

教育用太陽電池を用いたモジュール 実験の教材に関する研究

安森偉郎^{*}, 岡田工^{**}, 崔一煥^{***}

Study on teaching materials for module experiments
using solar cells for education

by

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

^{*}Tokai University Center for Educational Research and Development

^{**}STEM Education Center, Tokai University

^{***} Center for Liberal Arts, Tokai University

概 要

市販の教育用太陽電池を4枚用い、直列や並列および直並列混合接続によるモジュールを構成し電気的特性について調べた。さらに、LTspiceによるシミュレーション結果から考察した。*I-V*特性の測定結果から、直列接続ではセル数に対して短絡電流は0.2Aと変わらないが、開放電圧はセル数に比例して増加し、4セルでは7.2Vとなることがわかった。並列接続では開放電圧は並列セル数に対して1.8Vと変わらないが、短絡電流はセル数に比例し4セルで0.8Aという結果が得られた。2直列2並列混合接続では、開放電圧は3.6V、短絡電流は0.4Aとなり、開放電圧は直列セル数、短絡電流は並列セル数にそれぞれ比例し2倍に増加するという結果が得られた。シミュレーション結果では、開放電圧において測定結果と比較的近い値が得られた。各接続において、セル数の増加に対して典型的な結果が得られたことから、太陽電池モジュールの実験実習に市販の教育用太陽電池を用いることが可能であることが明らかとなった。

* 東海大学教育開発研究センター

** 東海大学理系教育センター

*** 東海大学現代教養センター

1. はじめに

近年、地球温暖化への懸念からエネルギー問題への関心が高まり、再生可能エネルギーの1つとして太陽電池は注目されている(渡部, 2011)。地球温暖化にともなう気温の上昇は、二酸化炭素(CO₂)濃度の急激な増加が原因であるとされている(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もその目標の1つであることから、エネルギー環境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)。

太陽光発電では複数枚の太陽電池セルを接続することによってモジュールを構成し、さらにそのモジュール同士を接続し太陽電池パネルとすることによって大容量発電を行っている(飯田, 2015)。このモジュールの構成では、各太陽電池セルの基本性能(短絡電流, 開放電圧, 曲線因子, 最大電力等)ができるだけ同等のものを用いている。このため、モジュールの短絡電流はセルの並列接続数に比例して増加し、開放電圧は直列接続数に比例するという特性となる。これにより、セルの枚数や接続方法からモジュールの短絡電流, 開放電圧, 最大出力などの仕様を決定することができる。同様に太陽電池パネルにおいても、モジュールの枚数や接続方法から仕様を決定している。モジュールを構成する際のセルの接続方法は直列や並列を含んだ直並列混合接続であり、接続方法やセル数による電気的特性について理解することは太陽電池パネルを設計する際の基礎となる。太陽電池の教育に関する研究では、教育用太陽電池セルを用いたモータの駆動(奈須野, 2012)やLEDの点灯(富山, 2012)に関する取り組みが多く、モジュールに関する研究報告は見受けられない。

本研究では、市販の教育用太陽電池を用いて、直列や並列および直並列混合接続モジュールの電気的特性について調べ、市販の教育用太陽電池を用いたモジュールの実験実習について検討した。本論文では、各接続において太陽電池のセル数を増加させたときの開放電圧および短絡電流について、電子回路シミュレータを用いて考察した結果について述べる。

2. 計測方法

教育用太陽電池セル(C500, ケニス)を4枚用いて、図1の模式図に示すように、(a)直列接続, (b)並列接続, (c)直並列混合接続の3種類にモジュール化して*I-V*特性を計測した。直列並列混合接続では4枚のセルを2枚ずつ直列に接続し、それら2組を並列に接続した。全体をより均一に光照射するために、図2に示すように500Wランプ(PRF500W, 岩崎電気)を2台並べ、比較的均一な照射領域を確保した。また、ソーラーパワーメータ(TM-750, TENMARS)

