

論文

マイクロスケール実験を用いた、高等学校における無機分析化学実験への活用と検証

Utilization and verification for experiments inorganic and analytical chemistry
in the high school using the microscale experiment.

植田 幹男^a, 根津友紀子^b

Mikio UEDA, Yukiko NEZU

Key words: マイクロスケール実験, 無機化学, 分析化学, 実験教材

Microscale experiment, Inorganic chemistry, Analytical chemistry, Experiment materials

1. はじめに

1.1 マイクロスケール実験の概念

マイクロスケール実験とは、グリーンケミストリーの考え方をもとに内外で発展してきた実験手法の一つである。化学実験のスケールを通常使用する器具よりはるかに小さくした、スモールスケール化学実験が1980年代からアメリカの大学の有機化学分野で組織的に取り入れられ、試行されてきた^{(1)~(3)}。実験の小スケール化は、大学の一般教育の実験をはじめ、初等中等教育の理科実験においても、種々の教材や実験キット、実験方法が開発され、国内外で普及し幅広い広がりを見せている。

マイクロスケール実験は、物質を合成・分析する際に有害物質をできる限り使用しない化学的手法を用い、汚染防止、安全性の確保、環境問題への配慮等を前提としている。このような視点は、「持続可能社会を目指す環境共生化学」GSC（グリーン・サステナブル・ケミストリー）として注目されている。GSCは、化学プロセスの環境負荷低減のみならず、新たな技術革新における資源、環境、エネルギーによる制約からの脱却に貢献できるものとして捉えられており、この理念を広く普及させ教育現場にも浸透させていくことは重要である^{(4)~(7)}。また近年、持続可能な開発目標（SDGs）が定められ、そのターゲットとしても、クリーンなエネルギーの利用や開発、グローバル的視点での環境保全が挙げられている⁽⁸⁾。これらに掲げられる課題に対し理科教育の視点から、マイ

クロススケール実験の活用は、学校現場で積極的に取り入れていくべき重要な実験手法といえる。日本化学会発行の「化学と教育」誌においても「マイクロスケール実験の広場」を通じ、精力的に研究実践報告がなされてきた。また理科教育系学会においても、マイクロスケール実験をテーマとしたシンポジウムやワークショップが開催されており、芝原らが主宰する京都マイクロスケール実験研究会⁽⁹⁾などをはじめ、新たな教材開発や研究が精力的に行われている^{(10),(11)}。

1.2 マイクロスケール実験の有効性

化学実験のスケールを小さくすることは、①試薬や廃棄物の少量化に伴う環境問題への配慮と経費の削減、②安全性の向上と事故の防止、③器具の省スペース化による少人数個別実験の導入、そして④実験操作の簡略化に伴う実験時間の短縮等、多数の有効な点が挙げられる。中学校学習指導要領解説（理科編）⁽¹²⁾、および高等学校学習指導要領解説（理科編）⁽¹³⁾においても、事故防止、薬品などの管理及び廃棄物の処理の観点において、マイクロスケール実験が推奨されており、使用する試薬をできる限り少量に留める工夫や大切さから、環境教育への結び付けについても重要視されている。また実験の小スケール化に伴う費用の削減は、年間の実験費が潤沢とはいえない初等中等教育の現場において極めて有用である。さらに学校現場では、必ずしも教員自身の専門領域が担

当授業に反映されるとは限らないため、マイクロスケール実験の導入は、専門外の教員にとって指導や準備の面で取り組みやすいものであるといえる。この傾向は特に小学校において顕著である。小学校の現場では、理科を得意とする教員が専科として担当するとは限らず、持ち授業時間数が比較的少ない主任クラスの教員などが理科の授業に充てられる例も見られることが報告されている⁽¹⁴⁾。このような事例に対する改善策としても、実験の小型化と扱い易い教材の開発は重要なものである。実験教育の充実は、生徒・児童に対し、理科や自然科学全般の興味付けという観点において大切なものであり、科学的思考力、判断力や表現力を養うこと、即ち考える力の育成に繋がるものと考えられる。そこで今回、これまでに報告されているマイクロスケール実験の種々の教材開発の状況について、主に中学校・高等学校化学分野を中心に、その活用事例をまとめ、実験の小スケール化の有効性について考察を行った。

