

## 平成27・28年度広域科学教科教育学研究経費報告書

プロジェクト名称 「反応速度の温度依存性を題材とした実験学習プログラムの開発」

研究代表者 自然科学系基礎自然科学講座 教授 小川 治雄

プロジェクトメンバー 連合学校教育学研究科 教授 國仙 久雄  
自然科学系基礎自然科学講座 准教授 生尾 光  
連合学校教育学研究科 2年 細江 剛史

金額(配分額) 平成27年度 568,000 円

平成28年度 349,000 円

### プロジェクトの概要

本研究で扱う反応速度やその温度依存性は高校「化学」で取り扱われ、理科の教員となる学生には重要な実験項目であるが実際に高校で実験を行った事のある学生はほとんどいない。本プロジェクトで開発する実験学習プログラムでは「簡単な反応」として過酸化水素の分解反応を扱う。そこでは、①反応速度を求めるために適切な実験方法を見だし、②滴定により過酸化水素濃度の経時変化を測定して反応速度が単位時間内に変化する物質の量で表されることや速度式を学び、③温度を変えた実験からは見かけの活性化エネルギーの算出方法を学ぶ。本研究の初年度は本学の1年理科生を対象に試行し、実験設備の不足などの問題点を抽出し次年度での試行に向けて改善した。2年目には改善した実験環境で試行し、学生の理解度をアンケートにより調査した。調査結果から活性化エネルギーの算出に困難を伴う学生がいたので、テキストに図などのイメージを用いた解説などの補強を行ったところ、反応速度の温度依存性についての理解が高まった。

本プロジェクトで開発した実験学習プログラムを平成 29 年度から「化学実験」に採用することができた。

## I 緒言

平成 29 年 3 月に公示された新学習指導要領(文部科学省, 2017)では, 中学校における理科の目標を以下のように定めている.

自然の事物・現象に関わり, 理科の見方・考え方を働かせ, 見通しをもって観察, 実験を行うことなどを通して, 自然の事物・現象を科学的に探究するために必要な資質・能力を次のとおり育成することを目指す.

- (1) 自然の事物・現象についての理解を深め, 科学的に探究するために必要な観察, 実験などに関する基本的な技能を身に付けるようにする.
- (2) 観察, 実験などを行い, 科学的に探究する力を養う.
- (3) 自然の事物・現象に進んで関わり, 科学的に探究しようとする態度を養う.

これらは, 小学校における理科の目標においても「探求」を「問題解決」のように表現は変更されているがほぼ同じ目標となっている. また, 現行の高等学校学習指導要領(文部科学省, 2009)に基づき出版された「化学基礎」や「化学」の教科書では, 単元毎に探求活動が設定されており学習における観察, 実験を重視した編集がなされている. この傾向は平成 30 年公示予定の高等学校新学習指導要領においても踏襲することが推測される. これらの目標を達成すべく生徒の資質・能力を育成するためには, 教員が観察, 実験などを安全に行うための基本的な技能を十分に習得し, 探求活動を指導する力量を持つ必要がある.

その一方, 小学校教員の理科実験に対する苦手意識が指摘されており(田村ら, 2004), 実験指導に積極的でない小学校教員の 70%が学生時代に実験を経験していないとの報告がある(田村ら, 2006). 本プロジェクトの代表者らは, 教師の理科の素養の向上をめざし, 教師教育用実験学習プログラムの開発を行ってきた. そこでは身近な食塩を題材とした種々の実験(生尾ら, 2008)や, 先端技術である燃料電池をトピックとした実験(生尾ら, 2009)を通して素養の向上がはかれるように構成し, 受講者が赴任校に戻っても実験が再現できるようにテキストに実験の詳細も記述した.