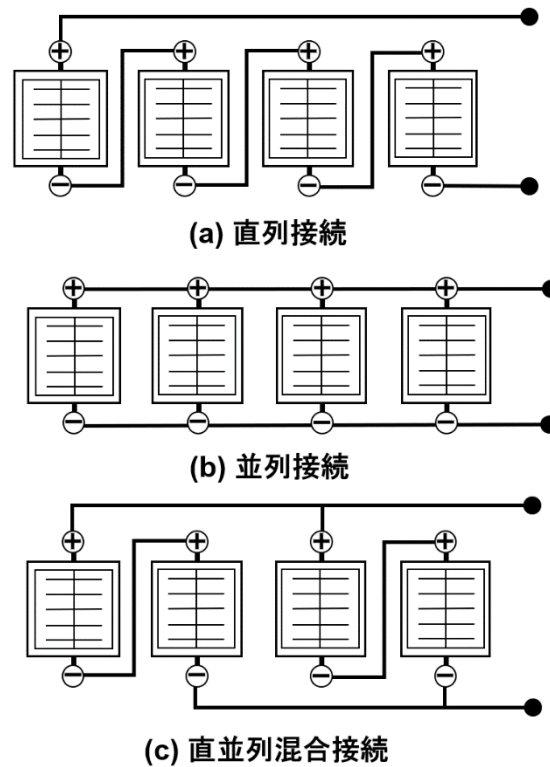


図1 教育用太陽電池セルを4枚用いた接続。
 (a) 並列接続, (b) 直列接続, (c) 直列並列混合接続。

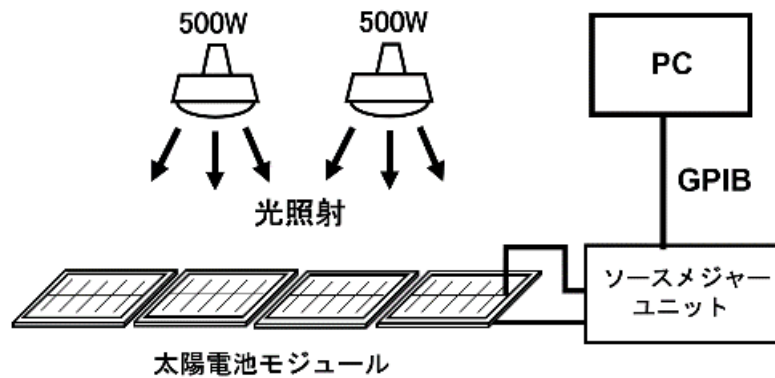


図2 太陽電池計測システムの概略図。

を用いて照射領域においておよそ 1 kW/m^2 の放射照度となるようにランプの高さと角度を調整した。その後、太陽電池計測システムを用いて、それぞれの接続における I - V 特性、 P - V 特性を調べた。計測では4枚の太陽電池セルを直列、並列、直並列混合とそれぞれ組み換えて行った。太陽電池計測システムでは、図2に示すように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 測定ソフト (サンライズ社) によって太陽電池特性が自動測定される。

3. 結果と考察

3.1 各太陽電池セルの性能評価

太陽光発電では、太陽電池セルを複数枚接続することによりモジュールを構成し、さらにモジュールを組み合わせることで太陽電池パネルが構築されている。このモジュールにおけるセルの接続は直列や並列を含んだ直列並列混合接続である。

太陽電池の I - V 特性から得られる主な基本性能は、短絡電流 I_{sc} 、開放電圧 V_{oc} 、最大出力 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 である（菅原, 2012）。各太陽電池セルの基本性能が同等であれば、太陽電池セルの並列接続数に比例して短絡電流 I_{sc} は増加し、直列接続数に比例して開放電圧 V_{oc} は増加する。よって、基本性能のできるだけ同じ太陽電池セルでモジュールやパネルを構成することにより、直列および並列の枚数から太陽電池モジュールやパネルの I_{sc} 、 V_{oc} 、 P_{max} を見積もることができる。

モジュールでは太陽電池セルの基本性能をできるだけ揃えることが必要となることから、使用する4枚の教育用太陽電池セルの基本性能について調べた。図3に示すように、4枚の I - V 特性の短絡電流は0.2A程度であり1.5V付近まで定電流となっていることがわかる。太陽電池の

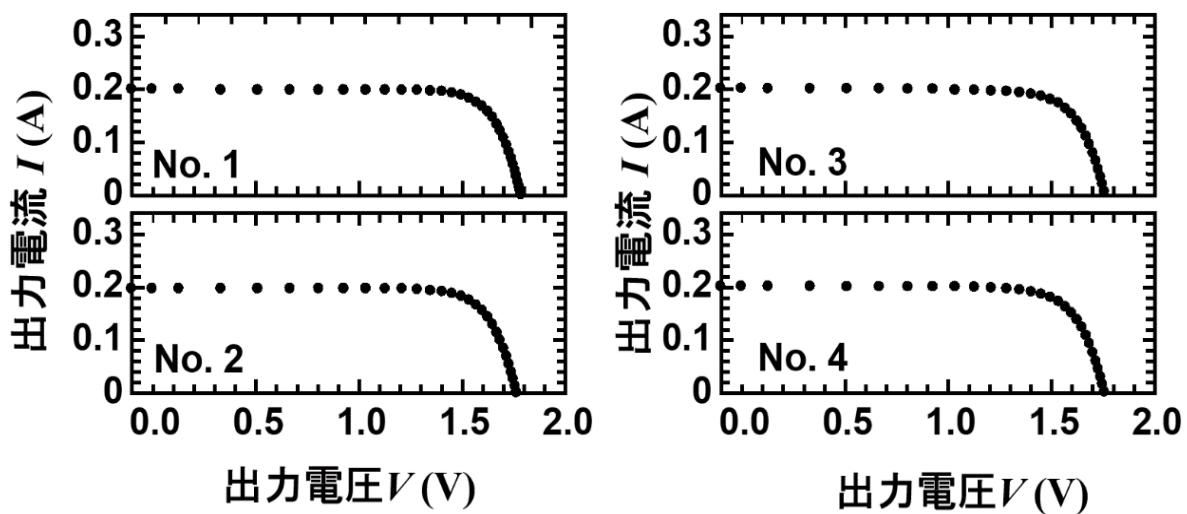


図3 モジュールに使用した4枚の教育用太陽電池セルの I - V 特性.

