

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 28 日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289373

研究課題名(和文)非サンベルト地域における高効率集光型太陽光発電を目指した日射特性把握と集光系設計

研究課題名(英文)Diffuse sunlight observation and optical design of concentrator photovoltaic module harvesting diffuse sunlight

研究代表者

山田 昇(Yamada, Noboru)

長岡技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：90321976

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、従来の集光型太陽電池では活用できない散乱日射をも発電に活用できる新たな集光型太陽電池の集光技術を確立した。まず、非サンベルト地域における散乱日射特性をスカイスキャナーを用いて観測した。次に、この日射特性に基づいて、集光光学系を設計し、試作モジュールを製作し、屋外で実験検証を行った。結果として、日本の気象条件において従来の集光型太陽電池の約1.5倍以上のモジュール変換効率を達成した。さらに、モジュールおよびシステムの低コスト化に向けた方策として、メカニカルスタック多接合太陽電池に本概念を適用し、低倍集光モジュールにするアイデアを検証し、実現可能性が得られた。

研究成果の概要(英文)：We have developed a novel concentrator photovoltaic architecture harvesting not only direct sunlight but also diffuse sunlight, which cannot be harvested in the conventional concentration photovoltaic module. First, diffuse sunlight characteristics were observed and analyzed by using a sky scanning device. Second, based on the obtained diffuse sunlight characteristics, concentrator optics were designed and optimized, then the prototype mini-module was fabricated to conduct an outdoor test. As a result, the present mini-module achieved higher module conversion efficiency than the conventional concentrator photovoltaic module by factor of over 1.5. Furthermore, as a solution in order to reduce the cost of the module and the system, we investigated the potential of applying the present concept to a mechanical stack III-V/Si solar cell with low solar concentration. The result indicated the feasibility of the proposed solution.

研究分野：熱工学

キーワード：太陽光発電 太陽エネルギー 集光型太陽光発電 集光型太陽電池 多接合型太陽電池 光学設計

1. 研究開始当初の背景

集光型太陽電池 (Concentrator Photovoltaics, CPV) は、レンズ等の安価な集光器を用いて変換効率の極めて高い、反面、高価な集光用太陽電池セルに太陽光を集めて発電する技術である。集光用セルの集光時の変換効率(セルの受光量を基準とする効率)は 38~44%、集光器を含めたモジュール変換効率(集光器が受光する直達日射量を基準とする効率)は 27~35%に達している。CPV の魅力はこの高い変換効率である。集光用セルの集光時変換効率は 10 年以内に 50%を超えると予想されている。高倍率 CPV では太陽追尾が必須だが、モジュール面積当たりの発電量を増やし、敷地の省面積化に繋がる。最近のメガソーラーの普及により、安価で平坦な土地が不足しつつあり、今後は限られた敷地で発電量を最大化するニーズが高まる。変換効率が高い CPV には技術ポテンシャルがあるにも拘わらず、国内では普及していない。原因は散乱光を発電に活用できないためである。散乱光とは大気中の微粒子により太陽光が散乱したもので、散乱されずに大気を通過した直達光とは異なり、様々な角度で太陽電池に入射する。集光理論では高倍率集光ほど集光器の許容角が狭くなり、広い角度から入射する散乱光を集められない(図 1)。散乱日射を集めるには必然的に直達日射に対する集光倍率も 1 桁程度まで落とす必要があった(→コスト増と効率低下を招く)。直達光が豊富なサンベルト地域では、年間日射量に占める散乱日射の割合は約 2 割だが、非サンベルト地域の日本では約 4 割もあるため、直達日射基準ではモジュール変換効率が 27%~35%でも全日射基準では 16%~21%相当となり、平板 PV と同レベルになってしまう。この技術課題の解決策を探るため、図 2 に示すように直達光を高効率セルに高倍率集光し、散乱光を低コストセルに非集光または低倍率集光する集光系の新概念を考案した。

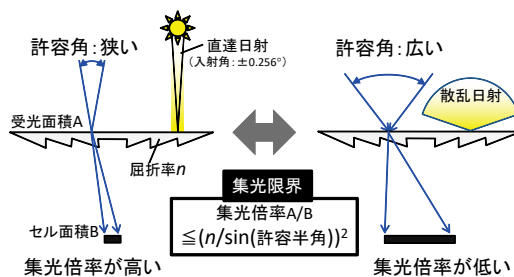


図 1 太陽光集光の理論限界

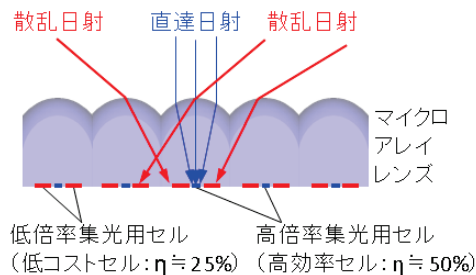


図 2 新規集光型太陽電池の概念図
(η は将来のセル変換効率)

