

## 触媒化学の歩みをめぐる散歩道 (1)

岡本康昭

## 1. はじめに

1835年, Jöns Jacob Berzelius (1779-1848, スウェーデン, 図 1)は, 当時報告されていた触媒現象に共通する実体を見抜き, 「触媒作用」という新概念を提案し, 1836年にはその本質を触媒作用の定義として明確に表現した<sup>1-6</sup>. Berzeliusの慧眼には畏怖の念を禁じざるを得ない。科学としての「触媒化学」は, ここから一步を踏み出したと言っても過言ではないだろう。しかし, その後, 触媒化学が, 順調に発展, 展開し, 現在に至ったとは言えない。1830-50年代当時の科学の状況は, 触媒化学をさらに発展させるには十分でなかった事は明らかである。化学の基礎となる元素の周期律表さえなく, 熱力学はやっとその芽が出てきたところで, 化学結合や化学反応に対する認識も極めて混乱した状況であった。さらに, 大学など高等教育機関での科学・技術教育も漸く始まったばかりであり, また, 研究者の社会的地位は確立していなかった。そのような中, 触媒化学およびその周辺化学が, その後の科学の進歩, 社会の要請を取り入れながら歩んできた道を, 本稿ではぶらぶらと, できれば20世紀初め頃まで辿ってみることにしようと思う。行掛り上, 以前の散歩道<sup>7-9</sup>と重なるところも多いことを, 予めお断りしてお

きたい。

散歩の道順は, 18-19世紀中葉の科学と社会の状況を振り返った後, 元素の周期律表, 熱力学の誕生に触れ, 呱呱の声を上げた触媒化学に戻る。その後, 酵素触媒の論争と触媒反応の機構, 化学反応の速度と平衡に関する進歩に触れた後, 19世紀後半の科学と社会の状況に立ち寄ってみる。触媒化学工業の発展を眺めた後, van't Hoffと化学反応, 物理化学の誕生と Ostwaldによる触媒の定義, Sabatierと触媒化学の拡大に触れる。その後, Ipatieffと高圧触媒化学反応, Haber-Bosch-Mittaschによるアンモニア合成を訪ねることにする。第一次世界大戦と科学者の問題を概観した後, 20世紀初めの触媒化学工業の発展, すなわち石炭の液化, メタノール合成, F-T合成反応について見てみたい。さらに, 歩み出した石油化学工業の様子を眺めた後, LangmuirやTaylorによる表面科学の誕生と表面反応の理解の広がりを見届けた後, 20世紀初め頃までの固体酸・塩基



図 1 Jöns Jacob Berzelius (1779-1848, スウェーデン): スウェーデン, 1939, #297

触媒反応とキャラクターゼーション法の発展にも簡単に触れ、この散歩を終えることにしようと思う。

現在の触媒化学，化学工業があるのは多くの有名，無名の触媒化学者，技術者の苦悩と苦勞の賜物である。ぶらぶら気ままな散歩をしながらではあるが，彼らに心から敬意を表したいと思う次第である。もしこの散歩から見える景色の中に一つでも現在の触媒化学者・技術者の心に残る景観があれば，この上ない恐悅である。できるだけ史実に忠実な記録を目指したが，それでも誤解や誤記が残っているかも知れない。それらをご指摘いただければ幸いである。

## 2. 18—19 世紀中葉の科学と社会

まず 18 世紀中葉から 19 世紀中頃までの科学を取り巻く状況を振り返ってみたい。Isaac Newton (1642-1727, イギリス, 図 2) による「自然哲学の数学的原理 (プリンキピア)」(図 3) の出版(1687)により，「科学革命」は完結したとされている。そのイギリスでは，18 世紀中ごろから綿工業を中心とする種々機械の発明により，工業化が急速に進んだ。しかし，技術革新の担い手は，科学の研究者ではなく，また，彼らによって得られた科学知識の応用でもなかった。伝統的職人層が主役であった<sup>10,11</sup>。蒸気の力を使っ



図 2 Isaac Newton (1642-1727, イギリス): ドイツ, 1993, #1771

た外気圧機関の発明者である Thomas Newcomen (1664-1729, イギリス) は鍛冶屋であり(1712), コークスを用いた高品質鉄の製鉄法を発明, 改良した Darby 親子は製鉄工であった(1709, 1735 頃)。ジェニー紡績機(1764 頃), 強靱な経糸の大量生産を可能にした水力紡績機(1768), 細くて強い経糸・緯糸の生産を可能にしたミュール紡績機(1779), 蒸気機関を利用した力織機(1785)の革新的技術は, それぞれ紡織工, 理髪師, 紡織工, 牧師によりなされた。凝縮器を備えた実用的蒸気機関の発明(1775, 1781)を成し遂げた James Watt (1736-1819, イギリス) は科学器具製造工であったし, 蒸気機関の高圧化, 小型化により蒸気機関車を開発(1804)した Richard Trevithick (1771-1833, イギリス) は機械工・鉱山技師であった。産業革命では, 綿工業や製鉄業などにおいて目覚ましい発展が見られ, 鉄道も普及したが, それらの技術革新は主として職人層による伝統技術の創意工夫で生まれ, 純粋科学の寄与は小さかったと考えられている<sup>10</sup>。その中で Watt は, 新興の産業資本家である工場経営者 M. Boulton らがスポンサーとなり創設された「月光協会」(1766 年創立, バーミンガム) という自然探究の愛好者, 今で言う科学研究

