で等しい。また二つの物体の作用はいつも互いに等しく、反対方向を向いている。

法則一は慣性の法則、法則二は運動方程式、法則三は作用・反作用の法則を表しているとみなされる。ニュートンの新しさは、機械論的自然観に力の考察を導入した点にある。

三つの運動法則は、本質的には力の法則である。しかし、やや専門的で本題とも多少逸れるが、法則二は、必ずしもわれわれの考えている運動方程式 $F=ma (=dnu/dt)$ を表しているとは言えない、ということに注意する必要がある。すなわち、法則二が対象としているのは「運動の変化」であり、運動の変化の割合ではないということである。

さらに、ニュートンは、『プリンキピア』において現代のように運動方程式（微分方程式）を積分することによ

って物体の運動の軌道を求めたのではなかった。彼はすべて古代ギリシャの幾何学的スタイルで議論しており、一部の例外を除いて青年期に創造した微分積分法は用いていないのである。

一般にニュートンが古典力学の基礎を築いたと言われ、そのため今日では古典力学は「ニュートン力学」とも呼ばれていることから、「ニュートン力学」がニュートンの『プリンキピア』とともに成立したかのようになっている。しかし、一八世紀の科学者たちは「ニュートンの運動法則」が力学体系の出発点であるとはみなしていない。実際、ニュートンの運動法則が力学体系の基礎として認められるのは『プリンキピア』よりもはるかに後のことであり、そのときには法則の内容自体もニュートンの述べたものとは大きく変わっていたのである。つまり、ニュートンが古典力学の創始者として認められるのも一九世紀後半のことであり、こうしたニュートン評価は歴史的に形成されてきたのである。

本題に戻ろう。いずれにしても、ニュートンによれば、すべての自然科学的問題は運動現象から「自然の諸力」を探求し、見出されたその力から他の運動現象を論証することができる。彼はそれを実際にうまくやり遂げた。惑星の楕円運動（ケプラーの第一法則）から、質量の積に比例し距離の二乗に反比例する力（万有引力、重力）を導き出し、逆にその力の概念を使って、天上界の惑星・衛星・彗星の運動を数学的に導き出したばかりでなく、地上界の落下体・投射体・潮汐の運動も説明した。こうしてニュートンは万有引力理論に基づいて運動法則を定式化することによって、いわゆる地上と天上の運動の数学的法則を統一的に扱う力学の理論体系を構築したのである。アリストテレス的な世界はここで最終的に放逐され、力学的な世界がそれに取って代わったわけである。

しかし、デカルト派にとつては、ニュートンによる重力概念の導入は機械論的自然観に問題をもたらずものと映った。距離を隔てて働く力（遠隔作用力）は、何かしら「神秘的な能力」（隠れた性質、occult quality）を物体

に認めるものだったからである。確かに、重力の作用する数学的原理は明らかにされたが、重力そのもの、あるいは「重力の原因」について、ニュートンは表向きには沈黙を守った。

彼自身は重力を現象の示す「明らかな性質 (manifest quality)」であるとし、近接作用の機構を解明しようと模索したが、それはうまくゆかなかつた。むしろわれわれにとっては驚くべきことであるが、ニュートンは重力を非機械的な原因とみなし、絶対的空間をいわば「神の感覚中枢」であるとして、重力の存在・作用の原因を神の普遍性に求めたのである。そのことについて簡単に触れよう。

一六七〇年代からニュートンはデカルトの自然哲学（特に、機械論的哲学）にいわば反逆の姿勢を見せ始める。ニュートンによるデカルトの自然哲学に対する最も根本的な批判は、デカルトの自然学に特徴的なテーゼ、すなわち物質と延長空間との同一視（「物質即延長説」）に対するものであった。さらにニュートンのデカルト批判は「永遠真理創造説」にまで及んでいる。

