

# イオンの移動速度 第二報

北海道札幌南高等学校 科学部

2年 水上翔太 大窪健児 藤川圭吾 岡田夏実

1年 瀧本秀格 永本郁宏 山田真輝 酒井慎弥 出口貴史



2010年度 札幌南高等学校 科学部

## 1 はじめに

我々は昨年の研究で、電解質水溶液を染み込ませた紙上でイオンの移動速度に影響を与える要素について実験を行い考察した。今年、昨年の反省を元に、以下の改善を行った上で、イオンの移動速度に関する実験を行った。

- ・ろ紙の乾燥による影響を抑えるために、寒天を支持体として用いた。
- ・実験精度の向上を図るために、定規による測定を画像解析による測定に改めた。
- ・実験結果の信頼性を向上させるために複数の金属イオンの移動速度も測定した。

また、昨年の実験より、電圧がイオンの移動速度に影響を与えることがわかった。そこで、イオンの移動機構について理解を深めるため、等電位線をグラフ化する実験を行った。

## 2 イオンの移動速度の実験

### 2.1 実験の手順

まず、 $\text{Na}_2\text{SO}_4$  aq(0.1M)で溶解した寒天を図 1a の容器に入れて凝固させる。なお、薬品を滴下する凹みを作るため、容器の蓋の中央にはあらかじめアクリル製の円盤を接着してある。その後、蓋を取り、図 1b のように銅製の電極を挿し込む。次に、凹みに薬品を 0.5ml 滴下し、それぞれ 15V の電圧をかけて動画を撮影する。以上の実験を  $\text{CoCl}_2$  aq、 $\text{NiCl}_2$  aq、 $\text{CuSO}_4$  aq、 $\text{HCl}$  aq、 $\text{NaOH}$  aq (以上各 1M) の 5 種類で行った。また、 $\text{H}^+$  と  $\text{OH}^-$  の実験では、電極を挿す前に、万能指示薬を寒天に一樣に染み込ませてから観察した。

### 2.2 実験の原理

寒天内のイオンは電場から受ける力によって、陰イオンは陽極へ、陽イオンは陰極へと引きつけられる。なお、イオンは凹みの内壁を通じて、寒天の内部に染みこんで移動する。

水溶液中で色をもつ  $\text{Co}^{2+}$ (赤)、 $\text{Ni}^{2+}$ (緑)、 $\text{Cu}^{2+}$ (青)は、それ自体の色を基準に移動速度を測定した。 $\text{H}^+$  と  $\text{OH}^-$  は無色であるため万能指示薬を使用し、その色を基準に測定した。

測定精度を向上させるため、画像を分析するプログラムを Excel の VBA を用いて自作し利用した。自作プログラムによって、画像の特定の範囲における光三原色(赤・緑・青)の強さをグラフとして表すことができる。イオンの存在範囲ではイオンの色の補色の値が小さいことを利用し、画像におけるイオンの先端とグラフにおける色の変化を比較し、両者が一致する点をイオンの先端と定義して測定した<sup>\*</sup>。

<sup>\*</sup> 以後の「イオンの移動速度」とはこのイオンの先端の移動速度のことである。

例として、 $\text{Co}^{2+}$  の解析結果を図 2 に示す。 $\text{Co}^{2+}$  は赤色を呈すので、補色である緑色と青色の値が小さくなっている。

この測定方法では、画像の 1 画素が最小単位である。また、目で判断しにくいイオンの先端を可視化することができる。この 2 点から、昨年の定規による測定よりも精度が高いと考えられる。

### 2.3 実験結果

どの金属イオンも測定を続けたところ最終的に移動が停止し、それと同時に、移動の先端部分が  $\text{Ni}^{2+}$  は白、 $\text{Co}^{2+}$  は青、 $\text{Cu}^{2+}$  は水色に変色していた(以後、このようにイオンの移動の先端部分が変色することを「転色」と呼ぶ。なお、「転色」は造語である)。また、 $\text{H}^+$  と  $\text{OH}^-$  でも移動が停止することを確認したが、こちらは転色していなかった。停止時間を確認し、正確な移動速度を測定するため撮影した動画を基に、5 分おきの移動距離と停止直前までの平均移動速度を測定し、実験結果とした。

