

## 19世紀から20世紀前半の研究現場における 技術と科学の位置づけと役割

田 辺 義 一

国立科学博物館名誉研究員  
〒305-0005 茨城県つくば市天久保4-1-1

### Position and Role of Technology and Science during the Course of Research and Development in 19<sup>th</sup> and Early 20<sup>th</sup> Centuries

Yoshikazu TANABE

National Museum of Nature and Science  
4-1-1 Amakubo, Tsukuba, Ibaraki 305-0005, Japan

**Abstract** The position and role of technology and science in the progress of research and development is discussed, based on the research topic such as electromagnetism by M. Faraday, dye chemistry by W. H. Perkin, C. Graeve and C. Liebermann and A. von Baeyer, and synthetic polymers by W. H. Carothers. The word “science” is used in the limited meaning that is the deductive system derived from the small number of premises.

Various apparatus such as lightening, communication, motors and generators were technologically developed before the establishment of electromagnetism by C. Maxwell *et al.*

Mauve (purple dye) was serendipitously found by W. H. Perkin. Alizarin (red dye) and indigo (deep blue dye) were synthesized by C. Graeve and C. Liebermann and by A. von Baeyer, respectively, although the detailed chemical structure has not been known well. The accurate trans structure of indigo was reported about 70 years later than the success of synthesis.

The synthetic rubber does not appear before the chloroprene has luckily been synthesized by addition polymerization of monovinyl acetylene under the presence of hydrochloric acid. The synthetic fiber of polyamide (higher molecular weight polyamide) was polymerized using the molecular still without design theory of fiber properties.

These results show that technology proceeds without science. Science of above-mentioned three examples (electromagnetism, dye chemistry and synthetic polymers) was established after and through the development of technology. Technology precedes science, which is the important concept to evolve the research and development program.

**Key words:** position of technology and science, electromagnetism, dye chemistry, synthetic polymers

#### 1. はじめに

科学の発展をベースに近代工業は発展したとよくいわれるが、その実体はどうなのか、研究現場の歴史的事実を客観的に分析した結果に基づいて議論されているとは言い難い。技術史や科学史は主として欧米での研究成果に基づいて議論されていることもあり、どのような概念の流れの中で新

たな概念が出てきたか<sup>1)</sup>、といった哲学的思考を中心としたものが多く、またそれら新しい思考・思想を提案した人をより高く評価するといったある種のフレームワークを通して見たものになっている。人間の考えることなので、一面的であることは仕方のないことではあるが、別の面からの見方も必要である。

一般に技術史や科学史の研究では、その技術や

科学の中味そのものの発展の分析が重要であるが、一方でそれを担った人物が如何なる考えや動機をもって研究したかを調べ、後続の研究者に伝える役目もある。研究報告や伝記の場合、整理された形で書かれていることが多く、研究現場で考えていることとずれてまとめられることが多い。その結果次の研究者が誤って研究の進め方を理解し、苦勞することが多いと思われる。ここでは研究現場の実体はいかなるものか、なるべく現場の状況を再現しながら検討してみたい。

研究者は、何を研究するかを最初に考える。大学であれば教授等から、研究機関であれば研究チームの上司から与えられる、更には自分自身の考えにより始める場合もある。いずれにしろ、その研究を行うことにより、何を解決したいか、何が知りたいかといった問題意識は自分自身の中で明確にして始める。勿論その思惑通りに進行するとは限らないので、途中の変更は十分ありうる。技術史や科学史の研究の一つの目的として、このような研究者の研究テーマの立て方を考えることも必要である。しかしその点を明確に意識したものは少ない。むしろその研究者のもつ宗教的バックグラウンドと関係づけたりする例が多い<sup>2)</sup>。

研究者が研究テーマを選び、研究を進めていくにあたり、何を考えて実行していったかをいくつかの例について辿り、研究者の姿として何が捉えられるかを検討する。そのため19世紀から20世紀前半に、「科学に基づく技術開発の成果或いは基礎研究に基づく技術開発の成果」としてしばしば例に出される電磁気分野の場合（Michael Faradayの研究を中心として）、合成染料分野の場合（William Henry Perkin, Carl Graebe and Carl Liebermann, 及び Adolf von Baeyerの研究を中心として）、そして合成高分子分野の場合（Wallace Hume Carothersの研究を中心として）を検討し、実際の研究開発の姿はどうであったのかを調べる。これらの例では、科学として重要な電磁気学、合成染料学、合成高分子学といった「学問」が成立する以前に技術開発は行われて成功しており、むしろその成果の洞察からそれぞれの分野の「科学」が成立していったことが明らかとなる。技術開発が科学成立に先行することを明確にする。

## 2. 本報告で用いる仮説

本報告における考え方の前提（仮説）は以下の

ようなものである。技術は人間の生きる術であり、人間が生きる中で経験的或いは実践的に積み上げられた事柄を因果的に理解し蓄積したものである。技術でとらえた因果的知見を一部体系化（少ない前提から演繹的に論理展開可能にすること）したものが科学であるという考えに立つ。かなり狭い科学の定義であるが、本質を捉えていると考える。経験的事実を単に積み上げたものは「学問」である。学問は科学の発生以前から存在する。この学問の中から、少ない前提で演繹的に論理展開し、説明ができるような体系を取り出したものが「科学」である。中山によれば、学問には記録的学問と論争的学問があるとしているが<sup>3)</sup>、ここではこの区別はしない。

人間の生きる術として技術を見た場合、人間の生活を最低限可能ならしめるものとして、火、住居、衣料、食料獲得や栽培の技術等、道具（武器を含む）の製作は必須であり、人口増加との相乗効果により、より大掛かりに、より高度になっていく。即ち道具を含む生産技術は人類の生存に不可欠の要素であり、その発展と共に人類はその歴史を紡いできた。どの人種・民族も人類として同じ歩みをたどっている。

人間は社会生活を営んでいないと生存できない動物である以上、意思疎通に重要な言葉やそれを書き留める文字或いは社会的合意形成の政治的方法も技術（technique）であるが、ここでは道具乃至は必要物の製作・使用に関する技術（technology）に焦点を絞る。

技術を道具乃至は必要物の製作や使用に固有な活動更にはその知識と定義したとき、技術はどのように開発されるであろうか。道具（必要物の開発を含む）は試行錯誤で開発される。例えば物を切りたいというとき、その機能のために道具はどういうものかという目標があり、手に入りうる材料を用いていろいろ試行され、その中で、石でたたいて切ることから石の形がとがってくれば切れるという現象を見出し、より適した材料を探すといった作業或いは開発が続いたと考えられる。これらの成果は経験知として社会的に共有され、蓄積されてきた。徒弟として実地で伝承されるものもあるし、書き物として残されるものもある。その時代に集大成された書物があり、それらを学ぶ制度がある場合「学問」と言われる。技術についても文字を持つ文明では書物が存在することから、土木や建築の技術や機械といった分野で人間

の知識の集積はあった。文字を持つあらゆる文明に技術の書物や学問は存在し、伝承されている。

しかし科学が成立した文明と科学を持たない文明がある。その特徴を端的に捉えたのは中国明末時代の徐光啓である。彼は1607年（萬曆丁未）に「幾何原本」を訳出する（エウクレイデス [Euclidēs] の「原論」の一部）を行ったが、その中の刻幾何原本序（徐光啓書）或いは訳幾何原本引（徐光啓記）で、容易且つ明確な実理（公理）から出発して演繹推論により種々の事実を証明する論理を高く評価している。即ち1600年初頭まで中国には演繹法で体系を作る考えは全くなかった<sup>4)</sup>。「科学」はなかったと言える。しかし技術は高度なものを持っており、学問として伝承されていた。

図1に技術と学問及び科学の関係を図示する。人間社会で開発された技術を用いて経験的に蓄積された学問的事実のうち、因果的に理解できる部分を少ない前提から演繹的に説明可能な体系としたものが科学であることを示している。

技術開発は試行錯誤の繰り返しであり<sup>5)</sup>、その流れを図式化したものが図2である（科学についても試行錯誤による進化の過程であると既に指摘されている<sup>6)</sup>）。この試行錯誤の流れは太古より変わらない。実現したい機能や性能をどのように実現するか、設計し試行し、改良・改善を加えていく。必要なものが実現できたら「製品」として社会へ還元され、実用に供される。

技術は定量的でないと成り立たない。物を作っていく過程は意識的にしろ無意識にしろ定量的でないと実施できない。科学は定量的な言葉を使って初めて成立するものであり、科学の定量性は技術から獲得したものである。科学は、経験的に知られた多くの事柄の相関を因果的に理解し、その中で少ない前提或いは公理からなるべく多くの事実を演繹法で説明できるように作った人間の理解体系である。これにより人間は個々の事実を記憶するよりもっと多くのことを理解し、伝達できるようになった。公理と論理体系を教育すれば、多くの事実が他人に伝達できるようになった。科学においても前提に何をとりかは試行錯誤で探さなければならない。科学も試行錯誤で作られる。

技術は個々の事実の積み上げである。技術は科学の目を通し部分的に体系化することにより、他人への伝授が容易になった。このことが技術に科学が入り込んだ要因の一つである。しかし技術の

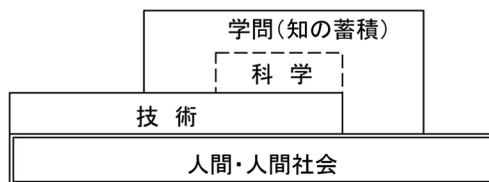


図1. 技術と学問, 科学の関係

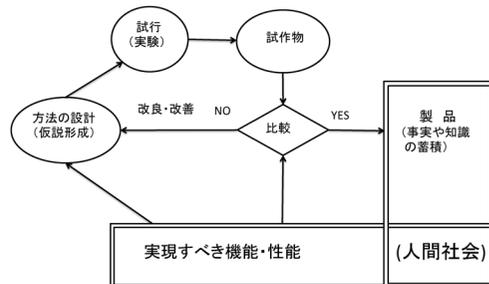


図2. 技術における試行錯誤

全てが体系化できているわけではない。現代でも科学として説明できない技術の分野は多々ある。

技術と科学は、試行錯誤という方法を共有して新たな事実を得るという方法論上の共通点がある。これは人間が考える或いは物を作るといった基本的な行為は試行錯誤で行われることと対応している。そして人間の試行錯誤の経験は蓄積され、次に生かされるので、この試行錯誤の過程は進化過程といえる。技術や科学は試行錯誤で行うが、人間はその実施においては設計若しくは仮説形成を行う。そして仮説形成に基づいて得られたものが、目的としたものであるか、他の事実と矛盾しないか等を調べることにより社会に受け入れられるかどうかの判定をする。

