

太陽光・熱を利用したハイブリッド太陽電池の開発

－多接合型太陽電池と熱電変換素子を積層化した集光式太陽電池－

豊田丈紫* 嶋田一裕* 橘泰至* 南川俊治*

太陽光を集光して小面積の太陽電池で電気エネルギーに変換する集光式太陽電池は、集光倍率を高めることで太陽光発電システムのコスト削減に有効である一方、熱の対策に課題がある。この未利用熱を電気エネルギーへ変換することによるエネルギー回収効率の向上を目的とし、太陽電池の直下に熱電変換素子を配置した太陽電池の開発を行った。面積比の異なる多接合型太陽電池と熱電変換素子の組合せや熱接合材として機能する絶縁基板の厚みの適切な組合せを検討した。フレネルレンズと太陽追尾装置で構成される発電モジュールの特性評価の結果、625倍の高集光倍率において25.2%のモジュール変換効率が得られた。キーワード：集光式太陽電池，多接合型太陽電池，熱電変換素子

Development of a Hybrid Photovoltaic Module Using Sunlight and Solar Heat

- A Concentrator Photovoltaic Module Assembled with Multi-junction Solar Cells and Thermoelectric Device -

Takeshi TOYODA, Kazuhiro SHIMADA, Yasushi TACHIBANA and Toshiharu MINAMIKAWA

A concentrator photovoltaic (CPV) system under concentrated sunlight was utilized to generate electricity by high-efficiency multi-junction solar cells. This technology can be benefited in both the cost reduction of PV system and improving energy conversion efficiency by increasing the concentrating magnification, however there are issues with the suppression of heat. With the aim of improving the recovery efficiency through the conversion of this waste heat into electricity, we developed a CPV system in which a thermoelectric (TE) device between the solar cells and the heat sink. A several combinations of hybrid photovoltaic module of varying surfaces area with thermoelectric elements and insulated substrates of appropriate thickness as thermal bonding materials were investigated. The performance of a CPV module with a focusing Fresnel lens and solar tracking device gave a module conversion efficiency of 25.2%, where the geometrical concentration ratio was 625 times.

Keywords: concentrator photovoltaic, multi-junction solar cells, thermoelectric

1. 緒言

固定価格買取制度(FIT)が導入されて以降、太陽光発電は想定約5倍のペースで導入(2016年3月時点で約3500万kW)が進んでいる¹⁾。しかしながら、水力発電や風力発電と比較して現状ではコストが割高であり、更なる技術開発が求められている。

多接合型太陽電池は、太陽光の各波長のエネルギー分布に対応した複数の太陽電池を積み重ねることで変換効率を向上させ、最も高い変換効率として46%を達成している²⁾。さらに、レンズ等を使って太陽光を集める集光装置と併用することで発電システム的大幅なコストダウンが期待される³⁾。一方で、電気に変換されない未利用光は熱となり性能低下の原因となるため、

集光倍率を抑制して低い温度で稼働させているのが現状である⁴⁾。我々は、未利用の熱エネルギーを電気として回収することが可能な熱電変換技術や、これを用いた発電システムの開発に取り組んでいる。そこで本研究では、集光式太陽電池(Concentrator photovoltaic : CPV)システムにおける太陽エネルギーの総合変換効率向上を目的とし、多接合型太陽電池と熱電変換素子を積層化したハイブリッド太陽電池(Hybrid Photovoltaic: HPV)を作製して疑似太陽光や自然光からの発電特性を評価した。

2. 実験

本研究では、Spectrolab製の3接合発電素子(CDO-100-C3MJ、素子形状10×10mm:有効面積98.9mm²)を用い

*電子情報部

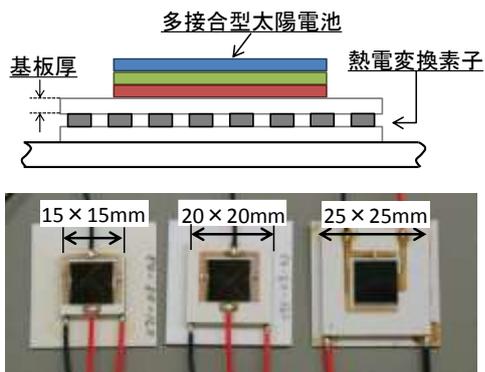


図1 HPVの構造(上)および試作品の外観(下)

