

ルシャトリエの原理に関するマイクロスケール実験
— 教材改良と授業実践 —

中川徹夫*¹ 中澤克行*²

Microscale Experiment on Le Chatelier's Principle
— Improvement of Teaching Materials and Practical Lessons —

NAKAGAWA Tetsuo*¹ NAKAZAWA Katsuyuki*²

*¹ 神戸女学院大学 人間科学部 環境・バイオサイエンス学科 教授

*² 兵庫県立神戸高等学校 主幹教諭

連絡先：中川徹夫 〒662-8505 西宮市岡田山4-1 神戸女学院大学人間科学部環境・バイオサイエンス学科
nakagawa@mail.kobe-c.ac.jp

要 旨

ルシャトリエの原理（平衡移動の原理）は、高校化学で取り扱われる。東海林と荻野は、3枚の12穴セルプレートを用いて、ルシャトリエの原理に関するマイクロスケール実験教材を開発した。本研究では東海林らの方法を改良して、1枚の12穴セルプレートで、酢酸水溶液とアンモニア水の電離平衡の移動および飽和塩化ナトリウム水溶液の溶解平衡の移動を実験できるようにした。また、本手法で使用した試薬量は、通常実験のおよそ1/6であった。さらに著者らは、兵庫県立神戸高等学校で1年生および2年生の生徒を対象に、本手法を用いた授業実践を実施した。いずれの生徒も真剣に取り組み、アンケート結果からも本実験教材を評価する回答が得られた。以上より、高校化学における本実験教材の有用性が認められた。

キーワード：マイクロスケール実験、ルシャトリエの原理、電離平衡、溶解平衡、授業実践

Summary

Le Chatelier's principle, namely, the principle of displacement of equilibrium appears in Japanese high school advanced chemistry textbooks. Shoji and Ogino have already investigated and developed teaching materials on the Le Chatelier's principle, using three 12-well plates. In this study, we have made some improvements on their method and proposed alternative teaching materials on the displacement of ionization of dilute aqueous acetic acid and ammonia solutions and that of solution of saturated aqueous sodium chloride solution using only one 12-well plate. In our way, the amount of used solutions is drastically reduced to 1/6 in comparison with that in an ordinary scale experiment. Moreover, we have carried out practical lessons for first and second grade senior high school students (aged 15-17) at Hyogo Prefectural Kobe High School. All of the students that took these lessons did experiments steadily and admired our teaching materials on the questionnaires. Therefore, it has been found that our teaching materials are useful for high school advanced chemistry.

Keywords: Microscale experiment, Le Chatelier's principle, Ionization equilibrium, Solution equilibrium, Practical lesson

1 はじめに

通常実験の規模を小さくしたマイクロスケール実験には、試薬の節減、実験廃棄物の削減、実験時間の短縮等、様々な長所がある¹⁻²⁾。著者の一人である中川は、これまで主として日本学術振興会より科学研究費補助金を受け、マイクロスケール実験教材の開発・改良と授業実践に従事し、その成果を報告した³⁻⁵⁾。

高等学校学習指導要領によれば、ルシャトリエの原理は、化学（4単位）で扱われる⁶⁾。教科書にも詳細な記述が見られ⁷⁾、これに関する教材開発や改良は、化学教育の視点からも重要である。

ルシャトリエの原理の中で、電離平衡の移動および溶解平衡の移動に関するマイクロスケール実験教材は、すでに東海林と荻野により開発されている⁸⁾。本研究ではこれを改良し、酢酸水溶液、アンモニア水の電離平衡の移動、飽和塩化ナトリウム水溶液の溶解平衡の移動が一度に理解できるように工夫した。本教材を用いて、著者らは兵庫県立神戸高等学校で授業実践を行った。

本稿では、今回改良した電離平衡の移動および溶解平衡の移動に関するマイクロスケール実験教材と、これを用いた授業実践について紹介する。なお、内容の一部はすでに学会等⁹⁻¹¹⁾で発表した。最近松本ら¹²⁾や前川ら¹³⁾も、本教材を活用した授業実践を行っている。

