

「教育臨床総合研究13 2014研究」

## 中学校理科におけるイオン概念形成を目的とした 電気泳動実験の導入とその教材開発

Application of electrophoretic experiments and development of teaching materials for the purpose of the “ion concept formation” unit in junior high school science classes

勝部 翔太郎\*

Shotaro KATSUBE

西山 桂\*\*\*

Katsura NISHIYAMA

園山 裕之\*\*

Hiroyuki SONOYAMA

### 要 旨

平成20年度学習指導要領解説理科編においては、「電極に物質が生成することからイオンの存在を知ること」と定められている。そこで、肉眼で直接観察することが不可能なイオンの存在を生徒に理解させるためには、水溶液中で実際にイオンが「動いていく様子」と関連づけて指導することが有益であると考えた。よって本研究では、電気泳動教材を学習に組み込むことで、イオンの存在をより明確に理解できるか授業実践を行うとともに、それに必要な電気泳動教材の最適化も行った。その結果、電気泳動教材を使用することによってイオンの移動現象が明確に演示できた。一方生徒にとっては、電場印加に伴うイオンの移動理由を正確に考察する端緒となった。

The Curriculum Standards of Science for junior high schools, Revision 2008 by MEXT, Japan, defines that “to exhibit the existence of ions due to substances formed on the surface of electrodes as a result of electrolysis”. In order to have the students understood the existence of ions, which are invisible, we propose that observation of ion movements in aqueous solutions may play a key role as instruction processes. In our present study, we have therefore incorporated electrophoretic experiments in the teaching material, and carried out practical classes in a junior high school. As a result, we have clearly presented ion mobility in the class. For the students, on the other hand, we have provided an opportunity to discuss the reason of ion mobility under the electric field.

〔キーワード〕 化学変化とイオン, 電気泳動, カラギナンゲル, イオン移動度, 塩化銅(Ⅱ)水溶液  
chemical changes and ion, electrophoresis, carrageenan gel, ion mobility, aqueous solution of copper(Ⅱ)chloride

\*島根大学大学院教育学研究科教育内容開発専攻自然系教育コース大学院生

\*\*島根大学教育学部附属中学校教諭

\*\*\*島根大学教育学部自然環境教育講座准教授

## I はじめに

### 1. 単元の背景と課題

平成20年の学習指導要領改訂に伴って、中等理科教育においても学習内容が大幅に変更された。その一環として、単元に関して校種間の移行も少なくない。中学校理科においては、その典型例として単元『化学変化とイオン』が挙げられる。平成10年度の学習指導要領改訂では、この単元は中学校理科からいったん削除され、高等学校へと移行した。しかし、現行の学習指導要領においては中学校で取り扱う内容として復活した。しかも現行の内容は、平成元年度改訂の中学校指導書理科編と比較しても深化した内容となっており、イオンの成り立ちについてその原子構造の根幹と関連づけて指導することとされている<sup>1-3)</sup>。

平成20年学習指導要領解説理科編によると、イオンの存在を学習するにあたり「電気分解の実験を行い、電極に物質が生成することからイオンの存在を知る」ような指導法が求められている。しかし、肉眼で観察することが不可能なイオンの存在を生徒に理解させるためには、教材や指導法に格段の工夫が必要であり、多くの研究が行われてきた。例えば、イオンを表現するモデルを改良した「穴あきコブ付きモデル」<sup>4)</sup>や、外部電場によるローレンツ力を利用してイオンの性質を確かめる教材<sup>5)</sup>も報告されている。これらの研究成果は、生徒にイオンの存在自体を理解させる教材としては適していると考えられる。しかし、指導要領において求められている「電気分解の実験結果を解釈する教材」としては、さらに研究の余地があるものと思われる。電気分解実験においては水溶液中の「イオンの動き」を理解することで、実験結果のよりの確かな分析・解釈につながるからである。

そこで、我が国で現在使用されている中学校理科の教科書の全5社を比較した<sup>6-10)</sup>。その結果、2社で電気泳動の実験を取り入れ、イオンが存在することを見いだすきっかけを与えていることが分かった。電気泳動実験とは、「荷電粒子が溶液中で電位勾配により移動する現象」のことである<sup>11)</sup>。すなわち溶液中に電極を挿入し、外部電荷を加えて電位勾配を発生させると、溶液に含まれるイオンが対応する電極に向かって移動する様子を観察することができる。以上のことから、電気泳動実験を生徒に演示することにより、イオンの動きを理解させ、電気分解の仕組み、さらにはイオンの存在を明確に伝えることができるのではないかと考えた。

### 2. 電気泳動教材の背景と課題

#### (1) 教科書実験の確認

まず、現行教科書のなかで、塩化銅(II)水溶液の電気泳動実験が採録されているものを選び、教科書に掲載されている手法に従って実験を行った<sup>9)</sup>。すなわち、ろ紙を電解質(硫酸ナトリウム;  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )水溶液に浸し、ガラス板の上に載せ、両側を鉄製のクリップで留めた。ろ紙上、中央部に塩化銅( $\text{CuCl}_2$ )水溶液(100 [g/kg])を1滴、ピペットで滴下した。電源装置を用いて、電極間に15 Vの電場を印加した。約20分観察したところ、図1のよう

