色素増感太陽電池を用いたエネルギー変換教材の研究と教育実践による検証

電気研究室 松田 拓未

I はじめに

中学校「技術」及び高等学校「工業」では、環境・エネルギーに関する学習を行うことが両教科ともに学習指導要領に明記されたことを受け、適切な実習教材の開発が必要とされている。小学校「総合的な学習の時間」においても児童が「環境」に関するテーマでものづくりを通じて自ら課題を見つけて学び、考え、主体的に判断していく適切な実習教材の開発が必要である。そこで、日常生活と切り離すことができない電気を環境・エネルギー教材として取り上げることができれば、学習者のエネルギーや環境問題に対する関心・意欲が向上するのではないかと考え、「色素増感太陽電池」の製作を行う授業・企画をし、教育実践することを目的とした。「色素増感太陽電池」を取り上げた理由として、現在も研究開発が進められている先端技術でありながら学校の理科室や技術室、実習室程度の設備で製作が可能であり、危険な薬品を使用しないため、製作材料を簡単に入手できるからである。また、太陽電池を手作りできる場所にも教材としての魅力があり、色素を変えたり組み合わせたりさせて、学習者に考えさせることで、自ら課題を見つけて学び、考え、主体的に判断していく人材の育成へとつながると思われる。そして、各学習者が製作した太陽電池は、光を当ててテスター等で発電の確認ができる。このことから、色素増感太陽電池を用いた環境・エネルギー変換に関する学習教材は、学校現場の教科「技術」及び「工業」、「総合的な学習の時間」において適切であると提案できる。しかし、製作する手順や使用する材料についての研究はあるが、論文を参考にした追試から再現性に乏しく、実際に学校現場で授業として実施することは困難であることが判った。また、市販に売られている色素増感太陽電池の材料セットなどに付録としてある製作資料を見ても、再現性に乏しいのが現状で、多くの学習者が完成できるのは難しいといえる。

本研究では、色素増感太陽電池機能の再現性を高め、エネルギー変換教材として教育現場での実践を目的に、負極側に使用する酸化チタン (TiO_2) を塗布する角度・焼成時間の検討を行い、ソーラシミュレータ及び走査型電子顕微鏡 (SEM) による表面解析などを行った。また、正極に塗布する鉛筆についても、再現性の観点から望ましい濃度について検討した。さらに、色素増感太陽電池を作製し、日にちが経過することで、どの程度劣化するかも調べた。その後、色素増感太陽電池に関する各種検討結果からどの児童・生徒が読んでもわかりやすい実習インストラクションを作成し、校種ごとの児童・生徒に対して教育実践を展開した。実践後には学習アンケートを実施し、その結果についてまとめたことで、色素増感太陽電池を用いたエネルギー変換教材は、児童・生徒にどのような影響を与えたかを校種ごとに検討・考察し、報告としてまとめた。

II エネルギー変換教材に向けた各種実験及び結果

2-1 TiO_2 ペーストの塗布について

塗布方法の1つである「スキージ法」で TiO_2 ペースト塗布する場合、塗布角度を変化し、その電圧 V 及び電流 I を測定することで最適な塗布角度を選定することを目的とした。

実験方法は、 $2\text{cm}\times 2\text{cm}$ の面積に簡易ドクターブレード及び自動ステージを使用して 0° 、 30° 、 60° 、 90° と角度を変えて塗布した。自動ステージが動くところに、簡易ドクターブレードを手で押さえて、電極用導電性ガラスに TiO_2 ペーストを塗布する方法により、均等に TiO_2 ペーストを塗布することを狙ったものである。塗布後は、全ての負極用電極をホットプレートで乾燥（10分）、ガスコンロで焼成（10分）、乾燥（10分）という順で統一して作製を行った。正極側電極にはHB鉛筆を塗布し、電解質溶液であるヨウ素液を2滴垂らした。測定には、光照射機に入れて、ハロゲンランプを光照射機の頂点に設置し、高さ30cmからハロゲン光を照射して実験した。色素を浸透させずに作製することで、 TiO_2 のみの発電量をデジタル・マルチメータを用いて測定した。電流Iについては、作製した太陽電池に 100Ω の負荷を直列接続し、負荷の両端電圧をデジタル・マルチメータで電圧測定してからオームの法則より電流を算出し、評価した。