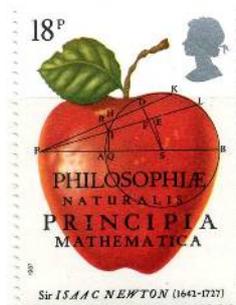


図 3 「プリンキピア」(自然哲学の数学的原理): イギリス, 1987, #1172

者の集まりに顔を出していた。酸素の発見者である Joseph Priestley (1733-1804, イギリス, 図 4) もよく通っていた。その集まりで Watt は、二酸化炭素の研究で知られた Joseph Black (1728-99, イギリス) から、凝縮熱のことを聞いていたということではある。また、18 世紀最大の数学者といわれる Leonhard Euler (1707-83, スイス, 図 5) は、歯車の数学的理論に関する著作を 1760 年に出版した。しかし、これらの科学研究が、効率的な蒸気機関や産業機械の発明に直接つながったかどうかは、不明である。むしろ、それらの革新技術は、科学知識の必要性を示すとともに、科学の発展を促したと考えるのが妥当であろう。

力学や天文学を中心とした科学革命より約 100 年遅れて出版された Antoine-Laurent de Lavoisier (1743-1794, フランス, 図 6) による「化学要綱」(1789) をもって、「化学革命」は完結したとされる。元素の定義, 当時定義された 33 元素の表, 定量的測定的重要性など, 近代化学の出発点となった。John Dalton (1766-1844, イギリス, 図 7) による「化学哲学の新体系」(1808) で提唱された原子論により, 化学革命は一層加速された。

イギリス産業革命における綿工業, 製鉄

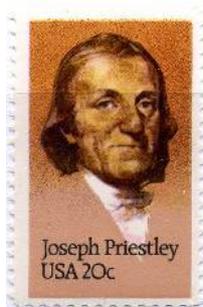


図 4 Joseph Priestley (1733-1804, イギリス): アメリカ, 1983, #2038

業では技術革新が職人層によりなされたのとは対照的に, 化学工業における技術革新はむしろ, 化学技術者や研究者主導でなされた。18 世紀終わりごろには, ガラスや石鹼などの原料であるソーダ(炭酸ナトリウム)の需要が急増した。従来, ソーダは草木灰などから非効率な方法で製造されており, 森林破壊の原因ともなっていた。医者であった Nicolas Leblanc (1742-1806, フランス) は, フランス科学アカデミーによる食塩からのソーダ製造法の懸賞募集(1783)に応じ, 1785 年, 食塩と硫酸から出発する炭酸ナトリウム製造法を開発し(Leblanc 法), 1791 年, パリ近郊に工場を建設した<sup>1,10-13</sup>。Leblanc は外科医の大学で修士課程を修了したが, 当時, 化学は医学の一教科として教えられていたので, 化学についての十分な知識はもっていたと考えられる。余談だが, Leblanc は, 1787 年に始まったフランス革命に翻弄され, 1794 年に革命政府によって工場を接収され, 技術情報を全て開示されてしまっ



図 5 Leonhard Euler (1707-83, スイス): 東ドイツ, 1983, #2371



図 6 Antoine-Laurent de Lavoisier (1743-1794, フランス): フランス, 1943, #464.

た。1799年、Napoleon Bonaparte (Napoleon I世) (1769-1821, フランス)のクーデターにより帝政が樹立され、1801年、工場はLeblancに返還された。しかし、再開する経済力も余力も彼にはなく、1806年自ら命を絶ってしまった<sup>12,13</sup>。Leblanc法によるソーダの工業的製造は、James Muspratt (1793-1886, イギリス)により、イギリス、リバプールで1823年より始められた<sup>14</sup>。これ以来、Leblanc法によるソーダ工業は、産業革命が進展しつつあったイギリスで非常に盛んになった。一方、Leblanc法によるソーダ製造は、廃棄される塩酸と亜硫酸により、工場周辺での公害が大問題となった<sup>15</sup>。しかし、Solvay法にとって代わられるまで、改良を重ねながら100年近く実施された。

Leblanc法によるソーダ製造が盛んになるにつれ、硫酸の需要が急増した。硫酸は、1746年にJohn Roebuck (1718-94, イギリス)により技術的に改善されたプロセス、即ちチリ硝石を触媒原料として用いた鉛室法で生産されていた。しかし、強硫酸を注ぎつつコークスタに排ガスを通して、触媒である窒素酸化物の捕捉、回収を行うGay-Lussac塔を考案した(1827)のは、大化学者のJoseph Louis Gay-Lussac (1778-1850, フランス, 図8)であった。鉛室法による硫酸製造技術は、John Glover (1817-1902, イギリス)によるGlover塔の開発をもって(1859)技術的に完

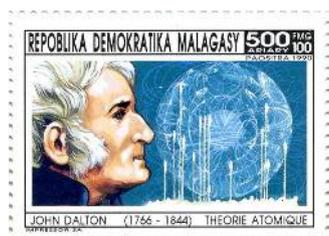


図7 John Dalton (1766-1844, イギリス): マダガスカル, 1992, #1100c

成した。原料ガスを耐酸レンガ充填塔に通しつつ、これに硝酸を含む硫酸を注ぎ、硝酸を分離する塔である。Gloverは、ニューカッスルの機械研究所で化学の教育を受け、化学会社で技術開発に関与していた技術者である。また、後に盛んになる染料工業も化学の専門知識がなくしては成り立たなかった。このように化学工業では、イギリス産業革命を支えた職人層とは異なり、化学の専門知識を持った研究者や技術者による発明や開発が主としてその発展を支えた。同様に、電気工業でも、その発展には専門知識をもった研究者と技術者が必要であった。

19世紀初頭には、科学に携わる専門家集団が産業発展には欠かせないことが、次第に認識されるようになってきた。このような状況の下、科学研究者育成の必要性が高まるとともに、科学者の社会的地位も次第に向上した。数学者・哲学者であるWilliam Whewell (1794-1866, イギリス)による「科学者(Scientist)」という造語が、一般に使われるようになったのは、1840年代のことである<sup>10,16,17</sup>。科学の研究を職業とする専門家集団が形成され、社会の中に定着してきたことの現れである。さらに、科学の専門分化により、研究者自身の専門分化が起こり、数学者、化学者、物理学者などと、その専門領域



