

教育用太陽電池を用いて常夜灯電球を 点灯させる教材の開発

安森偉郎^{*1}, 岡田工^{*2}, 崔一煥^{*3}

Development of educational materials that light up night light bulbs
using solar cells for educational purposes

by

Yoshio Yasumori^{*1}, Takumi Okada^{*2} and Ilyong Choe^{*3}

*Tokai University Center for Educational Research and Development

** STEM Education Center, Tokai University

*** Tokai University

概 要

太陽光パネルを用いた発電システム教材が市販されてきている。このような教材は交流 100 V を出力させ、実際に家電製品を稼働させることができるため、学生・生徒に太陽光発電の仕組みをより深く理解させる契機となる。本研究では、教育教材用の太陽電池を用い、白熱電球による光照射によって屋内において交流 100 V を出力させる発電教材の開発に取り組んでいる。教育教材用の太陽電池に、DC/DC コンバータや DC/AC インバータ、および常夜灯電球を組み合わせて点灯回路を構成し、白熱電球により放射照度 5.6 kW/m^2 の光照射を行った。その結果、交流 100 V の電圧が出力され、照明器具で使用される交流 1 W の常夜灯電球を点灯させることができた。

*1 東海大学教育開発研究センター

*2 東海大学理系教育センター

*3 東海大学

1. はじめに

近年、地球温暖化による異常気象などの影響が懸念され、再生可能エネルギーとして太陽電池は注目されている（渡部，2011）。地球温暖化による気温の上昇は、化石燃料の燃焼による二酸化炭素（CO₂）濃度の急激な増加等が原因であると考えられている（水谷，2015）。2015 年の国連サミットにおいて持続可能な開発目標（SDGs）が採択され（環境省，2020）、クリーンエネルギーについてもその目標に含まれていることから、エネルギー教育に関する研究は SDGs への取組みの一端を担うことに繋がる。

これまで筆者らは、必要最低限の半導体製造装置を用いて教育用シリコン（Si）太陽電池を製作する研究を行い（崔，2000）、さらに半導体製造装置やフッ酸などを使わずにソーラーモータを駆動させることのできる実験実習用 Si 太陽電池の製作方法を開発した（安森，2018, 2020）。教育教材用の太陽電池を用いたソーラーモータの駆動や LED の点灯などの取組みは、学校教育等において盛んに実践されてきている（奈須野，2012，富山，2012）。また、太陽光パネルを用いて交流 100 V を出力させる太陽光発電教材も市販されてきている¹。太陽光発電教材では家電製品を稼働させることができることから、学生・生徒に発電の仕組みへの理解を深める契機となる。このような太陽光パネルを用いた交流発電教材では、家電を稼働させる程度の高出力を念頭に置いているため比較的パネルが大きく高価で大掛かりなシステムとなる。市販の太陽電池を用いた交流発電教材については筆者らの知る限りこれまで報告されていない。そこで、本研究では教育教材用の太陽電池を用いて、低出力ではあるが安価で手軽に交流発電の実験実習を実施できる教材を開発してきた。その結果、太陽電池に白熱電球を用いて光照射を行い、直流から交流への変換に低出力用 DC/AC インバータを用いることによって交流 100 V を出力させ、1 W の常夜灯電球を点灯させることができたことがわかった。本論文では、太陽電池への放射照度と電気的特性から常夜灯電球を点灯させる条件について述べる。

2. 点灯方法

常夜灯電球を点灯させる回路の概略を図 1 に示す。点灯回路の太陽電池に白熱電球を用いて光照射を行い、その出力電圧を DC/DC コンバータにより直流 13 V に昇圧させる。次に後段の

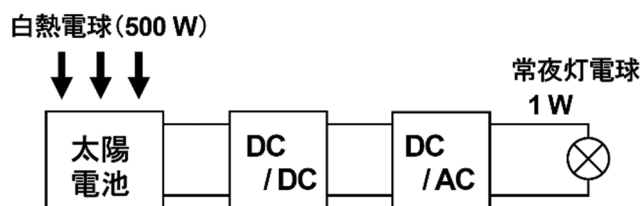


図1 教育教材用の太陽電池による常夜灯電球点灯回路

¹ 共立エレショップ <https://eleshop.jp/shop/r/r0710/>

DC/AC インバータで交流 100 V に変換することにより、常夜灯電球を点灯させるという構成となっている。太陽電池には、図 2 に示す教育教材用の太陽電池（C500，ケニス）を用いた。

