

研究ノート

ファラデーの『ロウソクの科学』と 理科教育

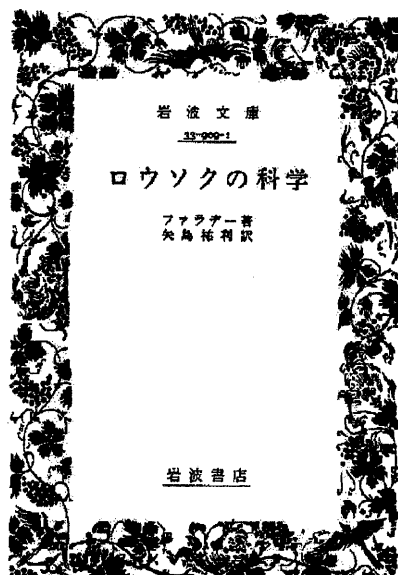
小原政敏

“Faraday, The Chemical History of Candle, ed by W.Crookes”
and Science education

KOHARA Masatoshi

はじめに

ファラデー (1791-1867) は、イギリスの有名な科学者であり、主に化学や電気分野で多くの業績を上げたことは良く知られている。特にベンゼンの発見、電磁誘導現象の発見、電気分解の基本法則の発見、エネルギー保存の法則の示唆、光と磁気の相互作用の発見、反磁性の発見、電磁力と重力の統一への示唆など数えればきり



がないほど多様な成果がある。

他方、ファラデーはロンドン王立研究所の教授として科学と研究に邁進する傍ら、一般の市民に科学の内容について平易に解説することにも力を尽くした。中でも青少年のためにわかりやすい講義を行った。とくにクリスマスにはクリスマス講義として数回にわたり、自然科学の現象についてわかりやすくまた興味関心を持つことができるような講演を行った。この『ロウソクの科学』は、1860年の暮れにファラデー（当時70歳）によって行われたクリスマス講義をクルックス（1832-1919、イギリスの科学者・物理学者、タリウムの発見者）が編集したものである。

『ロウソクの科学』（ファラデー著；矢島祐利訳；岩波文庫＝以後「原本」と略記する。）は、理科教育の初期から多くの国において基本的な文献として参照されたものであるが、150年後の現在でも理科教育の基本的参考書としての存在は失われていない。科学技術が高度になり、科学技術を駆使した高性能の工業製品が溢れているにも関わらず、理科離れや科学離れがむしろ進む傾向にある。

このような時代に理科教育の原点に立って子どもたちに自然の不思議や科学のおもしろさを伝える場合、ファラデーの『ロウソクの科学』の視点に立って高度な科学技術社会における理科教育のあり方を再検討することが求められているように思われる。

この研究では、『ロウソクの科学』の内容と説明方法や実験方法を分析し、小学校・中学校の理科教育の充実と小学校教員を目指す学生の理科指導法に関する資料として役立てようとするものである。

なお、この論文の参照図は当時の実験方法の理解を深めるために全てこの本の図を写したものである。

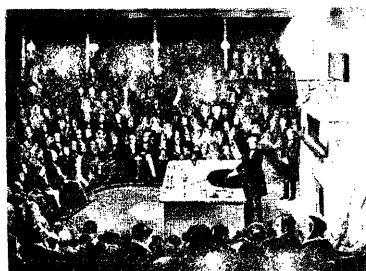


図17 1866年12月7日にファラデーがおこなっている「金環の講義」の録（ファラデーのうしろにはアンダーソンが立っている。聴衆の一番前列には、コンノー）殿下、ダリンス・オブ・ウェルズ、アルフレッド殿下などで、ほかにティンデルやファラデー夫人などいる）

（平田寛著「科学の考古学」
中公新書65頁）

1、第一講の内容と分析

ロウソク 炎……そのもと……構造……運動……明るさ

この第一講の最初の部分でファラデーは、ロウソクを講義の題材とする理由を述べている。この理由には、ファラデーが自然現象を研究対象とする基本的な姿勢が示されている。

少し長くなるが、以下のような文章が書かれている。

「これから皆さんにロウソクのお話をいたそうと思う。……………これから出発して驚くほど多種多様な自然の研究に導かれるからです。いろいろなもの支配している法則のうちロウソクの話の中に出てこないものは一つもありません。そこ物理学の勉強をはじめするにはロウソクの物理的現象を研究するのが最も良い、最も便利な戸口です。ですから、私が何かもっと新しい題目を選ばずにこういうものをとりあげて諸君を失望することはないと思います。新しいのでいい問題もあるでしょうが、ロウソクほどいいものはないでしょう。」(原本12頁)

この文章の中でファラデーは当時の日常生活の中で良く用いられていたローソクを題材にすることによって様々な自然科学の現象を説明できることを見越してローソクを取り上げている。ローソクがどのようにして熱と光を発生するのかを自然科学の方法によって解明しようとしている。

1 「ロウソクの木」：ククイノキ (学名 *Aleurites triloba*)

良く燃えるのでローソクの代わりとして用いられていることを説明。

2 「糸心ローソク」：木綿の糸を心にして獣脂に浸けて固めロウソクとしたもの多くの種類があることを説明。

ワックスロウソク (動物・植物・鉱物など多くの種類がある)

ステアリンロウソク (動物・植物の脂肪酸)

パラフィンロウソク (石油化合物)

鯨油ロウソク

蜜蝋ロウソク（ミツバチの巣の構成成分）

和（日本）ロウソク（ウルシやハゼの果実の蝋で

パルミン酸が多い、心は和紙で作られている）

- 3 「ステアリン酸 $C_{17}H_{35}COOH$ 」：獣脂から抽出した物質として説明。
- 4 ゲーリュサックの樹脂からステアリンの製法を簡単に説明。
- 5 ローソクの色を「化学染料」で着色することを説明。
- 6 ローソクの炎について

ロウソクの炎の燃え方の観察とランプの燃え方の比較

油は心の部分では燃えるのに油面では燃えないのか

ロウソクは固体なのに燃えるのはなぜか

空気の流れ

事物の本性とかかわりのない複雑な事柄が加わっていると問題の研究ができない

炎を安定して揺れないようにするほやの作用の説明

ロウソクの縁は空気に流れによって中心よりも冷えている。

中心は、炎の熱で蝋が融解し、液体の蝋が水平に溜まる。

蝋の液体が水平になる理由は垂直に作用する重力のためである。

ロウソクは材料は、熱で溶け周囲の空気に冷やされて皿を作るようなものでなければならない。

ロウソクによっては、溶けた蝋が流れ出してロウソクの表面に厚く着く場合がある。

ここでファラデーは、次に様に述べている。

「ロウソクおいてだけでなくまた他の色々な場合においても、予期に反した事情や失敗お陰でそれなしではおそらく得られなかったところの教訓を得ることがしばしばあります。このようにして私たちは自然の研究者になるのです。諸君はあらゆる現象において、それが新しいものである場合にはなおさら『その原因はなんであるか、どうしてそうなるのか』と考えて

