

マイクロスケール実験の 探究活動への応用

OGINO Kazuko

荻野和子

東北大学医療短大 名誉教授

マイクロスケール化学実験には、いろいろな長所があるが、その一つに探究活動へ応用しやすいことがある。操作が簡単、安全で、短時間で実施できる、器具が安価なので、生徒が自由に実験するのに適しているからである。本稿では、マイクロスケール化学実験の探究活動を授業時間内で行った例とSPPで実施した例を紹介する。

1 マイクロスケール化学実験は面白い

マイクロスケール実験(MC)とは、少量の試薬を使い、通常より小さい器具を使った実験である。実験のスケールを小さくすると、

- 1) 試薬の節減
- 2) 実験廃棄物の少量化
- 3) 省資源、省エネルギー

につながるのは当然で、環境にやさしい実験である。廃棄物を出してから処理するのではなく、そもそも出さないようにするというのはグリーンケミストリーにおいて重要な原則であり、マイクロスケール実験は学園におけるグリーンケミストリーともいえる。

MCには、以上のほか、次のようなさまざまな長所がある。

- 4) 安全性の確保：危険が少なく、事故が防止できる
- 5) 実験環境の改善
- 6) 実験時間の短縮¹⁾
- 7) 経費の節減
- 8) 環境問題についての生徒の関心を深められる
- 9) 高価あるいは希少な試料を実験に使うことの可能性
- 10) 1グループの人数が少ないので、一人ひとりが積極的、主体的に実験に参加できる
- 11) MCでは使用する器具は取り扱いが簡単なものが多い
- 12) 安価な器具で行うものが多い
- 13) 静かな雰囲気で行うことができる
- 14) 流しなどの設備のない通常の教室でも実施できる

一方、「スケールを小さくする」というと、教育効果は劣るのではないかという懸念をもたれるかもしれない。しかし、マイクロスケール実験において重要なことは、通常スケールの実験と同等あるいは、それ以上の教育効果をあげることである。実際私どもの開発・実践しているMCは「面

白く楽しい」ものである。そのような実験はアイデアや工夫の産物で、世界各国のマイクロスケール実験研究者は情報と経験を交換して、すぐれた教材を共有し、魅力的で学生・生徒の学力向上に役立つ化学教育を広めようとしている。また、MCはデモ実験に向かないという印象をもたれがちであるが、決してそうではない。適切な機材を使うとマイクロスケール実験を大スクリーンに映しだすことができる。世界でもっともすぐれたデモ実験を行うことで知られるオーストリアのV. Obendrauf教授の実験はマイクロスケールである。器具が小さいので、いろいろな多彩なデモ実験器具を世界各地の会場に運ぶことが可能なので、大ホールのステージで数百人の参加者を魅了する。

MCの特記すべき長所に、探究型活動に適していることがある。本稿では、MCのそのような面について紹介する。

2 マイクロスケールの探究型実験

上に述べたようにMCは、安全、操作が簡単で、短時間で実施でき、小さなスペースで行うことができるので生徒が自身で行う探究型実験に適している。

すでに中国では、数年前からそのような利用が盛んである²⁾。

探究型実験にはいろいろなタイプがある。

- ① 生徒自身が主体的に課題を設定し、実験法も生徒が考える。
- ② 教師が与えた課題を、マニュアルなしに生徒が実験法を考えて取り組む。
- ③ マニュアルにある実験の発展として、類似の方法で実験できる課題を与える。複数のグループがあるときは、グループごとに異なった課題を与える(あるいは選ばせる)ことができる。

①の場合は、教師一人で多数のグループの実験を把握するのは、しばしば困難をとまなう。しかし、指導者多数

で指導できるときには、生徒の創意を促すような探究ができる。このタイプの探究活動は、成功したときの達成感も大きい。本稿では、教員1人で1クラスの生徒実験を指導した③の例と、SPP行事として行った①、②の例を紹介する。

3 発展実験—電気分解での例

電気分解の学習の際、高校生が理解困難を訴える項目に、陽極、陰極で起こる電子授受がある。特に電子授受に関与する分子種あるいはイオン種が何であるかがわかりにくいという。それは、教科書で扱っているのが、希硫酸、水酸化ナトリウム溶液、硫酸銅(II)などのうちの数個に限られており、通常スケールの生徒実験で検証できるのは通常1、2種だからである。MCの場合には、短時間に多数の電解質水溶液の電気分解が可能である³⁾。初め、マニュアルに従って全グループが同じ溶液で実験して、同じような結果を得た後、それぞれ自分で選んだ溶液で発展実験を行わせた。

