

粒子領域の系統性と探究の過程でみる 「ろうソクの科学」

高井 隆行・岡島 礼久・鈴木 克治

「ろうソクの科学」は、イギリスの王立研究所の所長であったマイケル・ファラデーが青少年向けに行ったクリスマス講演の講義録であり、ノーベル化学賞を受賞した吉野彰氏をはじめ、多くの読者に影響を与えている名著である。演示実験を中心に行われたこの講演は粒子領域を中心に小学校から高等学校の内容と幅広く、また、探究の過程を段階的に示し、対話を通して主体的な学びに結び付けている様子がうかがえる。そこで、ファラデーがこの講演で行った粒子領域の実験を系統的にみるとともに、ファラデーが示した探究の過程について考察し、報告する。

〔キーワード〕 マイケル・ファラデー ろうそく 粒子領域の系統性 探究

はじめに

本センターの小学校理科研修講座である「問題解決の力を育む実践力向上研修」において、第6学年の粒子領域の単元である「燃焼の仕組み」では、ろうそくの燃焼に関する実験を題材として展開している。そこで、参考文献としてファラデーの著書「ろうソクの科学」を改めて紐解くと、小学校第6学年の内容でとどまらず、高等学校の内容まで多岐にわたっていることに気づいた。また、ファラデーは講演に参加した青少年に対し、単なる演示実験ではなく、対話を通して探究の過程や方法についても教授し、受講後の主体的な学びに結び付けている様子が大変興味深い。

そこで、ファラデーがこの講演で行った粒子領域の実験を系統的にみるとともに、探究の過程や方法を通して、どのように理科における見方・考え方を育んでいるかを考察した。

1 学校段階別に粒子領域の系統性でみるファラデーの講演

(1) 小学校の粒子領域

① 第4学年 空気の圧縮

- ・ じゃがいもで作った玉を使った空気ですぼ

うで、空気は押し縮められることを示した。

② 第4学年 水の三態変化

- ・ ろうそくの炎の上に食塩と氷を混ぜた寒剤を入れた容器をかざし、炎から生じた水蒸気を凝縮させて水が生じたことを示した(図1)。



図1 寒剤の入った容器で炎から生じた水蒸気を凝縮させる

- ・ 水が沸騰しているフラスコの口を時計皿で覆うと、時計皿が弁のように上下し、かたかた音がする。ブリキ缶に水を少し入れて加熱すると水が水蒸気になる。このブリキ缶に冷水をかけると中の水蒸気が水に戻る

ことでブリキ缶は潰れる。これらの実験から、気液間の状態変化における体積変化は著しく大きいことを示した。

- ・鉄瓶に水を入れて密閉し、中の水を凍らせると、氷になって膨張し、鉄瓶が割れる。氷が水に浮くことから、水は氷になると体積が大きくなり、軽くなることを示した。

③ 第6学年 燃焼の仕組み

- ・燃えているろうそくにできた炎のまわりのくぼみを観察。ろうそくに近づいた空気が炎の熱により上昇気流となり、この気流がろうそくの外側を冷やすことで芯のまわりにお椀型のくぼみをつくり、液体になったろうを溜めていることを示した。
- ・ろうそくの炎に紙を水平に差し込むと、炎の真ん中と炎の外の空気との間の部分に焦げ目が輪になってできることから、新鮮な空気（酸素）に触れていて空気と燃料が反応する場所である炎の外側の温度が高いことを示した（図2）。

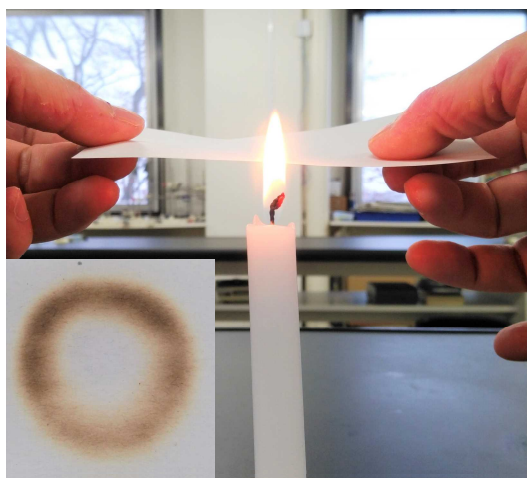


図2 ろうそくの炎に紙を差し込むと焦げ目（左下）が輪になる

- ・燃えているろうそくにガラス瓶をかぶせると炎が小さくなってやがて消えることから、燃焼には新鮮な空気（酸素）が必要であることを示した。【確認実験】①オイルランプは炎の真ん中に空気を送るとよく燃えるが、空気を断つと不完全燃焼をして煙が出始める。②綿玉を芯にしてテレピン油を燃

