

環境にやさしい理科教育実験

－中学校理科におけるマイクロスケール実験の実践例－

佐藤 美子¹⁾・芝原 寛泰²⁾

Environmentally Friendly Experiments in Science Education

－ Some Practical Examples of Junior High School Microscale Experiments －

Yoshiko SATO¹⁾ and Hiroyasu SHIBAHARA²⁾

抄 録：環境にやさしく持続可能な化学（グリーンケミストリー）の考え方に基づく理科教育実験の試みとして、マイクロスケール実験の実践例について検討した。本稿では、特に中学校理科における「水溶液の性質」をテーマにマイクロスケール実験の具体例を取り上げ、生徒の反応なども含めて、この実験の有用性と課題について考察した。

キーワード：マイクロスケール実験, グリーンケミストリー, 持続可能性, 科学リテラシー, 水溶液の性質

はじめに

リデュース, リユース, リサイクルの「3R」は, 中学の英語の教科書でも扱われており, 生徒たちの間でも, また, 一般的にも, この言葉は浸透してきた。いらないものは買わない, 作らない＝リデュース, 作ったら再使用＝リユースし, 再生紙, 再生ノートに見られるように, 出来るだけ再生利用＝リサイクルすることが, 私たちに出来る環境への思いやりであり, 取るべき行動なのだろう。しかし, より効果を高めるには, まず始めのリデュースに取り組むことが必要だ。リユース, リサイクルすべき量を軽減し, その負担を減少させることで, 全体として大きな効果をあげることができる¹⁾。リデュースすること。それは, 理科教育の立場からいうと, 実験での廃棄物や, 廃液量を減らすことである。しかし, 廃棄物や廃液量を減らすために実験の回数を減らすことは出来ない。そこで, どのように対応すればよいかが課題となる。実験は必要不可欠な活動である。生徒たちは理科という科目を通して, 講義の中で科学に関する多くの知識を学んでいる。インターネットの普及により, 簡単に検索し, 調べたりもできるため, 多様な知識を言語的には認識している。その認識を現実の世界と結びつけ, 実感を伴う明確な概念にするために, すなわち, 科学リテラシーを育てるために, 実験という活動の役割は非常に大きい。実験を拡大しても, 縮小することは決して出来ない。

そこで, 廃液量を減らし, 積極的にリデュースすることが可能であり, なおかつ, 内容を充

1) 滝川第二中学校・高等学校

2) 京都教育大学

実させ、教育効果を高めることが出来る実験活動として、マイクロスケール実験の導入を検討した。

I. マイクロスケール実験の導入

1.1 マイクロスケール実験の特徴

マイクロスケール実験とは“環境問題に配慮した化学”、“環境にやさしい化学”というグリーンケミストリーの考え²⁾を反映して開発された画期的な実験方法であることはすでにいろいろなところで取り上げられ、広まりつつある実験方法である^{3,4)}。また、中学校学習指導要領解説理科編（平成 20 年 9 月）においても、「マイクロスケール実験など、使用する薬品の量をできる限り少なくした実験を行うことも考えられる。」と、その有用性が明記されている⁵⁾。そこで、まずマイクロスケール実験の 3 つの長所について考察する。

1.1.1 環境への配慮

従来、多数の試験管等の器具を使用して行っていた実験をセルプレート等に置き換え、スケールを縮小したことで、使用する薬品の量を大幅に削減することが可能となり、結果として、廃液量を減少させることに成功した。環境問題への取り組みとして、廃液、廃棄物等の処理の仕方、リサイクリングの技術開発、方法が頻繁に話題とされているが、より積極的に取り組むには、廃液、廃棄物をださないこと、原料を無駄にしないことが重要である。環境にやさしい化学というグリーンケミストリーの考え方には環境にやさしい化学を追求していくという積極的な姿勢で臨み、環境への負荷を減らすことで、sustainable chemistry（持続可能な化学）を目指していることがうかがえる⁶⁾。