2. 教材開発事例

2.1 代表的な使用器具

マイクロスケール実験における少量試薬の反応には、小型の反応区分が設けられたポリエチレン製で透明度が高いセルプレートが一般に用いられる(図1)。ウェル(くぼみ)の数が6, 12, 24, 48, 96のセルプレートが市販されており、実験の用途により使い分けられるが、小学校～高等学校においては、6または12ウェルの使用が一般的である。また付属のふたを用いることで簡易的な密閉だけでなく、用途に応じてふたを加工し使用することも可能である。セルプレートは1枚あたり500円前後の価格のため、個数を班毎または個々の生徒数分そろえるにはある程度の費用がかかるが、何度でも繰り返し使用することができ、ガラス器具のような破損もないことから、安全で経済的な実験器具といえる。またより安価に実験を行う試みとして、セルの部分をペットボトルキャップで代替した教材についても報告されている⁽¹⁵⁾。



図1 セルプレート (12, 6 ウェル)

試薬の滴下に関しては、プラスチック製プチボトルが有効である(図2)。例えば指示薬や定性分析用試薬の少量滴下に優れており、ガラス製点眼ビンよりも操作が容易である。実際、筆者らも頻繁に用いる指示薬、酸や塩基等については、プチボトルに小分けし活用している。容器はプラスチック製であるため、耐薬品性が高く、遮光性のもも市販されていることから、各種無機試薬の保存に適しており、生徒実験の試薬準備の時間を大幅に削減することが可能である。また容易に試薬の少量添加が可能であることから、実験の習熟度が低い生徒にとっても使いやすく、ピペットによる試薬の導入と比較し、その使用量が格段に減少するといったメリットがある。その他、ディスプレイスポイトの活用も有効である(図2)。熱を加えることによりスポイト先端を細く延伸させ、滴下量の調整を行う加工が容易であり、実験用途によって自作することができる。以上のように、一般的なガラス器具をプラスチック製に代替・小型化して利用することで、器具破損による危険の回避や費用面、使用試薬量・廃液量の観点からマイクロスケール実験の活用は学校現場において非常に有効な手段であるといえる。



図2 プラスチック製器具

2.2 中学校・高等学校における教材実験

2.2.1 電気分解系教材

水の電気分解をはじめとした電気化学の実験は、通常H字管を用いたホフマン型電気分解装置が用いられる。しかしながら、これらの装置は高価な実験器具であり、その取り扱い方も難しい。また1装置あたり、100 mL程度の水溶液(酸または塩基)を必要とするだけでなく、装置への水溶液の充填方法や水位の調整も特殊であるため、教員側の事前準備に多大な時間と労力を有する。そこでH字管の代替として6または12ウェルセルプレートと水溶液を充填したプラスチックスポイト、そしてまち針を電極とした電気分解装置が開発されており、水溶液の充填の簡略化、使用試薬の少量化が報告されている⁽¹⁶⁾。また、セルプレートを用いた水溶液の電気伝導性の確認⁽¹⁷⁾、電解による金属イオンの移動⁽¹⁸⁾、複数のセルを使用した複数種類の水溶液の電気分解および結果の比較検討⁽¹⁹⁾など、種々の授業展開に活用されている。さら

に近年、USB電源と電解槽を組み合わせた装置を使った、ファラデー定数の測定についても報告されている⁽²⁰⁾。いずれも少量の水溶液の使用と簡易器具を用いることから、多人数多展開授業に適した実験教材であり、実際の廃液量も通常の1/10以下程度に抑えられている。

