

# 優れた生徒課題研究の成果を教材化する試みと実践報告①

複合領域で活用できる教材開発（酸化還元を利用した七色に輝く銅箔の化学）

渡辺 尚（宮城教育大学・理科教育講座），菅原 佑介（仙台第三高等学校・教諭）

Attempt to make the results of excellent and scientific study of student activities  
into teaching materials and practice reports ①

WATANABE Naoshi

SUGAWARA Yuusuke

## 概要

我々は、世界最高峰の生徒研究の大会である ISEF（国際学生科学技術フェア）で受賞した「銅箔の色調変化の研究」を題材に、教材開発および授業実践を行った。銅箔をグリルプレートで焼くことによって、加熱温度と時間に応じた様々な色の銅箔を作り、それを用いて様々な銅箔作品（スケルトンリーフ・貝殻・A4コピー用紙・A4カラー用紙・レジン封入銅箔ストラップ）を授業等で扱うことができた。これは、初等教育においては理科で扱う3つの金属の代表（銅）としての活用応用例を示し、中等教育においては、酸化反応を絡め、優れた探究活動事例の一つとして示すことが出来た。現職教員や教員の卵が多い本学の大学院生（教職大学院生および修士課程院生）に対して、高いレベルの生徒研究を示しながら、どのように教材化し授業展開するかといった STEM 教育/STEAM 教育の一環として活用できる筋道を示すことができた。

Key words: 銅箔 STEM 教育/STEAM 教育 ISEF 課題研究/探究活動 酸化銅(I)

## I はじめに

多くの教員や教員を志す学生は、サイエンスに対する研修を欲しており、分かりやすい教材の開発、あるいは新しい教材開発の視点はいつの時代にも要求され、普遍的なものとして考えられる。実際に多くの教材開発に関する教育事例が報告されているのは心強い。一方「深い学び」が叫ばれ多くの探究活動が児童・生徒の活動に脚光が浴びるが、その指導を貫き最後まで子供達に寄り添える教員は少ない。実際に教材開発事例の報告は沢山あるが、初等教育や中等教育において、児童や生徒の探究活動から得られた誰もが認める優れた研究成果を「教材」として取り入れた授業実践は殆ど散見できない。

我々は、生徒が学校教育の中から課題を見出し発展させ、その結果、最高峰の生徒研究発表会であ

る ISEF（International Science and Engineering Fair：国際学生科学技術フェア）で受賞した生徒の課題研究/探究活動成果を取り上げる。その優れた研究を「実際に」指導し、その成果について分かりやすくかつ取組やすく教材化した STEM/STEAM 教育につながる授業実践事例について報告する。

## II 教材の背景とその性質について

### 1 課題研究/探究活動における ISEF の位置づけ

日本国内の課題研究/探究活動を発表する場所と機会は SSH 校の指定など国の施策もあり、一昔前よりは増えた実感がある。その中で、ISEF は世界最高峰の生徒研究の祭典となっている。この大会に出場するには、日本学生科学賞で中央審査に選ばれさらに上位に入賞し代表選出されるか、高校生科学技

術チャレンジで上位に入賞し代表に選ばれる必要がある。

## 2 ISEF2015 での日本人の活躍

ISEF2015 は、アメリカペンシルバニアのピッツバーグのデイヴィッド・L・ローレンス・コンベンションセンター(David L. Lawrence Convention Center)を会場として、2015 年 5 月 10-15 日の 6 日間に渡り行われた。日本代表として派遣された個人・グループの生徒 13 研究の中(日本学生科学賞で上位に入賞した 5 研究/高校生科学技術チャレンジで上位に入賞した 8 研究)で優秀賞(Grand Award)を受賞した研究は、4 部門で一つずつの合計 4 研究であった。その中で日本人最上位の賞を受賞した研究が 2 つあり、偶然にも宮城県の高校生の研究であった(渡辺(2016))。化学部門で門口尚広氏(当時仙台第三高等学校高校 2 年生)が、また地球環境科学部門で遠藤意弘氏(当時仙台二高高等学校高校 3 年生)が共に 3 等賞を獲得した(河北新報 2015. 6. 17 朝刊等)。

この報告で取り上げる化学部門の門口氏の課題研究/探究活動成果が「銅箔の色調変化の研究(Color Change of Copper Foil by Oxide Thin Layer Formation)」である。

## 3 教材の性質・理論的背景について

銅板は空気中で加熱されると表面に酸化銅 (I) を形成し、薄膜の光学干渉により様々な色を与えることが知られている。この色の変化の規則性は、金属中の酸素原子の拡散距離の式を用いて説明することができる(図 1)。門口氏の研究は、従来から知

$$D = D_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad L(t) = 2\sqrt{Dt}$$