1.1.2 内容の充実

マイクロスケール実験では、スケールを小さくしたことで、多くの試料を一度に調べて結果を得ることが可能となった。スケールの縮小は実験時間の短縮にもつながり、単一時間内での複数の実験を可能にし、実験結果を落ち着いて比較、検討する時間的なゆとりも生じた。密度の濃い、充実した内容を生徒に提供することで、生徒に満足感を与えることのできる実験方法として教育的な効果は非常に大きく、同時に sustainable chemistry（持続可能な化学）という方向性を示唆している⁷⁾。

1.1.3 実験活動の多様性

従来の、班活動中心の実験スタイルだけでなく、生徒一人一人の取り組みを重視した実験スタイルが可能となった。これまで、ピンホールカメラやストロー笛の製作という限られた場合のみ、一人作業を行ってきたが、理科実験での主流は班での作業である。班での作業により、生徒は協力しあうことで、協調性を養うこともできる。しかし、班での活動の場合、班の誰か一人に比重がかかり過ぎたり、怠けたり、また逆に、参加したいのに記録したり、見るだけに終わってしまう生徒も見受けられる。このマイクロスケール実験は、生徒一人一人が自らの実験活動に責任をもって携わり、集中して取り組むことで、自らを取り巻く環境に働きかけ、概念を明確に獲得していくことが可能となる。

活動の多様化は、生徒たちの概念の定着、科学的な思考力、表現力の育成を通して、持続可能な（sustainable）現在および将来にわたって必要な科学リテラシーを育てていく機会を拡大するものである⁸⁾。

Ⅱ．授業実践

中学理科，第1分野，単元「身のまわりの物質」の中の「水溶液の性質」について，中学1年2クラス，1組35名，2組46名の計81名を対象に，2008年10月下旬から11月初旬にかけて4回の実験を行い，その内2回，マイクロスケール実験を用いて授業を行った。マイクロスケール実験の活用は，積極的に廃液量を減らすという環境への配慮を忘れることなく，さまざまな働きかけにより，生徒の知的好奇心を満たし，科学リテラシーを育てる上で，非常に大きな教育的効果をもたらすことを，検証していくことにする⁹⁾。

2.1 授業計画「水溶液の性質」予定7時限

1) 物質を分ける方法	1 限目	講義	物質を分ける方法
	2	実験	班実験でのろ過，再結晶による分離，演示実験
2) 酸性，アルカリ性とは何か	3	講義	性質の違い，指示薬の特徴，識別方法について
	4	実験	いろいろな水溶液の性質を調べる
3) 酸とアルカリの中和反応	5	講義	中和によって塩と水が出来ること
	6	実験	中和と塩，塩の違い
	7	講義	実験後のまとめ
追加	8	実験	食塩の結晶を観察

2.2 演示実験（2 限目）—中華そばの色変わり—

物質を分ける方法として，ろ過と再結晶の班実験を行う。その実験の最後に，次の学習への意識づけを行った。中華そばにカレーパウダーをかけると赤く変色し，さらにソースをかけると黄色に変色することを演示で見せた（図1a，1b）。カレーパウダーの中のターメリックにはクルクミンというアルカリ性に反応し，赤く変色する成分が含まれている。したがって，アルカリ性のかん水を含む中華そばは，クルクミンによって黄色から赤色に変色し，さらに，酸性



図1 a カレーパウダーをかけたら赤く変色



図1 b さらにソースをかけると元の色に

のソースをかけることで、元の黄色にもどる。生徒たちはその変化にものすごい歓声を上げた。なぜなのか、全員が色変わりに驚き、好奇心から中華そばを食べていた。生徒と共に驚きや楽しさを共有することが大切だと考えている。

2.3 酸性、アルカリ性とは何か

3 限目の講義の中で、代表的な水溶液の性質と指示薬の特徴についてしっかりと学習する。次に続く実験の中で、その手順や次の段階の予測や推測、判断などを行う基準となるのが、ここでの学習による知識やこれまでの認識である。実験は学習による知識に支えられ、学習は実験に支えられてお互いにフィードバックしながら概念を明確にし、科学リテラシーを高め、確かな力となっていく。この意味において、両者共に、その果たす役割は大きいと言える。