結果として平均電圧・電流は 0° のときが高いことがいえる。しかし、どの角度もデータの分散値が高く、「スキージ法」では、再現性の高い太陽電池の作製は難しいことがいえる。

2-2 TiO_2 の焼成時間について

「スキージ法」で一番電流値が高い塗布角度 0° において TiO_2 ペーストを塗布した後、焼成する時間について変化させることで、適した焼成時間について検証を行った。実験方法については、2-1に記述した方法で、焼成時間を10分、20分、30分、40分とし、測定結果を考察した。

結果として電圧V及び電流Iが30分の焼成時間のとき最高値を示し、分散値も見られず良好な結果であった。その他の時間では分散値が大きかった。しかし、教育実践を考えた際、学習者が太陽電池の焼成時間に30分待機することは難しいと考えられる。30分の電圧・電流値と大差ないことから、焼成時間は10分で良いと判断した。また、分散値を小さくするために、作製装置が必要であることが示唆された。

2-3 負極の時間経過による性能の劣化について

TiO_2 ペーストを「スキージ法」で 0° で塗布し、焼成時間10分で作製した太陽電池を日にちが経過することで、開放電圧 V_{oc} の変化を調べた。太陽電池の作製方法は2-1に記述した方法で、開放電圧を測定したところ、日にちが経過する毎に低下していくことが確認できた。

また、測定の際にヨウ素を補充するプロセスを追加で行ったところ、結果として日にちが経過する毎に低下した。太陽電池において開放電圧が低下する要因は、色素が光励起により電子を放出し続けることで、色素の光励起量が落ち、開放電圧を低下させたことが結果から考察できた。

2-4 走査型電子顕微鏡 (SEM) による TiO_2 表面の観察

色素増感太陽電池の作製方法として、2-1で行った「スキージ法」以外に、ガラス棒及び鉛筆の表面にテフロン加工を施したもので TiO_2 ペーストをガラスに塗布する方法と

自作で教材用のスピコート法を製作し、「スピコート法」でガラスに TiO_2 ペーストを塗布する方法を用いて、走査型電子顕微鏡 (SEM) により表面の観察を行った。

結果としてスキージ法による角度毎($0^\circ \sim 90^\circ$)、ガラス棒、テフロン加工鉛筆の SEM 画像は TiO_2 に亀裂や剥がれが生じていることがわかる。また、厚さが薄い部分と厚い部分が混在しており、電気伝導性が低下することが考えられる。これらに対して、スピコート法で作製した TiO_2 表面は、亀裂が非常に少なく、厚さが均一に塗布されていることがわかる。厚さが均一に塗布されているということは、電気伝導性の向上が期待できる。

2-5 ソーラシミュレータを用いて最適な塗布方法を選定

「スキージ法」で作製した太陽電池と「スピコート法」で作製した太陽電池を 1 つずつ用意し、どちらが電圧-電流特性 (V-I 特性) が良いかをソーラシミュレータで測定し、考察した。

実験方法として、 TiO_2 ペーストの塗布には「スキージ法」については、 $2\text{cm} \times 2\text{cm}$ の面積に示す簡易ドクターブレード及び自動ステージを使用して、電流分散値が比較的低い 0° の角度で塗布した。「スピコート法」については、 $2\text{cm} \times 2\text{cm}$ の面積に自作スピコート法を使用してギア比 12:1 により、回転数約 2000rpm で 5 分間回転させた。塗布後は、2 つの負極側電極をホットプレートで乾燥 (10 分)、ガスコンロで焼成 (10 分)、乾燥 (10 分) という順で統一して作製を行い、電解質溶液であるヨウ素液を 2 滴垂らし、ハイビスカス色素に 10 分間浸透させた。正極側電極には HB 鉛筆を用意して 5 分間塗布を行い、負極側電極と正極側電極をダブルクリップで挟んだ。測定にはソーラシミュレータを使用し、日本の標準緯度 (兵庫県明石市の緯度 $37^\circ 38'$) に照射される AM1.5 相当の光を作製した太陽電池に用いて測定した。

結果として開放電圧 V_{oc} 及び短絡電流 I_{sc} とともに「スピコート法」で作製した太陽電池が大きい値を示した。また、V-I 特性グラフの面積が大きいほど、V-I 特性が良いといえるため、「スキージ法」で作製するよりも「スピコート法」で作製した太陽電池の方が発電効率において高く、SEM 観察を行った 2-4 の結果と一致することが確認できた。