表1 4枚の太陽電池セルの性能評価(受光面積: 38 cm²)

sample No.	1	2	3	4
I_{sc} (A)	0.199	0.197	0.201	0.201
V_{oc} (V)	1.80	1.80	1.78	1.77
P_{max} (W)	0.284	0.275	0.274	0.274
V_{max} (V)	1.50	1.50	1.46	1.46
I_{max} (A)	0.188	0.182	0.186	0.186
FF	0.787	0.770	0.759	0.763

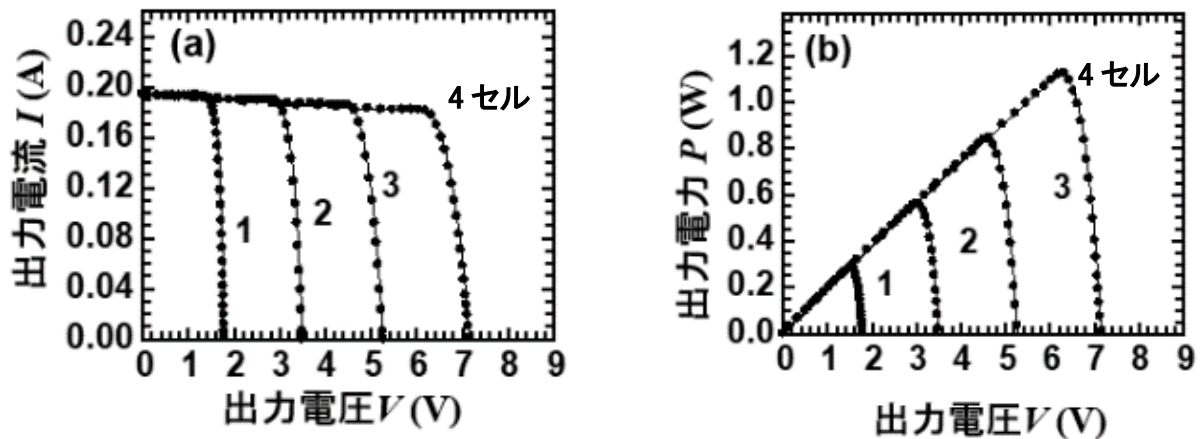


図4 実験教材用太陽電池セルを1から4枚まで増加させた直列接続の I - V 特性. (a) I - V 特性, (b) P - V 特性.

I - V 特性から得られた基本性能を表1に示した。この表からわかるように、4つのセルの基本性能の値においてバラツキが比較的小さいことから、直列や並列および直並列接続において典型的な特性が得られることが期待される。

3.2 直列接続

3.2.1 直列接続の I - V 特性

教育用太陽電池を4セルまで直列接続させたときの I - V 特性を図4(a)に示す。この図から、太陽電池のセル数を直列に増やしても短絡電流 I_{sc} は変化せず 0.2 A 付近であることがわかる。開放電圧 V_{oc} は1セルでは 1.8 V であり、4セルの直列では4倍の 7.2 V となった。このように直列接続では短絡電流 I_{sc} はほとんど変化しないが、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直列接続の典型的な結果が得られた。

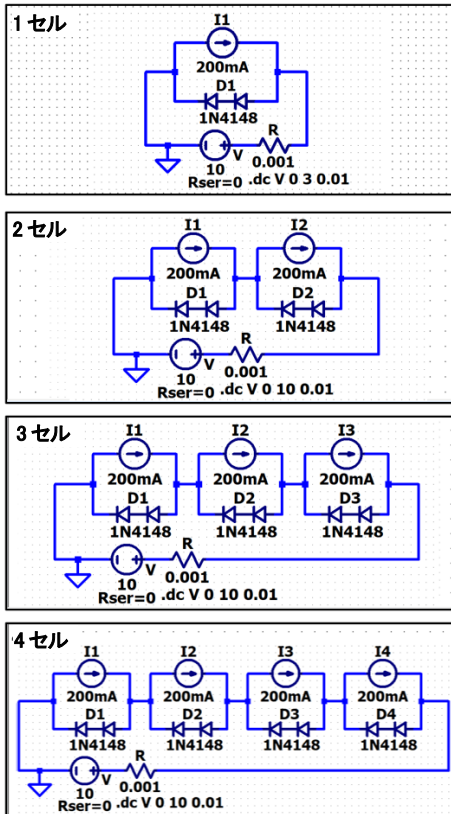
3.2.2 直列接続の P - V 特性

直列接続のセル数を増加させたときの P - V 特性を図4(b)に示す。各セルのピーク位置は、1セル (1.6 V, 0.30 W)、2セル (3.1 V, 0.55 W)、3セル (4.6 V, 0.85 W)、4セル (6.3 V, 1.15 W)、と測定され、これらは最大出力電圧 V_{max} と最大出力 P_{max} であり、最適な負荷抵抗を接続したときの電圧と電力を意味している。前述したように、短絡電流は変わらないが開放電圧は直列セル数によって増加する。これにより、ピーク位置の V_{max} と P_{max} はセル数にともない増加する。

3.2.3 LTspice による直列接続のシミュレーション結果

教育用太陽電池の直列接続では開放電圧 V_{oc} は直列セル数に比例して増加する。この開放電圧の増加について調べるために、LTspice シミュレータ (アナログ・デバイセズ社) を用いて I - V 特性のシミュレーションを行った。この LTspice は Web から無償でダウンロードできる。

