

マイクロスケール実験を用いたテルミット反応の教材開発と授業実践

堀出 麻由香^{*A}・芝原 寛泰^{*B}・川本 公二^{*C}・櫻井 健治^{*C}・種岡 和哉^{*D}・古川 豊^{*D}

(A:京都教育大学大学院・B:京都教育大学・C:京都府立桃山高等学校・D:京都教育大学附属高等学校)

Development of Teaching Materials and Teaching Practice of Thermite Reaction Using Microscale Experiments

Mayuka HORIDE, Hiroyasu SHIBAHARA, Koji KAWAMOTO, Kenji SAKURAI,
Kazuya TANEOKA and Yutaka FURUKAWA

2015年11月30日受理

抄録: 高等学校 化学基礎「酸化と還元」の単元におけるテルミット反応を対象に、実験室内での個別実験を可能にするために、実験操作の簡略化、及び安全性の向上を目的としてマイクロスケール実験を用いて教材開発を行った。本研究では、安全性の向上のため、試薬量の削減と実験器具の改良を行った。また、遮光板を通して直視せずに反応の様子を観察できるように図った。さらに、生成物の鉄の確認実験においては、磁石との反応と導通検査を併用した。

開発した教材を用いて教員志望の大学生及び高校生を対象とした授業実践を行った。教員志望の大学生を対象とした実践では、通常スケール及びマイクロスケールの両実験の比較体験により、安全性や操作性について検討した。また、高校生を対象とした実践ではマイクロスケール実験による2人1組の個別実験を実施し、生徒の「酸化と還元」に関する理解の変容を調査した。授業実践を通して、開発した本教材実験は、実験室内で安全に実施でき、生徒に強い印象を与えるだけでなく、実感の伴った「酸化と還元」の理解を促すことが可能であることが分かった。

キーワード: マイクロスケール実験, テルミット反応, 安全性, 化学基礎, 日常生活や社会とのかかわり

I. はじめに

1. 研究の背景

現行の高等学校学習指導要領¹⁾において、理科の「基礎を付した科目」では、中学校と高等学校の接続を考慮しながら、観察・実験などを行うことにより、基本的な概念や探究方法を学習する。さらに、理科に対する興味・関心を高め、理科を学ぶことの意義や有用性を実感させるために、日常生活や社会との関連が重視されている²⁾。また、「酸化と還元」の単元のねらいでは、“酸化還元反応と日常生活や社会とのかかわりについて理解すること”とされており、具体的な例として金属の精錬が挙げられている。現行の教科書³⁾において、金属の精錬の例としてテルミット反応が取り扱われている。しかし、教材実験として記載している教科書は少なく、化学反応について詳しく説明しているものも少ない。本研究で対象としたテルミット反応は、現在でも鉄道のレール溶接に用いられる技術であり、酸化還元反応が日常生活や社会で活用されていることへの理解につながる教材である。

一般に、酸化鉄(Ⅲ)とアルミニウムを用いたテルミット反応では、激しい反応が生じ、鉄の生成が確認できる。反応時には、火柱が上がり、周囲に火花や生成物が飛散するため、安全には十分な注意が必要であり、実験室内での実施は難しい。安全のため、教師による演示実験も考えられるが、反応時の飛散物や閃光による影響を避けるため、生徒は離れた場所からの観察になり、反応や生成物の様子の詳細な観察が困難となる。そこで、安全に生徒一人ひとりが実験を観察できる方法として、マイクロスケール実験に着目した。反応時の詳細な観察により、酸化還元反応と日常生活や社会との関連への興味・関心を喚起できると考えた。

マイクロスケール実験は、GSC(グリーンサステナブルケミストリー)の理念を理科教育に反映させる実験方法の一つであり、特徴として、“実験のスケールを通常よりも小さくすること”、“試薬の少量化に伴い、事故

防止に役立つこと”，“1～2人の個別実験が可能で，グループ実験とは異なる学習効果が期待できる” ことなどが挙げられる^{4,5)}。本研究では，特に，“試薬の少量化に伴い，事故防止に役立つこと”に着目し，反応規模を縮小し，安全に実験を行うことができる方法を検討した。実験器具のダウンサイジングや試薬の削減を行うことは，実験時の安全性を確保するだけでなく，実験操作の簡略化に伴う実験時間の短縮にもつながる。

