

中学理科における マイクロスケール実験の活用

京都教育大学教授
芝原 寛泰

1 はじめに

マイクロスケール実験は、環境問題に配慮した化学として注目されているグリーンケミストリー^{1,2)}の概念を学校現場における理科実験に反映させることができる。マイクロスケール実験の特徴として、

- ①従来の実験器具よりスケールを小さくする
 - ②試薬と経費の節減（省資源、省エネルギー）
 - ③実験廃棄物の少量化
 - ④試薬が少量で危険が少なく、事故防止に役立つ
 - ⑤実験時間の短縮
 - ⑥1～2人の個人実験が可能で、達成感が得られる
 - ⑦理科実験室でなく、通常の教室でも実施が可能
 - ⑧小・中学校では、専門外の教員でも指導・実施が容易
- などがあげられる。

ここでは、中学校理科の教材として、「水の電気分解」「爆鳴気」「燃料電池の原理」「水溶液の性質」のマイクロスケール実験を、実践例を含めて紹介する。

2 水の電気分解

水の電気分解は、中学校理科第1分野にお

ける代表的な実験の一つであり、実験器具としては、一般に、H型電解装置やホフマン型電解装置が用いられる。しかし、この2つの電解装置には、電解質溶液である水酸化ナトリウム水溶液が多量に必要であり、また、液だめとコックを同時に操作するのが難しいこと、高価であることなど、幾つかの問題点があり、個別の生徒実験として導入するのは困難である。

個別の生徒実験として導入するためには、簡単に、かつ大量に自作できる実験装置であることが望ましい。そこで、少量の試薬を使い、短時間で電気分解を観察でき、また、気体発生量の体積比を定量的にとらえられるマイクロスケール化した水の電気分解実験装置を紹介する。気体発生量を定量的にとらえることは、水分子を構成する原子の比や、化学式で化学反応を考えるという観点からも重要である。

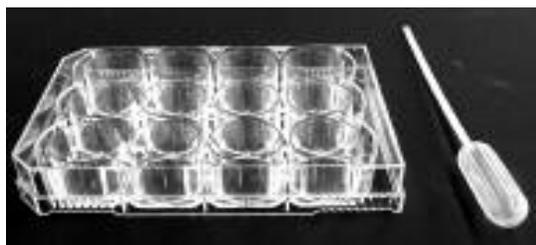


図1 3×4セルプレートとポリスポイト

【材料】

- ・ 3 × 4 セルプレート (IWAKI, 85mm × 120mm, ウェルの直径約20mm, 図1)
- ・ ポリスポイト (アズワン, 採血用, ポリエチレン製, 長さ150mm, 図1) 2本
- ・ 直径0.8mmステンレス線 (ステンレス製まち針でもよい) 2本
- ・ 電解質溶液 (1 mol/l -水酸化ナトリウム水溶液; 4%水溶液に相当)
- ・ 電源装置 (USBハブを利用, 図2)



図2 USBハブを利用した電源装置

従来は、電源として直流安定化電源装置や乾電池を用いたが、生徒実験では個別に電源装置が必要となってくるので、電源としてパソコン用USBハブ(出力電圧約5V, 最大出力電流2A, 図2)を利用している。USBハブは、常に安定した電圧が得られ、また、直流安定化電源装置に比べて非常に安価であり容易に入手できる³⁾。

【実験方法】

- ① 3 × 4セルプレートのウェルの一つに、1 mol/l -水酸化ナトリウム水溶液を約2ml入れる。
- ② 先端を約5mm残して切ったポリスポイトに1 mol/l -水酸化ナトリウム水溶液を満たしたら(気泡が入らないよう注意して入れる)、①のウェルに立てる(図3, 4)。