2. 研究の目的

本概念の検証と具体化を目指し、散乱光活用型 CPV の集光技術を確立し、集光型に不利とされてきた非サンベルト地域において全日射基準のモジュール変換効率を実用的なコストで最大化する技術の構築を目的とした。具体的には以下の3つの点を明らかにした。

- 1) 非サンベルト地域における日射輝度の入射角依存性(時間、季節、年間)
- 2) 上記1の日射特性において集光効率と倍率を最大限に高める集光系の形態
- 3) 上記3に基づいて製作したモジュールの実績性能と高性能化、低コスト化への方策

3. 研究の方法

(1) 散乱光の天空放射輝度分布特性把握

散乱光活用型 CPV を開発していくに当たり、モジュール構造の最適化等、より有効的な散乱光の活用方法を検討するためには、散乱光がどの方向にどのくらいの量存在するのかといった散乱光の分布特性を詳細に、また、定量的に把握する必要がある。そこで、全天走査型放射輝度測定システム(Sky scanner: 英弘精機株式会社 MS-321LR)を導入し、散乱光の分布特性の実測による把握を試みた。Sky scanner は、全天空を 145 点の天空要素に分割し、各々の放射輝度を開口半角 5.5°の放射輝度センサーと 2 軸制御の回転駆動部を用いて自動走査する測定装置である。これを大学構内(長岡市)に設置し、2014 年 6 月より長期観測を開始した。1 回の測定に約 4.5 分を要するため、測定間隔は 10 分毎とした。その他に、全天日射計(英弘精機株式会社 MS-402)と直達日射計(英弘精機株式会社 STR-22)を取付け、水平面全天日射量 GHI, 水平面直達日射量 GNI および追尾面直達日射量 DNI も測定した。これらの測定系の設置状態と Sky scanner の外観を図 3 に、Sky scanner の

自動走査方法と測定結果の例を図4に示す。10分毎に得られる放射輝度分布を基に、天空要素145点における放射照度を算出する。Sky scannerを中心とする天球を測定範囲とし、天空要素 n が天球上に占める領域を a_n [sr] とすると、その領域の放射照度 I_n [W/m²] は、各天空要素の放射輝度 R_n [W/(m²・sr)] と a_n の積となる。

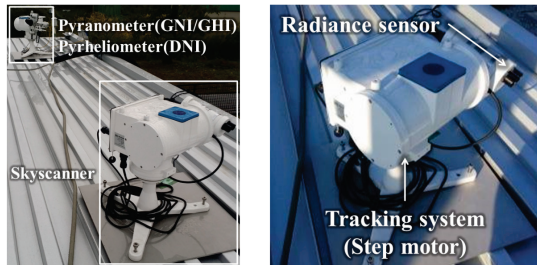


図3 測定系の設置状態と Sky scanner の外観

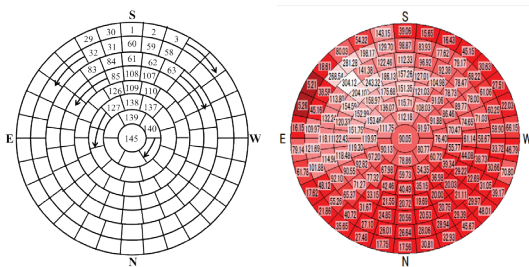


図4 各測定点の走査順序と測定結果の一例

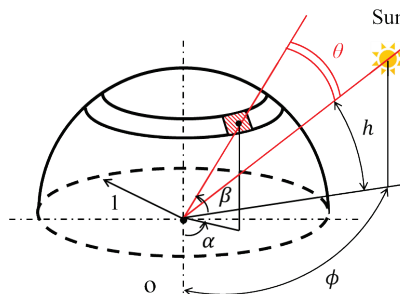


図5 入射角 θ の定義

上記の方法で算出した各天空要素の放射照度は以下の方法で算出した各天空要素への入射角 θ を基準として、 $0^\circ \leq \theta < 10^\circ$ 、 $10^\circ \leq \theta < 20^\circ$ のように 10° ごとに合算した。その結果、太陽近傍の欠損データ(日射強度が強すぎるためにセンサー値が得られないことによる)のほとんどが $0^\circ \leq \theta < 10^\circ$ の範囲に収まり、この範囲をDNIの実測値で補完した。本来、半角 2.5° の範囲を直達光、それ以外の範囲を散乱光として扱うべきであるが、本観測では $0^\circ \leq \theta < 10^\circ$ の範囲に直達光が含まれることとなる。なお、図5のように、太陽方位角を ϕ 、太陽高度角を h 、各天空要素

