

磁界中での電気化学反応を利用したローレンツ力の可視化 —新たな現象観察装置の概要と活用可能性—

仲野 純章^{1), 2)}, 糟野 潤³⁾, 藤原 学⁴⁾

1) 奈良県立奈良高等学校 nakano-sumiaki-07@nps.ed.jp

2) 京都大学大学院理学研究科附属サイエンス連携探索センター

3) 龍谷大学先端理工学部応用化学課程 kasuno@rins.ryukoku.ac.jp

4) 龍谷大学先端理工学部応用化学課程 fujiwara@rins.ryukoku.ac.jp

キーワード：電気化学反応，ローレンツ力，XPS

(受付：2021年1月26日)

I. はじめに

鉛直方向に磁界を印加した中，電解質水溶液に浸した電極上で電気化学反応を起こすと，電解質水溶液の流動（以下，溶液流）が見られるということは古くから知られている（Doss, 1972）。一般的に，磁界中を運動する荷電粒子にはその移動方向と磁界の両者に垂直な方向にローレンツ力と呼ばれる磁気力が働き，上記溶液流もこれに起因するものである。すなわち，電気化学反応に関与するイオンが電解質水溶液中を移動する際にローレンツ力を受けることで溶液流が引き起こされる。例えば，鉛直上向きに磁界が印加された状態の下で陰極に向かって陽イオンが右方向に移動する場合（図 1(a)），当該陽イオンには紙面奥から手前に向かってローレンツ力が働き，同方向の溶液流が発生する。このとき，荷電粒子の電荷が逆符号であれば，作用するローレンツ力の向きも逆方向となる。例えば，鉛直上向きに磁界が印加された状態の下で陽極に向かって陰イオンが右方向に移動する場合（図 1(b)），当該陰イオンには紙面手前から奥に向かってローレンツ力が働き，同方向の溶液流が発生する。

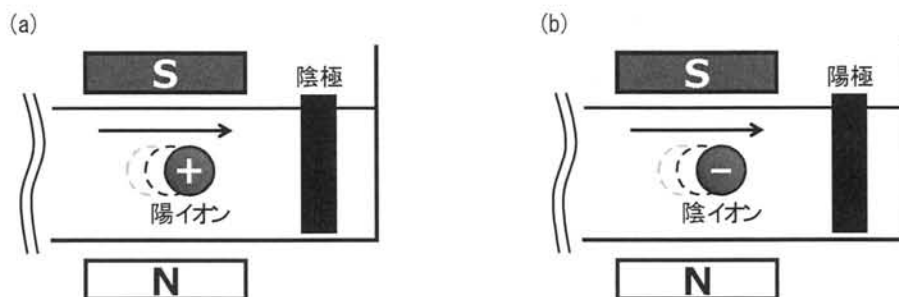


図 1 磁界が印加された電解質水溶液中を移動するイオン：

(a)陰極に向かう陽イオン，(b)陽極に向かう陰イオン

こうした溶液流は、荷電粒子にローレンツ力が作用することを視覚的に示す有効な手段となり得ることから、理科教育現場で用いる教材としての転用を狙った教材化研究が種々なされてきた(矢野・稲田, 1999; 矢野ほか, 2005; 柴田・大山, 2006; 野田, 2010; 矢野ほか, 2011 など)。しかしながら、簡便性や安全性、汎用性といった面での課題も多く、教材として確立・普及するには至っていないのが実態である。

今回、溶液流の観察を理科教育現場で実践しやすいよう、取り扱い性に優れた新たな現象観察装置(以下、新規装置)を検討した。本稿では、新規装置の概要について報告すると共に、その活用可能性についても言及する。