$D$ : 拡散係数( $\text{m}^2/\text{s}$ )       $D_0$ : 拡散定数( $\text{m}^2/\text{s}$ )  
 $E_a$ : (活性化エネルギー( $\text{kJ}/\text{mol}$ ))  
 $R$ : 気体定数       $T$ : 絶対温度  
 $L$ : 拡散距離       $t$ : 加熱時間( $\text{s}$ )

図 1 拡散係数と拡散距離の関係式

られていた銅板表面に酸化皮膜が形成され、この皮膜により色調変化を起こすことをヒントに、銅の薄膜(銅箔)に応用したのが端緒となった。銅箔を加熱することで酸化皮膜を形成し、その酸化皮膜の厚さによって様々な金属光沢を持った色を理論的に作り出すことを可能にした。特筆すべきは、塗料や化学的薬品を使わずに金属光沢を持つこと、またモルフォ蝶の羽が美しくカラフルな金属光様に輝きを示す「構造色」とは違う原理で作り出すことに成功したことが挙げられる。

銅板より薄い銅箔は酸素原子が銅箔の中を拡散する距離に応じて、色が変わる。拡散距離は加熱時間と温度に応じて、オレンジ(橙・赤橙)、紫、銀、金、ピンク、緑色を呈するが、その傾向を(図 2)に示した。



図 2 酸素の銅箔中拡散距離と発色の関係  
(数値の単位:  $\mu\text{m}$ )

金箔と銀箔は、絵画、屏風、漆器、その他の装飾材料などの日本の伝統芸術として根付いている。特に銀箔の場合は、硫化水素との反応により得られる光沢のある様々な色を示され、例えば(株)今井金箔(金沢市)では 21 色の銀箔が光陽箔という商品名で販売されている。しかし銅箔に関して、様々な色を論理的推測から作り出したという報告は無く、門口氏らの研究で初めて解き明かされたものであり、新しい材料として、新たな工業的活用や芸術的活用有望であり、全く新しい可能性を生み出した。

## III 銅箔を用いた授業実践・体験授業について

### 1 教科書に取り上げられている銅教材について

多くの児童が、初めて銅について学習する機会は、小学校 3 年生の理科の授業であろう。小学校 3

年生の教科書では金属の代表として「鉄」「銅」「アルミニウム」が示され、この3種類の金属について電気が流れること、また磁石にくっつくかどうかの内容を学習する。

中等教育では、銅の化学的性質について反応性を中心に学ぶ。中学校では、銅は塩化銅(II)の電解質として、あるいは電極として電池や電気分解で登場する。そしてイオン化傾向から銅が析出しやすい金属であることを履修する。高校では銅は極めて熱伝導性や電気伝導性が良い金属として紹介され、遷移金属元素としての性質や、酸やアルカリとの反応について、あるいは酸化力のある酸との反応や錯塩形成についてなど、様々な銅の化学的性質を学ぶことになる。また生徒の探究活動で登場する場合が多い。銅に纏わる研究は、錯イオンとして呈色したカラフルな色に魅了された生徒達が、錯体化学を中心に研究を行った成果が多く発表されている。

一方、酸化銅(I)については、中学校の科学の教科書で、ベネジクト溶液を使った糖の検出反応の際にできる「赤い沈殿物」として登場するが、その正体については述べられないことがない。また、高校化学においては、酸化銅(I)は赤色物質として紹

介され、「フェーリング反応」の際の還元反応によって生成された赤色物質として取り上げられ、大学入試の頻出事項の一つに数えられる。しかし、中学校で履修した「ベネジクト反応」は高校で習う「フェーリング反応」と原理は同じで、還元糖が持つアルデヒド基によって、 $\text{Cu}^{2+}$ が $\text{Cu}^+$ に還元されることにより $\text{Cu}_2\text{O}$ (赤色沈殿)が生じる反応である(図3)。

用いる薬品がクエン酸三ナトリウム(ベネジクト反応)か、酒石酸ナトリウムカリウム(フェーリング反応)かが異なる。 $\text{Cu}_2\text{O}$ 生成によって酸化還元反応を用いる反応には変わらない。しかし、酸化銅(I)の結晶が透明(ややオレンジ色)になることは学習しない。

