着想の才能を引き出す化学系実験への期待

Prospect for Education of Engineering Talent by Chemical Experiments

四ツ柳 隆 夫^{※1}
Takao YOTSUYANAGI

石 山 純 一^{※2}
Jun-ichi ISHIYAMA

In the field of engineering education, much efforts have been placed on the teaching and training for knowledge and skill, however, education of engineering talent, including wisdom, intelligence, and sense, by chemical system construction experiments were in minor position even though which is essential for the technical innovation in the times of sustainable development of the human life. "Ideas" occurred in students mind, when PBL style chemical experiments such as inorganic qualitative analysis and organic synthesis being carried out, should have essentially the same nature as those required in the construction of chemical evolution systems in their future.

Keywords : Engineering Talent Education, Chemical Experiment, Chemical System, Idea,

キーワード : 技術者の着想力を引き出す教育, 化学実験, 化学システム論, アイデア

1. はじめに 新たなフロンティアに向けて

次世代を担う技術者教育において、実験・実習が担う役割は従来にも増して大きい。その訳は、人類が未体験のフロンティアに踏み込むとき、必ずイノベーションによって限界を超えるしか途はないからである。イノベーションは、シュペンターによって提案された概念である¹⁾。当初は、「新結合」と表現された、異質なものの組み合わせが駆動力を生むという考え方である。これによって世界大恐慌の困難な状況を克服して資本主義の発展の原動力となった。

新結合を考え出すには、思いつき、着想が必要である。ウエーバーは、第1次大戦後意気消沈したドイツの学生達を励ます講演の中で、情熱を持って仕事に集中する必要性を説くと共に着想の重要性を「如何に情熱があっても、その場に適した思いつきがなければ、何事も成し遂げられない」という形で語っている²⁾。

学問は自らの体系の中から新しい学問をつくれない。外側からのニーズによって、ブレークスルーの契機をつかんできた。産業革命時代、熱機関の技術ニーズから生まれた熱力学はこの世界の駆動力として最も信頼できる科学である。技術が科学の揺籠となった例であり、この技術が科学の応用によって生まれたわけではない。熱力学をめぐって、アメリカと日本の学生達の発想法の間に、次のような大きな違いがある。米国NASAから3年間、東北大学に来ていたスペースシャトルの専門家パーク・チョル教授は、「日本の大学では創造性を育てる話をよく聞きますが、大学生で

は遅すぎませんか」というものであった³⁾。彼によると、MITの学部学生の半数以上が、永久機関の設計やモデル造りにチャレンジして、熱力学の第2法則があつて不可能だといくら言ってもそれだけでは引き下らない。ではどこが間違っているか、指摘してください、と食い下がられて、簡単には不備を指摘できない出来栄であったそうである⁴⁾。一方、日本では、物理学の大法則にチャレンジする学部学生は聞いたことがない。このようなチャレンジャーがごく当たり前に生まれる学びの文化と風土の中に、人類の生存をかけたブレークスルーが生み出される希望がある。このような学生を育てる、才能を引き出すEDUCATION、のシステムを創り、実験・実習のあり方を工夫する必要がある。

高度成長期を支えた技術者が受けていたかつての工学教育では、化学系であっても、機械工学と電気工学に関する概論講義と学生実験を必修とし、技術者としての広汎な体験重視型の教育スタイルをもっていた。これに対して最近の教育では、学ぶべき事項が多くなった等の理由で他分野の教育にまで手が回らず、視野の狭い技術者を育ててしまう傾向がある。現在の学生達が中核となって活躍する20～30年先の時代では、環境と調和して生きるための技術は、その内容を高度に複合化したものとなるであろう。このため、再び幅広い分野の素養を要求するようになってくる筈である。

この様な視点から、本稿では、着想力の育成に焦点を当てて、機能創発システムを創った事例を追体験する方法と、無機定性分析体系を活用して物質を自在に操る物質感覚と論理的な思考力を養成する、システム論に着目した教育モデルを考えてみたい。

平成22年10月29日受付

※1 東北大学

※2 仙台高等専門学校

2. 講義、演習、実験・実習の時間バランスについて
まず、講義、演習・実験・実習の時間数のあり方を、考え直してみる。例えば、異分野であるが、ハーバード大学医学部の有名な例がある。「朝の第1, 2講時に講義、第3, 4講時にその演習を行う。午後からの5～10講時に実験・実習を行う」というスタイルである。

