

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 1 日現在

機関番号：10102

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2013

課題番号：22500797

研究課題名(和文) 見えない現象を観ることに挑戦する「化学反応とエネルギー」に関する新規実験教材開発

研究課題名(英文) The development of new experimental teaching materials for learning of "energy and chemical reaction" to visualize invisible phenomena

研究代表者

田口 哲 (TAGUCHI, Satoshi)

北海道教育大学・教育学部・教授

研究者番号：60281862

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円、(間接経費) 960,000円

研究成果の概要(和文)：若い世代の中学校理科教師の多くは、高校までの物理と化学の縦割り教育、高校での物理未履修などにより、「化学反応とエネルギー」の本質を微視的な(原子・分子レベルの)エネルギー変換の観点からは深く理解せずに教えている可能性がある。そこで本研究では、直接認識できる巨視的な実験結果(例えば、吸熱・発熱現象)を基に、目には見えない微視的な現象(化学結合の切断・生成など)を観ることでこの分野の本質的理解を学習者に促す、理科教員養成のための先導的な実験教材を開発した。

研究成果の概要(英文)：Many of junior high school science teachers of younger generation are poorly educated about physics in high school. Even if they received education for physics and chemistry in high school, they have learned chemistry without correlating with physics. Accordingly, they probably teach the relation between chemical reaction and concomitant energy conversion without understood fully from the viewpoint of chemical bond dissociation and formation at atomic level. In this study, we developed the experimental teaching materials for science teacher training to interpret chemical reaction being the perceptible macroscopic phenomena (i.e. endotherm and exotherm) from the viewpoint of microscopic phenomena (i.e. bond dissociation and formation).

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：科学教育・教育工学，科学教育

キーワード：科学教育 理科教育 化学教育 理科教員養成 科学教員養成 実験・観察

1. 研究開始当初の背景

本研究代表者は、平成 18～21 年度科研費基盤研究(C)で「食塩を主題とした科学知識の主体的体系化を促す探求型化学実験教材の開発と Web 化」の研究をおこなった。この研究では、上記主題の本質の理解には種々の科学知識が必要であることを明示し、学習者が、自然科学の階層的知識体系を探究的に構築できる新規実験教材の開発をおこなった。

その途上で、食塩 (NaCl) はなぜ水に溶解するのか、溶解や化学反応に伴うエネルギー変化 (吸熱・発熱など) はなぜ起こるのか、といった基礎的内容を学習者が理解するには、微視的 (原子・分子レベルの) 視点で化学結合の切断・生成に伴うエネルギー変化の理解が必須であると考えた。しかし高等学校までの物理学と化学の縦割り教育によって、この視点からの理解に課題があるのではないかと、との仮説を教育経験上持っていた。教員養成系大学として、理科の教員を目指す学生にはこの視点からの体験を伴った教育は不可欠と考えていた。

また電気分解と化学電池の学習において、中学校理科では、化学エネルギーと電気エネルギーの相互変換としてこれらを抽象的に扱っている。高校化学では、これらが互いに逆反応であることは扱われているが、反応に伴う電子の (静電的ポテンシャル) エネルギーの変化の視点からの考察はない。

さらに、若い世代の (特に化学を専攻しなかった) 中学校理科教師の多くは、高等学校で物理を未履修であることに加え、98 年の教免法施行規則の改正に伴う教科専門科目必修 40 単位の半減で、後述のように理科教育の中でも特に重要な「化学反応とエネルギー」の本質を深く理解しないまま教えている可能性があった。

2. 研究の目的

そこで、直接認識できる巨視的な実験結果 (例: 吸熱・発熱現象) を基に、目には見えない微視的な現象 (例えば、化学結合の切断・生成に伴うエネルギー変化) を “観る” ことで「化学反応とエネルギー」の本質的理解を学習者に促す、理科教員養成における先導的な実験教材等を開発することを本研究の主たる目的とした。なおこれは、現職教員の再教育教材や中学・高校生を対象とした発展的的化学教材としての機能も同時に合わせ持つものとした。

