

“ぶち発明”をいかした教材としての色素増感太陽電池

Dye-Sensitized Solar Cell in Energy-Environment Education from Viewpoint of “Petit Invention”

小田善治、川村康文、柏倉達也、
柴木悠作、海野貴央、紫藤寛司（東京理科大学）
藤原清（NPO法人サイエンスEネット）

ODA Yoshiharu, KAWAMURA Yasufumi, KASHIWAGURA Tatsuya,
SHIBAKI Yusaku, UNNO Takao, SHITOU Hiroshi (Tokyo University of Science)
FUJIWARA Kiyoshi (NPO Science E-Net)

要約：平成24年4月1日より全面実施される新学習指導要領において、中学校理科ではエネルギー教育を行うよう明記され、適切な実験機材を用いることで学習者の学習効果の促進を期待したい。しかし、エネルギー環境教育の授業を行う全ての教師がエネルギー科学の分野に精通しているわけではない。従って、授業に適した実験教材の開発は重要である。そこで今回、“ぶち発明”の方法論（川村、2007a）を利用した適切な実験教材として、色素増感太陽電池教材をセットアップした。本研究では安価で作成が容易な色素増感太陽電池教材を開発し、この教材を学校現場で用いたところ、高い学習効果が得られたので報告する。

1. はじめに

新エネルギーについて、児童・生徒が学べる実験教材を求める声は多い。これまでも新エネルギーの教材について、第二著者はさまざまなタイプの実験器具を開発してきた。例えば手回し発電機の作成と発電実験、色素増感太陽電池での発電実験、身近なドリンクで作る燃料電池での発電実験、サボニウス型風車風力発電機での発電実験、自転車発電でテレビをつける実験などがある。

今回研究に取り上げた実験教材は色素増感太陽電池である。次の二つのポイントの実現をめざした。

- ①：これまで以上に『適切な教材価格』を意識した原材料費の削減
- ②：安定した性能とその持続性

①で挙げた問題については、従来までの色素増感太陽電池では教材費が高いため教育現場から敬遠されがちであったが、今回電気伝導性ガラスの大きさを約30%に縮小し、さらに陽極側に使用していた電気伝導性ガラスをステンレス板に変えることで、原材料費を500円以内に収めることができた。

また②で挙げた性能・持続性については、従来までの色素増感太陽電池に比べて、作成方法を改良することにより、安定した性能を維持することにも成功した。以上より教育現場で、エネルギー環境教育の教材とし

て十分に役に立つ教材が開発できたと考える。

2. 色素増感太陽電池とは

2.1 色素増感太陽電池の動作原理

色素増感太陽電池のプロトタイプはスイスのグレッツェルらが開発した太陽電池で、太陽の光からエネルギーを取り出す植物の光合成に似ているため、光合成型太陽電池とも呼ばれる。今回紹介する太陽電池の主な材料は電気伝導性ガラス、ステンレス板、二酸化チタン、色素、ヨウ素溶液である。二酸化チタンは、光触媒作用を利用して汚れにくいタイルに用いられている。太陽の光を吸収する色素には、ハイビスカス、緑茶、紫キャベツ、ブルーベリーなどの天然色素が利用できる。

現在普及しているアモルファスシリコンの太陽電池は、製造のために投入するエネルギー量が膨大で、かつ高い技術力が必要である。更に、廃棄の段階で大量の廃棄物が懸念される。しかし、色素増感太陽電池は低コストで作製でき、比較的小規模の施設での製造が可能であり、環境への負荷が少ないという特徴もある。

色素増感太陽電池の発電原理は下に示す通りである（図1参照）。光が色素に当たると、色素中の電子が励起される。励起された電子はすぐに半導体である二

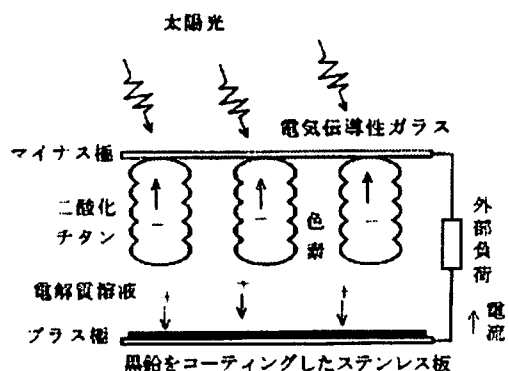


図1. 色素増感太陽電池の発電原理図
(川村、島田、吉田、藤原改作、2007b)

