Technical Report

Learning about Dye-Sensitized Solar Cells with Citizens

Yasufumi KAWAMURA^{*1}, Tomoko TAYAMA^{*1}, and Akinori KODAMA^{*2}

(Received December 17, 2011)

市民とともに学ぶ色素増感太陽電池

川村康文^{*1}, 田山朋子^{*1}, 兒玉明典^{*2}

It is important for citizens to get interested in science, energy, and environmental problems in order to be able to make scientifically sound judgments. For the purpose of this activity we have chosen the example of dye-sensitized solar cells.

Although dye-sensitized solar cells are known as a handmade experiment, they still require high-technology such as nanotechnology and have a very high cost. We have invented dye-sensitized solar cells with materials that are closely used in everyday life. The efficiency of the dye-sensitized solar cells is lower, but it is possible for citizens to make handmade dye-sensitized solar cells by themselves. We expect this invention will generate increased interest in science, energy, and environmental problems and aid citizens in making more scientifically sound judgments.

Key Words

Dye-Sensitized Solar Cell, Learning in citizens

1. はじめに

理科離れや理科嫌いといわれて久しくなった。これに対して、多くの科学分野の研究者が危惧の念をもち、中高校生に理科の楽しさや理科の素晴らしさを伝えていこうとする活動が広く行われるようになった。学校教育現場とつながっては、スーパー・サイエンス・ハイスクール (SSH) やサイエンス・パートナーシップ・プロジェクト (SPP) が活発に実施され、若者の科学意識を高めるための政策は充実してきたようにみえる。しかし、市民が科学の興味・関心を高めるための政策が十分になされているとは言い難い。くしくも、2011年3月11日には東日本大震災が生じ、それに続いて福島第1原子力発電所の事故が起こった。エネルギー環境問題、原子力発電所の問題、節電対策について、その後しばらくは、朝から晩まで、テレビ放映が次々と繰り返され、多くの市民が今後の我が国のエネルギー政策の在り方に戸惑う状況に陥った。

このような状況に陥ることを防ぐためには、市民が科学やエネルギー環境問題に高い関心をもち、自ら積極的に関わり、科学的に冷静な判断ができるようになる必要があると考える。このことは、東日本大震災後の福島第1原子力発電所の事故を経験したために必要になったのではなく、元来、高度科学

技術社会に生活する市民にとって科学リテラシーとして必要なものである。

そこで、このようなことを実現するための一つとして、本稿では、市民が自然エネルギーを体験する実験教室のテーマとして、“色素増感太陽電池の手作り”を取り上げた。また、この実験教室では、日常生活の中にある身近な素材を用いて色素増感太陽電池の手作り実験を行ったので、その方法を紹介する。

2. 開発した色素増感太陽電池実験教材

太陽電池といえば、まず、市販のものを購入し、それをどのように活用するかを考えることが、市民にとっては一般的であろう。「太陽電池を作りませんか」と呼びかけると、「太陽電池って、手作りできるのですか」という質問が返ってくる。「はい、自分で作れる太陽電池があります。」と返事をすると、多くの市民が目を見開き、「作ってみたい!」「うちの子どもにできますか」と肯定的な返事が返ってくる。しかし、これまで色素増感太陽電池の実験では、実験材料費が高額になるため、SSHの高校など実験のための特別な予算を持っている学校¹⁾でないと実施が困難であった。同じく、市民対象

* 1 Tokyo University of Science
1-3 Kagurazaka, Shinjuku-ku, Tokyo 162-8601, Japan

* 2 Tokyo University of Science
1-3 Kagurazaka, Shinjuku-ku, Tokyo 162-8601, Japan

* 1 東京理科大学理学部第一部
〒162-8601 東京都新宿区神楽坂1-3

* 2 東京理科大学科学教育研究科
〒162-8601 東京都新宿区神楽坂1-3

図1 開発した色素増感太陽電池実験教材

のセミナー等でも、実験材料費が高いという理由で、実施が困難であった。

そこで、色素増感太陽電池の実験を行うのにあたって、性能は高くなくても、少しでも安価に実施できることをめざした。市民や次世代層にとってなじみやすいように、実験材料は、日常生活で入手できるような身近なものをを用いた。このようにして開発した実験教材としての色素増感太陽電池を図1に示す。

