


# Hirao School of Management Review

---

 CUBE 西宮 マネジメント創造学部

Hirao School of Management

## 本文情報

---

出版物タイトル： Hirao School of Management Review  
巻： 第5巻  
開始ページ： 25  
終了ページ： 36  
原稿種別： 論文(Article)  
論文タイトル： 教養としての科学—Newton 力学/古典電磁気学/量子力学と「技術」との関連について—  
第一著者： 寺内衛  
第二著者： 寺内かえで  
第一著者所属： 甲南大学マネジメント創造学部 准教授  
第二著者所属： 奈良女子大学理系女性教育開発共同機構 特任講師

## 教養としての科学

—Newton 力学/古典電磁気学/量子力学と「技術」との関連について—

寺内 衛\*・寺内かえで<sup>†</sup>

### 【要旨】

「科学」と「技術」の関係の変遷を、17世紀末のNewtonによる古典力学—19世紀後半のMaxwellによる電磁気学の体系化—20世紀の量子力学の誕生、という自然のありようについての知見の拡がりに関する主要な転換点毎に考察し、「科学」は常にその時代毎の「技術」に依拠して拓かれ、新たな“知見”が「技術」を資するようになるまでには有限の時間が必ず必要とされる、という結論を得た。また、“定量予測可能性”をNewton力学以降の“近代科学”を特徴付ける性質として提案すると共に、『“身の丈を超える科学”を担う“コスト”』という視点の重要性についても指摘する。

### 【キーワード】

Newton 力学, 電磁気学, 量子力学, 定量予測可能性, 因果律

---

\* 甲南大学マネジメント創造学部 准教授

<sup>†</sup> 奈良女子大学理系女性教育開発共同機構 特任講師

## 1. はじめに

本小論では、「科学」と「技術」の関係を理解するために、17世紀末の Newton による古典力学 (Newton 力学) – 19世紀後半の Maxwell による電磁気学の体系化 – 20世紀の量子力学の誕生, という自然「科学」 (= 自然についての知識全体) の変遷を振り返り, そのそれぞれの段階で「技術」が果たしてきた役割を考察する. また, 「科学革命」以降の「科学」 (= 近代科学) の特徴を, それ以前の「科学」との比較を通じて定義することも試みる. なお, 本稿でも前稿<sup>1</sup>と同様, 「技術」は“手の技 (わざ)” = “単なる理念ではなく, 実際に具現化する技量”を表わすものとする.

## 2. Newton 力学

1687年<sup>2</sup>に刊行された“*Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*” (自然哲学の数学的原理) において Newton が述べたものは何だったのであろうか. 一言でまとめれば, Archimedes 以来の“静力学” (釣り合い, てこの原理, 浮力の原理; すなわち「機械学」) の伝統の下に, Galilei による“落体の法則” (1604) と Kepler による“惑星運動の3法則” (1609-1619) を統合した“Newton 力学 (古典力学)”の完成と, その記述に用いられる手段 (= “言語”) としての“微分積分学” (数学の一部門) の創設である. Newton 力学による自然観 (= 自然のありようについての記述) は, 数学言語を用いた次の表現に集約される:

$$m \frac{d^2 \vec{x}}{dt^2} = \sum_i \vec{F}_i \quad (\text{Newton の運動方程式}) \quad (1)$$

ここで,  $m$  は物体の質量 (= 物体の動きにくさを表わす係数),  $\frac{d^2}{dt^2}$  は時間  $t$  に関する

2次導関数,  $\vec{x}$  は物体の位置を表わす位置ベクトル (ある任意の基準点から見た物体の位置を表わす量で, 大きさ及び方向の双方を有する),  $\sum_i$  は総和を表わす記号 ( $i$  個

のものを順次足していく),  $\vec{F}_i$  は物体に働く力を表わすベクトル量である. 位置の時間

変化の割合 (=  $\frac{d\vec{x}}{dt}$ ) を**速度**, 速度の時間変化の割合 (=  $\frac{d}{dt} \left( \frac{d\vec{x}}{dt} \right) = \frac{d^2 \vec{x}}{dt^2}$ ) を**加速度**,

<sup>1</sup> 寺内衛, 寺内かえで『“科学” “リテラシー” に関する一考察』『政経研究』第93号第71–78頁 (政治経済研究所, 2009) .

<sup>2</sup> 以下, 科学的な人名及び年号は、『理化学辞典第5版』 (岩波書店, 1998) に依る.