3. 研究の方法

(1) 小・中・高等学校の物理分野と化学分野におけるエネルギー概念の形成過程を共に調べ、微視的視点での化学結合の切断・生成に伴うエネルギー変化の理解に関する課題を明らかにする。

(2) その課題を解決するための、「化学反応とエネルギー」に関する巨視的視点からの実験教材を開発する。

(3) 巨視的な実験結果を基に、目には見えない微視的な現象である「化学結合の切断・生成に伴うエネルギー変化」を “観る” 教材を開発する。

(4) 開発した教材を用いた教育実践を行なう。

4. 研究成果

(1) 「化学反応とエネルギー」の取り扱いに関わって、中学校・高等学校学習指導要領解説および現行の中学校理科と高校化学の教科書をレビューしたところ (図 1)、以下の課題が明らかになった。

中学校理科では、反応で熱が吸収・放出される事実を確認し、その基は化学エネルギーであるという抽象的な説明がなされる。高校化学現行教科書では、化学結合の切断・生成に伴う微視的視点でのエネルギー変化を巨視的な吸熱・発熱現象と結び付ける記述はない。

高等学校学習指導要領解説でも「化学反応の前後における物質のもつ化学エネルギーの差が熱、光の発生や吸収となって現れることを理解させる」といった記述にとどまり、微視的視点から “化学エネルギーとは何か” には迫っていない。

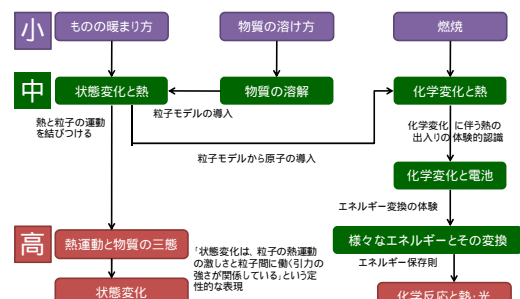


図 1 化学領域におけるエネルギー概念教育の系統性

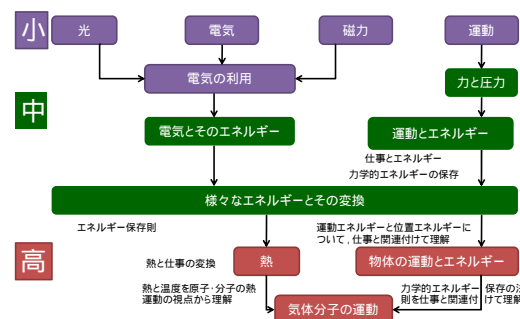


図 2 物理領域におけるエネルギー概念教育の系統性

結合の切断や生成に伴う熱エネルギーの出入りの理由を明確に理解するには、結合の切断に伴って分子同士・原子同士に仕事が行なわれポテンシャルエネルギー

が増加することを認識する必要があり、そのためには物理領域で形成されるエネルギー概念が欠かせない(図2)。しかし、化学領域で形成されるエネルギー概念と物理領域で形成されるエネルギー概念は、カリキュラム上接続されていない。

- (2) そこで、高等学校化学領域で形成されるエネルギー概念と高等学校物理領域で形成されるエネルギー概念を接続する理科教員養成カリキュラムの構築を目指し、熱エネルギーと化学(結合)エネルギーの相互変換を可視化する教材の開発を行った。以下に巨視的視点から開発した実験教材の幾つかを示す。

「アセトンの液体から気体への状態変化に伴う温度変化の測定」

沸騰石 2-3 個とアセトン 55g を入れた 300ml 丸底フラスコに、ガラス管 2 本(温度センサー挿入用・圧力センサー接続用)と三方コック付ガラス管を挿入したシリコン栓を接続した後、電子天秤でフラスコの質量を測定した。この丸底フラスコのガラス管の一方に圧力センサーを接続し、もう一方には温度センサーを挿入した。また、三方コック付ガラス管に真空ポンプ用ゴムチューブをつないで減圧ポンプに接続した。25℃ に設定した恒温槽に、このフラスコを入れた(写真1)。アセトンの温度が一定になったのを確認した後、フラスコ内部を小型減圧ポンプで 5 分間減圧した(約 30kPa, 写真2)。減圧終了後、フラスコに付いた水滴をよく拭き、再びフラスコ全体の質量を測定した。