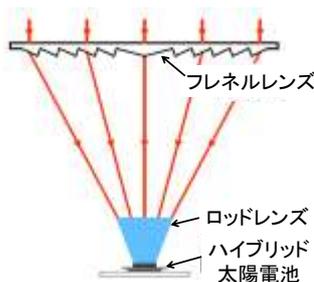


図2 発電モジュールの構造(上)とCPVの外観(下)

た。本素子は、Ge基板上にエピタキシャルでInGaP(1.88eV)、GaInAs(1.41eV)、Ge(0.67eV)の3つのサブセルを形成し、広い波長領域からの光電変換を行うことが出来る。熱電変換素子は100℃域で変換効率が高いBiTe系材料を用いた。アルミナ基板(基板厚さ0.5mm又は1.0mm)上にpおよびn型素子で構成されるπ型構造で、15×15 mm²(72対)、20×20mm²(98対)、25×25mm²(241対)の3種類の受熱面積を持つ熱電変換素子を作製した。HPVは、熱電変換素子の高温面(上面)に電極を形成して多接合型太陽電池をはんだ接合およびワイヤーボンディングすることで作製した(図1)。HPVの発電特性評価はソーラーシミュレータ((株)ブライテック・BXE-F-1000-KEI)を用いた。発電量の測定は、

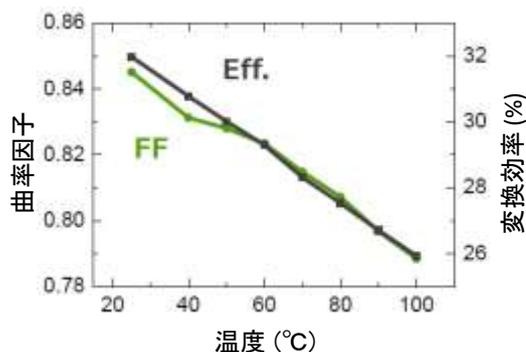


図3 多接合型太陽電池の変換効率(Eff.)および曲率因子(Fill Factor, FF)の温度依存性

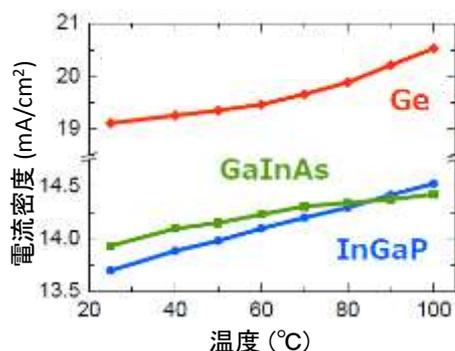


図4 多接合型太陽電池サブセルの電流密度の温度依存性

基準条件(Standard Test Cell Conditions: STC)に準拠して集光評価はソーラーシミュレータの入射光路内に300×300mm(焦点距離300mm)のフレネルレンズ(日本特殊光学樹(株)・CF300-B)を挿入することで疑似太陽光を受光面(10×10mm)角の多接合型発電素子に集光して測定した。集光倍率の制御は、フレネルレンズ上に100×100mm、150×150mmおよび200×200mmの開口部を持つ遮光シートを設置することで行った。各集光倍率の値は多接合型発電素子の短絡電流(I_{SC})の増加率で定義した。また、直達光以外の入射エネルギーによる誤差要因を抑制するため、多接合型太陽電池の受光面以外を遮光することで熱電変換素子への入熱源と3接合発電素子で発生した熱とを等しくした。また、熱電変換素子の評価における周囲環境を同一に保つため、HPVの裏面は25℃に温度制御した。