この内容を、1講時を1時間、45時間の学習で1単位として単位数を計算してみる。これを1セメスター15週とすると、講義、演習、実験・実習、合計4単位となる。週5日、年2セメスターとすると4年間では160単位に相当する。卒業要件単位数は124であるから、36単位分の余裕があることになる。なお、自学自習の必要時間は、この設定では、講義に4時間、演習に1時間、合計5時間/日である。なお、我が国では講義時間数が多過ぎるので、必要とする自学自習時間数が対応困難なほど過大となっている。

それにしても、2単位講義が最大週5コマでは、「講義科目数が少なすぎませんか」、という問いが出てくる。これに対しては、「演習と実験・実習を充実させているから大丈夫である」とのことであった。なお、学生当たりの教員数が、我が国の2倍以上ある豊かな人的資源があって、初めてこのような教育システムが機能していることも見逃してはならない。

このように、講義が少なく、実験・実習の時間数が多いカリキュラムのあり方は、講義の進度に追いつき難い学生が増えてきている状況に照らして、検討に値する。我が国の学生達の多くも、実験・実習の時間でどれだけ救われていることか、学生達の声を聞き、その実情は承知しておくべきである。

3. 化学システム論

工学を学ぶ際、工学の3要素といわれてきた「物質、エネルギー、情報」に関する素養に加えて、「システム」に対する素養が重要である。高度の機能を持つシステムを創り出すことが、科学技術の核心的課題である。

化学の領域で、機能を持つモノや仕組みを創るには、1) 新しい物質を創る方法(合成化学)と、2) 既存の物質と働く場所(場)とを組み合わせる新たな機能を獲得する方法、化学システム論: 図1^{5), 6)}とがある。組み合わせによって構成要素の機能の和を超える新たな機能を発現する現象を創発という。前者については、化学の伝統的な手法であるから説明するまでも

図1 化学システム論と機能の創発

ない。後者の究極のモデルは生命体であるが、化合物に関するものについて具体的な例を説明しておく。

物質は、その置かれた場の条件によって多様な物性を発揮する。例えば、優秀な溶媒であり、熱媒体であったフロンは、人間の生活圏では安定で安全であるが、成層圏ではオゾン層を破壊し、紫外線の透過率を上げて環境問題を起こした。有害な大気汚染物質である酸化窒素は、人間の血管壁では、血管拡張機能を発揮して、心臓の危機を救った(ノーベル医学生理学賞)。エチレンは、植物の生長点で成長ホルモンとして機能する。エチレンや酸化窒素は、簡単な分子であるが、その構造だけをいくら見ても上述の機能を予測できない。では、機能創発システムを理論的に予測し、設計する方法はあるか。これは組み合わせの可能性が無限にある問題であるから、理論上不可能である。このことから、新規物質の安全性に関するアセスメントも行き先が無限にある以上、不可能であることが分かる。

この結論は、持続性を考えるとき重い意味を持つ。

具体的な着想さえあればコンピューター化学(図1)によるシミュレーションは強力な武器である。プログラム可能な既にある学術情報(理論)の世界内に限られるが、着想による組み合わせの試み(仮説)から人間のまだ気付いていない機能が得られる可能性はある。この着想を引き出す工夫こそが図2^{6), 7)}の主題である。

4. システムを創り出す「着想」について

化学系の実験・実習では、先人が創ったシステムや分子を対象とし、原理とその作り方や解析の技術を学ぶと共に、それらのもつ構造の美しさや機能のすばらしさを知らせることに力点がある。しかし、技法や知識を学ぶには有効であっても、それを組み立てる際の最も重要な要素、「着想」に配慮されないことが多い。このような教育方法では、「要素があれば、必要に応じてシステムを作れる」と学生が思いこむことの方がむしろ自然である。我が国には「着想や思いつき」を当てにならないものとして軽視する風土が根付いている。科学者達によって辛くも支えられた科学の歴史を無視している。修士論文の研究の過程で行き詰まった時、「先生は正解を知っているでしょう、教えて下さい」と言った学生がいたという。この恐るべきエピソードも、「着想」が無視されていたことに原因があった。

5. システムの機能について

技術システムの機能は、次の2つの特性をもつ。システムを組み上げるときに必要な着想とそれを生み出す関連事項を図2に、その技術水準を決めるキーテクノロジーと要素技術の関係については図3に示す。