図8 Joseph Louis Gay-Lussac (1778-1850, フランス): フランス, 1951, #B260

の名称で呼ばれるようにもなった<sup>10</sup>。

科学者が職業人として社会的に認知される以前は、科学研究を余技として、あるいは神の御業を理解し信仰を深めるために、別に仕事をもちながら、あるいは音楽家や画家などと同様、君主、貴族、富豪や産業資本家などパトロンの財政的庇護のもとに、大半の自然探究者は研究を行っていた。例えば、化学革命の総仕上げを行った Lavoisier は、富裕なパリの弁護士の息子で、科学研究に十分費やせる財力をもっていた<sup>11</sup>。Robert Boyle (1626-91, アイルランド, 図9)は、貴族の出身で、母国での政争をよそに、遺産として与えられたロンドン郊外の壮園で静かに研究活動を行った。Henry Cavendish (1731-1810, イギリス)も名門貴族で、特定の職につくこともなく、生涯自分の研究のみに没頭していた。このような自然探究者は、イギリス語圏では「哲学者」、「自然哲学者」、「実験哲学者」、「科学する人」などと呼ばれ、フランス語圏では「哲学者」とか「学者」、ドイツ語圏では「自然研究者」などと呼ばれていた<sup>10</sup>。Dalton が原子論を展開した著書の題名も「化学哲学の新体系」(1808)であり、当時の科学の状況を窺い知ることができる。

現在、大学は科学・技術者の育成、研究機関として、社会体制にしっかりと組み込まれている。しかし、最初から大学で科学が教

授されていた訳ではない。ヨーロッパでは、アラビアからの文献翻訳が盛んになった12世紀以降、各地に大学が創設されるようになった。ボローニャ大学(1088)、パリ大学(1150)、オックスフォード大学(1167)などに続き、ケンブリッジ大学(1209)、ローマ大学(1303)、グルノーブル大学(1330)、ウィーン大学(1365)、ハイデルベルク大学(1385)、バルセロナ大学(1450)、フライブルク大学(1457)(図10)、ウプサラ大学(1476)、コペンハーゲン大学(1498)の例が挙げられる。1500年までに80校近くの大学が各地に創設された。大学の運営は基本的にはカトリック教会と深く結びついており、教師は聖職者で占められ、聖職者の養成は大学の重要な使命の一つであった。後に世俗権力の台頭と国権の強大化に伴い国家官僚の養成がもう一つの重要な使命となった。中世の大学の upper 学部には、神学、法学、医学の三専門課程があり、それぞれ聖職者、法律家、医師の養成を行っており、19世紀前半までのヨーロッパの大学がもっていた専門学部は基本的にこの3つであった。専門に入る前の一般教育の場として置かれた学芸学部では、文法、修辞、弁証術の3学と算術、幾何、天文学、音楽の4科合わせて7自由学芸が教えられていた。中世ではスコラ学が教えられていて、科学革命当時の大学においても実質的に変わらなかったということである

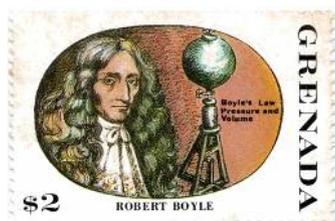


図9 Robert Boyle (1627-1691, イギリス) と空気ポンプ：グレナダ，1987，#1537



図10 フライブルク大学500年(1457年創立)：ドイツ，1957，#766.

<sup>10</sup>。Galileo Galilei (1564-1642, イタリア, 図 11)が 18 年間教授として過ごし, 力学, 天文学の研究を行ったパドヴァ大学は, アリストテレス論理学の牙城であった。そこで彼は, 反アリストテレス宇宙論を展開した (1638)。Newton は, 1669 年以降 32 年間ケンブリッジ大学の「ルーカス教授」の数学担当ポストについていたが, 研究の場は大学の外, ロンドン王立協会(1662 年創立), にあった。近代科学の形成に重要な役割を演じた多くの自然探究者は大学人でなかったばかりか, 他に職をもっていた。ユニテリアンの牧師であった Priestley も, クウェーカー教徒であった Dalton も非国教徒アカデミーという学校で教鞭をとっていた。Dalton は, 1799 年以降, 個人教授をしながら研究に専念した。Lavoisier は, 徴税請負人として旧体制に仕えたのが仇となり, 残念ながら, 革命政府により処刑されてしまった。Cavendish はケンブリッジ大学に入学し (1749), 3 年余り在学したが, 卒業間際に退学したという<sup>18</sup>。しかし, 物理, 化学, 天文学, 数学などに通じており, 水素の発見など重要な研究を自宅で悠々に行った。化学革命を担った彼らは, 化学の「アマチュア」であった。18 世紀半ば, 産業革命の推進国であったイギリスの大学でも旧態依然とした教育内容であった。産業革命の推進者が, 職人層にあったことと符合する。

イギリスの大学における科学教育の導入は遅れた。科学革命, 産業革命を牽引したイギリスでは, 地方の貴族や裕福な都市の人々にとっては「科学はレジャーを過ごす上品な仕事」<sup>10</sup>となった。バーミンガムの月光協会やマンチェスターの文学・哲学協会のような会合では科学の実験を伴った講義