より詳細に言えば、人間の使う推論としては、演繹法、帰納法、仮説形成法（アブダクション、或いは最善の説明を導く推論 [IBE, Inference to the best explanation]）とも言われる。）があるが、演繹法ではその枠内で前提となる事柄を見いだせないし、完全な帰納法では全ての事柄を調べ上げることが仮定されているので、それは人間には実行不可能である。通常は仮説形成法が使われる。

仮説形成法は、仮説形成-実験-演繹-事実の説明のループからなる。仮説形成というのはその人間の考えることと、思いつくこと、或いはアイデアを出すことであるから、その人間の持つ技術や科学の知識の範疇にとどまらず、その人間の持つ

過去の思考・経験が全て反映されていると考えるべきである。極端に言えばその人間の感じた宗教的啓示であっても構わないといえる。その仮説に対してそれを説明できる実験を用意し、結果（事実の説明）を出すこと、或いは過去の理論を用いて演繹し、結果（事実の説明）を出すことが求められる。首尾よく結果が出れば仮説は採用され、他の事実と矛盾しないか更に検証されることになる。この仮説形成-実験-演繹-事実の説明について試行錯誤が行われることになる。このことは技術も科学も同じである。

仮説を作る際には科学の素養のある方がよい（勿論後述のFaradayのように、天性のセンスを持つ人であれば、科学の教育を受けていなくてもよい）。試行錯誤と言っても成功の確率は高くなる、或いは成功までの時間の短くなることが期待されるからである。一方既存の科学に囚われすぎるとアイデアとしての仮説の斬新さは失われる可能性もあることに留意しなければならない。

長い人類の歴史から技術と科学の特徴をつかむと、技術は、①人間の必要とする機能の把握、②製作したいもののイメージを作る、③入手可能な材料・もの・知識を選択して試作する、④製品の試作品、⑤使用による問題点の把握と改良、⑥原材料や生産方法の確定、となる。一方科学は、①対象とする状態量或いは物理量を把握する、②状態量或いは物理量を定量的に測定する、③測定データの間の因果関係を明確にする、④法則性の把握、⑤なるべく少ない前提で、法則間の関係を説明する、である。この科学の特徴のうち、①から④は事実の羅列であり、「学問」の領域である。⑤の段階まで来て「科学」となる。（図1参照。）技術の①から⑥及び科学の①から⑤のどの段階も試行錯誤で行われる。

「実験的方法の存在」が科学の特徴であるとする考えがある。しかし技術も必要なときは実験をして目的物の構成が可能かどうか試してきた。つまり実験的方法は科学のみの特徴ではなく、技術においても重要であったし、現在も重要である。

以上の基本的スタンスの基で、19世紀から20世紀前半の技術開発を特徴付ける電磁気分野、合成染料分野及び合成高分子分野の研究の例について検討する。

### 3. 電磁気分野の場合 (Michael Faradayの研究を中心として)

摩擦電気は太古より知られ、磁気も磁石や磁針として既知であり、1600年には地球も磁石であることが報告されていた。電源として利用可能なものは、摩擦起電機（1670年頃のゲーリケ（Otto von Guericke）のSchwefelkugel und Elektrisirer Maschineを嚆矢として種々作られた。）やライデン瓶（摩擦電気を貯める装置として1746年ミュッセンブルック（Pister van Musschenbroek）及び殆ど同時か若干早くクライスト（Ewald Georg von Kleist）により発明。）が知られていたが、一時的な放電しか得られなかった。1800年ボルタ（Alessandro Giuseppe Antonio Anastasio Volta）は銅板と亜鉛板の間に硫酸を挟んだ電池・電堆を発明し<sup>7),8)</sup>、これが電源として使用可能と分かると、電気の研究が劇的に進んだ。ボルタ電池はライデン瓶のように放電するが、すぐ回復して永久的な電気の源になる。ボルタの電堆に到ってはじめて低電圧定常電流を供給できる電源となった。電気の研究は1800年のボルタの電堆の発明により飛躍的に活性化された。

このボルタの電堆の発明と時を置かずして水や塩の電気分解が行われた。1809年にはゼンメリング（Samuel Thomas von Soemmering）が最初の電気化学的電信機を発明した。アルファベットの数だけ線を張り、一端で電鍵を押し、他端で気泡が発生する仕組みであった。1807年ハンフリー・デーヴィ（Humphry Davy）（K, Na, Sr, Mg, Ba, Ca等の発見者、塩素の名前の提案、更には電流の現象にも興味を持っていた。炭鉱で使用する安全灯の発明等で有名。）は、ボルタ電堆を電源としてアーク放電灯を発明した。

1820年1月、ヨハネス・エルステッド（ラテン語：Johannis Christianus Oersted、英語：Hans Christian Oersted）は題名“Experiments on the Effect of a Current of Electricity on the Magnetic Needle”という論文を発表した<sup>9)</sup>。ボルタ電堆につないだ導線の近くにある磁針が揺れるというもので、電気相克（electric conflict）即ち電流（current）による磁気作用の発見である。この針金に電流を流すと近くにある磁針が動く現象（電流の磁気作用）の発見と間髪を入れず、同年ヨーロッパで電気と磁気の間髪を調べる研究が一気に行われた。その様子はマイケル・ファラデー（Michael Faraday）が

要約している<sup>10)-12)</sup>。

1820年8月頃ウィリアム・ウォラストン (William Hyde Wollaston) はOerstedの実験を追試する過程で、電磁回転 (electro-magnetic rotation) の可能性を思いつく<sup>13),14)</sup>。

1820年9月、アンドレ=マリ・アンペール (André-Marie Ampère) は電流を流した2本の導線間に電流の向きにより引力若しくは斥力の相互作用が働くこと、更には右ネジの法則を発表した。同じく9月にはフランソワ・アラゴ (François Jean Dominique Arago) が電流の流れているコイルの中においた鉄が磁化すること、鉄芯に巻き付けた導線に電流を流すと磁石になることを示した。同10月にはジャン=バプティスト・ビオ (Jean-Baptiste Biot) とフェリックス・サヴァール (Félix Savart) は電流によりその周囲に生じる磁場の大きさを与えるビオ・サヴァールの法則を発表した。

DavyとWallastonがOerstedの実験からヒントを得て、電気磁気的作用から移動や回転の力学的作用を引き出そうと試みていた。1820年11月から1821年1月試作機を持ってWallastonが王立研究所のDavyの所へ来た。Davyの助手であったFaradayも議論に参加した<sup>13),14)</sup>。

Faradayは1821年7月から8月にかけて、“Historical Sketch of Electro-magnetism”を執筆するかたわら<sup>10)-12)</sup>、電磁回転の実験を続ける。DavyやWallastonが試みた電気磁気的作用から回転という力学的作用を引き出すことを実現させたのは助手のFaradayである。

1821年9月にFaradayは電磁回転装置の試作機を完成する。ガラス管の下部の水銀中に磁石を立て、上部から銅の針金をつるし、自由に動けるようにして、水銀と接触させる。ガラス管の上部と下部をボルタ電堆につなぐと針金は磁石の周りを回転する。1821年9月4日の日記に“Apparatus for revolution of wire and magnet”として概念図が描かれ<sup>15)</sup>、製作したものの図は参考文献12)のp. 118にある。1821年10月に発表、印刷は1822年1月頃である<sup>12)</sup>。

Faradayが電磁回転装置を作ることを目指したことは明らかである。この時点で科学の進歩に貢献しよう、真理を探究しようと考えていたわけではない。1821年9月4日の日記にも“Apparatus for revolution of wire and magnet”と明記されており、この時点では電磁回転装置の製作が目的であったことが分かる。この開発にあたって、彼はOersted

の電流による磁針の振れの発表以後精力的に実施されたAmp re, Arago, Biot and Savart, Davy, Wallastonといった人達やその他の関連する研究者の仕事をも丹念に検討し、電磁回転装置の開発に成功している。この研究の進め方がFaradayの面目躍如といえる<sup>10)-12)</sup>。彼は本質を見抜く力を持っており、それに基づいて実験装置を作り上げる秀でた能力を持っていた。

更にこの電磁回転装置の試作の過程で、別の装置も試作した。スタンドの上に2つのガラス容器をおき、一方のガラス容器では磁石棒が電流の流れる水銀浴中で回転する。他方のガラス容器では磁石棒が固定されて、その周りを針金が回転する機構を持つ<sup>16)</sup>。この装置をロンドンのLisle-streetのJohn Frederick Newman (有名な装置製作者であったらしい。例えばJohn Frederic Daniellの開発した高温計pyrometerや湿度計hygrometerを製作販売している。)に作製させた。この装置にRobert Hareの開発した電池calorimoterに接続したところ、針金は目で追うことが困難な非常に高速で回転した<sup>17),18)</sup>。この結果電気をを用いて力学的運動即ち回転を得ることができることを示したと共に、その回転がかなりな高速まで可能であることを示した。ここで電磁回転装置の未来に自信を持ったのではないか。

Faradayは「電磁回転装置を作る」という目標をはっきりと定め、実現する過程で自分の考えたことを大切にし、他人の考えを批判的に捉えたと共に、独自の電磁気現象に対する洞察を深めていった。最初から電磁気に関する真理を探究することを目的としたわけではない。電磁回転装置を作り上げ、その回転速度が非常に速いということを見出したが故、この分野 (モーター) の研究が活性化された。その後1822年バーロー (Peter Barlow) によるBarlow wheelの発明、1827年ハンガリーのイエドリック・アーニョシュ・イシュトヴァーン (Jedlik  nyos István) によるlightning-magnetic self-motorの作製を経て、1834年Thomas Davenportによる実用的な直流電動機 (DC electrical motor) の発明に至った。機関車を動かすほどの回転力を出せた。

Faradayは電磁回転装置や関連する現象の研究に興味をもちつつ、師であるSir Humphry Davyとの確執もあり、師に指示された研究も行った。1825年にはオイルガス (鯨油や魚油から得る。Portable Gas Company製) の熱分解からベンゼン