Ⅱ. 過去の教材化研究における課題

これまでの教材化研究の中で提案されてきた代表的な装置(以下、従来装置)では、電解質水溶液を円柱形容器に入れ、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、陽極(棒状電極)を容器中心部に立て、陰極(環状電極)を容器内壁面に沿って形成した後、電極間に直流電流を流すと、各電極での電気化学反応に参与するイオンにローレンツ力が作用し、一定方向の溶液流が発生するとされる。矢野ら(1999; 2005; 2011)は、硫酸水溶液や硫酸銅水溶液を電解質水溶液として使用することや、CuやZnなどを電極材料として使用することなどを提案しているが、簡便性や安全性、汎用性の面では課題が残る。すなわち、上記の電解質水溶液はあらゆる理科教育現場で準備や取扱いがしやすいものであるとはいえず、電極材料についても同様である(環状電極を形成する場合には、所定形状に切り出し、成形する際に危険が伴う)。従来装置と一部共通性を有する独自装置を検討した野田(2010)は、反応場に磁界を印加する方法として、電解質水溶液中の電極間に磁石を挟み込み、その際、磁石に絶縁性と防水性を与えるために60℃で軟化する自由樹脂を用いてコーティングを施す方法を提案しているが、やはり簡便性や汎用性の面での課題が残る。こうした従来装置に対し、柴田・大山(2006)は、陽極や陰極、外部電源を用いない形態の装置を提案している。具体的には、電解質水溶液中でAgやAg塩を析出させる化学反応を起こし、それに伴って生まれる濃度勾配により移動する残存イオンがローレンツ力を受け、一定方向の溶液流発生に至るとされる。当該装置は、構造簡素化という利点がある一方、電解質水溶液として硝酸銀水溶液が必要になるといった取り扱い上の課題に加え、ローレンツ力を受ける荷電粒子の移動を考える際、外部電源からの直流電流と連動した形で捉えることができず、理科教育では扱われない「濃度勾配」という知識が必要になるといった課題がある。

Ⅲ. 新規装置の概要

1. 構造

図2に新規装置の概略図を示す(図2は仲野, 2020による従来装置の概略図を参考に描画)。新新規装置では、従来装置の基本構造を踏襲した上で、主たる構成要素である電解質水溶液、陽極、陰極の見直しを行った。具体的には、電解質水溶液にNaCl水溶液を適用し、陽極と陰極にそれぞれAlを適用した。

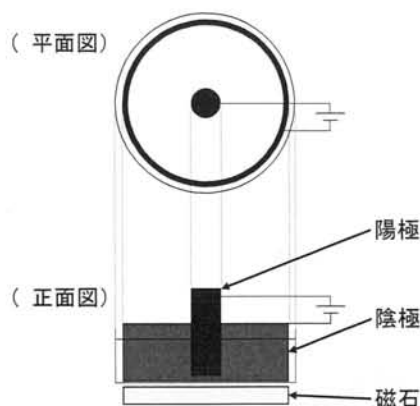


図 2 新規装置の概略図

2. 観察される現象

例えば、0.68 mol/L の NaCl 水溶液 3.0 mL をシャーレ（内径 27 mm）に入れ、シャーレ裏から 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）により磁界を印加した状態で単 1 アルカリ乾電池 1 個（電圧 1.5 V）を用いて Al 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。

このとき、陽極と陰極では、通電開始直後からそれぞれ気体の発生が確認される。一般的に、NaCl 水溶液の電気分解では、陽極で式(1)に示す酸化反応、陰極で式(2)に示す還元反応が起こることが知られており（栗原，1995），新規装置においても、両電極上で式(1)，(2)に基づく、あるいはそれに準じた気体発生反応が起こると考えられる。



一方、電解質水溶液中では、通電開始後徐々にゲル状白色沈殿が形成され、2 分後には明瞭にその存在を目視確認することができる。ここで、通電前の電解質水溶液の外観と共に、通電開始 2 分後にゲル状白色沈殿が分散した電解質水溶液の外観を図 3 に示す。反応系の主な存在物質が電極材料である Al や Na^+ 、 H^+ 、 Cl^- 、 OH^- といったイオン種に限られるということと沈殿の外観的特徴から、当該ゲル状白色沈殿は電解質水溶液中で $\text{Al}(\text{OH})_3$ が生成し、その溶解度が小さいため沈殿として析出したものと推察される（渥美ほか，2007）。これを確かめるため、基準物質としての $\text{Al}(\text{OH})_3$ （ナカライテスク，Code 01716-65）とゲル状白色沈殿に対し、X 線光電子分光装置（アルバック・ファイ，ESCA-1600R）を用いた XPS (X-ray photoelectron spectroscopy) 分析を実施した。XPS 分析は、 10^{-6} Pa 以下の高真空中で分析試料に X 線を照射し、試料表面から放出される光電子の運動エネルギーを計測することで、物質同定などを行う手法である（藤原・栗崎，2015）。今回、X 線源には Mg K α 線（1253.6 eV）を使用し、エネルギー範囲を広くとるワイドスキャン XPS スペクト