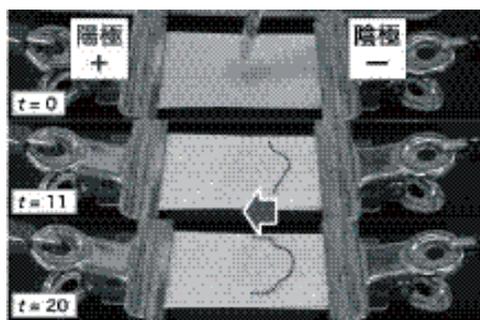


図1 教科書記載の電気泳動実験  
( $t$ は時間 [min] を示す)  
※点線は著者追加

に銅(Ⅱ)イオンの電気泳動が視認できた。図1は白黒で表示されているが、実際には銅(Ⅱ)イオンが青緑色の軌跡(図中では点線で表示)を描き、時間とともに変化する様子が観察された。その一方、以下のような課題も認められた。

- ① 電気泳動において反応の空間的な原点(塩化銅(Ⅱ)水溶液のろ紙への滴下点)が判別しづらいため、反応の進行が分かりにくい。
- ② 銅(Ⅱ)イオンの軌跡が、結果として陰極から、ろ紙の中央(塩化銅水溶液の滴下点)に進むように誤認されやすい(図1, 矢印)。これは電気泳動と、電圧の印加過程におけるろ紙の乾燥が競争して進行するため、ろ紙中の銅(Ⅱ)イオンの濃度勾配に偏りが生じたためと推定される。また、印加電圧をさらに増加させると、回路短絡が懸念されるとともに実験者の安全確保も問題である。
- ③ 銅(Ⅱ)イオンの軌跡の視認性に乏しい。現実には、銅(Ⅱ)イオンが白色ろ紙中に紛れた色調であるため、生徒は銅(Ⅱ)イオンの軌跡が浮かび上がる様子を極めて注意深く観察する必要がある。

電気泳動によってイオンが「移動する」ことを生徒に認識させるためには、例えば、銅(Ⅱ)イオンが反応の空間的な原点から陰極に向かって徐々に展開し、「進む」イメージをもたせることが必要であると考えた。

## (2) 電気泳動実験の実際

電気泳動実験は、平成20年学習指導要領解説理科編に与えられている「イオン」において、酸とアルカリの性質を調べる実験の一例として紹介されている。そのため教科書による例示に留まらず、種々の教材開発例が報告されている<sup>12, 13)</sup>。またこの実験は、前述の単元に用いられるだけではなく、「ア 水溶液とイオン」におけるイオンの存在を明確にする教材としても活用できると考えられる<sup>14)</sup>。電気泳動実験を活用した教材研究の大まかな方向性としては、溶液を保持する媒体の改良が主である。まず、溶液を保持しているろ紙を改良した研究として、電解質水溶液をしみ込ませた風糸を、ろ紙の中央部に設置して空間原点とする手法が紹介されている<sup>15)</sup>。この手法を用いると、イオンの移動を明確に示すことができると考えられる。一方、現行の指導要領解説理科編においてイオンの存在を知るにあたり、取り扱うこととされている「電解質の電気分解実験」において使用する装置や器具が大きく異なり、授業実践において、水溶液中の現象であるという連続性を保つことが困難であると考えられる。従って、電気分解から電気泳動への実験を無理なく移行できる教材の開発の余地があると考えた。

一方、ろ紙の代わりに寒天を使用した電気泳動実験も報告されている<sup>16)</sup>。つまり、板状に成形した食用寒天の両端に炭素電極を挿入し、中央をくり抜いた形状とする。その中央部分に塩化銅(Ⅱ)水溶液を注入して電圧を加えることで、銅(Ⅱ)イオンの移動を立体的に、すなわち上方及び側面の両方から観察可能とした。ろ紙を用いた実験と比較すると、装置の形状が電気分解の実験と類似しているため、生徒にとっては、電気泳動と電気分解の実験とを比較対照しやすいという利点がある。なおこの研究<sup>16)</sup>では教材の全長を約3 cmとマイクロスケール化することによって、電場印加開始後の5分程度でイオンの移動が目視で確認できるようになる。授業

実践においては便利な一方で、教材が小ぶりであるため、陽極側において進行する塩素発生反応が不明瞭になると予想される。また、イオンを担持する媒体として、白色の食用寒天を使用しているため、ろ紙を用いた実験の場合と同様、銅(Ⅱ)イオンの展開が判別しづらくなる場合もある。

## Ⅱ 研究目的と研究方法

### 1. 研究目的

本研究の目的は次の2点である。

- ① イオンの移動を生徒に明示できるような電気泳動実験の教材開発を行う。
- ② 電気泳動実験を教材として導入することで、イオンの存在をより明確に示すことが可能かどうか、授業実践を通して確かめる。

