

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月13日現在

機関番号：10102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2018

課題番号：26350222

研究課題名(和文) 実験で深化させた粒子認識を持つ理科教員を養成するための系統的实验教材開発

研究課題名(英文) Development of systematic experimental teaching materials for training science teachers who acquired deep particle recognition by experiments.

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) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：初等・中等教育の理科教育の化学分野は、「粒子」を科学の基本的な見方や概念の柱に据え、内容の構造化・系統化が図られた。一方、理科教員を目指す学生の入学時の粒子認識は、物質は粒子(原子)でできているとの前提(教科書に書いてあった)を基に演繹的推論だけで身につけてきたものであり、探究的な実験に基づいて「直接的には見えないが物質は確かに粒子からできている」との確信に至ったものとは必ずしも言えないのが現状である。そこで、科学者が粒子観を獲得するに至った歴史的实验の再現・追試を含め、「巨視的・微視的双方の視点から、実験に基づいて粒子認識を深化させた中学校理科教員」を養成するための系統的实验教材を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果は、理科の学習指導要領解説でも基本的な見方や概念の柱に据えられている(目には直接見えない)「粒子」の存在を、机上の空論ではなく、体験的かつ体系的に認識した理科教員を養成するための教材の在り方を提案するものであり、優れた理科教員を養成するための環境構築という点で学術的意義や社会的な意義がある。このような体系的な教材を開発した事例は知られていない点からも意義があると考えられる。

研究成果の概要(英文)：In the chemical education in primary and secondary school, "particles" were put in the pillar of the basic view and concept of chemistry, and chemical education has been systematized with this basic view and concept. On the other hand, the particle recognition at the time of University of education admission of the student who aims to be a science teacher is based on the view that the substance is made up of particles (atoms) since it was written in the textbook. In other word, this view is not the result that came to the conviction that "the particle is not visible directly but substances must be made of particles" based on exploratory experiments. Therefore, we developed systematic experimental educational-materials for training of the junior high school science teachers who deepen particle recognition of substance based on experiments from both macroscopic and microscopic perspectives, including the reproduction of historical experiments.

研究分野：化学教育，科学教育，物理化学，電気化学

キーワード：科学教育 化学教育 科学教員養成 実験・観察 原子・分子 イオン 粒子 物質認識

1. 研究開始当初の背景

本研究代表者は、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」(平成18年度~21年度)「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の開発」(平成22年度~25年度)の研究を行った。前者では、食塩の理解には種々の科学知識が必要であることを明示し、自然科学の階層的知識体系を学習者が探究的に構築する実験教材を(図1)、後者では、化学結合の切断・生成といった直接見えない微視的現象の本質的理解を学習者に促す理科教員養成の為の実験教材を開発してきた(写真1)。



図1 食塩を主題とした実験教材の体系

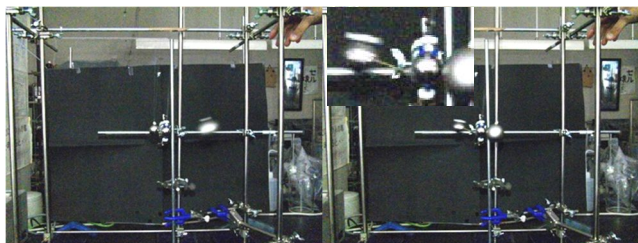


写真1 熱エネルギーの化学エネルギーへの変換モデル

る教師をどう育てるか 日本理科教育学会第63回全国大会論文集, Vol.11, pp. 73-74 (2013) )、6割の学生は、粒子の实在を前提とすると演繹的に現象の説明が可能だから化学を粒子で考えたと答えた。すなわち、中学校理科教員を目指す学生達の粒子認識は、物質認識の科学史を踏まえてはいない。また大学での理科教員養成でも、粒子の实在を前提に化学教育が展開されており、それを実験等で改めて教育することは稀である。