3.1 プレーートのウェル中での炭素棒を電極とした電解³⁾

12ウェルプレートの一つのウェルを電解槽とする。ここに電極板をセットして炭素棒を立て、3-9Vの直流電源をつなぎ、電解する³⁾。その際、図1のようなワークシートを用いる。図の右端の長方形部にプレートをのせ、隅の欠けている部分をプレートの欠けている部分を合わせるようにすると、どのウェルにどの溶液が入っているか確認できる。最初の硫酸ナトリウム水溶液に、pH指示薬を加え、ろ紙片を立てて陽極と陰極を隔てる。電解に伴い、気体の発生、溶液の色の変化が陽極と陰極ではっきり異なることが

10秒ほどで観察される。これらの観察事項を、ワークシートの該当欄に記入し、電極反応式と対照させて考察させる。次に食塩水に指示薬を加え、ろ紙を立てて電解すると、塩素の匂い、溶液の色の変化が観察される。すぐに陽極側の液は退色する。残り2種の溶液のスペースがあるが、そこでは各自、調べたい溶液の電解を行わせる。その際、炭酸ナトリウム、酢酸ナトリウム、塩化カルシウム、硫酸銅(II)、塩化銅(II)、塩化カリウム、硫酸マグネシウム、硫酸アルミニウムなどの電解質(固体または水溶液)、食紅液、フェノールフタレイン、BTBやムラサキキャベツ色素液など適宜用意しておき、生徒に電解質と色素液を選ばせて実験させる。電極反応式などをシートに記入し、実験結果と対照考察させる。

この実験では、生徒は夢中になっていろいろな組み合わせを試し、多彩な結果に驚き、それに伴う電極反応式を書き、実験結果が説明できることを見出して喜ぶ。実験結果も、反応式もグループごとに異なるので、主体的に考察することになる。適切に電解質溶液と指示薬を用意しておけば、教員1人で10グループの実験を指導するのも困難ではない。

3.2 脚長スポイトと待ち針2本で組み立てるマイクロスケール電解槽⁴⁾

図2のように脚長スポイトと待ち針2本で組み立てるマイクロスケール電解槽は中国マイクロスケールケミストリーセンター周寧懐教授の実験⁵⁾を修飾したものである⁴⁾。水酸化ナトリウム溶液あるいは硫酸ナトリウム水溶液をスポイトに吸い上げ、待ち針を電極として電気分解し、出てきた気体を別のウェルの中性洗剤液(あるいはシャボン玉液)

電気分解

電解質	電極反応		観察されたこと(気体、色の変化、においなど)	
	陽極	陰極	陽極	陰極
Na ₂ SO ₄ 2 mL pH試験液5滴	陽極 $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{H}^+ + \text{O}_2 + 4\text{e}^-$	陰極 $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{OH}^- + \text{H}_2$		
NaCl 2 mL pH試験液5滴	陽極 $2\text{Cl}^- \rightarrow \text{Cl}_2 + 2\text{e}^-$	陰極 $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{OH}^- + \text{H}_2$		
	陽極	陰極		
	全反応			
	陽極	陰極		
	全反応			

1. ウェルに試薬(硫酸ナトリウムあるいは食塩溶液)と試験液をとり、ろ紙を立てる。
2. 電極板をのせる。
3. 炭素電極を電極板の穴から、ろ紙の両側に1本ずつ立てる。
4. 導線のミノムシクリップで電極をはさみ、導線の他端を乾電池につないで電気分解を始める。

考察

図1 自由度のある電気分解実験の生徒用ワークシート(A4の大きさ)の例。

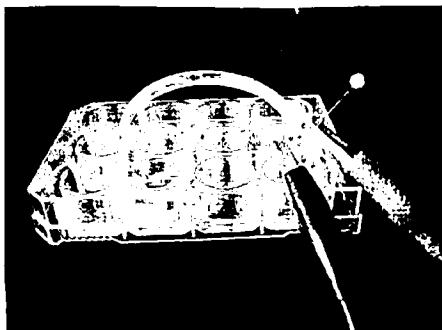


図2 プラスチック脚長スポイト中の電解とプレートを用いた爆発。

に通して、生じた泡に火を近づけると大音量で爆発する。

秀光中等教育学校の東海林恵子教諭は、この実験を修飾して発展的な探究実験とした⁴⁾。爆鳴気の実験に用いたのとは異なる電解質水溶液を数種用意し、生徒にそのうち1種を選んで、電解させる。実験の前に結果を予想させ、その予想を検証する実験も行わせた。

例えば、洗剤の泡に集めた気体に火を近づけたとき、小さい音で爆発したら、発生した気体がほとんど水素と推定できる。また、そのとき爆発せずに、炎の大きくなるのが観察されれば、気体は主として酸素ではないかと推定される。この実験のために数種の電解質溶液以外に、食紅水溶液、デンプン液、ヨウ化カリウム水溶液、石灰水なども用意した。