### 2. 研究方法と視点

#### (1) 電気泳動実験のための教材開発

前章で課題として挙げた点を改善するため、以下の視点をもって教材の開発を行う。

- (a) 空間原点(反応開始の原点)が明確で、徐々に進行していくことが分かるものであること
- (b) 電気分解の実験をイメージしやすいような系および媒体であること
- (c) 陽極側からの塩素発生を確認できること
- (d) 銅(Ⅱ)イオンの進展が明確であること

#### (2) 授業進行の立案とその実践

電気泳動実験を導入した授業計画を立てるとともに、その教材を使用して授業実践を行う。

#### (3) 授業実践の評価とアンケートの分析

アンケートを作成して、電気泳動実験を演示する前後に実施する。電気泳動実験を導入することにより、生徒の電気分解の実験に対する考えがどのように変容したのか、このアンケートにより明らかにする。また、この集計結果から電気泳動実験を導入することの効果进行分析し、教材の評価を行う。

## Ⅲ 研究成果・考察

### 1. 教材研究

#### (1) 電気泳動教材の構想

電気泳動教材に関して既に述べた課題を改善するために、前章2-(1)に掲げた4つの視点に基づいて、その具体的な手法を検討した(表1)。

表1 教材開発の視点とそれに対する改善の方法

教材開発の視点	改善の方法
(a)空間原点（反応開始の原点）が明確で、徐々に進行していくことが分かるものであること	寒天のようなソフトマテリアルを使用した電気泳動装置 ⇒中央部から電極に向かう方向に進むことが予想される
(b)電気分解の実験をイメージしやすいような系および媒体であること	⇒電気分解の実験と同じ3次元で、電極付近の状態を観察可能となる
(c)陽極側からの塩素発生を確認できること	フルスケール化（目視及び、嗅覚による確認が容易なスケールの実験器具を使用） ⇒電気泳動装置の中央部の塩化銅(Ⅱ)水溶液を境に、媒体の陽極側でのみ塩素の発生が確認可能であると予想
(d)銅(Ⅱ)イオンの展開が明確であること	寒天とは別の媒体を使用 ⇒透明度を高くすることで、明確になると予想

(2) ソフトマテリアルの選択<sup>17, 18)</sup>

水を分散媒としたゲル（ハイドロゲル）の分散質の主成分は、多糖類とタンパク質に分けることができる。タンパク質からなる典型的なゲルとして、ゼラチンゲルが知られているが、温度や溶媒によって容易にゾル-ゲル転移し、力学的に弱いことが知られている<sup>17)</sup>。

一方、多糖類を主成分とするゲルでは寒天が有名であるものの、白濁しており、透明度という観点から課題が残っていた。そこで、寒天と同じ原料である海藻（紅藻類）から得られるゲルで透明度が高いことで知られる、カラギナンゲルに着目した。日本や中国では古くから寒天を抽出してトコロテンを作っていたのに対し、ヨーロッパではカラギナンを使用してミルクプリンを作っていたことが知られている。現在ではカラギナンとローカストビーンガム（マメ科植物の胚乳由来の多糖類）を加えてゲル化させ、トイレの芳香剤の多くに用いられている。寒天とカラギナンゲルの違いを表2に示す。

表2 カラギナンゲルと寒天の違い

種類	原料となる海藻	糖の種類
カラギナンゲル	ツノマタ、スギノリ キリンサイ	カラギナン
寒天	テングサ オゴノリ	アガロース アガロペクチン

寒天に含まれる成分のうち、ゲル化させる能力が高いのはアガロースである。多糖類の水酸基が水素結合するため、安定な二重らせん構造を形成する。一方カラギナンには、硫酸基を糖の一次構造に含んでおり、一重らせん構造を有していることが示唆されている<sup>17)</sup>。これら基本構造が織りなす高次構造の違いにより、結果としてカラギナンゲルは透明度を高い状態を保っていると考えられる。

そこで、カラギナンを主原料としているPEARL AGAR-8（富士商事）を使用した。これは食品のゲル化剤であり、透明度が高いため製菓などに活用されている。

### (3) イオン移動度

電気泳動実験のフルスケール化に伴って、電気泳動に要する時間を予備実験によって確認しておく必要がある。すなわち、媒質中のイオンの移動距離は時間に関して正の相関を持つため、マイクロスケール教材に使用した化合物がフルスケール実験にそのまま適用できるとは限らない。まず、ゲル中に分散させる電解質として、教科書<sup>9)</sup>に紹介されている硫酸ナトリウム(Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)を使用した。硫酸ナトリウムは、ろ紙を用いる電気泳動実験に一般的に使用される電解質である。その結果、銅(II)イオンの展開を目視で確認できるようになるまで、約40分を要した。つまり、一回の授業時間中に演示実験を完結させるには課題が残る。そのため、イオン移動度を検討することとした。