本研究において用いた常夜灯電球（M5-2004，マクサー電機）は、交流 100 V の家庭用照明器具に付属されていることの多い、一般にナツメ球と呼ばれるものである。この常夜灯電球は LED ではなくフィラメントからの放射熱によって発光させるタイプであり、100 V の電圧を加えたときに 1 W の消費電力となる。

DC/DC コンバータ（以後、DC/DC という）とは、入力電圧を出力側において昇圧・降圧させる回路であり（平地，2018），図 3(a)に使用した DC/DC（MT3608，VKLSVAN）を示す。後段の DC/AC インバータ（以後、DC/AC という）の動作には 12-13 V の電圧が必要なため、前段の DC/DC からの出力電圧を図 3(a)の可変抵抗を調整し 13 V に設定した。DC/AC とは入力した直流電圧を出力側において交流電圧に変換する回路であり（森本，2011），定格出力が高いほど電力消費も高くなる（中村，2018）。本研究における点灯回路では白熱電球を用いて光照射を行っているため太陽電池からの出力電力は低く，一般的な定格出力の高い DC/AC では機器自体の動作が困難となる。そこで，図 3(b)に示すような定格出力 30 W の低出力の DC/AC（MTU-30K，メルテック）を用いた。

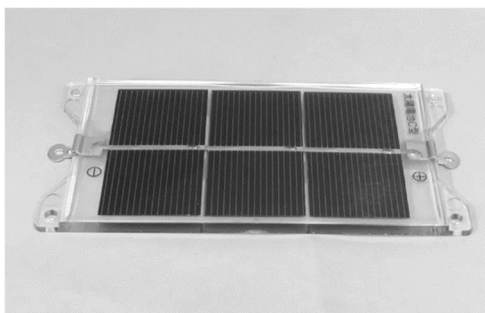


図 2 点灯回路において使用した教育教材用の太陽電池（C500，ケニス）



図 3 常夜灯電球点灯回路に使用した DC/DC と DC/AC
(a) DC/DC：可変抵抗によって出力電圧を 13 V に調整
(b) DC/AC：モバイル機器用の定格 30 W

3. 直流電源による DC/DC の入出力特性

DC/DC の入出力特性について調べるために、図 4 に示すように直流電源（PMX32-2QU，菊水電子工業）を点灯回路に接続し、電圧を印加したときの入力電圧 V_i に対する入力電流 I_i や出力電圧 V_o ，および出力電流 I_o を測定した。

図 5(a) に示すように、DC/DC への入力電圧 V_i を 2.5 V へ増加させると、入力電流 I_i は 1.2 A へ急激に上昇した。このとき常夜灯電球は点灯した。このことから、DC/DC の動作電圧は 2.5 V であることがわかった。その後は入力電圧 V_i を増加させるにつれて入力電流 I_i は 0.25 A 付近まで減少するが、常夜灯電球は点灯した状態であった。

入力電圧 V_i を 2.5 V 以上とすると、図 5(b) に示すように DC/DC からの出力電圧 V_o は 13 V，図 5(c) に示すように出力電流 I_o は 0.17 A 一定であった。DC/DC の入力電圧 2.5 V 以上において DC/DC の出力 V_o と出力 I_o は一定であり、入出力は $V_i I_i \asymp V_o I_o$ （一定）の関係となる。このことから、図 5(a) に示すように V_i を上昇させると I_i は減少する。このように、DC/DC への入力電圧を増加させると入力電流を下げた状態で点灯させることができることがわかった。