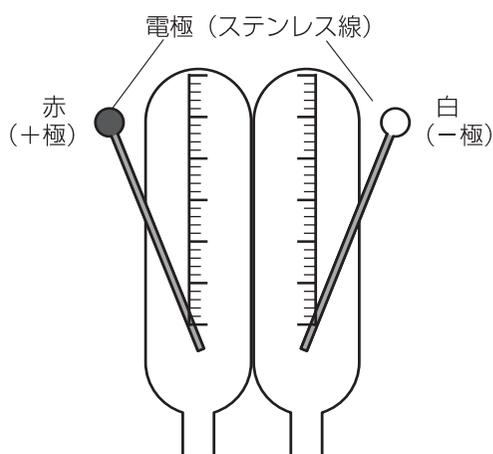


図3 水の電気分解実験用ポリスポイト

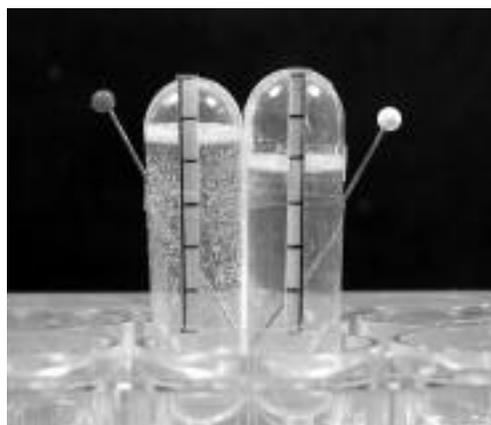


図4 電気分解後の様子(右:一極側, 左:十極側)

- ③ 電極を電源装置につなぎ、約5分間、直流電圧を印加する。

【実験結果と考察】

実験装置と実験後の様子を図4に示す。電極に直流電圧を印加した直後から、気体の発生が観察できる。また、約10分間の電気分解により、発生する気体の体積比、水素:酸素 = 2:1を確認できる。USBハブを利用した電源装置による電圧値は約5V, 電流値は約10~11mAを示す。なお、実験に必要な電解質溶液の量は約10mlである。これは、従来の水の電気分解実験に比べ、電解質溶液(水酸化ナトリウム水溶液)の量が非常に少量である。また、短時間で実験結果が得られるので、実験時間の短縮の効果は大きい。

マイクロスケール実験による電気分解でも、電極材料を工夫すれば通常の実験と同様に、電解質溶液に塩化ナトリウム水溶液、硫酸ナトリウム水溶液、塩化銅水溶液を用いることも可能である。また、塩素が発生する場合には食紅などの色素を、中性の溶液には指示薬を加え、電極で起こる反応と溶液の色の変化を観察することも可能である。

図4の実験装置の形は、実は、ファラデーの『ろうそく物語』に登場する実験装置⁴⁾と類似している(図5)。約200年前にファラデーが子どもたちのための演示実験に用いた実験装置をマイクロスケール化したといえる。

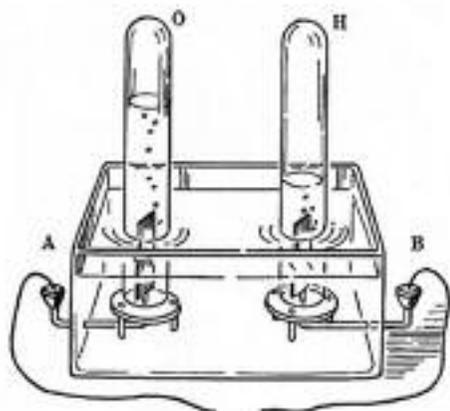


図5 ファラデー『ろうそく物語』に登場する水の電解装置⁴⁾

3 水の電気分解で発生した水素と酸素の混合気体(爆鳴気)の燃焼実験

ポリスポイトを利用した爆鳴気の実験方法は、中国杭州師範学院教授N.H.Zhou(周寧懷)による⁵⁾。マイクロスケール実験のデモンストレーションによく用いられる方法である。水の電気分解で発生した爆鳴気といわれる体積比2:1の水素と酸素の混合気体に点火すると、爆発的に反応する。