2. 研究の目的

本研究では，高等学校 化学基礎「酸化と還元」の単元における，マイクロスケール実験を用いたテルミット反応の教材開発を目的とした。教材開発にあたり，“机上でできるテルミット反応”⁶⁾を参考に，実験器具のダウンサイジングにより，“実験時の安全性，観察のしやすさを向上すること”及び，“2人1組の個別実験の導入を図ること”を目標とした。また，開発した教材を用いて授業実践を行い，アンケート調査の結果を踏まえて，開発したマイクロスケール実験による教材実験の有効性を検証することを目的とした。

Ⅱ. 教材開発⁷⁾

高等学校 化学基礎「酸化と還元」の単元における実験として，テルミット反応を取り上げた。本研究では，2人1組での個別実験を目指し教材開発を行った。

1. テルミット反応

テルミット反応は，酸化鉄(Ⅲ)とアルミニウムの混合物に点火することで，鉄の単体を取り出す実験である。反応時には，火柱が上がり，生成物や火花が飛散する激しい反応の様子を観察できる。

(1) 実験器具の作製

テルミット反応の実験において，安全性の向上のためには，火柱や火花等の周囲への影響を最小限に抑える必要がある。そのために，紙コップ(φ5 cm, 90 mL)をステンレス製ケーキ型(4～5号)の内部に設置し，それぞれに直径の異なる園芸用人工軽石を入れ，反応容器を作製した(図1)。反応容器を二重構造にして，反応時に飛散する火花や生成物などが直接机上に落下することを防いだ。また，アルミニウム板の囲い(高さ約25 cm)を作製し，反応容器全体を覆うことで，周囲への生成物の飛散や火柱の拡散を抑制した。さらに，マグネシウムリボンの燃焼や反応による激しい閃光によって，観察時に目を痛める危険性があるため，黒色プラスチック板を用いて遮光板の役割となるついたてを作製した。反応容器の前面に立てることで，ついたてを通して反応の様子を点火から継続して観察できるようにした(図2)。

次に，テルミット反応が日常生活や社会に活用されていることを実験から実感できる工夫をした。φ55 mmろ紙を2枚用い，1枚の底部に鉄製ピン針2本を左右対称に刺し(図3)，もう一方の同型に折ったろ紙と重ね合わせ，試薬入れを作製した。反応後の生成物は，反応で生じた鉄によってピン針同士が接合した状態で取り出せるため，線路のレール溶接を実験によって簡易的に再現することが可能である。



図1 反応容器



図2 実験器具(全体図)



図3 試薬入れとピン針

(2) 実験方法

酸化鉄(Ⅲ) 0.30 g, アルミニウム粉末 0.12 g を量り取り, ニューカップバイアルビンに入れて振り, 試薬を混合する。なお, 酸化鉄(Ⅲ) は吸湿すると一部が塊状になり, 混合しづらいため, 乾燥したものをを用いる。次に, 混合試薬を図 3 の試薬入れに注ぎ, あらかじめ磨いておいたマグネシウムリボン 4 cm を混合試薬の中央に真っ直ぐに立てる。この際, マグネシウムリボンの先端に縦方向へ少し切り込みを入れ, Y 字型にして上下逆さまにすると, 試薬が少量でも立ちやすい。最後に, ついたてと囲いの間から, ガスマッチを用いてマグネシウムリボンに点火する。反応容器の位置が囲いの奥にあること, マグネシウムリボンが直立していることを点火前に確認する。マグネシウムリボンに着火すると, 試薬が短時間で激しく反応して, 実験装置内に火花や生成物が飛び散る(図 4)。点火後は, 目を痛める可能性があるため, 黒色プラスチック板を通して観察し, 直接反応を見ないようにする。反応後, 囲いの上部等が高温になる場合があるので, 数分間放冷した後, 生成物をピンセットで取り出す。