酸化チタン TiO_2 に受け渡され、電気伝導性ガラスで作られた電極へと送られる。そして、電子メロディーのような外部負荷を通り対向電極へ送られる。色素に残ったホール (h^+) は電解液のヨウ素イオンを I^- から I_3^- へと酸化させる。酸化されたヨウ素イオンは向いあわせた電極で再び電子を受け、 I_3^- から I^- へと還元される。このようにして、光エネルギーが電気エネルギーとして利用される。

2.2 色素増感太陽電池の作り方

2.2.1 材料、道具

今回作成する色素増感太陽電池の材料・道具は、① 20mm×20mm×厚さ1.1mmの旭ガラスファブリテック製電気伝導性ガラス（以下ガラス）4枚、② 20mm×20mm×厚さ1.0mmのステンレス板4枚、③ 昭和電工製低温焼成用二酸化チタンペースト SP-210（以下二酸化チタン）、④ ハイビスカス色素、⑤ 昭和電工製ヨウ素電解液（以下ヨウ素電解液）、⑥ ダブルクリップ（電気伝導性、以下銀色クリップと表記する）8個、⑦ ダブルクリップ（電気非伝導性、以下黒色クリップと表記する）8個、⑧ 綿棒、⑨ フライパン、⑩ アルミ箔、⑪ 6B 鉛筆

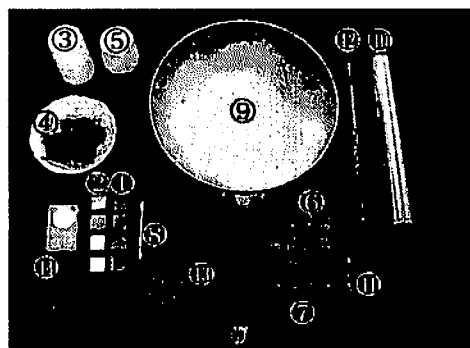


図2. 使用した材料、道具

（炭素電極として使う）、⑫スポイト、⑬みの虫クリップ付リード線、⑭電子メロディーである。下の図2にそれら一式を示した。

2.2.2 製作手順

①図3のようにガラスの導電面に綿棒を使用し、二酸化チタンを塗る。なお、図4のように塗り付ける際は一边を約2mmの幅を空ける。塗り終わると二酸化チタンが完全に乾くまで自然乾燥させる。同じ方法で4枚に塗布する。



図3. 二酸化チタンを塗る様子

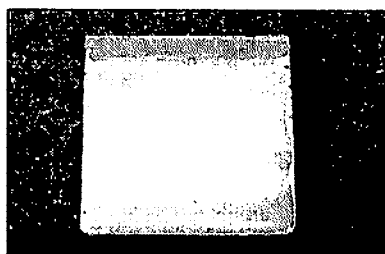


図4. 二酸化チタンを塗布したガラス
上端部には、約2mmの二酸化チタンを塗布しない部分がある。

②二酸化チタンを塗ったガラス4枚を、アルミ箔を敷いたフライパンにのせ、強火で焼き付ける。一旦こげたように黒くなるが、やがて白色になるので、焼き上がりが確認できる。焼きあがった後、急冷すればガラスが割れる危険があるので十分冷めるまで放置する。