5.1 機能の創発

機能創発システムの機能は、要素の特性の和からは予測できないから、要素をいくら勉強しても目標とするシステムは作れない。考えた上で「着想」を得たとき、

システムは組み上がる。なお、考える技術の資料を紹介しておく⁸⁾。この着想は特別なものではなく、創造活動から日常的な行動まで、何かに対する希望を持つ人間に「こうしてみようか」という具体的な動機を与える普遍的なものである。着想を評価する考え方には人間の可能性に対する信頼がある。

図2のTeaching & Trainingを行うに当たって、志があって初めて、身につけるべき技法が意味を持ち、学ぶ楽しさもまた湧いてくる。着想を生み出す基盤は、身についた“学問・情報”と、それらを使いこなす“智の技法・技能”である。外部にある膨大な学術情報ではない。有機合成の方法は、主要なものだけでも優に3万種類を超えるという。これを1つ修得するには4日掛かるとすると、100年かけても修得不可能な分量である。世界一流の研究室でさえ、その内、約50種類、全体の0.2%以下、を自在に使える程度である。人類の知的資産量は、学習可能な水準をとくに超えている。その一方で、自在に使える技知と知恵となった知識があれば、世界で最先端の創造活動ができることを意味している。知恵となった知識のセットが、パスツールの言う、Chance favors the prepared mind. の“The prepared mind”を形成するからであろう。

知識と情報と知恵について、次のような言葉がある。
 “或る程度の無知は発明のための必須の条件である”、
 “我々が情報の中で失った知識は何処にある、
 我々が知識の中で失った知恵は何処にある”
 前者はアンチノック剤の発明者、後者はワーズワースの詩の一節である。さらに、「この教科は何の役に立つのか分からない」というよくある切実な質問がある。まだ志を持ってない人が、学びの過程で起こすものである。この様なとき、図2の鎖線の上にあるEducationが必要であり、実験・実習はその契機を与える。実験によって救われている学生の存在は、このことを物語っている。

学習は、“知る→分かる→使える”という順序で理解が深まると考えられている。各段階それぞれに固有の障壁があるが、この場合も「こうかな」という思いつきがあって乗り越えていく場合が多い。どうしても分からないときには、先ず使ってみて（実験・実習）そこから逆に分かる途もある^{9),10)}。言葉にならない情

図2 着想がシステム構築の鍵

報を発している実物との対話は、言葉（学問）の障壁を突破する重要な方法である。この種の対話には知識や予断、仮説や着想は邪魔でさえあることがある。

ヘルマン・ヘッセは、「シッタルダ」の中で、「『知識』を人に伝えることは出来る。しかし『智慧』を伝えることは出来ないのだ。智慧を見出すことはできる。それを生活し味わうことはできる。それを自分の力とすることはできる。中略—しかしそれを口で言い、人に教えることはできない」と語っていた¹¹⁾。

教えることの出来る知識の体系が学問であるが、学問がいくらあっても技術は造れない。かつて、工学教育に関する講演会で吉川弘之は約20の学問（伝熱工学、金属加工学、化学、生物学ほか）を列挙して、「学問を学ぶだけでは目玉焼きは作れない」例を話していた¹²⁾。実物を一度体験すると簡単に分かることでも、学問だけからの取り組みでは本質的に困難である。

さて、着想に役立つセンス、インテリジェンス、志、知恵などという“教えることが出来ない素養”はどうやって身につけるか。これらは体験を通して自分の中から引き出されるものである。教師は時に応じ、行動と言葉を通して学生の心に届く光を当てることもある。先人達の着想の姿を学びながら、研究により自ら創造を体験する。大学で学ぶ楽しさと面白さの中心はここにある。図2はこれを育むためのヒントに他ならない。

5.2 キーテクノロジーとは最も遅れた技術

総合技術全体の技術レベルは、最も低い構成要素によって決まる。図3に、「技術の桶モデル¹³⁾」を示す。

構成要素技術を桶の枠木で示せば、その桶に貯まる水の水準は最も低い枠木の高さで決まる。これが総合技術水準である。最も遅れた要素技術を発見しそれを改善することによって、全体の水準を上げることが出来る。一方、最も進んだ技術を実用化するには、遅れていた周辺の技術群を同等の水準まで引き上げて初めて、その能力を発揮させることができる。桶モデルを用いて数多くの技術の進歩の跡を学ぶことができる。