みるべきです。そうすればいつかその理由がわかります。」(原本20頁)

このファラデーの言葉の中に自然科学の本質と研究することの意義が含まれている。

7 液状の燃料が心を伝わって上昇する原因『毛細管現象』

8 『表面張力』

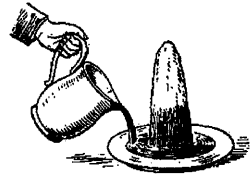
表面張力は、互いに溶け合わない二つの物体を密着させる働きを持っている。

水の中に指を入れて注意深く見ていると、水が水面より高い所まで少し上がってくるのが認められる。

9 食塩柱(食塩を柱のように盛り上げたもの)

に色つき飽和食塩水が毛細管現象で上昇する様子を示す。

10 水の入った洗面器の縁に手ぬぐいを掛けておくと水が毛細管現象のサイホンによって床にこぼれてしまう現象



(原本22頁)

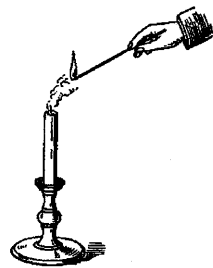
11 ベンジンの中に籐の細い切れ端を入れると、籐の中の毛細管を通してベンジンが上昇しロウソクのように燃焼させることができる。

12 ロウソクを逆さまにすると溶けた蠟によって心の温度が下がり火が消える。

13 物の燃焼は、気体の状態において行われる。

ロウソクの火を吹き消すと心から蒸気がたちのぼることがわかる。

この蒸気につけぎの火と近づけると蒸気に火がつきロウソクが燃える。



(原本24頁)

14 炎の形

ろうソクの心の上端が燃えているときどうなっているか。

美しい輝きが発せられる。

ろうソクの炎の形は、ろうソクの大きさと空気の状態で異なる。

心の下の部分ではだんだん暗くなっている。これは燃焼が完全でないからである。

炎を取り巻いている空気の上昇気流がある。これが炎を上へ引き上げる。

日なたでろうソクの火の影を紙に投影すると炎のまわりにもやもやしたものが写る。

ボルタの電池で電燈をともし太陽光の代わりとする。

(注) 1840年代ころから白熱電灯が研究されていたが実用性のあるものはこの当時まだ存在していない。ただし、短寿命の白熱電灯は何人かが研究していたのでファラデーは立場上実験段階の白熱電灯を試すことは可能であったと思われる。1878年炭素フィラメントによる白熱電灯がスワンによって発明されたが、特許を先に取得したエジソンによって実用研究が進められた。

炎の一番明るいところが、影では一番暗くなっている。

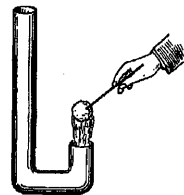
15 炎は空気の流れの方向に従って上でも下でも向かう

アルコールを綿にしみこませたものに火をつけてその炎の向きが空気の流れの方向に向くことを小さな煙突を用いて示す。

(アルコールに塩化銅を混ぜて炎が緑色に着色する演出を行う。)



(原本26頁)



(原本27頁)

16 気流による炎の形の変化

炎の形の研究は、写真を用いることの必要性を示す。

炎のなかには、めらめらした舌を出すものもある。

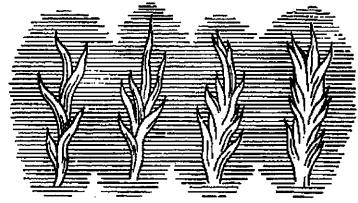
木綿の玉にアルコールをしみ込ませて炎をつくる。

炎の舌のゆらめきを示す。

この理由の説明

スナップドラゴン（ブランデーに火をつけてその中の干しぶどうなどを取る遊び）の炎の舌の様子を実験、この理由は空気が不規則に流れるからであると説明。

この炎の動きは肉眼では細部まで見る事が出来ないことも示す。



(原本29頁)

このように、第一講ではファラデーの自然科学や研究に対する考え方もともに自然を研究する方法をロウソクが燃えるという現象を総合的に説明することによって示している。

現在の理科教育では、ロウソクの構造・材料・燃焼・空気の対流・毛細現象などのように一つの材料を多面的に研究する方法は示していない。それぞれの現象を最も容易に説しやすい方法で示している。子ども達にとってそれぞれの現象を別々に説明した方が分かりやすいかもしれない。しかし、自然の現象が細切れとなり、自然現象を多面的に考察するような方法や考え方を育成することでは後退した方法と言わざるを得ない。自然は総合的な存在であり、個々の単独の現象が総合されて自然現象として観測されている。

自然科学のそれぞれの分野での発達が高度になり全ての分野を総合的に探究するには無理な状況にあることはやむを得ないが、理科教育の教材としてファラデーが示したように総合的な探究の方法を取り入れることによって子どもへの自然現象に対する興味関心を高められるように思われる。

2、第二講の内容と分析

炎のあかるさ……燃焼には空気が必要なこと……水のできるこ

第二講では、炎の各部分における現象とその理由またろうそくが燃えた後どようになるのが扱われている。いわゆる燃焼という化学反応を説明している。燃焼については現行小学校の理科学習指導要領では、第6学年で動植物の呼吸と物の燃焼が扱われている。

- 1 ろうそくの炎の中心の暗い部分の性質を調べるため、細いガラス管をその部分にあててその部分の気体をガラス管の他端に導き、その気体をピンに導く。この気体は空気より重く、ピンの底に溜まる。

次にこの気体に着火して、この気体がろうそくのように良く燃えることを示す。

- 2 1と同様にして、ガラス管の他端から出てくる気体に着火すると良く燃焼することを示す。
- 3 炎に生じている2つの現象を示す。

第一は、蒸気の発生

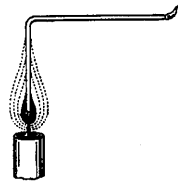
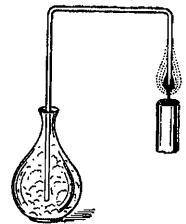
第二は、蒸気の燃焼

- 4 燃焼が起こった部分からはもはや気体（蠟の蒸気）を取り出すことはできない。

ガラス管の炎の中の位置を移動することによって他端の炎が消えることを示す。

- 5 炎がろうそくの蒸気と空気の化学作用として生じることを説明
- 6 炎の最も高温の部分を調べる。

一枚の紙を炎の真上にかざすと最も良く焦げる部分で炎の温度の状況を調べる。



(原本31・32頁)