2.3.1 実験：いろいろな水溶液を調べてみよう（4 限目）

ここではマイクロスケール実験により、各自一人一人行う実験スタイル、一人作業で実験を行った。この実験で用いる主な器具（図 3）は 24 セルプレート（液体などを入れる 24 のホールがある。以下セルと呼ぶ。）、投薬ビン（液体を入れる）、点眼ビン（指示薬用）である。実験用台紙 1（図 2 b）にセルをセットし、3 限目に学習した中から 5 種類の水溶液を用意し、BTB 溶液、フェノールフタレイン溶液、そして、赤色リトマス紙、青色リトマス紙を用いて色の変化を観察し、水溶液の性質を調べることにした。その際、まず始めに、①結果を予測し、用意した実験プリント 1（図 2 a）の左の欄に記入する。また、マグネシウムリボンを入れたときの反応も予測を立て、同様に記入しておく。続いて、実際に作業を行い、それぞれの②結果を確かめ、右の欄に記入し、結果から自らの予測が正しかったかを③思考し、判断する。さらに、名前をふせた 4 種類の水溶液を用意し、各自 1 つ選んで指示薬による色の変化や、マグネシウムリボンとの反応から物質名を④推測していく。

2.3.2 実験の結果と考察

5 種類の水溶液と選択した身のまわりの水溶液 1 種類、合わせて 6 種類の水溶液について一度に短時間で性質を調べることができた。学習から得た知識をもとに推測する。一人作業により、次の 4 つのプロセス、①予測、②確認、③思考、判断、④推測を各自が体験し、自らの認

図 2 a 実験プリント 1

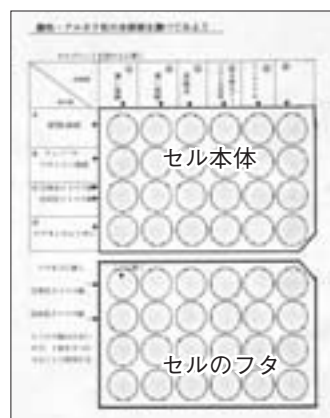


図 2 b 実験用台紙 1（セルを置く）

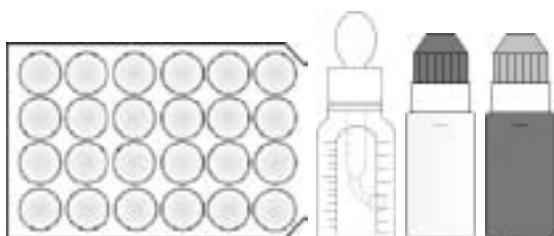


図3 24セルプレート 投薬ビン 点眼ビン



図4 器具を用いて実験中

識と現実が結びつく感動を味わうことができた。

ほぼ予測の結果であったが、塩化ナトリウム水溶液の反応だけが予想外の結果になった。その原因としては①隣の水溶液が少し入ってしまった。②入れる場所を間違えた。③他の水溶液を間違えて使用した、などが考えられる。そこで、この点については5限目に確かめることにした。

実験後の感想(図5)から、ほとんどの生徒が予測と結果が一致した場合には大きな満足感を得ている。一致しない場合には不満足と、なぜだろうという気持ちが生じている。満足感にはさらに発展させていこうとする気持ちを引き起こし、不満足と疑問の感情はもう一度確かめたいという意欲的な感情を誘発している。生徒自らが楽しいと感じ、このような意欲を持つことが重要である¹⁰⁾。

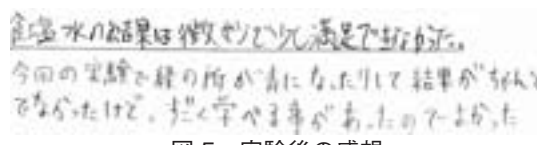
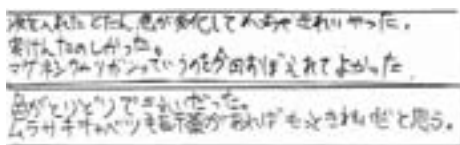