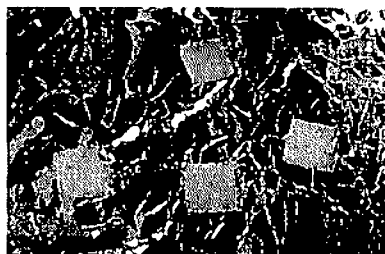


図5. 焼き付けたガラス

③図5の焼き付けたガラスが手で十分触れるまで冷ました後、フライパンから取り出しハイビスカスから抽出した色素を含む液で着色させる。

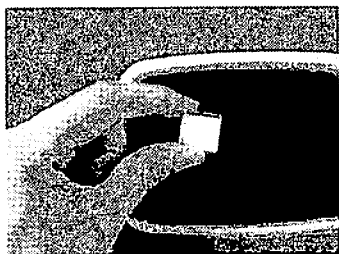


図6. ガラスを着色させる様子

④図6で色素を着色させたガラスを取り出し、一方でステンレス板には6Bの鉛筆を塗る。ガラス面と同様に、一辺は約2mmの幅を空ける。



図7. 色素を吸着させたガラス（左）と、鉛筆を塗ったステンレス板（右）

⑤手順④のガラス及びステンレスの塗った面を向かい合わせ、その間にヨウ素電解液を一滴下し、互いに重ね、黒色クリップで固定する。これを1セルとする。



図8. 1セルの完成形

⑥手順⑤でできたセルを同様に4個作り、銀色クリップで1セルずつ連結させる。

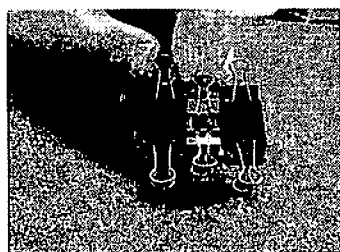


図9. セル同士連結させた状態

⑦セルは4セル全て連結する。最後に両端に電子メロディーをつなげば電子メロディーの音色をきくことができ、発電を確認することができる。

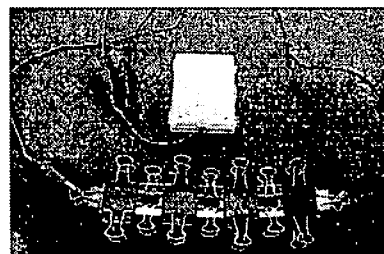


図10. 完成図

3. 実験方法と結果

3.1 色素増感太陽電池の評価実験

今回の実験で計測したものは、1セル毎の電圧、電流、変換効率、4セル直列（図10の状態）の電圧、電流、そして実際電子メロディーを鳴らしどのくらいクリアな音色が聞けるか、そしてその音色の持続時間である。測定に用いた機器は、変換効率についてはペクセル・テクノロジーズ社製ソーラーシミュレーターPEC-L11（図11、12）とケイスリー社製デジタルマルチメータ2400SourceMeter およびペクセル・テクノロジーズ社製解析ソフトI-VCurveAnalyzer ver.2である（図13）。