これは、炎の中心ではなく、環となることを示す。

これを確認する方法として細長い紙を紙と同様に炎にかざすと炎の外側でこの紙が焦げることを確認できる。

このことから、空気とロウソクの蒸気（燃焼物質）が遭遇する場所で燃焼が生じることが分かる。

- 7 燃焼にとって新鮮な空気（酸素が多く含まれている空気）が必要なことを説明。

燃えているロウソクをピンを逆さまにして覆うと暫くして火が消えることを示す。（この実験は、小学校6年の理科の内容でもある。）

- 8 このピンの中の空気がどうなったのかの説明を始める。

ピンの中にはまだ空気があるが、そのある成分が燃焼によって変化していることを示唆する。

- 9 アルガン（スイス人）が作成したランプを用いてそのランプの炎の中心に空気を入れると良く燃えることを示す。

- 10 アルガンのランプで空気を遮断すると煙が出ることを示す。

この理由を問いかける。

- 11 10が不完全燃焼という状態にあることを説明する。

- 12 木綿玉にテレピン油（松精油）を含ませて着火する。

黒い煙が登るのを観察させる。

炎から出てくるすすを観察し、十分に空気が入らないと不完全燃焼になることを説明する。

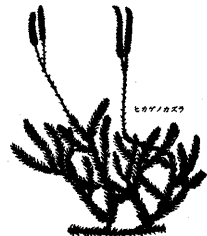
- 13 炎とは異なった燃焼があることを示すために火薬の燃焼を示す。

火薬は炎を立てて燃焼することを示す。

鉄のヤスリくずを火薬に混ぜる。この実験は危険であることを注意。

鉄のヤスリくずは炎を立てて燃えない。

- 14 石松子（ヒカゲノカズラの胞子）がアルコー



（万有百科大事典；
小学館）

ルの炎の中でばちばちと音を立てて燃える事を示す。

- 15 ロウソクの炎の前回より少し上の部分にガラス管を差し入れ、黒い蒸気が他端に出てくることを確認。これを炎に導くと炎が消える。この物質は何かを確かめる。

これはロウソクに含まれている炭素であることを説明する。

- 16 炎を通過させない金網を炎に触れるくらいの位置に持ってくると炎が消えてもうもうと煙が立ち上る。
- 17 鉄くずのように物質が蒸気の状態にならないで燃える場合は、非常に強い光を出す。

あらゆる物質は、固体のまま熱せられると強い光を発する。

ロウソクが明かりになるのは、炎の中の固体の粒子が関係していることを説明。

- 18 白金の針金を炎の中に入れて熱すると強く光ることを示す。

- 19 水素を燃焼させ、白金を炎に入れると強く輝くことを示す。

水素が燃焼するには酸素が必要なことを示す。

水素と酸素の混合気体は激しく燃えることを示す。しかし光はあまりでない。

この理由は、固体が含まれていないことを説明。

水素の燃焼炎の中に石灰片を入れると強く輝くことを示す。

- 20 水素の燃焼中の炎の中に木炭の粉を入れて光りを発することを示す。

ロウソクの炎の中で蠟の蒸気が分解され炭素となり、燃焼する。

炭素が燃焼した後は、炭素とは異なった物質となって空気中に逃げていく。

- 21 燃焼によって小さい固体を生ずる場合に明るい光を出すことを説明する。

- 22 リンを燃焼させ、それにガラス鐘をかぶせる。

煙がガラス鐘の中に充満する。この煙は、燃焼によって発生した物質と説明。



(原本40頁)

- 23 塩素酸カリと硫酸アンチモンを混ぜ合わせて燃焼させる。

まず、一滴の硫酸をかけて燃焼することを示す。

この場合も燃焼によって小片の固体が発生しそれが光ることを説明。

- 24 強く熱したるつばに亜鉛のヤスリくずを入れて火薬の様に燃えることを示す。

亜鉛が燃えた後、綿くずのような煙（亜鉛の酸化物＝酸化亜鉛）が出ることを示す。

中世にはこれを「賢者の羊毛」（白雪ともいわれていた。）と呼んでいたことを説明。

酸化亜鉛を水素の炎の中に入れると美しく輝くことを示す。

- 25 煙を多く出すベンジンを燃焼させ、この煙を水素の炎の中に導くと光ることを示す。

煙を作っている粒子が熱せられて光ることを説明。

煙の正体が炭素であり、炭素が熱せられると輝くことを説明。

- 26 炭素や炭がさらに燃焼するとどうなるかを示す。

ロウソクにかぶせた煙突に風船をかぶせてふくらませる。

燃えているロウソクにガラス鐘をかぶせると暫くして燃え方が弱くなる事を示す。また、ガラス鐘は水蒸気によって曇ることを示す。



(原本43頁)

3、第三講の内容と分析

燃焼の産物。燃焼から水……水の性質……化合物……水素

- 1 ロウソクが燃焼すると炭（煙）と冷たい物体の表面で凝結する気体が

であることを示す。

この気体が水蒸気であることを説明する。

- 2 水とカリウムが激しく反応するので、カリウムを用いて水が出来ていることを示す。

カリウムが水面の上で激しく燃焼していることを実験で示す。

- 3 ロウソクの炎の上に、氷水が入った容器をかざし、そのまわりに水滴がつくことを示す。

燃焼してできた水は、他の自然の水と全く同じであることを示す。

- 4 油の燃焼から得られた水を示す。

1リットルの油を完全燃焼させると1リットル以上の水ができることを説明。

- 5 可燃性の物質であり、炎を上げて燃焼するのであれば、水ができることを説明。

- 6 水は、固体、液体、気体となるがどのような状態でも水として同一であることを説明。水は、固体（氷）、水（液体）、水蒸気（気体）の形態を取るが体積は水が最小。

- 7 鑄鉄製の厚さが1 cmもあるビンの中に空気が入らないように水を満たし、ねじを締めてフタをし、水を凍らせると容器は氷の体積膨張に耐えず破壊されることを示す。

- 8 ガラスビンに水を入れ、ビンの口にフタをかぶせて熱すると蒸気がフタをガタガタと振動させるが、水の量はそんなに減少しないことを示す。

- 9 水は、体積膨張によって水よりも同体積で軽くなっていることを説明。

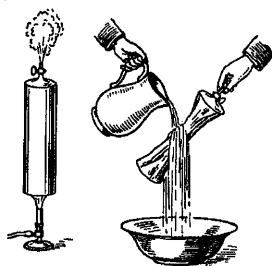


(原本46頁)

- 10 プリキ缶に水を入れて熱すると蒸気が流出することを示す。

蒸気に冷えたコップをかざすと蒸気が凝結して水になることを示す。

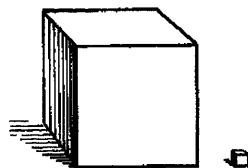
- 11 蒸気をプリキの小さな缶に閉じこめ、冷水をかけて冷やすとプリキ缶が潰れることを示す。



(原本51頁)

- 12 水1立方インチを水蒸気にすると1立方フィートになることを説明 (約1700倍)。

- 13 どのような出来方であっても、水はすべて水として同じ物であることを説明。



(原本52頁)

- 14 ロウソクからできる水はどこから来るのかを疑問としてかかげる。

水はロウソクの中にも空気の中にもあるのではなく、燃焼によってロウソクの成分と空気の成分が化学変化をして生ずることを説明。

($C + O_2 \rightarrow CO_2$) (注：化学式は全て小原が加筆したものである。)