が流行好きの聴衆を魅了し, また国中いたるところで巡回公演が開かれた。科学のより系統的な教育を求める中流階級の人々には, いくつかの非国教徒専門の学校の行う講習があった<sup>19</sup>。しかし, ケンブリッジやオックスフォード大学を含め伝統的の大学は, 古い学則の陰に眠っていて, この情熱に些かも注意を払わなかった<sup>19</sup>。オックスフォード大学では, 医学部には医学, 自然哲学, 植物学, および幾何学の講座は 17 世紀以降存在し, 化学と実験哲学の講座は形だけ 19 世紀初頭に付け加えられただけであった。スコットランドの諸大学では科学が教えられていたが, その大部分は小・中学生レベルであった。「プリンキピア」が出版されて 130 年も経った 19 世紀初頭においてさえ, イギリスにおける大学は科学の発展に実際的な寄与をしていなかった<sup>19</sup>。そのような中 1799 年に王立研究所(Royal Institution)が設立され, 1800 年に国王 George III 世の勅許を得た。産業革命で出現した貧困労働者の救済のため, 農業や工業の技術教育を目的として創設され, 技術博物館としての役割を果たした。王立研究所の Humphry Davy (1778-1829, イギリス)は, 電気化学手法を用いて K, Na など 6 種の元素の単離に初めて成功した(1806-1808)。また, 1816 年, 石炭ガス, エーテル, エタノール, エチレンなどの可燃性ガスと空気の混合ガスを熱い白

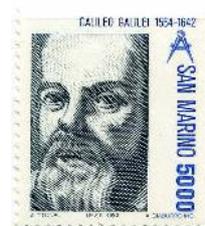


図 11 Galileo Galilei (1564-1642, イタリア): サンマリノ, 1982, #1030

金線に触れさせると、白金線が赤熱状態に保たれることを発見した<sup>1,2,5,6,8,20-24</sup>。触媒現象が注目される切っ掛けとなった。Davy は、Michael Faraday (1791-1867, イギリス, 図 12)を助手として採用した。後に Faraday は電磁気学分野で輝かしい業績を上げることになる。また、電気化学や触媒の研究も行った<sup>8,25,26</sup>。イギリスの大学はこの間も沈黙を保ち続けた。

科学革命に触発された啓蒙主義はイギリスで始まったが、イギリスでは盛り上がらなかった。作家の Voltaire (1694-1778, フランス, 本名 Francois Marie Arouet)は、特権階級のみが優遇されるフランス社会に見切りをつけ、1726 年、17 世紀半ばに市民革命（ピューリタン革命, 1640-60）を経た「自由」の国イギリスに渡り 2 年半ほど滞在した。その折、「プリンキピア」に触発され、科学的理性による社会の変革を説いた。Denis Diderot (1713-84, フランス)や Jean Le Rond d'Alembert (1717-83, フランス)らが、当時の科学、技術、芸術の知識を総合的にまとめ上げた「百科全書」（全 28 巻, 1751-72）は、「啓蒙主義思潮のマニフェスト」であった<sup>10</sup>。啓蒙思想により科学は宗教から解放された。科学活動は、「神の計画」を理解するためではなく、人間の幸福、社会の進歩のために行われるべきと主張され、技術を媒介として人間に奉仕する科学、すなわち技術のための科学が強調された。新たな形のベーコン主義であり、唯物論的で技術的な現代人のもつ科学観に近い<sup>10</sup>。啓蒙思想は、科学や技術における進歩だけでなく、人間社会も時代とともに進歩するという歴史観を生み出した。啓蒙主義は、アメリカ独立宣言

(1776)やフランス革命(1789)の引き金となった<sup>10</sup>。

フランス革命直後の混乱の中、政権をとったジャコバン派は、大衆科学の支持者や急進思想家の間で批判と憎悪が高まっていた旧体制の科学の殿堂、王立科学アカデミーの閉鎖に踏み切った(1793)。科学アカデミーの会員であった Lavoisier は閉鎖の免除を求め運動したが、功を奏さなかった。革命前には 22 校あった大学や、地方都市に 40 近くあった王立科学・文芸アカデミーも 1793 年に解体された<sup>10</sup>。フランス革命の波及を恐れ、ヨーロッパ諸国はイギリスを中心とする反仏同盟を結び、共和国に対する干渉戦争を起こした(1793)。この危機下に革命政府は、輸入不能となった火薬、ソーダ、鋼などの軍事物資の自給に当たさせたが、即戦力となる旧体制の科学者や技術者の多くは国外に亡命していた。1794 年、テルミドールのクーデターによりジャコバン派の Robespierre が処刑され(7 月)、恐怖政治は終りを告げた。新政府は、同年 12 月、パリに公共事業中央学校を創設した。翌 1795 年、エコール・ポリテクニクと改称され、世界最初の本格的な高等科学技術者養成機関となった<sup>10,16,27</sup>。1795 年に国立学士院が発足し、その第 1 部門に旧科学アカデミー会員が復帰



図 12 Michael Faraday (1791-1867, イギリス): イギリス, 1991, #1360

した。同部門は、後に「科学アカデミー」と呼ばれた。

エコール・ポリテクニクの初代学長には Joseph Louis Lagrange (1736-1813, フランス, 図 13) が就任した。化学では, Claude Louis Comte de Berthollet (1748-1822, フランス, 図 14), Antoine Francois Comte de Fourcroy (1755-1809, フランス)らが顔をそろえ, 数学者では Jean Baptiste Joseph Fourier (1768-1830, フランス), Adrien-Marie Legendre (1752-1833, フランス), Pierre Simon Laplace (1749-1824, フランス)らの第一級の科学者が教育に当たった。教育内容は, 科学(数学, 化学, 物理など)と技術(土木, 建築, 軍事技術など)を一貫して結びつける画期的なカリキュラムであった。これは, 啓蒙主義的 科学観に裏付けされたプログラムに他ならない<sup>10</sup>。学生は, 平等主義の立場から身分や家柄によらず, 数学を中心とした厳しい競争試験で選抜された。しかし, 実際は裕福な中流階層出身の子弟で占められており, 職人や農民などの下層階級の子弟は少数であった<sup>10</sup>。しかし, このような科学と技術の一貫教育も改変を迫られ, 1799年の学制改革では, 修業年限が3年から2年に短縮され, 基礎科学中心の教育の場となった。他に高等師範学校, 医科大学に加え, 応用技術教育