を発見している<sup>19)</sup>。300種以上の混合物からベンゼンを単離したが、現在の技術でもかなり難しいと言われる<sup>20)</sup>。しかしこの間も電磁気現象の検討は続けていた。上述のように電流から磁気を通して回転運動を導けるのであるから、磁気から電流を作ることも可能ではないかと常に意識していた。例えばFaradayの日記1831年8月29日の冒頭は“Expts. On the production of Electricity from Magnetism”で始まっていることから分かる<sup>15)</sup>。1821年から1831年の間「磁石から電流を作る」という意図のもと、研究・実験を積み重ねており、具体的には地球磁場の影響、Aragoの実験の追試等を行っている。

1825年11月28日や1828年4月22日の実験の失敗を経、1831年8月29日に磁電誘導（ここでは日記冒頭の“Expts. On the production of Electricity from Magnetism”を生かすため、敢えて磁電誘導と表記した。Oerstedの発見は電磁誘導であることを含意している）の現象を見出した後、その年の10月には、Aragoの円板をモチーフにしたと思われる電流を生じる機械magneto-electric machine（磁電誘導電流発生装置、ファラデーディスク）を作った<sup>21),22)</sup>。これにより電流発生が確実に行われることを示した。そして何故その現象が生じるかを種々の実験結果を通して考察し、「磁気線を切る（to cut the magnetic curves [the lines of magnetic forces]）」と表現した近接作用の概念に至った<sup>21),22)</sup>。

以上の例からわかるように、Faradayは科学の新しい分野を切り開こうと目指したわけではない。得られた種々の情報をもとに電気で運動するもの、回転するものを作り出す、磁気で電流を起こさせるといった目的をもって実験を行い、これを実現する装置を作り上げた。技術的に成功した後、その事象の裏に隠された本質をどう捉えるかについて考察を深めていった。

Newton以来流行していた運動力学の遠隔作用論に対して、Faradayは電磁気が近接作用による現象であることを明確にした。後に、マクスウェル（Clerk Maxwell）が近接作用に基づく体系化を行い<sup>23)-26)</sup>、またヘビサイド（Oliver Heaviside）によるベクトルを用いた現代の電磁気学の記述ができ<sup>27)</sup>、更にマイケルソン（Albert Abraham Michelson）-モーリー（Edward Williams Morley）の実験によりエーテルが否定される1887年を経て、電磁気学の体系が完成する、即ち科学として成立する。

Faradayは実験即ち現象の本質を定量的に捉える技術開発の能力に極めて秀でていた。電磁回転装置の開発、電流を生じる機械である磁電誘導電流発生装置の開発を行い、十分な性能を持つ装置を開発している。彼が電磁誘導及び磁電誘導の本質を説明しようとするのはその後である。種々の現象を積み上げて近接作用の概念を提案することになる（なお現代では、電磁誘導と磁電誘導はまとめて電磁誘導と呼ばれている）。

近接作用の考えを出す前段階及び近接作用の概念を出したFaradayの段階を科学というのは無理がある。近接作用の考えに基づき、場の概念を抱きながら、Maxwellが電磁気学の体系を構築する（エーテルの概念を残すなど完全とはいえないが）のは1856年から1865年頃のことである。更に言えば、Michelson-Morleyの実験によりエーテルが否定される1887年以降に電磁気学は完成したと見るべきである。Faradayは電磁気学という体系に基づいて電磁回転装置や磁電誘導電流発生装置を製作したわけではない。技術的開発が科学の成立より先である。技術が科学に先行している。

当時の技術開発の状況をより詳細に図3に示す。

図3から分かるように、Voltaの電池・電堆の発明後、電灯や通信技術はその直後から、電気の利用としての技術開発が進んでいた。1820年のOerstedの発見以後、電気や磁気或いはその相互作用を利用した技術の開発を目指して世界中の研究者が参画する。その中で1821年のFaradayの電磁回転装置の発表は大きな影響を与えている。ハンガリーのJedlik Ányos Istvánのように、独自に電磁作用で回転する装置の開発に力を注いだ研究者もいる。1827年彼は“lightning-magnetic self-rotor”と名付けた装置を作製した。Faradayが磁電誘導現象を発表する数年前である。ここでは1825年にウィリアム・スタージャン（William Sturgeon）が発明した電磁石（鉄芯にコイルを巻き付けると磁場が強くなる）を用いている。Sturgeon自身も1832年に電動機を開発している。またFaraday（1831年）よりも早く磁電誘導を発見したと言われるジョセフ・ヘンリー（Joseph Henry）も1829年頃から強力な電磁石の開発を行い、1831年には1t程度の物体を持ち上げることに成功している。また1831年には電磁石が前後に振動する電動機も作製している。一方FaradayやHenryにより磁電誘導の現象が明確にされると、ヒポライト・ピクシー（Hip-

polyte Pixii) やヴェルナー・フォン・ジーメンス (Werner von Siemens) をはじめ、世界的に発電機の開発が行われる。Maxwellの電磁場理論が発表される或いは電磁気学が確立する前から電磁気の技術は大きな進歩を遂げていることが分かる。

また1856年から1865年にかけてMaxwellの理論が発表された後、1888年にはヘルツ (Heinrich Rudolf Hertz) により電磁波の存在が確認された。これによりMaxwellの電磁気学は確認されたと言われることもある。しかしこれはHertzにより電磁波の波長 (波長4m, 周波数75 MHz程度) が実験的に見出され<sup>28)</sup>, その測定法が提示されたことに大きな意味があると考えべきである。電磁波の波長が定量的に把握されたことにより、無線通信関連装置の設計が可能となり、技術の開発が進んだ。電磁気学が完成されたから無線通信技術が発展したわけではない。完成して間もない電磁気学が多くの研究者に受け入れられ、技術開発の基になったとは考えられない。当時の研究者はFaraday等と同じで電磁気学の体系を知らずに装置を開発していった。

電磁気学が構築され (Maxwellの式の登場及びMichelson-Morleyの実験を待つ), その後その応用として電気技術・通信技術が発達したわけでは決していない。ではどのように解釈したらよいか。

技術も科学もその研究開発においては必ず仮説形成法が用いられる。Oerstedの場合は教壇でボルタの電堆を電源として電流の実験をしていたら、たまたまそばにあった磁針が振れたというものであり、意図したというよりセレンディピティに近い。磁針の振れに気づくためには電気と磁気に関連すると頭に描いていないと駄目だという議論もあるが<sup>29)</sup>, そこまで考えなくてもセレンディピティで見出したということでも十分理解できる。

Faradayは1821年の段階では電気や磁気の作用で移動や回転が可能だという仮説 (師のDavyの考えであったが) のもと“Apparatus for revolution of wire and magnet”を作ることに成功した。Jedik Ányos IstvánやSturgeonもいわゆる電動機が作れるはずだという仮説のもと、現実にその作製に成功している。

このように技術も科学も、その研究開発は仮説形成法が基本であり、その研究の遂行中に副産物として多くの事実が得られてきたのが人類の歴史である。科学の場合はその得られた成果をなるべく少ない公理のもとで演繹的に説明することが主

になる。即ち科学は実験等を通して得た知識を整理し、少ない前提で多くの事柄を演繹法で説明できるようにしたものである。この体系のメリットは少ない情報で多くのことを人間同士で伝える或いは共有出来ることである。個々の積み上げられた事実を全て覚えるのは人間には不可能であるが、論理の進め方 (演繹法) さえ共有しておけば、初めの公理の部分を伝え合うことにより多くの知識を効率よく共有出来、それにより人類は膨大な知識を利用してきたと言える。そしてその科学が成立する基になる事実の積み上げは技術により行われてきた。今後もその流れの大宗は不変である。

#### 4. 合成染料分野の場合 (William H. Perkin, Carl Graebe and Carl Liebermann、及びAdolf von Baeyerの研究を中心として)

近代化学工業の確立として重要な位置を占める合成染料工業の成立に関しても科学に先導されて技術が成立したと言われるが、果たして実体はどうかをみしてみる。

近代化学については、1756年Braggにより反応物質と生成物質を秤量により定量的に扱う方法が意識的に始められ、錬金術の時代から離陸した。この方法はラヴォアジエ (Antoine-Laurent de Lavoisier) に引き継がれた。1775年プリーストリ (Joseph Priestley) が酸素を発見、Lavoisierは1777年頃空気が酸素と窒素からなることを報告し、以後1783年水は水素と酸素の化合物であること、1784年頃不十分ながら有機化合物分析法即ち元素分析法を創始、1789年質量不変の法則を正式化、元素或いは単体の概念を使用した。1799年にプルースト (Joseph Louis Proust) により確立された定比例の法則と1804年のドールトン (John Dalton) の倍数比例の法則に基づき (但し倍数比例の法則は原子分子仮説を着想した後、逆に実験的に見出されたという報告もある<sup>30)</sup>), 1808年Daltonが原子分子仮説を出し、また原子量を使用した。

1811年アメデオ・アヴォガドロ (Conte Lorenzo Romano Amedeo Carlo Avogadro di Quaregna e Cerreto) が有名なアヴォガドロの仮説 (同温同圧の全ての気体は同容積中に同数の分子を含む) を提唱し、紆余曲折を経ながら、これらをもって近代化学の基礎が確立した。1842年頃にはシャルル・フレデリック・ジェラルド (Charles Frédéric Gerhardt) とオーギュスト・ローラン (Auguste Lau-

西暦	
1746	Musschenbroek 摩擦電気を貯める装置発明 Kleistも
1785	Coulombの法則 (電気, 磁気)
1800	Volta 電池・電堆の発明
1807	
1809	
1816	
1820	Oersted 電流による磁針の振れ発見
	Ampère 電流を流した導線間に働く力学的力
	Arago 電流による円板の回転
	Biot-Savartの法則
1821	Faraday 電磁回転装置の試作機
1822	Barlowの車輪
1825-26	Sturgeon 電磁石の発明
1827	
	Jedlik Ányos Istvánによる電動機の発明
1831	Faraday 磁電誘導の発見
	Henryも発見(magnetic rocker)
1832	P.M. (匿名) rotating electric machineを発表
1833	Lenz 電磁と磁電の相互関係の発見
1834	Jacobi 実用的電動機の開発
1837	
1837-42	Davenport 直流電動機の開発
	Davidson (electric locomotive)
1840	Joule ジュールの法則発見
1847	Helmholz エネルギー保存則の発見
1856	Siemens 電動機
1866	
1866-67	
1871	Gramme 電動機としても使用可能 ←
1875	Maxwell 電磁気理論の提唱
1856-73	
1878	Tesla 回転磁界
1882	
1884	Heaviside 現代の電磁気理論の記述完成
1887	Michelson-Morleyの実験 (エーテルの否定)
1888	Tesla 実用的交流電動機の発明
1891	J.J.Thomson 電子の概念確定
1895	
1897	
現在	電磁気学の確立
	電動機の開発