とそれぞれ定義すると、上式は、

「物体の有する**加速度**は、その物体に加わる**力の合力**の方向であって、その合力の**大きさに比例し、物体の質量に反比例する**」という**実験事実**(=自然が有する性質)を**数学言語**によって表現したもの

に他ならない。(1)式のような表記では、右辺に原因(=物体に働く力)を、左辺に結果(=物体が有する加速度)を書くことが多いが、これは因果律を踏まえてのことである。また、右辺が 0 になる場合は物体の加速度がゼロということになるが、これは、Archimedes の静力学(=力が釣り合っている場合)と Galilei の“等速度直線運動”とに対応している。

(1)式は、数学的には時間  $t$  に関する 2 階の微分方程式であり、数学の教えるところでは、初期値  $(\vec{x}_0$  及び  $\left. \frac{d\vec{x}}{dt} \right|_0$ 、すなわち時刻  $t_0$  における位置及び速度)を与えれば、解が一意に決まる。すなわち、初期値の組(=時刻  $t_0$  における位置及び時刻  $t_0$  における速度)を与えれば、その物体の時刻以降の運動は一意的に決まることになる。この“定量予測可能性”こそが、**Newton 力学をそれ以前の静力学とは本質的に異ならしめている**<sup>3</sup>ものである。つまり、**重力に従った運動をしている体系においては、現時点での観測を通じて将来が予測可能である**、という自然の性質が明らかになったのである。この定量予測可能性は因果律へ「定量性」を付与し、Galilei の始めた実証実験の手法と相まって、職人たちの伝承に任せられてきた技量=「技術」に「科学」が資することが原理的に可能になった。このような「科学」(=自然のありようについての定量予測可能

<sup>3</sup> この指摘は、科学史家による著作ではなされていない。例えば、J. D. バナールは、『歴史における科学』(鎮目恭夫訳)(みすず書房、1966)において、『(ニュートンの)真価は、物理的原則を量的に計算できる結果に転換して観察によって確かめられるようにするためと、逆にそういう観察から物理的原理へ到達するための数学的方法を見出したことにある』(第7章の9)と述べつつも、『万有引力の体系は当時ニュートンの最大の仕事と思われ、今日でも依然としてそうであるが、彼が科学の内外に与えた影響は、彼がこの結果を達成するに使った方法によってのほうがいっそう大きかった』(同)として微分積分学の創設をより評価している。村上陽一郎は、『文明のなかの科学』(青土社、1994)において、『すなわち、アリストテレス、プトレマイオスの地球中心説が、コペルニクスの太陽中心説に、アリストテレス的な運動論がガリレオ、デカルト、ニュートンの力学に、ガレノス流の生理学がハーヴィー以降の生理学に、それぞれ置き換えられる過程の集積が「科学革命」である、と考えられるにいたったのである』(第7章)としか述べていない。佐々木力は、『科学論入門』(岩波書店、1996)において、Newton の“自然哲学の数学的原理”について『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』(第2章)としつつも、『それは、二つの物体間の万有引力から、惑星の楕円軌道を導き出しただけでなく、彗星、月の軌道もすべて数学的に同様の軌道を描くことを計算してみせた。それだけではなく、林檎が地上に落下するのも同じ力のなせるわざであることを説き、ある物体の初速度を増大させてやれば、月と同等の人工衛星を打ち上げることすらできると述べた』(同)とするに留まっている。

性を有する知見)こそ, “近代科学” と呼ばれるべきもの<sup>4</sup>であると筆者は考える。

Newton 力学の有用性は今日でも揺らぐことは無いが (例えば, 7年の月日をかけて小惑星イトカワから帰還した「はやぶさ」<sup>5</sup>も, Newton 力学に従った軌道を描いてきた—もちろん, 多体問題<sup>6</sup>であるので解析的には解が無いが, 摂動計算によって十二分な精度が得られることは過去の宇宙開発の歴史<sup>7</sup>において実証済みである—), 17世紀末の「技術」との関係について以下の2点を指摘しておきたい:

- ・ Newton 力学の定式化がなされた直後には, この“近代科学”が「技術」を資することは皆無であった
- ・ Galileo の望遠鏡や 16世紀末の顕微鏡の発明から明らかなように, 17世紀には「技術」の進展が人類の知見の範囲を“身の丈”を超えたところまで広げつつあった

前者に関しては, バナールは「技術」の未成熟によるものとの見解を示している<sup>8</sup>が, 筆者は, 当時の大部分の「技術」が Newton 力学という“近代科学”を必要としていなかったことがその理由であると考えている。前述のように, Newton の運動方程式(1)は物体の運動の時間発展<sup>9</sup>を記述する。従って, 運動しない物体について考えるときは(1)式を用いる必要は特に無く, その時代の「技術」に既に採り入れられていた Archimedes 以来の静力学を活用すれば充分であったのである (Newton 以前に, 教会・