2.1 二酸化チタンペーストに関する検討

これまで、色素増感太陽電池の実験を行う場合、用いる二酸化チタンペーストは、理科実験用にキット化されたものを用いるか^{1)~3)}、アナターゼ型の粉末の二酸化チタンを、ポリエチレングリコールを用いてペーストを状にしたものを利用するか⁴⁾、発電効率のよい市販の高価な二酸化チタンペーストを利用していた⁵⁾。これらの実践では、受講生からは好評であったが、実験材料費は決して安価ではなかった。

二酸化チタンペーストを安価にする方法として次のことを考えた。歯磨きペーストには、二酸化チタンが含まれているものが多くあり、これをペーストの基材として使えないかと考えた。歯磨きペーストだけでは色素増感太陽電池は作製できなかったが、これに粉末二酸化チタンを添加することで成功した。粉末二酸化チタンと歯磨きペーストの混合割合は、表1に示すように、混合の割合を1:3と1:4のとき良い結果が得られた。

表1 配合の違いによる実験結果

二酸化チタンの質量	歯磨きペーストの質量	開放電圧 [V]	短絡電流 [μ A]
1	: 5	1.10	20.0
1	: 4	1.49	96.5
1	: 3	1.41	88.5
1	: 2	1.39	40.0

4セル直列に接続したものに、LED電球を15 cm離して照射しテスターで開放電圧と短絡電流を測定した。このときのセル表面付近の照度は5880 luxであった。

2.2 ヨウ素電解溶液に関する検討

ヨウ素電解溶液は、市販の高価なヨウ素電解溶液を使用していた^{1)~3) 5)}が、本実験教材では、ヨウ素入りのうがい薬に変更した。

2.3 本実験教材において選定した材料

本実験教材に用いた実験材料を以下に示す。

電気伝導性ガラス(20 mm×20 mm)を8枚、アナターゼ型粉末二酸化チタン(P25)を0.33 g、二酸化チタン配合の歯磨きペーストを1 g、ヨウ素入りのうがい薬を1 ml、非電気伝導性バインダークリップ(黒いクリップ)を8個、電気伝導性バインダークリップ(銀色のクリップ)を6個、6Bの鉛筆、ハイビスカスティ、テスター、導線、フライパン、カセットコンロ、アルミホイル、手作り電子メロディー(メロディーIC・圧電スピーカー)

2.4 身近な材料で作る色素増感太陽電池の作り方

実験教室で実施した色素増感太陽電池の作り方を説明する。

1. 二酸化チタン入りの歯磨きペーストに、粉末二酸化チタンを加え、全体が滑らかになるまでよく混ぜ、完全なペースト状にする(図2参照)。
2. マイナス電極を作製する。テスターを用いて電気伝導性ガラスの導電面を調べ、その面に、1.で作ったペーストを4枚ともに塗布する。このとき、端から2 mmの部分にはペーストを塗らない。この部分が電極になる(図3参照)。
3. フライパンにアルミホイルを敷き、その上に、ペーストを塗った面を上にして置き、カセットコンロを用いて強火で、電気伝導性ガラスに二酸化チタンを焼結させる。このとき、いったん焦げ茶色になるが、さらに焼き続けると白くなる。白くなれば二酸化チタンの焼結は完了である(図4、5参照)。
4. ガラスを急に冷やすと割れる可能性があるため、フライパンごとコンロからはずしてガラスが冷えるまで待つ。

図2 混合後のペースト

図3 ガラスへのペーストの塗布

図4 二酸化チタンの焼結

図5 左：焼結途中、右：焼結後

図6 炭素の塗布後

図7 ハイビスカスティで染色

図8 水分を拭き取る

図9 染色後

図10 1セル完成

図11 セルのつなぎ方

5. 焼結したガラスを冷やしている間を利用して、プラス電極を作製する。導電膜がついている面に、鉛筆の芯で炭素を塗る。なお、このときも2.と同様に、端から2 mmの部分には炭素を塗らない(図6参照)。
6. ハイビスカスティを80℃程度の湯で浸して色素を抽出し、染色液を作る。ガラスが冷えてから染色する。染色は10分から15分間でもできるが、1日染色すればなおよい(図7参照)。
7. ガラスが赤紫色に染まったら液から取り出し、軽く水分をふき取る(図8, 9参照)。
8. 炭素を塗った面に、うがい薬を1滴滴下する。
9. 赤紫色に染まった二酸化チタン膜と炭素を塗布した面が向い合せになるように、2枚の電気伝導性ガラスを、非電気伝導性のバインダークリップではさみ、図10のように固定する。
10. 9.のように作製したセルを4つ直列に接続する。このとき、電気伝導性バインダークリップでガラス同士を図11のように左側がマイナス極、右側がプラス極となるように順につなぐ。こうすることで、プラス極の面は上になり、