停止直前までの平均移動速度は  $\text{OH}^-$  が 1.43mm/分、 $\text{H}^+$  が 0.81mm/分、 $\text{Co}^{2+}$  が 0.35mm/分、 $\text{Ni}^{2+}$  が 0.23mm/分、 $\text{Cu}^{2+}$  が 0.19mm/分となった(図 3a~d)。これら 5 種類のイオンの移動速度を比較すると、 $\text{OH}^- > \text{H}^+ > \text{Co}^{2+} > \text{Ni}^{2+} > \text{Cu}^{2+}$  の順に大きいという結果になった。

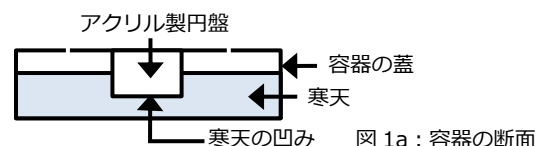


図 1a : 容器の断面

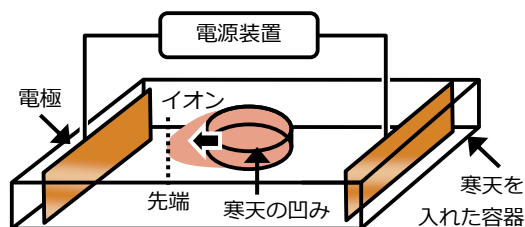


図 1b : 実験装置 1

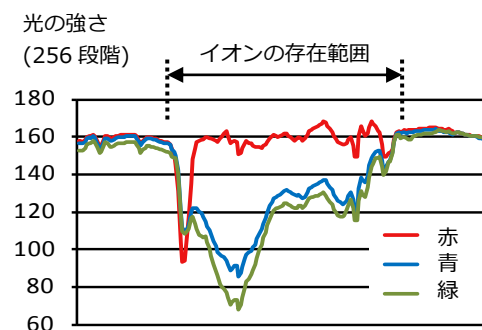
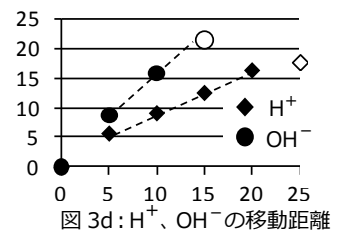
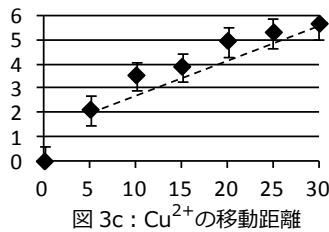
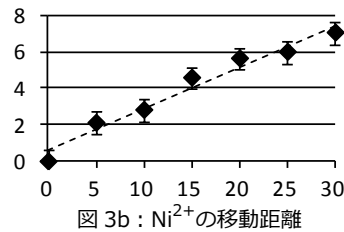
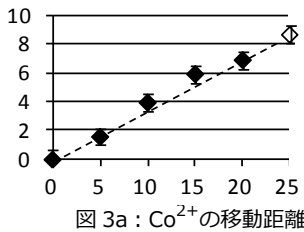


図 2 : イオンの存在範囲の光三原色の強さを表すグラフ( $\text{Co}^{2+}$ )



また、移動距離のグラフ(図 3a~d)は、全てのイオンにおいて、点線で示したように、時間に対して直線を描いた。すなわち、移動距離が時間に比例しており、等速運動をしていると推論される。