2.2.2 化学電池系教材

化学電池の学びについては、小学校での電池のつなぎ方や物質の電気伝導性の理解から始まり、中学校での化学変化、イオンの移動、電池の反応、エネルギーの変換についての学習、そして高等学校での酸化還元をもとにした電子を伴う反応へと一連の流れをもって続くものである。化学電池を作成し、反応の様子を観察する実験は多数知られており、野菜電池や果物電池、備長炭電池等、主に導入で用いられる電池作成をはじめ、ボルタ電池、ダニエル電池、鉛蓄電池の作成と原理の理解等、多岐にわたり授業で取り上げられている。しかしながら、ピーカーレベルの大きさで作成する化学電池は、作成と観察の過程で、硫酸や重金属を含む水溶液を多量に必要とする点に問題があった。シャーレに折り曲げた電極とセロハンを設置した簡易型のダニエル電池や鉛蓄電池が生徒実験で用いられることもあるが、教科書で紹介される化学電池の模式図と差異が生じているのが現状である^{(21),(22)}。そこでセルプレートを用いた化学電池のマイクロスケール実験が提案されている。例えば、セルプレートのふた部分に切り込みや穴を作成し、電極の設置を行うものが報告されており、電解液も極めて少量で電池を作成可能である⁽²³⁾。セルプレートはホットカッターやはんだごてなどの加熱器具で加工でき、用途に合わせた大きさや形状を容易に工作することができる。また、ダニエル電池のような隔膜を必要とする場合、塩橋を使用することでプレートのくぼみ2カ所を連結した実験モデルが考案されており、教科書と類似構造をもつコンパクトなマイクロスケール型ダニエル電池であっても従来型と同様の起電力が得られることが示されている⁽²⁴⁾。

2.2.3 有機化学系教材

高等学校有機化学分野の実験を行うにあたり、技術が未熟な生徒にとって実験のスマールスケール化は大きなメリットを有する。有機化合物の合成や精製、分離といった操作には、有機溶媒の使用が一般的であり、揮発性の高い物質からの防護が課題となるが、一般の高等学校においては、ドラフト等の換気設備が実験者数に対して極めて不十分である。分離・抽出は官能基の性質を理解

する上で重要な項目であるが、分液ろうとの使用やエーテル等の有機溶媒を多量に必要とする。そこで、抽出用のガラス器具を小型のサンプル管に置き換えた簡易的な分離抽出実験が提案されている。有機溶媒の使用量が数mLレベルに抑えられる利点が挙げられる一方、塩を形成させるための塩酸や水酸化ナトリウム水溶液を高濃度(6 mol/L程度)にする必要があり、溶液の扱いに十分な注意が必要なものであった⁽²⁵⁾。

教科書内における有機化学では、ベンゼンを出発原料とする合成反応が多数掲載されているが、ベンゼンは発がん性を伴う有毒物質であることが知られている。トルエン等をベンゼンの代替物質として扱い、求電子置換の学習に役立てることも考えられるが、配向性の観点を含めると、高校での学習としては取り扱いが困難である。そのような中、井上らは、マイクロスケールによるベンゼンのハロゲン化⁽²⁶⁾、ニトロ化⁽²⁷⁾、スルホン化⁽²⁸⁾を開発し、小スケール化に伴う安全性の確保を示している。さらに、少量でも効率よく安全に有機合成を行うことを目的に、井上らは、学校教材として使用可能な触媒や実験法の開発を精力的に行っている⁽²⁹⁾⁻⁽³²⁾。即ち、有機合成において実験の安全性を担保する上で、単に実験の規模を小さくすることのみに着目するのではなく、実験リスクの軽減と回避を前提とした、安全な反応試薬の開発、効率よく短時間で反応を進行させるような触媒や条件の精査もまた実験の小型化と併用し、重要な要素であることが示された。

その他、油脂のけん化による合成洗剤の実験⁽³³⁾、イオン液体などを活用した環境調和型教材の開発⁽³⁴⁾など、マイクロスケール実験を主体とした有機化学実験材料は多岐にわたり研究されている。

2.2.4 無機・分析化学系教材

マイクロスケール実験による実験の小型化は、定性分析への活用の幅が広い。無機分野における金属の定性反応については、班構成の生徒実験であっても、種々の金属を含む実験廃液が多量に排出される。反応容器を試験管から、セルプレートや呈色反応皿(美術のパレットと様相が類似したプレート)に代替し、さらに試薬を小分けしたプラスチック製プチボトルを用いることで、実際の廃液量を1/5以下に抑えられることが報告されている^{(35),(36)}。金属陽イオンの定性分析は、多数の反応試薬を使用するため、10班編成程度で1回実験を行うと、その試験管の量は100本以上にもなり、複数クラスに対応するためには、器具の洗浄や準備にかなりの労力を有す

るものであった。これをセルプレートで行うことにより、後処理は少量の試薬の回収またはふき取りで済み、器具の洗浄と再設置が容易であるため、教材準備の時間の大幅な短縮と廃液量の削減が可能であった（図3）。