の方位角を α 、各天空要素の高度角を β とすると、太陽と正対する方向を基準とする入射角 θ は幾何学的に求められる。観測データは、大気の状態(雲や日射等)の違いによる傾向を捉えるため、観測日の日平均散乱比 γ_{ave} を用いて分類した。 γ_{ave} は日平均全天日射量に対する日平均散乱日射量の割合であり、 $\gamma_{ave} = (GNI_{ave} - DNI_{ave}) / GNI_{ave}$ で定義する。冬期は降雪により観測できなかったが2年間で約300日分のデータを得た。

(2) 集光系およびモジュール構造の設計

光線追跡法(Ray-tracing)を用いて集光系設計を行った。図6に解析モデルを示す。光源、光学系、受光器の3要素で構成される。受光器は多接合セル(3接合セルを仮定し、以下3Jセルと記載)である。3Jセルの直下にSiセルを配置し、多接合セルの直上には2次集光系SOEを配置した。SOEにより許容入射角が広がり、セル面照度が均一化される利点がある。PVセルには、セル面における照度分布が不均一となるとFF値が減少する特性がある。この照度均一性は、PAR(Peak-to-average ratio)により評価した。

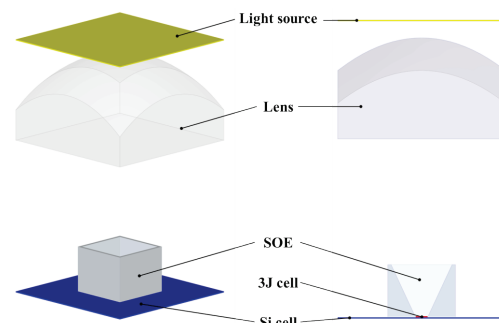


図6 集光系の光学解析モデル

(3) 高性能化、低コスト化への方策

高倍率集光系では、高精度の2軸追尾架台が必要となり、コスト面の課題がある。そこで、本概念を追尾不要な低倍率集光系に適用することも検討した。この場合、集光用セルには通常の化合物多接合型セルよりも安価なものが必要となる。その候補として、スマートスタックと呼ばれる一種の機械的接合により製造した次世代III-V/Siセルの適用を考えた。この接合手法は従来手法に比べて安価であり、また、ボトムセルにSiセルを使用することで、低コスト化が期待されている。スマートスタックセルの電気特性をモデル化し、光線追跡法を組み合わせ、最適な集光系の設計を試みた。

4. 研究成果

(1) 散乱光の天空放射輝度分布特性把握

観測の結果、明らかとなった年間散乱光分布を図7に示す。グラフ横軸は 10° 毎に分類した入射角 θ の代表値である。縦軸は積算散乱日射量を時刻別に分け、さらにそのうちの年間最大値で正規化し、分布図にしたものである。 $20^\circ \leq \theta \leq 40^\circ$ 付近に強い分布が現れていることが分かる。年間平均 γ_{ave} は約 0.6 であった。

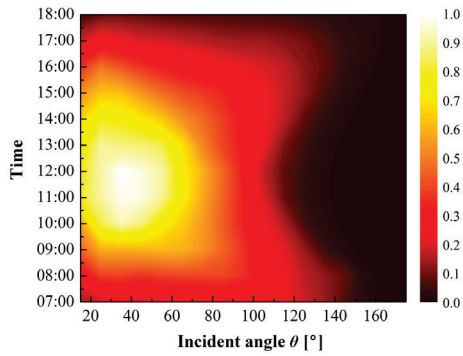


図7 年間散乱光分布の観測結果(冬期を除く)