本学では理科を専門として学習していない教員に対して助言できる中核的な理科教員の養成を目指し, 初等教育教員養成課程・理科選修, 中等教育教員養成課程・理科専攻の 1 年生に対して, 「物理学実験」, 「化学実験」, 「生物学実験」, 「地学実験」の 4 実験を必修としている. これらの学生実験では理科の実験指導に必要となる基礎的な「知識や技能」として, 例えば「化学実験」では, 試薬の物性などの予習に基づい

て安全に配慮した実験計画の立案やその実施，正確な計量や測定方法等の習得を，また，観察記録やデータ処理を含めた実験ノートの使用，それらをまとめたレポート作成などを通して「科学的な思考力や判断力」およびその「表現力」を養っている．これらは3年生に対して開講されているより専門的な実験，例えば化学教室にあつては「物理化学実験」，「無機分析化学実験」，「有機化学実験」，そして「セミナー」さらには4年生に対して通年で開講されている「卒業研究」およびその発表への準備となっている．これらの全ての実験や講義と研究を通して，将来の学校現場で生徒に対して「見通しをもった観察，実験」あるいは「探求活動」の指導が行えるように配慮されている．

本プロジェクトで開発する実験学習プログラムでは，前述の「化学実験」の数あるテーマのうちから，高等学校「化学」で扱われる反応速度を題材とした実験を取り上げる．ここでは，精度良く反応速度を求める実験を行うための実験計画やその適切な実施と記録および，実験結果のデータ処理により一次の速度式適用の可否を判定し，より妥当な実験方法へと改善するようなサイクルを通して実験技能の習得を確実なものとする．また，一次の速度式を客観的事実から検証する態度を育成し，「科学的な思考力や判断力」の強化を目指す．更なる展開として，反応温度を変えた実験を行い，アレニウス式からみかけの活性化エネルギー( $E_a$ )を求める．このことにより，教科書に記載されている概念について実験し実際にその値を導き出すことができるようになる．

本実験学習プログラムで扱う内容は，現行の高等学校学習指導要領(文部科学省，2009)の「化学基礎」の(3)物質の変化 イ 化学反応，および「化学」の(2)物質の変化と平衡 イ 化学反応と化学平衡に深く関わる内容である．本プログラムでは「簡単な反応」として過酸化水素の分解反応を扱う．そこでの実験操作は化学実験における基本的な技能であり，その原理は小・中学校理科の「エネルギー」「粒子」を柱とした内容のうち，「粒子」に分類されている単元とも深く関わっている．例えば，小学校では第4学年の「金属，水，空気と温度」，第5学年の「物の溶け方」，第6学年の「水溶液の性質」に，また，中学校では第1分野(2)身の回りの物質 (イ)水溶液，(ウ)状態変化，(4)化学変化と原子・分子(イ)化学変化に関わっている．また，本プログラムでのデータ整理や作図およびレポートの作成は「科学的な見方や考え方」を養うこととなり理科の目標とも合致する．

## II 実験学習プログラム

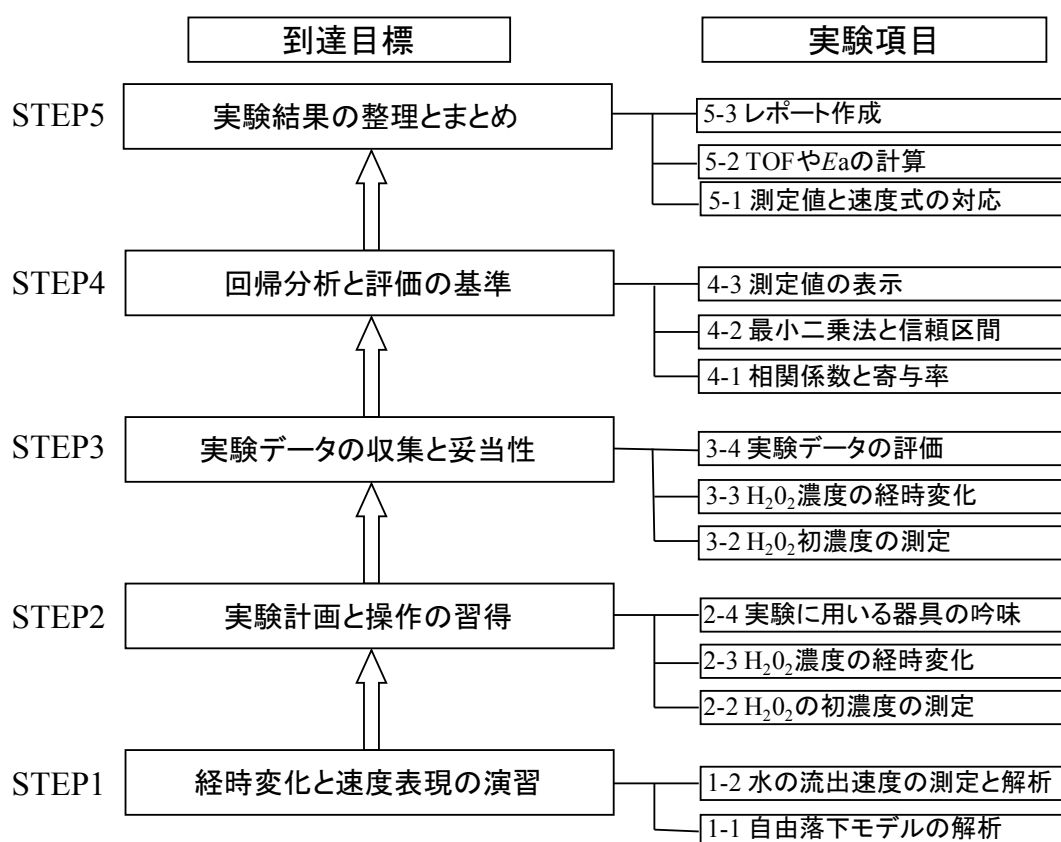
実験プログラムの流れと各ステップにおける到達目標および実験項目をスキーム1に示す．