やすと、芯が太いため炎が大きくなり、燃焼に必要な空気の供給量も多くなるので不完全燃焼を起こし煤が空気中を上っていく。

- ・ろうそくの燃焼の違いについて、酸素を入れた瓶の中と空気中とで比較する実験を通して酸素の助燃性を示した。
- ・空気中の酸素を除くと残った気体は空気を構成するもう一つの気体である窒素であることを示した。空気には酸素のほかに、酸素の助燃性を邪魔する窒素があり、空気の組成は酸素20%、窒素80%であることを説明した。
- ・ろうそくから発生した気体は石灰水を白く濁らせることと、空気は石灰水を濁らせないことから、石灰水を濁らせたのは酸素や窒素ではなく、二酸化炭素であることを示した。

(2) 中学校の粒子領域

① 第1学年 身の回りの物質とその性質

- ・ろうそくが燃えた後は別な気体（二酸化炭素）になる。ろうそくが燃えると煤（炭素）と水ができることを示した。
- ・炎をあげて燃えるもの（アルコール、ガスなど）の燃焼では水ができることを示した。
- ・亜鉛に塩酸または硫酸を加えて水素を発生させ、水素の性質を示した（可燃性あり、水上置換で捕集、空気中で逆さまにした瓶に移せることや水素の入ったシャボン玉や風船が浮くことから空気より軽い）。
- ・窒素は何の反応も示さない極めて反応性の低い、安定な物質であることを示した。
（可燃性なし、助燃性なし、あらゆる燃焼を抑える、無味無臭、水に溶けない、酸・アルカリでもない、感覚器では感じない）。
- ・水素、鉄線、硫黄、リンなどを酸素中で燃焼する実験で酸素の助燃性を示した。
- ・塩酸と大理石で二酸化炭素を発生させて集め、二酸化炭素の性質を示した（可燃性なし、助燃性なし、水上置換で集められるこ

とから水にあまり溶けない，少し溶けてその水溶液はわずかに酸っぱい，石灰水を白く濁らせる，空の瓶と分銅がつりあった天秤を用意し，瓶に二酸化炭素を注ぐと瓶を載せた方が下がることや，空気を入れた風船やシャボン玉が二酸化炭素の上に浮くことから二酸化炭素は空気より重い）。

② 第1学年 状態変化

- ・炎の真ん中の暗い部分にガラス管を差し込んで気体のろうを取り出し（図3），フラスコの底にたまっろうを加熱し，その気体に火をつけて燃やす実験や，炎の真ん中の暗い部分にガラス管を差し込んで，ろうの気体を離れたところに導いて燃やす実験（図4），さらに火を消した直後に出る煙

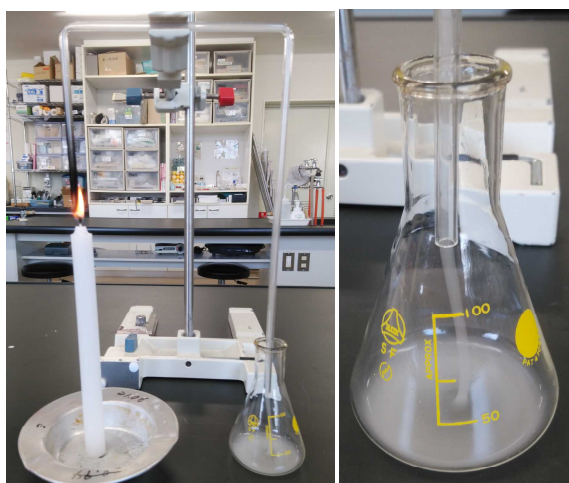


図3 （左）ろうそくの炎から気化したろうを取り出す （右）溜まったろう



図4 ろうそくの炎から気化したろうを離れたところに導いて燃やす

にろうそくから5センチくらい離れたところで火を近づけると，ろうそくの芯に飛び火して再び燃え出す実験を通して，ろうそくが燃えるためには気体のろうが必要であることを示した。