2 実験

2-1 試薬と器具

水溶液として、0.1 mol/L 酢酸 (CH_3COOH) 水溶液、0.1 mol/L アンモニア (NH_3) 水、飽和塩化ナトリウム (NaCl) 水溶液を使用した。これらはいずれも、市販の試薬を、蒸留水で希釈して調製した。液体試薬として、濃塩酸 (HCl) および99%エタノール ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) を使用した。

固体試薬として、酢酸ナトリウム (CH_3COONa)、酢酸カリウム (CH_3COOK)、塩化ナトリウム (NaCl)、塩化アンモニウム (NH_4Cl)、硫酸アンモニウム ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$)、水酸化ナトリウム (NaOH) を使用した。用いた試薬の等級は、いずれも1級である。

酸塩基指示薬として、ユニバーサル pH 試験紙、メチルオレンジ ($\text{C}_{14}\text{H}_{14}\text{N}_3\text{NaO}_3\text{S}$) 溶液、フェノールフタレイン ($\text{C}_{20}\text{H}_{14}\text{O}$) 溶液を用いた。メチルオレンジ溶液は、市販の0.1 W/V %を蒸留水で5倍 (0.02 W/V %) または10倍 (0.01 W/V %)、フェノールフタレイン溶液も、市販の1.0 W/V %を99%エタノールで5倍 (0.2 W/V %) または10倍 (0.1 W/V %) に希釈して使用した。

器具として、12ウェルセルプレート（組織培養用プレート、図1参照）、小さじ（またはスパチュラ）、ガラス棒、ピンセットを用いた。

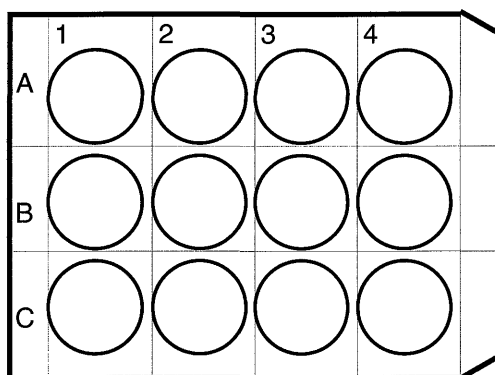


図1 12ウェルセルプレート

行にA、B、C、列に1、2、3、4と記号、番号が割り当てられているので、場所を決定するのに便利である。

2-2 方法

2-2-1 酢酸水溶液の電離平衡の移動

A行に0.1 mol/L 酢酸水溶液を約10滴ずつ加えた。A-2に酢酸ナトリウム、A-3に酢酸カリウム、A-4に塩化ナトリウムを小さじ1/3杯ずつ加え、完全に溶解させた。つぎに、ガラス棒を用いて、A-1からA-4までの水溶液をpH試験紙に付け、色調変化を観察した。さらに、A-1からA-4に0.02または0.01 W/V %メチルオレンジ溶液を1滴ずつ加え、色調変化を観察した。

2-2-2 アンモニア水の電離平衡の移動

B行に0.1 mol/L アンモニア水を約10滴ずつ加えた。B-2に塩化アンモニウム、B-3に硫酸アンモニウム、B-4に塩化ナトリウムを小さじ1/3杯ずつ加え、完全に溶解させた。つぎに、ガラス棒を用いて、B-1からB-4までの水溶液をpH試験紙に付け、色調変化を観察した。さらに、B-1からB-4に0.2または0.1 W/V %フェノールフタレイン溶液を1滴ずつ加え、色調変化を観察した。

2-2-3 飽和塩化ナトリウム水溶液の溶解平衡の移動

C行に飽和塩化ナトリウム水溶液をそれぞれ約20滴ずつ加えた。C-2に濃塩酸2滴、C-3に水酸化ナトリウム1粒、C-4に硫酸アンモニウムを小さじ1/3杯ずつ加え、変化の様子を観察した。

2-2-4 安全上の注意

濃塩酸や水酸化ナトリウムなどの危険な試薬を使用するため、常時安全眼鏡を着用して実験を行った。

3 授業実践

著者の一人である中澤が勤務する兵庫県立神戸高等学校は、文部科学省からスーパーサイエンスハイスクール（SSH）に指定されており、理数系人材育成カリキュラムの開発とその実践による教育効果の検証に取り組んでいる。また、科学技術人材育成重点枠に採択されており、地域において高大産連携による人材育成の中核拠点としての取り組みも行っている。