プログラムは毎週 1 回、午後の3授業枠分(90 分×3 枠)で実験が行われ、3 週間をかけて完結する。学習者の実験技能を評価するため実験は 1 人で行う。

事前(0 週目)には学習者が主体的かつ安全に実験を行うため、事前学習として①使用する試薬の物性を調べ、実験の安全について考えてくること、②精度良く反応速度の測定を行うための実験計画を立案することの二つを義務付けている。具体的には、本学の Web サーバー上の解説ページ(TGU)にあるフローチャートや実験操作の写真を参考に、使用する器具名や操作内容をフローチャートとして実験ノートに記入してることが求められる。

1 週目には STEP1 の経時変化や速度表現を作図から理解する演習、および STEP2 として、次週に行う反応速度測定の予備実験を行う。ここでは実験操作に慣れるばかりでは無く、事前に作成した計画の不備を見だし次週に向けて計画の見直しを行う。

2 週目には STEP3 として実験計画に従った反応速度の測定を行う。一回目の実験は、本プロジェクトで購入した温度調節器を用いた恒温槽中 25℃で行う。実験は、環境に配慮し、スモールスケール(羽原ら, 2000)で行った。操作としては、触媒である鉄



スキーム1 反応速度実験の流れと各ステップにおける到達目標

ミョウバンを加え、 $\text{H}_2\text{O}_2$ 濃度の変化を $\text{KMnO}_4$ の滴定値の変化により追跡する。なお、測定回数は自由度が3以上を満たす5回以上を基本とする。

$$\ln(C_0/C) = kt \quad (1)$$

一次の速度式(1)において $\ln(C_0/C)$ と時間のプロットにおいて比例の関係が見いだされるか否かを検証するため、学習者は反応時間  $t$  (min)および、 $\text{H}_2\text{O}_2$ 濃度  $C$ に対応する $\text{KMnO}_4$ の滴定量  $X$  (mL)を評価ソフト(寺谷ら, 1995)に入力すること(図1)で直ちに経時変化(図2)や $\ln(X_0/X)$ と時間の関係(図3)を表示することができる。