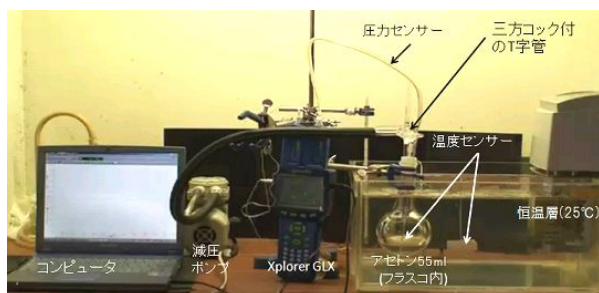


写真1 アセトンの液体から気体へ状態変化に伴う温度測定(ドラフト内)



写真2 減圧下(約30kPa)で室温でも沸騰しているアセトン

この結果、101kPa から 30kPa への減圧によってアセトンが室温下で沸騰し続け(写真2)、このフラスコ全体の質量が 5 分間の減圧で平均 0.64 g 減少した。この質量減少の再現性は高かった。この事実から、減圧に伴って液体から気体への状態変化が起こっていることを認識させる。減圧でアセトンの温度は低下し、恒温槽の温度より常に低い状態を維持した(図3)。この実験事実と上の認識から、液体から気体への状態変化、すなわち化学結合の切断に伴って熱エネルギーが吸収され続けていることを認識させる。

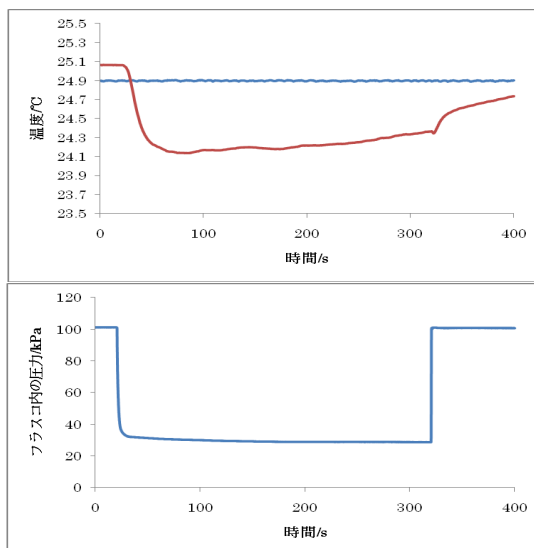


図3 アセトン 55g を入れた 300ml 丸底フラスコを減圧したときの温度(上、赤(青は恒温槽の温度))と圧力(下)の変化。

「酢酸ナトリウム三水和物の液体から固体へ状態変化に伴う温度変化の測定」

酢酸ナトリウム三水和物の過冷却液体が入った試験管側面に等間隔で温度センサーを 3 個貼り付けた。それぞれの温度センサーはデータロガーを経由しコンピュータに接続した。試験管のシリコン栓を外し、酢酸ナトリウム三水和物の結晶 1 粒を入れたときの温度変化を温度センサーで測定した。温度は、コンピュータのモニター上のグラフにリアルタイムで表示させた。

試験管に結晶を 1 粒入れると、試験管の上部から下部に向かって液体から固体への状態変化が起こった(写真3)。状態変化が到達した温度センサーから順に温度が上昇し、最終的に約 25℃ から 45℃ まで 20℃ 程度の温度上昇を観測した。温度変化は、中央部のセンサーが最も大きかった。この結果から、液体から固体への状態変化、すなわち化学結合の生成に伴って熱エネルギーが放出されることを認識させる。なお、中央部のセンサーが最も大きな温度変化を観測した理由は、状態変化に伴って発生した熱エネルギーが