【材料】

- ・ 3×4セルプレート(前出)
- ・ ポリスポイト(前出) 1本
- ・ 直径0.8mmステンレス線(ステンレス製ま

ち針でもよい) 2本

- ・ 電解質溶液(0.1mol/l -水酸化ナトリウム水溶液)
- ・ 洗剤液(水にごく少量の台所用洗剤を混ぜる)
- ・ 電源装置(USBハブを利用)
- ・ 点火用ライター

【実験方法】

- ① 図6のように電極を差し込んだポリスポイトに、0.1mol/l -水酸化ナトリウム水溶液を約3ml入れる(ポリスポイトいっぱいに入れないで、8分目まで入れる)。
- ② ウェルセルプレートのBのウェルに洗剤液を入れる(図7)。
- ③ ①のポリスポイトをAのウェルにセットする。
- ④ ポリスポイトを曲げ、先端をBのセルにつける(図7)。

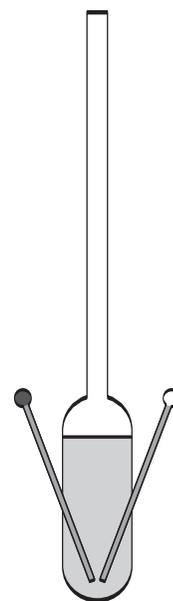


図6 電極を差し込んだポリスポイト

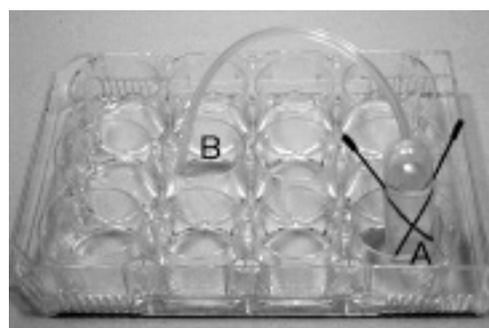


図7 爆鳴気の実験

- ⑤ 電極どうしが接触し、ショートしていないことを確認したあと、電極を電源装置につなぎ直流電圧を印加する。
- ⑥ Bのウェルにたまった、気体を閉じ込めた洗剤液の泡に点火する。

【実験結果と考察】

電極に直流電圧を印加した直後から、気体の発生が確認できる。また、ポリスポイト内に発生した気体は洗剤液入りのウェルに集まり、小さな石けん泡が多数できる。ウェルの表面を覆う程度に石けん泡が発生したところで、泡にライターの火を近づけ点火すると、乾いた大きな音（爆鳴気特有の爆発音）がする。発生直後の気体は大半がポリスポイト内の空気であり、しばらくしてから爆鳴気となることに注意する。

本実験は、マイクロスケール化しても爆発的な化学反応は従来どおり起こり、十分に大きな音がするので、実験のインパクトを失わない。また、マイクロスケール化により実験器具が簡略化され、実験の準備や操作も簡単になり、実験時間が大幅に短縮できる。さらに、大きな爆発による危険も避けられる。筆者も周寧懐教授による本実験のデモンストレーションに感動した一人である。

4 インジゴカーミン溶液による酸素の同定実験

水の電気分解により生じた酸素の気体の同定法について以下に述べる³⁾。

インジゴカーミン溶液は酸化還元指示薬の一種である。強力な還元剤によって還元された状態のものは、無色のロイコ酸となり、酸素によって酸化され青色に変色する。これを利用して、電気分解で発生した酸素の同定実験を行うことができる。

【材料】

- ・蒸留水 200mℓ
- ・インジゴカーミン 0.025g
- ・炭酸水素ナトリウム 0.05g
- ・0.25%-ハイドロサルファイトナトリウム水溶液
- ・3×4セルプレート（前出）
- ・ステンレス製まち針（電極用）2本
- ・電源装置（USBハブを利用）