ルと特定の電子軌道によるピークに焦点を当ててエネルギー範囲を狭くとりナロースキャン XPS スペクトルを取得し、両試料間でスペクトル形状を比較した。XPS 分析を行うにあたっては、カーボン製の導電性両面テープを用いて極微量の粉末試料を XPS 試料台に固定化した。ゲル状白色沈殿に関しては、純水で数回洗浄した後に数日間自然乾燥させた上で XPS 分析に供した。

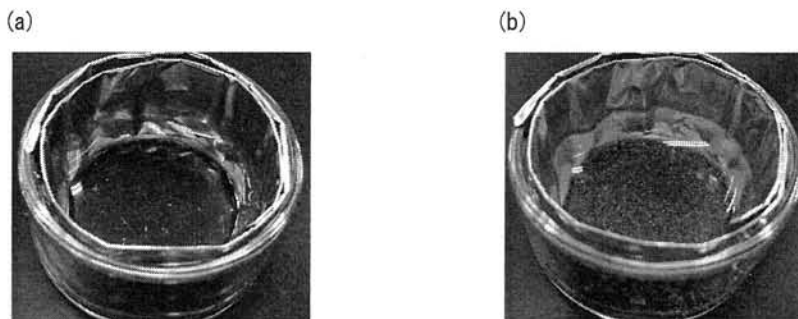


図 3 電解質水溶液の外観: (a)通電前, (b)通電開始 2 分後

得られたワイドスキャン XPS スペクトルを図 4 に、ナロースキャン XPS スペクトルを図 5～7 に示す。ここで、図 5(a)は基準物質である $\text{Al}(\text{OH})_3$ の $\text{Al}2p$ スペクトルであり、図 5(b)はゲル状白色沈殿から得られた同エネルギー範囲のスペクトルである。同様に、図 6, 7 はそれぞれ $\text{Al}(\text{OH})_3$ の $\text{Al}2s$, $\text{O}1s$ スペクトルとゲル状白色沈殿から得られた同エネルギー範囲のスペクトルである。図 4～7 に示すとおり、ゲル状白色沈殿のスペクトルは基準物質とほぼ同様の形状となり、生成した沈殿が $\text{Al}(\text{OH})_3$ である可能性が非常に高いと判断できる。このことから、通電開始後は電解質水溶液中で $\text{Al}(\text{OH})_3$ の形成が進み、その前提として、陽極では気体発生反応とは別の酸化反応、すなわち Al^{3+} の溶出反応が起こるものと解釈できる (式(3))。