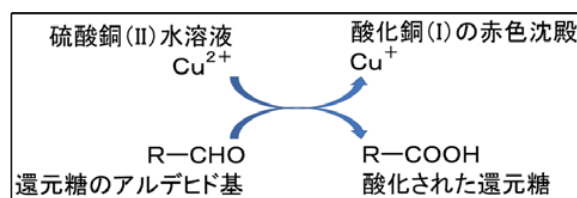
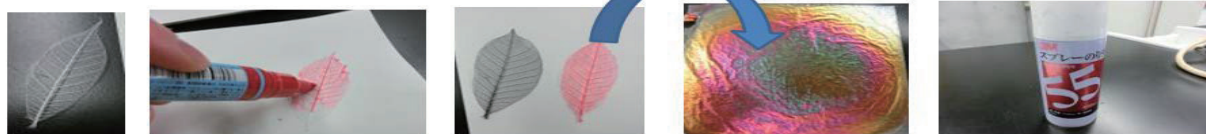
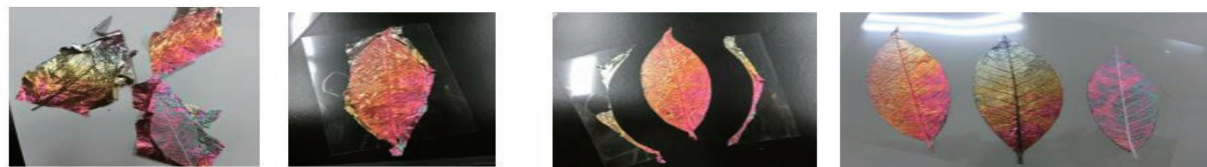


図3 ベネジクト反応とフェーリング反応に共通した反応メカニズム

## 銅箔リーフを作ろう！



①スケルトンリーフの葉脈を好みの色に塗ります。②葉脈にスプレーノリをかけ、好みの銅箔の色の箇所を上から貼り付けます



③葉脈の銅箔側にラミネートを貼り付けます(銅箔の補強)

④葉脈からはみ出した銅箔を切り落とします

⑤完成！

図4 カラフルな銅箔を利用した子供たちを引き付ける教材例・著者である菅原の実践見本例

## 2 授業実践例(1)小学生～高校生中心の授業

筆者の菅原は、指導教官として ISEF2015 で受賞した門口氏を指導した経緯から、優れた高校生の探究活動の成果を教材化した(図4)。菅原は銅箔を用いた授業実践として、勤務校での高校化学の授業ではもちろん、学都「仙台・宮城」サイエンスデイにおいて、「カラフルな銅箔を作ってみよう!(2015)」

「銅箔の色調変化を体験し、カラフルな銅箔を使ってストラップを作ろう!(2016)」「キラキラ7色に輝くレインボーリーフを作ろう!(2018)」等、小学校1年生～大人を対象に授業実践を行って来た(菅原(2016))。また、他にも仙台市科学館主催の市民講座「楽しい化学実験」で30名の児童を前に実験講座を行って来た。更に、教員対象の化学研究大会実験研修会(埼玉県高等学校理化研究会主催)においても講師を務めるなど実践を行って来た。

教材例として様々検討を試みたが、サイエンスデイでは、グリル(ホット)プレートで好みの色が出るまで焼いた銅箔を用いて、銅箔リーフを作製する参加型(親子体験を含む)の実験実習を行った。その結果、菅原の親子参加型の体験学習の出展は、宮城県産業技術総合センター所長賞(2016)や日本分光学会東北支部長賞(2016)、また日本化学会東北支部賞(2018)など多くの高い評価を頂戴してきた。

尚、メディアでは、日本テレビ NEWS ZERO 内の「ZERO human」(2015年7月14日)にて放送され、河北新報夕刊『勝手にノーベル賞』(2015年11月26日)に掲載された。

## 3 授業実践例(2) 大学院講義での実践

2014年より、門口氏の指導助言を行って来た渡辺は、宮城教育大学の教職大学院と修士課程在籍1年目の学生に対して、一回目の講義では優れた高校生の生徒研究としての紹介と、理論的背景を説明した上で、菅原が開発した教材の実践事例を紹介してきた。大学院生が優れた生徒研究に直接出会って指導する可能性はそう高くない。従って貴重な教育事例を体験するばかりか、その目線で指導できる教員

として教壇に立つて欲しいと期待した。理論と実践の往還が見事に融合した教育および教材開発事例として、銅箔をグリルプレートで焼き、カラフルな銅箔を作り、スケルトンリーフや貝殻に貼り、児童・生徒をはじめ複合的領域で行える実験を「理科教育特講(教職大学院)\*1」と「理科教育特論(修士課程)\*2」の講義で実践を行って来た(図5)。