(2) 集光系およびモジュール構造の評価

光源には AM1.5 スペクトルの直達光を模擬した条件を与え、この光線をレンズに入射させ、最適レンズ形状を探索した。具体的には、レンズおよび SOE 形状を決定する変数を変化させ、反復計算により光学的効率 η_{opt} が最大となる形状を求めた。得られたレンズおよび SOE 形状において入射角 θ を与えた光線を入射させ、光線の到達位置を求めた。図8は横軸が光線の入射角 θ 、縦軸が各セルに対する η_{opt} である。3Jセルに対する η_{opt} は、 $\theta \approx 0^\circ$ (垂直入射) に最大となり、80.8%となった。約 19%のロスの内訳は、レンズ表裏での反射ロスが約 8%、レンズ内部での吸収が約 11%である。2.5°から低下し、5.0°以上ではほぼ0となった。一方、Siセルに対する η_{opt} は、2.5°から増加し、20°で最大となった。2.5° $\leq \theta \leq 15^\circ$ での低下は SOE での反射ロスが原因である。観測で得られた年間散乱光分布特性では、日平均散乱比 γ_{ave} が 0.3, 0.6, 0.9 の場合において、各々、 $40^\circ, 50^\circ, 60^\circ$ までの入射角範囲に約 8 割の散乱日射があることが分かっている。図9は、これらの入射角範囲の光線をアレイモデルの中央レンズに入射させた場合の光線到達範囲を示している。いずれの入射角を与えた場合も、光線の到達範囲は隣接する Si セルに及んでいることから、散乱光を十分に捕集するためにはレンズと同面積の Si セルが必要である

ことが分かった。この結果より散乱光捕集を最大化するために、Si セルを両面受光型にする着想を得た。

図10に試作モジュールの外観を示す。4×4のアレイ構造の PMMA レンズは射出成型により製作した。レンズは枠で支持し、実太陽光下で集光しながら位置合わせを行った。基板には高透過白板ガラスを採用し、表面に必要な最小限の面積で銅配線をパターンニングした。配線パターン上に 3J セルを実装した。これを図11のように2軸追尾架台に搭載し、 I_{sc} , V_{oc} , P_{max} 等を 2ch の I-V トレーサにより測定した。また、直達日射計、全天日射計により DNI, GNI を取得した。

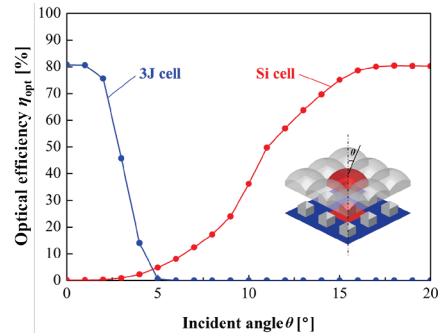


図8 各セルに対する光学的効率の入射角依存

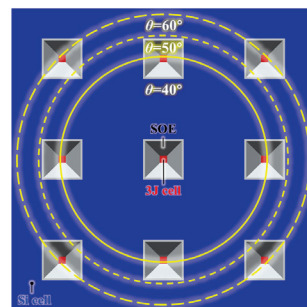


図9 $\theta=40^\circ, 50^\circ, 60^\circ$ の光線の到達範囲

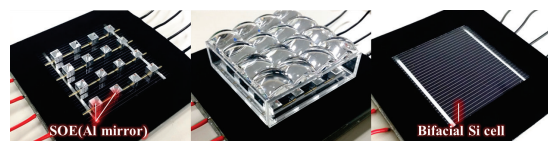


図10 試作モジュール

(3Jセル+両面Siセルの4端子モジュール)