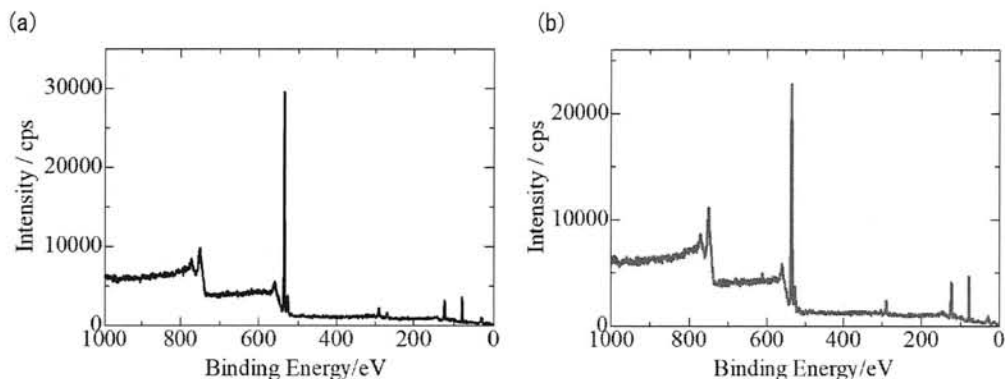


図 4 ワイドスキャン XPS スペクトル: (a)基準物質, (b)ゲル状白色沈殿

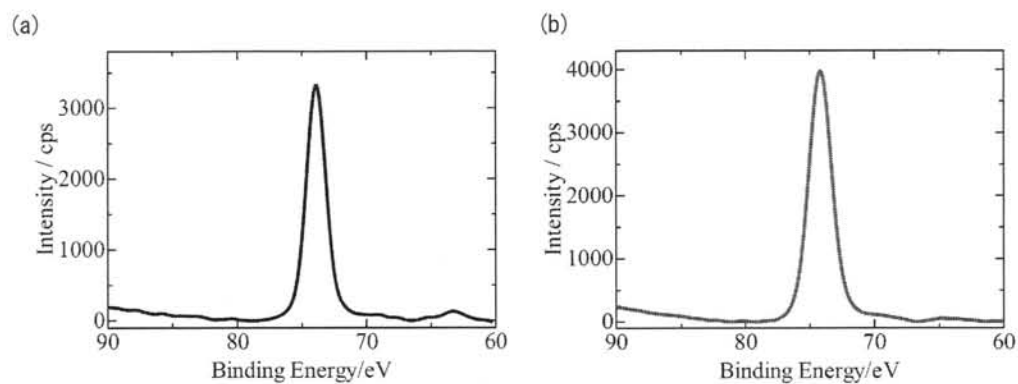


図 5 ナローズキャン XPS スペクトル (Al2p) : (a) 基準物質, (b) ゲル状白色沈殿

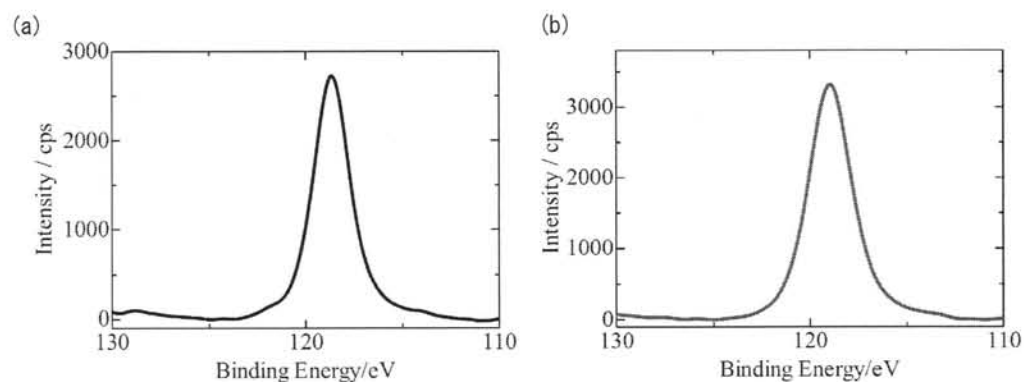


図 6 ナローズキャン XPS スペクトル (Al2s) : (a) 基準物質, (b) ゲル状白色沈殿

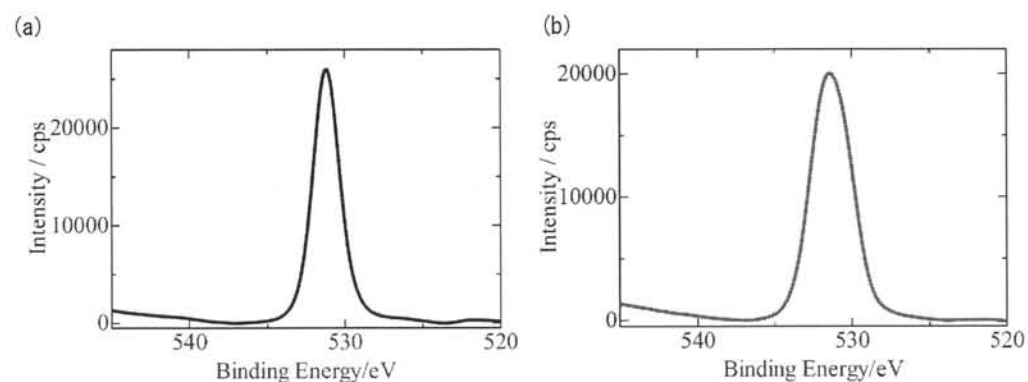


図 7 ナローズキャン XPS スペクトル (O1s) : (a) 基準物質, (b) ゲル状白色沈殿

以上のことから、通電開始後は少なくとも陽極で気体発生反応（これに関わるイオンを A^- とおく）と Al^{3+} 溶出反応が、陰極で別の気体発生反応（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容器中心部からイオンに向かう直線に垂直な右方向にローレンツ力を受けることで（図 8）、右回転の溶液流を引き起こすと解釈される。