<sup>4</sup> 本稿ではその詳細を採り上げないが, “近代化学の父” (フランス語版の Wikipedia によれば, *père de la chimie moderne*) と呼ばれている A. L. Lavoisier は, 「化学反応の前後で, 反応物の質量の総和と生成物の質量の総和は同一である」という質量保存の法則を見出した(1774年)。具体的な例を挙げれば,  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$  (天然ガスの主成分であるメタンが完全燃焼すると, 二酸化炭素と水が生成される) という化学反応において, 16g (すなわち, 物質質量 1 mol) のメタンを使用すると 44g (物質質量 1 mol) の二酸化炭素が生成される, という関係が常に成り立つ。従って, 完全燃焼するメタンの質量が与えられれば, 生成する二酸化炭素の質量が正確に予測できることになる。本文中では Newton 力学が明らかにした自然の性質として“定量予測可能性”に言及したが, 物理学ではなく, 化学の分野において“定量予測可能性”に言及した Lavoisier が“近代化学の父”と呼ばれることから, “定量予測可能性”を有する科学的知見を「近代的」という表現で指し示すことは妥当であろうと筆者は考えている。

<sup>5</sup> <http://www.isas.jaxa.jp/j/enterp/missions/hayabusa/> 及び, [http://www.jaxa.jp/projects/sat/muses\\_c/](http://www.jaxa.jp/projects/sat/muses_c/)

<sup>6</sup> 例えば, 万有引力に従う太陽と地球と月の運動を記述する, というような, 相互作用をする複数のもの (三つ以上のもの) の運動を記述する問題 (岩波『理化学辞典』第5版の定義)。

<sup>7</sup> 例えば, 月への有人探査を行なった「アポロ計画」[http://www.nasa.gov/mission\\_pages/apollo/](http://www.nasa.gov/mission_pages/apollo/)や, 火星へ探査機を送った「ヴァイキング計画」[http://www.nasa.gov/mission\\_pages/viking/](http://www.nasa.gov/mission_pages/viking/)あるいは, 木星・土星の詳細な観測を行ない, 現在もなお太陽系外への飛行を続けている「ボイジャー計画」[http://www.nasa.gov/mission\\_pages/voyager/](http://www.nasa.gov/mission_pages/voyager/)などを参照。

<sup>8</sup> J. D. バナール『歴史における科学』には, 以下のような記述が見られる: 例えば, ニュートンは, 空気の抵抗を考慮に入れて弾丸の弾道を実際算出した。彼の方法は, 第二次世界大戦においてもまだ利用されていたのだが, そういう方法は彼の時代には実際には全然使い道がなかった。砲身は様でなく, 弾丸は砲身にぴったり合わず, 火薬の質と量は詰めるごとにちがいが, 大砲の照準は索とくさびで大ざっぱに人力で動かす以外の手段はなかった。(第7章の10)

<sup>9</sup> 「時間発展」という表現は, 種々の物理量 (例えば, 位置, 速度など) の時間的変化の様子を表わすために用いられる。

橋などの“身の丈”を超える土木建造物がそれこそ無数に作られていることは、多くの世界歴史遺産が存在することからも明らかであろう)。

後者に関しては、このような「技術」の進展が、“定量予測可能性を有すること”をその本質とする“近代科学”の発展とは無関係に起こっていることに注目すべきだと考える。そして、この「技術」の進展が、光学機器の改良に不可欠な“光学”という「科学」を生んだこと (Newton の死後刊行された著作『光学 (Opticks)』がその代表例)、さらに天文学の発展や微生物学・細胞学の発展を可能にしたことは、「技術」が人間の知見の範囲を拡げていくこと、すなわち、「技術」が「科学」を生み出す、という性質が“近代科学”誕生以前から存在していたことの証左である。実際、この時期以降、新たな「技術」の発明が新しい「科学」(特に自然科学)の発展を促す、という関係が続いていくことは銘記されるべきである<sup>10</sup>。

### 3. Maxwell による電磁気学の体系化

琥珀 (amber) の摩擦電気や天然磁石 (lodestone) が鉄を引きつける事実は紀元前より知られていた<sup>11</sup>が、電気の性質に関する科学は、Coulomb の法則の発見(1785)や Volta による電池の発明(1800)<sup>12</sup>を端緒として、19 世紀初頭から急速に発展した。Maxwell はこれらの自然の性質の体系化を試み、1864 年に Maxwell の方程式と呼ばれる以下の 4 つの方程式を発表した：