かつてハーバーとボッシュは、どこにでもある空気と水からアンモニアの合成に成功して高压化学の扉を開き、肥料を大量生産して人類の食糧危機を救った。この事業は、触媒、高压反応容器等の要素技術にドイツ産業界の総力を結集して成し遂げられた¹⁴⁾。

図3 キーテクノロジーと桶モデル

6. 実験科目からのシステム論へのアプローチ

システムを組み上げる際のPBL (Problem Based Learning又はProject Based Learningの略称) モデルを図4に示す。これは、技術者が日常的に使っている手法であり、我が国の伝統的な卒業研究の様式である。

最初の課題は企画PBLである。スタートに当たって諸条件を洗い出し、目的・目標を確認する。持っている知識と技術での対応を検討して、それらだけでは解決できないと判断したとき、そこから未知への挑戦が始まる。「先生、これって範囲外です!」とは言わせない魅力ある課題を設定することが望ましい。

次いで、探索PBLが始まるが、情報探索技術がいくら進歩しても、問いを発しなければ何事も始まらない。誰が、いつ、どんな情念で? 先人の探索の苦勞のあとを調べるうちにキーワードを思いつく! これは立派な着想である。しかし探していたものに出会ったとき、それと気付く能力が必要である。ここでもThe prepared mindが成否を分ける。「発見」の重要性を体験する。見つけた知識・技法を使えるまでに理解するためには、「3人寄れば文殊の知恵」を活用するグループでの探索と学習PBLが有効である。

さて、情報が集まり、それらを総合するPBLに着手する。その成否は、所期の目標と比較して直に判断できる。否のときは、再度、各段階のPBLサイクルを点検し直す。この「総合」こそ、シューペンターの新結合でありイノベーションである。小さな課題でもこのサイクルを完結したとき、その達成感と感激は大きい。

図4 PBLモデルによる課題へのチャレンジ

7. 無機定性分析実験とPBL

人類の「生存の条件」の中で金属資源リサイクルの重要性が増すこれからの時代、金属イオンの多彩な溶液内反応の化学は、それらの物質感を養成する基盤として重要である¹⁵⁾。金属イオンの分離と検出については、高校時代に大学入試レベルの簡単な説明があり、大学基礎教育課程の化学実験に無機定性分析がある。かつては化学の基礎を学んできた学生に専門教育課程の入口でその総仕上げの関門として無機定性分析実験を課していた。その意図は、溶液内反応に関する知識

に基づいて分析操作の意味を総合的に体験し、より深く理解する処にあった。教える内容の増大と高度化もあって、専門教育課程から無機定性分析は消えていった。計測技術の進歩、例えば、ICP-MS（誘導結合プラズマ・質量分析法）による多元素同時分析の実現により、無機定性分析が技術的な役割を終えて久しい。しかし、ICP-MSでは、物質感は養えない。

沈殿の生成による分離と検出に偏重していた古典的な実験に新風を吹き込んだのは、名著“定性分析化学—溶液中の化学反応”を著したシャルロー¹⁶⁾であった。錯体化学のルネッサンスといわれた時代の始まりでもあり、大学教育においても、無機定性分析化学が経験の学問から科学へと脱皮する節目でもあった。

金属イオンを系統的に探索するシステムでは、実験操作は対象に対する問いかけであり、結果は対象からの回答である。これらを構成する理論と論理的思考法、相分離現象、酸塩基反応と錯形成反応の平衡論、酸化還元反応など溶液物理化学の手法を導入して、物質を取り扱うセンスを育成していた。これらの面で果たした役割は、計り知れない。例えば、分属試薬（ S^{2-} イオンや OH^- イオン）による選択的な分別沈殿反応の際に発現する明確な選択性は、酸塩基の「硬さ・軟らかさ（Hard and Soft Acids and Base）」の概念、硫化水素の飽和溶解度、沈殿の溶解度積と沈殿試薬の酸塩基平衡などに基づいて理解できる。反応選択性を支配するルールが存在を周期表との関係で整理し、物質の平衡論的特性として把握する体験が用意されている。