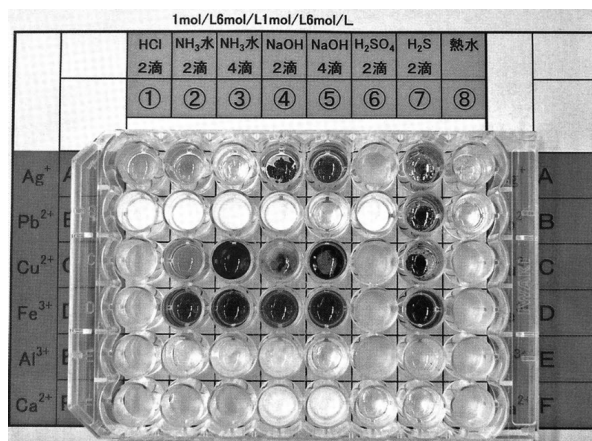


図3 金属イオンの定性反応への利用
(参考文献 10 より引用)

また陽イオン分離に必要な硫化水素を通じる反応等も、硫化水素ナトリウムの希薄水溶液の少量滴下により、硫化物イオンの導入ができることから、ドラフト等の設備を用いることなく、簡便で安全に分離の実験を進められるなど、マイクロスケール実験の有効性が示されている。

その他の反応などにおいても、酸・塩基の中和⁽³⁷⁾、水溶液の性質を調べる学習^{(38),(39)}、気体の発生⁽⁴⁰⁾、小型加熱器具の開発や加熱を伴う化学反応^{(41),(42)}、金属の酸化還元反応⁽⁴³⁾、そして毒性の高い二酸化窒素を用いた化学平衡（ルシャトリエの原理の検証）の小スケール化⁽⁴⁴⁾など、実験操作の簡易化と安全性の向上の観点から、マイクロスケール実験は非常に汎用性が高いものであり、種々の実践報告がなされている。

3. 結論と考察

現在マイクロスケール実験は、様々な実験事例が報告され、安全性や経済性、環境教育の導入、少人数個別実験への活用等、その有効性が多数示されているが、一方で学校現場における普及と積極的な活用が、今後の重要な課題となっている。また実験の小型化や簡易化が推奨されるが、従来型のスケールで行う生徒実験についても用途に応じて維持していく必要がある。マイクロスケール実験は、器具や操作の簡略化から、安全性や時間短縮のメリットを有するが、従来身に付けるべき実験技術（例えば、ピペット操作、試薬の希釈や調製、実験器具の組み立て等）の習得の機会を妨げる場合もありうる。

危険な操作を排除するだけが学習なのではなく、危険なものを安全に扱うための技術や知識を向上させること、そして実体験を通じて化学に対する感覚や感性、思考力を養うことが、大切な理科の学習事項でもある。従って、マイクロスケール実験と従来の実験の併用が、理科教育の学習効果を高めることにつながると考えられる。

マイクロスケール実験は、生徒自身が課題を発見し、考え学び、問題を解決する力を育成するための探求的な学習方法への利用が期待されている⁽⁴⁵⁾。教科書の事項を確認するのみの単なる実験から脱却し、探究的で思考が伴う実験スタイル、即ち、仮説を立て、実験により検証し、考察を行うといった科学研究に必須な手法を取り入れるにあたり、マイクロスケール化による実験時間の短縮が、非常に有効となる。納得のいかない結果が生じた場合には追実験を行い、問題点について再度確認をするといったことも容易であるだけでなく、少人数個別実験によるお互いの比較と検証、安全な操作に伴う生徒独自の発案による実験の進行など、その応用性は多岐にわたる。このように様々な学習的利点が期待される実験手法は、教員研修⁽⁴⁶⁾や教員養成系大学の授業にも取り入れられており、現在、学校現場での広がりを徐々に大きくしている。今後は、学習指導要領解説においても推奨される事柄であることから、初等中等教育の教科書におけるマイクロスケール実験の積極的な導入、従来法の実験活動とのよりよい併用、発展的な探究的学習への展開と繋げていくことで、一層の学習効果の向上と環境に根ざした教育活動へと波及していくものと考えている。