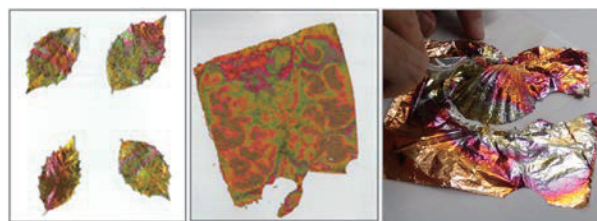


図5 酸化銅箔とそれを用いたリーフと貝殻の作り方を示した実践例：著者である渡辺の講義で使用した見本例

二回目の講義では、90分の時間をフルに活用して提出を前提とした自由題での作品の製作を行った。そして、受講した学生銘々が製作した\*1と\*2で2016-2019年度に実践してきた学生の作品例を(図6)に示した。銅箔の作品の背景として、黒・紫・青・白の用紙を準備した。写経では金文字を使用するときの背景には紫色の半紙を使うことで文字を引き立たせることで知られているが、それと同様に背景色を任意に選択させた。また、台紙の上に一度ラミネートで挟み込んだ銅箔をハサミなどで切って軽くのせ、あるいは固定してラミネートで封入した。尚、講義と実習は宮城教育大学理科実験棟の多目的実験室で行った。主な準備物(図4～図6)は次の通りである。(製作時間：60分～90分)

準備物一覧：

銅箔(約180ミリ角・例えば今井金箔では、約6-8 $\mu$ mのものを取り扱っている)、グリルプレート(YAMAZEN製 YHP-700)、竹製ピンセット、ラミネートフィルム(100 $\mu$ m用)、スケルトンリーフ、ラミネーター(Nakabayashi製 HEL-01A3)、スプ