- 15 水の性質を示すためにデーヴィが行った実験 (水に小さなカリウム片を入れると炎が出るほど激しく反応する) を示す。

($2K + 2H_2O \rightarrow 2KOH + H_2$: H_2 の燃焼)

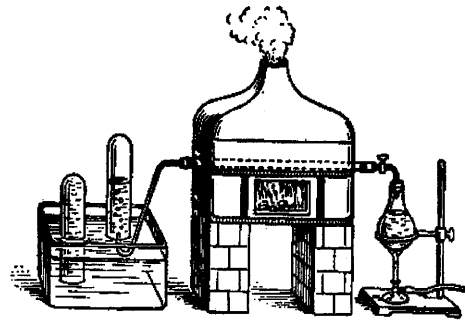
これは、鉄がさびるのと同じようにカリウムが水と反応していることを説明。

($4Fe + 3O_2 \rightarrow 2Fe_2O_3$)

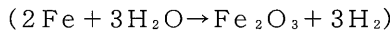
- 16 亜鉛の薄片をとってロウソクの炎に入れると、亜鉛が燃えて白い灰が残ることを示す。

($2Zn + O_2 \rightarrow 2ZnO$)

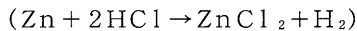
- 17 鉄の削りくずを詰めたガラス管を炉の中央に通し熱する。一方の口から水蒸気を送り込み、他端から出てきた気体を水上置換で集める。この気体は、冷やしても水に凝結しない。また、火をつけると激しく燃える。



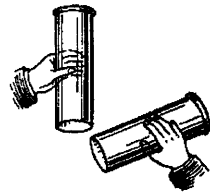
(原本55頁)



- 18 水に酸(例;塩酸)を加えてその中に亜鉛を入れると上記と同様の気体が発生することを示す。

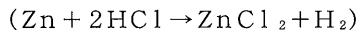
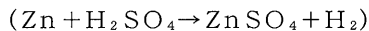


- 19 17、18によって得られた気体が水素という元素であることを説明。水素は軽くピンが逆さでも逃げず、また危険な物質であることを注意。

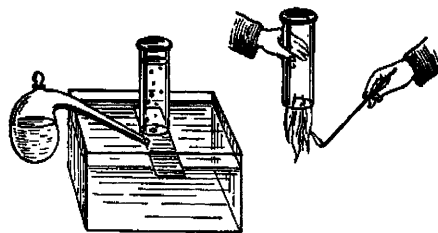


(原本57頁)

水素は、硫酸か塩酸に亜鉛の小片を入れると発生することを説明。

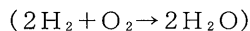


- 20 亜鉛に硫酸を注ぎ水素を発生させそれに火をともし「賢者の燈」という装置を用いて燈をともし。



(原本58頁)

- 21 この炎からできるガスをガラス容器に集め冷やすと水となることを示す。



- 22 この「賢者の燈」から出る水素でシャボン玉を作るとそれが部屋の天井まで上昇することを示す。水素が空気より軽いことの説明。

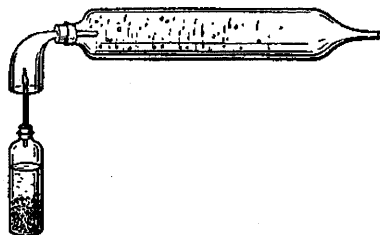
(筆者注：水素のシャボン玉は現在の理科教育でも活用することが多いが、この始まりがファラデーから始まっていることに改めてファラデーの着想力に感心する。)



(原本59頁)

- 23 水素をコロジオン（ニトロセルロースをエーテルとエタノールの混合液に溶かしたもの）で作った風船に入れて、空中に浮かぶことをしめす。

- 24 水素と水の重さを説明。1リットルで水は1000グラム、水素は0.1グラム以下であることを説明。



(原本60頁)

- 25 ボルタ電池を用いて+と-極をショートさせ、火花が発生することを示す。

また、鉄のヤスリくずに電流を通してヤスリくずが燃えることを示す。またこの電気のエネルギーが雷に近いものであることも説明。

このように第三講話でも、燃焼して水が出来ることと水の液体・気体・固体の体積変化と性質を多面的な展開によって示している。燃焼と水の性質についてこのように多面的に説明できれば、多くの聴衆は自然を探究することの面白さを十分に感じたものと思われる。学校の授業では、時間的な制約もあり、このように多面的に説明をすることは困難な事が多い。しかし、自然科学の本質を理解してもらうためにはこのファラデーの方法のように一つの現象を多面的に説明することが大切である。ファラデーの方法が理科教育を興味深いものにする多くのヒントを含んでいる。

4、第四講の内容と分析

ロウソクの中の水素……燃えて水になる……水のもう一つの成分……酸素

- 1 ロウソクが燃えると前回の実験のように水ができることを再確認する。

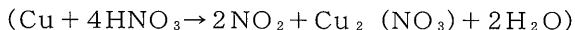
この水は、自然に存在する水と性質が全く同じ事も再確認する。

- 2 水の成分として水素が存在していることを再確認。

水素が燃えると水ができることを再確認。

- 3 ボルタの電池から電流を流すことによって物質が変化することを説明。

- 4 銅の切片の入ったビンに硝酸を加えて激しい変化をすることを実験で示す。



褐色の気体 緑色液体

(この気体が猛毒であることを示す。)

- 5 正体の分からない酸性溶液をビンから取り出し、紙にこぼして広げさせる。この紙を錫箔の上に広げる。

この液体が錫にも紙にも影響を与えないことを確認する。

- 6 ボルタ電池の作用を示すために白金線に電流を流し発熱することを示す。

- 7 二つの白金片を5の溶液をしみ込ませた紙に接しても何も変化のないことを示す。

- 8 今度は、二つの白金片にボルタ電池をつなぎ、5の溶液の浸みた紙に当てると黒いまだら模様が現れる事を示す。

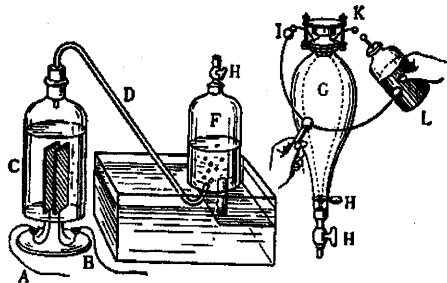
次に、白金片の一方を下に敷いた錫箔に接すると色が明瞭に変化することをしめし、紙に接している白金片で「ワカモノ」という文字を書く。

このことから、この酸性溶液には何かの物質が含まれていることを予想させる。この溶液は、4の実験でできた硝酸銅の溶液であることを説明。

(注) 電気分解の作用によって物質の色が変化することを用いてこのような興味ある演示実験をすることの工夫にはいくら敬意を表しても良いと思われる。ファラデーがいかに自然現象に興味深いものにして少年少女に示そうとしていたかが分かる工夫である。