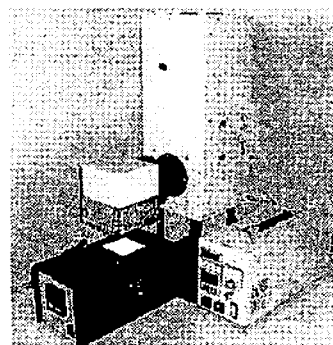


図11. ソーラーシミュレーターPEC-L11
（ペクセル・テクノロジーズ株式会社ホームページ
（<http://www.peccell.com/>）より引用）

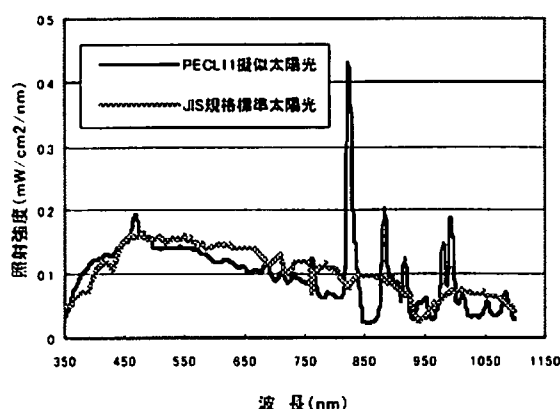


図 12. PECL-11 と標準太陽光

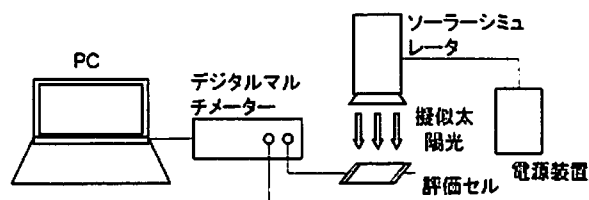


図 13. 変換効率測定システム

PEC-L11 の仕様はランプハウス、均一照射ユニット、ランプ電源から構成される。

1. ランプハウス NDXH-150ESS
 適合ランプ：150W キセノンランプ (USHIO UXL-151D-0)
 集合ミラー：アルミ蒸着 楕円面鏡
 ランプ取付台：小型 XYZ 三軸調整式
 排気ファン：AC100V 120mm 角型ファン
 シャッター：回転ソレノイド羽根式
 外形寸法：本体・W150×D150×H400mm
 ベース・W200×D200×H200mm
 スタンド・H200
2. 均一照射ユニット ITE50-AM1.5G
 ミラーユニット 45°：全波長反射アルミミラー型
 インテグレーター：BK7 製ドラムレンズ
 コリメーター：BK7 製 100φ
 エアマスフィルター：AM1.5G
 ランプ光軸高さ：調整可
 レンズ筒：φ70mm
3. ランプ電源 NDXP-150E
 制御方式：高周波 PWM 定電流制御式
 (スイッチングレギュレーター)
 入力：AC100V 50-60Hz 900VA
 出力電圧：DC20V±3V (ランプ特性に追従)

無負荷開放電圧 120V 以上

出力電流：DC5～8A 可変

電流リップル：5% (P-P) 以下

総合変動率：4%以下

スターター：STX-25 (ランプハウスに内臓)

使用ランプ：150W キセノンランプ

(USHIO UXL-151D-0)

測定により得られた電流-電圧曲線から太陽電池の性能をあらわす因子である曲線因子、最大電力、変換効率を決定することができる。回路を短絡させたとき (電圧が0のとき) の電流が短絡電流、電流が流れていないときの電圧が開放電圧である。実際に太陽電池が外部に出力できる電力は、電流-電圧曲線上で電流×電圧の値が最大になるときで、これが最大電力 P_{max} となり、この点を最適動作点という。

P_{max} = (最適動作点での電力)

そして短絡電流×開放電圧と最大電力との比は曲線の良好さを示す曲線因子 (fill factor: ff) となる。

$$ff = \frac{\text{最適動作点での電力}}{\text{開放電圧} \times \text{短絡電流}}$$

また変換効率 η (%) は、

$$\eta = \frac{\text{開放電圧} \times \text{短絡電流} \times \text{曲線因子}}{\text{受け取った太陽光エネルギー}} \times 100$$

$$= \frac{\text{最適動作点での電力}}{\text{受け取った太陽光エネルギー}} \times 100$$

で表わされる。ここで太陽光の単位面積当たりのエネルギーは地表付近での平均である $100\text{mW}/\text{cm}^2$ としている。

電圧、電流、メロディーの音色については、500W のハロゲンライトを 50cm 離して照射させた状態で計測した。

3-2 色素増感太陽電池の測定結果

以上の条件の下、測定結果を下の表 1 に掲載する。

表 1. 測定結果

	電圧 (V)	電流 (mA)	変換効率 (%)
4セル平均	0.42	0.51	0.071
4セル直列	1.62	0.52	—

なお、電子メロディーの安定した音色の持続時間は 12 分 40 秒で、教材として十分な持続性を確認できた。

また、この色素増感太陽電池 2008 年 4 月 29 日の午

後1時に太陽光のもとで計測した。結果は表2に掲載する。

表2. 太陽光のもとでの測定結果

	電圧(V)	電流(mA)
4セル平均	0.38	1.23
4セル直列	1.53	1.67

6分35秒で、太陽光のもとでも教材としての十分な持続時間を確認できた。更に、太陽光のもとではハロゲンライトの光に比べて、電流値が大幅に上昇した。

4. 色素増感太陽電池の教育現場での導入

4.1 導入先の学校について

本研究では、新しく開発した色素増感太陽電池のキットが、学校教育現場での使用に適しているかどうかを評価するため、京都市のM中学校の、2年の2クラス計77名に授業実践を行った。