屋外の自然光での発電特性評価は、フレネルレンズとHPVを組合せた発電モジュールを太陽追尾架台に搭載したCPVを試作して実施した(図2)。フレネルレンズは焦点近傍にて色収差が発生するため、HPVの前面にガラス製のロッドレンズ(受光部20×20mm)を配置して照射光の均一化を図っている。

3. 結果と考察

3. 1 多接合型太陽電池の発電特性

非集光時の多接合型太陽電池の変換効率(Eff.)および曲率因子(fill factor, FF)の温度依存性を図3に、各サブセルの電流密度の温度依存性を図4に示す。STCにおける変換効率は32%で温度上昇とともに単調に減少し、100℃では26%(温度係数: -0.08)であった。この傾向はFFも同じであった。FFの低下は主に開放電圧の減少が要因であることから³⁾、変換効率の減少が温度上昇による開放電圧の低下に由来することがわかる。外部量子効率(external quantum efficiency: EQE)の測定から各サブセルの電流密度は温度上昇に伴い単調に増加する半導体の挙動を示した。一方、各セルの温度係数の違いにより室温付近では上段サブセルのInGaPが、85℃以上では中間サブセルであるGaInAsが電流律速となることがわかった。

3. 2 HPVの発電特性

3. 2. 1 多接合型太陽電池の発電特性

図5にソーラーシミュレータ照射開始直後におけるHPV(熱電変換素子: 15×15mm, 基板厚み1mm)の変換効率を示す。本結果は多接合型太陽電池の温度は上昇しておらず、また熱電変換素子の両端に温度差が発生

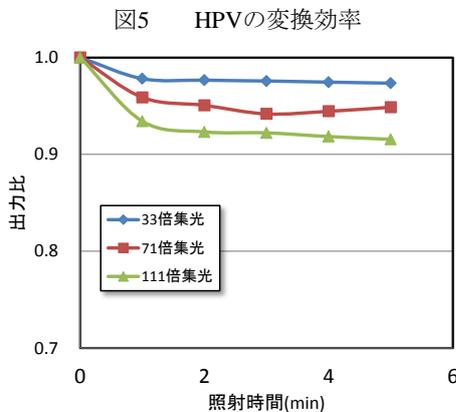
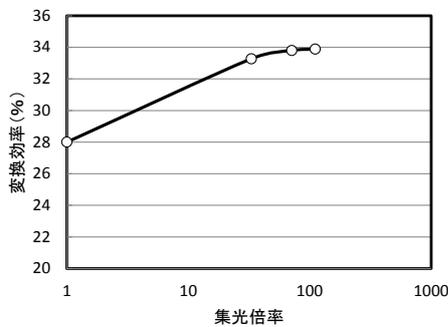


図6 出力比(初期出力値で規格化)の照射時間依存性

していない状態であり、発電量は多接合型太陽電池の発電量と等しい。非集光(集光倍率1倍)のときの発電効率(η_{cell})は28%であり、多接合型太陽電池の実装前の値に比べて4%低かった。これはソーラーシミュレータと太陽光とのスペクトル合致度の差異や電極との接合や配線による結線ロスによるものである。変換効率は集光倍率が高くなるに従って増加し続け、111倍集光時には6ポイント増加して最大34%に達した。3接合発電素子は太陽光スペクトルを3分割して発電するため、各サブセルの短絡電流密度を小さくすることが可能であり、これによりエネルギー損失量(I^2R)も小さくなる。実際、集光による変換効率の増加量はSi系太陽電池に比べて約2倍程度と見積もられており³⁾、高い集光比まで変換効率の増加が維持できる。よって、多接合型太陽電池は高集光倍率で発電を行うことで、より低コストで発電が可能になる。