- 9 さらに、4 でできた硝酸銅の溶液の中に白金片の電極を入れる。
最初に、ボルタ電池をつなぐに白金片だけを入れて何の変化もないことを示す。
次に電池をつなぎ電流を流すと一方の白金電極が銅の赤い色に変わることを示す。
他方は、電流を流す前と変わらないことを確認する。
さらに、白金電極をお互いに交換して電極を変えて電流を流すと銅色の電極は白金の白さに戻り、白かった他の電極は銅色に変化することを示す。

- 10 水に少し酸を混ぜた溶液を入れた容器の水の中に白金の電極を入れて電流を流す。
水溶液から出てくる気体を上方置換で捕集ビンに集める。



(原本67頁)

- この気体が水蒸気でないことを凝結して水とならないことで示す。
- 11 上方置換で集めた気体に点火すると爆発して燃える。
可燃性の物質であるが、水素の燃え方とは異なることを説明。
この気体は空気を供給なしに燃えることに注意を向ける。
- 12 この気体を密閉した容器にライデンビンから電流を流して点火する実験を行う。(筆者注：ライデンビンは電気を貯めるコンデンサーの原型)

この実験後、ビンの中が曇ることを示す。これから水が出来たことを説明。

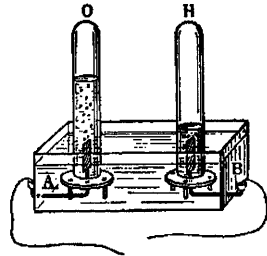
さらに、水が出来たことによってビンの中の気体なくなりビンの中が真空に近い状態になったことを弁を開いて水が上昇して入ることから説明。

つまり、水から電気によって発生した気体は、電気で点火することによって水にもどることを説明。

- 13 今度は、水溶液に入れた二つの白金電極をさらに分離して配置し、それぞれの電極を水を満たした試験管で覆う。

電流を流すと両方の電極から泡が生じて試験管の上方に溜まるのが観察される。

一方の試験管には他方よりも多くの気体がたまるのが示される。



(原本70頁)

両方とも無色透明の気体が溜まるが、丁度2：1の割合で気体が発生することを示す。

- 14 体積の多い方の試験管を取り、逆さにしたままその口に点火すると青白い光を発して燃焼する。すでに水素の燃焼を実験しているのでこれが水素であると確認できる。
- 15 他方の試験管の気体の中に火のついている木片を入れると盛んに燃焼する。

このことから、これは空気中にある酸素であることを示す。

このようにして水は水素と酸素から出来ていることを説明。

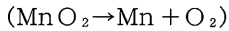


- 16 この実験の結果から酸素と水素の体積比は1：2になることを説明
また、両者の重量は酸素が水素よりもはるかに重いことを説明。

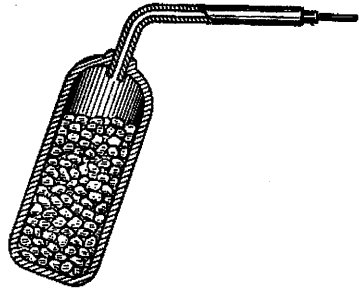
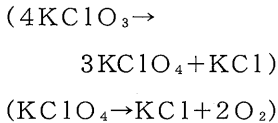
- 17 酸素を作ることを説明

空気中の酸素を集めることも出来るが面倒であることを説明

鉄製のビンに入れた過酸化マンガン（二酸化マンガン）を熱して酸素が発生することを示す。



次に二酸化マンガンに触媒として塩素酸カリウムを加えると酸素を発生することを示す。



(原本73頁)

これが酸素であることを示すためにつけぎに火をつけてこの気体に入れると明るく燃焼することを確認する。

- 18 酸素と水素の重量について比較した値を説明する。

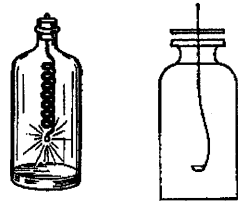
酸素は水素に対して同じ体積で16倍の重さを持っていることを説明。

- 19 再度ロウソクを空気中と酸素中で燃焼させて酸素では激しく燃えることを示す。

ロウソクが燃えると水ができることも再度説明する。

- 20 ランプも酸素を供給すると明るく燃焼することを示す。

酸素の供給を遮断するとランプの明かりは暗くなることを示す。



(原本75・76頁)

- 21 酸素の中では鉄製の針金も燃焼することを再度実験する。

- 22 酸素の中で硫黄を燃やすとやはり良く燃焼することを示す。

- 23 酸素の中でリンも激しく燃えることを実験で示す。

- 24 以上の実験から酸素が物を燃焼させるものであることを結論することができると説明。

- 25 酸素と水素の混合物が燃焼するとどうなるかを実験する。

このためにシャボン玉を一容積の酸素と二容積の水素の割合にして

小 原 政 敏

手の上に作り、それに火をつける。

この場合、火がガラス管を伝わって水素全体の爆発とならないように注意する。

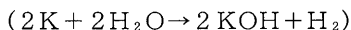
(注) このシャボン玉を用いた実験も熱心な理科教師によって現在でも利用されている。

26 以上の実験によって水・酸素・空気間の関係を理解できたことを説明。

27 カリウムが水と反応して燃焼するとき、カリウムは水を分解して水の水素を燃焼させる理由を説明。

再度カリウムを水面におき、水と反応して激しく燃えることを示す。

このとき、カリウムが水を分化し、水素を発生させ、その水素が燃焼することを説明。



氷の上にカリウムをのせると一種の火山のような現象となることを示す。

この第四講話は、水の構成元素が酸素と水素であることを示し、燃焼が酸素との化学反応であることを、水素・鉄・カリウム・硫黄・リンを用いて説明している。また、水が電気分解によって酸素と水素に分解され、酸素対水素の体積比は1対2となることも説明している。さらに水素は酸素の16分の1の重さであることも示している。

物質が化学変化をする原因は、小さな粒子である分子・原子が原因であることを硝酸銅溶液の電気分解によって示している。

また、水素と酸素の混合物をシャボン玉の中に入れて手の上で爆発させるような演技も実演している。この方法は現在でも理科教育に熱心な教員によって用いられている方法である。このようなショッキングな方法をすでにファラデーが開発していたことに改めて感心するものである。

ファラデーの実施したこのクリスマス講話は、子ども達を対象としたも

のであるが、扱われている内容は当時ファラデーも研究していた最先端の研究成果である。研究の成果をこのように分かりやすくまた興味関心を高めるように講話することに工夫を凝らしたファラデーの努力と才能は現在でも高く評価できる。

19世紀の前半に電磁気学の基礎的研究と化学的研究で当時の最先端にいた科学者が他方でこの講話のような分かりやすい興味を惹く内容で講話をしていたことを高く評価しなければならない。理科離れが叫ばれている現在、理科教育の原点としてファラデーの講話を学ぶ意義は大きい。