これから、未知の状況への対処が求められるとき、探索手法の論理的トレーニングをも含めたPBLモデルとして、定性分析法は格好の教材となるであろう。

次に実施モデルを示す。考え方の若干異なるテキストを与え、自主的に調べてきた方法も許可を得て使ってよいことにする。試薬類の調製・廃棄の方法と器具の扱い方に関する簡単な復習と、安全性に関する留意事項の解説・実習を済ませる。若干の確認実験を数例体験させたあと、未知試料を多数回与えて、教員1人とTAで、40名程度の実験クラスを、午後の3時間／3日／週で3ヶ月程度の期間、実験計画を自ら立てて行う。学生の自主的な探索に任せ、未知試料の検出同定の結果を聞くことにより運営できる。口頭による面談に重点を置き、工夫と着想を重視した簡単なレポートを書かせる。信頼して任された探索実験では、学生達の目の輝きが違った。

今時そんなに時間が取れるか、と言われるが、教育効果を知れば、その価値をお分かり頂ける筈である。最初の時間配分を書いた2章を読み直して頂きたい。

8. 講義—演習—実験の一貫性について

講義が取り扱う概念や理論を身につける方策の一つが演習である。そして、その結果を学生実験に直接結

びつけることが出来れば、理論からその実験による実証までを一貫して学ぶことが出来る。JISに定められている鉄(II)イオンの分析法を、錯体化学、分光分析法(吸光分析)、及び熱力学(物質収支と平衡論)を使って実証した¹⁷⁾。北海道・東北地区の化学系教員が協力して作成した教科書¹⁸⁾を参照されたい。このような事は他分野でも可能であろう。挑戦していただきたい。

9. 熱力学の体験学習による知識から知恵へ

熱力学の知識を「身についた知恵」に育てるには、企業等の協力を得た現場での長期インターンシップ等の実習が望ましい。昭和34年、著者の一人は、都市ガス工場での夏期実習で「コークス炉の物質収支と熱収支」を実測してそのプロセスを評価した。同時に、現場で操業を管理・指導する先輩技術者の日常業務の一端に触れた経験がある。難解であったエントロピーを含む熱力学の諸法則が、プロセスを駆動する中心的な原理として働いていることを実感し、熱力学の実際的な役割を知った。現場の装置や物質が発しているデザインや物質感に関わる非言語的情報環境が、潜在能力を引き出す場をもたらし、知恵を育みセンスを磨く。

10. 有機化学実験の今昔

有機化学実験について、主に著者の一人が経験してきた昭和40年代後半から今日までにおける大学及び高専で行われてきた有機化学実験について概説したい。

10.1 有機化学実験事始め

日本の有機化学は天然物化学に始まることは良く知られている。自然界に存在する物質から有用な物質を抽出単離し、その構造を決定してそれらを人間社会で利用するという観点から発展してきた。その初期においては多くの場合、植物がその研究対象となった。一例としては、戦前における真島利行氏(日本の有機化学の祖、元大阪帝国大学総長)による漆からのウルシオール単離とその構造決定が上げられる。化学物質、特に有機化合物の構造は、その骨格をなす炭素原子が4本の共有結合を持つことに起因して多種多様の構造異性体を有することから、現代のような機器分析技術がなかった時代において非常な困難を伴ったことは、想像するに難くない。現在では有機化学分野の裾野は、構造有機化学、反応有機化学(有機反応論)、合成有機化学、生物有機化学(生命有機化学)、有機高分子化学と幅広く広がっている。ミクロからマクロまで、地球におけるありとあらゆるものが研究対象となる。

有機化合物の構造が決定すると、有用な天然由来の物質を人工的に合成しようとする合成化学が戦後日本の高度成長と共に発展した。その結果、大量かつ安価に製造する合成プロセスの開発技術は、日本のお家芸と言われるようになった。これを契機に有機工業化学や有機金属化学の分野が花開き、2010年度の鈴木章氏と根岸英一氏のノーベル化学賞にも繋がることになる。

しかし、大量かつ安価に製造する技術開発のみに眼が奪われ、その際に発生する副生成物や有害物質の廃棄技術を軽視した所以か、日本は公害の問題に見舞われることになる。この後の日本は、好むと好まざるに係わらず「ファインケミストリー(少量で付加価値のある物質を合成する化学)」への展開が余儀なくされていく。このような時期に、高専が中間技術者の養成を目的として、基幹学科である機械や電気工学科とともに、多くの高専に工業化学科が発足したことは興味深い。また、ファインケミストリーの精神は、現在の「環境にやさしい化学」の開発と実施を目指す「グリーンサステナブルケミストリー」や、廃棄物の減少化と安全性の観点から、少量で実験を行う「マイクロケミストリー」の理念へと受け継がれていくことになる¹⁹⁾。