2. 研究の目的

学習指導要領解説(理科編)では、小・中・高等学校の化学分野は、「粒子」を科学の基本的な見方や概念の柱に据え、内容の構造化・系統化が図られている。一方、小・中学校理科教員を目指す学生の入学時の粒子認識は、物質は粒子(原子)でできているとの前提(教科書に書いてあった)を基に演繹的推論だけで身につけてきたものであり、探究的な実験(体験)に基づいて「直接的には見えないが物質は確かに粒子からできている」との確信に至ったものとは必ずしも言えないのが現状である。そこで、科学者が粒子観を獲得するに至った歴史的実験の再現・追試を含め、「巨視的・微視的双方の視点から、実験に基づいて粒子認識を深化させた中学校理科教員」を養成するための系統的实验教材を開発することを目的とした。なお、科学史における粒子観の獲得過程を意識しながら、以下の枠組みで、粒子認識の深化を図る探究的な実験教材を開発し、さらにそれをを用いた教育実践を行い開発した教材を評価した。

- (1) 巨視的な物質認識を定着させる実験教材
- (2) 巨視的な物質認識を微視的な物質認識に繋ぐ実験教材
- (3) 微視的な物質認識を深化させる実験教材

上記教材では「物質は粒子でできている」という物質観を前提とした。小・中・高等学校理科の学習指導要領解説でも、化学分野は「粒子」を基本的な見方や概念の柱に据え、スパイラルを描く系統的教育が強調されている。

一方、科学史を顧みると、粒子の实在は簡単には認められていない。原子論者(ボルツマンら)とエネルギー論者(マッハら)との間の深刻な対立が19世紀にあった。同世紀初頭には、ドルトンの原子説やアヴォガドロの分子説といった粒子概念の有用性は知られていたが、エネルギー論者は、科学は観測可能な事実だけに依拠すべきだと考え、概念が有用でも未観測な粒子の实在を認めなかった。この实在が認められたのは、20世紀に入りアインシュタインが構築した「ブラウン運動の理論」に基づき、ペランが、物質の粒子性を表すアヴォガドロ定数  $L$  の値を実験で求め、それが他の方法で得られた  $L$  の値と一致したためである。

しかし調査したところ、中学校理科教員を目指す学生の粒子認識は、19世紀初頭の原子・分子説止まりであることが分かった(田口 哲, 粒子概念を教えられ

### 3. 研究の方法

可能な限り、身近な素材や器具，教員養成系大学・学部でも入手可能な実験装置を用いることを前提とした教材の開発を行った。また，開発した教材は可能な限り実践で使用し，その教材の有用性を評価した。個々の教材に関わる具体的な研究方法は以下の研究成果で合わせて示した。

### 4. 研究成果

#### (1) 巨視的な物質認識を定着させる実験教材

無色透明で不可視でも気体は質量を持ち種類（個性）があるという物質観を定着する簡便な実験教材を開発した。具体的には，ディスプレイシリンジ（写真2）と電子天秤を用いた未知気体の定量的同定実験を考案した。上記シリンジに少量（10 mL）の未知の気体（ $O_2$ ,  $N_2$ ,  $CO_2$ ）及び空気を大気圧下で入れ，その気体の質量（電子天秤で測定：写真3），体積，温度，大気圧から理想気体の状態方程式を用いてモル質量（分子量）を求め気体を同定した。

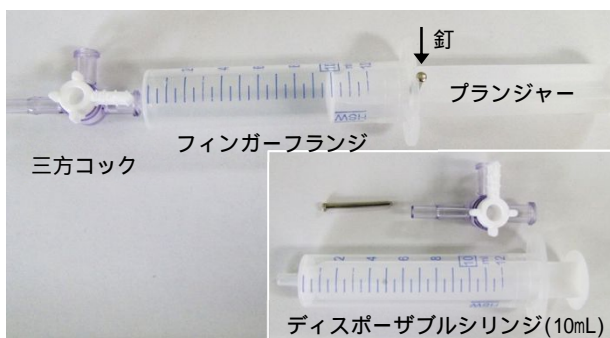


写真2 未知気体の定量的同定実験に使用した器具



写真3 電子天秤を用いて気体の質量を測定

シリンジ内部に空気を残さず未知気体を入れる工夫，大気圧以上で気体をシリンジ内に入れない工夫をして（写真4），少量でも精度良く気体同定が可能な教材を開発した。なお空気中の気体の質量測定は，空気による浮力の影響を無視できない。シリンジの同体積を真空にした際の質量も測定し，その質量を気体入りシリンジの質量から差し引き浮力の影響を相殺した。本教材を，理科教員を目指す教員養成課程の学生に実践した結果（表1），未知気体の定量的同定が可能であることが明らかになった。