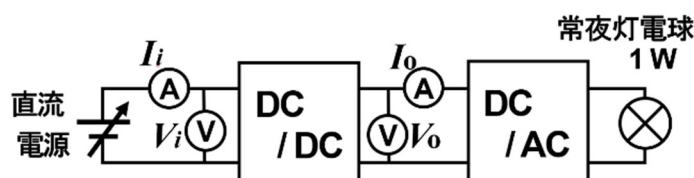


図 4 直流電源を用いたときの常夜灯電球点灯回路

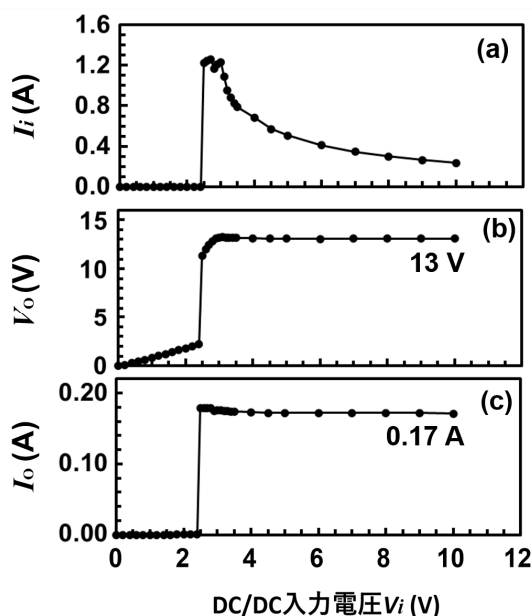


図 5 直流電源を用いて DC/DC への入力電圧を増加させたときの特性
 (a) 入力電流 I_i , (b) 出力電圧 V_o , (c) 出力電流 I_o
 V_i : 2.5 V のときに常夜灯電球点灯 V_o : 13 V 一定, I_o : 0.17 A 一定

点灯回路の直流電源を太陽電池に替えた場合、直流電源に比べて太陽電池の出力電流は小さくなる。そこで、太陽電池を複数枚直列に接続し DC/DC への入力電圧を増加させることにより太陽電池からの出力電流が小さくても常夜灯電球は点灯すると考えられる。本研究では太陽電池 4 枚を直列に接続しユニット化した。

4. 太陽電池の電流-電圧特性

教育教材用の太陽電池 4 枚の電流-電圧特性 (I - V 特性) を図 6 の計測システムを用いて調べた。太陽電池への光照射には 500 W 白熱電球 (PRF500W, 岩崎電気) を使用し、ソーラーパワーメータ (TM-750, TENMARS) によって基準の放射照度 1.0 kW/m^2 となるように光源の高さを調整した。この計測システムでは、ソースメジャーユニット (B2901A, Keysight) と PC が GPIB によって接続されており太陽電池 I - V 特性ソフト (サンライズ社) により自動計測される。

太陽電池の I - V 特性を測定における等価回路を図 7 に示す。太陽電池はダイオード構造であり、光照射したときに生じる電流は定電流であるため、等価回路ではダイオードと電流源の並列で示される。ここでは簡単化のために直列抵抗や並列抵抗は考慮していない。また、負荷抵抗

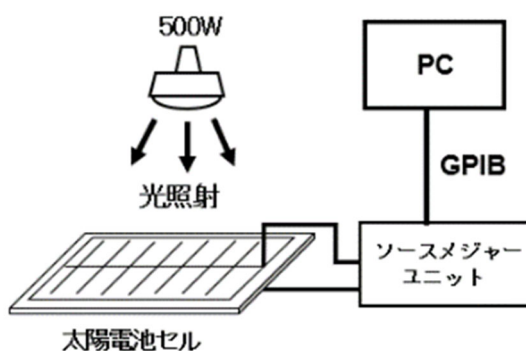


図 6 太陽電池計測システムの概略図。ソースメジャーユニットと PC が GPIB によって接続されており太陽電池特性が自動計測される。

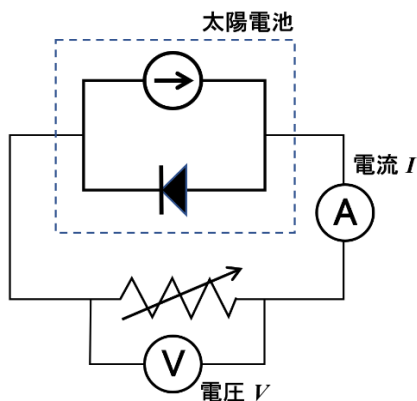


図 7 太陽電池の I - V 特性を測定する際の等価回路

抗を短絡させたときの電流を短絡電流 I_{sc} 、負荷抵抗を無限大へと開放したときの電圧を開放電圧 V_{oc} としている。

測定された太陽電池の I - V 特性を図 8 に示す。4 枚とも同様な特性が得られ、電圧 1.5 V 付近までは 0.2 A の定電流、それ以上の電圧において急激に電流が減少し、1.8 V 付近の開放電圧 V_{oc} が観測された。太陽電池の基本性能として、短絡電流 I_{sc} 、開放電圧 V_{oc} 、最大出力電力 P_{max} 、最大出力動作電圧 V_{max} 、最大出力動作電流 I_{max} 、曲線因子 FF があり（菅原，2012）、 I - V 特性から得られた値を表 1 に示した。基本性能の値に多少の不揃いはあるが、比較的機能が等しく以下で述べるように 4 枚を直列接続した際に直列接続特有の特性となる。また、太陽電池の I - V 特