### 3 等電位線の実験

#### 3.1 実験の目的

イオンの移動の仕方をさらに詳しく見るために、電極間の電位分布を調べた。

#### 3.2 実験の手順

ろ紙<sup>※</sup>に、鉛筆で縦 3mm 間隔、横 5mm 間隔の直線を網目状に引く。このろ紙を  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  aq (0.1M) に十分に浸した後、図 5 のように実験装置を組み立てる。その後電極に 15V の電圧をかけ、電圧計で交点の電位を測定した。また、測定した数値を記録し、Excel で 3 次元の図にした(図 6)。

※ 寒天上の電位分布は調べることが難しいため、寒天と同じであるとみなしてろ紙上の電位分布を調べた。

#### 3.3 実験の原理

ろ紙上に存在する交点における電位を一つ一つ測定し、電位が等しい点を結んだグラフをコンピュータで作成することで、等電位線及びその点における電位をグラフ化することができる。

#### 3.4 実験結果

図 6 から電位を高さで表す立体グラフは+極から-極にかけて全体的にほぼ平面の坂を描いていることがわかる。電位の傾きが一定であることから、イオンが電場から受ける力も一定である。このことから、イオンは等加速度運動をする予想される。

## 4 考察

#### 4.1 等速運動について

移動速度の実験結果より、イオンは等速運動をしたことが判明した。しかし、等電位線の実験結果より、イオンは等加速度運動をするはずである。等速運動をするためには、イオンに対して働く力がつり合った状態にならなければならない。つまり、イオンに働く電場からの力とつり合う力が存在するということになる。今回の実験ではイオンが寒天内を移動していることから、イオンが寒天内を移動する際に受ける抵抗力<sup>※</sup>によって力がつり合い、等速運動になったと考えられる(図 7)。

※ 以後の「抵抗力」とは、速度に比例する粘性抵抗などを指す。

#### 4.2 移動速度について

今回測定に用いた金属イオンは本来無色だが、水と配位結合することで呈色する。したがって、 $\text{Co}^{2+}$  は  $[\text{Co}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$ 、 $\text{Ni}^{2+}$  は  $[\text{Ni}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$  は  $[\text{Cu}(\text{H}_2\text{O})_4]^{2+}$  という、結晶の水和水を伴うアクア錯イオン(水和水イオン)として存在するとわかる(参考文献[2]より)。さらに、水和水イオンの周囲にも電気的な力に弱く引きつけられた水分子の層(水和水殻)が存在し、イオンはそれらを伴って移動すると考えられる。参考文献[3]より、 $\text{Co}^{2+}$  のイオン半径は  $0.75\text{\AA}$ 、 $\text{Ni}^{2+}$  は  $0.69\text{\AA}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$  は  $0.57\text{\AA}$  であるが、参考文献[4]より、イオン半径が大きいほど水和水殻を含めた水和水イオン半径は小さいと考えられる<sup>※</sup>ため、実質的なイオン半径の大小関係は  $[\text{Cu}(\text{H}_2\text{O})_4]^{2+} > [\text{Ni}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+} > [\text{Co}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$  である。

以上より、実質的なイオン半径が小さいほどイオンが移動するとき受ける抵抗力が小さいので、移動速度が  $\text{Co}^{2+} > \text{Ni}^{2+} > \text{Cu}^{2+}$  の順に大きくなったと考えられる。

※ イオン半径が小さいと、イオン表面の電荷密度が大きくなるため多くの水分子が引き寄せられ、水和水殻を含めた実質的なイオン半径は大きくなると考えられる。

- ・ 図 3a~d  
横軸は(分)、縦軸は(mm)  
○・◇はイオンの停止直前  
I は誤差の範囲を表す
- ・ 図 4  
速度は(mm/分)  
イオン半径は( $\text{\AA}$ : $10^{-10}\text{m}$ )