4. 参考文献

- (1) 萩野和子 (2001) 化学と教育, 49(4), 235.
- (2) 甲國信 (2001) 化学と教育, 49(5), 302.
- (3) 萩野博・萩野和子・猪俣慎二 (2005) 放送大学研究年報, 23, 89.
- (4) 御園生誠 (2017) 現代の化学環境学—環境の理解と改善のために化学教育における GSC の現状と課題, p.246, 裳華房.
- (5) 今井泉 (2017) 化学と教育, 65(2), 64.
- (6) 島田広道 (2011) 化学と教育, 59(1), 36.
- (7) 松原静郎 (2005) 化学と教育, 53(11), 604.
- (8) 環境省 (2020) 持続可能な開発のための 2030 アジェンダ/SDGs, 環境省 HP env.go.jp/earth/sdgs/index.html より 2020 年 8 月確認.
- (9) 京都マイクロスケール実験研究会 HP <https://h->

- shiba.wixsite.com/k-micro より 2020 年 8 月確認.
- (10) 芝原寛泰・佐藤美子 (2011) マイクロスケール実験
—環境にやさしい理科実験, p.131, オーム社.
- (11) 日本化学会編 (2003) マイクロスケール化学実験,
日本化学会.
- (12) 文部科学省 (2018) 高等学校学習指導要領理科編,
大日本図書.
- (13) 文部科学省 (2017) 中学校学習指導要領理科編, 大
日本図書.
- (14) 国立教育政策研究所 (2009) 小学校, 中学校及び
高等学校の理科教員等に係る現況, p.151.
- (15) 中川徹夫 (2020) 神戸女学院大学教職センター研
究紀要, 3(2), 1.
- (16) 萩野和子 (2007) 化学と教育, 55(2), 82.
- (17) 西村幸田・三宅安・島田秀昭 (2011) 日本科学教育
学会研究会研究報告, 26(2), 11.
- (18) 沼口和彦・中山迅・中林健一 (2013) 理科教育学
研究, 54(1), 61.
- (19) 佐藤美子・山口幸雄・芝原寛泰 (2017) 科学教育
研究, 41(2), 213.
- (20) 三池田修 (2019) 化学と教育, 67(7), 320.
- (21) 田口誠一 (2018) 化学と教育, 66(6), 292.
- (22) 山内薫 他 22 名 (2019) 改訂 化学, 102-109.
- (23) 中川徹夫 (2015) 教材学研究, 26, 69.
- (24) 堀翔太郎・山田貴之 (2020) 日本科学教育学会研
究会研究報告, 34(5), 53.
- (25) 東海林恵子・萩野和子 (2002) 化学と教育, 50(6),
448.
- (26) 井上正之 (2005) 化学と教育, 53(2), 98.
- (27) 井上正之 (2005) 化学と教育, 53(6), 339.
- (28) 井上正之・古賀信吉 (2006) 化学と教育, 54(9), 496.
- (29) 小山内皇樹・後藤洋子・井上正之 (2014) 化学と
教育, 62(12), 608.
- (30) 佐藤和則・井上正之 (2018) 化学と教育, 66(7), 356.
- (31) 栗城鮎美・後藤洋子・井上正之 (2019) 化学と教
育, 67(10), 500.
- (32) 吉川翔吾・井上正之 (2019) 化学と教育, 67(11), 564.
- (33) 中村文・島田秀昭 (2016) 日本科学教育学会研
究会研究報告, 31(2), 13.
- (34) 高木由美子 (2011) *Electrochemistry*, 79(1), 40.
- (35) 賀澤勝利 (2015) 化学と教育, 63(11), 548.
- (36) 川本公二・坂東舞・芝原寛泰 (2006) 化学と教育,
54(10), 548.
- (37) 萩原克明・中川徹夫 (2005) 化学と教育, 53(12), 688.
- (38) 栗原淳一 (2012) 教材学研究, 23, 101.
- (39) 佐藤美子・芝原寛泰 (2016) 理科教育学研究, 57(2),
123.
- (40) 佐藤美子・芝原寛泰 (2014) 科学教育研究, 38(3),
168.
- (41) 小松寛・池本勲 (2015) 化学と教育, 63(2), 96.
- (42) 畑宗平 (2019) 理科教育学研究, 59(3), 457.
- (43) 柴辻優俊・佐藤美子・芝原寛泰 (2015) 理科教育
学研究, 56(3), 347.
- (44) 中野源太・芝原寛泰 (2014) 理科教育学研究, 54(3),
393.
- (45) 萩野和子 (2007) 化学と教育, 55(7), 336.
- (46) 中川徹 (2007) 日本科学教育学会研究会研究報告,
21(4), 31.