は土木学校, 鉱山学校などの「応用学校」で集中的に実施されるようになり, 技術者に対する系統的教育も始まった。これは革命後, 外国からの武力干渉に対する戦争の経験からフランス政府が「国民的技術者養成」のために設立したものである。近代的科学技術者教育の原型となり, フランス科学の黄金時代をもたらした。さらに, これらの教育制度改革は, 俸給をもらう科学の教授という型の人々を作り出し, 19世紀を通じて次第に, 昔のアマチュアの紳士やパトロンに抱えられた自然探究者にとって代わっていった<sup>27</sup>。

Napoleon Bonaparte は, 1799年, 統制政府を樹立し, 事実上の政権を握った。さらに, 1805年皇帝に推戴された(Napoleon I世)。Napoleon I世は, 科学や技術に関心を寄せ, その制度化を進め, また科学者を顧問や官僚として登用する等, 科学者の社会的地位を高めた。Napoleon I世の財政的援助を受け, 数学者・物理学者である Laplace や化学者 Berthollet は 1801年にアルクイユ協会を設立し, 教育機関でしかなかったエコール・ポリテクニクの大学院的役割を果たし, 実験を含めた科学研究の教育を行った。Gay-Lussac, 化学者 Louis Jacques Thénard (1777-1857, フランス, 図 15), 化学者 Pierre Louis



図 13 Joseph Louis Lagrange (1736-1813, フランス) : フランス, 1958, #869



図 14 Claude Louis Berthollet (1748-1822, フランス) : フランス, 1958, #872

Dulong (1785-1838, フランス), 数学者 Siméon Denis Poisson (1781-1840, フランス), 天文学者 Dominique Francois Jean Arago (1786-1858, フランス)などの優秀な人材を育て、科学アカデミーに送りこんだ<sup>11</sup>。1808年の学制改革では、フランスを40ほどの教育区に分け、各地区には少なくとも1つのリセと、1つないしそれ以上のファキュルテ(大学の学部に相当)を置いた。中央政府が全国の教育をコントロールする仕組みであった。ファキュルテには、科学、文学、医学、法学、神学の5種があった。後に地方のファキュルテで、Pasteur, Sabatier, Grignardを初め多くの科学者が活躍した。余談だが、Napoleon I世の寵愛を受け、元老院書記長を12年間務めた Laplace は、全ての現象は粒子と粒子間距離の逆二乗の力によって決まるとする自説に基づいた研究プログラムをエコール・ポリテクニクの若手卒業生に押し付けた。フランスの国立学士院主催の懸賞論文の主要な選考委員として自らのプログラムに貢献する研究課題のみを採択するなど、Laplace 体制を築いた。Laplace の影響下、一時廃れていた Newton 力学的思考が19世紀初めの Berthollet, Gay-Lussac, Dumas 等に復活した<sup>28</sup>。しかし、1814年の Napoleon I 世の失脚後、批判が噴出し、Laplace の権威と名声は地に落ちたということである<sup>10</sup>。一方、Laplace プログラムは、精密な実験と



図 15 Louis Jacques Thénard (1777-1857, フランス): フランス, 1957, #864

高度な数学理論を駆使する物理学の研究スタイルを推進する役割を果たし、大きな成果を上げた。Laplace 失脚後のフランスでは、実証主義哲学が科学方法論の主流を占めることになった<sup>10,28</sup>。後に Louis Pasteur (1822-95, フランス, 図 16)は、1860年代の自国の科学の衰退を嘆き、Napoleon I 世統治下のフランス科学を真の黄金時代として回顧した(1871)<sup>10</sup>。フランスが普仏戦争で、プロイセンに敗れた年であった。

18世紀末のフランス科学界の優位性を示すかのように、フランスでメートル法の設定が行われた(1799)。当時、国際間の貿易も盛んになり、ヨーロッパ諸国における異なる度量衡による混乱は甚だしく、単位系統一の必要性は科学者間のみならず一般社会でも強く望まれた。王立科学アカデミーの Lagrange や Lavoisier らの委員会が中心となり新単位系の検討を行った。質量の単位は、0℃の既知体積の蒸留水の質量の測定から決定した。また、パリを通る子午線の北極から赤道までの長さの1000万分の一を1メートルとし(図 17)、メートル原器を白金棒で作成した(図 18)。しかし、当のフランス人は新しい度量衡の標準を受け入れるのを拒み、1840年にメートル法以外の度量衡を使うことが違法となった後、やっと使われるようになった。1872年の国際会議で、1メート



図 16 Louis Pasteur (1822-1895, フランス): フランス領アファル・イッサ, 1972, #C70

ルはこの原器を基礎とすることが決定された。1875年には、度量衡を国際的に統一する条約(メートル条約)が成立した。日本は1885年に加盟し、86年に批准した。しかし、完全実施は1959年であった(図19)。余談だが、1960年には、1メートルは $^{86}\text{Kr}$ のオレンジ色の光の波長の1,650,763.73倍と変更され(図20)、さらに1983年の国際度量衡総会において、光が真空中を299,792,458分の1秒間に進行する長さに変更され、現在に至っている。ウプサラ大学の天文学者 Anders Celsius (1701-44, スウェーデン, 図21)により1741年に提案された摂氏目盛りは、革命後、スウェーデンに続いてフランスでも用いられるようになった。単位の確立は科学にとって重要なだけでなく、近代的技術の成立、科学と技術の結合において基本的役割を果たす<sup>16</sup>。尚、メートル、グラムなどの単位名は、各国の国民感情を考慮して、ギリシャ語、ラテン語によっている。



図17 1メートルはパリを通る子午線の北極から赤道までの長さの1000万分の一：ルーマニア, 1966, #1873.



