マイクロスケール実験によるイオンの移動

坂東　舞[1)]，芝原寛泰[2)]

1）大山崎町立大山崎中学校　clockwork@y9.dion.ne.jp

2）京都教育大学理学科　shiba@kyokyo-u.ac.jp

キーワード：マイクロスケール実験，イオンの移動，中学校理科

（受付：2007 年 12 月 16 日）

Ⅰ．はじめに

平成 14 年（2002 年）度施行の中学校理科学習指導要領（現行の学習指導要領）において，旧学習指導要領から削除，もしくは高等学校理科へ移行統合された内容は以下の通りである（表 1）。

表 1　旧学習指導要領から削除もしくは高等学校理科へ移行統合された内容

第 1 分野（物理・化学分野）	**溶質による水溶液の違い，比熱，電力量，イオン，中和反応の量的関係，力の合成と分解，仕事，情報手段の発展**
第 2 分野（生物・地学分野）	**月の表面の様子，天気図の作成，大地の変化（一部），日本の天気の変化の特徴，遺伝の規則性，生物の進化**

この中でも，イオン，仕事および力の合成と分解は，1947 年以降の学習指導要領改訂の中でも一貫して扱われていた内容である。特にイオンは化学領域で重要とされてきた概念であり，物質の粒子性を理解するためには不可欠である。

以前は，「化学変化について観察，実験を通して，電気分解や中和反応について理解させるとともに，これらの事象をイオンのモデルと関連付けてみる見方や考え方を養う」（中学校学習指導要領理科，1990）という旧学習指導要領に基づき，第 2 学年で学習する単元「化学変化とイオン」において，電離，水溶液中のイオンの振る舞い，酸・アルカリの水溶液の定義（アレニウスの定義に基づく），中和反応の量的関係および電気分解における電極とイオンの間での電子のやりとりなどを学習していた。平成 5（1993）年度から，中学校理科では 1 価のイオンのみの扱いとなり，塩化銅水溶液の電気分解の説明が困難になった。

一方，現行の学習指導要領ではイオンの概念が高等学校理科「理科総合Ａ」，「化学Ⅰ」へ移行統合されたことにより，「化学変化と原子・分子」の単元がそ

れに代わった。よって，電離，水溶液中のイオンの振る舞いは削除され，電気分解については，熱分解と同様に“分解”の一例として示されているに過ぎない。水，塩化銅水溶液の電気分解実験では，陽極・陰極での生成物のみに主眼を置いた実験となっており，塩化銅水溶液の電気分解については，化学反応式も扱われていない。また，酸・アルカリ，中和反応についても，アレニウスの定義を用いることができないため，指示薬の色の変化のみで酸性・アルカリ性の水溶液を識別することになった。また，中和の量的関係は扱わず，酸とアルカリを混ぜると，それらの性質が打ち消し合って中和し，塩と水ができるといった非常に限定された内容に留まっている。学習指導要領からイオンが削除されたため，中学校理科においてこのような制限が生じることになった。

現在でも，イオンの移動実験を扱う教科書（細谷ほか，2005）はあるが，発展的内容として位置づけられており，イオンを学習することがなくなった現在では，授業でほとんど取り上げられていないのが現状である。旧学習指導要領から削除され，現在発展的な内容として位置づけられている中でも「フレミングの法則」「日本の天気の特徴」「遺伝の仕組みや遺伝の規則性」は高い割合で授業に取り入れられており（Benesse，2005），これらの学習内容を，多くの理科教員が重要視していることが伺える。「電解質溶液とイオン」については，通常授業で18.9%，選択理科で 13.2%と，選択理科授業においても高い割合で取り扱われている。なお，選択理科授業で取り扱われるその他の発展的内容の割合は 2%～4%であり，「電解質溶液とイオン」が最も高い割合となっている（Benesse, 2005）。これもやはり，イオンが重要視されていることを示すと考えられる。

中学校理科におけるイオンの削除は，高等学校理科にも制限をもたらしている。「生物Ⅰ」ではイオンを用いることなく，種々の生化学的反応を説明せざるを得なくなり，一例を挙げると「腎臓の働きと構造，ヒトの血漿と尿の成分」の記述では，ナトリウムイオン Na^+をナトリウム Na，カリウムイオン K^+をカリウム K としている（太田ほか，2002）。これは，金属ナトリウム Na や金属カリウム K と同じことになり，化学的には明らかな間違いである。また生徒に誤った認識を与えることになりかねない。