図3. 19世紀の電磁気関連技術開発及び電磁気学確立の歴史



rent) により原子量、分子量、当量の概念が明確化された。前後して多くの元素が発見され、1868年ドミトリ・イヴァーノヴィチ・メンデレーエフ (Dmitry Mendeleev) による周期律への到達に至る。また1853年エドワード・フラン克蘭ド (Edward Frankland) が原子価仮説を出し、更に1858年にアウグスト・ケクレ (Friedrich August Kekulé von Stradonitz) が炭素原子の鎖状結合を提唱し、分子構造が発表されていく。そして1865年Kekuléがベンゼン環の構造を確立した。これらの流れの中で、元素分析法が大きな役割を果たしたことが知られている。1830年代よりユストゥス・フォン・リービヒ (Justus Freiherr von Liebig) の炭水素定量法やジャン＝バティスト・デュマ (Jean-Baptiste André Dumas) の窒素定量法を組み合わせた元素分析法が用いられた。燃焼により出るCO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、H<sub>2</sub>Oを定量する。NO<sub>x</sub>は還元されてN<sub>2</sub>として定量する。O<sub>2</sub>は直接測定できない。また当然のことながら元素分析 (燃焼分析) では構造式は全く不明である。この段階で低分子の場合については定量的に取り扱え、再現性もある状況になっており、科学の段階といえる。しかし有機化学についてはまだ科学の段階とは言えない。

#### 4.1. モーブ (人工染料の始まり、紫色染料)

1856年ウィリアム・パーキン (Sir William Henry Perkin) はマラリア特效薬キニーネ (当時分子式はC<sub>20</sub>H<sub>24</sub>N<sub>2</sub>O<sub>2</sub>と分かっていたが、示性式或いは構造式は不明。因みにキニーネの立体構造は90年程後1944年になってようやくウラジミール・プレログ (Vladimir Prelog) が決定した。) の合成を目指し、アリルトルイジン (C<sub>10</sub>H<sub>13</sub>N) の重クロム酸カリウム (K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>) での酸化を試み失敗した。その後アニリン硫酸塩 (又はトルイジン硫酸塩、キシリジン硫酸塩、クミジン硫酸塩或いはこれらの混合物) と重クロム酸カリウムを当量熱水溶液中で溶解し、攪拌すると、黒色の固体が得られた。これをフィルターでこし、乾燥させるが、この時コールタールナフサで数回洗う。その後メチルアルコールで抽出すると色素物質が得られた。これをシュウ酸或いは酒石酸と少量のメチルアルコールと共に熱水に投入すると粉状の色素が得られた。これに布を浸して染色すると薄紫色或いは紫色に染まり、堅牢性がある。これが初めての人工染料である。これにaniline purple (1857年)、Tyrian purple (1858年)、mauve dye (1859年以降) という名前をつけた。通称としてモーブ (mauve) が

よく知られる。市販のmauveは無定形であったが、その中の結晶化する成分にmauveineという名をつけた<sup>31)–33)</sup>。

しかしmauveineはPerkinの考えたようなものとは異っており、その正確な構造や発色の原因について、その後あまり検討されていなかった。モーブは商業的に成功を収めたが、その後1859年に別の赤紫系合成染料フクシン (fuchsin, fuchsine) がフランスで発明されたため、競争が激化し、次第に使われなくなった。そのため、モーブの詳細な研究はされてこなかった。

2006年がmauveine開発から150年にあたることから、その構造や光学的性質を調べる機運が生じた。J. Seixas de MeloらはPerkinと同じ方法で合成したものや科学博物館に保存されていた試料を液体クロマトグラフで調べ、mauveineは7-amino-5-phenyl-3-(phenylamino)phenazin-5-ium核を持つ種々の誘導体の混合物であることを示した<sup>34),35)</sup> (mauveine A, B, B2, C, C25, pseudo-mauveine)。そして光吸収や蛍光スペクトルの検討も行っている。マイケル・プレーター (Michael John Plater) らは更に詳細な検討を加えているが<sup>36)</sup>、現在においても染料としてのmauveineの全容が解明されているわけではない。現代の目で見るとモーブが出来るにはアニリンだけでなく*p*-トルイジンと*o*-トルイジンが必要だが、これは当時のアニリンに不純物が多く、これらのものが含まれていたと考えられている。

この場合意図したものではなく、その研究の途中に思いがけない産物を得た例としてあげられる。Perkinは早速会社を作り工業化した。合成染料工業の幕開けである。人工的に紫色の染料が出来たことは欧州で大きな反響を巻き起こし、次に天然染料として大量に消費されていた茜 (赤色系統、主成分アリザリン) と藍 (青色系統、主成分インディゴ) がターゲットになった。

#### 4.2. アリザリン (人工赤色染料)

西洋茜に含まれる赤い色素は1826年ピエール・ジャン・ロビケ (Pierre-Jean Robiquet) により単離され、アリザリンが見出されていた。1868年アドルフ・フォン・バイヤー (Adolf von Baeyer) の助手であったカルル・グレーベ (Carl Graebe) はカルル・リーベルマン (Carl Liebermann) と共に、アリザリン (茜) の構造を調べた。アリザリンの骨格はナフタレンと推測していたらしいが、Baeyerが行った亜鉛 (粉) 末還元法をアリザリン

に適用してみて、アントラセンを骨格とする  $C_{14}H_{10}$  であるとした。これは茜から得られる天然染料を亜鉛粉末と加熱して酸素を取り除くとアントラセンと同じような性質を持つ物質が得られたことによる<sup>37),38)</sup>。そこで逆にアントラセンからアントラキノンを得、その後臭素化してジブロムアントラキノンにし、アリザリンを得る方法を報告した<sup>39),40)</sup>。この場合も分子式はともかく、その構造式は不明であったが、アントラセン骨格に狙いを定めて合成を行っている。十分な情報が得られて合成を行っているわけではなく、試行錯誤の段階といえる。現在でもアントラセンからアントラキノンのできる機構が明確になっているわけではない。即ち科学といえる状態にあるわけではない。

その後実用的な方法としてハインリッヒ・カロ (Heinrich Caro) と Graebe, Liebermann はアントラキノンをスルホン化した後アルカリ融解してアリザリンを得る方法を見出した<sup>41)</sup>。この方法により工業化された。偶然にもこの方法を Perkin も同時期に開発していた。1871年にはドイツとイギリス両国で市販が開始された。

#### 4.3. インディゴ (人工藍色染料)

次の大きなターゲットである天然藍の成分はインディゴである。アドルフ・フォン・バイヤー (Adolf von Baeyer) が当時の常套手段である元素分析、融点、沸点をもとに既知化合物との比較から構造を推定する研究を行い、インディゴからイサチン、そしてジオキシインドール、オキシインドール更にインドールと還元されることから、インディゴの構造を推定した (1870年)<sup>42),43)</sup>。その後インディゴ合成についての研究を一時中断するが、1875年以降再開し、1880年にはベンズアルデヒドから桂皮酸を合成し、その後 *o*-ニトロケイ皮酸を経由してインディゴの合成に成功している<sup>44),45)</sup>。そして1882年にはより簡単なインディゴ合成法として *o*-ニトロベンズアルデヒドとアセトンアルカリ存在下で反応させると一気にインディゴが合成できることを示した<sup>46)</sup>。その後これらの結果を基に1883年にはシス型のインディゴの化学構造式を与えた<sup>47)</sup>。即ちこの頃は合成した結果からその化学構造を推定する方法がとられていた。きちんと機能の分かったものの構造がそれほど正確に分かっていたわけではなく、分解物や合成物の特定 (それも元素分析や融点・沸点の測定等により) から化学構造を推定していたわけ

で、まだまだ有機化学の体系は確立していなかったし、ある意味現在に至るも状況は似たようなものである。特に機能と化学構造の関係の知識が現代でも圧倒的に不足している。医薬の分野では特にそうである。

Baeyerの開発した合成法は原料が高価で工業的には成功しなかった。工業的生産方法としては、1890年にカルル・ホイマン (Karl Heumann) の与えたアントラニル酸を経由する方法と *N*-フェニルグリシンを用いる方法が工業的インディゴ合成法となった<sup>48),49)</sup>。BASF社はナフタレンから発煙硝酸 (クニーチ法) を用いて無水フタル酸を得、その後フタル酸イミド、アントラニル酸、*N*-フェニルグリシン-*o*-カルボン酸、そしてインドキシルカルボン酸を経由してインディゴを得る方法を採用し、1897年に上市した。その後ヨハネス・プフレガー (Jahannes Pflieger) により *N*-フェニルグリシンのアルカリ溶解の工程でナトリウムアミドを使うとインディゴが効率よく得られることが示され<sup>50)</sup>、Höchst社はこのHeumann-Pflieger法により1904年に工業化に成功している。

このようにインディゴの合成は完成し、工業的に大成功を取めた。しかし天然インディゴがトランス型の構造であることが報告されたのは1954年である<sup>51)</sup>。シス型の報告から70年程経っている。構造化学的にみると、インディゴのシス型はエネルギー的に高い不安定な状態であり、トランス型は分子内水素結合によりエネルギー的により安定な構造である。このことが明らかにされるのは第二次大戦後である。またインディゴの藍色の発色機構について明らかになるのは更に遅れる。インディゴの電子構造はその分子内水素結合により強調される平面構造によっている。インディゴの発色団としては中心部のジケト-ジアミノエチレンの構造が重要で<sup>52)</sup>、この交差共役構造により深い色になると考えられている。

以上の例から分かるように、有機化合物の場合目標物の分子構造がある程度分かれば化学合成を行い、出来たものが狙った機能を持つかどうか調べながら研究を進めることができる。これは既存の知見 (分子構造の推定や関連する化学反応の選り方の推定等) を用いるが、あくまで参考の知見であって、その後は試行錯誤で研究を進めていかなければならない。その結果が狙ったものと違うと目標に対しては失敗であるが、情報を残しておけば知見としては将来有用なものとなるかもしれ