マイナス極面に光が入射しないので、光の入射による劣化を防ぐことができる。

11. メロディー IC と圧電スピーカーを用いて電子メロディーを組む。
12. 4セルを直列接続したあと、図1のように両端に電気伝導性バインダークリップを用いて、電子メロディーを接続する。マイナス極を上に向け、光を照射すると電子メロディーが鳴り、色素増感太陽電池による発電が確認できる。

2.5 材料費の比較

今回開発した色素増感太陽電池の実験教材では、3セル直列接続でも、電子メロディーが鳴ることが確認できた。しかし学校教育現場で、実験教材として利用する場合は4セルにすることが望ましい。その理由は、次の通りである。学校では40人学級が一般的で、理科実験を行うときには10班で構成される。このため、1班の班員数は4人となる。1人が1セルずつ作製することを想定すると、1バッテリーを4セルで構成することが望ましい数となる。

しかしここでは、社会教育で実施されるような実験教室で1人1バッテリーを作ることを想定する。このような場合の材料費を本研究室の過去の実験材料費用と比較した(表2)。

表2 実験材料費（40人分）本研究室実験教材比較

材料	40人分の必要量	本教材の費用（円）	過去の方法による費用（円）
粉末二酸化チタン (P25, アナターゼ型)	13.4 g	1,680	1,680
ポリエチレングリコール	160 ml	—	2,100
酢酸	40 ml	—	2,400
歯磨きペースト	40 g	210	—
ヨウ素電解液	50 ml	—	13,800
ヨウ素入りうがい薬	50 ml	609	—
乾燥ハイビスカスティ	60 g	400	400
鉛筆（6B）	1 ダース	1,260	1,260
非電気伝導性 バインダークリップ	320 個	726	726
電気伝導性 バインダークリップ	360 個	1,472	1,472
電気伝導性ガラス	1 枚（30 × 35 cm）	5,620	5,620
UNISONIC TECHNOLOGIES 製 メロディー IC	40 個	1,600	1,600
村田製作所圧電スピーカー	40 個	1,000	1,000
合計		14,577	32,058
1人あたりの金額		364.4	801.5

本作製方法では、過去の方法の約 1/2 の費用で実験することができた。

3. 発電性能の評価

本教材と市販の色素増感太陽電池の発電性能を図 12 に示す。性能を評価するためにペクセル・テクノロジー社製ソーラシミュレータ PEC-L11 とケイスリー社製デジタルマルチメータ 2400SourceMeter, ペクセル・テクノロジー社製解析ソフト I-VCurveAnalyzer ver.2 を用いて評価実験を行った。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, 変換効率を求めた。なお, 曲線因子 ff は, 短絡電流と開放電圧の積と最大電力の比である。

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

また, 太陽電池の変換効率 η (%) は,

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

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 mW/cm^2 として計算した。本実験は $5.50 \times 10^4 \text{ lux}$ のもとで行った。開放電圧と短絡電流の 4 セルの平均値は 0.476 V , 0.233 mA であった。また, 変換効率は平均 0.0105% であった。開発した手作り色素増感太陽電池と市販の色素増感太陽電池²⁾ の変換効率, 開放電圧, 短絡電流の比較を表 3 に示す。なお, 数値はそれぞれ 4 セルの平均値である。

表 3 にみるように, 短絡電流は, 市販の色素増感太陽電池に劣るものの, 変換効率, 開放電圧では, 開発した色素増感太陽電池は十分な性能を示した。

4. 身近な材料で作る色素増感太陽電池手作り体験講座

2010 年 4 月から, 東京理科大学川村研究室では, 市民を対象に毎週木曜日からはじめて木・金・月・火の 18:00 ~ 20:00 に, 「理科大好き実験教室」を始めた。現在も受講生は, ホームページ⁶⁾ で随時募集している。

2010 年 12 月 2, 3, 6, 7 日には, 「色素増感太陽電池を手作りして, 電子メロディーを鳴らそう」という題目で実験教室を行った。4 日間で, 小学 4 年生 7 名, 5 年生 6 名, 6