図5 実験後の感想

2.4 酸とアルカリの中和反応

始めに、塩化ナトリウム水溶液が中性であることを演示実験により、BTB溶液を用いて全員で確認した。生徒たちは、前回の実験で、異なる水溶液が混ざってしまうと予想した変化のとおりにならないことも体験している。そこで、異なる2つの水溶液を混ぜたらどうなるのか、酸性とアルカリ性の水溶液の特徴を思い出しながら、中和反応を想像し、結果を推測して、実験の中で確認していく。

2.4.1 実験：酸性とアルカリ性の水溶液を混ぜ合わせてみよう(6限目)

塩酸に水酸化ナトリウム水溶液、水酸化バリウム水溶液に硫酸をそれぞれ加え、水溶液の変化を比較し、中和と中性、生成物である塩について学ぶ。一人1つの6セルプレートを用い、今回は一人作業だけでなく、二人で行う、二人作業や班で取り組む、班作業など、いろいろな作業形態で実施した。

前回同様、実験プリント2(図6a)に予想を立て、二人作業で行うため、実験用台紙2(図6b)を二つ折りにして、必要に応じて二人のセルを台紙にのせたまま移動させ、合体して実験を行なう。

- ④ セルをのせた台紙2を近づけて連結し、二人で共同作業を行う。始めに、何番目のセルで完全に中和するか、予想を立てておく。各塩酸に水酸化ナトリウム水溶液を左端から0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 (ml) と、増量させて加え、変化を確認
(二人で予想) (二人作業) (二人で確認)
- ⑤ 前列の水酸化バリウム水溶液には、各自、硫酸0.5, 1.0, 1.5 (ml) を加え、それぞれの変化を確認
(一人作業) (二人で確認)
- ⑥ 全員で2種類の溶液をそれぞれ観察し、その違いを確認
(班で確認)
- ⑦ 確認の方法を話し合い、班で実験を行う。
(班で予測) (班作業) (班で確認)

2.4.2 結果と考察

〈 結果 〉実験結果と生徒の様子をまとめる。

- ① 塩酸と水酸化ナトリウム水溶液の反応では、酸性からアルカリ性への途中で黄緑色になり完全に中和したところを確認できた生徒たちは非常に満足していた。
- ② 水酸化バリウム水溶液と硫酸の反応では、BTB溶液を入れた水酸化バリウム水溶液は青色、フェノールフタレイン溶液を入れた水溶液は赤色を示した。同じ水溶液でも用いる指示薬により色の反応が異なることを二人で互いに確認した。
- ③ セルの前列には水酸化バリウム水溶液と硫酸によって塩ができて、沈殿していることが確認できる。一方、後列では、塩ができて沈殿している様子は全く見られない。中和による塩には水溶液中に溶解するタイプと析出するタイプがあることを全員が確認した。
- ④ 塩酸と水酸化ナトリウム水溶液の反応による塩化ナトリウムを取り出す方法を班で相談した。物質を分ける方法として、蒸発乾固により結晶を取り出す実験に班全員で取り組む。最終的に、1組では1班のみ、2組では2つの班が結晶を確認できた。



図7 実験結果の一例

(考察)

班で行なう実験では、2種類の中和実験にそれぞれに1時間を要する。今回のマイクロスケール実験により、2つの実験が同時に可能で、時間の短縮、廃液量の減少はもちろん、反応の途中経過をしっかりと見ることができた。また、2つの実験から生成する塩の違いを実際に観察し、比較した。これまで、同時に見比べることは時間的に無理であった。さらに、発展的実験として、その塩を取り出す作業にも取り組むことができた。このように、2つの実験を同時に行なうことは、内容の充実という点で非常に大きな教育的効果をもたらしていると考えられる。

多数の実験結果より、上記①②のような性質の変化や③の性質の違いについての信頼性は高い。しかし、色の露出具合は非常に様々な結果となった。使用する指示薬の量をしっかりと指示することが必要と反省している。また、性質が変化する境界付近では、試料が少ないため1滴多く入っただけでも色は変色する。たとえば、塩酸と水酸化ナトリウム水溶液の反応では、同濃度であるため、正確であれば、左から5番目のセルで完全に中和し、黄緑色となるが、実際には、塩酸の量が1滴少ない、水酸化ナトリウム水溶液が1滴多い、といったことから4番目のセルで中性の領域に入ってしまうケースも多かった。したがって、定量的な面での正確さ