図11 屋外試験の様子

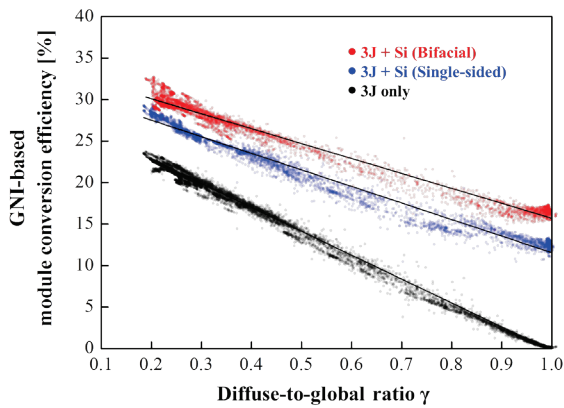


図12 屋外実験結果

GNI 基準モジュール変換効率 vs 散乱比

図 12 には散乱比 $\gamma = (\text{GNI} - \text{DNI}) / \text{GNI}$ によって整理した GNI 基準のモジュール変換効率を示す。図中には 3J セルのみ(すなわち従来 CPV), 3J セル+片面受光 Si セル, 3J セル+両面受光 Si セルの 3 パターンのプロットを示した。片面もしくは両面受光 Si セルを配置した場合には 3J セルの発電量に Si セルの発電量が上乗せされ、いかなる散乱比でも従来 CPV の効率を上回った。注目すべきは $\gamma = 1.0$ において、従来 CPV では発電量がゼロであるのに対し、散乱光発電型 CPV では、最低でも一般的な平板 Si 系 PV モジュール ($\eta \approx 17\%$) と同等以上の効率が得られている点である。また、各形態の最高変換効率を比較すると、両面受光型では 32.7%、片面受光型では 29.4% と非常に高い効率が得られたが、3J セルのみでは、23.7% に留まった。なお、現存の太陽光発電技術で GNI 基準の変換効率が 30% に及ぶのは、多接合セルを大面積で使用する宇宙太陽光発電用モジュールのみである。増加割合(Improvement factor)は 3J セルおよび Si セルの最大電力をそれぞれ $P_{\max,3J}$, $P_{\max,Si}$ として、 $(P_{\max,3J} + P_{\max,Si}) / P_{\max,3J}$ で算出した。発電量の絶対値は散乱比の増加に伴い減少していくが、増加割合で見ると徐々に増加していく傾向にあり、これは両面受光の場合により顕著に現れている。 $0.2 \leq \gamma < 0.3$ (サンベルト地域に相当)では 1.39 倍、 $0.4 \leq \gamma < 0.5$ の範囲(日本などの非サンベルト地域に相当)では 1.63 倍となり、本コンセプトには将来性が見込める結果が得られた。

(3)次世代セルを用いた低倍率集光系の検討

本概念を低倍集光スマートスタック多接合太陽電池セルに適用した場合について、解析および試作評価を通じて検討した結果、モジュール変換効率 30% を、より低コストに実現し得る可能性

が得られた。誌面の都合により詳細については発表論文等リストの雑誌論文[2], 学会発表[2, 4, 8-13]を参照されたい。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 2 件)

- [1] N. Yamada, D. Hirai, Maximization of conversion efficiency based on global normal irradiance using hybrid concentrator photovoltaic architecture, Progress in Photovoltaics, Research and Application, Vol.24, Issue 6 (2016), pp.846-854, DOI: 10.1002/pip.2765.
- [2] M. Baba, K. Makita, H. Mizuno, H. Takato, T. Sugaya and N. Yamada, Feasibility study of two-terminal tandem solar cells integrated with smart stack, areal current matching, and low concentration, Progress in Photovoltaics, Research and Application, Vol.25, Issue 3 (2017), pp.255-263. DOI: 10.1002/pip.2856.

[学会発表](計 23 件)

- [1] D. Sato, N. Yamada, K.-H. Lee, K. Araki, and M. Yamaguchi, Design and evaluation of partial concentration III-V/Si module with enhanced diffuse sunlight transmission, 44th IEEE Photovoltaic Specialist Conference (IEEE PVSC2017), Washington DC, 2017 年 6 月 25-30 日.
- [2] M. Baba, K. Makita, H. Mizuno, H. Takato, T. Sugaya, N. Yamada, Optical design for 2-terminal III-V/Si SMAC module, 同上.
- [3] 地木郁真, 桶真一郎, 山田昇, CPV+モジュールにおける散乱日射用ストリングのセル数増加の効果, 平成 29 年電気学会 電力・エネルギー部門大会, 東京都 明治大学 中野キャンパス, 2017 年 9 月 5-7 日.
- [4] 馬場将亮, 牧田紀久夫, 水野英範, 高遠秀尚, 菅谷武芳, 山田昇, スマートスタック/面積電流整合/低倍率集光を組み合わせた多接合太陽電池(SMAC モジュール)の光学設計, AIST 太陽光発電研究成果報告会 2017, つくば国際会議場, 2017 年 6 月 13-14 日.
- [5] 地木郁真, 桶真一郎, 山田昇, CPV+モジュールの発電電力における散乱日射の寄与, 平成 29 年電気学会全国大会, 富山大学 五福キャンパス, 平成 29 年 3 月 15-17 日.
- [6] 地木郁真, 桶真一郎, 山田昇, 散乱日射活用型 CPV モジュールの発電特性の長期フィールド試験による検討, 平成 28 年度 日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー学会合同研究発表会, 松山市総合コミュニティセンター, 2016 年 11 月 24-25 日.
- [7] 谷野恭平, 佐藤大輔, 山田昇, CPV 用マイクロレンズの温度変化が集光性能に及ぼす影響の評価, 同上. **奨励賞**
- [8] K. Makita, H. Mizuno, R. Oshima, T. Tayagaki,