試験管の上部からも下部からも伝搬したためと考えられる。

この実験は、液体から固体への状態変化に伴って熱エネルギーが放出されることを認識させることを目的としたが、この際、酢酸ナトリウム三水和物の質量に変化が起きていないことも確認した。

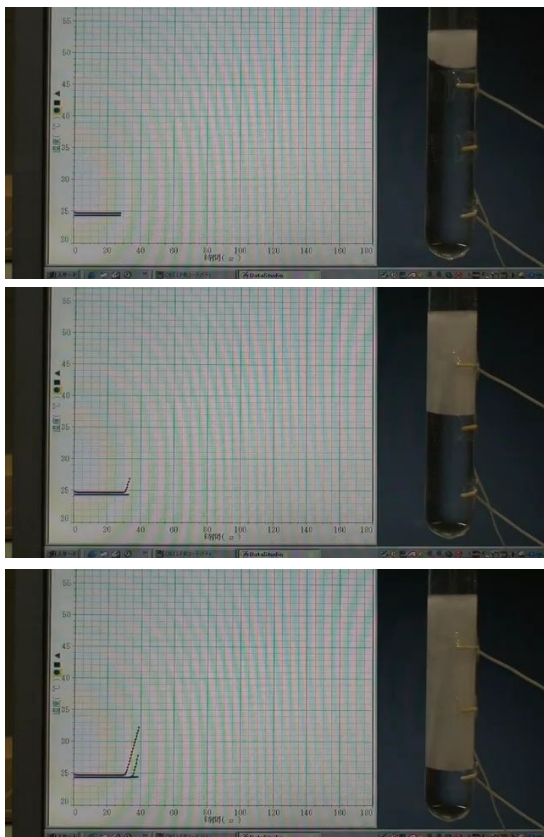


写真3 酢酸ナトリウム三水和物の過冷却液体の状態変化に伴う温度測定

この他、「 $\text{HCl}(\text{g})+\text{NH}_3(\text{g}) \rightarrow \text{NH}_4\text{Cl}(\text{s})$ に伴う温度変化の測定」「塩化アンモニウムの水への溶解に伴う温度変化の測定」「塩化リチウムの水への溶解に伴う温度変化の測定実験」といった実験教材も開発した。

(3) 上記実験教材を用いた「状態変化と化学変化に伴う熱の出入りについての経験的認識」のもと、化学エネルギーを、原子・分子の持つポテンシャルエネルギーの視点から捉えなおすことを目的として、目には見えない微視的な現象（化学結合の切断・生成に伴うエネルギー変化）を“観る”教材を開発した。

「錘の持ち上げに伴う仕事の測定」

回転(距離)センサーと力センサーを用いて、錘を持ち上げる際の移動距離と引く力の大きさを同時に測定する(写真4)。この測定結果を用いて、移動距離 vs. 力のグラフをコンピュータで作成する。中学校で学習する仕事の定義式【仕事(J) = 力(N) × 移動距離(m)】から、おもりになされた仕事をこのグラフから求める(図4)。最終的に、この錘持ち上げの仕

事はポテンシャル(位置)エネルギーの増加に使われたことを認識させる。

「ゴム又はバネによりモデル化した化学結合の伸長・切断に伴う仕事の測定」

原子(分子)を発泡スチロール球で、化学結合をバネ又はゴムで各々モデル化し、回転(距離)センサーと力センサーを用いて、このモデルの結合距離を伸ばした際の仕事を上記と同様の方法で求める(写真5、図5)。で身につけた認識とこの操作から、粒子間の結合距離を伸ばし結合を切るには仕事が必要であり、その際ポテンシャルエネルギーが増加することを認識させる。