ニュートンはデカルトの『哲学の諸原理』の、主として第二部、第三部に見られる運動、延長、空間などの基礎的概念への批判を目指し、同時にそれはニュートン自身の運動学研究の形而上学的基礎づけともなっている。物質と空間を同一視するなどということはとんでもない謬見である、とニュートンは考えた。

彼はデカルトの代わりにケンブリッジ・プラトニストの一人であるヘンリー・モア、そして原子論哲学者ガッサンディに依拠しようとしたのである。「モアによって代表される思想の流れは、ニュートンのデカルトに対する熱を冷ました」というわけである。ニュートンはウォルター・チャールトンの『エピクロス・ガッサンディー・チャールトンの自然哲学—原子仮説に関する自然科学の構造』を通じてガッサンディの思想に触れ、その源流であるエピクロスやセクストス・エンペイリコスをも読んでいた。ニュートン研究者のウエストフォールによれば、

「ニュートンを機械論哲学へ導いたのはデカルトだったかもしれないが、彼は時経ずして原子論へ乗り換えたのだった」。

ニュートンはデカルトの運動と場所に関する相对主義的概念を否定し、絶対運動と絶対空間の概念を提起する。ニュートンの空間概念は、その性質から、以下の五つの特徴をもつとされる。

- 一、空間は三次元連続体である。
- 二、空間の広がりは無限である。
- 三、空間の諸部分の位置は不変である。
- 四、空間は慣性系を構成する。
- 五、空間は神の本質的屬性である。

ニュートンにとって、空間はあらゆる種類の、あらゆる大きさの図形をその内に可能的に包含し、そこには一定の関係、すなわちユークリッド幾何学あるいはその他の数学が成立するものであった。また、デカルトとは異なり、ニュートンは無限と無限を区別せず、世界は有限、空間は無限であるとする。そして、彼にとっては空間よりも時間の方が先に知られているものであったのである。

また、空間と神の関係について、ニュートンは手稿「重力について」の中で、次のように述べている。

空間は存在の存在である限りの性質である。空間と何らかの仕方に関係づけられないものは存在しないし、

また存在し得ない。神はいたるところに存在し、創造された精神はどこかに存在し、そして物体はそれが満たしている空間中に存在している。(中略)したがって、空間は存在の最初の実在の流出結果である。というのも、何らかの存在が措定されたとき、空間は措定されているからである。

このように、ニュートンは空間を神学的に基礎づけているのである。空間は「永遠で不変の存在から流出する結果である」から、もし空間が存在していなかったならば、「神はそのときにはどこにも存在していなかったことになってしまう」というわけである。このような彼の空間についての説明は、いわば神の感覚中枢としての本質的属性についての説明であるから、確実なものとして可能であるが、必然的ではなく神の意志によって存在している物体については、その説明はより不確実であるということになる。すなわち、人間は物体についての完全な知識を最終的にはもちえない、とニュートンは考えたのである。

彼はいわゆるガッサンデイ主義者として、懐疑主義的知的態度を示していた。ここにニュートンがデカルトの「物質即延長説」を拒否した理由があった。ニュートンは、神の属性としての空間と被造物にすぎない物体の截然たる分離を図ったと考えられるのである。また、ウエストフォールも指摘しているように、ニュートンの機械論的哲学批判の動機に彼の鍊金術研究が決定的な役割を演じたとも見られる。

◆古代への畏敬と鍊金術研究

ニュートンがケンブリッジの学生として取り組んだ初期の数学研究は、ほとんど当時最新の代数解析の知識を取り入れた著作に基づいていた。未熟な若い数学者として、彼はデカルトやジョン・ウォリスを模範として歩ん

だのである。しかし、一六七〇年代中頃から、ニュートンのデカルト批判は数学の分野にも向けられることになる。

三〇代半ばのニュートンは、デカルトの『幾何学』から古代ギリシャ数学、とりわけアレクサンドリアの数学者パッポスの『数学集成』に強い関心を移していくのである。ニュートンが古代の幾何学者たちに畏敬の念を抱くようになったことを、『プリンキピア』第三版を編集したペンバートンは次のように証言している。