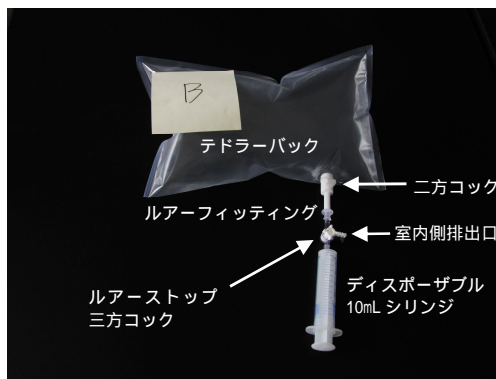


写真4 未知気体入りテドラーバックをシリンジに接続

表1 未知気体および空気モル質量  $M$  の実践における測定結果。空気を除き，ボンベからテドラーバックに気体を移し，そこからシリンジに気体を注入した。未知気体Aは  $N_2$ ，未知気体Bは  $O_2$ ，未知気体Cは  $CO_2$ 。

| 実験班                             | $M$ (未知気体A)/g mol <sup>-1</sup> | $M$ (未知気体B)/g mol <sup>-1</sup> | $M$ (未知気体C)/g mol <sup>-1</sup> | $M$ (空気)/g mol <sup>-1</sup> |
|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|------------------------------|
| 1班                              | 27.9                            | 31.5                            | 42.4                            | 28.6                         |
| 2班                              | 27.8                            | 31.7                            | 42.3                            | 28.6                         |
| 3班                              | 28.2                            | 32.1                            | 42.4                            | 28.7                         |
| 4班                              | 28.5                            | 31.6                            | 42.7                            | 28.7                         |
| 5班                              | 28.0                            | 32.4                            | 43.0                            | 29.7                         |
| 6班                              | 28.1                            | 31.3                            | 41.3                            | 28.3                         |
| 7班                              | 27.9                            | 31.3                            | 41.4                            | 28.6                         |
| 8班                              | 27.4                            | 31.1                            | 42.6                            | 28.4                         |
| 9班                              | 28.2                            | 32.5                            | 43.2                            | 28.6                         |
| 10班                             | 28.4                            | 32.0                            | 43.0                            | 28.6                         |
| 11班                             | 26.9                            | 31.6                            | 41.9                            | 28.1                         |
| 12班                             | 29.2                            | 31.4                            | 43.8                            | 28.7                         |
| 13班                             | 29.0                            | 31.9                            | 43.7                            | 28.3                         |
| 14班                             | 28.7                            | 31.6                            | 43.2                            | 28.0                         |
| 15班                             | 28.2                            | 31.9                            | 42.6                            | 28.0                         |
| 16班                             | 28.1                            | 32.5                            | 45.5                            | 28.1                         |
| $\bar{M}$ / g mol <sup>-1</sup> | 28.2                            | 31.8                            | 42.8                            | 28.5                         |
| $s$                             | 0.5                             | 0.4                             | 1.0                             | 0.4                          |
| $cv$                            | 0.02                            | 0.01                            | 0.023                           | 0.01                         |