実験例として、ヨウ化カリウム水溶液を電解質として選んだ例を紹介する。生徒は、陰極では水素、陽極ではヨウ素が生成すると予想した。この予想を検証するために生徒は、生じた気体を中性洗剤液に通し、泡に炎を近づけ小さい音で爆発することを確かめた。また、電解後の電解液をデンプン液中に少量押し出したら青紫になったことで予想が正しいことがわかった。

電解液として塩酸を選んだら、どのような結果となるだろうか。読者諸兄姉は予想をたて検証してみたいだろうか。この場合、もし塩素と水素の混合気体が出てきてそれを泡に集めたとしたらどうなるだろうか。光があたれば恐ろしい事態になる？

3.3 以上の実験のまとめ

電解の結果、どのような現象がみられるかを予想するのは、そう簡単ではないことがある。生徒が既習の事項を組み合わせて論理的に考えて予想できるかどうか、あるいはそこから何を学習できるのか、あらかじめ実験しておくこと、適切な試料を準備しておくことが重要である。これらの実験は電気分解の理解に有効であった。例えば、水素よりイオン化傾向の大きい金属イオンを含む溶液を電解すると、陰極では水分子が還元され酸素が発生すること、炭酸イオンや硫酸イオンは水溶液では電解酸化されないことを

認識させることができた。

ある事項の理解の増進ばかりではなく、主体的にまた論理的に考える力、幅広く知識を総合して考える力を育むのに役立つと考える。

上記2種の自由選択型探究実験は、20名程度の生徒の実験を教員1名で掌握できた。

4 SPPにおける探究実験

4.1 国際基督教大学における高校生対象のプログラム

2006年8月、国際基督教大学(ICU)理学科主催で、二つの高校の生徒23名(高1が10人、高2が3人、高3が10人)が参加してSPP(サイエンス・パートナーシップ・プログラム)「マイクロケミストリーで見る化学の世界」が2日間にわたって行われた。この行事では、マニュアルどおりに実験するテーマに加え、探究すべき課題を与えるとともに、自ら課題を考え実験することを奨励した。

1日目のマニュアルに沿った実験は「紫キャベツによるpH実験」⁵⁾、「水の電気分解とダニエル電池」^{3,6,7)}、「金属イオンの分析」⁸⁾の3種である。そのうち、これらに関する探究型実験を2人1組で行い、二日目に発表準備、追加実験と発表を行った。

4.2 実験の概要と探究活動

「紫キャベツによるpH実験」では、紫キャベツ色素を抽出。24ウエルのプレートを使って紫キャベツ色素と万能pH試験液でpHによる色変化を観察する。探究課題では、身近にある花/植物などを持って来て、pHによる色の変化を観察したり、身近にある物のpHを調べた。例えば、古くなった牛乳、酸性をうたうシャンプー、アルカリ性をうたう食品を持ってきて実験した。

「金属イオンの分析」では、まず96ウエルプレートを用いて、金属イオンを含む溶液8種と陰イオンを含む溶液12種を数滴ずつ反応させ、色の変化や沈殿の有無・沈殿生成の条件などを確認した。また、2種の金属を含む未知試料中の金属をマニュアルに従って分析した⁸⁾。その後、探究活動として、このグループの生徒たちは、主催者が用意した「ほかるん」、アラザン(ケーキに振りかける銀色の小球)、電線中の金属を調べる方法を考え、実験の結果、それぞれ、鉄、銀、銅を見出した。

「電解と電池」のマニュアルに沿った実験は、脚長スポイト中の電気分解と爆鳴気の爆発、注射器を使ったホフマン型電解装置による気体体積を調べる実験⁹⁾、いろいろな電解質の電気分解における陽極と陰極での反応とダニエル電池⁷⁾であった。その後、生徒自身がテーマを考えて探究活動を行った。例えば「水素と爆鳴気の爆発音の違い」の実験を行ったグループがある。とくに興味深かったのはダニエル電池の構造について探究したグループである。ダニエル電池の実験マニュアルでは、①12ウエルプレートの一つ

のウェルに硫酸銅溶液を入れる。②透析チューブを袋状にして硫酸亜鉛溶液を入れ、その袋を硫酸銅溶液の入ったウェルに入れる。③それぞれの溶液に銅板と亜鉛板を入れ、両金属板の間で起電力があることを調べる。というものである。この実験を行った生徒は高1で、電池についてまだ何も教わっていなかったため、電池の構造を調べるために、さらにいろいろな試みをした。その中で塩橋（生徒たちはその言葉は勿論知らなかった）のアイデアを得て、手近に置いてあったプラスチックの三方活栓と注射器を加工して2個のウェルを塩橋でつなぎ電池をつくりあげた。生徒が自分で課題をつくり、創意工夫によって問題を解決した例である。