彼らの眼識や証明形式について、アイザック卿（ニュートン）はいつも自分は大いなる賞賛者であると公言しておられた。私は嘗て、さらにもっと厳密に彼らを踏襲しなかつたとして、自分自身を責めておられたり、数学の勉強を始めた頃、（中略）エウクレイデスの『原論』を注意力をもって考察もしないで、デカルトや他の代数学の著者たちの諸著作に取り組んでしまった自己の過ちを後悔しておられるのを聞いたことがある。

一六八〇年以降、ニュートンは決して再びデカルトへのいわば知的恩義に言及することはなかった。彼はデカルト幾何学を「数学に不器用な人たちの解析」と呼ぶことさえしたのである。

ニュートンが古代のテキストを考察し始めたのは、必ずしも数学関係のものだけではなかった。近年の草稿に基づくニュートン研究によって、ニュートンは数学、力学、光学以外に錬金術や神学的研究にも全精神を傾けていたことが判明している。

ニュートンはケンブリッジ・プラトニストたちの基本路線を哲学的に語ることで満足せず、それを実行に移すために錬金術の研究へと向かった。というのも、錬金術は「能動的原理」について論じていたのみならず、そ

これらの働きについての「実験」に基づく証拠を与えるとも主張していたからである。ニュートンが能動的原理として重力概念を形成していく過程に、錬金術の能動的原理が概念的導引として役立つものと考えられる。

しかし、確かにニュートンはデカルトを激しく批判し拒否したが、錬金術をデカルトの機械論哲学に完全に取って代わるものと考えていたとは思えない。ニュートンは機械論哲学のデカルトに次ぐ、いわば第二世代に属するのである。彼は錬金術研究を進めるなかで、終始物質の粒子論的観点を保持し続け、機械論哲学とのある種の調和・統合を模索していたと考えられる。後にニュートンは、個別粒子の機械的性質のうちには席をもたない、いわば超機械論的な「遠隔作用による重力」という概念に到達した。彼がこのような力学の新しい概念に到達するのも、錬金術研究の延長上のことであると思われるのである。

四、一八世紀以降における展開

◆ニュートン・パラダイムの整備と拡充と修正

ニュートンは数学的自然学のための強力な数学的武器となる「微分積分学」を独力で作り上げたが、前述したとおり、『プリンキピア』はギリシャ以来の幾何学的形式で書かれていた。それを解析学的に書き換えて使いやすくする仕事が一八世紀以降、「数学の王者」の異名をもつレーオンハルト・オイラーなどによってなされ、ジョゼフ・ラグランジュの『解析力学』によってほぼ完成した。オイラーはライプニッツ流の無限小代數解析の精神を若くしてマスターし、力学をはじめとする多くの数学的諸科学の分野でめざましい結果を生み出した。また、一七八七年にフランス政府からパリの科学アカデミーへ迎えられていたラグランジュは、翌年の一七八八年、ニュートンの『プリンキピア』刊行一〇〇周年を記念するように、『解析力学』を刊行したのである。

よく話題にされることであるが、英国では『プリンキピア』刊行の翌年に名誉革命が起こり、フランスでは『解析力学』刊行の翌年にフランス革命が勃発する。ラグランジュはオイラーに最も期待をかけられ、パリの科学アカデミーに迎えられる以前、オイラーの後任として一七六六年から一七七年までベルリンの科学アカデミーで活躍している。『解析力学』もベルリンで書き上げられたものである。これにより力学現象一般が、単一の数学的原理（解析力学の基礎方程式）から統一的に説明できるようになった。運動量保存則、角運動量保存則、最小作用の原理などが数学的に演繹できるばかりでなく、流体現象についても力学的な体系的展開が可能になったのである。

一七八九年のフランス革命とともに起こった近代科学の飛躍は、今日、一七世紀の科学革命と区別して「第二の科学革命」と呼ばれる。トーマス・クーンは『本質的緊張』の中で、次のように述べている。