- ・熱によって水を水蒸気に変え，水蒸気を冷やすことによって水に戻す実験で，状態変化には熱の出入りが必要であることを示した。

③ 第2学年 物質の分解

- ・ボルタ電池の電気エネルギーで硝酸銅水溶液から銅単体を取り出せることを示した。
- ・水の電気分解で電極ごとに発生した気体を捕集すると，体積比が $H_2 : O_2 = 2 : 1$ になることを示した。

④ 第2学年 化学変化

- ・水素と空気（酸素）の混合気体は爆発し，水素が燃えると水ができることを示した。
- ・空気中で炭素が燃焼すると二酸化炭素になる。一方で，鉛や鉄は燃えたら化合した酸素の分だけ重くなり，炭素の燃焼とは違うことを示した。

⑤ 第3学年 化学変化と電池

- ・ボルタ電池は化学エネルギーから電気エネルギーを取り出す装置であることを説明した。

(3) 高等学校の粒子領域

① 化学基礎 物質と化学反応式

- ・水の電気分解で電極ごとに捕集した気体の体積比は $H_2 : O_2 = 2 : 1$ であることから，質量比にすると $H_2 : O_2 = 1 : 8$ であること，同体積における水素と酸素の質量比は $H_2 : O_2 = 1 : 16$ となることを説明した。
- ・炭素と酸素を重さにして6 : 16の割合で化合させると，二酸化炭素が重さにして22の割合で得られる。二酸化炭素と生石灰を重さにして22 : 28の割合で化合させれば，過不足なく炭酸カルシウムを生じる。カキの殻の成分（ $CaCO_3$ ）を調べると，重さにして貝殻50から炭素，酸素，生石灰がそ

れぞれ重さにして 6 : 16 : 28 で含まれていると説明している。

- 炭素を燃焼すると、反応に関係する気体の体積は反応の前後において変化せず、酸素が二酸化炭素になっただけであることを説明している ($C + O_2 \rightarrow CO_2$)。

② 化学基礎 酸化と還元

- カリウムと水、鉄の削りくずと水との反応や、亜鉛が燃えて白い灰になる反応を見せて、カリウム、鉄、亜鉛の反応性の違いを示した。
- 赤熱した鉄の削りくずと水蒸気を反応させると水素が発生し、鉄は黒色の四酸化三鉄になって重くなる実験で、水から酸素を除くと水素になることを示した。
- 銅に硝酸を反応させると、銅が溶けて赤褐色の二酸化窒素が生じ、硝酸銅水溶液になることを示した。
- すず箔の上にとろ紙を敷いて水溶液をたらし、そこにボルタ電池につないだ白金電極を 2 枚接触させると褐色のシミが出てくることで電気エネルギーで単体を取り出せることを示した (図 5) (使用した水溶液の詳細はないが、写真は硝酸銀水溶液を使用)。



図 5 硝酸銀水溶液を浸したろ紙に電極を接触させて析出した銀で書いた文字

- カリウムが水を還元したように、二酸化炭素中でカリウムを燃焼すると二酸化炭素を還元するため、黒色の炭素の粒が生じることを示した。

③ 化学 気体

- 体積が 1 立方インチ (約 0.0164 L) の水が水蒸気になると体積が膨張して 1 立方フィート (約 28.3 L) の立方体を満たす (体積

が約 1700 倍になる) ことを説明した。

④ 化学 液体

- 氷と食塩を混ぜると寒剤になることを示した。

⑤ 化学 反応速度

- 鉄のやすりくずを、燃やしたり高温の水蒸気と反応させる実験を通して化学反応には熱の作用が必要であることを説明した。

⑥ 化学 無機化学

- 発生させた一酸化窒素 (図 6) に酸素を混ぜると赤褐色の二酸化窒素になることを利用して酸素を検出できること、また、水を加えて振ると吸収されることから、二酸化窒素は水に溶けることを示した。