【実験方法】

- ①以下の方法でインジゴカーミン溶液を調整する。
 - ・蒸留水200mℓにインジゴカーミン0.025gと炭酸水素ナトリウム0.05gを完全に溶かす（以下これをインジゴカーミン溶液とする）。
 - ・インジゴカーミン溶液に0.25%-ハイドロサルファイトナトリウム水溶液を加え還元する（インジゴカーミン溶液は青色を呈している。溶液の色が黄色になるまで少しずつ0.25%-ハイドロサルファイトナトリウム水溶液を加える）。
- ②3×4セルプレートの一つのウェルに、インジゴカーミン溶液を満たす。
- ③電極どうしが接触しないようインジゴカーミン溶液につける。
- ④電極を電源装置につなぎ、直流電圧約5Vを印加する。

【実験結果と考察】

電極に直流電圧を印加した直後から、気体の発生が確認できる。また、+極側で、酸素の発生に伴い電極の周囲のインジゴカーミン溶液が酸化され、徐々に青色へと変色する。

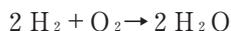
インジゴカーミン溶液にハイドロサルファイトナトリウム水溶液を加えるのは、可逆的に還元させるためである。ハイドロサルファイトナトリウムは、湿った状態や水溶液の場合は、いずれも酸素をよく吸収して亜硫酸水素塩と硫酸水素塩になる。この状態では、空気から遮断して保存しておいても分解するため、実験の直前に調製しなければならない。

実験中、インジゴカーミン溶液の色が変化しない場合は、インジゴカーミン溶液を少しずつ加える。また、実験機の表面が黒色の場合は、変色の状態（青色へ変化）がわかりにくいので、ウェルの下に白色の紙を敷いて実験するとよい。

5 燃料電池の原理を学ぶ実験

水の電気分解により得られた水素と酸素の

混合気体を直接に反応させると、**2**の実験のように爆発的な反応とともに、大きな熱エネルギーが放出されることがわかった。反応式で表すと、



となり、このとき、水18gにつき237kJの発熱がある。ところが、電子とイオンを仲立ちにして徐々に反応させ、熱エネルギーのかわりに電気エネルギーを取り出し、さらに生成物として水を得る方法がある。以下に示す実験方法は、燃料電池の原理を学ぶための教材実験であるが、現在、注目を浴びている、燃料電池の開発における初期のころに考案された方法に類似している^{6,7)}。

【材料】

- ・ 3 × 4セルプレート (前出)
- ・ ポリスポイト (前出) 2本
- ・ 鉛筆の芯を利用した炭素電極 (2 Bの鉛筆をガスバーナーで加熱し、炭化させて取り出す。ホルダー芯でもよい) 2本
- ・ 電解質溶液 (1mol/l - 水酸化ナトリウム水溶液)
- ・ 電源装置 (USBハブを利用)
- ・ 電子メロディー

【実験方法】

- ① **2**で使用した1 mol/l - 水酸化ナトリウム水溶液を再利用する。
- ② 3 × 4セルプレートのウエルの一つに、1 mol/l - 水酸化ナトリウム水溶液を約2 ml 入れる。
- ③ 図8のように加工したポリスポイトに、1 mol/l - 水酸化ナトリウム水溶液を満たす。
- ④ 電極を電源装置につなぎ、直流電圧を印加する(図9)。