電場存在下におけるイオンの動き $U$ は、イオン移動度と呼ばれ、次のように定義される。

$$U = \frac{Ze}{6\pi\eta a} \dots \text{式(1)}$$

ここで、 $Z$ ：イオンの価数、 $e$ ：電気素量、 $\eta$ ：溶媒（媒体）の粘性率、 $a$ ：イオン半径、である。

式(1)より、 $U$ は $a$ に反比例している。すなわち、イオン半径はイオン移動度に反比例することが分かる。

つまり、電極近傍に存在するイオン（ゲルに分散させた電解質のイオン）に、イオン半径が銅(II)イオンよりも大きな陽イオンを用いることで、装置中央（反応の空間原点）に存在する銅(II)イオンの実質的な移動度が相対的に大きくなると予想した（図2）。

そこで本研究では、電解質の陽イオンをナトリウムイオンからカリウムイオンに変更した。文献によると、Cu<sup>2+</sup>、Na<sup>+</sup>、及びK<sup>+</sup>の $a$ （六配位結晶中の値）はそれぞれ87 pm、

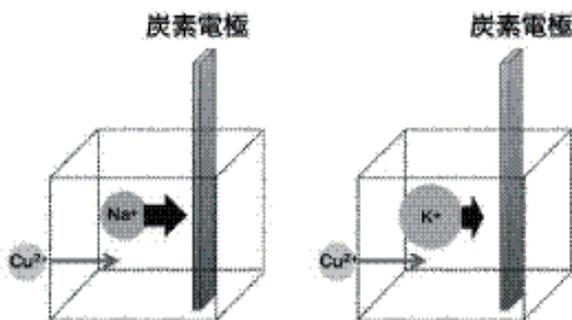


図2 ナトリウムイオンとカリウムイオンの移動度の違いを表した模式図

116 pm、及び152 pmであり、K<sup>+</sup>はNa<sup>+</sup>よりも $a$ が約1.3倍程度大きい<sup>19)</sup>。水溶液中での実質的なイオン半径は結晶中とは異なっているものと予想されるが、K<sup>+</sup>を用いた場合、式(1)によると少なくとも定性的には $U$ が小さくなると見積もられる。これらを踏まえて、電解質として硫酸カリウム(K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)を使用した。その

結果、約20分で銅(Ⅱ)イオンの移動が確認可能となり、硫酸ナトリウムを用いる従来手法と比べて所要時間が約20分短縮された。

#### (4) 開発した電気泳動教材

今回新たに開発した教材を図3に示す。以下、教材の作成手順を述べる。はじめにPEARL AGAR-8を50 [g/kg] 蒸留水に分散させたのち、沸騰するまで加熱した。次に、電解質となる硫酸カリウムを3.3 [g/kg] 溶解させた。その後、プラスチック製の容器 (15 cm × 7 cm × 4 cm) に移し、炭素電極を容器の端から3 cmの位置に入れ、室温まで冷却した。ゲル状態になったことを確認したのち、電極間の中央部を長さ1.5 cm切除し、得られた空間に100 [g/kg] 塩化銅(Ⅱ)水溶液を加えた。

今回開発した電気泳動装置は、炭素電極を電源装置につなぎ、15 Vの電場を印加し20分程度観察することで移動を確認できる(図4)。教科書には、ろ紙の電気泳動実験において使用する電圧は約15 Vと記載されている<sup>9)</sup>。なお、電圧をさらに高くするとイオンの移動に要する時間を短縮できる一方、回路が短絡されやすいことや、実験者の安全確保に問題がある。従って、本研究で用いた電圧も、授業実践には差し支えないと判断される。

本教材は、教材開発の視点として掲げた4点を全て満たすものと考えている。特に(c)に関して、反応の進行に伴って陽極周辺から塩素臭が容易に確認され、塩素が発生していることを実感することができた。生徒にとって、これらの現象を観察すれば、電気分解と電気泳動とを容易に関連づけてとらえることにつながると考えられる。