(a)直列回路



(b)シミュレーション結果

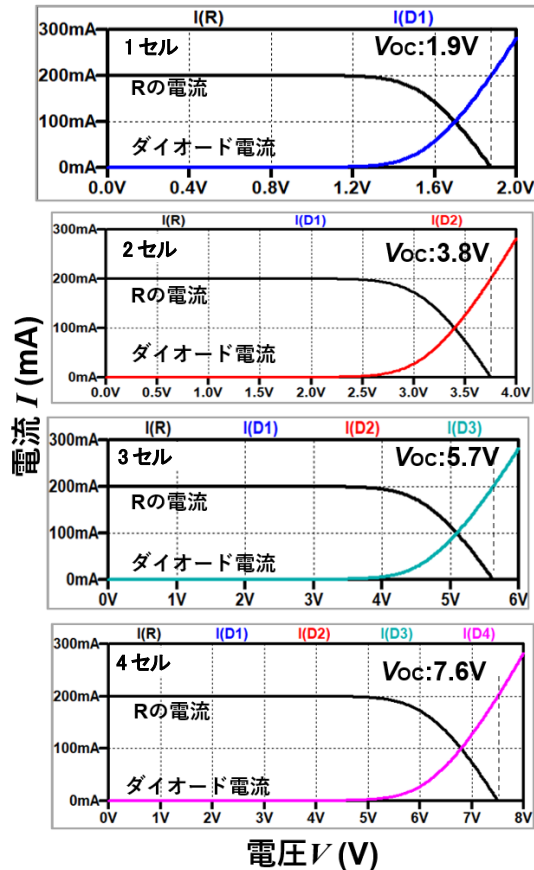


図5 LTspice を用いて太陽電池セルを1から4枚まで直列接続させたときの等価回路とシミュレーション結果。(a) 直列回路, (b) シミュレーション結果

図5(a)に LTspice を用いて構成した直列回路, (b)にシミュレーション結果を示す。太陽電池はダイオード構造であり, 光照射したときの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。LTspice では, 図5(a)に示すように整流用ダイオード (1N4148) の2直列と定電流源 (200 mA) とを並列にすることによって太陽電池と等価的なセルを構成した。本論文では, 2直列させたダイオードを各セルにおいて総称し, D1, D2, D3, D4 と呼ぶ。直流電源については定電流源からの電流を妨げる向きに配置した。LTspice では回路の電流を計測するための抵抗が必要なため, $I-V$ 特性に影響を与えない程度の $1\text{ m}\Omega$ の低抵抗を接続した。

図5(a)の1セルにおいて抵抗 R を流れる回路全体の電流は, 図5(b)の1セルに示すように, 印加電圧 1.2 V までは 200 mA の定電流であるが, それ以上の電圧では電流は低下し 1.9 V で流れなくなった。一方, ダイオード $D1$ を流れる電流は印加電圧 1.2 V から生じ, 開放電圧 1.9 V のときに 200 mA となった。2セルの直列では, 印加電圧 2.4 V 付近から1セルと同様にダイオード $D1, D2$ の電流は増加した。LTspice の画面上では $D1, D2$ の電流は重なって示されている。よって, 開放電圧 3.8 V では $D1, D2$ に各 200 mA の電流が生じる。3セルでは開放電圧 5.7 V のときに $D1\sim D3$ に各 200 mA , 4セルでは開放電圧 7.6 V のときに $D1\sim D4$ に各 200 mA の電流が生じている。開放電圧は1セルでは 1.9 V , 4セルでは4倍の 7.6 V となり直列セル数に比例して開放電圧は増加した。短絡電流は 200 mA であり, 直列セル数を増やしても変わらないことが確認できた。

3.2.4 4セル直列接続の I - V 特性

教育用太陽電池を4セルまで直列接続させたときの等価回路を図6に示す。ここでは、簡単化のため、各セルにおいてダイオードを1つの図記号で示している。シミュレーション結果に基づき教育用太陽電池の直列接続の I - V 特性について述べる。図6(a)の等価回路に示すように、短絡では同一電流源の直列回路となるため、セル数を増やしても電流値は変わらない。これにより、図4(a)の測定結果に示すように、教育用太陽電池の直列セル数を増やしても短絡電流はおよそ0.2Aとなる。

図6(b)の負荷抵抗の場合において、電流は定電流であるため負荷抵抗の抵抗値を増加させると抵抗の両端の出力電圧が増加する。負荷抵抗をさらに上昇させ、抵抗の両端の電圧がダイオードの立ち上がり電圧 \times セル数を超えると、電流は各ダイオードへも流れ負荷抵抗に流れる電流は低下する(シミュレーションでは立ち上がり電圧1.2V \times 4セルの4.8V付近から電流は低下)。

さらに負荷抵抗を上昇させ、図6(c)の開放状態では4つのセルのダイオードに0.2Aの電流が生じ、これにより各セルのダイオードの両端に1.9Vの起電力が生じる。よって、開放電圧は単セルの起電力 \times セル数となり、シミュレーション結果では1.9V \times 4セルによって7.6Vの開放電圧となった。 I - V 特性の測定から、4セルの開放電圧は7.2Vである〔図4(a)〕。このように、測定された開放電圧に近い値がシミュレーションから得られた。