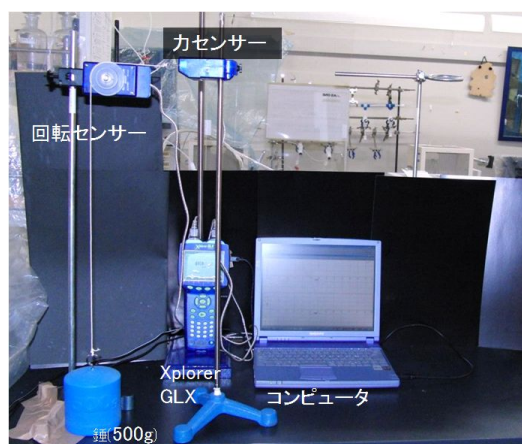


写真4 錘の持ち上げに伴う仕事の測定

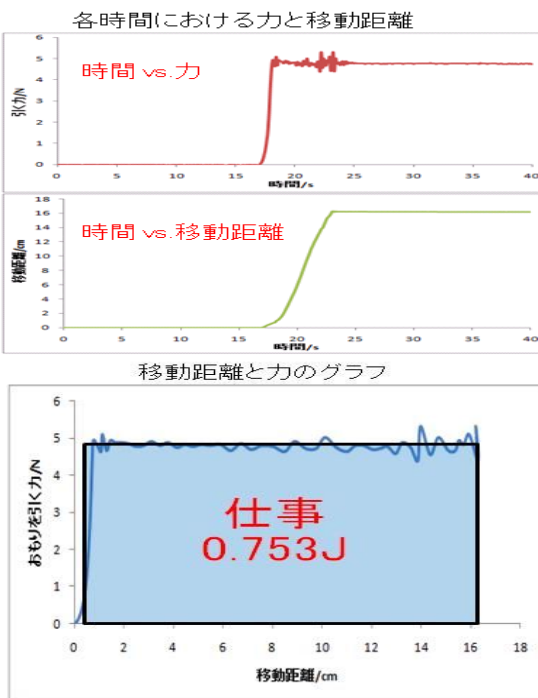


図4 錘の持ち上げ仕事の見積もり方法

「金属球を用いた分子モデル同士の衝突による熱エネルギーと化学エネルギーの相互変換のシミュレーション」

ここでは、ワイヤーでぶら下げた金属球で原子(分子)を、バネ又はゴムで結

合を各々モデル化した(写真6)。持ち上げたあと手を離すことで運動している右の金属球は、熱エネルギーを持った分子をモデル化している。この金属球をバネ(ゴム)でつながった静止した2個の金属球に衝突させた(写真7)。このとき、結合(バネ又はゴム)が伸びる(切断する)と同時に、運動していた金属球は衝突後ほぼ停止した。この様子は、ハイスピードカメラで連続撮影し、動画化した。