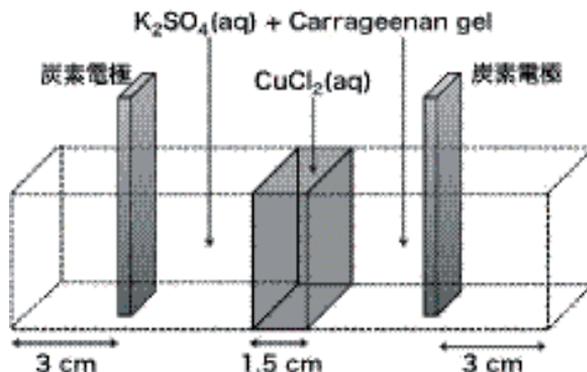


図3 開発した電気泳動装置の概略図

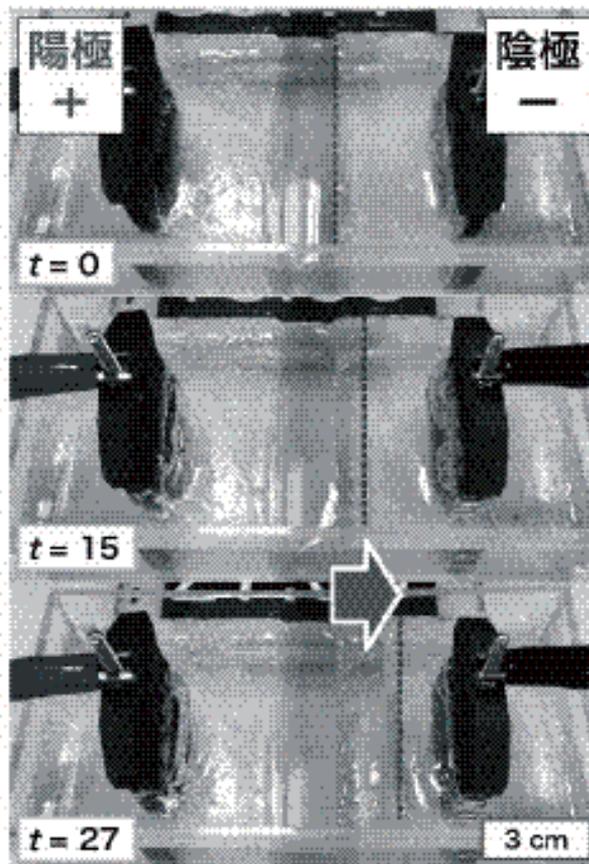


図4 開発した電気泳動教材 (tは時間[min]を示す) ※点線は著者追加

## 2. 授業実践

今回は、S大学教育学部附属中学校第3学年の4クラス（計132名）を対象に実践を行った。期間は2013年9月上旬であった。授業2時間の単元（学習指導要領に沿った表記）は、「(6) 化学変化とイオン」のうち、「ア 水溶液とイオン」、「(イ)原子の成り立ちとイオン」である。表3に授業の概要を示す。

表3 実践した授業の目標と内容

第1時	<p>(目標) 塩化銅(Ⅱ)水溶液の電気分解の実験を行い、陽極と陰極に発生した物質を調べることができる。【観察・実験の技能】</p> <p>(内容) 塩化銅(Ⅱ)水溶液を電気分解する実験を行い、各電極によってどのような物質が生成したのか調べさせた。その後、陰極から銅、陽極から塩素が発生したという実験結果から、電気分解の化学反応式を記述させた。さらに原子モデルを使用しながら、電気分解の様子を表現させた。</p>
第2時	<p>(目標) 塩化銅(Ⅱ)水溶液の電気泳動から、プラスの電気を帯びた粒子とマイナスの電気を帯びた粒子が存在していることに気づき、それぞれが引き寄せられていることを図や言葉で表現することができる。【科学的な思考・表現】</p> <p>(内容) 前時の塩化銅(Ⅱ)水溶液の電気分解の実験を復習し、電場を印加したときの水溶液の様子に注目させた。そこで 《ゲルを用いた塩化銅(Ⅱ)水溶液の電気泳動》 《ろ紙を用いた塩化銅(Ⅱ)水溶液の電気泳動》の様子を観察させた。 次に、ワークシートを用いて実験をまとめ、なぜ「銅や塩素のもと」が移動したのか個人で考察させた。最後に、グループで話し合う機会を設けた。なお「銅や塩素のもと」という表現は、教科書に従ったものであり、イオンを学習していない生徒にイオンの存在を指し示すことを目的として用いられている<sup>10)</sup>。</p>

まず、第1時で電気分解の生徒実験を実施し、塩化銅(Ⅱ)水溶液は電気分解することができることを実験結果から分析・解釈させる。その後、水溶液に視点を当て、第2時では今回開発した教材を使用して、電気泳動実験を観察させる。そして、なぜ「銅や塩素のもと」が移動したのかを考察させ、水溶液中に存在するイオンの理解へと結びつける流れを考案した。

また、教材の有用性を検討するため、2つのグループに分けて授業を行ったので次章で報告する。

### 3. 教材の評価方法と結果

#### (1) 評価方法

本研究では、生徒が「水溶液中におけるイオンの存在を認識しているかどうか」を明らかにする必要があると考えた。これを目的として、図5のようなアンケートを実施した。本設問では、電気分解の実験において水溶液中のイオンの動きを、図を用いて説明させる内容となっている。

また授業の進行とともに、生徒がどの学習段階においてイオンを認識できたかどうかを調査した。具体的には、図5と同様のアンケートを授業の進行に合わせて合計3回実施し、回答の変遷を確かめた。一方で、授業で使用したワークシートも調査の一環として解析した。その理由は、電気泳動に関してなぜ「銅や塩素のもと」が移動したのかを考えさせる内容となっているとともに、生徒自身による考察過程を明確に把握可能であると考えたためである。