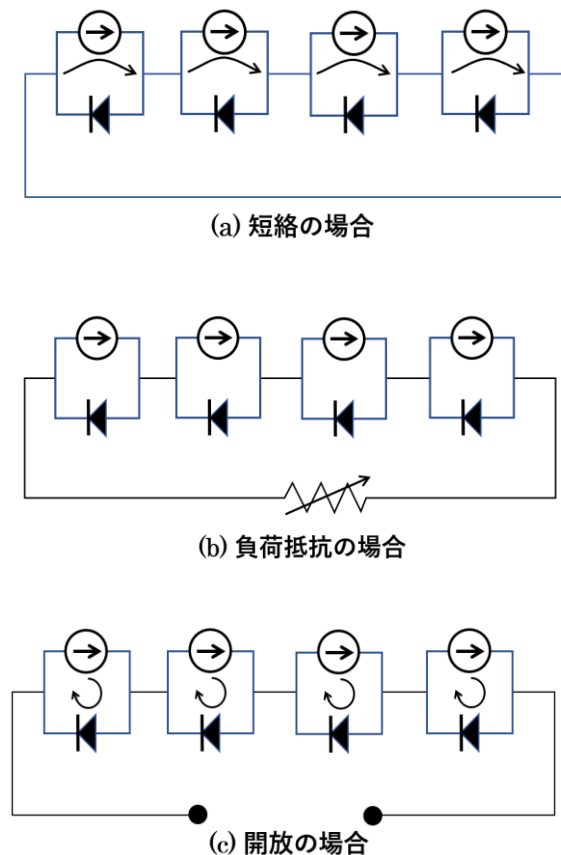


図6 直列接続の等価回路.

3.3 並列接続

3.3.1 並列接続の I - V 特性

太陽電池を並列に 4 セルまで接続させたときの I - V 特性を図 7(a)に示す。この図に示すように、1セルの短絡電流は 0.2 A、4セルでは約 0.8 A であり並列セル数に比例して短絡電流は増加した。一方、開放電圧は並列セル数を増加させても変化せず、1.8 V であった。このように、並列接続では並列セル数を増加させても開放電圧は変わらないが、短絡電流は並列セル数に比例して増加するという並列接続の典型的な結果が得られた。

3.3.2 並列接続の P - V 特性

図 7(b) に並列接続の P - V 特性を示す。各セルの特性において出力のピーク値は最大出力 P_{\max} であり、1セルでは 0.25 W、4セルでは 1.2 W であり、並列セル数にともない最大出力 P_{\max} は増加している。図 7(a)に示すように、並列接続では開放電圧に変化はなく短絡電流が増加するため P_{\max} は増加する。

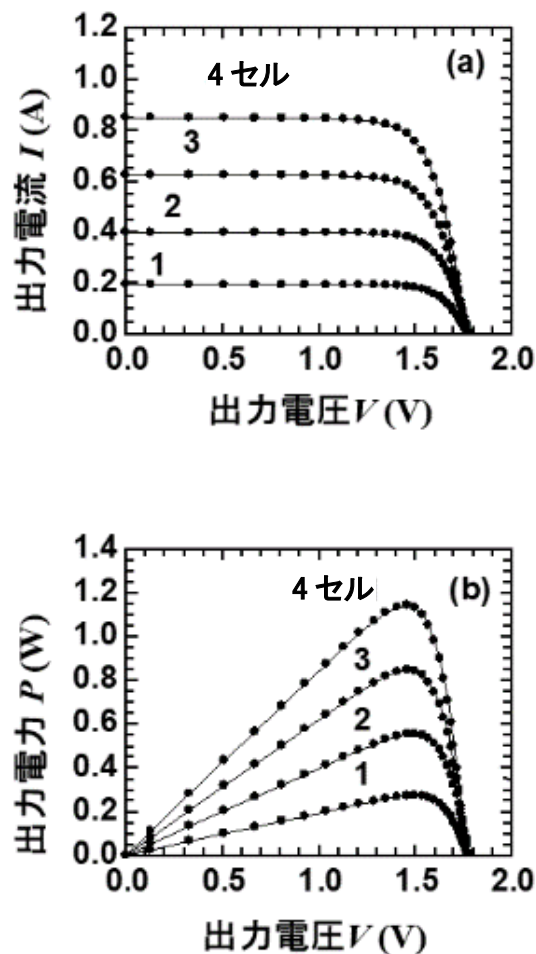


図 7 実験教材用太陽電池セルを 1 から 4 枚まで増加させた並列接続の特性。
(a) I - V 特性, (b) P - V 特性。

3.3.3 LTspice による並列接続のシミュレーション結果

並列接続では、上述したように短絡電流 I_{sc} は並列セルに比例して増加する。この短絡電流の増加について調べるために、LTspice を用いて I - V 特性のシミュレーションを行った。図 8(a) に LTspice を用いて構成した並列回路、(b) にシミュレーション結果を示す。

図 8(b) のシミュレーション結果から 1 セルにおいて抵抗 R の電流は、印加電圧 1.2 V までは 200 mA の定電流であり、開放電圧の 1.9 V において流れなくなった。ダイオード $D1$ の電流は 1.2 V から上昇し、開放電圧の 1.9 V において 200 mA に達した。また、ダイオード $D1$ に電流が生じていないとき、抵抗 R の電流は 200 mA の定電流となっている。

2 セルでは 1 セルの 2 倍の 400 mA の定電流が抵抗 R に生じ、1 セルと同様に印加電圧 1.2 V 付近から電流は低下し、開放電圧の 1.9 V のときに流れなくなった。ダイオード $D1$ 、 $D2$ の特性は画面上では重なって示され、どちらも印加電圧 1.2 V 付近から電流は上昇し、開放電圧の 1.9 V では $D1$ 、 $D2$ に各 200 mA (合計 400 mA) の電流が生じている。また、ダイオード $D1$ 、 $D2$ に電流が流れていないときには抵抗 R に 400 mA の定電流が生じた。