一八〇〇年から一八五〇年の間のある時期に、物理学の多くの部分、特に物理学として知られている一群の研究分野において、研究の性格における重要な変化が生じた。（数学化された理論の文脈で行われた定量的な実験様式が、偉大な有効性をもつという認識への）この変化の故に、私は、ベーコン的物理学諸科学の数学化を、第二次科学革命の一側面であると呼ぶのである。

まさに世界観としての機械論そのものが抽象的な数式による世界記述として革命的に変貌するのである。

ピエール・シモン・ラプラスは主著『天体力学』五卷（一七九九―一八二五年）において、ニュートンが神の手に委ねた太陽系の安定性の問題を数学的に証明するのに成功し、力学の世界を力学法則だけで理解可能なものとした。こうしてニュートン力学の適用範囲が拡大していくのである。

適用領域外にあった熱現象も、ミクロな粒子（分子）運動のマクロな力学的効果として扱われるようになり、統計力学として一九世紀末にはニュートン・パラダイムに組み込まれた。その中から新しいタイプの法則として、エネルギー保存法則が定式化され、エントロピー増大の法則も発見された。これらを熱力学という学問形態に集大成したのはルドルフ・クラウジウスである（一八六五―一八七〇年）。またニュートンの扱わなかった電気や磁気の現象は、万有引力と同型なクロウンの法則の確立（一七八五年）によりその研究が始められ、クリステイアン・エールステズによる電流の磁気作用（一八二〇年）やマイケル・ファラデーによる電磁誘導（一八三二年）の発見を経て、その理論は一八六〇年代にはジェイムズ・マックスウェルにより電磁気学として完成された。マックスウェルの電磁場の概念は、物質と運動と力のみで自然を理解しようとしてきた伝統に、新たな第四項として「場」の概念を導入し、ヴェクトル場の数学的法則の形で定式化され、近接作用として理解していく道を開いた。さらに光が電磁エーテルの振動であることがハインリヒ・ヘルツにより確認され（一八八八年）、光学は電磁気学に組み込まれた。

また発展の遅れていた化学については、ジョン・ドールトンにより近代的な原子論が提出されてから（一八〇八―一八〇九年）急速に発展し始め、種々の化学物質の性質と化学反応の理解が進められ、ドミートリー・メンデレーエフの周期律（一八六九年）による無機化学の体系化を経て、物理化学が成立することになった。それに伴い、生物を化学的に研究する手法が生化学として発展し、特に核酸の研究は分子生物学の成立を導いた。核酸が遺伝子であることが明らかにになり、その一種であるDNAの二重螺旋モデルが提出される（一九五三年）に及んで、生物学の一部は機械論的な描像に組み込まれるようになった。

こうしてニュートン・パラダイムは種々の領域に拡張されていったが、一九世紀末にX線や放射線が発見され、

その研究の中から、パラダイムの転換を迫る「新しい物理学」が二〇世紀に出現した。相対性理論と量子力学である。

「特殊相対性理論」とは、「すべての物理法則は、任意の慣性系において、いつも同じ形で表現される」ことを要請するものである。ニュートン力学はガリレオ変換に対して不変であるのに対し、電磁気学はより一般的なローレンツ変換に対して不変であった。この二つの理論の矛盾を解消したのがアルバート・アインシュタインの理論であった（特殊相対性理論、一九〇五年）。これによって、空間・時間・運動・同時性などの基礎的概念が変更を余儀なくされたのである。

また加速度を含む「任意の座標系」への拡張は一九一六年に定式化された。その一方、原子の内部構造の研究がマックス・プランクやニールス・ボーアによって行われ、一九二〇年代後半にエルヴィン・シュレーディンガーやヴェルナー・ハイゼンベルクによって量子力学が完成した。粒子と波動の二重性や観測問題という新たな問題が出てきたばかりでなく、位置と運動量あるいは時間とエネルギーの「不確定性関係」が示され（一九二七年）、古典的な因果律が崩れていることが明らかになった。