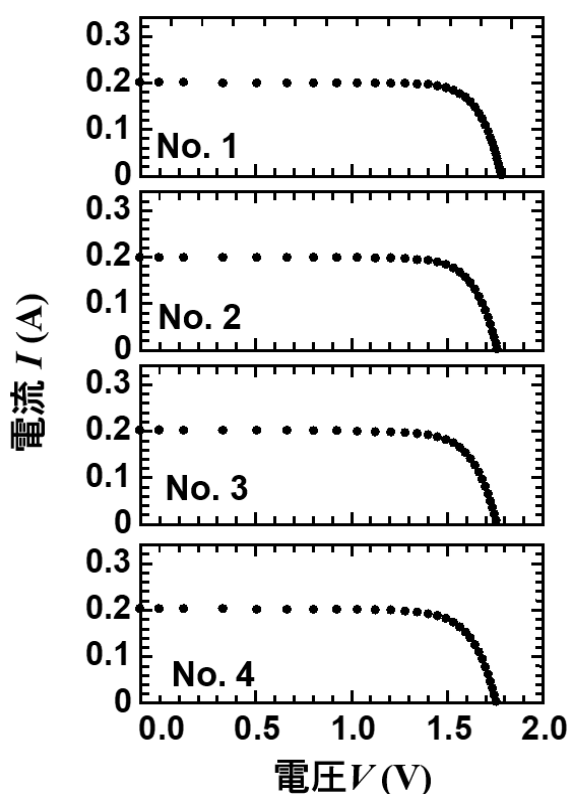


図 8 教育教材用の太陽電池 4 枚の I - V 特性。放射照度は 1.0 kW/m^2 であり、4 枚とも出力電圧 1.5 V 付近までは 0.2 A の定電流であった。

表 1 太陽電池の基本性能評価（受光面積： 38 cm^2 ）

sample No.	1	2	3	4
I_{sc} (A)	0.20	0.20	0.20	0.20
V_{oc} (V)	1.80	1.78	1.78	1.77
P_{max} (W)	0.28	0.28	0.27	0.27
V_{max} (V)	1.5	1.5	1.5	1.5
I_{max} (A)	0.19	0.18	0.19	0.19
FF	0.79	0.78	0.76	0.76

性からは、太陽電池に負荷を接続した際に出力される電圧、電流および電力を見積もることができるため、 I - V 特性は重要な基本特性とされている。

3章で述べたように、太陽電池から DC/DC への入力電圧を増加させるため、太陽電池 4 枚を直列に接続しユニット化した (図 9)。初めに太陽電池を 1 枚ずつ直列に接続させたときの I - V 特性を調べた。図 10 に示すように、開放電圧 V_{oc} は 1 枚では 1.8 V、4 枚では 4 倍の 7.2 V となった。一方、短絡電流 I_{sc} は接続枚数を増やしても変わらなかった。このように直列接続では短絡電流 I_{sc} は変化しないが、開放電圧 V_{oc} は太陽電池の枚数に比例して増加するという典型的な特性が得られた。また、接続数を 4 枚に増加させた際に、6 V 付近までにおいて観測される電流の緩やかな減少は、直列に接続した部分の接触抵抗の増加と考えられる。

5. 常夜灯電球の点灯

太陽電池 4 枚の直列ユニットに、DC/DC、DC/AC、常夜灯電球 (1 W ナツメ電球) を接続した回路を図 11 に示す。放射照度は、白熱電球を太陽電池ユニットに近づけることによって増加させた。図 12(a) に示すように、太陽電池ユニットへの放射照度を増加させると DC/DC への入力電圧 V_i は急激に上昇し、放射照度 1.0 kW/m^2 から 6.5 V 付近で一定となり、その後は 5.0 kW/m^2 から徐々に減少していることがわかった。