Ⅱ．イオンの移動実験

イオンは物質を構成している基本粒子の一つである。イオンの移動実験は，物質について学習し始める中学校段階において，物質の粒子性を理解する大きな手助けになると考える。

電解質溶液に電圧を印加すると，電離により生じた陽イオン，陰イオンが移動する。有色のイオン（例えば，塩化銅，硫酸銅，硝酸銅など銅イオン Cu^{2+}を含むものは青色，硫酸ニッケルのニッケルイオン Ni^{2+}は緑色）はその色によって

イオンの移動が観察できる。無色のイオン（水素イオン H^+，水酸化物イオン OH^-）は指示薬との化学反応でイオンの移動が視覚的に観察できる（恩藤ほか，1998）。後者の実験の多くは，酸が電離して生じた水素イオン H^+，アルカリが電離して生じた水酸化物イオン OH^-を観察する方法がとられている（図 1）。図 1 は，青色リトマス液をしみ込ませた濾紙の中央に，塩酸をしみ込ませた糸を置き，直流電圧を印加している。電圧を印加すると，糸にしみ込んでいる塩酸の水素イオン H^+が陰極に移動するため，陰極側の青色リトマス液が赤変する。同様に，赤色リトマス液をしみ込ませた濾紙の中央に，水酸化ナトリウム溶液をしみ込ませた糸を置いて電圧を印加すると，陽極側の赤色リトマス液が青変する。これは，水酸化物イオン OH^-が陽極に移動するためである．これらの実験により，水素イオン H^+は正の電気を，水酸化物イオン OH^-は負の電気を帯びていることがわかる。

中学校理科で扱う水の電気分解実験など，直流電源装置を用いた実験では，急激な気体の発生や感電を避け，安全に生徒実験を行うためにも，電源装置の電圧は最大でも 12V までと指導している（竹内，2005）。しかし，イオンの移動実験は，指示薬やイオンの移動に影響を与えない電解質溶液（例えば，硫酸ナトリウム水溶液）をしみ込ませた濾紙に電圧を印加するため非常に電流が流れにくく，電極間の距離によっても差はあるが 15～20V の高い電圧が必要となる。

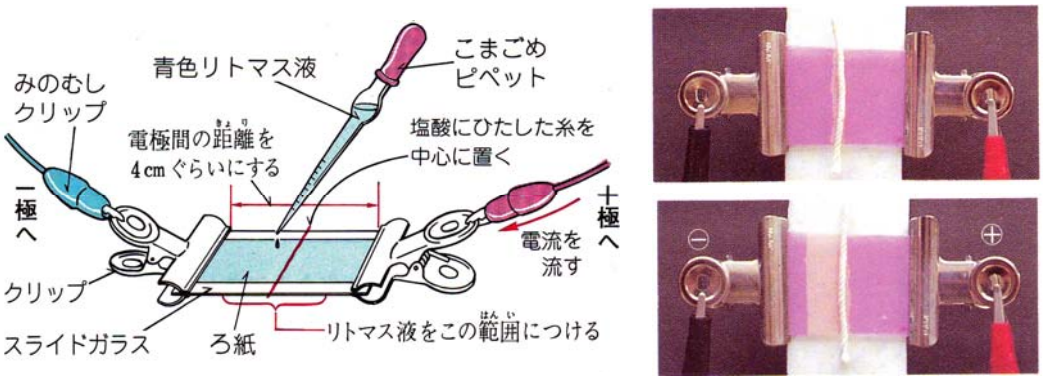


図 1　イオンの移動実験の一例（恩藤ほか，1998 より転載）

Ⅲ．教材実験の内容

Ⅱで述べたように，現行の教科書，実験書等で扱われているイオンの移動実験は，高い電圧を必要とする。そこで，マイクロスケール実験を利用し，USB ハブを利用した 5V 直流電圧（坂東・芝原，2007）でイオンの移動が観察できる簡易な方法を考案した。また塩化銅水溶液の電気分解実験（坂東ほか，2007）と