このSSHの校内における取り組みの一つとして、外部講師によるSSH特別講義を年間5回程実施してきた。2013年6月28日、中川がSSH特別講義の講師として招聘され、1年生43名（綜合理学科40名+普通科3名）を対象として、「マイクロスケール実験により、ルシャトリエの原理を学ぼう」の題目の授業（講義+実験）を実施した。受講生は化学を未履修で、ルシャトリエの原理に関する予備知識を持たない。そこで、まず化学平衡とその移動について簡単に説明した後、本教材を用いて授業実践を行った。

続いて中澤が、2014年3月5日、化学の授業で化学平衡とルシャトリエの原理を履修した普通科理系2年生39名に対し、本教材を用いて授業実践を行った。

いずれの授業でも、実験プリント（図2参照）¹⁴⁾を使用し、生徒が実験に取り組みやすいように配慮した。実験は、グループではなく、個別に取り組みさせた。それぞれの授業実践終了後、アンケートを実施した（図3参照）。

マイクロスケール実験シート（ルシャトリエの原理）

実験日時 年 月 日 神戸女学院大学 中川徹夫 作成
 高校名 _____ 年 _____ 氏名 _____

マイクロスケール実験により、電離平衡や溶解平衡に関するルシャトリエの原理を理解する。

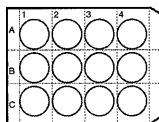
1. 準備

1) 実験器具

12 ウェルセルプレート（下図）、ガラス棒、ピンセット、小さじ（コーヒー用マドラー）、安全メガネ。

2) 試薬

0.1 mol/L CH₃COOH（水溶液）、0.1 mol/L NH₃（水溶液）12 mol/L HCl（水溶液、濃塩酸）、CH₃COONa（固体）、CH₃COOK（固体）、NaCl（固体）、NH₄Cl（固体）、(NH₄)₂SO₄（固体）、NaOH（固体）、フェノールフタレイン溶液*、メチルオレンジ水溶液*、ユニバーサル pH 試験紙（万能試験紙）、NaCl（飽和水溶液）



A行：0.1 mol/L CH₃COOH
 B行：0.1 mol/L NH₃
 C行：飽和NaCl水溶液

*フェノールフタレイン溶液、メチルオレンジ水溶液については、市販の溶液を溶媒で約5倍に希釈したものを使用する。

2. 方法（実験開始時に、必ず安全眼鏡を着用すること）

2-1 弱酸水溶液（酢酸水溶液、希酢酸）の電離平衡

- 1) A行に0.1 mol/L CH₃COOH（水溶液）を約10滴入れる。
- 2) A-2にCH₃COONa、A-3にCH₃COOK、A-4にNaClを小さじ1/3杯入れてよくかき混ぜる。
- 3) A行の液をガラス棒に取り、ユニバーサル pH 試験紙につけて、色調の変化を観察する。
- 4) A行にメチルオレンジ水溶液を1滴加え、色調の変化を観察する。

2-2 弱塩基水溶液（アンモニア水）の電離平衡

- 1) B行に0.1 mol/L NH₃（水溶液）を約10滴入れる。
- 2) B-2にNH₄Cl、B-3に(NH₄)₂SO₄、B-4にNaClを小さじ1/3杯入れてよくかき混ぜる。
- 3) B行の液をガラス棒に取り、ユニバーサル pH 試験紙につけて、色調の変化を観察する。
- 4) B行にフェノールフタレイン溶液を1滴加え、色調の変化を観察する。

2-3 電解質飽和水溶液（塩化ナトリウム飽和水溶液、飽和食塩水）の溶解平衡

- 1) C行に、NaCl（飽和水溶液）を約20滴入れる。
- 2) C-2に濃塩酸を2~3滴、C-3にNaOHを1粒、C-4に(NH₄)₂SO₄を小さじ1/3杯入れてよくかき混ぜ、変化の様子を観察する。

3. 結果と考察

3-1 弱酸水溶液（酢酸水溶液）の電離平衡

電離平衡式：

	1 CH ₃ COOH	2 CH ₃ COOH + CH ₃ COONa	3 CH ₃ COOH + CH ₃ COOK	4 CH ₃ COOH + NaCl
pH 試験紙				
メチルオレンジ水溶液				
考察 電離平衡の移動に関して	電離平衡の 状態			