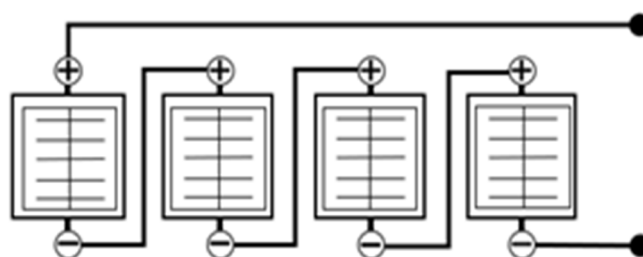


図9 太陽電池 4 枚を直列に接続した模式図

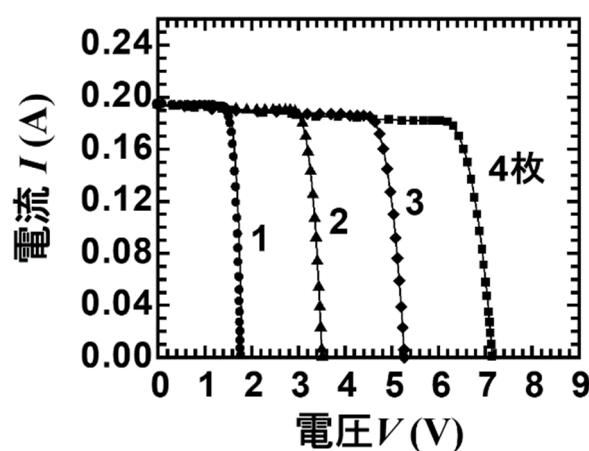


図10 太陽電池を 1 枚から 4 枚まで直列接続させたときの I - V 特性 (放射照度 1.0 kW/m^2)

一方、DC/DC への入力電流 I_i は、図 12(b)に示すように放射照度を 5.6 kW/m^2 に増加させると 0.18 A から 0.39 A へと急激に上昇した。このとき DC/AC から交流電圧 102 V 、交流電流 10 mA の出力が生じ、 1.0 W の常夜灯電球を点灯させることができた。放射照度 5.6 kW/m^2 において入力電流が急激に上昇し、常夜灯電球が点灯したことから、この急激な電流上昇は DC/AC が作動し 1 W の常夜灯電球へ通電されたためと考えられる。このように、放射照度 5.6 kW/m^2 以上の光照射を行い DC/DC への入力電圧 6.1 V 、入力電流 0.39 A となったときに 1.0 W の常夜灯電球が点灯することがわかった。

常夜灯電球が点灯したときに DC/AC インバータの出力側コンセント部をオシロスコープ (TDS2014B, Tektronix) を用いて観測した波形を図 13 に示す。観測された波形は機器の仕様通り疑似正弦波が観測され、交流 102 V が発生していることを確認できた。

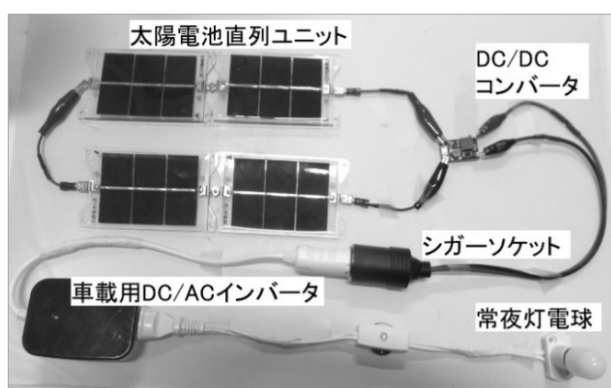


図 11 常夜灯電球点灯回路。太陽電池直列ユニットに DC/DC、DC/AC、常夜灯電球が接続されている。

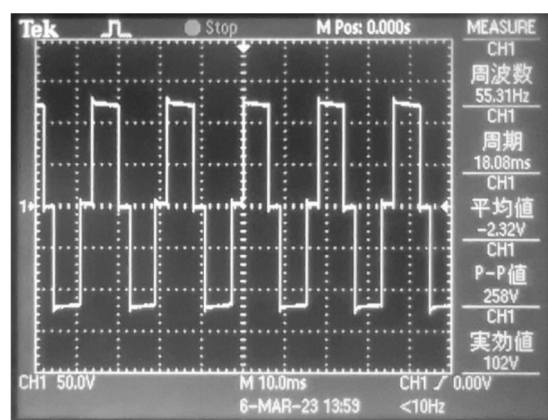


図 13 常夜灯電球を点灯させたときに DC/AC の出力側をオシロスコープ (TDS2014B, Tektronix) によって観測した波形。仕様通りの疑似正弦波が観測され、AC102 V の実効値が得られた。また、交流電流は AC 10 mA であった。