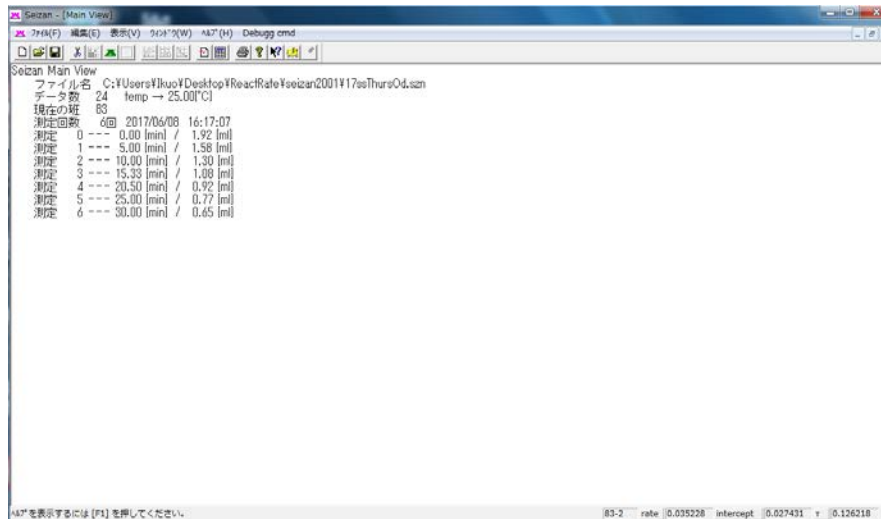


図1 評価ソフトの入力例

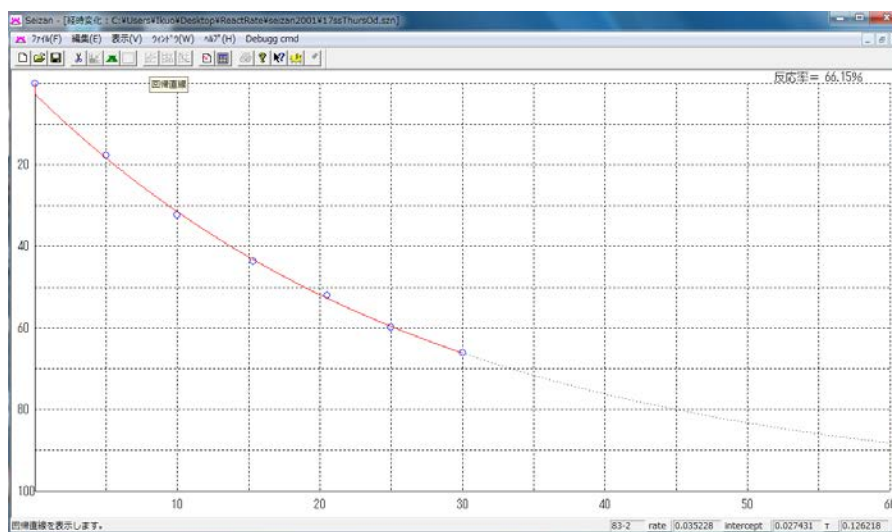


図2 過酸化水素反応率の経時変化

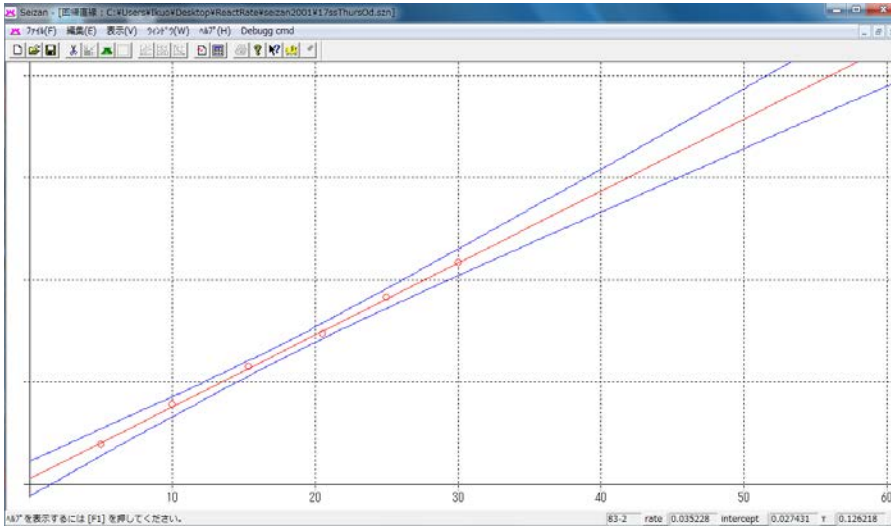


図 3 積分速度式の検証,  $\ln(X_0/X)$  と時間の関係

図 3 には、①最小二乗法により推定された直線(赤色)が 99.9%信頼限界(青色)と共に表示され、その傾きや②切片の値が図下の欄外に表示される。これらの 2 つの観点から比例の関係を見いだすことができれば一次の速度式により実験結果が説明できると判定され(寺谷, 1990), ①および②それぞれの度合いに応じて赤枠の外側から 2, 4, 6, 8, 10 の得点が表示される(図 4).