3-2 弱塩基水溶液（アンモニア水）の電離平衡

電離平衡式：

	1 NH ₃	2 NH ₃ + NH ₄ Cl	3 NH ₃ + (NH ₄) ₂ SO ₄	4 NH ₃ + NaCl
pH 試験紙				
フェノールフタレイン溶液				
考察 電離平衡の移動に関して	電離平衡の 状態			

3-3 電解質飽和水溶液（塩化ナトリウム飽和水溶液）の溶解平衡

溶解平衡式：

	1 NaCl	2 NaCl + HCl	3 NaCl + NaOH	4 NaCl + (NH ₄) ₂ SO ₄
変化の様子				
考察 溶解平衡の移動に関して	溶解平衡の 状態			

文献：東海林恵子，萩野和子，化学と教育，49(10)，634-636（2001）。

図2 実験プリント¹⁴⁾

マイクロスケール実験アンケート

- (1) 高等学校の現在の学年はどれですか (○印)。
ア. 1年, イ. 2年, ウ. 3年
- (2) これまでに (今回の講義・実習を受ける前に)、マイクロスケール実験という言葉を知っていましたか。また、「ア. はい」と答えた人は、どのようにして知りましたか。 (○印)。
ア. はい (どのようにして)
イ. いいえ
- (3) 今回のマイクロスケール実験は、どうでしたか (○印)。
ア. とても楽しかった, イ. 楽しかった, ウ. 普通, エ. あまり楽しなかった,
オ. 全く楽しなかった
- (4) 今回のマイクロスケール実験の内容は、理解できましたか (○印)。
ア. よく理解できた, イ. 大体理解できた, ウ. 半分程度理解できた,
エ. あまり理解できなかった, オ. ほとんど理解できなかった
- (5) 今回のマイクロスケール実験の操作は、どうでしたか (○印)。
ア. たいへん簡単だった, イ. 簡単だった, ウ. 普通, エ. やや難しかった,
オ. たいへん難しかった
- (6) マイクロスケール実験の長所は、どこにあると思いますか (○印, 複数回答可)。
ア. 実験時間の短縮, イ. 試薬量の減少, ウ. 廃液の減少, エ. 操作が単純で簡単,
オ. その他 ()
- (7) 今回は別の内容でも、機会があればマイクロスケール実験を行いたいですか (○印)。
ア. 是非行いたい, イ. 行いたい, ウ. 何ともいえない, エ. あまり行いたくない,
オ. 絶対に行いたくない
- (8) マイクロスケール実験を、高校化学の授業に取り入れることに対して、どのように思いますか (○印)。
ア. 是非取り入れてほしい, イ. 取り入れてほしい, ウ. 何ともいえない,
エ. あまり取り入れてほしくない, オ. 絶対に取り入れてほしくない
- (9) マイクロスケール実験に対する意見や感想を書いてください。

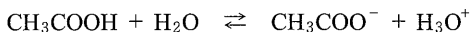
図3 アンケート用紙

4 結果と考察

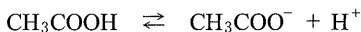
4-1 酢酸水溶液の電離平衡の移動

酢酸水溶液の場合、pH 試験紙は橙色、メチルオレンジ溶液は赤色を示した。しかし、これに酢酸ナトリウムや酢酸カリウムを加えると、pH 試験紙は緑色、メチルオレンジ溶液は黄色を示した。一方、塩化ナトリウムを加えた場合、pH 試験紙は橙色、メチルオレンジ溶液は赤色と、もとの酢酸水溶液と同色を示した。この原因は、つぎのように考えられる。

酢酸水溶液は、次式のような電離平衡の状態にある。



または、



これに、酢酸ナトリウムや酢酸カリウムを加えると、酢酸イオン CH_3COO^- 濃度の増加により、電離平衡が左に移動する。その結果、オキソニウムイオン H_3O^+ (または H^+) 濃度が減少するため、pH が増大する。一方、塩化ナトリウムを加えても平衡は移動せず、pH は変化しない。