ない。

某かの化学物質を作ることは技術であって科学ではない。試行錯誤を繰り返して目標物を得ていく技術である。この技術の研究遂行の過程で新しい反応の知見が得られれば、科学として既存の知見に加えられ、より普遍的な知見へ高めるために用いることが可能である。このとき科学というのは、主として技術開発の過程で得られた知見を分類し、体系的に記述し、なるべく少ない前提のもと演繹的に記述できる体系としたものをいう。有機化学の場合この体系化があまり成功しておらず、相変わらず記述と分類の段階にとどまっていると考えられる。上述の例はこのことを如実に示しているし、現在においてもそれほど進歩しておらず、状況は似たり寄ったりである。これは分子単体にせよその集合体にせよ、有機物の構造と機能発現の関係に関する研究が不十分であり進んでいないことも関連している。

人名反応といわれる有名な化学反応は200種以上が知られている。これだけの数があれば、より少ない前提からこれらの反応を整理できないかと考えるが、その試みは行われていない。科学の域に達していない。

これら3つの合成染料の例で見ると、Perkinのモーブは明らかに意図したものとは異なるのでセレンディピティの例である。GraebeとLiebermannのアリザリンは、ある程度構造の手がかりはあったとはいえ、正確なものではなく、偶然の果たした役割も大きかった。そしてBaeyerのインディゴについても状況は似たようなものであり、ある程度の化学構造の目安をつけながら（分解物から見当をつける）ねらいを定め、その結果を考慮しながら目的物を得た。そして正確な化学構造はむしろそれらの結果から逆に得られた。化学合成の場合、目的物の化学構造が正しくても化学反応経路を設計することは至難の業であり、現段階においても試行錯誤の世界であると言える（勿論過去の膨大な蓄積をベースとして設計するわけであるが、それで成功するとは限らない）。

インディゴのように合成が出来てはじめて化学構造が決まる例もあり、過去の科学的成果からねらいを定めてもその通り合成できるわけでもなく、逆のケースも多い。科学というのは分かっている範囲では合理的（そのような体系になっている）であるが、少しでもそれから逸れた或いははみ出た部分に対しては不完全或いは無力なもので

ある。人間は技術（及びその製造物）との関わりで生きているのであり、その技術は試行錯誤で手に入れることが出来る。科学から技術が生まれることは少ないし、生まれたとしても斬新なものではないことに十分留意すべきである。

## 5. 合成高分子分野の場合

### （Wallace Hume Carothersの研究を中心として）

ナイロンやネオプレン等の合成高分子の開発で有名なカロザース（Wallace Hume Carothers）の例を考える。

デュボン社の誘いを受けたが、ハーバード大学での安定性や自身の精神的問題などの理由により幾ばくかの逡巡の後、Carothersは1927年10月末にハーバード大学からデュボン社へ移ることを決心した<sup>53)</sup>。その背景には、デュボン社でpolymerizationの研究を行いたい、これはデュボン社にとっても発展の期待できる分野と考えたことがある<sup>54)</sup>。彼は当時市販材料として重要であったゴム、セルロースやその誘導体、樹脂、蛋白質等は重合物であると考え、これに類するものを作りたいと考えた。有機化学の立場からみると、当時天然ゴムや繊維素、デンプン等の構造はかなり分かかってきており、これからはこれら高分子の合成が大きな課題となるとCarothersは考えていた。そこでこの合成高分子化学の分野ならCarothers自身も開拓したい分野であるし、企業にとっても利益になると考え、デュボンへの入社を承諾した経緯がある。

Carothersは天然の繊維素やデンプン、ゴムといったものが繰り返し単位の結合したものであるから、合成の機構から考えて、付加重合（Addition Polymerization；繰り返し単位がそのまま付加反応して重合する。ポリスチレン、ポリオキシメチレン、ポリエチレン等）と縮合重合〔重縮合ともいう〕（Condensation Polymerization；重合の際に水分等の簡単な分子がとれて縮合反応を起こし重合していく場合。ポリエステル、ポリアミド等）の2種類が存在することを指摘した。

エルマー・ボルトン（Elmer Keiser Bolton）から合成ゴムの相談を受けたCarothersはブタジエンの付加重合でイソプレンができることを念頭に、MVA (monovinyl acetylene) を用いることを決めた。1930年4月17日、実験をしていたアーノルド・コリンズ（Arnold Miller Collins）はフラスコ

にこびりついた固体を針金で釣り上げたとき、大きな弾性を持ち、大きく伸張できることに気づいた<sup>55)</sup>。アセチレンからMVAを得るときにCuCl<sub>2</sub>を用いるが、少量の塩酸が入るため、これがMVAと反応して2-chloro-1,3-butadiene即ちchloropreneが生じたものと考えられた。これが重合して、初めての合成ゴム polychloroprene が得られた<sup>55)</sup>。これは意図したものではないということから、即ち塩酸が重要であることを認識していなかったことと出来た物質が必要な物性を備えていたことの二重の意味で、全くのセレンディピティと言える。Boltonが長年追いかけてきた合成ゴムであることはすぐ確かめられ、その後デュポン社のdupreneとして、後に1936年名を変えてneopreneとして市販された。

一方でCarothersは重縮合に大きな興味を持っていた。それはエミール・フィシャー (Emil Fischer) が精力的に行ったアミノ酸縮合反応で、ポリペプチドの合成である<sup>56)</sup>。Fischerはこのポリペプチドの分子量は4021が最大値と考えていたし、アメリカの化学者世界でもこれ以上のものは存在しないと漠然と考えられていた。但しこれはFischerがフェニルヒドラジンを用いて糖の同定のために開発したオサゾン (osazone) の知見をもとに、マルトースを修飾して可能な限り分子量を上げようと努力した結果である。ここでは分子量を上げることに強い意識があり、ヨードで修飾する等、現代の観点からすればあまり発展性のあるものとは思われない。むしろ $\beta$ -ロイシン3個とグリシン15個をアミド結合でつないだオリゴペプチドが、重合度は20程度とはいえ、初めての重合反応であり、興味深い。Carothersも重縮合の研究ではペプチド結合に興味を示している。

Carothersはアミノ酸の縮合反応を拡大し、グリコールとジカルボン酸の組み合わせで種々のポリエステルを合成した。そして5000程度までの分子量であることを確認した<sup>57)-59)</sup>。しかし、グリコールとジカルボン酸の縮合反応では、エステルのできる反応 (水ができる) と元の酸とアルコールに分解する逆反応との可逆反応であるため、分子量が大きくなる前に反応が止まってしまう。そこで生じる水を取り去ることができればもっと分子量をあげられると考えた。そのためには反応の平衡状態をずらし、生成側に偏らせる必要があり、そのため真空下で反応を起こさせる方法を取りあげた。当時から10年程前の1920年にブレンステッ

ド (J. N. Broensted) とヘベシイ (G. Hevesy) は水銀の同位体分離に低圧下で水銀を蒸発させ、その蒸発物を低温の表面に濃縮させる方法を報告していた<sup>60)</sup>。塩素についても報告している<sup>61)</sup>。詳細な報告は参考文献62)にある。アメリカでは国立標準局での研究が報告されている<sup>63)</sup>。当時これらを参考にすることができ、分子蒸留装置を設計・製作できた<sup>64)</sup>。

ジュリアン・ヒル (Julian W. Hill) は、分子蒸留装置 (molecular still) を用いて10<sup>-5</sup> mmHg以下の真空中でヘキサデカメチレンジカルボン酸 (C-16ジカルボン酸) とトリメチレングリコール (C-3グリコール) の縮合反応を行った。するとエステル化の平衡をシフトさせることができ、更に長時間 (12日間程度) 200°Cに加熱することにより、分子量12,000程度 (重合度37程度) のポリマーが得られた (沸点上昇測定による)<sup>65)</sup>。1930年4月30日のことである。高い分子量を示したポリマーは糸に曳くことができ、更に冷延伸が可能であった<sup>65),66)</sup>。世界初の合成繊維の誕生である。

その後 $\epsilon$ -アミノカプロン酸からのポリアミドの合成やトリメチレングリコールとヘキサデカメチレンジカルボン酸と $\epsilon$ -アミノカプロン酸を同時に熱してポリエステル-ポリアミドの共重合体を作った<sup>67)</sup>。後者は同様に糸に曳くことができた。しかし融点が高いことや多くの溶媒に溶解するため、合成繊維としては不向きと考えられた。またポリエステルについても検討されたが、同様に融点が高かった<sup>68)</sup> (因みに実用に耐えるポリエステルは1941年のジョン・ウィンフィールド (John Rex Whinfield) とジェームズ・ディックソン (James Tennant Dickson) によるポリエチレンテレフタレート<sup>69)</sup>の合成<sup>69)</sup>まで待たねばならなかった)。

一方 $\epsilon$ -アミノカプロン酸を分子蒸留の方法で重縮合させた場合、固くて靱性の高い、しかも殆どの溶媒に溶けない (熱したフェノールと熱したフォルムアルデヒドには溶ける) 試料が得られたが、糸に曳くことはできなかった<sup>67)</sup>。しかし融点が高いことと、耐溶媒性といった性質を考慮し、また「羊毛はポリアミドの一種である。」<sup>70)</sup>という考えにも同調して、Carothers達は種々のアミノ酸を重縮合させたり、二塩基酸とジアミンの組み合わせをかえて重縮合させたポリアミドの性質を調べあげた。繊維として利用するためには、適当な融点、粘度、耐溶媒性等が必要であるが、それを

設計するための知識は全くなかった（このことは他の分野も含めて、分子構造やその集合構造と機能の関係については現在でも確立された理論があるわけではない）。そのために銅鉄主義或いは絨毯爆撃といわれる試行錯誤を繰り返した。それらをアミンの中及び酸の中の炭素数を並べて表すと、2-10, 5-6, 5-10, 5-6, 5-12, 5-18, 6-6, 10-1, 10-2, 10-6, 10-10, 11-10, 12-6等であり、81種のポリアミドにのぼる<sup>71)</sup>。その中で1935年2月に、ヘキサメチレンジアミンとアジピン酸を用いて、ポリヘキサメチレンアジパミド(66ナイロン)ができた。冷延伸された66ポリアミドは高い強度と弾性を持ち、通常の溶媒には不溶、融点は263°Cで、アイロンがけにも耐える温度であった。この物質が持っている性質と製造コストからして best balance と考えられた。