試薬入れに設置した 2 本のピン針が生成した鉄によって溶接された状態で, 生成物を取り出せる(図 5)。生成した鉄の表面には, 酸化アルミニウムや副生成物である磁鉄鉱(Fe_3O_4)が覆っているため, 金槌で叩くことで取り除く。この際に強く叩くと細かな生成物が飛散するため, 軽く叩くようにする。



図 4 点火後の反応の様子

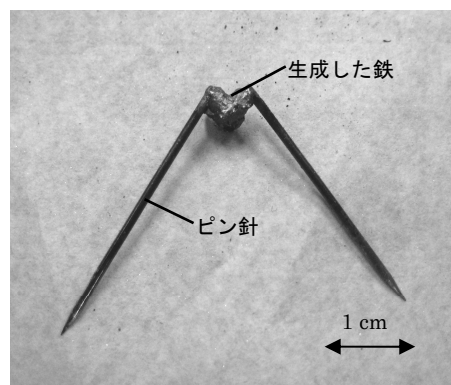


図 5 生成物の様子

2. 反応前後の物質の比較実験

テルミット反応では, 生成物として鉄が得られる。この実験では, 反応前の物質と生成物の性質を比較し, 生成物が鉄であることを実験結果から確認できるようにする。テルミット反応の生成物の主な性質の比較実験として, 磁石との反応が挙げられる。しかし, 磁石との反応だけでは, 反応過程で生じる副生成物である磁鉄鉱と, 主生成物である鉄との違いが明確に現れない。そのため, 本研究においては, より簡便な方法として, 磁石との反応と導通検査を併用し, 鉄の生成を確認できる教材実験を開発した。

(1) 磁石との反応

酸化鉄(Ⅲ) は鉄と異なり, 磁性を持たないため, 磁石を近づけて反応前後の物質を区別した。酸化鉄(Ⅲ) をサンプリングチューブに入れ, 外部からの磁石には引き寄せられないことを確認できる。生成物に関しても, 同様に磁石を近づけて反応を確認するが, この際に, 磁石をポリ袋に入れると細かな生成物が磁石に直接付着せず, 扱いやすい(図 6)。実験によって得られる生成物は鉄の単体の他に, 磁性をもつ磁鉄鉱が混在する。磁石との反応の強弱によって鉄と区別することも可能であるが, ネオジウム磁石では磁力が強く, 判別が難しいため, 実験時にはフェライト磁石を用いる。

(2) 導通検査

電気伝導性の違いを用いて, 導通検査により, 鉄とその他の生成物を区別する。デジタルマルチメーターを用い, 反応前に測定端子を酸化鉄(Ⅲ) に入れ, 導通検査を行う。反応後には, 生成物に接合したピン針 2 本にそれぞれ測定端子をあてる(図 7)。ピン針がうまく接合しない場合は, 球状の鉄の単体に直接デジタルマルチメーターの測定端子をあて, 導通検査をする。

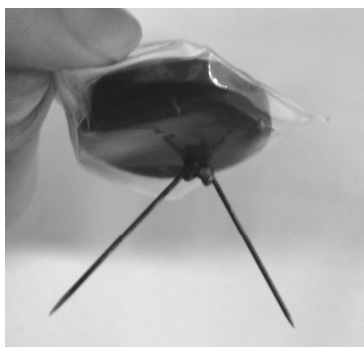


図6 磁石との反応

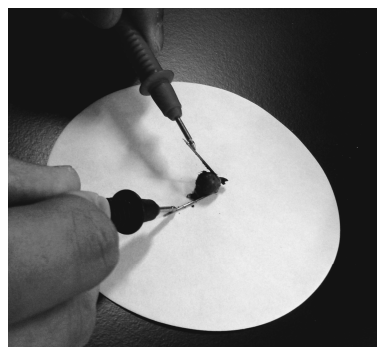


図7 導通検査

Ⅲ. 授業実践⁷⁾

開発した実験教材を用いて本学及び公立高校において授業実践を行った。本学の実践では、教員志望の大学生18名を対象に、90分×2コマの授業を実施した。授業では、通常スケール実験と開発したマイクロスケール実験を実施し、実験の安全性、操作性についての比較を目的として、アンケート調査をした。