の関連性を考慮して，塩化銅（Ⅱ）二水和物水溶液を用い，銅イオン Cu^{2+} の移動が観察可能な実験とした。実験方法，結果および考察を以下に記す。

1. 準備

6 セルプレート（IWAKI），炭素棒電極（ホルダー芯もしくは鉛筆の芯でも可）2 本，USB 電源装置（5V 直流電圧），ヨウ化カリウムデンプン紙

2. 試薬

硫酸ナトリウム水溶液（0.5mol dm^{-3}），ゲル状塩化銅水溶液（0.5mol dm^{-3}）

【参考：ゲル状塩化銅水溶液の調製方法】

（1）蒸留水 10 cm^3 を沸騰させ，寒天 0.03 g が完全に溶けるまで攪拌と加熱を続け，0.3%寒天溶液を作る。

（2）寒天が完全に溶けた後，さらに塩化銅（Ⅱ）二水和物を 0.85 g 溶かし，0.5mol dm^{-3} 塩化銅（Ⅱ）二水和物水溶液を作る。

3. 実験方法

（1）セルの中心にゲル状塩化銅水溶液を円形になるように滴下し，固まるまでしばらくおく（図 2）。

（2）ゲル状塩化銅水溶液の周囲に硫酸ナトリウム水溶液を 2 cm^3 加える。

（3）セルの両端に炭素棒電極を挿入し，ミノムシクリップで固定する。

（4）5V 直流電圧を印加する。

（5）ヨウ化カリウムデンプン紙をセルに近づけ，変化を観察する。

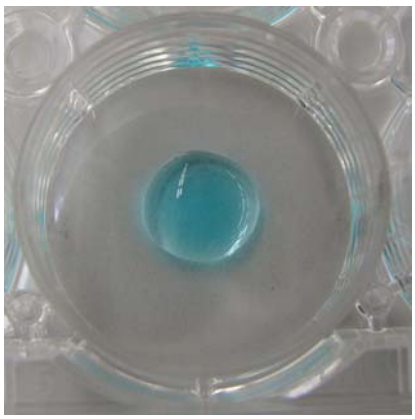


図 2　ゲル状塩化銅水溶液

4. 結果および考察

電圧を印加した後のイオンの移動を図 3 に示す。3 分後（図 3，左上）には，ゲル状塩化銅水溶液の周囲から陰極へ銅イオン Cu^{+2} の移動が見られた。

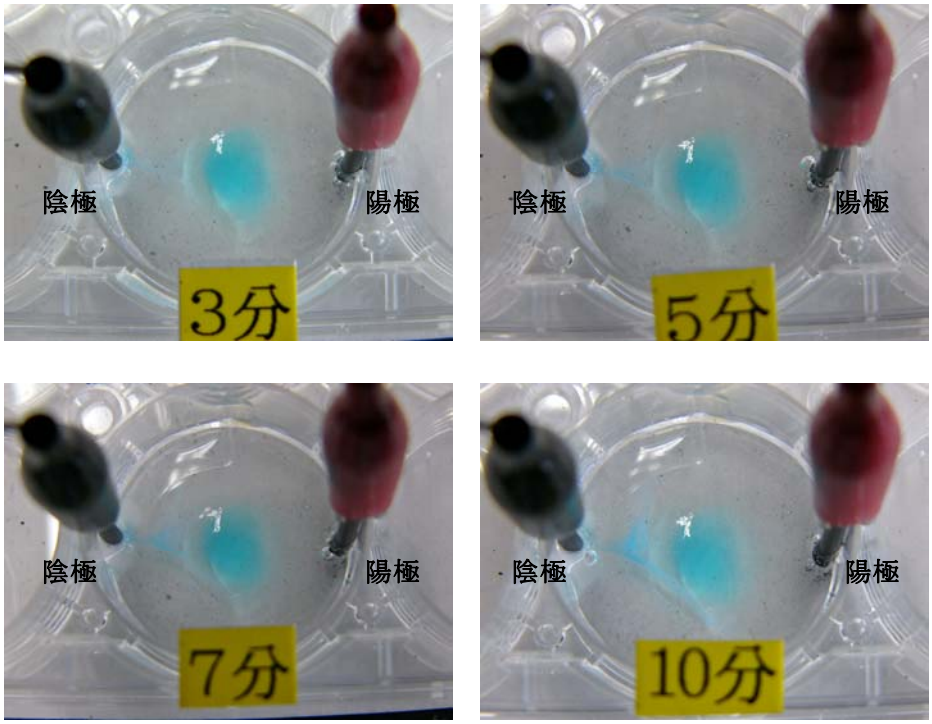


図 3　銅イオン Cu^{2+} の移動

硫酸ナトリウムは水溶液中では，次のように電離している。

$$Na_2SO_4 \rightleftharpoons 2Na^+ + SO_4^{2-}$$

よって，水溶液中にはナトリウムイオン Na^+，硫酸イオン SO_4^{2-}，および水分子 H_2O が存在する。電離によって生じた硫酸イオン SO_4^{2-} とナトリウムイオン Na^+ はイオン化傾向が大きく安定であるため，水溶液中では酸化・還元されない。水溶液に炭素棒電極を挿入し，電圧を印加すると，陰極では水分子が電子を受け取って還元され，水素 H_2 が生成する（pH 条件が pH＜2，pH＞12 にも該当しない場合は，反応物は水分子になる）。陽極では水分子が酸化され，酸素を生成する。硫酸ナトリウム水溶液の反応物は陽極，陰極ともに水分子であり，電離した水酸化物イオン OH^-，水素イオン H^+ ではない。しかし，1997 年度までの高等学校化学の教科書は，「陰極では水の電離によって生じた H^+ が還元され H_2 が

生じる，一方陽極では水の電離によって生じた OH^- が還元され O_2 が生成する」（長岡ほか，1996）と記述されていた。