10.2 高度成長期以後の有機化学実験

高度成長期以後の日本における大学及び高専における有機化学実験はどのように行われてきたのであろうか。それには、目覚ましい分析機器の発展が大きく関わっている。大学における有機化学実験は、戦後しばらくの間はLiebig以来のグラム単位によるフラスコとビーカーとの実験であり、特に大きな実験装置や機械を必要としなかった。それが昭和30年代に入って急速に新しい機器分析の手法が取り入れられるようになり、大学における有機化学実験もそれに伴い大きく変わり始めた。昭和40年代になり、有機化合物の構造解析には、無くてはならない赤外分光計(官能基の存在の特定)、紫外可視分光計(共役 π 電子系の存在の特定)、質量分析装置(分子と分子断片の分子量と元素組成の測定)、核磁気共鳴分光計(炭素や水素の立体配置や立体配座の解析)およびX線結晶構造解析装置(原子配置の解析)などが、この時期に大学に、その後5~10年を経て高専に設置された。これらの分析機器の導入が、大学や高専の有機化学実験の在り方に大きな影響を与えることになる。

合成により化合物を得る際、一般にその化合物の純度は低い場合が多い。そこで、目的とする化合物だけを分離精製する(純度を高める)操作が必要となる。精製法には、(1)抽出、(2)蒸留または再結晶、そして(3)各種クロマトグラフィーといった方法があり、対象とする物質の状態(気体・液体・固体)や精製前の状態(複数の物質や相の混合状態)などによって使い分けられることが一般的である。これらの精製手段は基本的には現在においても変わらないが、機器分析手法の発達により、現在では取り扱う量がグラム単位からミリグラム、場合によってはマイクログラムの量で有機化学の実験や構造解析を行うことができるようになった。また、それらの分析機器をシステムティックに組み合わせた自動分析装置の開発も進み、条件さえ整えば分離精製する(単離する)ことなしに有機化合物の分子構造を決定することも可能である。また、教育効果を考えて学生実験を授業の中に取り入れようと

する場合に、費用や時間および安全性の観点からマイクロスケール実験で問題を解決することも考えられている¹⁹⁾。このような時代に、実験技術を確実に習得させるためには、どのような練習実験を行わせるべきか真剣に考える必要がある。

10. 3 現在に求められる有機化学実験

情報過多の世の中で、より便利に、より正確に、より安全に有機化学実験を行うことができるようになってはいるが、現在の学生は半世紀前の学生に比べて、はたして実験技術もその思考や研究能力も数段上回っているのであろうか。確かに分析機器の進歩は、コンピュータの発達とともに急速に進化したことは間違いないが、それを使いこなす人間はどうであろうか。危険を知らない人間に安全を語ることはできないように、実物に触れたことのない人間が頭の中だけで考えて実験を行うことは非常に危険である。ことに爆発(ニトログリセリンなど)を起こす危険や毒物(サリンなど)に変化する有機化合物を扱う実験、さらには遺伝子組み換え技術などの生命に係わる有機化学実験を行う場合には、倫理面も含めた基礎トレーニングが必須である。機器分析が進歩したがために、グラム単位のフラスコを使った実験の経験もせず、危険性を伴う実験技術や倫理面のトレーニングも経ないままに社会に出る学生が増えているのではないかと危惧する。

1962年の化学教育10巻1号に当時の東京都立大学教授の畑一夫氏が書いた「大学における有機化学実験の指導法」という論文がある²⁰⁾。その中で畑氏は「効果のあがる有機化学実験計画」を紹介している。当時の都立大では、約3ヶ月(毎週月～金の午後全部)を3段階に分けた実験指導を行っていた。始めにスライドを使いながら基本操作と全般的な注意を行った後、実際の実験に入り、第一段階として実験にあたっての事細かな注意を与えながら入門合成実験を行う。この段階では、ベンゼン→ニトロベンゼン→アニリン→アセトニトリドの合成実験を取り上げている。この段階で蒸留、水蒸気蒸留、再結晶、融点測定、混融(氷酢酸及び無水酢酸によるアセチル化生成物の混融)の操作を教え、固体や液体物質の取扱いや有機化学実験における必要な基本操作を身につけさせ、学生自らが実験内容を理解しながら実験を進める習慣を会得させる。