図 12 色素増感太陽電池の性能評価実験の結果（黒：本教材の色素増感太陽電池の性能, 灰色：市販の色素増感太陽電池の性能）

表3 性能評価実験の比較

	変換効率 [%]	開放電圧 [V]	短絡電流 [$\times 10^{-3} \text{ A}$]
本教材の色素増感太陽電池の場合	0.0105	0.476	0.233
市販の色素増感太陽電池の場合	0.0127	0.359	0.866

図 13 実験教室の様子

年生 3 名，中学生 2 名，高校生 1 名，社会人 2 名が参加した。

結果，全員が電子メロディーを鳴らすことに成功した。受講生は，日常生活で使用している材料を用いて，色素増感太陽電池を手作りできたことに感激していた。「家に持って帰ってもまた実験できますか」「どのぐらい長持ちしますか」「鳴らなくなったらどうしたらいいですか」といった質問が次々と飛び出し，自然エネルギーや地球環境問題への大きな関心がうかがわれた。ハイビスカスティを用いてガラスの染色を行ったが，ハイビスカスティを知らない受講生もいたので，実験教室の終了後にハイビスカスティ試飲会を開き賞味してもらった。自分たちがこの実験で用いた染色液が，飲食に適するもので，決して危険な薬品を用いて行っている実験ではないことを実感してもらった。「すっぱい」，「おいしい」など，さまざまな感想が飛び交い笑顔がこぼれ，受講生は色素増感太陽電池に親しみを感じてくれたことが伺えた。

5. おわりに

市民にエネルギー環境問題に高い関心をもってもらうため，自然エネルギーを広く紹介したいと考え続けている。今回は，身近な材料を用いた色素増感太陽電池の手作り実験を実験教室で体験してもらった。実験材料を購入しやすい安価なものにするために，また，色素増感太陽電池そのものや実験材料にも親しみをもってもらうため，身の回りの日用品を用いて色素増感太陽電池の手作り実験を行った。色素増感太陽電池に使われている電気伝導性ガラスは，液晶テレビやタッチパネルなどに利用される身近な存在である。二酸化チタンは，歯磨きペーストや洗顔料などに含まれている。また，最近では光触媒としてよく知られている。電解液には，ヨウ素入りの

うがい薬を使用した。

科学や科学技術に興味を持てずに，関心を示さない市民も少なくはない。なかにはアレルギーのような反応を示す方もいる。しかし，身の回りの日用品で太陽電池が作れるなど，楽しい実験を体験することで，少しでも科学や科学技術へのアレルギーをとりのぞくことができたのではないかと考える。さらには，理科好き，科学好きを増やすことができるのではなかろうか。今回は，ハイビスカスの色素を用いたが，色素の種類によって色を変えたり，模様を付けることなどを試みることで，市民が，より興味・関心を持てるような色素増感太陽電池の手作り実験教材の開発を行っていきたい。

このようなエネルギー環境分野における最先端科学技術を基本にした実験教材を市民に広く体験的に知ってもらうことがきっかけになって，市民がこれからの我が国のエネルギーのあり方などを，科学的に冷静に議論ができるようになればと願っている。また，このような実践が，エネルギー環境問題の解決に少しでも役立てばと強く願っている。今後とも，このような教育的な実践を続けて行こうと強く決意するところである。

文 献：References

- 1) 川村康文，物理教育，**51**(4)，262-266(2003)：Kawamura, Y., *Journal of the Physics Education Society of Japan*, **51**(4), 262-266(2003)
- 2) 西野田電工(株)，色素増感太陽電池キット「花力発電」，<http://www.nisinoda-electronics.co.jp/index.html>：Nishinoda Denko., Ltd, Dye Sensitized Solar Cell Kit “Karyoku Hatsuden”
- 3) 川村康文，遺伝，**59**(6)，15-19(2005)：Kawamura, Y., *Iden*, **59**(6), 15-19(2005)
- 4) 宮本憲武，山本勝博，化学と教育，**54**(3)，172-173(2006)：Miyamoto, K., Yamamoto, K., *Kagaku to kyoiku*, **54**(3), 172-173(2006)
- 5) 川村康文，吉田加津哉，島田英俊，藤原清，物理教育，**56**(1)，21-24(2008)：Kawamura, Y., Yoshida, K., Shimada, H., Fujiwara, K., *Journal of the Physics Education Society of Japan*, **56**(1), 21-24(2008)
- 6) 理科大好き実験教室，<http://www2.hamajima.co.jp/~elegance/kawamura/>：Rikadaisuki experimental class