図 6 銅と硝酸を反応させて一酸化窒素を発生させて捕集する

- 同じ大きさの瓶に空気と酸素を別々に入れ、それぞれに一酸化窒素を加え、生じた二酸化窒素の赤褐色の色の濃さの違いから瓶の中の酸素濃度を比較した (図 7)。



図 7 一酸化窒素が酸化して赤褐色になることを利用した酸素濃度の比較 (左) 空気 (右) 酸素のみ

- ・容器内の空気（酸素）に一酸化窒素を反応させて二酸化窒素にして水に溶かし、空気から酸素を取り除けることを示した。
- ・二酸化炭素は石灰岩，貝殻，サンゴ，チョークに炭酸塩の形で多く含まれ，それらを加熱すると二酸化炭素が発生することを説明した。
- ・二酸化炭素を発生させるとき，石灰石に硫酸を用いると生成物（硫酸カルシウム）が不溶性でどろどろになる。塩酸だと可溶性の物質（塩化カルシウム）を生じるので，どろどろにならないことを説明した。
- ・石灰水に二酸化炭素を通すと生じる白い粉はチョークや貝殻と同じ成分（炭酸カルシウム）であることを説明した。
- ・砂糖に硫酸をかけると脱水作用で炭化し，残った炭素に酸化剤を加えると二酸化炭素になって消えることを示した（図8）。

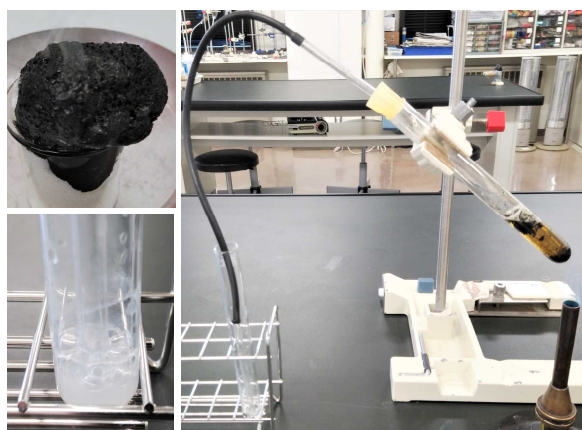


図8 （左上）濃硫酸により炭化した砂糖
（右）その炭に酸化剤（写真は硝酸）を加えると気体が発生
（左下）発生した気体により白濁した石灰水

- ・リンが燃焼すると白煙になる（十酸化四リン），亜鉛粉末が燃焼すると白色固体（酸化亜鉛）が生じることを示した。
- ・カリウムに水を加えると激しく反応して水素を発生し，燃えると紫色の炎を出すことを示した。
- ・アルコールの炎が見えにくいので塩化銅を混ぜて，炎色反応により着色した（図9）。

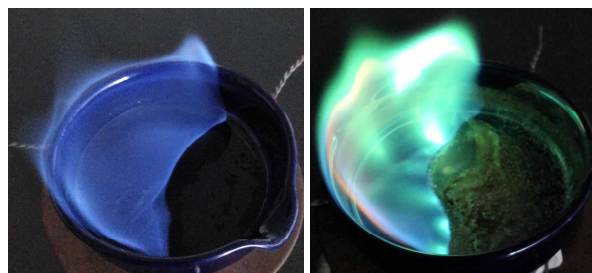


図9 炎色の違い（左）エタノールのみ
（右）エタノール+塩化銅（Ⅱ）

⑦ 化学 有機化学

- ・獣脂（牛脂）に石灰石を混ぜて加熱し，次に希硫酸を加えてステアリン酸を取り出しておろそくを作ることを説明した。
- ・砂糖は質量比C：H：O＝72：11：88で水素と酸素が水と同じ割合で存在することを説明した。

2 探究の過程でみるファラデーの講演

ファラデーは参加している青少年に対し，常に疑問を投げかけ，その疑問を解決するための方法を実験を通して示し，設定した課題を解決するとともに，次の探究の課程につなげている。

一例として，ろうそくの成分として水素が入っていることを探究する過程を見る。ファラデーは「ろうそくから得た水はどこから出てきたのでしょうか。水はろうそくの中にも空気の中にもあったものではありません。一部はろうそくから，一部は空気から2つのもの結びつきの結果生じたのです。では，どうすればわかるのでしょうか。皆さん自身の考えと，これまでに私がお話したことを組み合わせて，自分自身で答えを見つけてほしいのです」と述べている。