第二段階では、いくつかの合成実験を課す。始めは簡単なものから次第に難しい操作を練習させる。この段階で、オリジナルの論文を調べて実験するような課題も与える。文献通りでは上手く行かない場合、自分で工夫をすることになり研究実験を行う際に役に立つことが多い。第三段階では研究実験への入門としてすべてを自分の考えで自由に行わせる。合成すべき化合物の名称や構造式だけを示し、合成のために必要な文献を自分で調べ、指導者と相談しながら計画をチェックした上で実験を行う(第三段階は実際に合成するとすると経費や日数を要することから、後に文献調査に

より最良の方法を見つけ、レポートにすることになった)。このような指導は第2・第3の段階において、適宜機器分析を取り入れることにより、現在においてもPBLの訓練には最適と考えるが如何であろうか。

驚くことに畑氏はその論文²⁰⁾の中で、視聴覚教育の重要性も指摘している。実験を始めるにあたって、基本操作を講義しておくだけでは学生は十分に理解し難いので、実験講義を行いデモンストレーションすることが一番であるが、それに代わって時間や労力の軽減化を図るために、映画やスライドによる方法の有効性を紹介している。また、スライドの説明にレコーダーを応用したことも書かれてある。これらの事例は、当時の大学において、現在のe-ラーニング教育の原型が既に行われていたことを示すとともに、時間をかけて学生を事細かに指導しながら有機化学実験を行ってきたことを証明する貴重な資料である。

10. 4 科学者に求められる姿勢と心構え

有機化学を含めてそもそも科学とはなんであろうか。ムーアは、科学というものがもつべき性質を以下の八つに要約している²¹⁾。

- (1) 科学は観察や実験によって得られたデータに基づくものであるべきである。
- (2) データは質問に答えるために集積され、観察は推測を強化あるいは排除するためになされなければならない。
- (3) 先入観を最小にするために客観的な方法を採用しなければならない。
- (4) 仮説は観察と合致し、全般的な概念と適合しなければならない。
- (5) すべての仮説が検証されなければならない。
- (6) 一般化は、特定の科学の領域の中で広く当てはまらなければならない。
- (7) エラーの可能性を排除するために、事実や発見は他の研究者によって繰り返し確認されたときのみ、受容されなければならない。
- (8) 科学は、定常的に理論を改善し、誤った理論を正しい理論で置き換え、以前には疑問であった問題を解決していかなければならない。

これらの科学がもつ厳しい性質を、科学や工学に携わる者は心する必要がある。また、学生を教育する上で教師は自らの行動で示す必要がある。十数年前、NHKの「世界の先生」という番組で、アメリカの中学校の理科の先生が紹介された。彼(Mr. Al Stawicki)は、理科の授業の時間になると、シルクハットにマントの姿でミスター・フィオックと名乗り生徒の前に現れ、授業では手品を見せながらおもしろおかしく生徒の興味を引き、何故そうなるかを生徒にたずねる。彼は決して答えを言わないで、生徒に考えさせ質問させる。そのときになぜそう考えたのか、生徒にはGood Questionなどと言いながら、できるだけ自分で考えさせる訓練を行っていた。このミスター・フィオック

(PHEOC) という名は、問題 (Problem) → 仮説 (Hypothesis) → 実験 (Experiment) → 観察 (Observation) → 結論 (Conclusion) の頭文字をつないだものである。その過程を以下の (1) ~ (7) にまとめた。

- (1) まず問題が起こったらそれはどんな問題かを考える。
- (2) 次に、問題を解決するための仮説を考える。(仮説を考える過程が大事)
- (3) 仮説を証明するための実験方法を考えて実際に実験を行う。
- (4) 出来るだけ私心を入れないで虚心に観察を行う。(なかなか人間には難しい)
- (5) 実験観察の結果、仮説が正しいことが証明されなければ新たな仮説を立てる。
- (6) (2) と (3) の繰り返し。
- (7) 仮説が正しく証明されたら結論に導く。(広く適合するかなど定常的な改善が必要)

番組でミスター・フィオックは「答は間違っているもいい、大切なのは考える過程だ」と言うのである。この科学的方法論は、ムーアの「科学とはなにか」という八つの要約を平易に的確に表現している。基本技術を習得させながら、これらのことを学生自身に考えさせることが、EducationでありPBLとしてこれからの有機化学実験においても求められていると思う。