硫酸ナトリウムは中性塩であるため，陰極では水酸化物イオン OH^- が増加し，陽極では水素イオン H^+ が増加する。

陰極　$2H_2O$ ＋ $2e^-$ → H_2 ＋ $2OH^-$

（水酸化物イオン OH^- が増加）

陽極　$2H_2O$ → O_2 ＋ $4H^+$ ＋ $4e^-$

（水素イオン H^+ が増加）

一方，硫酸ナトリウム水溶液に接したゲル状塩化銅水溶液の一部は次のように電離している。

$CuCl_2$ → Cu^{2+} ＋ $2Cl^-$

電圧を印加すると，陰極では銅イオン Cu^{2+} が，陽極では塩化物イオン Cl^- が次のような変化をする。

陽極　$2Cl^-$ → $Cl_2\uparrow$ ＋ $2e^-$
陰極　Cu^{2+} ＋ $2e^-$ → Cu

硫酸ナトリウム水溶液の電気分解により，水分子が還元され，水酸化物イオン OH^- が増加した陰極で，銅イオン Cu^{2+} は水酸化銅（Ⅱ）$Cu(OH)_2$ の沈殿を形成する。この水酸化銅（Ⅱ）$Cu(OH)_2$ の沈殿が図 3 の陰極に向かって見られる軌跡であり，銅イオン Cu^{2+} の移動を示している。

Cu^{2+} ＋ $2OH^-$ → $Cu(OH)_2\downarrow$

中性の水溶液ではなく，塩基性の水溶液を電解質に用いると，銅イオン Cu^{2+} は以下のように変化する。

水酸化ナトリウム水溶液の場合　**Cu^{2+} ＋ $2OH^-$ → $Cu(OH)_2\downarrow$**
アンモニア水の場合（少量）　**Cu^{2+} ＋ $2OH^-$ → $Cu(OH)_2\downarrow$**
（過剰）　**Cu^{2+} ＋ NH_3＋ → $〔Cu(NH_3)_4〕^{2+}$**
（深青色水溶液　テトラアンミン銅（Ⅱ）イオン）

酸性の水溶液を電解質に用いると，塩酸の場合は沈殿を生じないが，濃塩酸の場合は，テトラクロロ銅（Ⅱ）酸イオン〔$CuCl_4$〕$^{2-}$の黄緑色水溶液となる。

$$Cu^{2+} + 2Cl_2^- \rightarrow [CuCl_4]^{2-} \quad （黄緑色溶液）$$

硫酸を電解質溶液に用いた場合は，陰極では水素イオンが還元されて水素が生成し，陽極では水分子が酸化されて酸素が生成する。

$$陰極 \quad 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$$
$$陽極 \quad 2H_2O \rightarrow 4H^+ + O_2 + 4e^-$$

陰極では硫酸 H_2SO_4 が電離した水素イオン H^+が還元され，また溶液は常に酸性に傾いており，銅イオン Cu^{2+}と水酸化物イオン OH^-が反応して水酸化銅（Ⅱ）$Cu(OH)_2$ の沈殿を形成することがない。以上の点を考慮すると，電解質溶液には硫酸ナトリウム水溶液が最も適している。