図18 メートル原器とクリプトンのスペクトル：スイス, 1975, #599

フランスの科学的精神は海峡を超えることはできなかったが、ライン川を超えた<sup>19</sup>。18世紀、ドイツでは約300の大小さまざまな王国、侯国、公国、伯国、自由都市などが分立していた。1806年最強国の一つプロイセン王国がイエナの戦いで Napoleon I 世軍に大敗した。フランス軍の侵攻と Napoleon I 世による全ドイツ支配は、ドイツにおけるナショナリズムを覚醒させた。この事件は、フランスに対する憎悪を募らせるとともに、フランスとの国力の差を思い知らされた。1812年 Napoleon 軍がロシア遠征で大敗した翌年、プロイセン軍はオーストリア軍、ロシア軍と連合し、ライプチヒの戦いでフランス軍を破り、Napoleon I 世によるドイツ支配は終わった。Napoleon I 世失脚後、1815年のウィーン会議に基づいて35の領邦国家と4つの自由都市からなるドイツ連邦が結成された。ドイツ統一事業はプロイセン国家を中心に進められた。1866年のプロイセン-オーストリア戦争で勝利したプロイセンは、ドイツ連邦を解体し、プロイセンを盟主とする北ドイツ連邦を成立させ(1867)、オーストリアを排除したドイツ統一事業が画期的に進んだ。1870-71年のプロイセン-フランス戦争では、北ドイツ連邦の諸邦、南ドイツ諸邦もプロイセンに加担し、フランスに勝利した。1871年1月ドイツ帝国が成



図19 日本では1959年にメートル法が完全実施された：日本, 1959, #673

立した。1870年9月セダンの戦いで Napoleon III 世が捕虜となり、フランスでは第二帝政が打倒され、再度共和制に戻った。

18世紀のドイツでは、30ほどの大学があったが、中世的スコラ主義の幻影から脱却しておらず、神学、法学、医学の3つの上級学部からなっていた。多くの大学では、中世的な組織と教授法が維持されており、時代の要請に合わず18世紀末から19世紀初めにかけて20もの大学が閉講された。他のヨーロッパ諸国と同様、18世紀における科学研究の中心は、大学ではなく学会とかアカデミーであった。

このような危機的状況を変えたのは、プロイセンの教育改革の一環として1810年に創設されたベルリン大学が示した新しい方向であった。フランス革命と Napoleon I 世軍による敗北の強い衝撃を受けていたプロイセンでは、リベラルな改革派官僚による国制改革と文化国家創設の機運が高まった<sup>10</sup>。プロイセン政府の要請を受けてベルリン大学創設の中心人物となった言語学者 Karl Wilhelm von Humboldt (1767-1835、ドイツ)らは、大学とそこで行う学問に新しい意味を与えた。大学は「教える自由」と「学ぶ自由」の二大原則を保障し、国家や社会から独立して学問(Wissenschaft)の探求に邁進す



図20 1メートルは<sup>86</sup>Krのオレンジ色の光の波長の1,650,763.73倍：フランス、1975, #1435

べきであると強調した。Wissenschaftは、全ての知識に対する客観的にして批判的なアプローチを含んでいる<sup>19</sup>。人間形成としての純粋学問の探究や自由独立の理念は、18世紀以来台頭してきた実利主義的な教育観に対する反発、フランスにおける国家主義的な科学体制に対する反動とみなすことができ、ドイツ観念論、ロマン主義の学問観を反映している<sup>10</sup>。大学改革によって、自然科学の諸学問および人文系、社会系の学問を含む哲学部が従来の3上級学部と同等あるいはそれ以上の地位に上昇した。哲学部学生のうち自然科学専攻者の割合は、次第に上昇した。教員養成という社会的役割も担っていたが、19世紀後半には科学研究者養成の役割を果たした。フランスにおける技術を目指した中央集権的な科学教育・研究体制とは異なり、純粋科学を目指した科学教育・研究体制が、遅ればせながらドイツに根差した。ドイツでの産業革命は、1830年頃やっと始まったとされている。イギリスやフランスから見れば、当時のドイツは後進国であった。

19世紀におけるドイツ科学の躍進を考える上で、化学者 Justus von Liebig (1803-73、ドイツ、図22)の寄与を忘れることはできない。Liebigはドイツのヘッセン・ダルムシュタット大公国の首都ダルムシュタットで、医薬や染料などを製造販売する商人の10人



図21 Anders Celsius (1701-44, スウェーデン)：スウェーデン、1982, #1402.

兄弟の次男として生を享けた<sup>18</sup>。ボン大学、エルランゲン大学で化学の講義を受けたが、講義内容に不満を抱いた。留学を決意し、1822年パリのソルボンヌ大学で、Gay-Lussac、Thénardらから講義を受け、フランス流の実証主義的、定量的な化学を学び、感動した。Gay-Lussacとガス体の化学作用に関する研究の経験もある博物学者 Friedrich Heinrich Alexander Humboldt (1769-1859, ドイツ, 図 23)の計らいで、幸運なことに、エコール・ポリテクニク教授の Gay-Lussac がもつ実験室で、化学実験の手ほどきを受けることができた<sup>18</sup>。Liebig が自国の若い化学者のために化学の共同実験室を大学に作り、実験教育を植え付けようと思いついたのは、この留学時代であったといわれる<sup>10</sup>。1826年、F.H.A. Humboldt の薦めで、ヘッセン・ダルムシュタット大公国のギーセン大学 (図 24) に員外教授として職を得ると、彼はその構想の実現に着手した。Liebig の実験教育の最も重要な点は、当時の化学界で不統一であり、十分確立されていなかった化学分析、特に有機化学分析のノウハウを学生教育用に作り上げたことにある。講義は最小限に抑えられ、実験教育で得られた手法を使って教授の指導下でオリジナルな研究を行い、その成果が認められれば哲学博士号の学位が授与された。教育と研究を統合した巧みな体系的制度であった<sup>10,19</sup>。