同校選択の理由は、昨年第二著者が同校の当時1年であった生徒27名に従来の色素増感太陽電池の制作を行ったため、新型色素増感太陽電池と従来の色素増感太陽電池を比較する上で最適な教育現場であると考えたためである。

4.2 調査方法

各クラスとも授業を2008年6月17日、18日に行った。各クラスとも2時間の授業を通して1人1セルの色素増感太陽電池を製作し、4セル連結し太陽光の下、電子メロディーを鳴らして発電の確認を行った。その後4-1で述べた、色素増感太陽電池製作経験者27名とそれ以外の未経験者50名にそれぞれアンケートを行い、『色素増感太陽電池を用いた電子メロディーの鳴り具合』、『色素増感太陽電池の製作の容易さ』、『色素増感太陽電池の製作の楽しさ』についての調査を行った。

4-3 調査結果

4-3-1 色素増感太陽電池製作経験者27名の回答

質問内容と回答の結果を右の図14、15、16に掲載する。

Q1:『前回と比べて、電子メロディーはよく鳴りましたか』

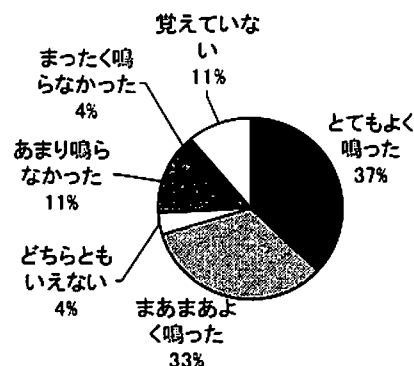


図14. Q1の回答 (回答者27名)

Q2:『前回と比べて、作り方はかんたんでしたか、むずかしかったですか』

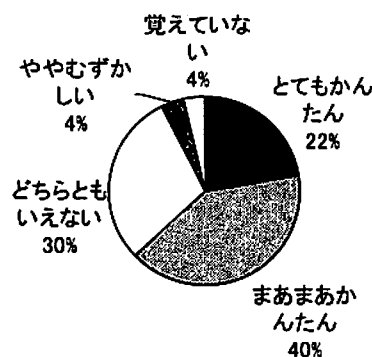


図15. Q2の回答 (回答者27名)

Q3:『前回と比べて、楽しかったですか』

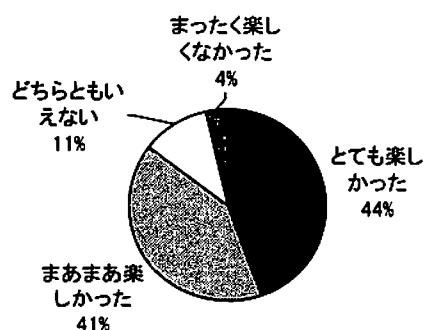


図16. Q3の回答 (回答者27名)

4.3.2 色素増感太陽電池製作未経験者 50 名の回答
質問内容と回答の結果を右の図 17、18、19 に掲載する。

4.4 調査結果の考察

4.4.1 色素増感太陽電池製作経験者 27 名に対する結果の考察

7 割の生徒が従来の色素増感太陽電池に比べて電子メロディーがよく鳴ったと回答し、6 割以上の生徒が製作の容易さを実感し、8 割以上の生徒がより楽しく学習できたと回答した。

以上より、新たに開発した色素増感太陽電池キットは従来の色素増感太陽電池に比べ、より高い学習効果を得ることができると考えられる。

4.4.2 色素増感太陽電池製作未経験者 50 名に対する結果の考察

また、未経験者についても 9 割以上の生徒が電子メロディーを鳴らすことに成功し、8 割以上の生徒が容易に製作できたと回答した。さらにほぼ全員の生徒が、この色素増感太陽電池キットの製作を楽しいと感じた。