2日目は、主として発表の準備と発表にあてられた。生徒たちは、「紫キャベツによる pH 実験」、「水の電気分解とダニエル電池」、「金属イオンの分析」のグループにまとまってパワーポイントによる発表を行った。

4.3 成功の要因

生徒たちは、全員全プログラムに楽しそうに取り組んだが、その集中ぶりは驚異的であった。このプログラムに参加した生徒の感想には次のようなものがある。

- ・マイクロスケール実験は、自分の手でできるので、よかった。
 - ・工夫したり、ひらめいたことをその場ですぐに実験できるのがよい。
 - ・先生方、TAの方がとてもよく準備して下さり、また、教えて下さったので2日間本当に楽しかったです。
- また参加した高校教師からも高い評価を受けたが、次のコメントが寄せられている。
- ・2日目は、朝から行きバスの中でずっとディスカッションをしていました。
 - ・次から次へと素朴な疑問がわいてくるようで発表へ向けての意気込みも感じられました。
 - ・楽しんでやっているのがよかった。そして基本的な知識の必要性を感じていた（筆者注：今回参加したのは1年生が多く化学はまだ少ししか学んでいない）。今回の実験のいくつかは、授業にも取り入れたい。
- ：教室で接しているときの姿とは別の面を見ることができ私も嬉しい思いで一杯です。今回の経験が、彼女たちの今後の進路選択に影響を与えるものと確信します。

このプログラム成功の原因は、いろいろ考えられる。まず主催者のICUの方々の適切な企画と周到な準備があげられる。プログラムに先立って、担当者、高校教員、TA合同の予行演習が行われている。次に、指導者が多かったことである。筆者を含め、外部講師2名、ICU教員2名、高校教員4名、TA7名が常時生徒の実験を見守った。自由実験のときは、生徒たちのひらめいたアイデアなどに臨機に

対応することができた。

5 おわりに

探究型の実験は、論理的思考、創意を育む上で効果的と考えられる。しかし、限られた時間と器材で行うには、しばしば困難をとまなう。本稿では、授業時間内で行った例とSPPで実施した例を紹介した。いずれもまずマニュアルどおりのマイクロスケール実験を経験してから、発展的、探究的な実験を導入した。

高校化学の授業の中の実験は、理解に役立つこと、授業進度を遅らせないことが重要である。探究的活動にあたっては教員の創意工夫、周到な準備が必要で、負担は大きいのではないだろうか。MCでは、通常スケール実験に比べ教員の負担はかなり軽減される。

SPPのような行事では、面白さ、楽しさ、科学への生徒の興味・関心を高めることが重要であるが、紹介した例ではその点でも好評であった。このプログラムの詳細は<http://science.icu.ac.jp/MCE/>に紹介されている。なお、このサイトにはMCの資料が豊富である。

以上紹介したマイクロスケール実験では、安価な器具を用いており、どこでも実施できる。

参考文献・注釈

- 1) MCは短時間でできることについて：化学反応の速さはスケールに無関係であるが、短時間でできるのは、例えば次の要因が考えられる。①少量なので試薬の添加、攪拌が短時間でできる。②セルプレートを使った実験では、操作が簡単である。③電気分解の実験では、装置の組み立てが短時間でできる。④電気化学の実験では、わずかな電流量の電流で変化が観察できる。例えば、0.5 mLの気体の発生は、通常スケールでは、見えないのに対し、マイクロスケール実験では、体積を正確に測定できる。
- 2) Zhou Ning-Huai, *Microscale Chemistry and Creative Education* <http://www.micrecol.de/zhouninghuai/rev.html> (2007年6月現在)；筆者の手許には浙江省農村の中学校のマイクロスケール探究学習についての研究報告（2003年）がある。
- 3) 荻野和子, 東海林恵子, *化学と教育* 1998, 46, 742.
- 4) 東海林恵子, 荻野和子, 平成18年度化学教育研究協議会東北大会, 秋田大学, 2006年9月.
- 5) Zhou Ning-Huai, "Six Microscale Chemistry Experiments with Well-plate 6," in *Microscale Chemistry Experimentation for All Ages* (P. Schwarz, M. Livneh, M. Hugerat eds.), Academic Arab College for Education, 2006.
- 6) 荻野和子, *化学と教育* 2007, 55, 82.
- 7) 東海林恵子, 荻野和子, *化学と教育* 2001, 49, 712.
- 8) 川本公二, 坂東 舞, 芝原寛泰, *化学と教育* 2006, 54, 548.



おぎの かずこ

筆者紹介 [経歴] 1960年東北大学理学部卒業、64年東北大学理学部助手、73年東北大学医療技術短期大学部教授、2001年定年退職。05年度国際基督教大学客員教授。理学博士。[専門] 無機化学、化学教育。[趣味] 散歩。[連絡先] 981-0944 仙台市青葉区子平町16-30(自宅)。