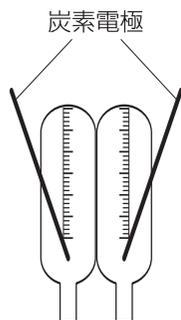


図8 燃料電池用ポリスポイトと電極

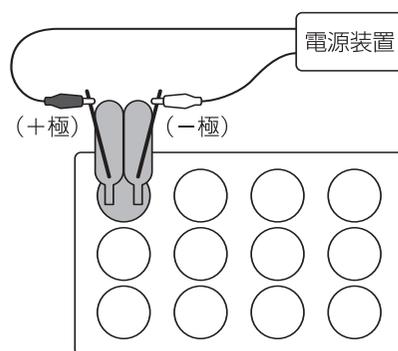


図9 実験装置の全体図

- ⑤ 数分間電気分解を行ったあと、電極から電源装置をはずして電子メロディーに接続する(図10)。

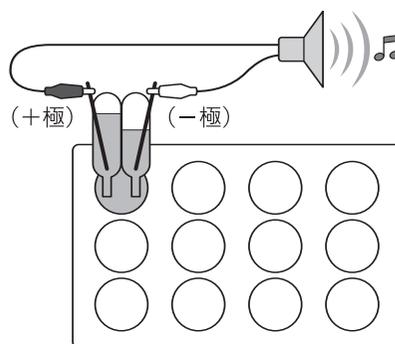
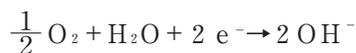


図10 電子メロディーに接続

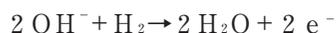
【実験結果と考察】

約3分間の充電(水の電気分解)で約1.7Vの起電力があり、電子メロディーであれば約5分間は動作する。反応は次のように考えられる^{6,7)}。

電解質溶液として水酸化ナトリウム水溶液を用いているので、図10の酸素側(電池としては+極)で、



の還元反応が起こり、さらにOH⁻は、電解質溶液を通り水素側(-極)に移動する。-極では、



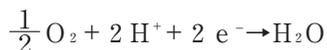
の反応が起こり、水を生成するだけでなく、酸化反応でできた電子は、つながれた導線を通して+極に送られる。この電子は、前述の酸素側の電極で還元反応に使われる。回路の中を電子が流れると、電気エネルギーとしてエネルギーを取り出せることになる。本実験で用いた炭素電極の表面に吸着した酸素、水素の気体（あるいは活性状態にある酸素、水素）が関与して、電気分解とは逆の酸化・還元反応が起こっていると考えられる。

なお、白金線による電極を用いて同じような実験を行ったが、処理をしていないので効率がよくないものの、同じ結果が得られている。教材実験としては、炭素電極が適当である。

もし、電解質溶液として希硫酸を用いると、まず水素側で、



の酸化反応が起こり、水素イオン H^+ は電解質溶液を通して酸素側に移動するが、電子は導線を通じて酸素側の電極にわたされる。酸素側の電極では、導線からの電子と水素イオン H^+ が酸素と反応して、



となり、水が生成し同時に電気エネルギーも取り出せる。水素ガスを燃料とする燃料電池の基本原理になる。

現在、実用化されている燃料電池は、水素ガスを燃料として空気中の酸素と反応させており、また、このほかに、電極材料と構造、電解質材料などにさまざまな工夫がされている。本実験は、水の電気分解の逆反応を応用したエネルギー変換の教材実験として用いることができる。

6 水溶液の性質

中学校理科で学習する「酸性・アルカリ性の水溶液の性質」では、幾つかの酸やアルカ

リの水溶液を用いた実験・観察を行い、それらに共通する性質を見いだすこと、また、酸とアルカリを混ぜるとそれぞれの性質が打ち消されることや、塩が生成することを取り扱う。

ここで紹介するマイクロスケール実験では、 4×6 セルプレートに6種類の水溶液を入れ、それぞれに3種類の指示薬を加えて反応をみる実験、さらに6種類の水溶液にマグネシウムリボンの小片を入れ、気体の発生の有無を観察する実験を取り上げる。また、生徒の興味や関心を高める工夫として、身のまわりにある身近な水溶液を用いて、その性質を調べる実験も可能である。セルプレートを用いると24種類の反応を一度に比較でき、色の変化も相対的に観察できる利点がある⁸⁾。

以下に、指示薬を使って、酸性・アルカリ性の水溶液の性質を調べる実験を紹介する。

【材料】

- ・ 4×6 セルプレート
- ・ 点眼びんに入った水溶液（6種類）
- ・ 指示薬（BTB溶液、フェノールフタレイン溶液、ムラサキキャベツ抽出液）
- ・ マグネシウムリボン
- ・ ピンセット
- ・ リトマス紙（赤・青）

