

ハロゲン化アルカリ水溶液のアルミニウム電極を用いた電気分解

—磁界中の荷電粒子について考える物理教材への活用可能性—

仲野 純章 (奈良県立奈良高等学校)

アルミニウム電極によるハロゲン化アルカリ水溶液の電気分解を磁界存在下において行うと、水溶液の流動現象が目視で容易に観察される。本稿では、電磁気分野の物理教材としてこうした現象の活用を検討してきた内容について紹介する。

キーワード：ハロゲン化アルカリ，電気化学反応，磁界，荷電粒子

1. はじめに

磁界中を運動する荷電粒子が受ける力であるローレンツ力は、電磁気学の重要概念の一つであり、理科教育においても、学校段階間をまたいで指導がなされる。ローレンツ力が直接関係した現象が初めて扱われるのは中学校段階であり、理科第1分野「電流とその利用」単元において磁界の中を流れる電流が磁界から力を受けることが指導される。ただし、学習指導要領や学習指導要領解説にはローレンツ力という用語は盛り込まれておらず、指導上もこうした力の実態については言及することが求められていない^{1),2)}。一方、高等学校段階に至ると、物理「電気と磁気」単元においてローレンツ力に関するより実質的な指導がなされる。当該単元では、電気や磁気に関する現象についての観察や実験を通して、電流が磁界から受ける力について理解できるよう指導することが求められている³⁾。そして、指導の一環としてローレンツ力に触れることが高等学校学習指導要領解説の中でも具体的に要求されており、「磁界中における荷電粒子の運動の観察を通して、荷電粒子が受ける力の向きを調べる」といったアプローチ例が示されている⁴⁾。

現在、ローレンツ力に関する指導で用いられるローレンツ力可視化教材^{註1)}としては、陰極線の磁界による屈曲を観察するものや縦方向の磁界中に吊り下げた水平な導線に通電をしてその動きを観察するものが一般的である^{5),6)}。これらの教材は、いずれも電子にローレンツ力が作用することで発

現する巨視的現象を観察するものである。しかしながら、本来、ローレンツ力は幅広い荷電粒子に働くものであることを考えると、電子以外の様々な荷電粒子にローレンツ力が作用する様子を学習者に観察させる教材の存在も望まれるところである。

ここで、ローレンツ力が関係した現象の一つとして、磁界存在下での電気分解に伴う電解質水溶液の流動（以下、溶液流）現象がある^{7),8)}。これは電気化学反応に関与するイオンにローレンツ力が作用して起こる現象であり、その特性を活かして、ローレンツ力可視化教材への応用を狙う種々の検討がなされてきた^{9)~14)}。しかし、教育現場によっては準備が必ずしも容易でない材料の利用や取り扱いに注意を要する材料の利用など、汎用性や簡便性といった面での課題も多く、現在のところ、教材として確立・普及するには至っていない。

本稿では、こうした溶液流を利用した新たなローレンツ力可視化教材（以下、新教材）を実現し得る手段系として検討してきた「アルミニウム電極を用いてハロゲン化アルカリ水溶液を電気分解する形態」の可能性について、その概要を紹介する。

2. 新教材の構造と観察される現象

新教材の主要構成部材を図1に、全体の概略図と外観を図2に示す。新教材では、円柱形の小型容器に電解質水溶液を入れ、容器裏に設置した磁石から鉛直方向に磁界を印加する。そして、容器

内壁面に沿ってアルミニウム製の陰極（環状電極）を設置し、容器中心部にアルミニウム製の陽極（棒状電極）を立てて設置する。この時、身近で安価なアルミ箔を用いると電極準備をより簡便なものとする事ができる。具体的には、アルミ箔を適当な大きさに切り出した上で、数回折りたたんで短冊状にしたものを容器内壁に沿うよう丸みをつけることで陰極（環状電極）を、棒状に丸めることで陽極（棒状電極）をそれぞれ安全かつ容易に成形できる。電解質水溶液には、ハロゲン化アルカリ水溶液を採用する。ハロゲン化アルカリは極めて安定な結晶性化合物であり、フッ化リチウムを除いて、いずれも水に溶解しやすく、水溶液調製が容易である。

以下、ハロゲン化アルカリ水溶液として、塩化カリウム水溶液を用いた場合、あるいは塩化ナトリウム水溶液を用いた場合¹⁵⁾について述べる。



図1 新教材の主要構成部材
(左から磁石、小型容器、環状電極、棒状電極)

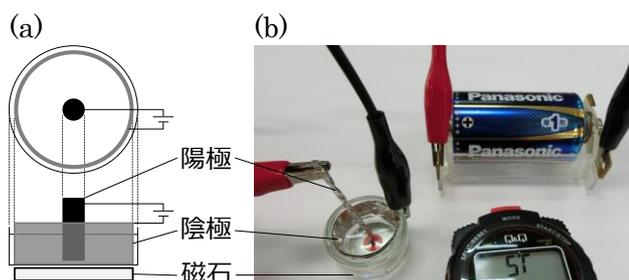


図2 新教材全体の(a)概略図と(b)外観

2.1 アルミニウム電極-塩化カリウム水溶液系

塩化カリウムは、塩橋材料として用いられるなど¹⁶⁾、理科教育の現場においても比較的馴染み深く、また安全性の面でも懸念が少ないことなどから、実践利用しやすい材料の一つである。このよ