(2) 巨視的な物質認識を微視的な物質認識に繋ぐ実験教材

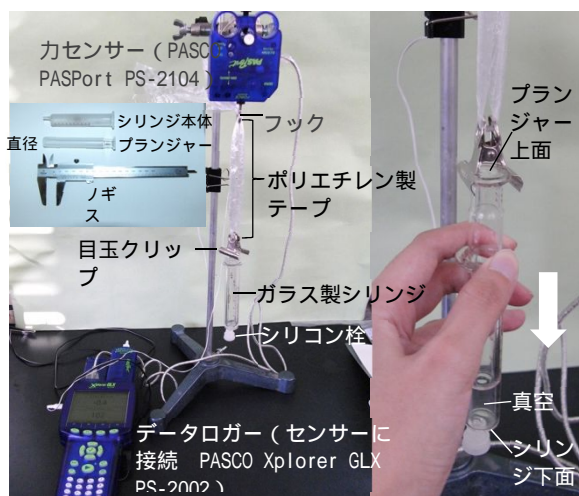


写真5 考案した実験システム



内部が真空のガラス製注射器 (左図) のピストンを伸縮しない紐でカセンサーに接続し、大気圧に逆らって注射器本体を手で引く力を測定することで大気圧を簡便に測定できる教材を開発した (写真5)。工夫のポイントは、ピストンが滑らかに動くと共に注射器内部を真空に保つ工夫 (潤滑剤の選択)、一定の力で注射器を引く工夫である。まずは大学研究室 (標高10m) で測定を重ね、引く力をピストン断面積で割り大気圧が求められるかを確認したところ、求められることがわかった。

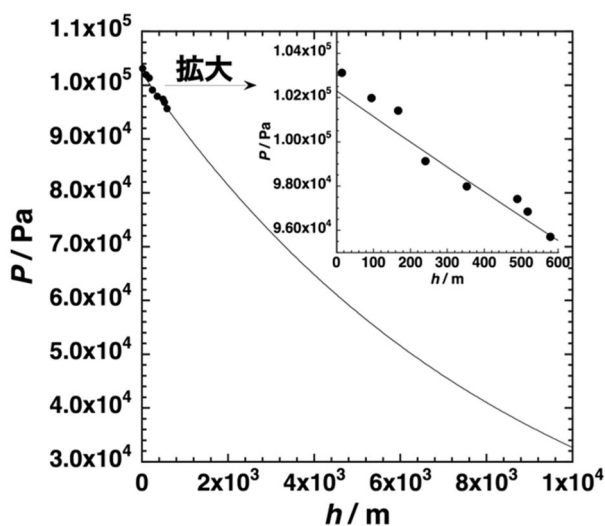


図2 大気圧の標高依存性の理論曲線と本教材を用いた測定結果

次に、異なる標高地点 (GPS, Google Elevation API 使用で標高取得) で同様の測定を行ない、大気圧の標高依存性を調べた。測定は、札幌市手稲山において、温度一定条件にするため車内で行なった。大気圧の測定結果の標高依存性を図2に示す。標高 vs. 大気圧のグラフはボルツマン分布則にしたがっており、その考察から、標高による大気圧の違いは空気の密度の違い、すなわち単位体積あたりの空気の分子数の違いによることがわかり、微視的視点で空気を捉え直す教材となりうるということが明らかになった。すなわち「気体分子の衝突による力」を実感しつつ大気圧の測定が簡便にでき、またその標高依存性も測定できる実験教材が開発できた。

本研究の成果は、現在、論文としてまとめているところである。

(3) 微視的な物質認識を深化させる実験教材

ポリスチレンマイクロ球を用いた電子の粒子性検証実験

今から100年以上前に行われた電子の粒子性を表す歴史的実験の一つとして、ロバート・ミリカンによる油滴を用いた電気素量測定実験がある。本教材では、ミリカンの油滴実験をポリスチレンマイクロ球を用いた実験に替え、ポリスチレンマイクロ球の自由落下速度ならびに電場下 (電極間) での上昇・下降速度の測定結果から、電気素量 ( $1.602 \times 10^{-19} \text{C}$ ) の整数倍に近い値が求められ、電荷の量子化分解能が高い実験法を考案した。