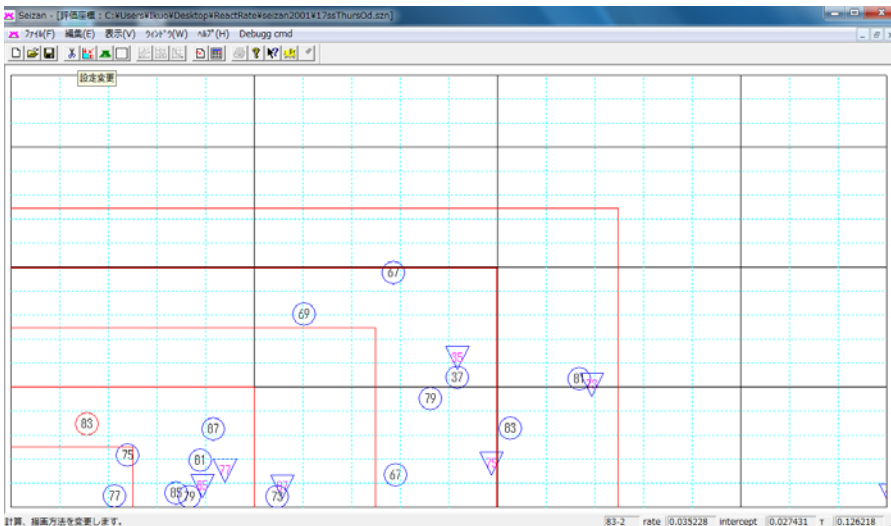


図 4 評価の座標

赤枠内に表示され 2 点以上の得点が得られた場合は当該テーマの実験技能を習得したと判断され温度を変えた実験へと進むことができる。本プロジェクトにより導入した温度冷却器(ハンディクーラー)と温度調節機を併用することで 0~35℃で恒温槽の温度制御が可能となり、任意の温度で測定ができるようになった(図 5)。

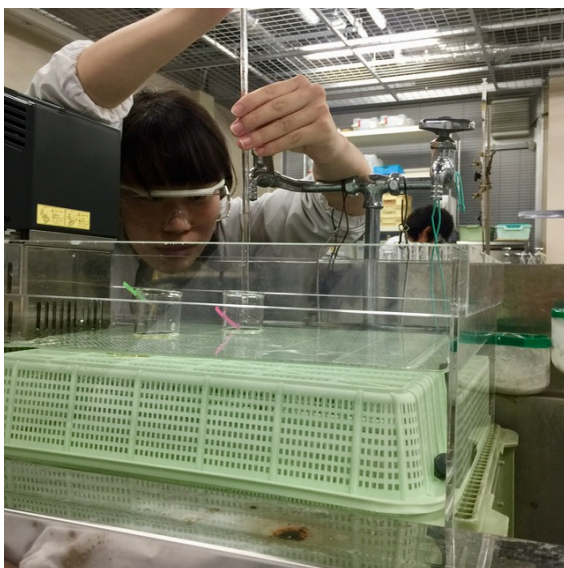


図 5 温度調節機を用いた恒温槽

一方、得点が赤枠の外 0 点となり技能が不十分と評価された場合は再実験が指示される。一般に、学生実験の現場では時間の制約から、そのデータの詳細な解析には困難を伴う。本プログラムでは評価ソフトを用いて迅速にデータの解析や評価がなされるため、学習者は直ちに結果を知り、前述の 2 つの評価基準を参考に実験計画を見直した上で再実験を行うことができる。具体的には、より精度の高いデータを得るために最適と思われるピペット等の測容器具の選定、反応系内の攪拌の有無、サンプリングの回数や時間間隔等の対策を講じフローチャートに加筆することで計画の見直しが行われる。評価ソフトを用いることで実験計画の見直しおよび再実験のサイクルを容易に行う事ができる。一次の速度式のような「仮説」を客観的事実から検証しようとする態度を育成することは、「科学的思考力や判断力」の強化につながるものと考えられる。