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_0 \operatorname{div} \vec{E} = \rho \quad (2) \\ \operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (3) \\ \operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (4) \\ \operatorname{rot} \vec{B} = \mu_0 \left\{ \vec{j} + \frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_0 \vec{E}) \right\} \quad (5) \end{array} \right.$$

(2)式は「電荷によって電場ができる」ことを示しており、これは Gauss の法則

<sup>10</sup> ちなみに、Newton 自身は光の性質を追究する目的で自ら鏡面を磨き、Newton 式反射望遠鏡 ([http://en.wikipedia.org/wiki/Newtonian\\_telescope](http://en.wikipedia.org/wiki/Newtonian_telescope)) を発明して実際に製作することもできたが、Galileo Galilei や Tycho Brahe / Johannes Kepler が天文学史上に残したものと比肩するような新たな観測結果は残していない。

<sup>11</sup> <http://en.wikipedia.org/wiki/Thales>

<sup>12</sup> 解剖しておいたカエルの脚が近くの起電機の放電で痙攣することを偶然発見した Galvani の実験(1790 年頃)を追試していったことが Volta による電池の発明に繋がった、という意味では、新たな科学が新たな技術を生み出したことになる。その後、Volta が発明した電池が電気に関する“制御された”実験を可能にし、新しい自然の性質の発見に繋がった (新たな技術が新しい科学を生み出した)。

(1835)と呼ばれているものである。(ρ: 電荷密度,  $\text{div}\vec{E}$ : 電場ベクトルの divergence (発散),  $\epsilon_0$ : 真空の透磁率)

(3)式は「磁気単極子は存在しない」という事実を表わしている。(div $\vec{B}$ ; 磁束密度ベクトルの divergence)

(4)式は「時間的に変化する磁場があると電場に渦ができるが、それは磁束密度の変化を妨げる向きである」という自然の性質を示しており、これは Faraday の電磁誘導の法則(1831)と呼ばれているものと Lenz の法則(1834)と呼ばれているものをまとめて表現したものである。(rot $\vec{E}$ ; 電場ベクトルの rotation (回転), 右辺; 磁束密度ベクトルの時間変化の割合)

(5)式は「時間的に変化する電場は、電流と同様に磁場に渦を作る」という自然の性質を表わしたものであり、一般化された Ampere の法則 (1822 年) の表現である。(rot $\vec{B}$ ; 磁束密度ベクトルの rotation,  $\mu_0$ ; 真空の透磁率,  $\vec{j}$ ; 電流ベクトル,  $\frac{\partial}{\partial t}(\epsilon_0\vec{E})$ ; 電場ベクトルの時間変化の割合<sup>13</sup>)

上記(2)~(5)式を組み合わせ得られる方程式

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta\vec{E} = \epsilon_0\mu_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \vec{E} \quad (6) \\ \Delta\vec{B} = \epsilon_0\mu_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \vec{B} \quad (7) \end{array} \right.$$

は、 $\vec{E}$  (電場) 及び  $\vec{B}$  (磁束密度) よりなる波動 (=電磁波) が、速度  $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}}$  で

空間を伝播していくことを表わす波動方程式である。なお、(6)式及び(7)式中の  $\Delta$  は

ラプラス演算子  $\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$  ( $x, y, z$ ; 直交座標軸) である。(6)式及び(7)式は時

間についての 2 階の微分方程式であり、前節において採り上げた Newton の運動方程式と同様に、初期値を与えればそれ以降の時刻に電磁波が伝播する様子を記述できる、すなわち、定量予測可能性を有している。このように、将来に関する定量予測可能性を有する点で、Maxwell による電磁気学の体系化は Newton 力学と同様に“近代科学”と呼ばれうるものであり、Newton 力学の対象ではなかった電気力・磁気力に関する自然のありようを記述している。この Maxwell による電磁気学の体系化によってもたらされた自然観 (=自然のありようについての記述様式) が、Newton 力学のそれと本質的には異なっていないこと、すなわち、Newton の運動方程式 (前掲(1)式) と数学的

<sup>13</sup> 変位電流と呼ばれる。

形式としては同一である、時間についての 2 階の微分方程式(6)及び(7)によって電磁波が表わされること、に留意されたい。なお、初期値を与えればその後の系の時間発展が一意に決まる、という考え方(=決定論)は、初期値を誰が与えるかについて何ら規定をしていないため、『神は言われた。「光あれ。」こうして、光があった。』(旧約聖書創世記第 1 章第 3 節, 新共同訳, 1987) というキリスト教的世界観と全く矛盾が無いことに注目すべきであると筆者は考える。17 世紀の Newton のみならず 19 世紀の Maxwell もが(どの程度意識していたのかは不明ではあるが) 数学を利用してキリスト教文化の伝統と矛盾しない世界観(=自然のありよう)を導き出していた、という事実は、相対性理論の提唱者である Einstein が量子力学による確率論的解釈を嫌って“神はサイコロを振らない”と言ったというエピソード<sup>14</sup>とも併せて、“宗教”の有する影響を看過しがちな我々日本人が敢えて意識すべき事項であると思う。