4-2 アンモニア水の電離平衡の移動

アンモニア水の場合、pH 試験紙は濃青色、フェノールフタレイン溶液は赤色を示した。しかし、これに塩化アンモニウムや硫酸アンモニウムを加えると、pH 試験紙は緑色、フェノー

ルフトレイン溶液は淡桃色を示した。一方、塩化ナトリウムを加えた場合、pH 試験紙は濃青色、フェノールフトレイン溶液は赤色と、もとのアンモニア水と同色を示した。この原因は、つぎのように考えられる。

アンモニア水は、次式のような電離平衡の状態にある。



これに、塩化アンモニウムや硫酸アンモニウムを加えると、アンモニウムイオン NH_4^+ の濃度の増加により、電離平衡が左に移動する。その結果、水酸化物イオン濃度 OH^- が減少するため、pH が減少する。一方、塩化ナトリウムを加えても平衡は移動せず、pH は変化しない。

4-3 飽和塩化ナトリウム水溶液の溶解平衡の移動

飽和塩化ナトリウム水溶液に、濃塩酸や水酸化ナトリウムを加えると白濁した。しかし、硫酸アンモニウムを加えても無色のままであった。この原因は、つぎのように考えられる。

飽和塩化ナトリウム水溶液は、次式のような溶解平衡の状態にある。



これに、濃塩酸や水酸化ナトリウムを加えると、塩化物イオン Cl^- 濃度やナトリウムイオン Na^+ 濃度の増加により、溶解平衡が左に移動する。その結果、塩化ナトリウムが析出するため、水溶液は白濁する。一方、硫酸アンモニウムを加えても平衡は移動しないので、変化は生じない。

4-4 実験結果のまとめ

4-1~4-3の実験結果を、図4に示す。ただし、この写真では、メチルオレンジ水溶液とフェノールフトレイン溶液は、いずれも市販の原液を10倍に希釈した液を使用した結果である（5倍希釈液を用いた場合も、ほぼ同様の結果が得られた）。

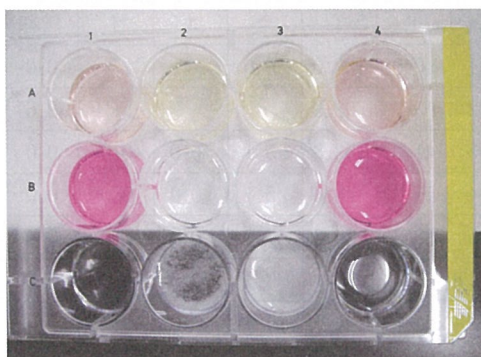


図4 マイクロスケール実験の結果

A行：酢酸水溶液の電離平衡の移動、B行：アンモニア水の電離平衡の移動、C行：飽和塩化ナトリウム水溶液の溶解平衡の移動。酸塩基指示薬の色調変化や沈殿の生成により、平衡の移動が理解できる。

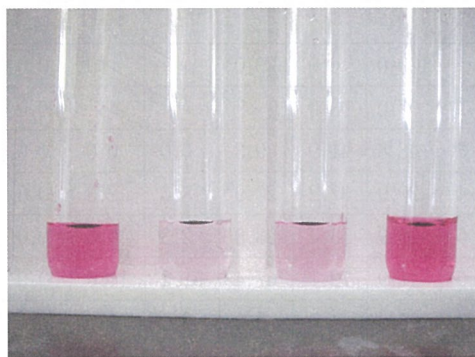


図5 通常実験の結果

アンモニア水の電離平衡の移動。左より、アンモニア水のみ、アンモニア水+塩化アンモニウム、+硫酸ナトリウム、+塩化ナトリウムに、フェノールフトレイン溶液を1滴加えた結果。

比較のため、試験管を用いて通常実験で行ったアンモニア水の電離平衡の移動実験（4-2に相当）を図5に示す。これは、通常の試験管で使用可能な最少量の液体である、2 mLのアンモニア水を用いて実験した結果である。今回のマイクロスケール実験で使用した水溶液の量はおよそ0.33 mLであり、通常実験のおよそ1/6の量である。そのような微量にもかかわらず、通常実験と同様の結果が得られた。