ヘキサメチレンジアミンとアジピン酸から作る66ポリアミド(ナイロン)を工業的に製造するにあたっては、石炭酸からシクロヘキサノールを得、硝酸と反応させてアジピン酸を得る。更にアジピン酸とアンモニアとの脱水縮合によりアジポアミドを得、脱水してアジポニトリルそして水素を添加してヘキサメチレンジアミンを得る方法が開発された。これらの原料を自社生産し、これらをオートクレーブ中で重縮合反応を起こさせて、66ポリアミド(ナイロン)とする。分子量を1万以上にするために工業的には高真空は使わず、触媒や安定剤が使われる。できた溶融ナイロンはロール上にリボン状に押し出されて、そのリボンがチップに切断される。このチップを再溶融して紡糸する。紡糸後冷延伸して繊維糸として使われる<sup>72)</sup>。

Carothersはモノマーの構造を明確にしながらか重合を行った(その反応から重縮合や付加重合を明確化した)<sup>73)</sup>。しかし合成繊維というものの開発という観点からは分子量を高分子量化(10,000以上、或いは重合度でいえば数百程度以上)することが最も重要であった。これは彼らの研究の10年ほど前に開発された分子蒸留という方法を採用入れることにより可能であることを示した(工場生産のときは高真空を用いず、触媒で解決した)。この高分子量化という目標は科学から出てきたわけではないし、その達成には技術が先導しているといえる。このナイロン等の開発の時代には合成高分子学はまだ成立しておらず、むしろナイロンという初めての合成繊維の開発に触発されて合

成・物性の研究が進み、現在不十分ながら「高分子科学」といえる段階まで来たといえる。

例えば、分子量の決定はオリゴマー程度(分子量が数千以下)なら凝固点降下法や沸点上昇法で可能であったが、分子量が1万を越えるようになって、別の方法が必要になった。粘度や遠心分離法といった方法が採り入れられていく。この中で高分子鎖のコンフィギュレーションやコンフォメーションの議論が必要とされ、Carothersと一緒に研究したポール・フローリ(Paul John Flory)を中心として高分子溶液物性が研究された。またポリエステルやポリオレフィンが合成されて高分子化学更には高分子固体物性といった分野が構築されていくが、これはナイロン発表・市販以後のことで、第二次大戦後の発展に属する。

科学の目により、どのような構造と反応が関連しているのかがはっきりすれば、必要な物質の設計が可能となり、研究は楽になる。しかし現在でも、目標とするものの機能が明確になったものは少ない。現実的には天然で機能の明確なもの(染料、特效薬等)の化学合成が研究対象になる程度である。目標をはっきり持った上での試行錯誤が研究の姿である。何でもよいから興味のある反応で物質を作ってみて機能はその後考えるでは効率が悪い。目標の設定をどうするかが、有機化学の大きな課題である。

## 6. 技術は科学に先行する

科学に基づいた技術開発の例としてあげられることの多い、電磁気分野、合成染料分野、合成高分子分野の各場合を例としてみてきた。これらは実体としては、技術の開発が先行し、その結果がよかったから「何故(why)」を考え、その理由付けを行い、科学へと発展していった或いはしつつあるという動きであることが分かる。

Faradayは電磁回転装置や磁電誘導電流発生装置を作り、極めて高性能に稼働することを示した後、「何故」を追求し、近接作用の概念に行きついた。そして電磁気学の体系化を試みたのがMaxwellであり、更に整理したのがHeavisideであり、そしてMichelson-Morleyの実験によるエーテルの否定をもって体系として完成する。一方その電磁気学の体系化の動きとは独立して、通信分野の技術開発が進み、電話や大西洋横断通信等が一気に進んだ。またよく知られているように、トーマ

ス・エジソン (Thomas Alva Edison) による発電所の建設、電灯等家電機器の開発も進み、20世紀文明が開花した。技術 (電動機、発電機、通信、電灯、家電機器等) の開発と科学 (電磁気学の確立) とはあまり連動しているとは見えない。技術が科学に先行している。むしろ科学の教育を受け、或いはその素養をもった人達が技術を開発したことが重要なポイントである。

Baeyer は天然インディゴ合成を試み、その後 Heumann や Pfleger 等による工業的生産方法が確立された。しかしインディゴの化学構造がトランス型であることが判明したのは、Baeyer のシス型構造の発表から70年程たった1954年である。ある程度のねらいをつけて化学合成を行っても、結局は試行錯誤の世界であることが分かる。研究開発というものは技術にしても科学にしても試行錯誤の世界であるという本質は変わらない。Baeyer はインディゴ合成技術を開発したが、合成物の構造は不明確であったことから、この分野はまだ科学の域に達していなかったと言える。

Carothers は高分子を合成するには付加重合と縮合重合 (重縮合) があることを見抜き、提唱したことは慧眼であり、高く評価されている。縮合重合で分子量を上げるには分子蒸留装置の開発が必要であったが、この技術は Carothers らの研究の10年程前に開発されていたもので、幸運であったというべきである。アミノ酸の縮合重合においても、分子量4000くらいまでは E. Fischer により既に行われており、Carothers らの貢献は分子量を上げたことであるから、それに果たした分子蒸留装置の役割は大きかった。それ無しには Carothers らがナイロンという人工繊維に辿り着くことはありえなかった。明らかに技術が先行している。高分子量のポリアミドが合成可能と分かると、工業的には触媒を用いる方法が開発された。また戦後になるが、ポリアミド以外のポリエステルやポリオレフィン等を中心とした現在の高分子材料の世界が開かれていった。

電磁気分野や合成高分子分野の例から端的に分かるように、まずある目的を持って「技術」開発が試行錯誤で行われ (電磁回転装置、磁電誘導電流発生装置、高分子量ポリアミド等)、それに基づき定量的なデータが得られるようになる。この定量的データに基づき、他の既知のデータも総合しながら、必要な新たな概念 (近接作用、付加重合と縮合重合の機構) を用いて、少ない前提から演

繹法により多くの事実を説明できるようにしたものとして「科学」(電磁気学、合成高分子学) が成立している。この科学により、事実を全て覚えることにより伝承する科学以前の方法に比して、少ない前提と演繹法を共有することで、人類の持つ個々の膨大な事実を容易に共有出来るようになった。そしてこの科学の教育を受けた人間が技術開発を行えば、試行錯誤の本質は変わらないとはいえ、より効率的に行えることは明らかである。技術は科学に先行しているといえる。なお本報告では19世紀から20世紀前半の研究現場の例について検討したが、他にも20世紀には多くの例が見られる。これらは今後の検討課題である。

## 7. 議論

本報告では一般的に使用されている科学よりもかなり限定された意味で科学という言葉を用いた。本稿での狭い意味での科学を前提にすると、一般的に用いられている科学の問題点も浮かび上がってくる。

まず学問と同じ意味で科学が用いられている場合がある。学問は受け入れられた事実・思考等を並列的に (分類はするにしても) 並べたものである。人類の経験が並べられている。科学の発生以前はこれが知の蓄積の一般的方法であり、人類のどの文明も同じである。中国はその内容が多く、日本をはじめ周辺国にも伝搬している。

この学問として知られた蓄積の中で、いくつかの数少ない前提から演繹法により導ける事項を集め、整理できることが知られるようになった。まず数学でその例が現れ、特にエウクレイデス (Euclidēs) の「原論」が現在知られている最古の例である。数学以外でもアルキメデス (Archimēdēs) の「平面版の平衡すなわち平面版の重心」や「浮体について」も同様の形式を踏襲して書かれている。数学は「原論」をモデルとして、少ない前提 (公理) のもと、演繹法で導かれる事実をまとめて、体系が作られていった。科学もこの体系をもって記述されたものの集合である。単なる事実を集めた学問とは異なる。

物理学では、古典力学、熱学、電磁気学、量子力学、相対論といった体系ができ、科学発展の金字塔になっているが、森羅万象が説明できているわけではない。しかも線形系に限られていると言っても過言ではない (流体力学や統計力学はそ

の根拠もまだ十分でないところがある)。複雑な系の代表格である物性についてはまだまだ不十分な点が多い。素粒子の分野では理論が先行しているように見えるが、加速器等による実験結果に理論が誘導されていることには変わりがない。

気体の圧力の法則や空気の組成等から元素の存在が明らかとなり、それらの化学反応から原子・分子の存在を認める化学が成立し、周期表も明らかとなった。錬金術をベースとしてきた化学が科学となった。しかし炭素・水素・窒素を中心とした有機化学は分子の構造が複雑であり、現在においても科学というには不十分な姿が続いている。

生物学についても、遺伝子関連技術や知識は近年飛躍的に増大しているとはいえ、まだ科学の域に達しているというには十分でないところがある。演繹的に説明できる体系には不十分である。このことは工学の各分野についても言えることである。

科学は状態量が何であるかが把握され、その状態量が測定でき、定量化された状態量の間の関係を因果性で捉えることから始まる。物理学の場合は質量、位置ベクトル、運動量ベクトル、時間といったものが基本的な物理量として捉えられ、更に温度、エントロピー、電磁場、電流、磁化といった状態量が把握されて、熱力学や電磁気学が成立している。

生物学は遺伝子レベルの認識が進んだが、全体としてはまだ体系化の途上である。化学についても低分子に関する化学はともかくとして、有機化学は生化学も含めて複雑なままであり、状態を表す量として何がよいか研究を進めて、より単純な体系にする必要がある。人名反応が200を越えて存在する状況は、まだまだ事実の積み上げの段階といえる。このように見てくると、科学といえるものはかなり少ないことが分かる。

「技術は科学の応用である」(応用科学説)という根強い考えがあるが、応用する情報源としての科学が森羅万象の全てを把握している点で誤りを含んでいる。技術のある部分を科学理論で説明するためには役立つ考えだが、(1)そもそも科学が森羅万象を説明できているわけではないこと、(2)応用といっても、科学理論とは別個の独自の工夫が必要であること、等の理由によりあまり認められているとは言えない。しかし基礎から応用へという単純な考えが頭に入りやすいこともあり、政治を含めた一般社会での科学技術経営