次に多接合型太陽電池の各集光倍率における出力比(performance ratio: PR)の照射時間依存性を図6に示す。照射開始後にセルの温度上昇が進むにつれて出力が低下し、5min照射後にはすべての集光倍率において出力が一定となり定常状態になった。また、集光倍率が高くなるに従いセルの温度上昇率も高くなるため、出力の低下が顕著になった。図3から求めた温度係数で見積られる多接合型太陽電池の平均温度は33, 71, 111倍の集光に対してそれぞれ36℃, 47℃, 61℃であった。非集光状態では多接合型太陽電池の温度は上昇せず集光状態により入射光のエネルギーで温度上昇し、熱電変換素子に熱が投入される。よって、前記の温度上昇分の熱エネルギーと熱電変換素子に投入される熱エネルギーが等しくなる。

3. 2. 2 熱電変換素子の発電特性

照射開始5min後の各集光倍率におけるHPV(熱電変換素子: 15×15mm, 基板厚み1mm)の熱電発電特性を図7に示す。熱電発電の電流-電圧特性は集光倍率の増加によって電流と電圧がともに増加する傾向を示す。これは、短絡電流と開放電圧が温度差に比例して増加する熱電効果の基本的な特徴であり、その結果として出力は集光倍率に対して2次の関数で増加する。一方で、3接合発電素子の受光面積よりも熱電変換素子の面積は2.25倍大きい。そのため、熱伝達材でありつつ電気絶縁層として機能するセラミックス基板の厚みや多接合型太陽電池と熱電変換素子の面積比によって

HPV内部の熱伝達の形態が異なることが予想される。一例として熱電変換素子の面積が異なる場合の発電量の集光倍率依存性を図8に示す。各集光倍率ともに15mm角素子の出力が20mm角素子を上回る結果となった。これは、太陽電池の素子面積に比べて熱電変換素