このように、短絡電流 (定電流) は並列セル数に比例して増加し、4 セルでは 1 セル 200 mA の 4 倍の 0.8 A となった。抵抗 R に生じる電流は並列セル数に関わらず 1.2 V から低下し、開放電圧の 1.9 V において流れなくなる。一方、各セルのダイオードの電流は 1.2 V から上昇し開放電圧の 1.9 V で 200 mA となった。また、1.9 V における各セルにおけるダイオード電流の和は短絡電流の電流値となることがわかった。

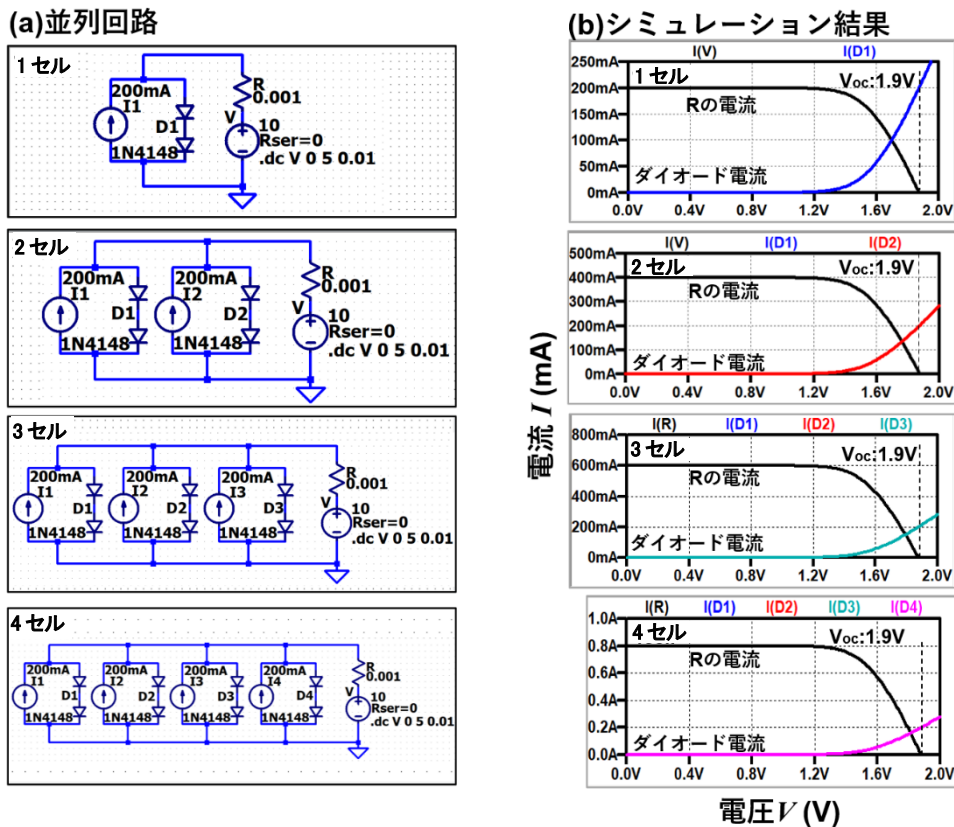


図 8 LTspice を用いて構成した並列回路とシミュレーション結果。(a)並列回路：電流源とダイオードの構成をセルとし、4 セルまで並列接続させたときの回路。(b)シミュレーション結果。

3.3.4 4セル並列接続の I - V 特性

図 7(a) の並列の I - V 特性の測定から、各セルの短絡電流はおよそ 0.2A であることがわかり、4セルでは4倍の 0.8A 程度となった。太陽電池セルを並列接続したときの等価回路を図 9 に示す。短絡の場合では、図 9(a)に示すように定電流源の並列となり、回路全体の短絡電流は各電流源からの電流の和、言い換えると電流値 \times セル数となる。これにより、シミュレーションから4セルの短絡電流は 0.8A ($0.2\text{A}\times 4$ 倍) となり、測定結果とほぼ一致した。

図 9(b)の負荷抵抗の場合において、抵抗値を増加させると抵抗の両端の出力電圧は増加する。負荷抵抗をさらに上昇させ、抵抗の両端の電圧がダイオードの立ち上がり電圧を超えると電流は負荷抵抗だけでなく4つのダイオードへも流れ、負荷抵抗を流れる電流は低下する。図 7(a) の4セル並列の I - V 特性の測定では、出力電圧 1.4V 付近から出力電流が低下している。この低下はダイオード側へ電流が流れ始めているためである。

図 9(c)の開放状態では、短絡のときの 0.8A の電流が4つのダイオードにそれぞれ 0.2A 流れ、各セルの両端に 1.9V の起電力が生じることがシミュレーション結果から得られた。4セル並列の測定から開放電圧は 1.8V であることから [図 7(a)], 測定結果に近い値がシミュレーションから得られた。