【実験方法】（次頁図11参照）

- ① A 1, B 1, C 1に、希塩酸を約20滴ずつ加える。
- ② A 2, B 2, C 2に、希硫酸を約20滴ずつ加える。
- ③ A 3, B 3, C 3に、塩化ナトリウム水溶液を約20滴ずつ加える。
- ④ A 4, B 4, C 4に、水酸化ナトリウム水溶液を約20滴ずつ加える。
- ⑤ A 5, B 5, C 5に、水酸化バリウム水溶液を約20滴ずつ加える。
- ⑥ A 6, B 6, C 6に、アンモニア水を約20滴ずつ加える。
- ⑦ A行にBTB溶液を1滴加え、変化を見る。

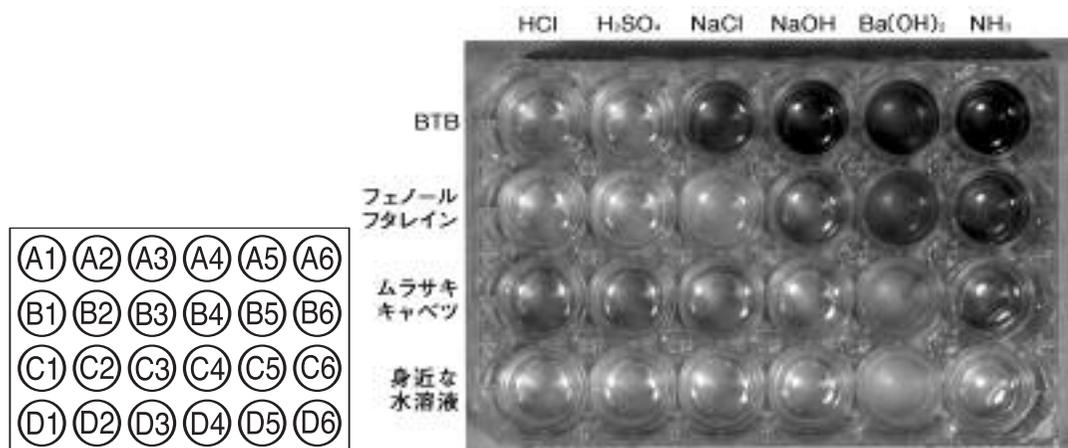


図11 セルプレート上の各溶液の配置と実験結果

- ⑧ B行にフェノールフタレイン溶液を1滴加え、変化を見る。
- ⑨ C行にムラサキキャベツ抽出液を数滴加え、変化を見る（色の変化がわかるまで加える）。
- ⑩ A行にマグネシウムリボンを一片入れ、変化を調べる（ピンセットを使って入れる）。
- ⑪ リトマス紙を使って、それぞれの溶液を調べる（リトマス紙は、ウェルのふたに並べておく）。

【実験結果】

実験結果を図11に示す。各水溶液の指示薬の変化を1つのセルプレート上で確認、また比較することができ、学習効果は高い。マグネシウムリボンとの反応は、酸性溶液（希塩酸、希硫酸）であれば、金属表面で気体の発生を確認することができる。

D1～6には身近な水溶液を入れ、BTB溶液などの指示薬との反応を観察し、水溶液の性質を調べることも可能である。指示薬を選択すれば小学校の理科実験にも応用できる。

7 授業実践の例

2 および 3 で述べたマイクロスケール実験「水の電気分解」「爆鳴気の実験」をテ

マにして、京都教育大学附属京都中学校において授業実践を行った³⁾。実験は2人1組で行った。また、マイクロスケール実験では、実験操作および観察時に、実験器具に顔を近づけることがある。マイクロスケール実験で使用する試薬は少量であるが、それらが飛散して目に入るという危険も十分予想されるので、実験中は必ず、安全眼鏡を装着するよう指導した。実験に必要な器具および試薬は、すべて透明なケースに入れ実験キット（図12）とした。実験キットはグループ数用意した。これにより、実験の準備やあと片づけが簡単になり、実験時間の短縮につながった。