は十分とは言えない。今後、より正確にしていくための工夫をしていきたい。しかし、今回の目的である水溶液の性質を知り、混合した時の反応や生成物の特徴を把握する上ではなんら問題はない。むしろ、生徒一人一人が頭と手を動かして実験に取り組み、これらの内容を自ら把握できたことの意義は非常に大きいと考えている。

2.4.3 廃液量について

図 8.9 のように大きなボールに廃液を回収した結果、非常に廃液量が少ないことに驚いた。中和実験では廃液量の測定も行なった。



図 8 廃液 A. (水溶液の実験)



図 9 廃液 B. (中和の実験)

43 名（欠席 3 名）が行なった中和実験での廃液 B（図 9）は、約 900m ℓ であった。生徒たちは一人作業にまだ慣れていないので、初期段階ではやり直しもかなりあった。その量も含めた値である。

46 名（12 班）が班実験を行なった場合、各班で使用する薬品の量は

- ① 塩酸 25 m ℓ + 水酸化ナトリウム水溶液 30 m ℓ
- ② 水酸化バリウムの飽和水溶液 25 m ℓ と薄い硫酸 15 m ℓ

となり、2 実験による廃液量はおよそ $(55 + 45) \text{ m ℓ} \times 12 \text{ 班} = 1200 \text{ m ℓ}$ になる。この計算値からも廃液量が削減されていることがわかる。

生徒たちが器具の扱いに慣れ、失敗が減るとさらにもう少し減らすことも可能であろう。

生徒たちは集中して取り組むことで失敗も減り、さらに廃液量を減らすことが可能であることに気づき、環境について考えるきっかけを得た。

Ⅲ. 実験のまとめと追加実験

実験についてのアンケート（詳細はⅣ）を取った後、実験のまとめをした。（7 限目）

3.1 実験のまとめ

酸性の水溶液にアルカリ性の水溶液を加えはじめるとすぐに塩ができ始める。そして、すべて塩になったとき、中和が終わり、中性になること、さらにアルカリ性の水溶液を加えても塩の量は変わらず、アルカリ性の水溶液が増えていくことを図に記入し全員で確認した。（図 10）

図 10 のプリントでは、中和によってできる物質「塩」を「えん」と読み方を書き加えている。

食塩と塩が異なることを認識しようとしている。この点は、感想のところで、一度、塩化ナトリウムと書いた語句を、修正して「塩」としている点からも「塩」という語句の使い方に戸惑いがあるものの、そこに意識が集中していることがうかがえる。

実験への積極的な参加とまとめにより、学習と実験を明確に結びつけ、確かな知識へと導くことができる。食塩の結晶を見たいという生徒たちの意識と意欲はさらに高まり、次の時間、食塩の結晶を見ることにした。

3.2 食塩の結晶の観察

塩化ナトリウム水溶液を1滴スライドガラスにとり、ドライヤーで乾かし、顕微鏡で結晶を観察する、班での活動とした。目的意識がはっきりしているため、全員の動きもよく、短時間で観察を終え、スケッチもおこなった。感想には実験によって勉強したことを確かめ、実感できた喜びが多く記載されていた。スケッチの絵(図11)は、実験後すぐに写真を撮り、スライドとして授業の終わりに見せた。

3. 実験後のまとめ

(1) 食塩とアルカリ性物質の水溶液を混ぜると「塩化ナ」塩化が出来る。
(2) 食塩とアルカリ性物質の水溶液を混ぜると「塩化ナ」塩化が出来る。
(3) 食塩とアルカリ性物質の水溶液を混ぜると「塩化ナ」塩化が出来る。