18 世紀から 19 世紀において電気力・磁気力が物理学の対象となり得た理由は、もちろんそれ以前の時代においては不可能であった実験装置が「技術」の進展によって製造されるようになったためである。つまり、この時代においても、「技術」の進展が新たな「科学」を生み出していたことになる。なお、Maxwell による電磁気学の体系化の帰結である“電磁波の存在”が実験的に確認されたのは 1888 年であり(Hertz の実験)、電磁波を利用した通信装置を Marconi が発明したのが 1895 年である。このように、最先端「科学」が「技術」になるまでには必ず時間遅れが存在している。このことは、“科学者”と“技術者”が異なる社会階層に属していること、すなわち同一人物では無いこと、を思い出せば以下のように自明である： 最先端の科学的知見を見出すのは科学者である。この科学者はその時点での最先端の「技術」を活用することができるが、見出した最先端の科学的知見を「技術」に適用することはできない。なぜなら、科学者は必ずしも技術者では無い、すなわち、全ての科学者が、「手の技」である技術を正当に伝承するための訓練を受けてきている訳では無いからである<sup>15</sup>。従って、科学者の見出した最先端の科学的知見を技術に翻訳して実現することが可能な技術者の存在が必要になり、この技術への翻訳とその実現に有限の時間がかかるため、最先端「科学」が「技術」に影響を与えるまでには必ず時間遅れが存在してしまうのである。この時間遅れは、上記電磁波の場合で少なくとも 20 年以上であり、“最先端”の科学的知見が「技

<sup>14</sup> [http://de.wikipedia.org/wiki/Gott\\_w%C3%BCrfelt\\_nicht](http://de.wikipedia.org/wiki/Gott_w%C3%BCrfelt_nicht)  
あるいは [http://en.wikiquote.org/wiki/Albert\\_Einstein](http://en.wikiquote.org/wiki/Albert_Einstein)

<sup>15</sup> 例えば、ニュートリノ天文学の開拓によって 2002 年にノーベル物理学賞を受賞した小柴昌俊東京大学特別荣誉教授に『カミオカンデ』による超新星からのニュートリノの観測を可能にしたのは、浜松ホトニクス株式会社で 20 インチ光電子増倍管を構成する巨大なガラス容器を吹き上げたガラス職人たちである ([http://www.hamamatsu.com/jp/ja/technology/projects/20inch\\_pmt/index.html](http://www.hamamatsu.com/jp/ja/technology/projects/20inch_pmt/index.html))。



術」に活かされている，という表現が適当であるとは思われない。

既に佐々木が指摘していること<sup>16</sup>であるが，18世紀から19世紀の産業革命の進展に合わせて“熱学”も発展した。容易に推察されるように，この“熱学”は，蒸気機関の発明の後になされた，蒸気機関の熱効率を向上させるための無数の技術的試行錯誤から得られた知見が体系化されたものである。つまり，**産業上の要請**（＝可能な限り少ない燃料によって可能な限り多くの仕事をさせることができる熱機関を実現したい）が，**それまでに知られていなかった自然の性質を明らかにし，新しい「科学」を誕生させた**のである。このことも，「技術」の進展が新たな「科学」を生み出していたことの一例である。加えて，蒸気機関の発明が人類に“身の丈”を超える“力”を与えて人馬によっては不可能であった重量物の運搬や移動を可能にし，そのような重量物を骨組みとした巨大建造物の建築を原理的に可能にしたこと，また，巨大建造物を実際に構成するために不可欠な強い素材（＝鋼鉄）に対する需要が生みだされて20世紀における自然の新たな性質の発見（＝量子力学の成立）の端緒を開いた，という視点を持つことは極めて重要であると筆者は考える。