また、京都府公立高校においては、1年生4クラスを対象に、化学基礎の授業内で実践を行った。生徒は「酸化と還元」の単元に関しては、未履修であり、本授業実践において初めて学習する。なお、授業では、「酸化還元反応」をテーマに扱い、実験形態は2人1組の個別実験で、50分×1コマの授業で行った。以下に具体的に紹介する。

1. 教員志望の大学生を対象とした授業実践

(1) 授業内容

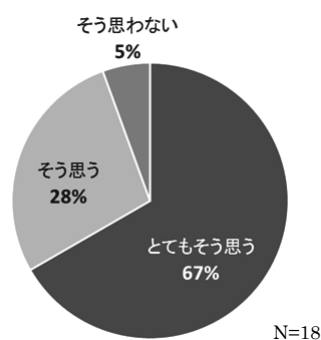
本授業実践では、授業を2日間（各90分×1コマ）に分けて実施し、1日目に通常スケール実験⁸⁾、2日目に開発したマイクロスケール実験を行った。通常スケール実験では、4人1組の班ごとに実験を行い、実験室内での実験方法の説明後、実験準備を行い、屋外へ移動し、試薬に点火した。2日目のマイクロスケール実験では、2人1組で実験を行い、全ての過程を実験室内で実施した。各実験の後にアンケート調査を行った。

(2) アンケート調査

テルミット反応の通常スケール実験とマイクロスケール実験を比較するために、授業後にアンケート調査を実施した。学生は、実験の操作性及び安全性に関して、指導者となることを想定した教員としての立場と、生徒としての立場の両方の観点から評価し、さらに選択回答式とそれに対する意見の自由記述を求めた。

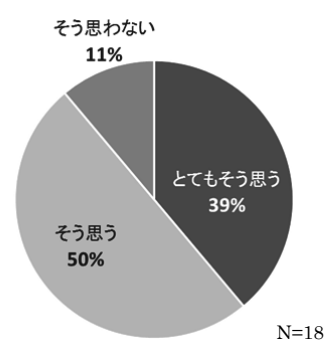
通常スケール実験とマイクロスケール実験を比較すると、実験の操作性に関しては、95%がマイクロスケール実験を支持した（図8）。具体的な記述では、“全ての操作が小さかったので、すぐにセットできた”や、“外ですると風が吹くなど、いろいろ大変なので、室内でできるのは簡単だった”，などの意見があり、マイクロスケール実験では、実験器具が小さく、省スペースで行えるために操作しやすいと感じる学生が多く、さらに室内で実験することによって天候に左右されずに実施することができ、実験時間が短縮できるといえる。

実験の安全性に関しては、89%がマイクロスケール実験を支持した（図9）。具体的な意見を表1に記す。マイクロスケール実験では、試薬量の削減によって反応の規模が縮小し、さらに実験器具の改良により安全性が向上したといえ、遮光板を用いることによって観察のしやすさも向上したといえる。しかし、否定的な意見として、学校現場においては、複数箇所でも実験を同時に行う際に、目が行き届きにくくなる可能性があるという指摘があった。また、灰や火花が実験器具の外部に出るという意見に関しては、反応容器と囲いの位置に関する指示が行き渡っていなかったと考えられる。



「マイクロスケール実験は通常実験と比べて
操作が容易である」

図8 アンケート結果（操作性）



「マイクロスケール実験は通常実験と比べて
安全に実験を行うことができる」

図9 アンケート結果（安全性）

表1 安全性に関する記述

安全性	肯定的な意見	否定的な意見
通常スケール実験	屋外で行うことで、安全性が高まる	風で点火がしづらい
	十分に距離を保って観察できる	近づいて観察すると、危ない
	誰もケガをしなかった	風で試薬が飛散する
		ビーカーが生成物によって割れる
マイクロスケール実験	灰が出たが、実験には問題ない	灰が飛散するので、マスクが必要な人がいる
	遮光板によって観察しやすい	少し火花が散る
	火花の量が少なく、囲いで防げる	何箇所でも実験すると、目が行き届かない
	安全に配慮すれば、問題なく行える	