アンケートを実施したタイミングとその目的を以下に示す。

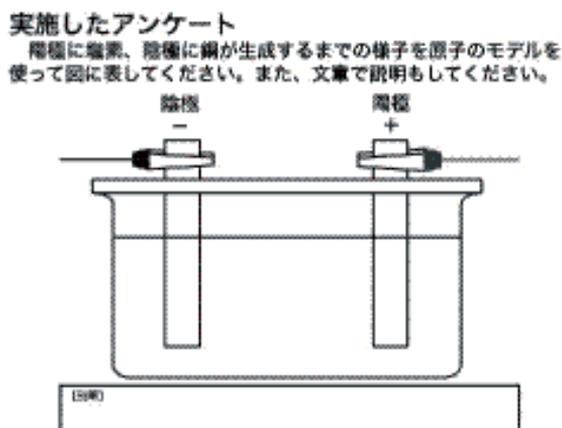


図5 実施したアンケート

#### ① 電気泳動実験前

電気分解の実験を行った直後にアンケートを行う。すなわち、塩化銅(II)水溶液は「分ける」ことができることを知った直後である。この時点ではイオンの動きに関しては触れていないため、多くの生徒が電極の様子を、原子モデルで表現すると予想した。

#### ② 電気泳動実験直後

次に、電気泳動実験を観察した直後にアンケートを行う。これは、電気泳動実験によって、どれだけの生徒に移動を理解させることができたのか、を明らかにすることができると予想した。

#### ③ 個人で移動理由を考察した後

続いて、なぜイオンが移動したのかを考察したワークシートを調査対象とする。移動理由を考察することで、どれだけの生徒がイオンの存在を知ることが可能か、明らかにできると予想した。よって、ワークシートもアンケートと同じ基準で解析することとした。

#### ④ グループで移動理由を考察した後

最後に、イオンの移動理由をグループで考察した後、アンケートを行う。これは、イオンの移動理由をグループのメンバー(3～4人)と意見を交換する中で、どれだけの生徒がイオンの存在を知ることが可能か、明らかにできると予想した。

以上の4つの調査を実施することにより、電気泳動実験を観察することによる生徒の考察内容の変容や、移動理由を検討することによる生徒のイオンの存在の認識を明らかにすることが可能であると考えた。これらの結果を総合して、電気泳動実験を導入することの評価を行うこととした。

また本研究は、開発した教材の評価を行うことも目的としている。そのため、今回開発したカラギナンゲル装置と従来型のろ紙装置に分けて、電気泳動実験の授業実践を行うこととした。授業実践を行った全4クラスのうち2クラスずつ（ゲル法：2クラス[68名]，ろ紙法：2クラス[64名]）に分けた。これによって、教材による差が見られるのか検証するとともに、開発した教材の有用性を考察できると考えた。また、変化させた要素は用いた教材のみで、授業の展開やワークシートの構成，教師の問いかけ方など変化させないよう十分注意した。

## （2）調査の集計結果

それぞれの調査を集計したところ，以下のA～Eに分類することができた。

- A：電気を帯びた粒子の存在を表現した上で粒子の動きを表現することができる
- B：粒子の動きを表現できる
- C：電極の様子を，原子モデルを用いて表すことができる
- D：塩化銅(Ⅱ)が動くことを表現 [誤答]
- E：その他