#### 4. 産業上の要請から誕生した量子力学

これまで述べてきたように，新しい「科学」が「技術」に還元されるまでには必ず有限の時間を必要としている。これは，“科学者”と“技術者”とが異なることの必然である。これに対して，「技術」そのものは“技術者”による**不断の改良が可能であり，それ自体連続的に発達し得る性質を有している**。この点をきちんと認識しなければ，「常に科学の発展が技術の発達を導いてきた」という「科学上位・技術下位」的なステレオタイプの視点に縛られてしまう。また，「科学」及び「技術」の双方ともが人類の有する“知識”に基づいているため，基本的に，ある時点以前の「科学」/「技術」よりなる（知識）基盤にその時点で得られた新たな“知見”を追加していくという“**漸進性**”を有していることも理解しておかなければならない（もちろん，何らかのきっかけで忘れ去られてしまい，後年新たに再発見/再発明される事例も多くあるが）。ここで，以下のことに留意する必要がある：**新たな“科学的”理論による予測は従来の理論が適用可能な範囲の少なくとも一部においては従来の理論と同様の予測を与えるべきであり，また，新しい「技術」を従来の「技術」が適用可能な範囲に適用した場合には，少なくともその範囲の一部において従来の「技術」と同様の結果を与えなければならない**。もし，このことが可能でなければ，新たな「科学」/「技術」がもたらす描像が正しいも

---

<sup>16</sup> 佐々木力『科学論入門』第2章の4。

のであるか否かが全くわからなくなってしまうからである。但し，“科学的”理論においては，Newton 力学と適用範囲が全く重ならない“量子力学”のような自然観が成立する可能性はある<sup>17</sup>が，新「技術」における過去の「技術」との“連続性”は必ず実現されている（=backward compatibility）。

19世紀終わりまでに，人類は，17世紀にNewtonが与えた物体の運動に関する自然の力学的性質に加えて，自然の電磁気学的性質並びに熱学的性質についての科学的知見を獲得した。従って，それ以降の「科学」及び「技術」の進展には，自然の力学的性質・電磁気学的性質・熱学的性質に関する知見がその基盤となった。そして，程度の差こそあれ，それらの科学的知見の影響を受けたその時点での技術が活用されることになる。このような視点から，20世紀前半にかけて成立した量子力学の誕生前夜を振り返ることにする。

上述したように，産業革命の進展に伴って，強い素材としての鋼材の需要が増大した。鋼材は，鉄鉱石をコークス及び石灰石と混合して強熱することによって得られる<sup>18</sup>が，温度と炭素含有量とに依存して，異なる性質を有する<sup>19</sup>。従って，所望の性質を有する鋼材を得るためには，温度を正確に測定することが必須である。もちろん，この温度は極めて高温であるため，接触式の温度計は使用できない。鉄の温度が高くなるにつれて発光し，しかも色が温度と共に変化することはよく知られていたため，発光スペクトルを解析してその温度を求めようとする研究が行なわれるようになり，19世紀末にStefan-Boltzmannの輻射法則<sup>20</sup>(1884)並びにWienの輻射法則<sup>21</sup>(1896)が，熱学より発展した熱力学に基づいてそれぞれ提唱された。しかしながら後から発表されたWienの輻射法則でも，観測される発光スペクトルを全波長域に亘って正確に再現することはできなかつた。この問題に対する最終的な解を与えたのがPlanckの輻射理論<sup>22</sup>(1900)であるが，これは，“エネルギーのやりとりは連続的ではなく，最小単位を有する離散的なものである”というエネルギー量子仮説を採用し，当時，熱力学を包含する形で体系付けられつつあった“統計力学”に基づいて導出されたものである。このエネルギー量子仮説と，光電効果<sup>23</sup>の説明のためにEinsteinによって提出された光量子仮説<sup>24</sup>(1905)

<sup>17</sup> 新しい“科学的”理論の適用範囲が従来の理論の適用範囲と全く重複を有さない場合には，双方の理論を用いて同一事象の予想をすることが不可能なので，それぞれの適用範囲における事象の予想がどのようなものであろうとも，互いにそれぞれの理論の存在を否定することにはならない。

<sup>18</sup> 『理化学辞典』第5版（岩波書店，1998）に依る。

<sup>19</sup> 鉄の相図（炭素含有量と温度との関係）については，例えば

<http://www.mmm.muroran-it.ac.jp/~isaos/page14/page18/files/FS090508.pdf>を参照。

<sup>20</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Stefan%E2%80%93Boltzmann\\_law](http://en.wikipedia.org/wiki/Stefan%E2%80%93Boltzmann_law)

<sup>21</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Wien\\_approximation](http://en.wikipedia.org/wiki/Wien_approximation)

<sup>22</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Planck%27s\\_law](http://en.wikipedia.org/wiki/Planck%27s_law)

<sup>23</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Photoelectric\\_effect](http://en.wikipedia.org/wiki/Photoelectric_effect)

<sup>24</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Photoelectric\\_effect#20th\\_century](http://en.wikipedia.org/wiki/Photoelectric_effect#20th_century)