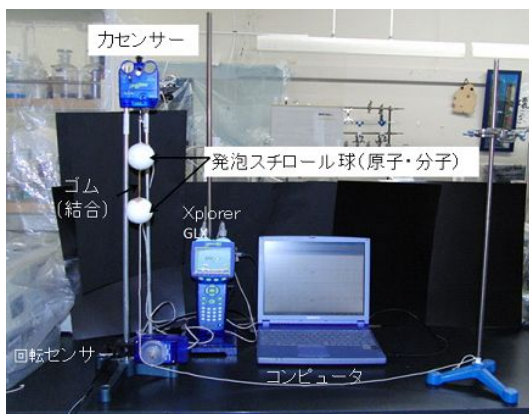


写真5 ゴムによりモデル化した化学結合の伸長・切断に伴う仕事の測定

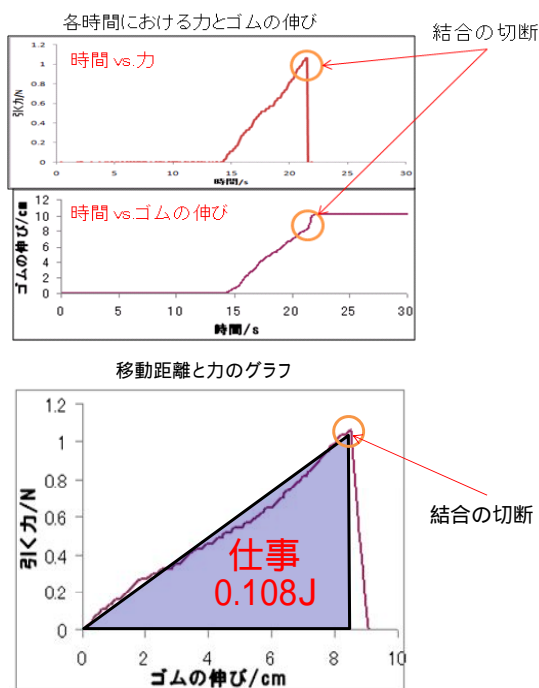


図5 ゴムでモデル化した化学結合の伸長に対する仕事の見積もり方法

(2)と(3)を基に、このシミュレーション動画教材によって、化学結合の切断に伴って熱エネルギーが吸収され、それはポテンシャルエネルギー(化学エネルギー)に変換される過程であることを認識させる。すなわち、熱エネルギーを持った分子(原子)が結合を持った分子にぶつくと、熱エネルギーを持った分子(原子)は結合を持った分子に対し

て仕事をし、化学結合した分子(原子)のポテンシャルエネルギーが増加する。ゴムを用いた場合は、ゴムが切断されることで、状態変化や化学変化の際に化学結合が切断されることをシミュレーション出来る。このシミュレーションにより、熱エネルギーが結合の切断に使われるため吸熱し、この熱エネルギーが分子の持つポテンシャルエネルギーに変換され化学エネルギーが増加することをイメージさせる。また、上記の動画を逆再生することで、化学結合の生成は、ポテンシャルエネルギー(化学エネルギー)が低下し熱エネルギーに変換される過程であることを認識させる。

以上の教材を用いて微視的な観点から、熱エネルギーと化学エネルギーの相互変換を可視化し理解させる。

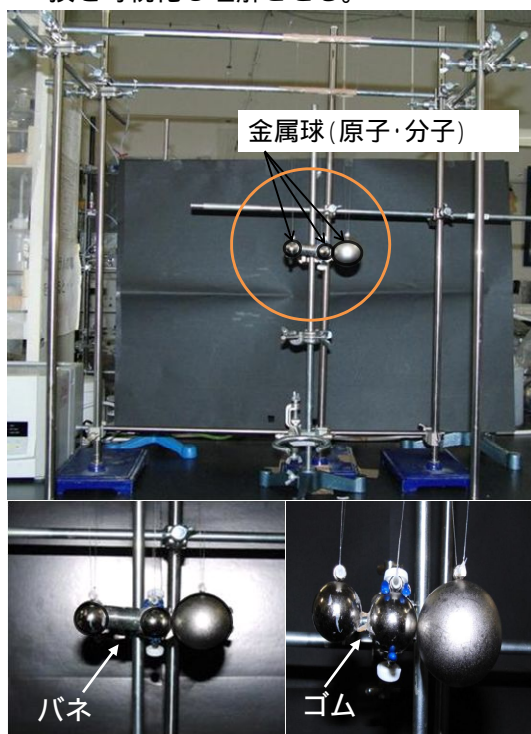


写真6 金属球とバネ(左下)・ゴム(右下)を用いた分子モデル

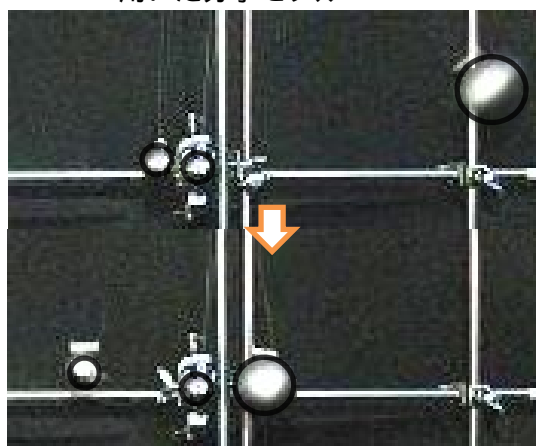


写真7 写真6の金属球同士の衝突により結合(ゴム)が切断する様子

この他、電気エネルギーと化学エネルギーの相互変換についての実験教材の検討、上記を活用した実践等もおこなった。

下記の発表論文等の他にも、現在、上記研究成果を論文として投稿する準備を進めている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計2件)