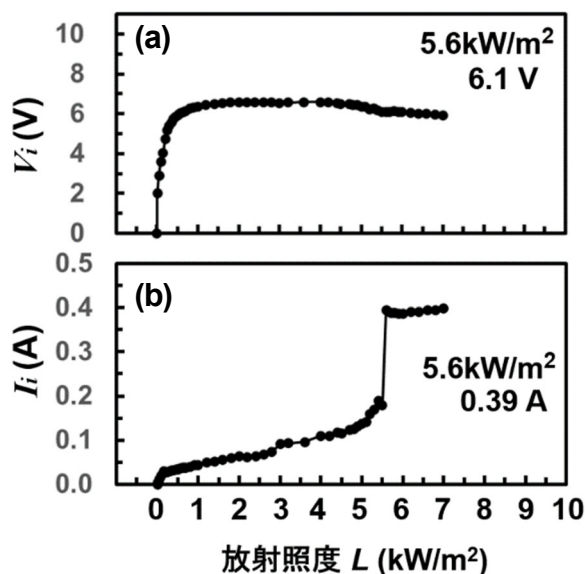


図 12 太陽電池ユニットへの放射照度に対する DC/DC への入力電圧と入力電流。(a)入力電圧 V_i , (b)入力電流 I_i 放射照度 5.6 kW/m^2 以上において電流は 0.39 A となり常夜灯電球を点灯させた。

6. 太陽電池ユニットと直流電源の I - V 特性の重畳

前章で述べたように、太陽電池ユニットへの放射照度を増加させ入力電圧 6.1V の電流値が 0.39A となったときに常夜灯電球は点灯した。この点灯条件についてさらに知見を得るために、太陽電池直列ユニット自体の I - V 特性を調べた。図 14 示すように、放射照度 1.0 kW/m^2 の光照射を行ったときの出力電圧 6.1 V における出力電流は 0.2 A となり、点灯に必要な 0.39 A よりも低いことがわかる。一方、放射照度 5.6 kW/m^2 の場合の出力電圧 6.1 V における出力電流は 0.39 A となり、常夜灯電球を点灯させる値となっていることが確認できる。また、このとき観測される開放電圧の 7.2V から 6.5V への減少は、太陽電池ユニットの温度が白熱電球により上昇したためである（菅原，2012）。

3 章で述べた点灯回路に直流電源を用いた場合の I - V 特性を図 14 に重畳させた。直流電源の場合では DC/DC への入力電圧 2.5 V 以上において常夜灯電球は点灯し、電圧をさらに上昇させると点灯した状態で入力電流は低下した。この直流電源の特性と 5.6 kW/m^2 の特性との交点は、太陽電池ユニットを用いて点灯させたときの値（6.1 V，0.39 A）と良い一致を示している。このように、太陽電池ユニット自体の I - V 特性と直流電源を用いて点灯させた際の I - V 特性との重畳による交点から、太陽電池ユニットを用いて点灯させる際の電圧・電流値を見積もることができることがわかった。

常夜灯電球の消費電力は 1 W であるが、消費電力の高い負荷を接続した場合さらに電力が必要となるため、図 14 に示した直流電源の I - V 特性の電流は全体的に上昇し、太陽電池の I - V 特性（ 5.6 kW/m^2 ）と直流電源との交点は上方にシフトすると予想される。この図からわかるように 1 W の負荷の場合、交点の位置が低電流側であることから、さらに消費電力の高い負荷を接続できると考えられる。