2-6 「再現性」向上を目指した使用鉛筆の濃度選定

色素増感太陽電池を作製する際、正極部分において、作製者が塗布しているときに触ることや塗布する力の入れ具合によって完成度が変化することが考えられる。そこで、日本工業規格 k5600「塗料一般試験方法」第 6 節「付着性」を採用し、炭素が剥がれることで、どの程度正極用電極に光が吸収されるかを検討した。光が吸収される度合いが大きい濃度ほど、光が発電に使用されることが考えられる。

実験方法として、使用する鉛筆の濃度は F, HB, 2B, 7B, 10B を使用した。実験前に、可視紫外分光光度計に何も設置しない状態で測定し、この状態を透過率 100% として、以後の実験を行った。正極用導電性ガラスに 5 分間鉛筆を塗布して、引き剥がし前の測定 [1st]、セロハンテープで 1 回引き剥がした後の測定 [2nd]、セロハンテープでもう 1 回引き剥がした後の測定 [3rd] の合計 3 回を可視紫外分光光度計で測定した。濃度ごとに透過率とし

てまとめた結果、F, HB, 2B は引き剥がし試験を実施しても透過率 50%程度からあまり変化が見られない。それに対して 7B, 10B は引き剥がし試験を実施するごとに光の透過率が上昇していき、2 回目の引き剥がし試験では、7B 及び 10B は 80%程度光が透過していることが確認できた。

追加実験として、鉛筆濃度の発電効率に与える影響をソーラシミュレータを用いて調べた。負極用電極の作製には、2-5 で記述した「スピコート法」の作製方法を採用した。結果として、HB の鉛筆で塗布した太陽電池は開放電圧 V_{oc} 及び短絡電流 I_{sc} が一番高い値を示しており、 $V-I$ 特性グラフも大きいことから、発電量が高いことが確認できた。また、7B や 10B など濃度が高い鉛筆で塗布した太陽電池は、発電量が低い傾向が示された。

III 色素増感太陽電池を用いたエネルギー変換教材の教育実践

「再現性」に焦点を当てた実習資料の作成を行い、スピコート法を用いて色素増感太陽電池を作製する「エネルギー変換教材」による教育実践を行った。小学生、中学生、高等学校生に教育実践を行った。小学生を対象にした実践は、愛知県産業労働部及び（株）中日アド企画と連携して「親子理科教室」、「夏休み新エネルギー親子工作教室」、「クルマ未来博 2012 子ども工作教室」で各回 30 名程度に行った。中学生を対象にした実践は、愛知県立 A 工業高等学校「中学生体験入学」の 19 名に行った。高等学校生を対象にした実践は、愛知県内の工業高校 4 校にお願いし、科目「実習」などの授業時間内（3 時間程度）で実践していただいた。各高等学校の選定は地域が固まらないように名古屋地区、尾張地区、三河地区で最低 1 校ずつお願いした。すべての教育実践の最後にはアンケートを記入してもらい、色素増感太陽電池を用いたエネルギー変換教材の教育実践が子どもたちにどのような影響を与えたのかを検証した。

小学生、中学生に対して教育実践を行ったことによる結果として、多くの小学生や中学生にもものづくりや環境・エネルギー問題への興味や関心、意欲、態度が育てられる教材であることが確認できた。エネルギー変換教材として学校教育において小学校では「総合的な学習の時間」などの場面、中学校では教科「技術」などの授業において「エネルギー変換」の単元として、理論 1 時間、スピコートの製作 2 時間、太陽電池の作製及び測定実験 2 時間、まとめ 1 時間の合計 6 時間の授業を実践することができると考えられる。高等学校生では、教育実践を行ったことによる結果の特徴として、高等学校の地域間格差がある中、興味・関心が高い学校の高等学校生に実践する場合は、小学生や中学生まではいかないが、教材としてもものづくりや環境・エネルギー問題への興味・関心を育てることができるといえる。また、全ての高等学校に共通していえるのは、「ものづくり」に対する意識が「変わった」と回答した生徒が各学校で半数程度おり、「ものづくり」に対する意識の変容を与えることができる教材としても効果があると考えられる。教科「工業」において、学科を問わず工業技術基礎や課題研究、実習の 1~2 回分（3~6 時間程度）の授業で実践することが可能であると思われる。