分野では未だによく使われる概念である。応用科学説の罪悪は、暗黙のうちに科学を技術より上位のものであるという意識を蔓延させていることである。人間の手作業よりも頭脳労働をより高度なものとする欧州流の意識が忍び込んでいる(古い例では参考文献8)のp.663以降を参照。またこの中のPlate17ではApplied Scienceと明記されている)。

科学と技術は別個のものであり、技術により蓄積された事実を演繹で説明できるように体系立てたのが科学である。その時前提の異なる体系が数多く存在する。物理学の中でも古典力学(ニュートン力学)、量子力学、相対論等というようにいくつかの体系が存在する。科学の発展はこれらの既存の体系の成立する限界や成立条件或いは有効な領域を明らかにするものであるともいえる。他にも化学、生物学、工学、農学等の一部も科学としての体系化が進んでいるものがある。技術の蓄積の中から科学の種を探し出すべきである。科学から新たな技術が出てくることは殆どない。

既知の科学を身につけた或いは教育された人間により技術開発の行われる姿が科学と技術の合体した「科学技術」である。しかし科学から新たな技術が生まれるわけではなく、科学の教育を受けた人間による試行錯誤に基づく技術開発が必要であり、実際に行われている姿である。それらの技術開発により得られた定量的データに基づき、新たな考え方、概念を生み出す行為が科学成立を目指して行われている姿である。

試行錯誤を行う人間が科学を知っていると、その成功した原因或いは失敗した原因を把握しやすくなり、試行錯誤で好結果を得る効率がよくなる。また失敗例を他人に伝えるとき、何故失敗したかを科学をベースに説明できれば、受け手も科学をベースにした人間であれば、その説明を理解することができ、次の試行錯誤を効率的に行える。科学は技術開発者がバックグラウンドとして知っていると、失敗や成功のその情報の伝達や蓄積を格段に正確に迅速に行えるために重要である。

科学から新しい現象が見出されたことはない(世界史上何人かの天才を除けば、殆どない)。現象が何らかの理由で見つかった、その現象を用いた技術開発が行われ、その本質を理解しようとする行為から科学は始まる。そしてその本質がそれなりに分かって研究者に共有された時、その役割

を果たすことになる。即ち科学は研究者のバックグラウンドとして持っているべき知識であり、それを持つことにより理解が早まり、迅速に理解が伝わり、社会的に種々の現象が共有される。そのために重要であり、基本的に教育のためのものである。

科学はリアリティ（実在）を求めるとか、真理を探究するとか言われるが、科学でリアリティは把握できない。実験即ち技術により把握できるのみである。「真理の探究」という目的に至っては宗教と同じことになり、殆ど意味はない。真理はどこか遠くに存在するものではなく、試行錯誤の連鎖の中にある。進化は試行錯誤のプロセスをいうのであり、その一断面に仮説としての真理があるだけである。

技術も科学も試行錯誤で行われるが、技術は社会的に蓄積された知識を総動員して有用物或いは必要物の開発をめざす。その結果得られた知識のある部分を体系的に説明したものが科学である（図1参照）。科学は真理の探究ではなく、人間の知識の共有に効率のよい方法として編み出されたもので、教育にとって重要なものである。科学の発展や分野の拡大は技術の進展から導かれる。科学は教育乃至は知識の効率的な伝承のために有用であることをもっと重視するべきである。

本報告で取り上げた例、Faraday, Baeyer, Carothersといった人達の研究開発は基礎研究と位置づけられてきたが、実際は、如何に社会的に望まれた開発であったかを示しており、科学の教育を受けた或いはその素養を持った人達による研究開発であったことが明らかになった。はっきりとした目的をもった研究開発であったし、その実現のために本質的な考察を必要とし、科学的内容にまで踏み込んで研究をしたということが実情である。例えばFaradayは近接作用という概念を出すために研究を始めたのではない。電磁気回転装置や磁電誘導電流発生装置が可能で且つ極めて有用であることを実証したから、何故それが可能なのかを探究し、近接作用に辿り着いたのである。

最近の研究開発の実施は組織的（企業、大学、公的研究機関）に行われることが殆どである。その予算規模も大きくなり、予算使用の透明化も要求されるようになった。そのため研究開発組織も「経営」が必要となった。その視点から過去の研究開発の状況を見直して見る必要がある。高度化し、人的にも装置的にも大掛かりになった現代の

技術開発では、研究開発が個人作業から集団による作業に移っている。そのため研究開発の動機乃至はテーマの選定は、ますますその時々、社会的な情勢或いは興味のあり方から決まるようになっていく。電磁気回転装置や磁電誘導電流発生装置の開発、天然染料の化学合成による開発、合成繊維や合成ゴムといった合成高分子の開発が、まず試作により何がどのように作れるかのイメージが社会的・組織的（企業等）に共有された時に即ち社会的・組織的に認められたとき（in the air）、それらの開発が組織や個人の研究開発の強い motive force になる。そしてその場合に独創的な研究成果が出ることが多い。研究経営で留意されるべき点であろう。

## 8. おわりに

技術や科学、特に科学に対して、現実の大学等で理解されている概念（真理の探究）より狭い概念（少ない前提から演繹により説明できる事柄の体系）で捉えて議論した。科学により原子分子電子更には素粒子が把握され、その後その実体が観測されるようになったことから、リアリティの把握が科学の目的と言われることも多いが、それは科学の持つ派生效果と考える。化学の蓄積された実験事実を体系として考える場合に原子・分子の存在が必要と考えられ、その後技術の進歩により直接観察されるようになった。別の体系では状態量という言い方もされ、電磁場・電流・磁化や温度・エントロピー、応力・歪等が考えられた。生物の世界では遺伝子もその候補として記述されつつある。有機化学反応や液体といった世界は、未だ複雑すぎて科学となるには道が遠い。

本報告では19世紀から20世紀前半で顕著な成果を挙げた電磁気分野（M. Faradayを中心）、合成染料分野（W. H. Perkin, C. Graeve and C. Liebermann及びA. von Baeyerを中心）そして合成高分子分野（W. H. Carothersを中心）を例に取り上げ、その研究開発の道筋を辿ることから、技術の開発が先行し、その後科学（電磁気学、合成染料学、合成高分子学）の成立が続いたことを明らかにした。

科学という言葉が学問と近い意味で使われるようになり、その本質が見えにくくなってしまった。特に技術を低く見る傾向に拍車がかかり、理論優位の傾向を生み出してしまった。科学の理論

も重要だが、着実に一歩ずつ進めているのは技術であること、それが人間の生存について最大の開発課題であることを再確認することが重要である。

### 謝 辞

国立科学博物館図書室には文献調査に関して大変お世話になりました。深甚の謝意を表します。

### 参考文献

1. はじめに 及び 2. 本報告で用いる仮説
- 1) Berkson, W., 1974. "Fields of Force — The Development of a World View from Faraday to Einstein —". (London, Routledge and Kegan Paul Ltd).
- 2) Cantor, G. N., 1991. "Michael Faraday: Sandemanian and Scientist — A Study of Science and Religion in the Nineteenth Century —". (London, MacMillan Academic and Professional Ltd).
- 3) 中山茂, 1974. "歴史としての学問". (中央公論社).
- 4) 橋本敬造, 1982. 第六章西洋天文学の導入と徐光啓の役割 (吉田忠編 "東アジアの科学", 1982年, 勁草書房).
- 5) 市川惇信, 2008. "科学が進化する5つの条件" (岩波科学ライブラリー146, 岩波書店).
- 6) Popper, K. R., 1979. "Objective Knowledge — An Evolutionary Approach". (Oxford at the Clarendon Press), p. 243, p. 287.
3. 電磁気分野の場合 (Michael Faradayの研究を中心として)
- 7) Volta, A., 1800. On the Electricity excited by the mere Contact of conducting Substances of different kinds. In a Letter from Mr. Alexander Volta, F.R.S. Professor of Natural Philosophy in the University of Pavia, to the Rt. Hon. Sir Joseph Banks, Bart. K.B.P.R.S. *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond.*, 90: 403–431.
- 8) Routledge, R., 1881. "A Popular History of Science", (George Routledge And Sons, New York), p. 553.
- 9) Oersted, J (H) C., 1820. Experiments on the Effect of a Current of Electricity on the Magnetic Needle. *Annals of Philosophy*, 16: 273–276.
- 10) Faraday, M., 1821. Historical Sketch of Electro-magnetism. *Annals of Philosophy*, 2: 195–200.
- 11) Faraday, M., 1821. Historical Sketch of Electro-magnetism. *Annals of Philosophy*, 2: 274–290.
- 12) Faraday, M., 1822. Historical Sketch of Electro-magnetism. *Annals of Philosophy*, 3: 107–121.
- 13) Faraday, M., 1823. Historical Statement respecting Electro-Magnetic Rotation. *Quarterly Journal of Science, Literature and the Arts*, 15: 288–292.
- 14) Davy, H., 1821. On the magnetic phenomena produced by Electricity. *Philosophical Transactions Roy. Soc. Lond.*, 111: 7–19.
- 15) Faraday's Diary of Experimental Investigation 1820–1862, vol. 1 (Sep. 1820–June 11, 1832) ed. Thomas Martin (2008. HR Direct, Utah, USA.), p. 50, p. 367.
- 16) Faraday, M., 1822. On some new Electro-Magnetical Motions, and on the Theory of Magnetism. *Quarterly Journal of Science, Literature and the Arts*, 12: 74–96.
- 17) Faraday, M., 1822. New Electro-Magnetic Apparatus. *Quarterly Journal of Science, Literature and the Arts*, 12: 186–187.
- 18) Faraday, M., 1822. Description of an Electro-magnetical Apparatus for the Exhibition of Rotatory Motion. *Quarterly Journal of Science, Literature and the Arts*, 12: 283–285.
- 19) Faraday, M., 1825. On new compounds of carbon and hydrogen, and on certain other products obtained during the decomposition of oil by heat. *Philosophical Transactions of Royal Society of London*, 115: 440–466.
- 20) Kaiser, R., 1968. "Bicaruret of Hydrogen". Reappraisal of the Discovery of Benzene in 1825 with the Analytical Methods of 1968. *Angewandte Chemie International Edition*, 7(5): 345–350.
- 21) Faraday, M., 1832. Experimental Researches in Electricity. *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond.*, 122: 125–162.
- 22) Faraday, M., 1832. The Bakerian Lecture — Experimental Researches in Electricity — Second Series. *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond.*, 122: 163–194.
- 23) Maxwell, J. C., 1856. On Faraday's Lines of Force. *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, 10: 27–83.
- 24) Maxwell, J. C., 1861. On Physical Lines of Force. *Phil. Mag. Ser. 4*, 21: 161–175, *ibid* 21: 281–291, *ibid* 21: 338–348, *ibid* 23(1862): 12–24, *ibid* 23(1862): 85–95.
- 25) Maxwell, J. C., 1865. A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field. *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond.*, 155: 459–512.
- 26) Maxwell, J. C., 1891. "A Treatise on Electricity and Magnetism" (Clarendon Press, 1954 Dover).
- 27) Heaviside, O., 1894. "Electromagnetic Theory" ("The Electrician" Print Pub. Co., Ltd. London).
- 28) Hertz, H., 1893. "Electric Waves: Being Researches on the Propagation of Electric Action with Finite Velocity through Space" transl. by D. E. Jones (MacMillan and Co. Lond.), pp. 124–136.
- 29) Stauffer, R. C., 1957. Speculation and Experiment in the Background of Oersted's Discovery of Electromagne-