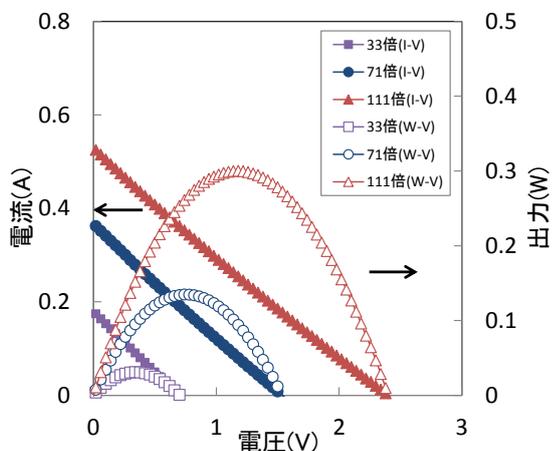


図7 HPV(熱電変換素子：15×15mm，基板厚み1mm)の照射開始5min後における熱電発電特性

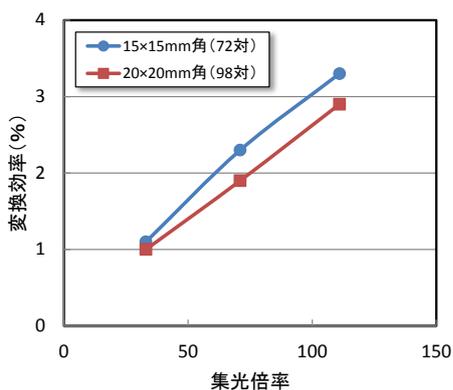


図8 熱電変換素子(基板厚み1mm)の変換効率

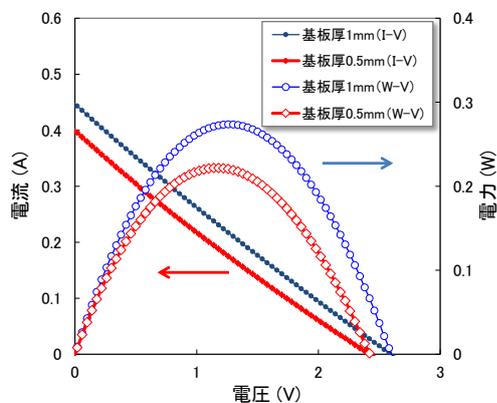


図9 HPV(熱電変換素子：20×20mm)の111倍集光時の熱電特性と基板厚依存性

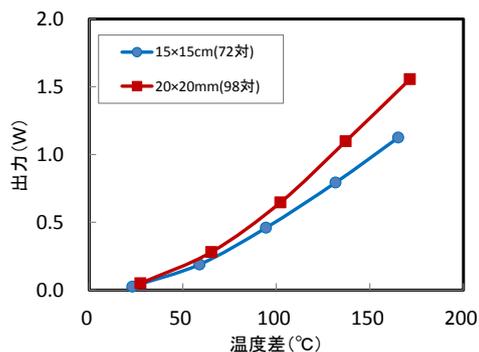


図10 HPV(基板厚み1mm)の熱電発電特性

子の面積が広いこと、熱電変換素子の高温面の均熱性に差異が出たことが要因と考えられる。この検証のため、HPV(熱電変換素子：20×20mm)の基板厚みが異なる場合の熱電発電特性を測定した。集光倍率111倍での測定結果を図9に示す。基板厚みが0.5mmの最大出力(P_{max})は0.22Wであるが、1mm厚の場合では0.3Wと約1.4倍高い出力が得られた。これは、基板の厚みを増すことで高温面の面内方向の熱拡散が促進されて受熱面の均一性が高まることで各熱電変換素子の電流値のばらつきが抑えられたことを意味する。

HPVの各熱電変換素子の発電特性を把握するため、熱電変換素子の発電量を発電効率特性評価装置(アドバンス理工(株) PEM-2)で測定した結果を図10に示す。熱電変換素子の起電圧や出力は温度差に比例し、出力は温度差の2次関数で増加する。また、p-n対数の多い20mm角(98対)は15mm角(72対)に比べて高い出力が得られる。この出力特性から図8の111倍集光時の熱電変換素子に発生した温度差を見積ると、20mm角の61℃に対して15mm角では74℃であった。以上の結果より、集光倍率に適した多接合型太陽電池と熱電変換素子の面積比が存在すること、受熱面の均一性を高める熱電変換素子の基板厚みを適切に選択する必要がある。

3.3 HPVの発電特性と出力比

表1にHPV(熱電変換素子：15×15mm，基板厚み1mm)の太陽光と熱電変換素子の各出力と変換効率を示す。総合変換効率では、71倍集光時に $\eta_{PHV} = 34.4\%$ が得られた。熱電発電単体では111倍で最高値 $\eta_{TE} = 3.3\%$ の変換効率を得られている。また、それぞれの集光倍率で光発電の初期出力を1としたときに、照射5分後における光発電と熱発電の和との比で表される出力比の集光倍率依存性を図11に示す。集光により温度

表1 HPV(熱電変換素子：15×15mm，基板厚み1mm)

の出力(上段)と変換効率(下段)				
集光倍率	1倍	33倍	71倍	111倍
3接合発電素子	0.03W 28.0%	0.89W 32.4%	1.87W 32.1%	2.85W 31.0%
熱電変換素子	-	0.03W 1.1%	0.13W 2.3%	0.30W 3.3%
総合変換効率 (η_{PHV})	28.0%	33.5%	34.4%	34.3%

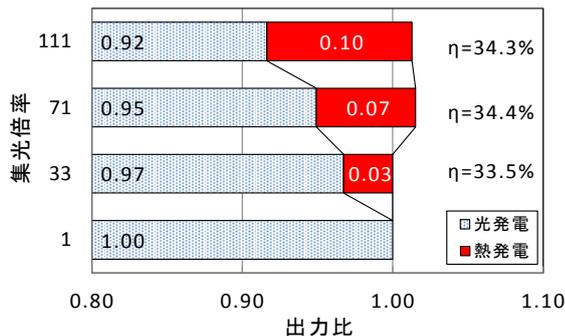


図11 HPV(熱電変換素子：15×15mm，基板厚み1mm)の出力比と光発電と熱発電の割合

上昇したことで多接合型太陽電池の出力が低下するが、その熱で低下分を上回る熱電発電が加わることで出力比1.0と同等以上の値となることとわかる。71倍集光と111倍集光では同等の出力比が得られているが、より広い面積から光が集められる高集光倍の方が同じ構成で高い出力が得られる。すなわち、111倍集光で動作させることで71倍集光に比べ出力で1.58倍の性能が得られており、費用対効果は高くなることとわかる。