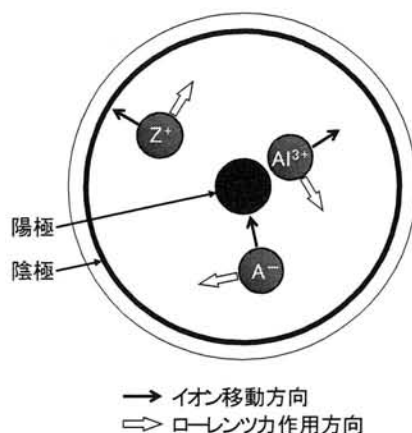


図 8 電気化学反応に関わるイオンの移動方向とローレンツ力作用方向の関係性（平面図）

3. 取り扱い性

新規装置では、図 3 に示したように、目視で十分確認できるゲル状白色沈殿が形成されることから、その動きを基に溶液流を容易に観察できる。こうした沈殿が形成されない場合の溶液流観察は容易ではなく、過去の教材化研究では、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という手段が提案されてきた（矢野ほか、2005；矢野ほか、2011）。このように、新規装置では現象観察用の浮遊物投入が不要となり、簡便性の向上に幾分か資する構成となっている。

浮遊物投入削減以外でも、新規装置は簡便性に配慮された構成となっている。まず、電解質水溶液となる NaCl 水溶液は、濃度を厳密に指定しない限り、容器に適量の NaCl と水を混合・溶解させることで容易に準備できる。また、電極についても、その材料に Al を採用することで電極準備を容易なものにしている。具体的には、身近で安価なアルミホイルを利用し、これを適当な大きさに切り出した上で、棒状に丸めることで陽極（棒状電極）を、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）をそれぞれ容易に成形できる。

なお、新規装置の主たる構成要素である電解質水溶液、陽極、陰極を準備する段階においては、安全性に大きな懸念は存在しないが、これらを組み立て、装置として使用する段階では、式(2)の進行に伴い電解質水溶液の液性がアルカリ側にシフトしていく可能性が考えられる。そこで、前節に記した条件下で、通電開始後の電解質水溶液の液性変化を pH センサ（PASCO, PS-3204）により確認した。その結果は図 9 に示すとおりであり、通電開始後、電解質水溶液の液性は中性付近から単調

に上昇する傾向にあるが、その上昇度合いは緩やかであり、溶液流観察に必要な 2 分間程度では危険性を有する液性には至らないことが分かる。

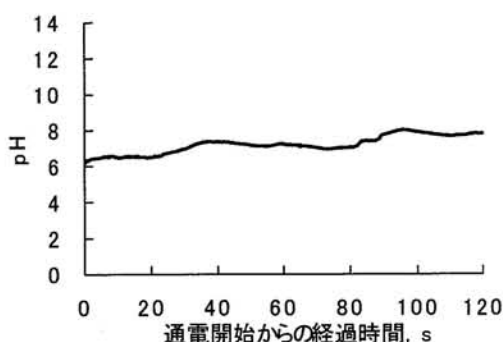


図9 通電開始後の電解質水溶液における液性変化

(電解質水溶液 : 0.68 mol/L NaCl 水溶液 3.0 mL, 陽極 : Al, 陰極 : Al, 印加電圧 : 1.5 V)

以上のように、新規装置は実践時に求められる簡便性や安全性を備えたものとなっている。また、新規装置はその構成材料に身近で一般的なもののみを用いており、材料的な汎用性という観点からも実践に適したものとなっている。