以上より、新たに開発した色素増感太陽電池キットは初めて製作する生徒にとっても大きな学習効果を得ることが期待できる教材であると考えられる。

4.4.3 授業中の生徒の動きについて

生徒の動きを観察すると、電子メロディーが標準の 4 セルで十分に鳴っている生徒は、3 セル、2 セルとより少ないセル数で電子メロディーを鳴らすことに挑戦していた。また、電子メロディーの鳴りの弱い生徒は、指導者が何も指示をしなくても、電子メロディーの鳴りを良くするためには数多くのセルを直列につなぐ必要を理解した上で、他の班の生徒と一組になって互いのセルを直列に連結してパワーアップを図る光景が見られた。このことより、この色素増感太陽電池キットは、生徒の自主的な学びを引き出すことが可能な実験教材であることが確認できた。

以上より、新たに開発した色素増感太陽電池の学習キットはエネルギー環境教育の教材として十分に役に立つ教材であると考えられる。

Q 1 : 『電子メロディーは鳴りましたか?』

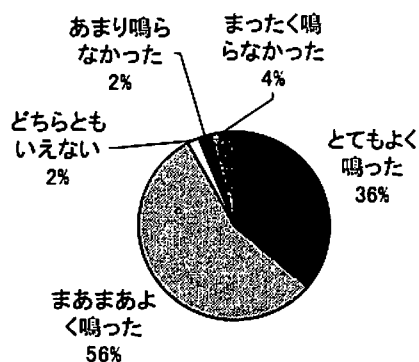


図 17. Q 1 の回答 (回答者 50 名)

Q 2 : 『作り方はかんたんでしたか、むずかしかったですか?』

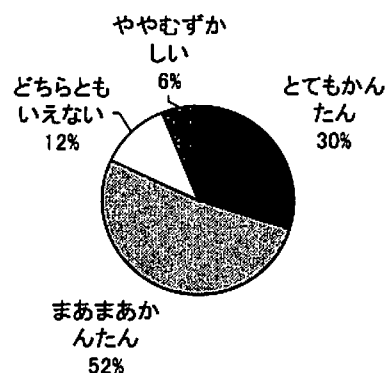


図 18. Q 2 の回答 (回答者 50 名)

Q 3 : 『今日、色素増感太陽電池を作って楽しかったですか?』

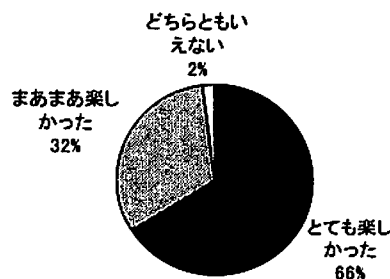


図 19. Q 3 の回答 (回答者 50 名)

5. おわりに

今回、新たに開発した色素増感太陽電池キットは、エネルギー環境教育の教材として十分役立つ教材であることが確認できた。

しかし、今回実践授業を行った中学校の生徒のなかには電子メロディーをうまく鳴らすことのできなかつた者も何名かいた。考えられる原因としては、二酸化チタンの塗布である。ガラスの導電面は片面だけなので、こちらの指導不足で非導電面に二酸化チタンを塗布した可能性がある。従って、ガラスの導電面の確認の指導は大切である。その意味では、今回のプラス極のステンレス板への変更はケアレスミスをなくすためにも重要なことである。

また、新たに開発した色素増感太陽電池キットのプラス極をステンレス板に代えたように、更なる改良のため思い切った電極の切り替えも今後研究していきたい。

いずれにしても、エネルギー環境教育教材としての色素増感太陽電池は、今後とも注目していきたい一つの大きな分野である。

謝辞

今回の研究を行うにあたり、京都教育大学教育学部附属桃山中学校 前園律子先生には多大なご指導をいた。この場を借りてお礼申し上げる。

参考文献

- 川村康文 (2007a). 「“ぷち発明” をいかした教材としての燃料電池模型自動車」、エネルギー環境教育研究、Vol. 2, NO. 1, p. 77
- 川村康文、島田英俊、吉田加津哉、藤原清 (2007b). 「色素増感太陽電池で模型自動車を動かす実験教材の開発」、物理教育、第56巻、第1号
- ペクセル・テクノロジー株式会社. 会社案内パンフレット