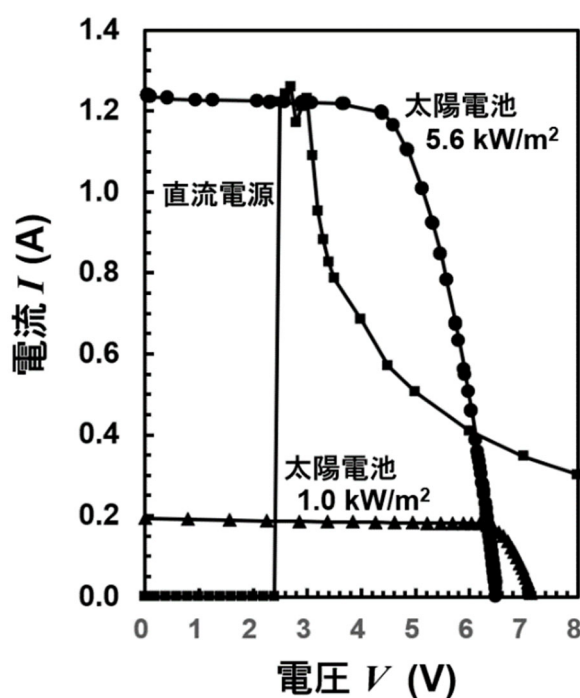


図 14 放射照度 1.0 kW/m^2 と 5.6 kW/m^2 の光照射によって計測した太陽電池ユニット自体の I - V 特性。図には直流電源を用いて点灯させたときの I - V 特性についても示した。太陽電池ユニットを用いたときの点灯条件である 6.1V，0.39A 付近において交点となっている。

7. 期待される教育効果

本研究では、教育教材用の太陽電池への白熱電球による光照射によって、交流 100 V の電圧を出力させ、常夜灯電球を点灯させる教材を開発した。本教材は室内で使用でき天候に左右されないため、計画的に実験実習等に組み入れることができると考えられる。また、1 W の低出力な発電ではあるが、表 2 に示すように比較的低予算により交流発電教材を構成することができる。よって、学生・生徒に本教材を各自 1 台ずつ揃えることが比較的容易となり、太陽電池によって光生成された直流を交流 100 V へ変換させる基本的な仕組みをより理解させることができると考えられる。

表 2 常夜灯電球点灯回路の構成に関する主な物品

教育用太陽電池	C500 ケニス 単価1,430円×4枚
白熱電球 (500 W)	PRS-500W 岩崎電気 単価4,829円×2個
ランプホルダー	DX-Si L20721 LPL 単価6,500×2個
DC/DCコンバータ	MT3608 VKLSVAN 90円
DC/ACインバータ	MTU-30K メルテック 1,639円
シガーソケット	MG2232 Mini Rainbow 475円
常夜灯電球	1W, M5-2004, マクサー電機 248円
電球ソケット	KP-M1215NH(W) エルパ 1,520円

8. まとめ

市販の教育教材用太陽電池 4 枚の直列ユニットに、DC/DC, DC/AC および常夜灯電球と接続することにより点灯回路を構成し、白熱電球を用いて放射照度 5.6 kW/m^2 以上の光照射を行った。その結果、DC/DC への入力電流は 0.39A へ上昇し、DC/AC から交流 100 V の電圧が出力され、1W の常夜灯電球を点灯させることができることがわかった。このように、市販の教育教材用の太陽電池 4 枚を用いて交流 100V の電圧を出力させる教材を安価に構成することができた。本教材は、太陽光発電の基本的な仕組みを理解することに役立つと期待される。

参考文献

- 渡部正治, 長沼二巳, 山内康弘, 中谷浩己 (2011). 再生可能エネルギー利用の概要, 日本ガスタービン学会誌, 39, 5, 334 - 342.
- 水谷仁 (2015). Newton 温暖化を知るための CO₂, ニュートンプレス, 4 - 5.
- 環境省 (2020). SDGs の基礎, 事業構想大学院大出版部, 2 - 24.
- 崔一煥, 岡田工, 佐藤洋一, 安森偉郎 (2000). 手作り太陽電池の性能評価, 応用物理教育, 24, 2, 99 - 102.
- 安森偉郎, 岡田工, 崔一煥 (2018). 半導体製造装置やフッ酸を用いないシリコン太陽電池の製作, 応用物理教育, 42, 1, 21 - 25.
- 安森偉郎, 岡田工, 崔一煥 (2020). 半導体製造装置やフッ酸を用いないシリコン太陽電池における製作時間の短縮化, 応用物理教育, 44, 1, 19 - 24.
- 奈須野裕, 大内二郎 (2012). 太陽電池を用いた LED 照光システム開発, 東北職業能力開発大学校紀要, 23, 21 - 26.
- 富山哲之 (2012). 太陽電池と大容量コンデンサーを用いたエネルギー教材の開発, 長崎大学教育学部紀要, 52, 21 - 33.
- 平地克也 (2018). DC/DC コンバータの基礎から応用まで, 電気学会, 3 - 10.
- 森本雅之 (2011). 入門インバータ工学, 森北出版, 7 - 37.
- 中村昌広 (2018). 独立太陽光発電所の作り方, 総合科学出版, 79 - 80.
- 菅原和士 (2012). 太陽電池の基礎と応用, 朝倉書店, 75 - 78.

(2024 年 1 月 26 日 受理)