11. おわりに 頭脳の時代、知恵の時代に向けて
商業資本主義、産業資本主義 (モノ造りと情報) から金融資本主義 (マネーの過剰流動の危機) へと進んできたが、何れも限界を経験して、この先の展望は開けていない。これからの持続可能な社会を築くに際して、無限の可能性を持つものは、人間の頭脳と太陽エネルギーをおいて他にない。生み出す知的資産の価値が鍵を握る社会で活躍する着想力豊かな技術者の育成が喫緊の課題である。実物に触れ、それと対話するタイプのEDUCATIONが必要である。よって、大幅に実験・実習を増やしたカリキュラムの創案を提言したい。

参 考 文 献

- 1) 吉川 洋：いまこそ、ケインズとシューペンターに学ぶ、ダイヤモンド社, pp.49-53, 2009
- 2) マックス・ウェーバー、尾高邦雄訳：職業としての学問、岩波文庫, pp.23-29, 1966
- 3) パーク・チュル (Park Chui)：独創性を生み出す工学教育、工学教育, 46-1, pp.8-11, 1998
- 4) Park Chui：創造性向けの工学教育 (日本工学アカデミー東北・北海道地区講演会講演録), EAJ Information, 76, pp.22-36, March 25, 1998
- 5) 四ツ柳隆夫：分離・濃縮システムの設計戦略 - 高次機能を創造する化学としての分析化学, ぶんせき, pp.957-963, 1993
- 6) 四ツ柳隆夫：熱と温度, アリーナ (中部大学国際人

間学研究所編), 7, pp.80-96, 2009

- 7) 四ツ柳隆夫：モノづくりによる高等専門学校の人づくり, 精密工学会誌, 69-1, pp.27-30, 2003
- 8) 大前研一：超ロジカル・シンキング, Harvard Business Review for Junior Managers, 別冊12号, pp.6-20, 考える技術の教科書, ダイヤモンド社, 2008
- 9) 四ツ柳隆夫：知ること, 分かること, 使えること, 東北自治, 59, pp.7-10, 1993
- 10) 四ツ柳隆夫：「考える」ことと「使える」こと, 工学教育, 48-3, 1, 2000
- 11) ヘルマン・ヘッセ, 手塚富雄訳：シッタルダ, p.152, 1965
- 12) 吉川弘之：工学教育の講演会, 千葉大学にて, 1996
- 13) 四ツ柳隆夫：21世紀のキーテクノロジーとしての化学分析と化学計測, 分析化学, 48-12, pp.1037-1041, 1999
- 14) T. ヘイガー, 渡会圭子訳：大気を変える錬金術 - ハーバー, ボッシュと化学の世紀, みすず書房, 2010
- 15) 藤原鎮男：「無機イオンの湿式分離分析反応の研究」振興策を立てよう, 〈誌上討論〉「分析化学から分析科学へ」, ぶんせき, p.476, 2010-9
- 16) G. シャルロー：定性分析化学 I - 溶液中の化学反応, 共立全書512, 共立出版, 1973
- 17) 四ツ柳隆夫：講義 - 演習 - 実験を一貫して教育するシステムについて, ぶんせき, pp.555-556, 2001-10
- 18) 分析化学反応の基礎 - 演習と実験, 日本分析化学会北海道支部・東北支部共編, 培風館, 2005
- 19) 荻野 博, 荻野和子, 猪俣慎二：新しい教育法 - マイクロスケール化学の現状と課題, 放送大学研究年報, 23, pp.89-95, 2005
- 20) 畑 一夫：大学における有機化学実験の指導法, 化学教育, 10-1, pp.76-79, 1962
- 21) 八杉貞雄：よく分かる基礎生命科学 - 生物学の歴史と生命の考え方, サイエンス社, p.58, 2002

著 者 紹 介

四ツ柳 隆夫

東北大学名誉教授, 誕生1938年函館, 1966年北海道大学工学研究科応用化学専攻博士課程修了, 工学博士, 北海道大学助教授, 1978年東北大学教授, 同工学研究科長, 宮城高専校長, 国立高専協会会長, この間, 宮城県産業振興審議会会長
専門：応用化学, 分析化学
趣味：囲碁
日本工学教育協会功績賞, 同特別教育士
日本分析化学会会長, 名誉会員, 同学会賞,
日本化学会学術賞 (無機・分析部門)