とが、Rutherford<sup>25</sup>による原子核の発見(1911)を踏まえて Bohr<sup>26</sup>による**前期量子論の確立**(水素原子構造モデルの提唱)(1913)に繋がった。ここで、光電効果の実験が、電磁気学に基づいて物質の電氣的性質を研究するための実験装置を 19 世紀の「技術」が創り出したことの結果として可能になったものであることに留意されたい。すなわち、量子力学誕生前夜には、産業上の要請が輻射理論という自然についての新しい“知見”(=「科学」)をもたらし、当時の「技術」によって可能となった実験によって得られた自然についての別の“知見”と共に、20 世紀における自然のありようについての新たな「科学」(=量子力学)の創設のきっかけとなったのである。

同時期に「技術」の発達で「科学」上の新たな発見を可能にした事例としては、**写真技術**を挙げることができる。19 世紀末に確立していた写真技術が、Röntgen による X 線の発見<sup>27</sup>(1895)や Becquerel による放射能の発見<sup>28</sup>(1896)を可能にした。写真技術そのものは、本来は人間の目で見えるもの、つまり可視光による像の撮影を目的として発達したものであるが、その技術が図らずも人間の目に見えない領域の自然のありようを明らかにしたことになる。すなわち、2 節で言及した望遠鏡や顕微鏡と同様、人間の「**手の技**」(=技術)によって人間が知り得る範囲が拡大されたのである。

20 世紀以降の科学と技術、そして社会(産業)との関係は、二度の戦争を契機としてより緊密になっていく。レーダー技術と電波天文学との関係、1980 年代までの東西冷戦と高エネルギー実験物理学との関係などを思い出していただきたい。冷戦終結の結果、Superconducting Super Collider (SSC)計画が中止になったこと<sup>29</sup>は、「科学」と「技術」のありように対する社会の影響を象徴的に表わしている。

## 5. 「科学」を担うための“コスト”とその負担者の変質

これまで述べてきたように、「(自然)科学」に関する新しい“知見”は、その時点で利用可能な(多くの場合、最先端の)「技術」を活用して、すなわちその時点以前になされた「技術」革新の集積を基礎にして得られてきた。そして、そのようにして形成された新たな「科学」は、「技術」による受容と熟成に係る有限の時間を経て、「技術」を資してきた。16 世紀末以来、「技術」の進歩が“身の丈を超える科学”を可能にできたが、忘れてはならないのは、“身の丈を超える科学”を拓くためには“エネルギー”<sup>30</sup>

<sup>25</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Ernest\\_Rutherford](http://en.wikipedia.org/wiki/Ernest_Rutherford)

<sup>26</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Niels\\_Bohr](http://en.wikipedia.org/wiki/Niels_Bohr)

<sup>27</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/X-ray#Wilhelm\\_R.C3.B6ntgen](http://en.wikipedia.org/wiki/X-ray#Wilhelm_R.C3.B6ntgen)

<sup>28</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Henri\\_Becquerel](http://en.wikipedia.org/wiki/Henri_Becquerel)

<sup>29</sup> 山本均『SSC 計画中止決定後の米国物理学界』「日本物理学会誌」第 49 巻第 929-933 頁(1994)。

<sup>30</sup> ここでは、“エネルギー”という言葉は、単に動力のみならず実験装置やその製造に用いられる素材などを含む概念として用いられている。

が必要なことである。従って、“エネルギー”を得るために、必ず“コスト”が発生する。そして実際にこの“コスト”を負担できるものだけが、最先端“科学”を拓くことが可能となる。

ここで提示した『「科学」を担うための“コスト”』の概念を適用すると、「科学」の担い手が歴史と共に変化してきたことが極めて明快に理解される。すなわち、“貴族の遊び”であった「科学」が、その地平を開くためのコスト負担増を契機として、産業革命を経て資本蓄積がなされた“産業界”によって担われるようになり、さらに、20世紀に入ってからは（特に軍事目的で）“国家”によって担われるようになる（「マンハッタン計画」<sup>31</sup>がその好例であろう）。ここで述べたような“資本蓄積できたところが科学を担う”という視点を持つことが、「科学」・「技術」と社会との関係を考察する上で極めて重要なことであると筆者は信じている<sup>32</sup>。

---

<sup>31</sup> 例えば、F.G. Gosling, “The Manhattan Project: Making the Atomic Bomb.” DOE/MA-0002 Revised. Washington, D.C.: Department of Energy, 2010.  
[http://energy.gov/sites/prod/files/Manhattan\\_Project\\_2010.pdf](http://energy.gov/sites/prod/files/Manhattan_Project_2010.pdf)