ここで「電気を帯びた粒子」とはイオンを意味しており，指導要領の表現に基づくものである<sup>1)</sup>。それぞれの図を以下に示す（図6）。

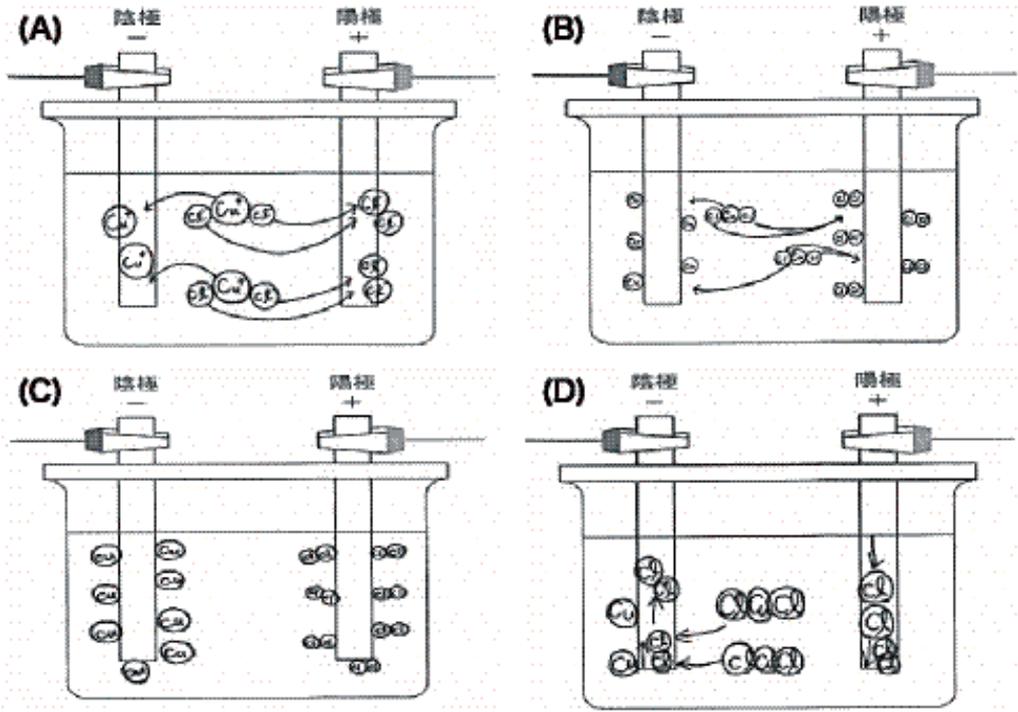


図6 アンケートで生徒が表現したモデル

(A)電気を帯びた粒子が動くことを表現 (B)粒子が動くことを表現

(C)電極の様子を原子モデルで表現 (D)塩化銅(II)が動くことを表現 [誤答]

続いて、これらの種類別に集計した結果を図7に示す。

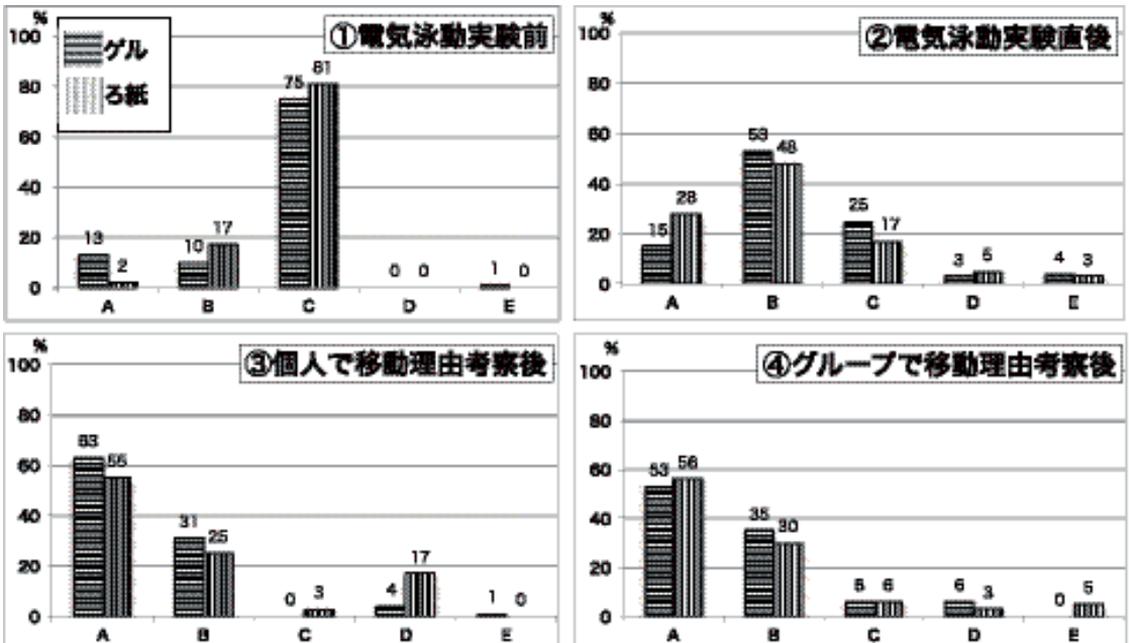


図7 種類別に集計した調査結果

(横縞：カラギナンゲル法, 縦縞：ろ紙法)

#### 4. 考察

##### (1) 電気泳動実験を導入することの評価

それぞれの調査の集計結果から、次のことが明らかになった。以下、ゲル法、ろ紙法、両電気泳動実験の結果を述べる。まず、①電気泳動の実験前では、電極の様子を原子モデルを用いて表す(C)が最も多く、70%を超えている。またこの時点では、粒子の動きに気付く生徒(A, B)は少ない。次に、②電気泳動実験を観察した直後、粒子の動きを表現できるようになることが分かった(B)。これらのことから、電気泳動実験の観察が、多くの生徒に粒子の動きをとらえさせることが可能であることが分かった。

その後、③、④個人やグループで移動理由を考えることによって、イオンの存在に気付ける生徒(A)の割合が半数を超えている。これらのことから、ゲル法、ろ紙法などの方法を問わず、電気泳動実験を取り入れることで電気分解までの粒子の動きを理解し、移動理由を考えることによって、多くの生徒がイオンの存在に気付くことが可能であることが分かった。

##### (2) 開発した教材の評価

次に、開発した教材の評価を行うため、ゲル法とろ紙法の比較を行う。それぞれの調査で大差ないように思われる。しかし、③個人で移動理由考察後の塩化銅(II)が動くことを表現(D)に該当する項目に、ろ紙法17%、ゲル法4%という差が見られた。すなわち、ろ