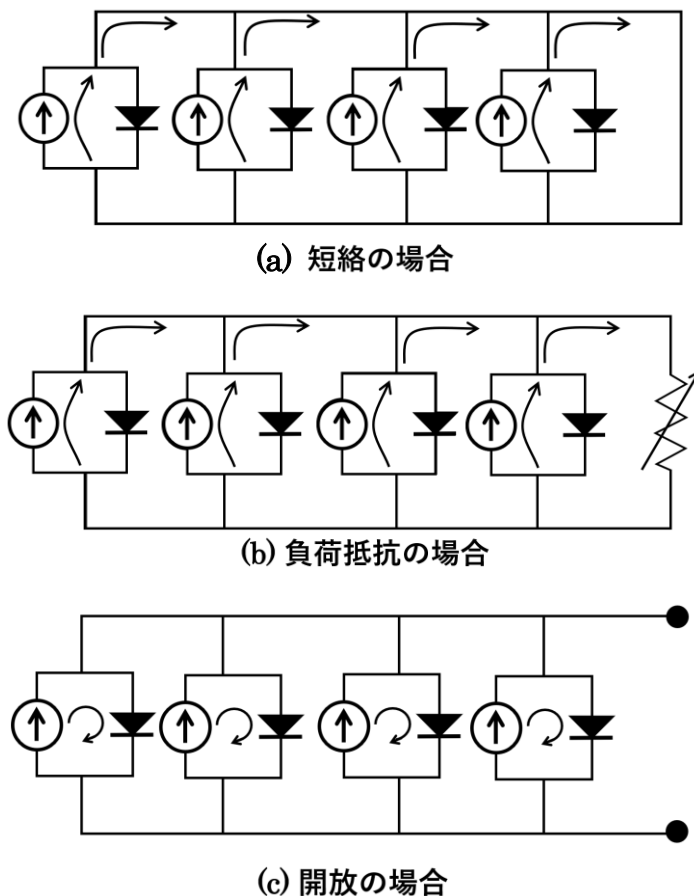


図 9 並列接続の等価回路.

3.4 直並列混合接続

3.4.1 直並列混合接続の I - V 特性

直列と並列の混合接続における I - V 特性を図 10(a) に示す。また比較のため直列 (4 セル)、並列 (4 セル) 接続の特性についても同図に重ねた。2 章で述べたように直並列混合の接続では 2 枚の直列どうしを並列に接続している。図 10(a) に示すように、混合接続の開放電圧 V_{oc} は 3.6 V、短絡電流 I_{sc} は 0.4 A となった。比較のために示した 1 セルの特性から直並列混合接続の V_{oc} 、 I_{sc} はそれぞれ 1 セルのおよそ 2 倍となっていることがわかる。このように、直並列混合接続では、開放電圧を増加させるためには直列セル数、短絡電流を増加させるためには並列セル数を増加させるというように、直列および並列のセル数によって開放電圧と短絡電流を設定できることがわかる。

3.4.2 直並列混合接続の P - V 特性

図 10(b) の P - V 特性において、セルを 4 枚用いた直列、並列、および直並列混合接続の最大出力 P_{max} は 1.15 W 前後であり、表 1 に示した 1 セルの最大出力 P_{max} のおよそ 4 倍であり接続方法による差がほとんどないことがわかる。 P_{max} は $V_{oc}I_{sc}FF$ の積からも求めることができる。曲線因子 FF は 0.8 程度であり、 $V_{oc}I_{sc}$ 積に FF の値を掛けると I - V 特性の面積となる。図 10(a) より並列、直列、および直並列の I - V 特性の面積は単セルのおよそ 4 倍となっていることがグラフからわかる。このことはセルの枚数が同一であれば接続方法に関わらず最大出力は一定となることを意味している。これにより、図 10(b) に示すように接続方法が異なっても P_{max} はほとんど変わらないという結果となる。