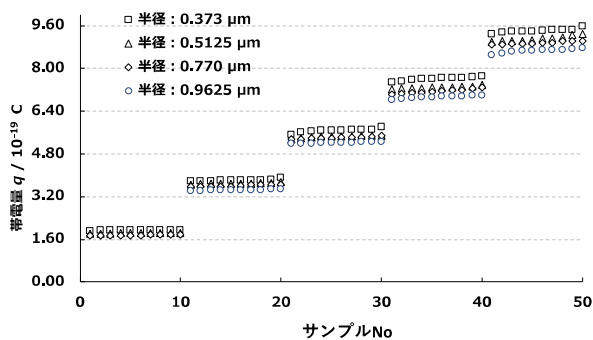


図3 ポリスチレンマイクロ球に帯電した電気量の実測値 (補正無し) の球半径依存性

ここで、球のサイズが空気分子の平均自由行程 (25, 1atm で  $0.1 \mu\text{m}$  程度) 程度に小さいと、結果の解析に必要な空気の粘性抵抗を表すストークスの定理に複雑な補正が必要となるが、ポリスチレンマイクロ球のサイズが電気素量の実測値に与える影響を検討した研究は行われていない。そこでまず、半径  $0.25 \sim 1.0 \mu\text{m}$  のサイズ既知のポリスチレンマイクロ球を用いてその影響を検討した (図3)。実験装置は市販品を使用したが、粒子を観察する顕微鏡部に USB カメラを接続する改良を加え動画撮影を可能にすることで、粒子の電場下での運動速度の測定を容易にする方法も考案した。その結果、図3に示したように、球半径を大きくすることで帯

電量実測値が電気素量の整数倍に近づく傾向が見られた。

図3より、ポリスチレンマイクロ球のサイズが大きいほど電離素量の整数倍の値に近づくことがわかったが、大きな球を電場下で上昇させるには、装置に標準装備している電源では電極間にかかる電圧が不足していた(図3の結果は、高電圧を印加できる外部電源も使用した結果である)。そこで、装置に標準装備している電源でも電場下での上昇・下降が可能な半径  $0.5125\ \mu\text{m}$  のポリスチレンマイクロ球を用いた実践を、理科教員を目指す教員養成課程の学生8名に対して実施した。その結果を図4に示す。

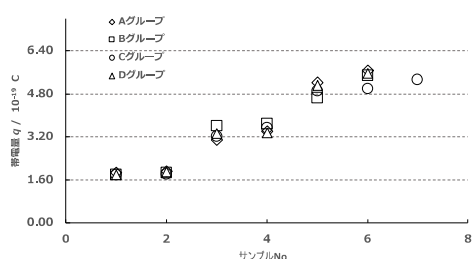


図4 教員養成課程の学生が行った  $r=0.5125\ \mu\text{m}$  ポリスチレンマイクロ球を用いた帯電電量の実測結果

実践後に行ったアンケート結果によると、「今回の実験を通して、物質(電子)の粒子性を実感することができましたか?」との問いに対しては全員が「実感できた」と回答した。また、「実験を通して、どのような事実から電子の粒子性を実感しましたか?」との問いに対し、「帯電電量の離散性から」「帯電した電子の数により球の速度が異なる」といった理由が挙げられており、理科教員を目指す学生の粒子認識の深化を図る探究教材になりうるということが示唆された。

なお、本教材については、現在、論文の執筆を準備中である。

#### プログラミング言語 Processing による中和滴定シミュレーションの開発

中和滴定は、水素イオンと水酸化物イオンという粒子同士の反応で水分子という粒子が生成するので、この現象を定量的に考える過程で微視的視点から物質認識を深めうる典型的な化学教育の題材である。そのため中和滴定の実験はよく実践されているが、さまざまな制約があり十分な活動を実験室だけで行うことには限界がある。そこで、Processing というプログラミング言語を用いて中和滴定をシミュレーションするプログラムを作成し、このプログラムを活用した授業の教育効果について分析した。すでに実験室での中和滴定を経験したことのある学習者に対して、コンピュータによるシミュレーションを活用した授業を行うことが、中和滴定実験に関する理解を深めるために有効であるという結果を得た。