食塩の水溶液	食塩の水溶液	食塩の水溶液
アルカリ性物質の水溶液	アルカリ性物質の水溶液	アルカリ性物質の水溶液
食塩の水溶液	食塩の水溶液	食塩の水溶液

(2) 食塩とアルカリ性物質の水溶液を混ぜると「塩化ナ」塩化が出来る。
(3) 食塩とアルカリ性物質の水溶液を混ぜると「塩化ナ」塩化が出来る。

食塩の水溶液	食塩の水溶液	食塩の水溶液
アルカリ性物質の水溶液	アルカリ性物質の水溶液	アルカリ性物質の水溶液
食塩の水溶液	食塩の水溶液	食塩の水溶液

1. 食塩とアルカリ性物質の水溶液を混ぜると「塩化ナ」塩化が出来る。
(2) 食塩とアルカリ性物質の水溶液を混ぜると「塩化ナ」塩化が出来る。
(3) 食塩とアルカリ性物質の水溶液を混ぜると「塩化ナ」塩化が出来る。

4. 実験の感想

食塩とアルカリ性物質の水溶液を混ぜると「塩化ナ」塩化が出来る。
(2) 食塩とアルカリ性物質の水溶液を混ぜると「塩化ナ」塩化が出来る。
(3) 食塩とアルカリ性物質の水溶液を混ぜると「塩化ナ」塩化が出来る。

図10 まとめプリントの1例



図11 a 結晶の観察A(食塩)

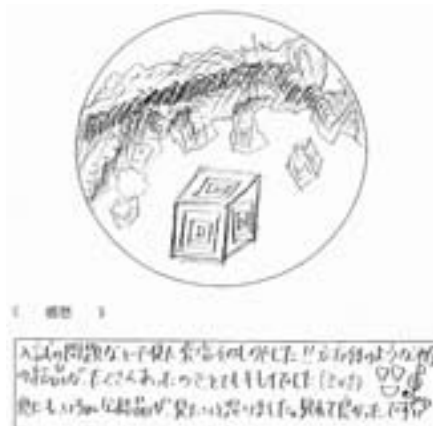


図11 b 結晶の観察B(食塩)

IV. 生徒の意識調査

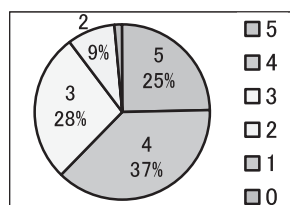
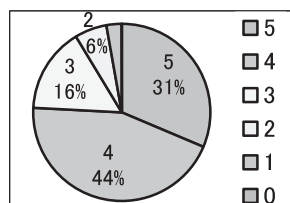
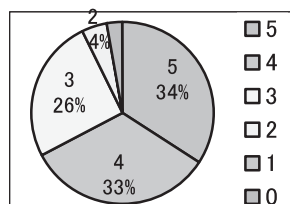
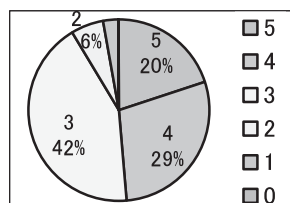
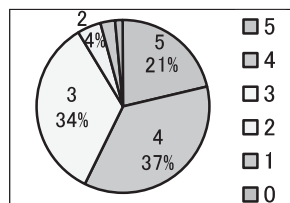
マイクロスケールで行なった2回の実験について、アンケートをとり、生徒の意識調査を行なった。以下は同じ質問に対する実験1(左)、実験2(右)、実施後の反応を対置している。