うな塩化カリウムを用いて例えば0.89 mol/Lの塩化カリウム水溶液を調製し、3.0 mLをシャーレ（内径27 mm）に入れる。ここで、水溶液量3.0 mLは容器容積の半分程度に相当し、水溶液濃度0.89 mol/Lは当該体積に0.2 gの塩化カリウムが溶解している状態である。これらの水溶液量・濃度は実践時の簡便性を考慮した上での値であり、「小さじ1杯程度の塩化カリウム（約0.2 g）を水に溶解させて容器容積の半分程度の水溶液を準備する」といった、大まかな水溶液調製を想定したものである。シャーレ裏からはN極側を上にしたネオジウム磁石（直径21 mm、高さ5 mm、磁束密度280 mT）により磁界をかけ、この状態で単1乾電池1個を用いて両電極間に直流電流を流すと、右回転の溶液流が観察される。

両電極上では、通電直後からそれぞれ気体が発生する様子が観察される。これは、一般的な塩化カリウム水溶液の電気分解で見られる塩素や水素の気体発生反応に類似の反応と考えられるが、詳細には、発生気体に対する定性分析などを通じた同定が求められる。また、水溶液中では、ゲル状白色沈殿が徐々に形成され、約2分後には右回転の溶液流と共に流動する様子が観察される（ただし、溶液流自体は通電直後から発生）。水溶液中に溶存する K^+ 、 H^+ 、 Cl^- 、 OH^- や、電極材料としてのAlなどといった反応系内の存在化学種の状況に加え、「ゲル状」で「白色」という特徴的な沈殿の外観（図3）、及び後述のXPS分析の結果から、ここで得られる沈殿は水酸化アルミニウムである蓋然性が高い¹⁷⁾。このことから、沈殿形成の前提反応として、陽極からアルミニウムイオン溶出反応が起こるものと解釈される。

以上を総合すると、通電後、陽極では気体発生反応（これに関わるイオンを A^- とおく）とアルミニウムイオン溶出反応が、陰極では別の気体発生反応（これに関わるイオンを Z^+ とおく）が起こり、これらの電気化学反応に関わるイオンがローレンツ力を受けることで溶液流が発生すると解釈される。すなわち、図4の模式図に示すように、陽イ

オンは移動方向に対して水平方向右 90 度にローレンツ力を受け、陰イオンは移動方向に対して水平方向左 90 度にローレンツ力を受けることで、全体として右回転の溶液流を起すものと解釈される。このように、電極材料としてアルミニウムを用い、電解質水溶液として塩化カリウム水溶液を用いることで、安全かつ容易に所望の溶液流が観察される。なお、従来の検討では、ポリスチレン片や炭素粉末を液面に投入して溶液流を観察する手段が提案されてきたが^{10, 14}、今回の新教材では沈殿の動きから溶液流を容易に観察できる。このように、新教材では、現象観察用の浮遊物投入が不要となる点も、簡便性の向上に幾分か寄与する。



図 3 水溶液中に分散するゲル状白色沈殿
(陽極を撤去した上で撮影)

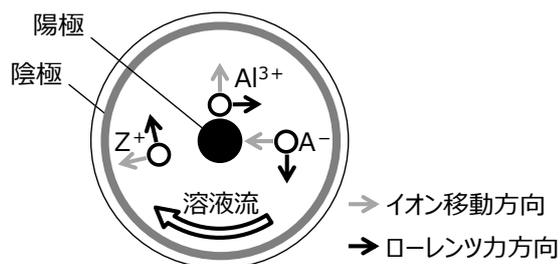


図 4 イオン移動方向とローレンツ力方向
(磁界方向：紙面奥から手前)

2.2 アルミニウム電極-塩化ナトリウム水溶液系

ハロゲン化アルカリのうち、塩化カリウム以上に身近で扱いやすい材料として塩化ナトリウムがある。塩化ナトリウムを水に溶解させた場合、陰イオンの種類は塩化カリウムを溶解させた場合と異ならず、陽イオンの種類についてのみ差異が生

じる。そこで、両水溶液間で陽イオンの電気化学的挙動を比較するため、表 1 に両水溶液中の主要陽イオンに関する標準水素電極系 (NHE, Normal Hydrogen Electrode) を基準とした標準酸化還元電位^{註 2)} (E^0) を示す。表 1 から、 Na^+/Na 電極系と K^+/K 電極系の電気化学的な位置付けは似通っており、アルミニウム電極-塩化ナトリウム水溶液系の新教材を構成した場合、アルミニウム電極-塩化カリウム水溶液系同様の電気化学的挙動が見られることが予想される。