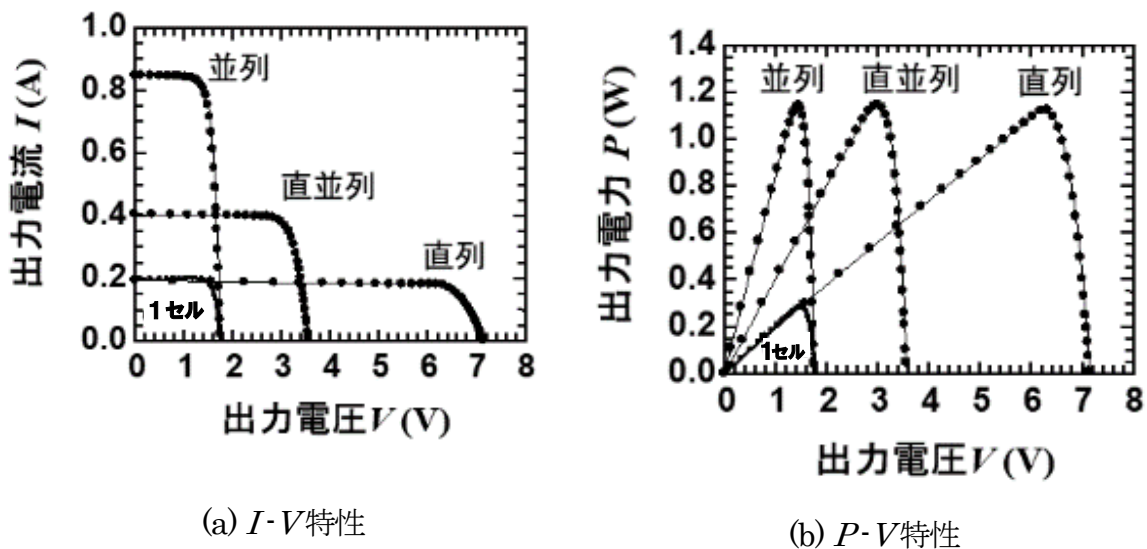


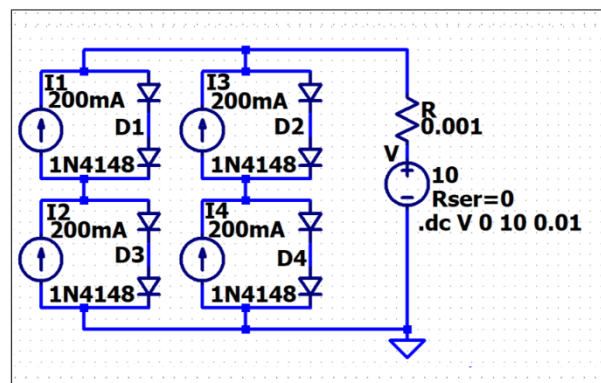
図 10 直列並列混合接続の特性 (a) I - V 特性, (b) P - V 特性, 図中のセルは単一セルの特性, 並列: 並列接続 (4 セル), 直並列: 直並列接続 (4 セル), 直列: 直列接続 (4 セル) .

3.4.3 LTspice による直並列混合接続のシミュレーション結果

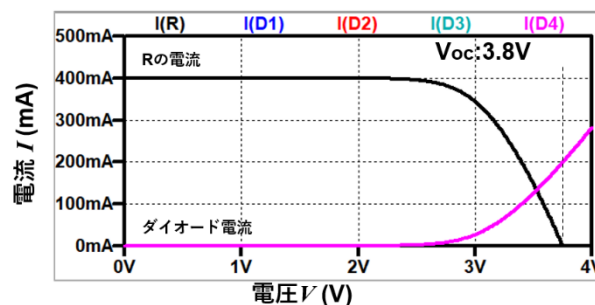
図 11(a)に LTspice を用いて構成した 2 直列 2 並列混合回路、(b)にシミュレーション結果を示す。図 11(b)より印加電圧 2.4 V までは 400 mA の定電流であった。この電流は I1, I2 の直列接続からの 200 mA と I3, I4 からの 200 mA が抵抗 R にそれぞれ流れるためである。2 直列 2 並列回路では並列数が 2 であることから電流は 2 倍となる。このように、短絡電流は並列セル数だけに比例することがシミュレーション結果から確認できた。

印加電圧 2.4 V 以上では抵抗 R を流れる電流は低下し、図 11(a)のダイオード D1, D2, D3, D4 に電流が流れ始める。このとき D1, D2 を合わせた両端と D3, D4 を合わせた両端に 2.4 V 以上の電圧が印加される。すなわち全ダイオード (D1,D2,D3,D4) の両端の電圧が 1.2V 以上となり、電流源の電流が各ダイオードにも流れ始める。

図 11 (b)に示すように開放電圧は 3.8 V であった。これまでのシミュレーション結果から単セルの開放電圧は 1.9 V である。2 直列 2 並列回路では、直列セル数が 2 であることから開放電圧は 1 セルの 1.9 V の 2 倍の 3.8 V となる。このように、開放電圧は直列セル数だけに比例することがシミュレーション結果から確認できた。図 10(a)の測定では 2 直列 2 並列の開放電圧は 3.6V であり、測定結果と近い値がシミュレーションから得られた。また、図 11(b)に示すように開放電圧 3.8 V のとき抵抗 R に電流が流れなくなり、電流源の電流は全て各ダイオードに流れる。このため、D1, D2, D3, D4 の電流は全て 200 mA となっていることがわかる。



(a)直並列混合回路



(b)シミュレーション結果

図 11 LTspice を用いて構成した直並列混合回路とシミュレーション結果。
(a)直並列混合回路、(b)シミュレーション結果。

4. まとめ

教育用太陽電池を用いて、直列や並列および直並列混合接続モジュールを構成したときの I - V 特性について調べた。測定の結果、直列接続では直列セル数に対して短絡電流は変わらないが開放電圧は比例して増加する。また、並列接続では並列セル数に対して開放電圧は変わらないが短絡電流は増加するという結果が得られた。直並列混合接続では、開放電圧は直列セル数に比例して増加、短絡電流は並列セル数に比例して増加するという結果が得られた。これらのセル数に対する短絡電流、開放電圧について、LTspice によるシミュレーションを行った結果、測定した I - V 特性に比較的近いシミュレーション結果が得られた。

教育用太陽電池では、それぞれのセルの基本性能のバラツキが比較的小さいため、3 種類（直列、並列、直並列）の接続を行った際に典型的な特性が得られることが明らかとなった。これにより、教育用太陽電池を用いて太陽電池モジュールの実験実習が可能であることがわかった。太陽電池モジュールにおいて、この 3 種類の基本的な接続方法による電気的特性を理解することにより、大容量化や太陽光発電に関心を持たせることができ、またエネルギー問題を考えるきっかけとなると期待される。

参考文献

- 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.
- 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.
- 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.
- 飯田芳一 (2015). 図解 配電系統と太陽光発電, オーム社, 30 - 32
- 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.
- 菅原和士 (2012). 太陽電池の基礎と応用, 朝倉書店, 75 - 78.

(2022 年 12 月 30 日 受理)