図8 カラギナンゲル法の特徴

紙法では塩化銅(II)が移動するという誤認識がやや多いことが言える。これは、個人で考察しているため、移動理由を考えるにあたり困難な点が存在していることが示唆される。この原因として考えられることは、ゲル法では、銅(II)イオンの移動と、塩素のにおい発生が同時に進行していくのに対し、ろ紙法では陽極側に嗅覚的に反応が起こらないためと考えられる(図8)。以上の仮説は、ゲル法で学習した生徒より「陽極から塩素のにおいがしたので、陽極には塩素のもとが引きつけられた」という記述が得られたことから支持される。これらのことから今回開発した教材は、従来のろ紙法に比べ誤認識をしにくい教材であることを結論づけた。

#### IV 結語

本研究は、電気泳動教材を学習内容に組み入れることで、生徒がイオンの存在を理解できるかどうか検討するとともに、授業実践に用いる電気泳動装置として最適なものを開発することを目指している。

その結果、電気泳動実験を学習に組み入れることによって、生徒が実験結果を自ら解釈しながら、イオンの存在が導かれるような授業展開が可能となった。電気泳動実験の直前に実施したアンケートにおいては、粒子の動きを指摘した生徒は20%前後に過ぎない。しかし今回、粒子の挙動を明示するために設計した電気泳動実験を観察させると、約70%の生徒が水溶液中で

の粒子の動きを正しく表現することが可能となった。

その一方、今回開発したゲルを用いた電気泳動教材に関しても、従来のろ紙を使用する装置と比較して、電離していない塩化銅(Ⅱ)そのものが電極間を動くというような、誤認識を生じさせる余地が少ない結果が得られた。特に陽極での反応が、塩素の発生という、電気分解実験と同じ現象であることが大きく影響していると考えられる。また電気泳動実験の進展には、従来の電解質を使用すると40分程度を要し、授業実践の現場では困難な面もあった。今回、イオン移動度を理論的に予測した結果から硫酸カリウムを用いたので、所要時間を20分と大幅に短縮し、授業に活用しやすくなった。展開時間のなお一層の短縮には、ハイドロゲルの原料や電極材料の最適化など、これからの研究が期待される。

原子は、電子を得て、あるいは失ってイオンになると、その物性がまったく異なる。これは、原子間相互作用を特徴付けるクーロン力がイオン化の前後で非常に異なっているためである。このようにイオンは、物質の成り立ちや性質のまさに根源を司るものに他ならない。中学校理科において、物質科学の奥深さを端的に示す格好の教材として、今後も新たな電気分解や電気泳動教材の開発が望まれる。

## 参考文献

- 1) 文部科学省：『中学校学習指導要領解説理科編』大日本図書，(2008)。
- 2) 文部省：『中学校学習指導要領解説理科編』大日本図書，(1998)。
- 3) 文部省：『中学校指導書理科編』学校図書，(1988)。
- 4) 宮城光則：「化学変化とイオンの関係性の理解を深めさせる教材の工夫 - イオンのモデルの教材化を通して -」沖縄県立総合教育センター研究集録，52，1-10，(2012)。
- 5) 野田新三：「イオンに関する科学的概念を観察，実験を通して身につけさせる指導」日本科学教育学会研究会研究報告，25，39-44，(2010)。
- 6) 大日本図書：『理科の世界3年』，(2011)。
- 7) 学校図書：『中学校科学3』，(2011)。
- 8) 啓林館：『未来へひろがるサイエンス3』，(2011)。
- 9) 教育出版：『自然の探究 中学校理科3』，(2011)。
- 10) 東京書籍：『新しい科学3年』，(2011)。
- 11) 日本化学会編：『標準化学用語辞典 第2版』丸善，(2000)。
- 12) 石井朋子：「新指導要領における中・高の接続を考えた化学Iの指導：「イオン」，「酸・塩基・塩」を中心に」お茶の水女子大学研究紀要，49，69-99，(2003)。
- 13) 村田一平：「寒天を用いた電気泳動の実験条件に関する検討」北海道立教育研究所附属理科教育センター研究紀要，24，40-45，(2012)。
- 14) 栢野彰秀，田中春彦：「新指導要領の新単元=教科書にない教材開発と授業化ヒント」，楽しい理科授業，506，46-47，(2008)。
- 15) 坂東舞・芝原寛泰：「マイクロスケール実験によるイオンの移動」フォーラム理科教育，9，1-8，(2007)。
- 16) 沼口和彦・中山迅・中林健一：「マイクロスケール化学実験による銅イオンの移動 - 寒天を用いる反応系の改良による有色イオンの観察 -」理科教育学研究，54，61-69，(2013)。
- 17) 長田義仁・梶原莞爾：『普及版 ゲルハンドブック』，エヌ・ティー・エス，(2003)。
- 18) 柴山充弘・梶原莞爾：『高分子ゲルの動向 - つくる・つかう・みる -』，シーエムシー，(2009)。
- 19) 日本化学会編：『化学便覧 改訂5版』丸善，(2004)。