3. 4 自然光でのCPVの発電特性

3. 4. 1 発電モジュールの変換効率

自然光を用いたCPVの発電量評価は以下のように実施した。まず、直達日射計(英弘精機(株)・STR-21G,

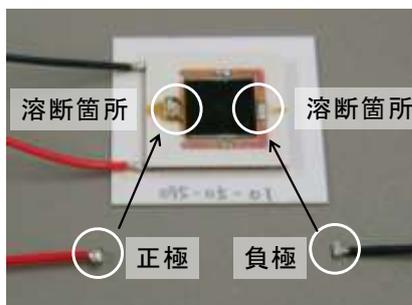


図12 熔断したHPV

表2 発電モジュールの変換効率

集光倍率	変換効率 η_{module}
100	31.8% (1.6)
225	26.5% (0.3)
400	25.3% (0.9)
625	25.2% (1.4)

MS-56)にて太陽光からの直達日射量を求め、レンズ上に配置した遮光マスクの開口部面積から入射強度を定義した。次に発電モジュールの発電量を測定してモジュールとしての変換効率を求めた。測定中の直達日射強度は750~850 W/m²の範囲であり、自然光の強度変動による誤差を見積もるため複数回測定した。表2にHPV(熱電変換素子：20×20mm，基板厚み1mm)を搭載した発電モジュールの変換効率を示す。集光倍率はHPVの受光面積とマスク開口部の面積比から求めた。また、変換効率のカッコ内に標準偏差を示す。100倍集光では疑似太陽光での結果と同等の31.8%の変換効率を得られた。一方で、高集光倍率になるに従い変換効率は低下し、625倍集光で25.2%であった。一方、900倍集光では多接合型太陽電池の温度が上昇し、電極部のはんだが熔断したため測定できなかった(図12)。このことから発電モジュールの適用範囲の上限は625倍であった。

3. 4. 2 太陽電池と熱電変換素子の面積比と出力特性

集光倍率400倍(開口部200×200mm)における3種類の発電モジュール(HPVの基板厚み1mm)の出力比を図11と同様に評価した結果を図13に示す。熱電変換素子形状20×20mmより広い面積で出力比が1.0を上回った。一方で15×15mmは、光発電の出力比が0.84と低く、熱発電との合計でも出力比で0.92であった。これは温度係数による3接合発電素子の出力低下が大きな要因である。図11に示すように同素子は111倍集光まで出力比1.0以上を保つのに対し、それ以上の集光倍率では熱電変換素子の貫通熱流密度が高くなることで3接合発電素子の熱移動量が飽和し素子温度が上昇したことで発電出力が急激に低下したものと考えられる。

熱電変換素子形状25×25mmは、3接合発電素子の冷却効果が高く、太陽光の連続照射による出力低下は出力比換算で0.04に留まった。一方で、熱電変換素子の出力は熱電変換素子形状20×20mmの出力比0.07に比べ大幅な出力低下となった。熱電発電は素子面内で多