ヨウ化カリウムデンプン紙をセルに近づけると，塩化物イオン Cl^-の移動する陽極側から次第に青色を呈した。これは，陰イオンである塩化物イオン Cl^-が陽極へ移動し，電子を授受して塩素が生成したことを示す。時間経過に伴い，青色を帯びていた銅イオン Cu^{2+}が茶褐色に変色するのは，電極から電子を授受し，金属銅が生成するため，あるいは脱水して酸化銅（Ⅱ）に変化したと考えられ，今後さらに検討が必要である。

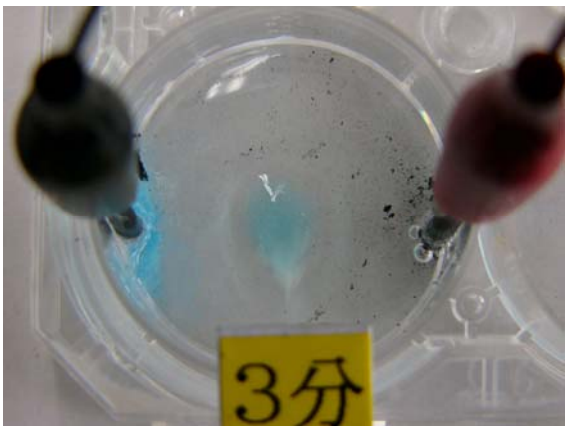


図 4　硫酸ナトリウム水溶液の濃度が高い場合の銅イオン Cu^{2+}の移動

硫酸ナトリウム水溶液の濃度が高いと（1mol dm^{-3}や飽和溶液の場合），銅イオン Cu^{2+}の移動の軌跡が現れず，陰極付近にのみ銅イオン Cu^{2+}の移動が見られた（図 4）。また，電圧を印加した直後から水素が盛んに生成し，それに伴い陰

極付近では水酸化物イオン OH^- が急激に増加する。最も水酸化物イオン OH^- の増加が顕著なのが陰極付近であり，陰極付近で水酸化銅（Ⅱ）$Cu(OH)_2$ の沈殿が形成しやすいため，陰極付近にのみ銅イオン Cu^{2+} の移動と水酸化銅 $Cu(OH)_2$ の沈殿の生成が見られたと考えられる。

Ⅳ．まとめ

平成 19（2007）年 11 月，授業時間数の増加を内含する学習指導要領改訂に向けた審議のまとめが提出された（文部科学省，2007)。学術技術や科学技術の世界的な競争が激化する中で，国際的な通用性や内容の系統性などを踏まえた指導内容の見直しが迫られた結果である。この審議のまとめには，理科の授業時間数の増加，実験・観察の時間の充実に加え，現在高等学校理科へ移行統合されている「イオン」,「遺伝」,「進化」を中学校理科に移行することが明記されている。学習指導内容改訂に伴い，教科書の充実等，条件整備が今後進められるであろう。これらを踏まえて，より簡便な方法で実施でき，生徒一人ひとりが個別に実験可能な個別実験教材としても効果があるマイクロスケール実験による方法を提案した。

今後はマイクロスケール実験を用いたイオンの移動の実践的研究を行い，イオンの概念の定着と生徒の科学的な思考力・表現力の育成を図りたい。

文献

坂東　舞ほか　2007．塩化銅水溶液の電気分解実験 - マイクロスケール実験の応用 - ．フォーラム理科教育，8，21-28.

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，日本理科教育学会 62-65.

Benesse　2005．中学校の学習指導に関する実態調査報告書 2005，p19.

細谷治夫ほか 28 名　2005．理科 1 分野（下）．教育出版株式会社，92-93．東京．

文部科学省　1990．中学校学習指導要領理科．
http://www.nicer.go.jp/guideline/old/h01j/chap2-4.htm

文部科学省　2007．学習指導要領改訂に向けた審議のまとめ．
http://www.mext.go.jp/a_menu/shotou/new-cs/index.htm

長岡三郎・渡邊啓・竹内敬人ほか 9 名　1996．化学 IB．東京書籍，127-128．東京．

恩藤知典ほか　1998．改訂版 SUPER 理科辞典．受験研究社，460．東京．

太田次郎ほか　2000．高等学校生物Ⅰ．啓林館，178-179．大阪．

竹内敬人　2005．指導書未来へ広がるサイエンス 1 分野（下）．啓林館，p4.