5、第五講の内容と分析

酸素は空気中にある……大気の本性……その色々の性質……ロウソクからのもう一つの産物……炭酸ガス……その性質

- 1 ロウソクが燃焼すると水ができるが、その時空気中の酸素が利用されること、ロウソクから出来た水を分解すると酸素と水素に分かれること、空気中の燃焼と酸素中の燃焼はなぜ異なるのかを示すことは空気の性質を理解することになると説明。
- 2 酸素の証明には燃焼を盛んにすることを確認することが大切であると説明。
- 3 燃えさしを容器の中に入れ、燃焼が激しくなることから酸素であることを確認。
- 4 二つの気体が入った容器を仕切りを設けて結合し、そのしきりを取り去ると化学反応で色が変わることを示す。これは酸化窒素が酸化して二酸化窒素（赤色）になる反応。
$$(2\text{NO} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{NO}_2)$$
- 5 空気に酸化窒素を混ぜると上記の反応が起こり、赤色となることから空気に酸素が含まれることを示す。

- 6 容器の中に水を入れて振ると赤色の気体が水に吸収されて容器の中の酸素をなくすことができることを示す。

酸素がなくなってもまだ他の気体が残っていることが分かる。

再度空気を少し入れて赤くなることを示すが、すぐに水に吸収されることを示す。

- 7 空気中でリンを燃焼させるとリンと空気中の酸素が反応した後は煙と酸素以外の空気が残る。これは6の場合と同じように酸素以外の気体が残ったことを説明。

- 8 このようにして残った空気の成分は窒素であることを説明。

窒素は、燃焼のような激しい化学反応をしないことを説明。

窒素の中にロウソクの火を入れる火を消してしまうことを示す。

あらゆる燃焼は、窒素で消火されることを説明。

窒素はにおいも味もないことを説明。

窒素は水に溶けず、酸でもアルカリでもなく、人間の感覚に感じないことを説明。

- 9 窒素がなく酸素ばかりであればほとんどのものが燃え尽きてしますことを説明。

窒素によって燃焼がコントロールされていることから窒素の存在の重要性を説明。

- 10 空気の成分が酸素20%、窒素80%であることを説明。

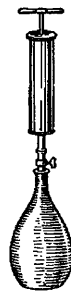
窒素は、生物の呼吸にも重要であることを説明。

窒素は、酸素よりも少し軽いことを説明。

- 11 気体の質量を測定する方法を説明。

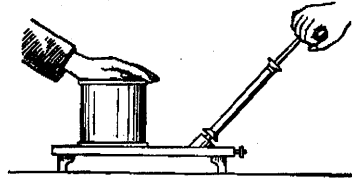
質量の分かっている容器に気体をつめてその質量を図ることによって気体の質量を求められることを実験で示す。

講話をしている講堂の空気の重さが1千キログラム（1トン）ほどあることを説明。



(原本86頁)

- 12 空気ポンプの吸い込み口に手を当ててポンプの取っ手を引き空気を抜く手が吸い込み口から離れなくなることを示す。



(原本88頁)

これは、空気の重さ（手の上にある空気の圧力）であることを説明。

- 13 豚の膀胱幕をポンプの吸い込み口に当てて空気を抜いていくと幕がだんだんへこみ最後には音を立てて破れてしまうことを示す。

この原因は、空気の圧力であることは明らかであると確認する。

さらにゴム幕を張った容器の中の空気を抜くことによってゴム幕が凹むことを示す。

- 14 二つの真ちゅうの容器を密着させ、空気が中にあるときは容易に引き離すことができるが空気を抜くと人間の力では離すことができないことを実験で示す。

後で聴衆の人々に試してみることを勧める。

(注：マグデブルグの実験)

- 15 赤ん坊用の吸い口をテーブルに押しつけるとくっつくことを示す。

これも空気の圧力によることを説明。

窓ガラスや平らな壁にこのような装置を取り付けてフックとして利用している。

- 16 コップに水を入れその上に紙をかぶせ、静かに逆さまにすると水が紙で支えられてこぼれないことを示す。

これも空気の圧力であることを説明。

このように空気はずいぶん重いものであることを理解させる。

- 17 紙鉄砲の原理を示すために、管の両端にジャガイモをつめ、他方のジャガイモを押し込むと他方のジャガイモが空気のために音がして飛び出すことを示す。

空気はある程度まで圧縮できるが、完全に圧縮できないことを説明。

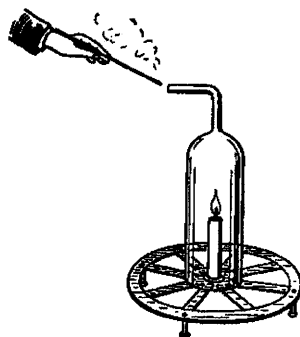
(注：これは小学校の現行の理科の内容と同じである。)

18 卵がぎりぎりはいるピーカーに入れて上から息を吹きかけると隙間から中に入った空気により、卵が上に上がることをしめす。

19 紙鉄砲は、空気の弾性によることを説明。

20 縮んだゴム風船を排気鐘に入れて、排気鐘の空気を抜くとゴム風船がふくらみ排気鐘一杯になる。空気を入れていくと風船は元の大きさになることを示す。

21 ロウソクが燃焼するとすすと水ができることはすでに確認してきたが、まだ確認しなかった物質があることを説明。



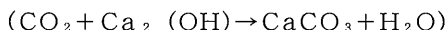
(原本93頁)

22 ロウソクを燃やし、そのロウソクに管付きのガラスの筒をかぶせると、ガラスのまわりに水滴が付くのが確認できる。これはロウソクの中の水素と空気中の酸素が化合してできたものである。

これ以外にまだ上に出てくる物がある。この煙の近くに小さな炎を近づけるとその煙によって小さな炎が消えそうになる。それは、窒素の影響と考えるかもしれないが、他の物質の可能性もあることを説明。

23 一つの空ビンをお小さな煙突の上へかざし、ロウソクの燃焼によって発生した気体を集める。この中では火が消えることを示す。

24 この集めた気体の中に石灰水を白く濁ることを示す。



白濁

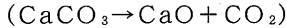
この反応は空気のみでは生じないことを説明。

石灰水は水・酸素・窒素では白濁しないことを説明

また白濁して出来た物質は白墨の成分炭酸カルシウム (CaCO_3)

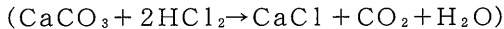
と同じであることを説明。

- 25 この炭酸カルシウムを少し湿らせて赤くなるまで熱すると気体が出てくるが、この気体はロウソクの燃焼のときにできる気体と同じであり、石灰水に入れると白濁することを説明。



- 26 この気体を炭酸ガスということ、自然界多数存在すること、石灰岩がこの炭酸ガスで出来ていることを説明。石灰岩の山・貝類・珊瑚はこの炭酸ガスでできていることを説明。大理石もこの炭酸ガスでできていることを説明。