2. 公立高校生を対象とした授業実践

(1) 授業内容

本授業実践では、京都府公立高校1年生4クラス計164名を対象とし、2014年6月に2日間に分けて行った。1クラスあたり50分×1コマの化学基礎の授業内で、実験室内で開発したマイクロスケール実験教材を2人1組の個別実験で実施した。まず、実験方法の説明を行い、その後実験器具を組み立て、20セット同時にマグネシウムリボンの点火の指示をした。授業の様子を図10、11に示す。授業の前後でアンケート調査を実施した。

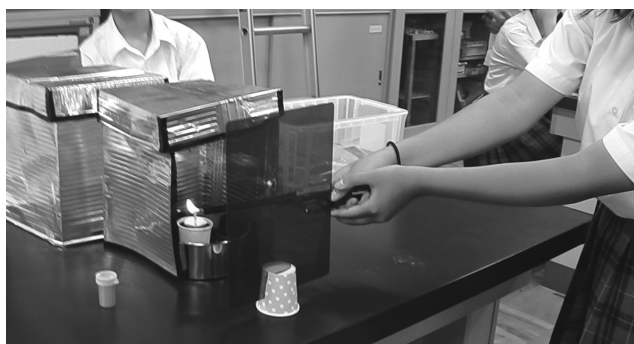


図10 マグネシウムリボンに点火する様子



図11 導通検査の様子

(2) アンケート調査

マイクロスケール実験における学習効果を検証するために、授業の前後でアンケート調査を実施した。事前アンケートは授業時間外に、事後アンケートは授業の最後に実施した。「酸化と還元」の学習²⁾では、「酸化と還元が常に同時に起こること」や「日常生活や社会とのかかわり」について扱うこととされており、「金属の酸化還元反応と関連して金属のイオン化傾向に触れることが考えられる」とされている。これらに基づき、「酸化と還元は同時に起こる」、「酸化還元反応は生活に活用されている」、「酸化還元反応は金属どうしても生じる」という3件の項目について、選択回答式でアンケート調査を行った。

まず、「酸化と還元は同時に起こる」という項目に関して、事前アンケートでは、66%が正しく回答しており、事後アンケートでは、80%に増加した(図12)。中学校において、酸化と還元が同時に起こることを学習する場合があるため⁹⁾、事前アンケートにおいても半数以上の生徒が正答したと考えられる。ワークシートの実験結果においても、酸化と還元の両方について記述している生徒が多く、本教材実験や考察を通して、「酸化と還元が同時に起こること」を確認できると考えられる。

次に、「酸化還元反応は金属どうしても生じる」という項目に関して、事前アンケートでは、39%が正しく回答しており、事後アンケートでは、65%に増加した(図13)。本教材においては、「酸化と還元」について未履修であっても、中学校での既習内容を活用して、金属間での酸素のやりとりを考察することが可能であると考えられる。一方、残りの35%については、反応後に鉄の生成を確認する実験を行うため、酸化鉄(Ⅲ)の還元に着目した生徒が多く、アルミニウムについては十分に考察できていなかったと考えられる。

“酸化還元反応は生活に活用されている」という項目に関して、事前アンケートでは、60%が酸化還元反応の生活での活用について実感することができていなかったが、事後アンケートでは、35%まで減少した(図14)。感想欄に記入されていた記述例(図15)に見られるように、生活の中で酸化還元反応とのつながりを見出すことは少ないために、生徒にとって身近に感じにくく、本教材実験を通して日常生活や社会との関連性を印象づけることが可能であると考えられる。