<sup>32</sup> 松本三和夫は、『文化としての近代技術—STS 相互作用モデルの視点』「科学技術のゆくえ」（加藤・松山編）（ミネルヴァ書房、1999）において、19世紀後半以降の産業社会におけるSTS相互作用モデルの特殊型として、“(科学⇔先端技術⇔商用技術) ⇔社会”（ここで、“A⇔B”はAとBとが相互作用することを表わしている）という関係を与えているが、科学や技術の担い手とその“コスト”について何ら言及していない。筆者の“資本蓄積できたところが科学を担う”という視点に立てば、社会構造の変化と共に“科学”の担い手が増えることは自明であるが、松本のSTS相互作用モデルの場合には、社会構造毎に科学と相互作用をする主体を探し、それを用いて各社会構造毎に適切なモデルを作り直さなければならなくなる。

本文中で述べた歴史的な変遷に加えて、“科学”・“技術”と社会との関係を同時代的に俯瞰する、という視点を提示しておきたい。この視点からは、以下のような認識が成り立つ： 本文2節で述べたように、（自然）“科学”の進展は、全てその進展以前になされた“技術”の進歩を前提としている。従って、16世紀末の望遠鏡や顕微鏡の発明以降、“身の丈”を超える世界を“技術”を活用して探索し利用するようになったことの当然の帰結として、科学者や技術者では無い一般の人々にとっては得られた新しい知見（＝“科学”）が“目に見える”ものでは無くなってしまい、結果的に、最新の“科学”が一般の人々の日常生活に直接的な影響を与えることが基本的には無くなってしまったのである。最先端の科学的知見は科学者あるいは技術者と呼ばれる人たちに還元されて利用されるが、一般の人々には直接には還元されない。仮に、情報として与えられたとしても理解できないので無視されてしまい、還元されていないのと同じ状況になってしまうのである。もちろん、このような状況は、一人の人間が取り扱える知識量が有限であることと密接に関連していることではあるが、最先端の科学的知見が“身の丈”を超えたところにしか存在していないことも決して無縁ではないのである。この状況は、かつてC. P. スノーが『二つの文化と科学革命』（松井卷之助訳）（みすず書房、1967）で指摘した“二つの文化”の乖離”に対応することであるが、筆者は、そのような“二つの文化”の乖離”の成立要因が『“科学”が“身の丈”を超えたこと』にあると考えている。

“文化の乖離”に関しては、さらに、“商業戦略による乖離”があることも指摘しておかなければならない。最先端の科学的知見を受容した技術者は、その“科学”を“技術”に転換してそれぞれの製品に取り込む際に、一般の人々に“技術”の存在を知られないように隠蔽する。なぜなら、使用方法を簡単におこななければ製品が売れないからである（←“ユーザビリティの向上”という表現がなされる）。このため、結果的に最先端科学のみならず最先端技術に対する興味も失われてしまう。つまり、現在の社会では、社会の仕組みそのものが、最先端の科学的知見や最先端技術を一般の人々から遠ざけるようになってしまっている、というのが筆者の認識である。

### 【参考文献】

- C. P. スノー(1967)『二つの文化と科学革命』(松井卷之助訳) みすず書房.  
J. D. バナール(1966)『歴史における科学』(鎮目恭夫訳) みすず書房.  
佐々木力(1996)『科学論入門』岩波書店.  
寺内衛・寺内かえで(2009)『“科学”“リテラシー”に関する一考察』「政経研究」No.93 71-78.  
松本三和夫(1999)『文化としての近代技術－STS 相互作用モデルの視点』「科学技術のゆくえ」  
(加藤・松山編) ミネルヴァ書房.  
村上陽一郎(1994)『文明のなかの科学』青土社.

注：本稿の脚注では英語版 Wikipedia へのリンクを多数掲載している。これは、現在では科学分野・技術分野の文献の大多数が英語で書かれていて科学者・技術者が科学的解説・技術的解説を英語で取り扱うことに習熟していることの結果として、Wikipedia 各国語版の中で英語版の記述が科学技術分野において充実していること、また、その記述に間違いがあった場合に修正することが可能な“専門家”の数が他の言語に比べて圧倒的に多いと考えられることから、その内容の妥当性が他言語版よりも高いと考えられるためである。また、Wikipedia の記述が専門家向けの記述ではなく、一般的な教養としての科学・技術に関する知識を得ることが可能なまともになっている、という点も考慮している(本稿を読まれる方々が必ずしも物理学あるいは物理学史の専門家では無いであろうと推測されるためである)。