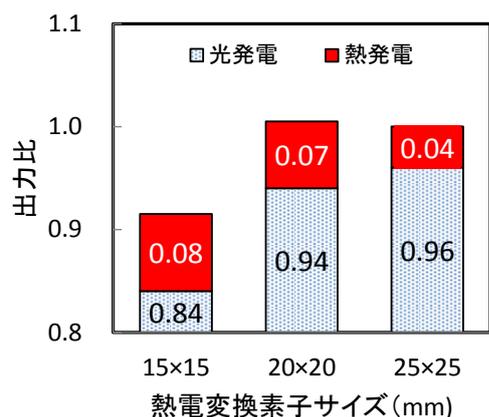


図13 発電モジュール(集光倍率400倍)の出力比および光発電と熱発電の割合

数のp-n接合回路を直列接続している為、図8の結果にもあるように受熱面積内に均一熱流があるとき最も高い出力が得られる。すなわち、ある一部分が加熱されて高温面が形成されても、出力は温度差が最も小さい部分で発電するp-n素子の電流値に律速される。このことから、太陽電池の素子面積に対する熱電変換素子の面積比としては1:4(多接合型太陽電池10×10mm：熱電変換素子20×20mm，基板厚み1mm)が最も発電出力と熱移動量のバランスに優れる組合せであることがわかった。

4. 結 言

多接合型太陽電池と熱電変換素子を積層化した太陽電池を作製して発電特性を評価した結果、100倍超の集光倍率において定常的な発電中における太陽電池の出力低下を熱電変換素子の発電により補うことで定格出力からの温度係数による出力減少を抑えることができた。また、熱電変換の効率は熱電変換素子の寸法や熱の平準化を担うアルミナ基板の形状にも依存することが分かった。

- (1) HPVの3接合発電素子の変換効率(η_{cell})は非集光で28%、集光倍率が高くなるに従って増加し続け、111倍集光時には最大34%に達した。温度係数から見積られる3接合発電素子の平均温度は111倍集光で61℃であった。
- (2) HPVの熱電変換素子の出力は集光倍率に対して2次関数で増加し、111倍集光時に $\eta_{TE} = 3.3\%$ に達した。

また、太陽電池の温度上昇による出力低下分を上回る熱電発電出力が加わることで、出力比1.0以上の値が得られた。3接合発電素子と熱電発電素子の出力の和で表される総合変換効率では、71倍集光時に最大値 $\eta_{PHV} = 34.4\%$ が得られた。

- (3) フレネルレンズ、HPVと太陽追尾装置で構成される発電モジュールを試作して太陽追尾架台に搭載したCPVの特性評価の結果、100倍集光では変換効率 $\eta_{module} = 31.8\%$ が得られた。また、625倍の高集光倍率に対応可能であり、そのときの変換効率 η_{module} は25.2%であった。太陽電池と熱電変換素子の面積比としては1:4が発電出力と熱移動量とで適切な組合せであることがわかった。

謝 辞

本研究を遂行するに当たり、多接合型太陽電池のご助言と発電量評価を頂いた東京大学先端科学技術研究センターの岡田至崇氏、玉置亮氏に謝意を表します。また、試作にご協力頂いたフェローテックセラミックス(株)および評価機器をご提供頂いた(株)アクトリーに感謝します。

参考文献

- 1) “再生可能エネルギー固定価格買取制度ガイドブック”. 経済産業省 資源エネルギー庁.
http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/data/kaitori/2017_fit.pdf, (参照 2017-07-29).
- 2) 勝本智子. “集光型多接合の化合物半導体太陽電池で世界最高の変換効率46%を達成”. NEDO海外レポート.
<http://www.nedo.go.jp/content/100587582.pdf>, (参照 2015-2-27).
- 3) 高木達也, 兼岩実. 集光型化合物太陽電池. シャープ技報. 2005, no. 93, p. 49-53.
- 4) 斉藤健司, 安彦義哉, 鳥谷和正, 森宏治, 古結靖和, 岩崎孝. 集光型太陽光発電システムの開発. SEIテクニカルレビュー. 2013, no.182, p. 18-21.
- 5) Marios Theristis, Tadhg S. O'Donovan. Electrical-thermal analysis of III-V triple-junction solar cells under variable spectra and ambient temperatures. Solar Energy. 2015, no.118, p. 533-546.