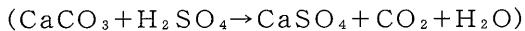
- 27 塩酸に大理石を入れると炭酸ガスが多量に出てくることを示す。



このように炭酸ガスは多くの石灰岩に固定されているので「固定気体」と呼ばれることも説明。

この実験で得られた炭酸ガスを石灰水に通すと燃焼によるものと同様に白濁することを示す。

- 28 炭酸カルシウムに硫酸を加えても炭酸ガスが発生することを示す。



- 29 炭酸ガスが少し水に溶けることを示す。

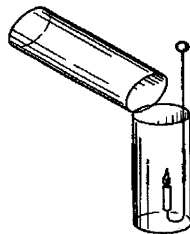
大理石に塩酸を加え発生する炭酸ガスを水に通す実験を講話の前から続けて炭酸ガスが水に溶けるかどうかを確認する。

この水をなめると酸っぱいことを示す。

この水に石灰水を少し入れると白濁し炭酸ガスが溶けていることを示す。

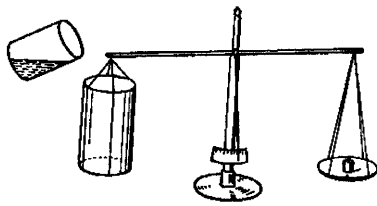
- 30 炭酸ガスが重い気体であることを説明、1立方メートル当たり約2キログラムであることを説明。

- 31 ロウソクが燃えているガラスビンの上口から炭酸ガスを流し込むと炭酸ガスが底から充満し、ロウソクの火が消えることで炭酸ガスが重い気体であることを示す。



- 32 天秤の一方にガラスコップを乗せ、他方に分銅をのせて釣り合わせておく。このコップに炭酸ガスを注ぎ込むと天秤はコップの方に傾くことを示す。

- 33 ガラスコップの炭酸ガスの中に空気を入れた風船玉を入れると炭酸ガスより軽いので炭酸ガスの上面のところで風船玉が静止することから炭酸ガスが重いことを示す。炭酸ガスを継ぎ足すと風船玉が上昇することが分かる。



(原本98・99頁)

- 34 今度は空気でシャボン玉を作り炭酸ガスの上に落とすと炭酸ガスの上面に静止することから、炭酸ガスが空気より重いことが示される。

6、第六講の内容と分析

炭素つまり炭……石炭ガス……呼吸とロウソクの燃焼……結論

第六講では、燃焼と同じように呼吸によっても酸素が消費され炭酸ガスが排出されることを説明している。このあたりも現行小学校の理科の内容である。

- 1 贈り物の日本製ロウソクについて贅沢な装飾がなされていることと心に穴があいている構造を説明。この構造はロウソクの燃焼を良くするための工夫でありロウソクの進歩であると説明、またこの日本製ロウソクはイギリス製よりも円錐形になっていることを説明。

2 ロウソクの燃焼によって生ずる炭酸ガスの成分が何であるかを明らかにすることがこの講話の目的であることを説明。

3 ロウソクは良く燃えないときはすすを生じ、燃えるときはすすがでな
こと注意。

ロウソクの炎の明るさはこのすすが原因であることを確認。

4 テレピン油を浸みかませた海面に点火し、多くのすすが出ることを示
す。

このすすから炭酸ガスができることを説明。

5 テレピン油が燃焼している海面をそのまま酸素の中に入れると、すす
が消えることを示す。

すすの炭素が酸素のなかでは完全に燃焼することを説明。

6 ロウソクにしてもテレピン油にしてもすすである炭が燃焼すると炭酸
ガスになることを説明。

上手く燃えない場合は、炭素が粒となって出てくることを説明。

7 炭をるつぼの中で燃焼させ、次にそれを酸素の中に入れると激しく燃
える。

この燃焼は、一つの炎に見えますが実際は炭素一つ一つが火花になっ
て燃えていることを説明。このときに炭酸ガスを発生することを説
明。

炭素は、炎になって燃えるのではなく、一つ一つが火花として燃焼
することを注意。

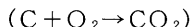
8 酸素を入れた容器につけぎで火をつけた炭を入れると炎がほとんどな
い状態で燃焼することを示す。

小さな炎が見えてもそれは一酸化炭素（CO）の燃焼であることを
説明。

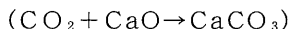
燃焼で炭素と酸素が結合して炭酸ガスができることを説明。

9 12の重さの炭素と32の重さの酸素が化合して44の重さの炭酸ガスがで
きる。

小原 政 敏

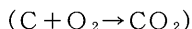


この炭酸ガスと56の重さの石灰（酸化カルシウム：CaO）が化合して炭酸カルシウムができる。牡蠣の殻の成分もほとんどこれであることを説明

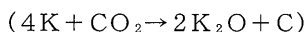


10 炭が燃えてだんだん小さくなっていくことを示す。炭が酸素の中に溶けてしまうようにみえることを示す。純水な炭であれば最後にはなににも残らないことを説明。

11 酸素は炭素と結合してもその容積は増加しないことを説明。



12 炭酸ガスを分解すると炭と酸素ができることを示すために炭酸ガスと熱したカリウムを反応させる。カリウムと炭酸ガスの酸素が反応し炭素（炭）が残ることを示す。



13 石灰水の入った瓶の中で木片を燃やすと、石灰水が白濁することを再度示す。木片が燃焼することによって炭酸ガスが発生することに注意。

木片は炭になるが、ロウソクは木片のように炭にならないことを説明。

石炭ガスは燃焼の祭多量の炭酸ガスを発生するが、炭素は見えないと説明。

14 石炭ガスに塩素を混ぜてある容器の中で、この気体に点火する。すると炭素が黒いすすとなって残ることを示す。このことから炎には炭が存在するといえることを説明。

塩素は石炭ガスの化合物から水素を分離して炭素を残す。

15 多くの燃料の中で燃焼すると固形の残留物を残さないのは石炭、木炭、木材などに限られることを説明。それ故、燃料として炉やかまどで使用されることを説明。

16 発火鉛の入ったガラス管を割って空中で燃えることを示す。

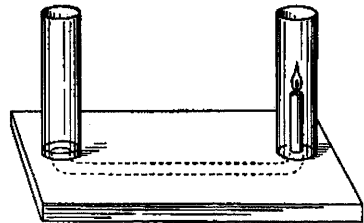
鉛が空气中で燃えるのは鉛をきわめて細かくしてあるので酸素と反応しやすいことを説明。燃焼によってできた酸化鉛が鉛の表面を覆うと反応しなくなることを説明。

炭の燃焼の場合は、燃焼でできた炭酸ガスが空气中に分散するので燃焼が持続することを説明。

発火鉛では、燃焼後元の鉛の量よりも多くの灰（鉛の酸化物）が残ることを示す。

17 燃焼と生物の呼吸が同じ反応であることを説明。

18 板の上面に溝を掘りその上をふさいで両端にガラスの筒をかぶせる。さらに一旦のガラスの筒の中にロウソクを入れて燃焼させる。ロウソクは溝から空気を供給されるので良く燃えることを示す。