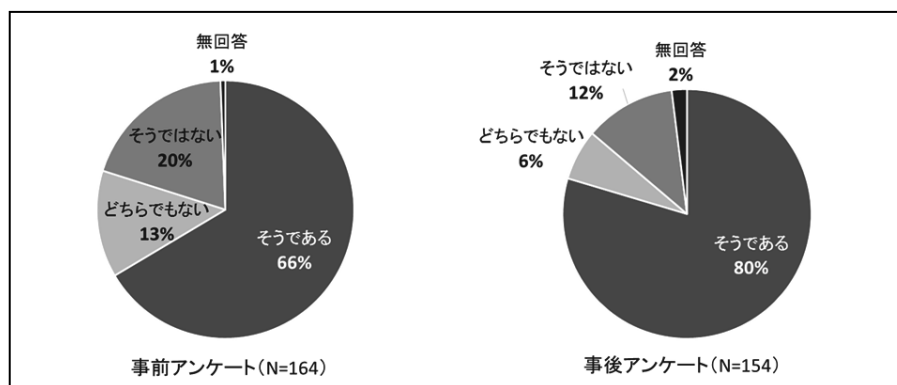


図12 「酸化と還元は同時に起こる」

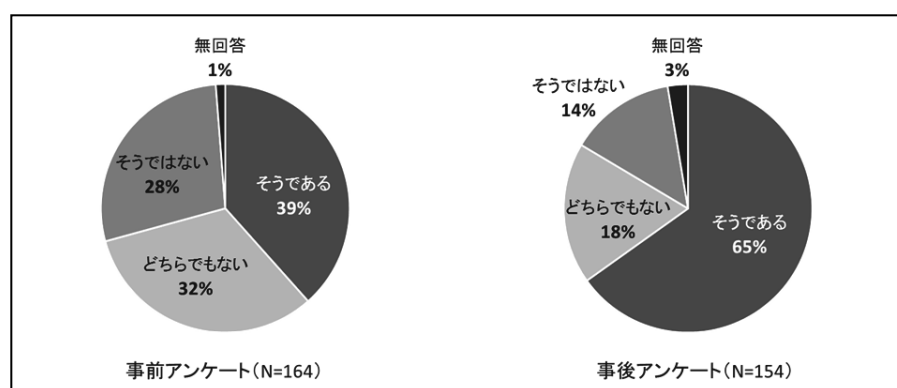


図13 「酸化還元反応は金属どうしても生じる」

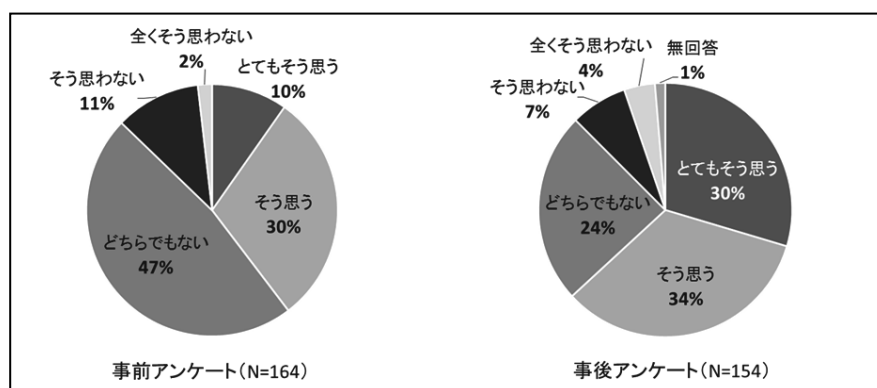


図 14 「酸化還元反応は生活に活用されている」

酸化や還元が生活に利用されているのは知らなかったのをおどろきました。
 このように化学などが生活に利用されている例を他にも知りたいと思いました。

図 15 酸化還元反応と生活との関連性に関する記述例

(筆者リライト：酸化や還元が生活に利用されているのは知らなかったのをおどろきました。
 このように化学などが生活に利用されている例を他にも知りたいと思いました。)

IV. おわりに

1. まとめ

本研究では、テルミット反応に関するマイクロスケール実験の教材開発を行い、それを用いて教員志望の大学生、及び高校生を対象とした授業実践を行った。教員志望の大学生を対象とした実践を通して、図 8 及び 9 の結果から、実験器具のダウンサイジングや試薬量の削減が、実験操作の簡略化につながり、実験を省スペースで行えることが分かった。また、ついたてや囲いを用いて実験室内で実施することで、観察のしやすさ、安全性がともに向上し、実験時間の短縮にもつながることが分かった。また、高校生を対象とした実践を通して、実験によって金属間における酸化と還元だけでなく、酸化還元反応と日常生活や社会とのかかわりについての理解を促すことが可能であると分かった。しかし、アンケートとワークシートの結果から、考察時間の不足により、アルミニウムについて着目した考察が十分でなかった生徒がいることが分かった。また、アンケートの自由記述においては、激しい反応の様子に注目した感想を記述している生徒が多く、生徒にとって印象的な実験となり、化学に対する興味や関心を引き出すことができたといえる。さらに、マイクロスケール実験を用いることで、生徒が主体的に実験に参加できるという感想があり (図 16)、2 人 1 組の個別実験を導入することで、一人ひとりが役割を持って実験を行い、実感の伴った「酸化と還元」の理解へとつながることが分かった。また、大学生を対象とした実践において、“数十箇所ですべて同時に実験をすると、(教師の) 目が行き届きにくくなる”という指摘があったが、授業実践の結果より、約 20 箇所での実験を同時に安全に実施できることが分かった。