- tism. *ISIS*, 48: 33–50.
4. 合成染料分野の場合 (William H. Perkin, Carl Graebe and Carl Liebermann, 及び Adolf von Baeyer の研究を中心として)
  - 30) 原光雄, 1973. “化学を築いた人々 (中央公論社, 自然選書).
  - 31) Perkin, W. H., 1857. Producing a new coloring matter for dyeing with a lilac or purple color stuffs of silk, cotton, wool, or other materials. Patent GB No. 1984 (dated on 26<sup>th</sup> August 1856 and sealed on 20<sup>th</sup> February 1857).
  - 32) Perkin, W. H., 1863. On mauve or aniline-purple. *Proc. Roy. Soc. London*, 12: 713–715.
  - 33) Perkin, W. H., 1864. On mauve or aniline-purple. *Proc. Roy. Soc. London*, 13: 170–176.
  - 34) Seixas de Melo, J., S. Takato, M. Sousa, M. J. Melo and A. J. Parola, 2007. Revisiting Perkin's dye(s): The spectroscopy and photophysics of two new mauveine compounds (B2 and C). *Chem. Commun.*, 2007: 2624–2626.
  - 35) Sousa, M. M., M. J. Melo, A. J. Parola, P. J. T. Morris, H. S. Rzepa and J. S. Seixas de Melo, 2008. A Study in Mauve: Unveiling Perkin's Dye in Historic Samples. *Chem. Eur. J.*, 14: 8507–8513.
  - 36) Plater, M. J., 2015. W H Perkin Patent AD1856 No.1984: A review on authentic mauveine and related compounds. *J. Chem. Res.*, 39(5): 251–310.
  - 37) Graebe, C. and C. Liebermann, 1868. Ueber Alizarin und Anthracen. *Ber. Deuts. Chem. Gesell. Berlin*, 1(1): 49–51.
  - 38) Graebe, C. and C. Liebermann, 1868. Ueber Farbstoffe aus der Anthracengruppe. *Ber. Deuts. Chem. Gesell. Berlin*, 1(1): 104–106.
  - 39) Graebe, C. and C. Liebermann, 1869. Improved Process of Preparing Alizarine. Patent US No. 95465 (dated October 5, 1869).
  - 40) Graebe, C. and C. Liebermann, 1869. Ueber kuenstliche Bildung von Alizarin. *Ber. Deuts. Chem. Gesell. Berlin*, 2(1): 14.
  - 41) Caro, H., C. Graebe and C. Liebermann, 1870. Ueber Fabrikation von kuenstlichem Alizarin. *Ber. Deuts. Chem. Gesell. Berlin*, 3: 359–360.
  - 42) Baeyer, A. and A. Emmerling, 1869. Synthese des Indols. *Ber. Deuts. Chem. Gesell. Berlin*, 2: 679–682.
  - 43) Baeyer, A. and A. Emmerling, 1870. Reduction des Isatins zu Indigbrau. *Ber. Deuts. Chem. Gesell. Berlin*, 3(1): 514–517.
  - 44) Baeyer, A., 1880. Ueber die Beziehungen der Zimmtsaure zu der Indigogruppe. *Ber. Deuts. Chem. Gesell. Berlin*, 13(2): 2254–2263.
  - 45) Baeyer, A., 1880. Darstellung von Derivaten der Ortho-nitrozimmtsaure, den Homologen und Substitutionsprodukten dieser Derivate und Unwandlung derselben in Indigblau und verwandte Farbstoffe. Patent DE 11857 (vom 19. Maerz, 1880).
  - 46) Baeyer, A. and V. Drewsen, 1882. Darstellung von Indigblau aus Orthonitrobenzaldehyd. *Ber. Deuts. Chem. Gesell. Berlin*, 15(2): 2856–2864.
  - 47) Bayer, A., 1883. Ueber die Verbindungen der Indigogruppe. *Ber. Deuts. Chem. Gesell. Berlin*, 16: 2188–2204.
  - 48) Heumann, K., 1890. Neue Synthesen des Indigos und verwandter Farbstoffe. *Ber. Deuts. Chem. Gesell. Berlin*, 23(2): 3043–3045. Patent DE 54626A.
  - 49) Heumann, K., 1890. Neue Synthesen des Indigos und verwandter Farbstoffe. *Ber. Deuts. Chem. Gesell. Berlin*, 23(2): 3431–3435. Patent DE 56273A.
  - 50) Pflieger, J., 1901. Process of Making Indoxyl Derivatives. Patent US 680395A.
  - 51) Hélène von Eller, 1954. Stéréochimie de l'indigo dans l'état cristallin. *Comptes Rendus Hebd. Seances de Acad. Sci.*, 239: 975–976.
  - 52) Klessinger, M. and W. Lükke, 1963. Theoretische und Spektroskopische Untersuchungen an Indigo-Farbstoffen II, Das Chromophore System der Indigo-Farbstoffe. *Tetrahedron*, 19: 315–335.
  5. 合成高分子分野の場合 (Wallace Hume Carothers の研究を中心として)
  - 53) Hermes, M. E., 1996. “Enough for one life” —Wallace Carothers, Inventor of Nylon — (ACS-CHF), p.84.
  - 54) Furukawa, Y., 1998. “Inventing Polymer Science” — Staudinger, Carothers, and the Emergence of Macromolecular Chemistry — (Univ. Penn. Press, Philadelphia), p. 110.
  - 55) Carothers, W. H., I. Williams, A. M. Collins and J. E. Kirby, 1931. Acetylene Polymers and their Derivatives. II. A new synthetic Rubber: Chloroprene and its Polymers. *J. Am. Chem. Soc.*, 53: 4203–4225.
  - 56) Fischer, E., 1914. Synthesis of Depsides, Lichen-Substances and Tannins. *J. Am. Chem. Soc.*, 36: 1170–1201.
  - 57) Carothers, W. H., 1929. Studies of Polymerization and Ring Formation. I. An Introduction to the General Theory of Condensation Polymers. *J. Am. Chem. Soc.*, 51: 2548–2559.
  - 58) Carothers, W. H. and J. A. Arvin, 1929. Studies of Polymerization and Ring Formation. II. Poly-esters. *J. Am. Chem. Soc.*, 51: 2560–2570.
  - 59) Carothers, W. H. and F. J. Van Natta, 1930. Studies of Polymerization and Ring Formation. III. Glycol Esters of Carbonic Acid. *J. Am. Chem. Soc.*, 52: 314–326.
  - 60) Broested, J. N. and G. Hevesy, 1920. The Separation of the Isotopes of Mercury. *Nature*, 106: 144.

- 61) Broested, J. N. and G. Hevesy, 1921. The Separation of the Isotopes of Chlorine. *Nature*, 107: 619.
- 62) Broested, J. N. and G. Hevesy, 1922. On the Separation of the Isotopes of Mercury. *Phil. Mag.*, 43: 31–49.
- 63) Washburn, E. W., J. H. Brunn and M. McHicks, 1929. Apparatus and Methods for the Separation, Identification, and Determination of the Chemical Constituents of Petroleum. *Bur. Standards J. Res.*, 2: 467–488.
- 64) Carothers, W. H. and J. W. Hill, 1932. Studies of Polymerization and Ring Formation. XI. The Use of Molecular Evaporation as a Means for Propagating Chemical Reactions. *J. Am. Chem. Soc.*, 54: 1557–1559.
- 65) Carothers, W. H. and J. W. Hill, 1932. Studies of Polymerization and Ring Formation. XII. Linear Superpolyesters. *J. Am. Chem. Soc.*, 54: 1559–1566.
- 66) Carothers, W. H. and J. W. Hill, 1932. Studies of Polymerization and Ring Formation. XV. Artificial Fibers from Synthetic Linear Condensation Superpolymers. *J. Am. Chem. Soc.*, 54: 1579–1587.
- 67) Carothers, W. H. and J. W. Hill, 1932. Studies of Polymerization and Ring Formation. XIII. Polyamides and mixed Polyester-Polyamides. *J. Am. Chem. Soc.*, 54: 1566–1569.
- 68) Hill, J. W. and W. H. Carothers, 1932. Studies of Polymerization and Ring Formation. XIV. A Linear Superpolyanhydride and a cyclic Dimeric Anhydride from Sebacic Acid. *J. Am. Chem. Soc.*, 54: 1569–1579.
- 69) Whinfield, J. R. and J. T. Dickson, 1941. Polymeric Linear Terephthalic Esters. Patent GB 578,079 (1941), Patent US 2,465,319 (1949).
- 70) Hermes, M. E., 1996. “Enough for one life” — Wallace Carothers, Inventor of Nylon — (ACS-CHF), p.184.
- 71) Furukawa, Y., 1998. “Inventing Polymer Science” — Staudinger, Carothers, and the Emergence of Macromolecular Chemistry — (Univ. Penn. Press, Philadelphia), p. 140.
- 72) Bolton, E. K., 1942. Development of Nylon. *Industrial and Engineering Chemistry*, 34: 53–58.
- 73) Carothers, W. H., 1931. Polymerization. *Chem. Rev.*, 8: 353–426.