(原本110頁)

他端をふさぐと空気の供給が止まり、ロウソクは消えることを示す。

19 ロウソクの燃えている反対側のガラス筒にファラデーが口を当てて自分の呼気を静かに送り、他端のロウソクの炎が消えることを示す。

これは、呼気には肺で酸素が使用され十分な酸素がないことを説明。

20 底のないガラス鐘を水をはった容器の中に置き、ガラス鐘から口で空気を吸うとガラス鐘に下から水が入り、ガラス鐘の空気が肺に吸われた事がわかる。肺から空気をはくと鐘の底面の水が元の位置までさがることを示す。



(原本111頁)

このガラス鐘の空気の中にロウソクの炎を入れると炎が消えることを示す。

このことから新鮮な空気が健康にとっていかに大切かを説明。

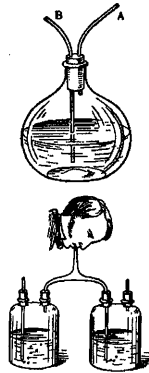
小 原 政 敏

- 21 石灰水を入れた瓶に新鮮空気を入れると石灰水はほとんど変化しない。しかし、呼吸を数回石灰水に吹き込むと白濁することを示す。

このことから呼吸には炭酸ガスが含まれていることを説明。

- 22 石灰水を入れたガラス容器を二個連結し、一方は常に新鮮な吸気、他方は常に肺からの呼吸を通す実験を実施。

この実験からも肺からの呼吸は、石灰水を白濁することを示す。



(原本112・113頁)

- 23 呼吸が酸素を吸い、炭酸ガスを排出する働きであることを説明。

この空気の呼吸によって肺から血液に送られた酸素が栄養素と化合して熱となり、発生した炭酸ガスが肺から呼吸として輩出されることを説明。

これはロウソクの燃焼と同じことであると説明。

- 24 食物の砂糖が炭素・水素・酸素の化合物であることを説明

砂糖の炭素が呼吸による酸素と結びついてロウソクのように熱を出すことを説明。

- 25 シロップに硫酸を加えて脱水させ、シロップの砂糖が黒い炭素に変わることを示す。

- 26 砂糖の炭素に塩素酸カリを加えると燃焼することを示す。

これは、肺の中の燃焼（酸化）と同じであるが、急激に反応するようにしたことを説明。

さらに、この燃焼によって出る炭酸ガスの量は、一本のロウソクが4～7時間ほど燃焼して発生する炭酸ガスに等しいことを説明。

大人は24時間に200グラムの炭素を変化させる呼吸をしていることを説明。

牛は2キログラム、馬は2.2キログラムの炭素を燃焼させているこ

とを説明。

あらゆる温血動物は、栄養分の炭素を燃焼させて体温を保っていることを説明。

このように自然界で実に多量の炭素が化学反応しているかを述べる。ロンドンでは24時間に250万キログラムの炭酸ガスを排出していると説明。

(注：ファラデーは、この説明の中で炭酸ガスが人間の日常生活や経済的活動によって炭酸ガスが大量に排出されることを指摘している。)

- 27 燃焼によって発生した炭酸ガスがどうなるかを説明。

炭酸ガスが地球上の植物にとって大切なものであることを説明。

- 28 金魚鉢の金魚を示して、この魚も水中に溶けている酸素を吸い炭酸ガスを排出していることを説明。

- 29 地球上の植物と動物は、呼吸によって酸素と炭酸ガスを供給しあっていることを説明。

自然界のあらゆるものは自然の一部をして他の部分のために役立っているというような法則によって互いに結びついていることを説明。

- 30 発火鉛の働きの原因は他の多くの化学変化と同様に化学力であると説明。

炭はその機会がくるまで燃焼しないで安定に存在することを説明。

- 31 火薬と綿火薬を示して熱した鉄片に接触させその燃え方が異なることを示す。

物質によって特有の発火温度があることを説明。

- 32 皆さんがロウソクの炎のように安定して輝き続け、人類の福祉のために活躍されることを期待すると述べて講話を終える。

まとめ

今から150年前に化学・電磁気分野で新しい自然現象を次々と発見し、人類に大きな恩恵をもたらした科学者ファラデーが少年少女のために行ったクリスマス講演は、ロウソクを取り上げ、ロウソクが燃焼する現象を多面的に探究することによって物理・化学・生命現象までの内容を含む魅力的な講演であった。

当時、我が国は幕末であり、明治維新直前であった。当時我が国で最も西欧科学の知識があった蘭学者でも自然科学について少年少女を対象に講演を行うことなど思いつかなかった。そんな時代にすでにイギリスでは自然科学者達が自分たちで自然科学の学会（王立学会）を組織し、一般市民ばかりでなく少年少女にも自然科学について分かりやすく講演を行っていた。

自然科学の研究は、急速に進む産業の発展へ寄与する面もあったが、多くの研究は自然の姿がどのようになっているのかを理解しようとする意図が主なものであった。

ファラデーのロウソクの科学は、他の科学者の講演に比べて分かりやすく一般市民にも少年少女にも人気があったと言われている。ここで分析したファラデーの説明内容とその方法も分かりやすく燃焼という現象を多面的（物理的、化学的、生物学的など）に考察をすすめるものである。物の燃焼や燃焼により発生する気体、生物の呼吸との類似性も小学校の理科の内容に含まれているものである。燃焼による水の生成・炭酸ガスの生成とその確認方法も小学校の内容である。空気の重さや圧力の説明も小学校理科の内容に含まれている。

第六講においてファラデーは人間の日常生活や経済活動によって大量の炭酸ガスが排出されることを指摘している。また、炭酸ガスによる温室効果などの考えがない時代であったが、ファラデーの指摘は現在の自然環境問題にもつながっている。

電流による発熱や発光も小学生の重要な理科教材である。電気の実験は現在では乾電池を用いて簡単に実験可能であるが、ファラデーの時代は最先端の研究課題であった。ファラデーがクリスマス講演で行ったこれらの実験は、ファラデーにとっては日々の研究材料であったと思われるが、一般の人々にとっては最新の知識となるものであった。当時の最新の科学研究の成果を少年少女にも分かりやすくしかも楽しく興味を持てるように講演したファラデーの方法は、現在の理科教育にもそのまま利用できるものである。

今回研究したファラデーの方法を、理科教育法にも採り入れて学生の理科の理解を深めるとともに理科の指導力の向上に生かすことが出来れば幸いである。

参考文献

- | | | | |
|---------------|--------|--------|-------|
| ロウソクの科学 | ファラデー著 | 矢島裕利訳 | 岩波文庫 |
| 大自然科学史 | ダンネマン著 | 安田徳太郎訳 | 三省堂 |
| ファラデーが生きたイギリス | 小山慶太著 | | 日本評論社 |
| 科学の考古学 | 平田 寛著 | | 中公新書 |