IV. 新規装置の活用可能性

磁界中での電気化学反応に伴う溶液流を観察する新規装置は、磁界と荷電粒子の相互作用の結果を観察するものであり、そうした相互作用について学ぶ理科教育現場での活用が期待される。学習指導要領上、小学校では、第 5 学年で電流と磁界の関連について学習するが、その内容は電流がつくる磁力についてであり、電流が磁界から力を受けることなどについては学習しない（文部科学省，2018a）。一方、中学校では、一般的な電気回路における電流の実態は電子の流れであるということに初めて触れ、その後、電流が磁界から力を受けることについても学習する（文部科学省，2018b）。さらに、高等学校、あるいは大学理工学系基礎教育に至ると、電磁気学の重要概念としてローレンツ力が具体的に扱われる。以上のことから、小学校においては溶液流発生の機構を理解するための基本的知識が欠如しており、新規装置の活用は難しく、またその必要性も認め難い。一方、中学校においては、電子という荷電粒子が磁界から力を受けるということについて理解を求めることは不可能ではなく、発展的な教材として新規装置の活用は可能である。そして、高等学校以上の理科教育現場においては、ローレンツ力が作用する様子を学習者に観察させ、ローレンツ力への理解を深めさせる上で有効な教材となり得る。このうち、高等学校での活用については、仲野により試行された実践事例（仲野，2019；2020）から、既にその有効性が示唆されている。具体的には、高等学校第 3 学年の学習者（2 人 1 班集体）を対象に、新規装置を用いて溶液流を観察し、ローレンツ力との関連性を考えさせる 1 時限の授業を試行したところ、電気化学反応とそれに伴う溶液流の観察を効率的に進め、ローレンツ力作用と関連付けて溶液流発生を解釈させる授業展

開が可能であることが示されている。その際の授業展開は、表 1 のとおりである。

表 1 新規装置を用いた実践事例における授業展開（仲野，2019）

項目（所要時間）	内容
導入（5 分）	本時の概要説明
実験準備～実施（15 分）	班ごとに新規装置を組み立てた後，通電開始し，経時変化を観察・記録
考察（20 分）	観察された現象を基に，各電極での電気化学反応や溶液流発生機構を考察
まとめ（5 分）	観察された現象とその解釈についての総括と，ローレンツ力の特性についての再説明

V. おわりに

今回，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溶液流を観察する新たな現象観察装置として，NaCl 水溶液と Al 電極からなる新規装置を検討した。新規装置は取り扱い性に優れた構成となっており，高等学校を始めとする理科教育現場で活用されることを期待すると共に，今後更なる改良が図られることも期待したい。

文献

- 渥美みはる・佐藤真理・山口則子 2007. 実験で学ぶ化学(3)化学分析による物質の検出と定量. 東京女子大学紀要論集 科学部門報告, 57, 1873-1886.
- Doss, K. S. G. 1972. Effect of magnetic field on electrodeposition and electrothinning. Proceedings of the 13th Seminar on Electrochemistry, 355-363.
- 藤原 学・栗崎 敏 2015. 表面分析. 庄野利之・脇田久伸（編），新版 入門機器分析化学. 三共出版，東京，235-241.
- 栗原敏夫 1995. 電気分解をどう教えるか—化学変化は基本的には電子の移動—. 化学と教育, 43, 760-761.
- 文部科学省 2018a. 小学校学習指導要領解説 理科編.
- 文部科学省 2018b. 中学校学習指導要領解説 理科編.
- 仲野純章 2019. 電気化学反応を利用したローレンツ力可視化教材—汎用性・簡便性を重視した新規手法の開発と実践—. 日本理科教育学会近畿支部大会発表論文集, p63.
- 仲野純章 2020. 磁界中の電気化学反応による電解質溶液流を利用したローレンツ力可視化教材の汎用性と簡便性の向上. 理科教育学研究, 61, 299-307.
- 野田新三 2010. イオンに関する科学的概念を観察，実験を通して身に付けさせる指導. 日本科学教育学会研究会研究報告, 25, 39-44.
- 柴田恭幸・大山光晴 2006. イオンが受けるローレンツ力を見る新しい実験手法の開

発 物理教育, 54, 5-9.

矢野 潤・稲田 誠 1999. 磁界中におけるボルタ電池反応の進行によるイオン流の視覚化. 化学と教育, 47, 562-565.

矢野 潤・小田健二・則包早百合・渡邊定和・松田雄二・大村泰 2011. 磁界中の電気化学反応によるイオン流から生じる液回転によるフレミングの左手の法則の視覚化. 工学教育, 59, 92-98.

矢野 潤・塩原正雄・平木弘一・竹田 正 2005. 磁場中の電気分解により発生した液回転によるローレンツ力の可視化. 科学教育研究, 29, 308-312.