4-5 アンケート結果

4-5-1 アンケートの集計結果

授業終了前に実施したアンケートの結果を、表1および2に示す。表中の数値はすべて百分率である。左列の数字は、アンケート用紙（図3）の質問番号に該当する。

まず、マイクロスケール実験の知名度をたずねた質問2に対して、両学年ともに、9割以上の生徒が否定的な回答をしている。これより、大部分の生徒は、今回の実践授業でマイクロスケール実験を初めて体験したことになる。

質問3から8までは、マイクロスケール実験の持つ種々の側面に対して、生徒の考え（肯定的か、あるいは否定的か）を把握するために設定した項目である。両学年とも概ね肯定的な回答をした者が8割に達し、今回の授業実践の成果が認められた。

マイクロスケール実験に対する嗜好性に関する質問3、6、7、8に対して、両学年とも9割以上の生徒が肯定的な回答をした。これより、楽しく実験ができ、再度マイクロスケール実験を行いたいと思ったことがわかる。

ただ、内容理解に関する質問4と5に対しては、2年生と1年生の回答には顕著な差が出現し、2年生の方が肯定的な回答をした者の割合が高い。これは、化学の授業で、ルシャトリエの原理を既習しているためと推察される。

表1 1年生のアンケート結果

	ア	イ	ウ	エ	オ	無答
1	100.0	0.0	0.0			0.0
2	7.0	93.0				0.0
3	48.8	41.9	9.3	0.0	0.0	0.0
4	20.9	37.2	20.9	18.6	2.3	0.0
5	20.9	53.4	23.3	2.3	0.0	0.0
6	41.9	72.1	67.4	51.2	11.6	0.0
7	55.8	34.9	9.3	0.0	0.0	0.0
8	60.5	37.2	0.0	0.0	0.0	2.3

表2 2年生のアンケート結果

	ア	イ	ウ	エ	オ	無答
1	0.0	100.0	0.0			0.0
2	5.1	92.3				2.6
3	41.0	53.8	5.1	0.0	0.0	0.0
4	51.3	43.6	5.1	0.0	0.0	0.0
5	53.8	38.5	7.7	0.0	0.0	0.0
6	33.3	23.1	23.1	79.5	5.1	0.0
7	43.6	41.0	15.4	0.0	0.0	0.0
8	53.8	43.6	2.6	0.0	0.0	0.0

数字は百分率。質問6は複数回答可。

4-5-2 受講生の意見・感想

質問9で、マイクロスケール実験に対する意見や感想を求めた。主要なものを以下列挙する。

1年生：

- ・普段とは違い、一人で実験をすることができて良かったです。廃液を減らすこともでき良い実験方法だと思います。
- ・実験後に余った大量の薬品を見て、「もったいないなあ」、といつも気になっていたので、すばらしいと思います。
- ・試薬量が少なくて済むので、個人で実験することができ、実感を持つことができました。
- ・この講義をうけて、マイクロスケール実験は試薬量や廃液量の減少につながるとても環境に優しいものだとわかりました。
- ・時間も短く、自分のペースで進めることができるのでよかったです。

2年生：

- ・あまり難しくなく、すぐにできる実験でした。平衡の原理についてより深くわかりました。
- ・実験方法が簡単で結果がわかりやすくてよかった。
- ・試薬量が少なく、経済的にも環境にも優しいと思いました。
- ・簡単な作業で平衡移動のしくみが分かってよかった。
- ・わかりやすい説明で変化がはっきり出るのでよかったです。
- ・1つの箱の中ですべてできるので簡単で分かりやすかった。

このように、生徒の意見・感想にも、マイクロスケール実験に対して肯定的な内容が多く寄せられ、授業実践の成果が認められた。

4-5-3 実習教員の意見・感想

本授業実践を行うにあたり、ご協力いただいた実習教員の主な意見・感想をつぎに記す。

- ・試薬の種類が多いので、瓶の本体とキャップにカラーテープを貼っておいた。そのためか、間違える生徒はいなかった。
- ・当日の机上の準備は、すべてバット1つに入れたので並べるだけで時間がかからなかった。
- ・実験後、小瓶をバットに収納して省スペースで保管出来るので、とてもよいと感じた。
- ・廃液が少なく処理が楽だった。