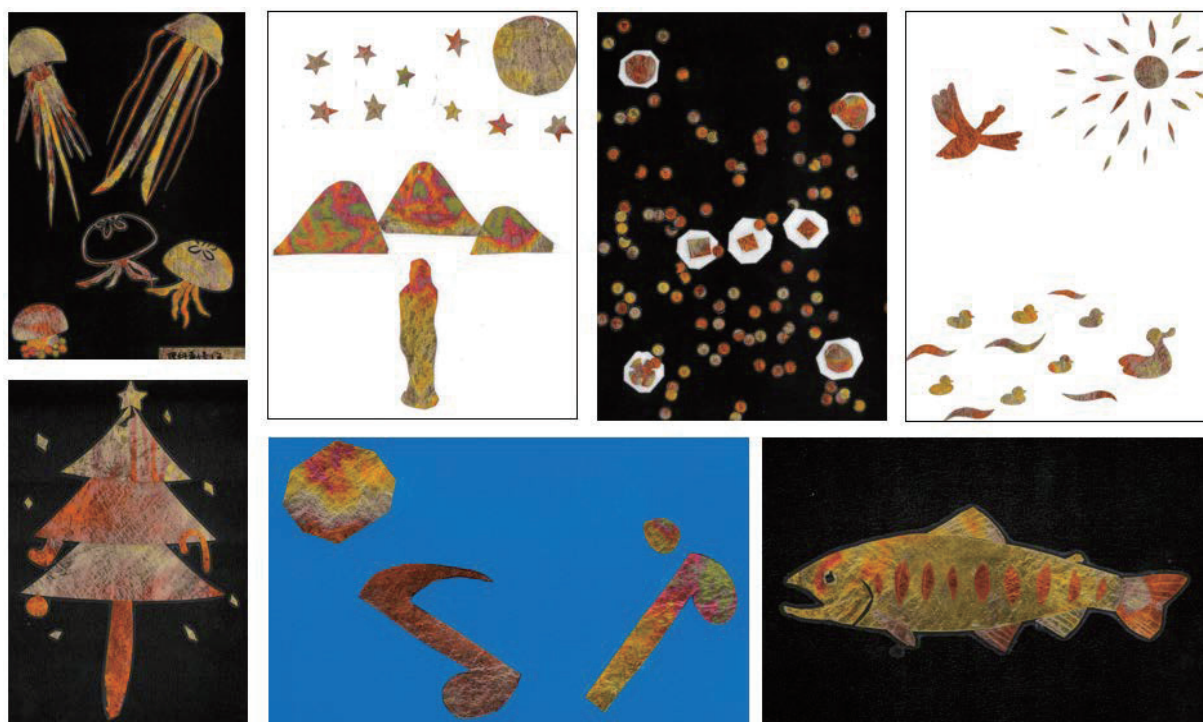


図6 ラミネートフィルムで挟んだA4やB5の大きさの作品。\* 1 \* 2での学生作品の一部

レー糊（3M スコッチ スプレーのり 55 430ml S/N 55）、色マジック、ハサミ、貝殻

#### IV 終わりに

##### 1 教材活用の展望

この優れた生徒研究の成果を教材化する試みは、理論と実践の往還が見事に融合した教育および教材開発事例となろう。またシュタイナー教育に代表されるような教育芸術にとどまらず、近年脚光を浴びている STEM 教育 (Science, Technology, Engineering and Mathematics: 科学・技術・工学・数学の分野の融合教育) に Art (芸術) を加えた STEAM 教育としての活用が期待できる。それは広く、小学校・中学校・高等学校・社会教育まで包括した複合領域の教材としても多いに活用できよう。そして色彩感覚の豊かな日本において伝統工芸と結びついた活用が今後見込まれる。

2017年に仙台で開催された第9回国際マイクロスケール実験シンポジウムでは、執筆者らは、Brilliant copper chemistry using redox (酸化還

元を利用した七色に輝く銅の化学) と題して実験ワークショップの開催を担った。その時、参加者に提出してもらった作品の一部を(図7)に示した。最近では、陶芸を専門とする業者からの問合せを受けることもあり、様々な分野での活用が見込まれる。

##### 2 STEM/STEAM 教育推進の心得

教育現場では、学習到達度が遅れ気味や、芳しくない子供達に対しては、手厚い指導が施されるのは当たり前と捉えられる傾向があり、援助の手が差し伸べられることが多い。一方、学習到達度が目標よりはるかに進み、いわゆる出来る子供達をより高みに至る指導を実践する事例は少ないと感じる。

この教育事例のように ISEF に出場する程の生徒研究とまででなくとも、各地で優れた生徒研究は数多く発表され、ともすると教員側が指導の範疇ではないと判断してしまうような研究が多数存在する。そのような教育現場から発信された生徒研究にスポットライトを当てて教育実践を行ったのが今回の報



図7 第9回国際マイクロスケール実験シンポジウム実験ワークショップ参加者作製リーフ

告である。是非、指導者はトレーナー的役割で、子供たちをより高いステージに上がれるような指導や助言を心掛けて欲しいと考える。

今回の教育実践事例は、STEM/STEAM 教育としての一例を示すことができ、また小学校・中学校・高等学校・社会教育まで包括した複合領域の教材としての活用例を示すことができたと考える。

## V 謝辞

この研究は（公財）中谷医工計測技術振興財団科学教育振興助成、JSPS 科学研究費助成事業基盤研究（C）（課題番号 18K02975）の助成及び平成 31 年度 教員養成大学ならではの学校教育・教員養成に関する研究への重点支援研究経費の支援を受けて行った。

## VI 引用・参考文献

門口 尚広（2014） 銅箔の色調変化の研究～銅箔の色を数式を用いて捉えることに確信を～

[http://sec-db.cf.ocha.ac.jp/pdf/58\\_seikagaku\\_HC16.pdf](http://sec-db.cf.ocha.ac.jp/pdf/58_seikagaku_HC16.pdf) (2020. 1. 1 閲覧)

門口 尚広, 相原 竜（2016） 銅箔の色調変化の研究（pp. 356-357） 2016 年第 40 回全国高等学校総合文化祭自然科学部門論文集

小竹 無二雄 他（1957） 実験化学講座 15 分析化学(上)（p. 101） 日本化学会

菅原 佑介（2016） 銅箔の着色を題材にした授業実践について～「誰でも」「簡単」「確実に」伝統工芸を～（pp. 178-179） 平成 28 年度全国理科教育大会石川大会研究発表論文（資料）集 第三十八巻

渡辺 尚（2016） インタラクティブ・アクティブラーニングを取り入れた化学部活動 研究テーマのデザインから ISEF 連続受賞まで（pp. 110-113） 平成 28 年度全国理科教育大会石川大会研究発表論文（資料）集 第三十八巻

山本 剛（2014） 平成 24 年小学校教員の理科教育に関する意識について（pp. 2-8） 奈良県立教育研究所研究紀要

科学が開く 世界への扉／国際学生フェア 県内高校生 2 人が 3 位／ 仙台二 遠藤君 斜面の崩壊を再現／仙台三 門口君 金箔代用物質探る（掲載日：2015 年 06 月 17 日 河北新報社）