図12 実験キット

以下に授業実践報告を示す。

【授業の概要】

- ①日時 平成17年6月22日(水)
第5校時, 第6校時(13:15~15:00)
- ②場所 京都教育大学附属京都中学校
- ③対象授業および生徒 第2・第3学年混合
選択理科講座(理科サイエンス)
- ④授業内容 水の電気分解と爆鳴気の反応

【対象生徒について】

選択理科講座の受講生徒35名のうち, 約 $\frac{2}{3}$ が2年生である。水の電気分解は第1分野「化学変化と原子, 分子」の単元で扱われる内容であり, この単元が未履修である2年生にとっては, 今回が初めての学習となる。そこで, 水の電気分解だけでなく, 化学変化における物質の変化や量的な関係についても未履修である2年生のため, 物質は原子や分子からできていることや, 元素記号で表すという基礎的な内容から授業を展開した。3年生にとっては, 既に学習した単元であり復習的な内容となるが, 少人数グループ(2人1組)での実験は今回が初めてである。

授業展開の詳しい内容については引用文献3)に報告している。

【授業のまとめ】

水の電気分解で発生する気体の体積比を確かめる実験では, 17グループすべてにおいて, 約10分間の電気分解で, 水素:酸素=2:1の実験結果が得られた。-極側の気体の発生量が+極側に比べて多いこと, 発生の様子も+極側に比べ-極側のほうが激しいことを実験プリントに書き込む生徒も多く見られた。

混合気体の反応実験では, 電極どうしが接触することによりショートが起こっているグループがあったが, 電極の接触を解消するとすぐに気体が発生した。また, 一度目の点火では爆発音がしなかったことから, 「泡の中に空気が多い場合はプチプチという音しかしない」と考察している生徒もいた。気体を閉じ込めた泡に点火するときは, まずは指導者

が演示を行い, 点火する際の泡の量についての指導を徹底した。生徒に点火作業をさせる際は, この実験は短時間で繰り返し行うことができるため, たとえ実験に失敗したとしても, その原因を生徒自身が探り, 再度実験することができた。図13に授業の様子を示す。



図13 混合気体に点火する生徒

授業後に行ったアンケートによると, マイクロスケール化した実験装置, 実験器具について83%の生徒が使いやすいと回答した。また, 実験結果のわかりやすさについても89%の生徒がわかりやすいと回答した。マイクロスケール化した実験装置は, 従来の実験装置に比べ小型であることから使いにくさが指摘されると予想したが, マイクロスケール実験に慣れていない生徒にとっても使いやすいものであり, 実験中の観察にも支障はないことがわかった。

安全眼鏡の装着については, 「違和感がある」「普段の理科の実験でもかけていない」という理由から, かけたくないという回答した生徒が34%見られた。これらは, 実験時に安全眼鏡を装着する習慣がないためと推測できる。安全眼鏡の装着は, マイクロスケール実験に限らず, あらゆる実験において徹底したものである。

実験に対しては, 66%の生徒が集中できたと回答した。今回の授業については, 91%の生徒が理解できたと回答した。これは, 水の

電気分解について既に学習している3年生の100%と、今回が初めての学習となった2年生の86%との総計である。

マイクロスケール実験の取り組みについてアンケート調査したところ、91%の生徒がよいと評価した。また、「一人一人が丁寧にできるからよいと思う」(3年生)、「片づけやすい。少人数で実験ができ楽しかった」(3年生)、「たくさん的人数ですと見ているだけの人ができるが、2人1組だと集中できるし、この実験内容も非常に面白かったし、興味をもてた」(2年生)という感想があった。

8 まとめ

マイクロスケール実験を用いると実験グループの人数を少なくすることができ、生徒の授業への参加意識を高めることにより、積極的な取り組みが期待できる。また、マイクロスケール実験は、単にグリーンケミストリーの観点からだけではなく、生徒実験における本来の目標を達成するという観点からも大変有用であるといえる。