#### 電解質入り寒天接触型ダニエル電池の開発

簡単にダニエル電池の実験ができる「電解質入り寒天接触型ダニエル電池」を開発した(写真6)。これは、銅電極と硫酸銅水溶液、亜鉛電極と硫酸亜鉛水溶液をそれぞれ寒天で固めて半電池を製作し、半電池の寒天部分を互いに接触させただけで電池として機能する教材である。この教材により、普通教室でも簡単にダニエル電池の実験を行うことができるのである。また、溶媒(水)が蒸発しないように密閉容器にこの半電池を保存することで、ある程度の期間にわたって繰り返し実験を行うことが可能である。本教材を、理科教員を目指す教員養成課程の学生に対して実践したところ、実践後のアンケート結果では「寒天どうしをくっつけて電子オルゴールが鳴るかを確認するだけなので、実験自体もとても単純でわかりやすいし、短時間でたくさんの種類の組み合わせを調べることができて良いなと思いました」「今回の実験に関しては、自由に方向性を模索させるスタイルであったために、生徒の主体性がよく引き出されると思いました」との声が聞かれ、物質認識を粒子の個性の視点から探究的に深化させる教材となりうるということが示唆された。



写真6 電解質入り寒天接触型ダニエル電池

以上(1)～(3)の研究成果は、理科の学習指導要領解説でも基本的な見方や概念の柱に据えられている(目には直接見えない)「粒子」の存在を、机上の空論ではなく、体験的かつ体系的に認識した理科教員を養成するための教材の在り方を提案するものであり、今後、本研究成果を広く活用していただけるような情報発信がさらに必要である。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計3件)

濱谷成樹, 田口 哲, 中学校・高校におけるダニエル電池製作・実験方法に関する考察, 日本理科教育学会 北海道支部大会発表論文集, 査読無, 第29号, 2019, 5-8

濱谷成樹, 田口 哲, 井上祥史, プログラミング言語 Processing による中和滴定シミュ

レーションの開発と高等学校化学教育での実践，北海道教育大学紀要（教育科学編），査読無，第69巻 第2号，2019，191-206，  
<http://s-ir.sap.hokkyodai.ac.jp/dspace/bitstream/123456789/10408/1/69-2-kyoiku-17.pdf>

田口 哲，大滝優実，瀧上 哲，仲鉢大地，柚木朋也，プラスチックシリンジと三方コックを活用した簡便な気体同定実験教材の開発と化学教育での実践，北海道教育大学紀要（教育科学編），査読無，第66巻 第1号，2015，135-147，  
<http://s-ir.sap.hokkyodai.ac.jp/dspace/bitstream/123456789/7809/2/66-1-kyoiku-12.pdf>

〔学会発表〕(計8件)

瀧谷成樹，田口 哲，電解質入り寒天接触型ダニエル電池の開発，日本化学会第99春季年会，2019

瀧谷成樹，田口 哲，中学校・高校におけるダニエル電池製作・実験方法に関する考察，平成30年度日本理科教育学会 北海道支部大会，2018

中野智文，田口 哲，電子の粒子認識を深めるためのポリスチレンマイクロ球を活用した電気素量測定実験：理科教員養成課程の学生への実践，日本化学会第98春季年会，2018

中野智文，田口 哲，ポリスチレンマイクロ球を活用した電気素量測定実験に対する球サイズの影響，日本化学会第96春季年会，2017

田口 哲，瀧上 哲，仲鉢大地，力の実感を伴った測定が可能な大気圧標高依存性測定実験－ガラスシリンジ・力センサー・GPS 搭載移動端末の活用，平成28年度日本理科教育学会北海道支部大会，2016

田口 哲，瀧上 哲，仲鉢大地，ガラスシリンジ・力センサー・スマートフォンを活用した大気圧の標高依存性の測定教材，日本化学会第96春季年会，2016

田口 哲，大滝優実，瀧上 哲，仲鉢大地，柚木朋也，プラスチックシリンジと三方コックを活用した簡便な気体同定実験教材：シリンジへの気体注入法の影響，日本化学会第95春季年会，2015

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：柚木 朋也

ローマ字氏名：(YUNOKI, Tomoya)

所属研究機関名：北海道教育大学

部局名：札幌校

職名：教授

研究者番号(8桁)：00311457

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。