表 1 標準酸化還元電位¹⁸⁾ (25°C)

| 電極系 | 電極反応 | $E^0 / \text{V vs. NHE}$ |
|----------------------------|---|--------------------------|
| H^+/H_2 | $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{H}_2$ | 0.00 |
| Na^+/Na | $\text{Na}^+ + \text{e}^- \rightleftharpoons \text{Na}$ | -2.713 |
| K^+/K | $\text{K}^+ + \text{e}^- \rightleftharpoons \text{K}$ | -2.925 |
| Al^{3+}/Al | $\text{Al}^{3+} + 3\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Al}$ | -1.66 |

実際、例えば 3.0 mL の 1.2 mol/L 塩化ナトリウム水溶液を用いて前節同様に新教材を構成し、通電すると、塩化カリウム水溶液を用いた場合同様の各種現象が見られる。すなわち、陽極と陰極で気体が発生すると共に、水溶液中ではゲル状白色沈殿が形成され、その流動を基に右回転の溶液流が観察される。そして、沈殿の流動を通じて溶液流を明瞭に観察できるまでの所要時間が約 2 分間であるという点も共通している。仲野・糟野・藤原は、ここで得られる沈殿と基準物質としての市販水酸化アルミニウム (ナカライテスク, Code 01716-65) に対して、Mg K α 線 (1253.6 eV) を X 線源とする XPS (X 線光電子分光法) 分析を実施し、両者の XPS スペクトルの比較から、沈殿が水酸化アルミニウムであることを確認している¹⁹⁾。

なお、上に例示した水溶液量・濃度は、アルミニウム電極-塩化カリウム水溶液系の場合同様、実践時の簡便性を考慮した上での値であり、「小さじ 1 杯程度の塩化ナトリウム (約 0.2 g) を水に溶解させて容器容積の半分程度の水溶液を準備する」といった、大まかな水溶液調製を想定したもので

ある。また、ここに示した一連の現象は、0.30～5.0 mol/Lの広い濃度範囲の塩化ナトリウム水溶液で観察されることが確認されており、実践時には更に大まかな水溶液調製が許容される。

以上のように、電極材料としてアルミニウムを用い、電解質水溶液として塩化ナトリウム水溶液を用いることで、やはり安全かつ容易に所望の溶液流が観察される。また、アルミニウム電極-塩化ナトリウム水溶液系の新教材は、アルミニウム電極-塩化カリウム水溶液系以上に汎用的な材料から構成されることから、実践上、より好ましい教材となり得る。

3. おわりに

磁界中での電気化学反応に伴う溶液流の観察は、電子以外の荷電粒子と磁界の相互作用の結果を観察するものである。今回紹介したように、アルミニウムとハロゲン化アルカリ水溶液を用いることで、こうした溶液流を安全かつ容易に観察することが可能となる。

註

- 1) 荷電粒子にローレンツ力が作用することで現れる巨視的現象を観察する教材を本稿ではローレンツ力可視化教材と称する。
- 2) 標準酸化還元電位は各酸化還元対で固有の値をとり、酸化や還元の強さの目安となる。

参考文献

- 1) 文部科学省 中学校学習指導要領 (2017a).
- 2) 文部科学省 中学校学習指導要領解説 (2017b).
- 3) 文部科学省 高等学校学習指導要領 (2018a).
- 4) 文部科学省 高等学校学習指導要領解説 理科編 理数編 (2018b).
- 5) 原康夫 電磁気学(II) 裳華房 (2003) 49.
- 6) 三沢和彦 大学の物理教育 **16** (2010) 88.
- 7) Doss, K. S. G. *Proceedings of the 13th Seminar on Electrochemistry* (1972) 355.
- 8) 佐々木和夫・九内淳堯 電極反応入門 化学同人 (1980) 59.
- 9) 矢野潤・稲田誠 化学と教育 **47** (1999) 562.
- 10) 矢野潤・塩原正雄・平木弘一・竹田正 科学教育研究 **29** (2005) 308.
- 11) 柴田恭幸・大山光晴 物理教育学会年会物理教育研究大会予稿集 **22** (2005) 100.
- 12) 柴田恭幸・大山光晴 物理教育 **54** (2006) 5.
- 13) 野田新三 日本科学教育学会研究会研究報告 **25** (2010) 39.
- 14) 矢野潤・小田健二・則包早百合・渡邊定和・松田雄二・大村泰 工学教育 **59** (2011) 92.
- 15) 仲野純章 理科教育学研究 **61** (2020) 299.
- 16) 賀澤勝利 化学と教育 **64** (2016) 448.
- 17) 渥美みはる・佐藤真理・山口則子 東京女子大学紀要論集 科学部門報告 **57** (2007) 1873.
- 18) 大塚利行・桑畑進・加納健司 ベーシック電気化学 化学同人 (2003) 189.
- 19) 仲野純章・糟野潤・藤原学 フォーラム理科教育 (submitted).