実験1 実施日：2008 年 10 月 30 日・11 月 1 日

実験参加生徒数 1 組 33 名 2 組 42 名

実験1 アンケート数:70(欠席5名) 質問1 実験器具について

酸性とアルカリ性の水溶液の性質

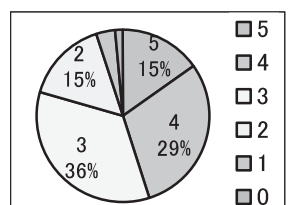
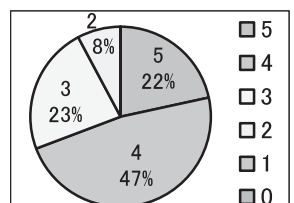
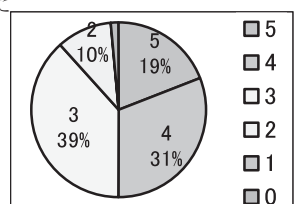
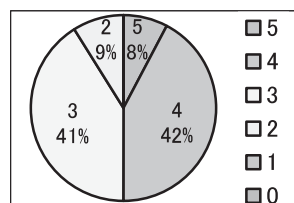
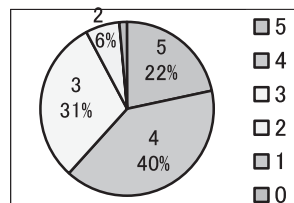


実験2 実施日：2008 年 11 月 6 日・7 日

実験参加生徒数 1 組 34 名 2 組 43 名

実験2 アンケート数:77

酸とアルカリの中和反応



以上の結果から、安全めがねに関しては、実験2で「できればかけたくない」が実験1よりも増加している。掛け心地の点で改良の余地がありそうだが、その他の項目については、実験1, 2ともに、90%を超える生徒が普通以上を占めている。マイクロスケール実験の器具の扱い方や、結果に対しても抵抗なく受け入れ、満足していること、内容も理解できたと考えていることがわかる。

質問3では、この実験について感じた気持ちを複数選択した。(図12)

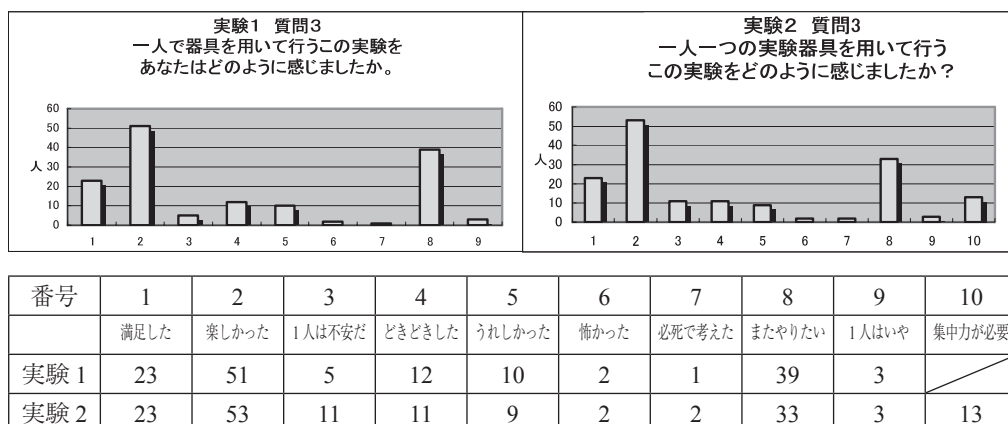


図12 質問3に関する調査結果

実験1, 2, ともに楽しかった, またやりたい, 満足したが特に多く, ときどきした, うれしかったと続く。また, やれるだろうか, ひとりはいやだなあといったような不安な気持ちになったことも少しかがえる。実験2では, 集中力が必要という項目をいれると, これも選択者が多かった。実験に集中して取り組み, ときどきしたり, 不安になったりもしているが, 結果に満足し, 達成感, 満足感を感じていることがアンケートの記述部分(図14)にも表現されている。

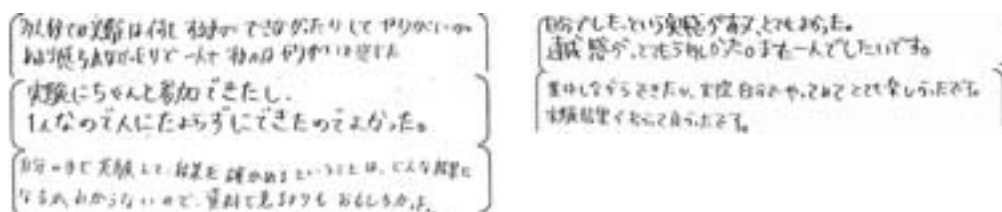


図14 生徒のアンケート記述より抜粋

質問6 実験2終了後, 実験を振り返って「あなたはどの形態で作業するのが好きですか。」

好きな順	一人作業	二人作業	班作業
1	33	21	23
2	15	23	8
3	10	13	22
記入なし	20	21	25

図13 質問6の結果

今回初めて一人作業をして満足したと同時に, 一人でする作業への不安や恐怖心, また自己責任, 集中力といった点から従来の班での活動もいいなあという生徒の気持ちが現れている。生徒はそれぞれの形態の良さを感じていると思われる(図13)。