図 22 Justus Freiherr von Liebig (1803-1873, ドイツ) : ドイツ, 1953, #695

ギーセン大学では、この教育法が定着し、19世紀中頃までには化学教育のメッカとして国外にも知れ渡り、多くの留学生が押し寄せた。実験主体の科学教育、卒業研究、学位取得という、今日の理工系学部で定着しているシステムはここから生まれ普及していった<sup>10</sup>。外国の学生が、ギーセン大学で Liebig と、マールブルク大学で Bunsen と、ゲッティンゲン大学では Wöhler と研究するために群がってきた。フランスの実証主義的な実験科学がライン川を超え、Wissenschaft と結合し、大きく育って行った。

ドイツの領邦国家では、1820年代から40年代にかけて、総合大学の他、技術者の養成機関として高等技術学校 (Technische Hochschule, TH) が設立された。学問としての科学は大学で、技術・工学は TH でと分業体制が確立された。しかし、TH は基礎科学の教育を強化する一方、世紀末に向かって産業化社会が進展するにつれ、大学でも応用的色彩の強い科学を扱うようになった。大学哲学部と TH 間での教官の移動もしばしば行われた。さらに TH は 1899 年以降、工学博士号の授与権を初め、大学に与えられている種々特権が与えられ工科大学 (Technische Universität, TU) への地位を確保していった<sup>10</sup>。



図 23 Friedrich Heinrich Alexander Humboldt (1769-1859, ドイツ) : ドイツ, 1956, #800

産業革命を牽引していたイギリスでは、科学教育事情は異なっていた。中世からの長い伝統をもつオックスフォード大学やケンブリッジ大学は国教徒のみに門戸が開かれていたが、19世紀前半でも、科学の専門教育は全く行なわれていなかった。相変わらず支配階級の子弟を対象に教養のための古典教育を貫いていた。ケンブリッジ大学で Whewell は「数学優等卒業試験」制度を導入したが、蔓延する実用的科学観によって伝統的な教養主義理念が脅かされるのを危惧し、また大学における数学教育が教養の枠を超えて専門家育成に使われることに反対した。Whewell の二面的態度に、時代の流れと伝統に生きるケンブリッジ人の当時の葛藤を見ることができる<sup>10</sup>。ケンブリッジ大学では、1848年に「自然科学優等卒業試験」という試験制度も設けられ、化学、鉱物学、地質学、比較解剖学、生理学、植物学の試験科目が創られた。それに対応するカリキュラムも作られ、学生はコース履修後に受験することができた。化学は人気が高かったが、専門研究者養成のための化学ではなく、化学の教養人ともいえる人々を送りだした。教養主義が基本理念として生きていた<sup>10</sup>。

バプティスト、プレスビテリアン、クウェーカーなどの非国教徒は、各地に非国教徒アカデミーという学校をつくっていたが、そこでは宗派に関係なく中産階級にも科学の教育を行っていた。ユニテリアンの牧師であった Priestley やクウェーカー教徒の Dalton もこのような学校で教鞭をとっていた。大学外部には科学研究の健全な動きがあった<sup>19</sup>。

1820年代になると、産業資本家層がスポ

ンサーとなり、職人や熟練労働者の技術教育を目的とする技能者講習所が、ロンドンを初め各地に会員制の学校として設立された。そこでは数学や初歩的な科学も教授された。産業資本家中産階級のイデオロギーを反映して1826年にユニバーシティ・カレッジ(ロンドン大学の前身の一つ)がロンドンに株式会社組織として開設され、宗教的信仰に関わりなく全ての希望者に開放された。通学制を採用し教育費を抑え、新興中流市民階級の子弟に近代科学や医学を含む広範なカリキュラムを提供し、ベーコン流の科学や技術に役立つ知識の普及を目指した。ユニバーシティ・カレッジは、1841年以降、工学講座をもっていた。イギリスでは、科学の主たる目的が産業を刺激することにあると捉えられ、低い社会階層の人々に相応しいものと考えられ、上流階級向きのもとはされなかった<sup>19</sup>。この点は、フランスでの状況と逆であった。

大陸諸国の産業力がイギリスに迫いつつつあることは、1851年に開催された大博覧会などを通して明らかになってきた。イギリスの技術協会は、政府に技術教育に対応するよう迫り、科学・技術局が設置された(1858)。科学・技術局は中等教育学校に科学教育を報奨制度によって奨励した。1872年



図 24 ギーゼン大学(現 Justus-Liebig Universität Giessen 大学, 1607年創立)350年:ドイツ, 1957, #768

には全国で 948 校が科学教育の補助金を受け取り、生徒の数は 3 万 7 千人にも上った。大学での科学・技術教育の拡大は、諸学校からのこの種の新生が供給されて初めて行いうることであった<sup>19</sup>。

Liebig は、1842 年イギリスを訪問した際、「イギリスは科学の国ではない。この国では実用とつながる仕事しか注目されない」と評したということである。ギーセンの留学経験をもつイギリスの化学者たちの強い訴えから、イギリスでの化学者養成のために、企業家や地主の財政援助を受けて、私立大学王立化学カレッジが 1845 年に創立された。初代教授として Liebig の高弟 August Wilhelm von Hofmann (1818-92, ドイツ) が招聘された。実験と独立研究を柱としたギーセン式化学教育をイギリスに移植するべく務めた。しかし、実利の見返りがないことに不満を持ったスポンサーの産業資本家たちが財政的援助を打ち切ったため 1852 年には他組織に併合され、1863 年にはその名を消した。Hofmann も失意のうちに本国に帰還した(1865)。オックスフォード大学の学校視察官が、「フランスの大学には自由がない。イギリスの大学には科学がない。ドイツの大学は両方持っている」と述べたのは、1860 年代のことである<sup>10</sup>。1870 年オックスフォード大学に Clarendon 研究所、1874 年にはケンブリッジ大学に Cavendish 研究所が開設され、実験物理学の研究体制が整った。いずれも篤志家の寄付金に依っている。両大学でも、科学全般の専門教育が本格的に始まった。イギリス諸大学は、科学革命に適応し、科学を大きく進め始めた。