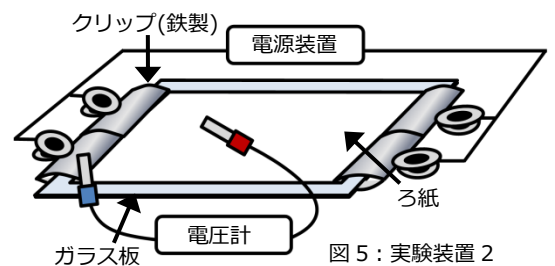
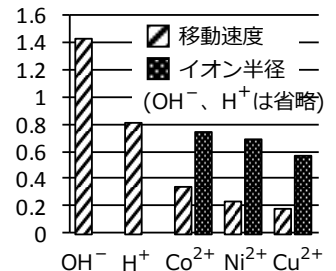
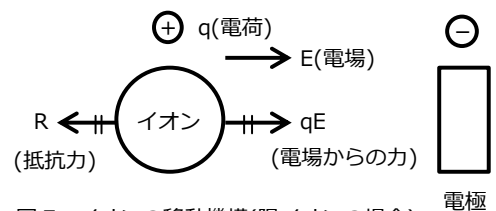
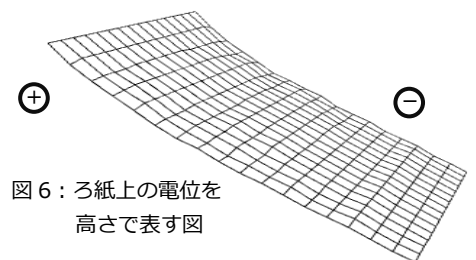


図 6 : ろ紙上の電位を高さで表す図



文献[1]を参考に作成

表 1: イオンの大きさと速度の大小関係

	$\text{Co}^{2+}$	$\text{Ni}^{2+}$	$\text{Cu}^{2+}$
イオン半径	大 ←→ 小		
水和水イオン半径	小 ←→ 大		
移動速度	大 ←→ 小		

$H^+$ と $OH^-$ が極端に速い理由は、文献調査によって、寒天内の水分子が水素結合を利用して $H^+$ を高速に受け渡すプロトン移動が行われているからであると判明した。参考文献[5]によると、プロトン移動は通常のイオンの移動より速いことが判明しているが、 $OH^-$ の移動機構について科学者の意見は一致しておらず、移動速度が $OH^- > H^+$ となった理由は分からない。

#### 4.3 移動の停止について

金属イオンの測定終了後、電気分解で発生した $OH^-$ の存在範囲を調べるために、寒天全体に万能指示薬を塗布して観察した。すると青く色づいた電解 $OH^-$ は、陰極から金属イオン先端の転色部分(移動速度の実験結果に示した「イオンの移動の先端の変色部分」)まで進んでおり、金属イオンと衝突していたことが分かった(図8)。また、転色は金属イオンの停止と同時に発生した。

※以降、電気分解で発生した $H^+$ を「電解 $H^+$ 」、 $OH^-$ を「電解 $OH^-$ 」、2つをあわせて「電解イオン」と呼ぶ。

したがって、転色の原因は、電解 $OH^-$ が正極に引きつけられる途中で、負極に引きつけられる金属イオンと衝突し、反応することで、金属イオンが水酸化物となったためである可能性が高い。

$H^+$ と $OH^-$ の実験では転色は見られなかったが、金属イオンの実験と同様に、電解イオンとの衝突と同時に測定対象のイオンが停止した。この場合は、「測定 $H^+$ と電解 $OH^-$ 」、「測定 $OH^-$ と電解 $H^+$ 」がそれぞれ反応するが、生成物が $H_2O$ であるため、転色が起こらなかったと考えられる。