はじめに，ろうそくの炎から発生した水蒸気を寒剤の入った容器を用いて凝縮させて集め，その液体が水であることを確認する。次に，水を電気分解することで水素を発生させ，最終的にろうそくの炎から集めた水は，ろうに含まれていた水素と空気中に含まれていた「何か」が化合して生じたと考察，推論する。そして，その空気中に含まれている「何か」を調べるこ

を次の探究の課題としている。

疑問を解決する際に、調べる手段や考えるヒントとして、事前に多くの実験を見せている。その一部を挙げると、水を検出する方法としてカリウムが水と激しく反応し紫色の炎色反応を示す実験、シャボン玉やコップを使って水素が空気より軽い気体であることを示す実験、水素を発生させる装置である「賢者の燈」を用いた水素の燃焼によって水素単体の燃焼は青白くかばそいことを示す実験、ボルタの電堆を使って電気分解により水溶液から単体を取り出すことができることを示す実験などを行っている。

また、水素の燃焼により水が生じる実験では「賢者の燈」の上に冷却用の太いガラス管を置いて水滴を確認する実験や、水の電気分解で生じた水素と酸素の混合気体を密閉容器に入れて点火し、爆発させる実験など、異なる複数の実験から結果を導いていたり、カリウムと水の反応の際に、鉄や亜鉛など他の金属の反応も見せて違いを比較したり、硝酸銅水溶液の電気分解において電池のつなぎ方を変えると銅が析出する電極が変わること、また、水の電気分解において生じた気体が凝縮しないことからそれは水蒸気ではなく、水素や酸素であることの確認の方法に加えて、生じた水素と酸素の体積比や質量比など数的な話をさりげなく入れることで、知識や興味関心の幅を自然に広げているとともに、理科における見方・考え方を育んでいる。

そして、講義の初めには前回の講義の振り返りと今回の講義の目標を、講義の終わりには次の講義に繋がる問いかけをすることで、講義に興味を持たせるとともに、青少年が自ら講義の中から課題を見つけ、実験を通して解決しようとする姿勢を育んでいる。また、合成染料や写真など当時としては最先端の科学技術の話題を折り込んで、科学に興味関心を持たせようとしている工夫もうかがえる。

3 まとめ

1860年にファラデーが「ロウソクの科学」の

クリスマス講演を最後に行ってからちょうど160年経つが、講演で語られた科学に関する基本的な部分は、今日においても十分通じるものである。しかも、改訂された学習指導要領において、小学校、中学校、高等学校を通して求められている主体的で対話的な深い学びと、探究の過程を学ぶという実践が、その当時にすでに行われていたことに驚くとともに、科学に対する姿勢と学びの本質は昔も今も変わらないことを再確認した。

最後に、ファラデーが行った「賢者の燈」やアルコールによる熱風船の実験は、取扱い方によっては危険性が高くなる。「発生する気体（水素）は、ご覧になったように可燃性です。

（発生装置内の）水面上の空間からすべての空気が追い出される前に、管の端に火をつけると、空気と混ざって、かなりの強さの爆発を起こし、けがをするかもしれません」とファラデーが青少年に注意を呼びかけているように、水素やエタノールの実験において爆発に関する事故が実際に多数報告されている。本センターの研修講座である「安全・適切な薬品取扱い研修」では、実際に起きた事故例も紹介しながら薬品の取扱いについて説明しているので、参考にしていただければ幸いである。

参考文献

- 1) ファラデー著、竹内敬人訳「ロウソクの科学」岩波書店、2010年
- 2) 市岡元気「面白いほど科学的な物の見方が身につく図解ロウソクの科学」宝島社、2019年
- 3) 「小学校学習指導要領（平成29年告示）解説 理科編」（平成29年7月）文部科学省
- 4) 「中学校学習指導要領（平成29年告示）解説 理科編」（平成29年7月）文部科学省
- 5) 「高等学校学習指導要領（平成30年告示）解説 理科編 理数編」（平成30年7月）文部科学省
- 6) 令和元年度小学校理科研修講座（問題解決の力を育む実践力向上研修【小学校冬期】）テキスト 北海道立教育研究所
- 7) 令和2年度理科研修講座（安全・適切な薬品取扱い）テキスト 北海道立教育研究所

（たかい たかゆき 化学研究班）

（おかじま のりひさ 化学研究班）

（すずき かつじ 義務教育研究班）