社会生活上、一定の具体的役割を担ってい

るものを「制度」と呼ぶとすると、科学も一つの制度、しかも、生産と結びつくことによって最も重要な制度であることは、現在、明白である<sup>16</sup>。フランス、ドイツ、イギリスでの 18 世紀後半から 19 世紀中葉にかけての近代科学の社会史を概観してきたが、まさにこの時期に、科学の制度化が進行したことが分かる。科学の重要性が認められ、科学研究が職業となり、科学者の社会的地位が向上した。科学者が拡大再生産される制度も構築された。

科学の制度化が進む中、Berzelius によって創り出された「触媒化学」が、どのように生まれ、育っていったのか、振り返ってみたい。ただ、その前に化学の骨格を成す領域、すなわち元素周期律の発見と熱力学の成立について、簡単に振り返っておきたいと思う。

#### 参考文献

- 1) 廣田鋼蔵, “触媒化学の発展史 (その一)”, 表面, 16 (1978) 219.
- 2) J. Wisniak, “The History of Catalysis: From the Beginning to Nobel Prizes”, *Educ. Quim.*, **21** (2010) 60.
- 3) B. Lindstrom, L. J. Pettersson, “A Brief History of Catalysis”, *CatTech*, 7 (2003) 130.
- 4) A.J.B. Robertson, “The Development of Ideas on Heterogeneous Catalysis: Progress from Davy to Langmuir”, *Platinum Metals Rev.*, 27 (1983) 31.
- 5) A. Comte, “Birth of the Catalytic Concept”, *Catal. Lett.*, 67 (2000) 1.
- 6) P. Sabatier, “La Catalyse en Chemie Organique”, Librairie Polytechnique, Ch.

- Bérangér, Paris et Liège, 1913, 2<sup>nd</sup> Edition, 1920, "Catalysis in Organic Chemistry"; Translated to English by E.E. Reid, D. van Nostrand, New York, 1922.
- 7) 岡本康昭, "触媒化学源泉への散歩道 (1)", 触媒懇談会ニュース, 113 (2018).
  - 8) 岡本康昭, "触媒化学源泉への散歩道 (2)", 触媒懇談会ニュース, 114 (2018).
  - 9) 岡本康昭, "触媒化学源泉への散歩道 (3)", 触媒懇談会ニュース, 115 (2018).
  - 10) 古川 安, 「科学の社会史—ルネサンスから 20 世紀まで」南窓社, 2012.
  - 11) A.J.アイド, 「現代化学史」(鎌谷親善, 藤井清久, 藤田千枝 訳) みすず書房, 1973.
  - 12) R. Oesper, "Nicolas Leblanc (1742-1806)", *J. Chem. Educ.*, 19 (1942) 567.
  - 13) R. Oesper, "Nicolas Leblanc (1742-1806)", *J. Chem. Educ.*, 20 (1943) 11.
  - 14) D. Reilly, "The Muspratts and the Gambles: Pioneers in England's Alkali Industry", *J. Chem. Educ.*, 28 (1951) 650.
  - 15) P. Reed, "The Alkali Inspectorate 1874-1906: Pressure for Wider and Tighter Pollution Regulation", *Ambix*, 59 (2012) 131.
  - 16) 広重 徹, 「近代科学再考」朝日選書, 1979.
  - 17) 小山慶太, 「科学史年表」中央公論社, 2003.
  - 18) 山岡 望, 「化学史傳」内田老鶴園新社, 1968.
  - 19) エリック・アシュビー, 「科学革命と大学」(島田雄次郎 訳) 中央公論社, 1977.
  - 20) A.J.B. Robertson, "The Early History of Catalysis", *Platinum Metals Rev.*, 19 (1975) 64.
  - 21) W. Prandtl, "Johann Wolfgang Döbereiner, Goethe's Chemical Adviser", *J. Chem. Educ.*, 27 (1950) 176.
  - 22) P.M.D. Collins, "Humphry Davy and Heterogeneous Catalysis", *Ambix*, 22 (1975) 205.
  - 23) G. B. Kauffman, "Johann Wolfgang Döbereiner's *Feuerzeug*: On the Sesquicentennial Anniversary of His Death", *Platinum Metals Rev.*, 43 (1999) 122.
  - 24) 島尾永康, 「人物化学史：パラケルススからポーリングまで」朝倉書店, 2002.
  - 25) M. Faraday, "Experimental Researches in Electricity-Sixth Series", *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, 124 (1834) 55.
  - 26) R.L. Burwell Jr., "Heterogeneous Catalysis before 1934", *ACS Symp. Ser.*, 222 (1983) 3.
  - 27) J.D.バナー, 「歴史における科学」(鎮目恭夫 訳), みすず書房, 1967
  - 28) J.S. Rowlinson, "The Border between Physics and Chemistry", *Bull. Hist. Chem.*, 34 (2009) 1.
- 注) 図の注釈にある発行国名は, 切手発行時の国名で, 発行年に続いて Scott カタログ番号を#以下に示した。ただし, Mi とあるのは Michel カタログ番号である。
- (筆者の E-mail : yokamoto@riko.shimane-u.ac.jp)