『中学校学習指導要領(平成10年12月)解説-理科編-』の112ページには、「ミクロスケールの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の機会を適宜設ける」と記され、本稿で紹介したマイクロスケール実験と同じ趣旨をもつ実験を推奨している。教育現場での普及が望まれる。

なお、中和反応および塩化銅水溶液の電気分解を扱ったマイクロスケール実験については、下記の筆者のホームページに掲載の予定である。

<http://natsci.kyokyo-u.ac.jp/~shiba/microscale/msHirobaOPEN.html>

引用文献

1) 荻野和子：スモールスケール化学実験のすすめ-学園におけるグリーンケミストリー-，化学と教育，46，516-517，1998

2) Paul T. Anastas, John C. Warner, 科学技術戦略推進機構訳編，渡辺正，北島昌夫訳：グリーンケミストリー，日本化学会，1999

3) 坂東舞，川本公二，土田弘幸，芝原寛泰：マイクロスケール実験による水の電気分解実験の定量化，京都教育大学教育実践研究紀要，第6号，25-34，2005

4) ファラデー，白井俊明訳：ろうそく物語，法政大学出版局，1976

5) N.H.Zhou：Microscale Inorganic Chemistry，Science Press，2000

6) 小久見善八編著：電気化学，オーム社，2003

7) 高橋武彦：燃料電池，化学One Point，共立出版，2002

8) 坂東舞，芝原寛泰：マイクロスケール実験による中和反応の定量的測定，日本理科教育学会全国大会発表論文集，153，2006

参考

マイクロスケール実験に関する事例は，荻野和子編：マイクロスケール化学実験-化学と教育：マイクロスケール実験の広場から-，日本化学会，2003に詳しい。また，マイクロスケール実験研究グループのホームページ

<http://science.icu.ac.jp/MCE/>

にさまざまな情報が掲載されている。

本研究は科研費(特定領域研究課題番号17011005，代表者 荻野和子，萌芽研究課題番号18650232，代表者 芝原寛泰)により実施された。なお，紹介した教材開発は，京都教育大学大学院生坂東舞の協力を得て行ったことを付記します。

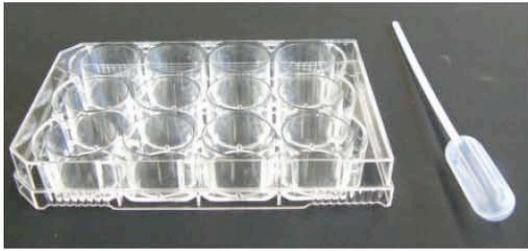


図 1 3×4 セルプレートとポリスポイド



図 2 USB ハブを利用した電源装置

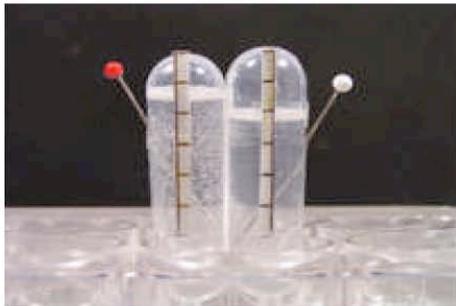


図 4 右：陰極側，左：陽極側

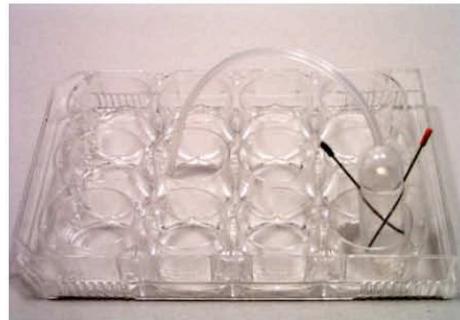


図 7 爆鳴気の実験



図 11 セルプレート上の各溶液の実験結果



図 12 実験キット



図 13 混合気体に点火する生徒