また素粒子論の研究が進み、二種類の力（核力などの「強い力」、ベータ崩壊などに見られる「弱い力」）が存在することが明らかにされ、「重力」、「電磁力」と合わせ、自然界には四種類の力があることがわかった。電磁力と弱い力は電弱力理論の中に統合されたが（一九六七年）、さらに強い力も組み込んだ「大統一理論」が構想されている。重力の統合についても現在研究が進んでいる。そうした構想そのものが、通常の自然現象を超え、実験的検証にかからない事態すらも対象とするようになったことを示している。

また時空の四次元空間を超え、一二次元の空間すらも要請する理論が提出されている。ここに至れば、数学的

自然科学は数学の導きなしには展開できないことになる。あるいは、高橋憲一氏が指摘するように、自然界に存在する法則を数学的に読み取るという関係が逆転して、数学的法則（あるいは、より一般的な変換に対して不変な式や理論）に従って自然界を読み取る「自然科学的数学」とすら言うべきものに変貌しつつあるといえるかもしれない。

◆「専門分化と「科学者」の誕生

理論的転換ばかりでなく、科学研究そのものの在り方も大きく変貌した。一七世紀にフランシス・ベーコンは「知は力なり」のスローガンに見られるように、科学による自然支配の理念を提出し、それを実現するためには自然研究者の共同作業が不可欠であると主張していた。このベイコンの理念は科学研究の制度化という形で実現した。

その先鞭をつけたのがフランス革命期に創設されたエコール・ポリテクニク（その前進が一七九四年開校、翌年エコール・ポリテクニクと改称）である。ここでは数学・科学を基礎とする教育を施し、科学知識をもった土木技術者と軍事技術者が養成された。この新しい教育制度がモデルとなり、フランスに各種の専門学校が創立されたばかりでなく、一八二〇―三〇年代のドイツでも技術者養成の高等技術学校（Technische Hochschule、略称、テーパー）が各地に設立された。今まで科学研究とは無縁であった大学も再編され、まず理学部、後には工学部がその組織に組み込まれるようになった。

こうした専門分化の過程と並行して、第二の科学革命の中心をなす科学の専門職業化が進み、大学や研究所で「俸給を得て研究に専念できる研究者」が現れ始めるのである。一八世紀までは、今日の科学者に相当する知識人

のことは、自然哲学者 (natural philosopher) あるいは知者 (savan) と呼ばれていたが、一八三四年にケンブリッジ大学のウイリアム・ヒューエルが、ラテン語 scientia と英語の接尾語 -ist から「科学者 (scientist)」なる造語を行った事実は、科学の専門分化と職業化の過程が進行しつつあった状況と見事に対応している。しかし、このサイエンティストという呼称の、*エント* のもつ「くしかできない」という否定的印象が、多くの「科学者」たちの逆鱗に触れたため、この新用語は半世紀以上当事者の間では使われなかった。OED によれば、一九一四年まで、「サイエンティスト」でなく、「科学に通じた人」(a man of science) を採用していたのである。

一七六〇—一八三〇年にかけて進行していた英国の産業革命の技術革新（紡績・化学・製鉄・動力機関・交通運輸など）は伝統的な職人階層によって担われたものであったが、機械制大工業の成立を導き、科学者が産業界に進出していく社会的素地を作ったことも見落とせない点である。経済競争に勝ち抜くために、各企業が自前の研究所を作って「科学の産業化」を推し進めたばかりではない。二〇世紀の二度にわたる世界大戦において毒ガスや原子爆弾の開発がなされたように、国家による科学動員が進められ、「科学の国家管理体制化」が現在も進行中である。科学者の社会的責任がここでもさに問われてくるのである。

五、おわりに

これまでわれわれはデカルトの数学的自然学についてその概要を見てきた。その一貫した自然学体系から、まさにデカルトは近代科学の形成にとって不可欠の思想家であったということがわかる。またニュートンの『プリンキピア』はガリレオとデカルトの自然学思想を体現してみせた近代科学の最高傑作であったといわれる。一般に科学史上の最高傑作といわれる著作ほど、読者も少なく、それを読みこなすことも困難を極める。実際、ニュ