Satoshi Taguchi, Masanari Kondo, Hiroki Mori, and Akiko Aramata, Formation of zinc-oxianion complex adlayer by underpotential deposition of Zn on Au(111) electrode: preferential formation of zinc monohydrogen phosphate complex in weakly acidic solutions, *Electrochimica Acta*, 査読有, Vol.111, 642-655 (2013)
DOI:dx.doi.org/10.1016/j.electacta.2013.07.217

田口 哲・佐藤久典, 条件制御下での食塩水滴からの結晶析出観察用顕微鏡システムの製作, *化学と教育*, 査読有, Vol.61 (5), 250-253 (2013)
<http://ci.nii.ac.jp/lojnavi?name=nel&lang=jp&type=pdf&id=ART0010077128>

[学会発表](計7件)

有田 稜, 田口 哲, 化学電池の起電力の温度変化測定による熱力学的物理量の決定, 日本化学会第94春季年会, 2014年3月29日, 名古屋大学東山キャンパス 仲鉢大地, 小川瑞紀, 田口 哲, Pt多結晶電極上へのupd Znの吸着サイトとZn/Pt(poly)上での硝酸イオン還元, 化学系学協会北海道支部2014年冬季研究発表会, 2014年1月29日, 北海道大学札幌キャンパス 学術交流会館

淵上 哲, 田口 哲, 過塩素酸水溶液中のAg/Pt(111)電極上での硝酸イオン還元, 化学系学協会北海道支部2014年冬季研究発表会, 2014年1月29日, 北海道大学札幌キャンパス 学術交流会館

田口 哲, 粒子概念を教えられる教師をどう育てるか, 日本理科教育学会第63回全国大会 シンポジウム:新学習指導要領を考える2:粒子概念をどう教えるか-小中高を貫く粒子概念の系統的指導のあり方-, 2013年8月11日, 北海道大学札幌キャンパス 高等教育推進機構

田口 哲, 淵上 哲, ディスポーザブルシリンジとルアーストップコックを利用した未知の気体の同定実験教材, 日本化学会第93春季年会, 2013年3月24日, 立命館大学びわこ・くさつキャンパス
田口 哲, 大滝優実, 注射器・カセンサー・

GPS・Google earthを活用した大気圧測定実験, 日本化学会第92春季年会, 2012年3月27日, 慶応義塾大学日吉キャンパス

S. Taguchi, S. Yoshikawa, H. Sato, Visualization of systematically-designed chemical demonstrations using sodium chloride for understanding of important chemical concepts, The 2010 International Chemical Congress of Pacific Basin Societies (Pacifichem 2010), 2010年12月19日, Honolulu, Hawaii, USA

[図書](計3件)

Satoshi Taguchi 他25名(5番目), Effective Instruction of Experiments and Observations - The Three States of Matter: Present State of Particles in Matter-, Project of Science, Hokkaido University of Education, pp.57-60 (2013)

<http://www.asa.hokkyodai.ac.jp/research/staff/rikaproj/>

浅川哲弥 小原 繁 蠣崎悌司 田口 哲, 平山雄二, 解説実験書『新しい北海道の理科』化学編, 北海道教育大学(「21世紀型実践的指導力を有した理科教員の養成・支援プログラムの開発」プロジェクト), pp.1-166 (2012)

<http://www.asa.hokkyodai.ac.jp/research/staff/rikaproj/books.html>

田口 哲 他27名(19番目), 中学校理科教科書 未来へひろがるサイエンス3年(1・2分野)平成23年度用補助教材, 新興出版社 啓林館, 1-77 (2011)

6. 研究組織

(1)研究代表者

田口 哲 (TAGUCHI, Satoshi)

研究者番号: 60281862