3 週目の STEP4 では、評価ソフトで行われる評価の根拠となる回帰分析と測定値の表示について各自のノートパソコンにより演習することでその手続きを確認する(図 6)。

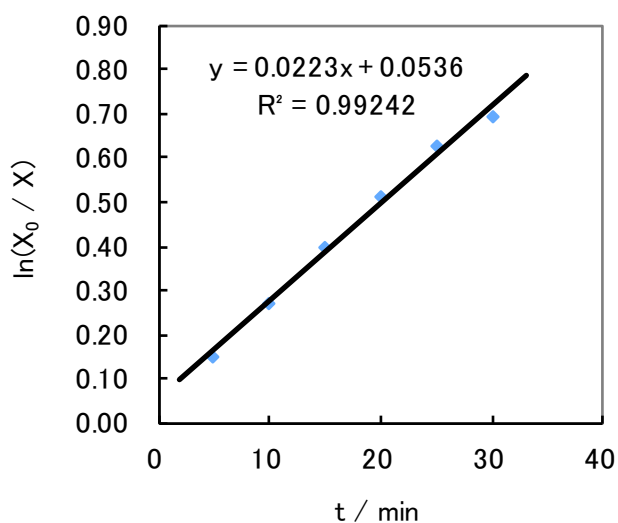


図 6 Excel で作成した図の例

STEP5 ではレポートを書くことを主眼に、実験結果の整理、客観的な根拠に基づく考察そして結論に至る過程を定型文(松原ら, 1996)の例を通して学ぶ。本プログラムを通し、精度良く反応速度を測定する方法と、根拠となる考え方(速度式)を確かめる手法を学び、結論に向かってレポートにまとめられるように構成している。

### III 実験学習プログラムの試行とアンケート調査

受講対象は、東京学芸大学教育学部の初等教育教員養成課程・理科選修および環境教育選修、中等教育教員養成課程・理科専攻の1年生であり、平成28年度に試行した3群の合計受講者数は108名であり、平均的な1群のサイズは34名であった。本実験プログラムは2人の教員と1人のティーチングアシスタントにより運営された。

試行の前後に、以下に示す①から④の反応速度に関わる概念、①「反応速度定数の算出」、②「反応速度の温度依存」、③「活性化エネルギーの算出」、④「金属イオン1個あたりの1秒間に反応する分子数(Turnover Frequency)の算出」に対する理解度の自己評価を求めた。理解度は以下のように得点化し、その変化を分析した。あてはまる:5点、ややあてはまる:4点、どちらともいえない:3点、ややあてはまらない:2点、あてはまらない:1点とした。

### IV 結果と考察



プログラムを試行した3つのすべての群で、①「反応速度定数の算出」、②「反応速度の温度依存」、③「活性化エネルギーの算出」、④「金属イオン1個あたりの1秒間に反応する分子数(Turnover Frequency)の算出」のいずれの得点も事後に増加した。

群1では①から④に対し、「あてはまる」「ややあてはまる」と回答した割合は、事後にそれぞれ 85.3, 88.2, 61.8, 70.6(%)となり、事前と比べ増加した。

表1 各反応速度に関わる概念の理解度の変化

群	教材	N	回答(得点)	活性化エネルギー / %					
				事前	事後	$\Delta^a$	前(5+4)	後(5+4)	$\Delta^{b'}$
1	【テキスト】	34	あてはまる(5)	0.0	23.5	23.5	5.9	61.8	-
			ややあてはまる(4)	5.9	38.2	32.4			
			どちらともいえない(3)	20.6	23.5	2.9			
			ややあてはまらない(2)	20.6	11.8	-8.8			
			あてはまらない(1)	52.9	2.9	-50.0			
2	【テキスト】 【式・グラフ による説明】	33	あてはまる(5)	0.0	54.5	54.5	12.1	84.8	23.1
			ややあてはまる(4)	12.1	30.3	18.2			
			どちらともいえない(3)	21.2	6.1	-15.2			
			ややあてはまらない(2)	33.3	6.1	-27.3			
			あてはまらない(1)	33.3	3.0	-30.3			
3	【テキスト】 【式・グラフ による説明】 【積分速度式 の説明】	35	あてはまる(5)	11.4	45.7	34.3	14.3	85.7	23.9
			ややあてはまる(4)	2.9	40.0	37.1			
			どちらともいえない(3)	22.9	14.3	-8.6			
			ややあてはまらない(2)	40.0	0.0	-40.0			
			あてはまらない(1)	22.9	0.0	-22.9			