トンの当時、『プリンキピア』の技法的な内容を理解できた学者は十指に満たなかった。ニュートン思想は決して一枚岩ではなく、その十全な理解には相当難渋する。しかし、いわゆる科学時代に生きるわれわれの現代的危険性を抉る試みにとって、現代のニュートン研究は大きなヒントを与えてくれるものと筆者は考えているのである。

紙幅の関係で今回は、近代自然科学とキリスト教との関わり、とりわけ「近代の形成期においてニュートン神学がいかなる影響を及ぼしたか」について触れられなかった。また、「科学と人間と社会の関係について」の考察もまだわれわれに残されている。次稿ではこれらのことについて模索することにしよう。

【参考文献】

- (1) トーマス・クーン『科学革命の構造』中山茂訳（みすず書房、一九七二、原著初版一九六二）。
- (2) アイザック・ニュートン『ニュートン—自然哲学の数学的諸原理』河辺六男訳（世界の名著二六）（中央公論社、一九七一）。
- (3) Isaac Newton, *Isaac Newton's Philosophiae naturalis principia mathematica*, the Third Edition (1726) with Variant Readings, eds. A. Koyre and I.B. Cohen with the assistant of A. Whitman, 2 vols. (Cambridge, 1972).
- (4) R・S・ウェストフォール『近代科学の形成』渡辺正雄・小川真里子訳（みすず書房、一九八〇、原著初版一九七二）。
- (5) 吉田忠編『ニュートン自然哲学の系譜』（平凡社、一九八七）。
- (6) 古川安『科学の社会史…ルネサンスから二〇世紀まで』（南窓社、一九八九）。
- (7) 佐々木力『近代学問理念の誕生』（岩波書店、一九九二）。
- (8) R・S・ウェストフォール『アイザック・ニュートン』I、II、田中一郎・大谷隆昶訳（平凡社、一九九三、原著初版一九八〇）。
- (9) エルンスト・カッシーラ『英国のプラトン・ルネサンス』花田圭介・三井礼子訳（工作舎、一九九三、原著初版一九五三）。
- (10) B・T・ドップス『ニュートンの錬金術』寺島悦恩訳（平凡社、一九九五、原著初版一九七五）。
- (11) 佐々木力『科学論入門』（岩波新書、一九九六）。
- (12) セクストス・エンペイリコス『ピュロン主義哲学の概要』金

科学史から見る近代（その二）

- 山弥平・金山万里子訳（西洋古典叢書、京都大学学術出版会、一九九八）。
- (13) 高橋憲一「近代自然科学の成立」、『人間と文化』根井豊・新島龍美編（九州大学出版会、一九九八）所収、四一―七五頁。
- (14) トーマス・クーン『科学革命における本質的緊張―トーマス・クーン論文集』我孫子誠也・佐野正博訳（みすず書房、一九九八、原著初版一九七七）。
- (15) 伊藤和行「古典力学における運動法則の歴史性―ニュートンの第二法則をめぐって」、『哲学研究』第五七〇号（二〇〇〇）、五三―七八頁。
- (16) B・T・ドップズ『錬金術師ニュートン―ヤヌスの天才の肖像』大谷隆昶訳（みすず書房、二〇〇〇、原著初版一九九二）。
- (17) 小林道夫『デカルト哲学とその射程』（弘文堂、二〇〇〇）。
- (18) 『デカルト著作集』全四巻、増補版復刊、三宅徳嘉ほか訳（白水社、二〇〇二）。
- (19) 佐々木力『デカルトの数学思想』（東京大学出版会、二〇〇三）。
- (20) 高橋秀裕『ニュートン―流率法の変容』（東京大学出版会、二〇〇三）。

〈キーワード〉

数学的自然学、機械論的自然観、力学の世界観、近代科学