以上、実験をサポートする立場からも、概ねマイクロスケール実験に対して肯定的な意見・感想が得られた。ただ、以下のような意見も頂戴した。今後の検討課題としたい。

- ・酢酸カリウムは、潮解性があるためしっとりした感じで口の小さい瓶に入れにくかった。
- ・試薬の種類と瓶の数が多く、準備と片付け（洗い物）に時間がかかった。
- ・濃塩酸入りのポリ滴瓶が数カ月で黄変していた。

5 おわりに

高等学校化学で取り扱われる電離平衡の移動と溶解平衡の移動を、東海林らの先行研究をもとに、1枚のセルプレートで迅速かつ簡便に実験できるマイクロスケール実験教材を開発した。

本手法を用いると、少量の試薬を用いて、容易かつ迅速に、平衡の移動を学習できる。廃液には有害な重金属イオンを含まないので、中和すればそのまま廃棄することも可能で、環境面、経済面からも優れている。

また、本教材を用いて授業実践を行ったところ、教育効果が非常に高く、コストもかからず、手軽にどの学校でもできる優れた実験であることも実証できた。

実験の準備と片付けを担当し、貴重な意見を寄せていただいた兵庫県立神戸高等学校実習教員の小田あすか氏に感謝申し上げる。

本研究は、JSPS 科研費24501072の助成を受けたものである。

文献と註

- 1) 荻野和子, 「マイクロスケール実験の広場」へのお誘い, 化学と教育, 49(2), 110 (2001).
- 2) 日本化学会編, マイクロスケール化学実験, 日本化学会 (2003).
- 3) 中川徹夫 (代表), 理科を専門としない教員のための指導資料の開発, 平成16-17年度科学研究費補助金基盤研究(C)(2), 課題番号16500539, <https://kaken.nii.ac.jp/d/p/16500539.ja.html>.
- 4) 中川徹夫 (代表), 小学校・中学校理科におけるマイクロスケール実験教材の開発, 平成18-19年度科学研究費補助金基盤研究(C), 課題番号18500650, <https://kaken.nii.ac.jp/d/p/18500650.ja.html>.
- 5) 中川徹夫 (代表), 理科に対する学習意欲を向上させるマイクロスケール実験教材の開発と改良, 平成20-23年度科学研究費補助金基盤研究(C), 課題番号20500748, <https://kaken.nii.ac.jp/d/p/20500748.ja.html>.
- 6) 文部科学省, 高等学校学習指導要領解説理科編理数編, 実教出版 (2009).
- 7) たとえば, 竹内敬人 他, 化学, 東京書籍, 154-162 (2012), 辰巳啓 他, 化学, 数研出版, 161-167 (2012) など.
- 8) 東海林恵子, 荻野和子, 「ルシャトリエの法則を視覚的にとらえるいくつかのsmallスケール実験」, 化学と教育, 49(10), 634-636 (2001).
- 9) 中川徹夫, 中澤克行, 「スーパーサイエンスハイスクール (SSH) におけるマイクロスケール実験の授業実践—ルシャトリエの原理—」, 日本化学会第94春季年会講演予稿集II, 3D1-01, 233 (2014).
- 10) 中川徹夫, 中澤克行, 「ルシャトリエの原理に関するマイクロスケール実験(1)—教材開発と改良—」, 第16回近畿地区化学教育研究発表会, 4, 7-8 (2014).
- 11) 中澤克行, 中川徹夫, 「ルシャトリエの原理に関するマイクロスケール実験(2)—授業実践—」, 第16回近畿地区化学教育研究発表会, 5, 9-10 (2014).
- 12) 松本誠司, 中川徹夫, 「兵庫県立東灘高等学校におけるマイクロスケール実験の授業実践—ルシャトリエの原理—」, 平成26年度日本理科教育学会近畿支部大会 (兵庫大会) 発表論文集, C-11, 49 (2014).
- 13) 前川奈央, 中澤克行, 小田あすか, 中川徹夫, 「兵庫県立神戸高等学校におけるルシャトリエの原理に関するマイクロスケール実験の授業実践」, 第17回近畿地区化学教育研究発表会, 2, 3-4 (2015).
- 14) 中川徹夫, マイクロスケール実験シート—小学校から中学校, 高等学校, 大学まで幅広い校種で活用できる魅力的な教材—, 神戸女学院大学 (2013).

(原稿受理日 2016年2月18日)