※以降、「測定イオン」と呼ぶ。同様に、測定対象の $H^+$ 、 $OH^-$ も「測定 $H^+$ 」、「測定 $OH^-$ 」と呼ぶ。

以上より、停止の原因は「測定イオンと電解イオンが反応し、電荷を持たない物質となったので、電場から力を受けなくなったためである」と考えた。

しかし、測定イオンは、電荷を持たない物質になる前から、既に運動している。よって、電場からの力を受けなくなったとしても、慣性が働いて等速運動を続ける。実際は抵抗力が働いているので、少なくともある程度の減速を経てから停止するはずである。だが、実際は減速の様子が観察できなかった。これより、測定イオンは抵抗力以外の要因によって停止したと考えられる。ここで最も考えられるのは、電解イオンと測定イオンが衝突した衝撃で、停止したことである。何故なら、電解イオンは図8のように電極とはほぼ平行な前線を維持して進行し、衝突するまで測定イオンと接触することはなかった。つまり、電解イオンは、衝突以前では測定イオンの移動に対する障害にはならず、衝突時に初めて測定イオンに影響を与えるのである。

よって、我々はイオンの停止と転色のメカニズムを以下のように予想した。

- 1 測定イオンが電場から受ける力によって負極(正極)へ引きつけられる。
- 2 電解イオンも電場から力を受け、正極(負極)へ引きつけられる。
- 3 十分な時間が経過すると、測定イオンと電解イオンが衝突する。
- 4 衝突の衝撃で、測定イオンと電解イオンがともに停止する。
- 5 測定イオンと電解イオンが接している面で反応する。金属イオンは水酸化物となり転色し、 $H^+$ と $OH^-$ では、 $H_2O$ となるため転色は起こらない。

#### 5 今後の課題

今年は昨年の反省を踏まえ、乾燥しないように寒天を用いたが、電解イオンと測定イオンが衝突して反応した。可能であれば、電気分解されない溶媒に変えるなどの異なる条件下でも実験を行いたい。また、予期していなかった様々なイオンの相互作用があると分かったため、実験を重ねてこれらの現象についてより理解を深めたい。

また、昨年の課題であった湿度の影響についても、冬期の実験が全て失敗したため解決する余裕が無かった。しかし、移動が遅い金属イオンは定規を用いた測定が困難であったが、画像を利用した分析によって測定できるようになったのは、大きな成果といえる。移動の停止が起きる直前までの移動距離を測定できたのも、この手法を用いた利点である。

今後は、実験数を増やすとともに実験環境を改善し、さらに高い精度を追求したい。

#### 6 参考文献 (敬称略)

- [1] 丸善「現代界面コロイド化学の基礎 原理・応用・測定ソリューション 第3版」日本化学会
- [2] 三省堂「化学I・IIの新研究」卜部吉庸
- [3] 「Revised Effective Ionic Radii and Systematic Studies of Interatomic Distances in Halides and Chalcogenides」R. D. Shannon
- [4] 「電解質溶液」<http://www.asahi-net.or.jp/~ir5o-kjmt/jyugyou2/bussei10/bussei10m.pdf>
- [5] 「Interaction between liquid water and hydroxide revealed by core-hole de-excitation」Emad F. Aziz 他

#### ◆受賞にあたって

このたびは、日本化学会北海道支部奨励賞を受賞することができ、大変光栄です。研究にあたってご助言頂いた先生方には感謝の言葉を申し上げます。本研究はイオンの電気泳動をあらゆる面から考察し、泳動の様子を明らかにすることを目標としていましたが、本受賞に至るまでには様々な苦労がありました。特に実験装置の工夫や精度の向上、実験中に発生した諸現象の解明には何度も討議を重ねて挑んできました。このような努力を今回のような形で認めていただき、部員一同大変喜ばしく思います。今後もさらなる研究の発展に向けて、努力していきたいと思っております。

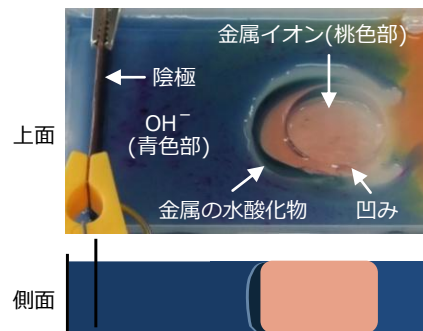


図8：金属イオンと電解 $OH^-$ の衝突