いろいろな実験形態により多様化させることで, 実験をより充実させることができるのではないだろうか。

おわりに

私たちをとりまく環境は現在、多くの問題を抱えている。地球温暖化、オゾン層の破壊、酸性雨など放置し続けると環境をますます悪化させていくと言われている。私たちは豊かな生活を目指し、豊かさが持続していくことを切望している。そのためにも環境を悪化させる原因を探り、対処していくための方法を模索し、できることから実行していかなければならない。理科教育において取り組むべきことは、環境を科学的に理解するために、科学的なリテラシーを育て、環境という概念を明確に捉えていくことである。その手段として、実験は必要不可欠である。科学の基本的な見方や考え方を単なる知識から実生活や社会という現実世界に関わる認識へと導くために、どのような実験活動を行えばよいのか。グリーンケミストリーの 12 箇条¹⁾において、廃棄物は「出してから処理ではなく」、出さないこと、原料を無駄にしないこと、と明記されているように、積極的な姿勢で環境への配慮を行なうこと。また、科学的なリテラシーを育てるために、これまで述べてきたような、内容の充実を図り、実験のスタイルを多様化させることで、多種多様な実験活動を実現することが必要である。これらの条件を満たす実験としてマイクロスケール実験を導入し、従来の実験だけでなく、より多様化した実験活動を目指していきたい。そして、何よりも生徒が楽しいと感じ、積極的に実験に参加しようとする意識や意欲を育てることが重要であろう。

本稿で示した考察により、マイクロスケール実験が、環境教育と理科教育の接点として、より広く活用されることの重要性について理解が深まれば幸いである。

参考文献

- 1) 御園生 誠, 2007, 化学環境学, 裳華房 179, 193
- 2) P・T・アナスタス, J・C・ワーナー (日本化学会・科学技術戦略推進機構訳編, 渡辺正・北島昌夫訳), 1999, グリーンケミストリー丸善 pp124
- 3) 芝原寛泰, 坂東 舞, 川本公三, 2007, 授業実践等によるマイクロスケール実験の有用性の検討—理科教育におけるマイクロスケール実験の普及をめざして—, 京都教育大学教育実践研究紀要, 第 7 号, 31-40
- 4) マイクロスケール化学実験, 2003 日本化学会 (編) pp45
- 5) 文部科学省, 2008, 中学校学習指導要領解説・理科編, 110
- 6) 御園生 誠, 村橋俊一 (編), 2001, グリーンケミストリー—持続的社會のための化学—講談社サイエンティフィック, 3, 12
- 7) 芝原, 坂東, 川本, 2007, 前掲, 31
- 8) 多様な指導の重要性については, 三井善止 (編著) 2002, 新説・教育の原理, 玉川大学出版部 166-172
- 9) 中学校理科におけるマイクロスケール実験の導入については, 以下の文献も参照。芝原寛泰, 2006, 中学理科におけるマイクロスケール実験の活用, 中学理科通信, 2006 年秋号, 8-16; 坂東 舞, 芝原寛泰, 2007, 中学校理科における中和反応のマイクロスケール実験—中和熱の測定, 電気伝導度の変化—, 理科の教育, 659 号, 62-65

10) 国際数学・理科教育調査 (TIMSS) に関する, 朝日新聞 2008 年 12 月 10 日朝刊の記事参照

11) 柘植秀樹, 荻野和子, 竹内茂彌 (編), 2002, 環境と化学—グリーンケミストリー入門, 東京化学同人 3-4

本研究は科研費 (基盤研究 C 課題番号 20500753, 代表者 芝原寛泰) により実施された。