マイクロスケールだと、一人一人が観客として見るだけでなく、
 一人ずつが行動できるのでとてもよいと思いました。

図 16 マイクロスケール実験に関する記述

(筆者リライト：マイクロスケールだと、一人一人が観客として見るだけでなく、
 一人ずつが行動できるのでとてもよいと思いました。)

2. 今後の課題

授業実践から、十分な考察時間を確保するとともに、実験後にグループ討論を行い、結果の共有と考察をさらに深める必要がある。また、アルミニウムの酸化と酸化鉄(Ⅲ)の還元の方の化学変化に着目するために、ワークシートの構成など授業展開についても検討が必要である。

今回の実践では、「酸化と還元」の単元における導入部分に関して授業を行ったが、「酸化と還元」のねらいである「酸化と還元が電子の授受によることを理解すること」を実現するために、本教材と合わせて金属間の電子の移動について着目する教材を先行研究¹⁰⁾をもとに開発した¹¹⁾。それらを用いて行った本学附属高校での授業実践の様子を図 17, 18 に示す。授業実践では、2 人 1 組の個別実験を実施し、各実験後に 4 人 1 班ごとにホワイトボードを用いて、実験結果についての考察を討論し、発表することで、クラス全体で意見を共有した。これらの 2 つの実験を用いて教材の有効性についてもさらに検討していきたい。



図 17 グループ討論の様子



図 18 発表の様子

本研究は、科研費（平成 26～28 年度基盤研究 C，課題番号 26350233，代表 芝原寛泰）の助成を受け、実施された。

V. 参考文献

- 1) 文部科学省，「高等学校学習指導要領」，2009 年
- 2) 文部科学省，「高等学校学習指導要領解説 理科編」，2009 年
- 3) 齋藤烈・藤嶋昭・山本隆一ら，「化学基礎」，啓林館，p.8，2012 年
- 4) 荻野和子，「マイクロスケール実験の広場（その 1）「マイクロスケール実験の広場」へのお誘い」，化学と教育，第 49 巻，第 2 号，p.110，2001 年
- 5) 芝原寛泰・佐藤美子，「マイクロスケール実験－環境にやさしい理科実験－」，オーム社，p.2，2011 年
- 6) 小松寛，「机上でできるテルミット反応」，化学と教育，第 57 巻，第 5 号，pp.242-243，2009 年
- 7) 堀出麻由香・芝原寛泰・川本公二・櫻井健治，「マイクロスケール実験を用いたテルミット反応の教材開発」，日本理科教育学会第 64 回全国大会愛媛大会要項，p.220，2014 年
- 8) 田中晃二，「演示効果の大きいテルミット反応の利用と安全性」，化学と教育，第 40 巻，第 7 号，p.478，1992 年
- 9) 有馬朗人ら，「理科の世界」，大日本図書，p.48，2014 年
- 10) 佐藤美子・芝原寛泰，「バックテスト容器を用いたマイクロスケール実験による電池・電気分解の教材開発と授業実践－考える力の育成を図る実験活動を目指して－」，理科教育学研究，第 53 巻，第 1 号，pp.61-67，2012 年
- 11) 堀出麻由香，「高校化学における鉄とアルミニウムを用いた酸化還元反応の教材開発と授業実践－マイクロスケール実験によるテルミット反応を例に－」，平成 27 年度京都教育大学大学院修士論文，2016 年