<sup>a</sup>  $\Delta$  = 事後 - 事前

<sup>b'</sup>  $\Delta'$  = 後(5+4)群2 - 後(5+4)群1, 後(5+4)群3 - 後(5+4)群1.

しかし③「活性化エネルギーの算出」においては低くなっており(表1)、当該概念の理解に困難を伴う学生がいることがわかった。そこで、反応速度の温度依存性についての理解度を高めるために、アレニウスの式を用いて活性化エネルギーを求める計算について、テキスト中の解説を文字と式に加えて式の変形やイメージ図を用いた補強を試みた。

補強したテキストを群2, 3に試行した結果、③「活性化エネルギーの算出」に対する理解度について、あてはまる(5)、ややあてはまる(4)と回答した人数の合計の割合は、補強前の群1と比較して群2, 3でそれぞれ 23.1, 23.9ポイント増加し 84.8, 85.7%となり、補強していない他の3つの概念①, ②, ④と比べても明らかな改善が認められ

た。イメージ図を用いた補強を行うと反応速度の温度依存性についての理解度が高くなった。

アンケート調査の自由記述では、補強前の群1でみられた「 $E_a$  の定義や導出の方法」「式の意味がわかりづらい」「公式についての説明が少ない」などの  $E_a$  の算出手順に対する難しさについての記述が群2, 3においてはみられず前述の結果と符合する。頻度因子 A についての問いが寄せられた。今後、これらの説明を加えたテキストの改善を行う予定である。

以上、実験の実施とイメージを用いたテキストの補強によって、反応速度の温度依存性についての理解が深まる実験学習プログラムを作成する事ができた。

## 引用文献

羽原一美, 生尾 光, 寺谷 徹介: スモールスケール化学実験と品質評価, 日本科学教育学会年会論文集, 24, 241-242, 2000.

生尾 光, 岡田修一, 吉永裕介, 小川治雄: 燃料電池を題材とする実験プログラムの作成と実践, 科学教育研究, 33(3), 201-213, 2009.

生尾 光, 吉永裕介, 小川治雄: 教師教育用学習プログラムの開発: 食塩を題材とする実験プログラムを例として, 科学教育研究, 32 (1), 39-55, 2008.

松原静郎: 中等化学教育における個人実験を通しての科学的表現力育成に関する調査研究, 平成7年度科学研究費補助金(基盤研究 B)研究成果報告書, 6, 1996.

文部科学省, [http://www.mext.go.jp/a\\_menu/shotou/new-cs/1384661.htm](http://www.mext.go.jp/a_menu/shotou/new-cs/1384661.htm), 2017.

文部科学省, [http://www.mext.go.jp/a\\_menu/shotou/new-cs/youryou/index.htm](http://www.mext.go.jp/a_menu/shotou/new-cs/youryou/index.htm), 2009

田村美奈, 西脇永敏, 有賀正裕: 「理科好き」教員を育てることが大切-「教員の理科嫌い」を断ち切るために何が出来るのか, 化学と教育, 52(10), 676-679, 2004.

田村美奈, 西脇永敏, 有賀正裕: 化学を市民のものにするために-小学校教員の実験嫌いについて考える (アンケートを通して)-, 化学と教育, 54, (4), 186-189, 2006.

寺谷 徹介: 化学実験の設計: I 「反応速度」実験の指導, 東京学芸大学紀要第4 部門 数学・自然科学, 42, 35-59, 1990.

寺谷 徹介, 江沼 直樹: 反応速度実験評価ソフトウェア SEIZAN の開発, J. Chem. Software, 2(3), 135-140, 1995

TGU, <http://www.u-gakugei.ac.jp/~teratani/rr02/c2.htm>