- J. Nishinaga, H. Shibata, M. Baba, N. Yamada, H. Takato, T. Sugaya, Low Concentration InGaP/GaAs/Si 3-Junction Solar Cells with Smart Stack Technology, 26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference and Exhibition (PVSEC-26), Marina Bay Sands Expo and Convention Centre, Singapore, 2016年10月24-28日.
- [9] M. Baba, K. Makita, T. Sugaya, N. Yamada, Characterization of Mechanically Stacked Multi-junction Solar Cell under Low Solar Concentration, 11th Asian Thermophysical Properties Conference (ATPC2016), Pacifico Yokohama Annex Hall, 2016年10月2日-6日. **Best Poster Award**
- [10] K. Makita, H. Mizuno, R. Oshima, T. Tayagaki, J. Nishinaga, H. Shibata, M. Baba, N. Yamada, H. Takato, T. Sugaya, Low Concentration GaAs/CuInGaSe and GaAs/Si Multi-Junction Solar Cells with Smart Stack Technology, in 32st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, International Congress Centre, Munich, Germany, 2016年6月20-24日.
- [11] 馬場将亮, 牧田紀久夫, 水野英範, 高遠秀尚, 菅谷武芳, 山田昇, スマートスタック/面積電流整合/低倍率集光を組み合わせた多接合太陽電池(SMAC モジュール)に関する研究, AIST 太陽光発電研究 成果報告会, つくば国際会議場, 2016年6月15-16日.
- [12] M. Baba, K. Makita, T. Sugaya, N. Yamada, "Concentrator Design for Dual-junction Solar Cells with Smart Stacking and Areal Current Matching Techniques", 25th International Photovoltaic Science and Engineering Conference and Exhibition, BEXCO・Busan・Korea, 2015年11月15-20日.
- [13] N. Yamada, K. Makita, M. Baba, D. Hirai, T. Sugaya, Fabrication of low concentration multijunction solar cells with smart stacking and areal current matching techniques, Proc. 31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EUPVSEC2015), CCH Congress Centre Hamburg, Germany (Sep. 14-18, 2015), 1514 - 1516. DOI: 10.4229/EUPVSEC20152015-4CV.3.48
- [14] 谷野恭平, 佐藤大輔, 山田昇, Silicone on glass レンズの熱変形が集光性能に及ぼす影響の評価, 学振175委員会第13回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム, アオーレ長岡, 2016年5月19-20日.
- [15] 山田昇, 佐藤大輔, 散乱日活用型 CPV モジュールの試作および評価, 同上.
- [16] 佐藤大輔, 山田昇, ハイブリッド CPV 構造による全天日射基準モジュール変換効率の向上, 同上.
- [17] 馬場将亮, 牧田紀久夫, 菅谷武芳, 山田昇, スマートスタック/面積電流整合/低倍率集光を組み合わせた多接合太陽電池(SMAC モジュール)の設計試作, 同上.
- [18] 馬場将亮, 牧田紀久夫, 菅谷武芳, 山田昇, ス

マートスタック多接合太陽電池の集光条件下における発電特性評価, JSME 熱工学コンファレンス2015, 大阪市立大, (2015.10.24-25), C112.

- [19] 小出拓希, 桶真一郎, 山田昇, 平井大貴, 岡本和也:「散乱日射活用型 CPV モジュールの発電特性の短期フィールド試験による評価」, 平成27年電気学会電力・エネルギー部門大会講演論文集, P54 (2015). **YPC 優秀発表賞**
- [20] 小出拓希, 桶真一郎, 平井大貴, 岡本和也, 山田昇:「散乱日射活用型 CPV モジュールのフィールド試験に向けた設計と試作」, 平成27年電気学会全国大会講演論文集, 7-051 (2015). **優秀論文発表賞**
- [21] 平井大貴, 岡本和也, 山田昇, 集光系設計のための散乱日射の天空放射輝度分布特性把握, 太陽/風力エネルギー講演論文集 (2014.11.13-14), pp.195-198.
- [22] D. Hirai, K. Okamoto, N. Yamada, The Effect of Circumsolar and Diffuse Solar Radiation on Cell-in-Cell-Structured CPV Module, Technical digest of The 6th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-6), Kyoto, Japan (November 23-27, 2014).
- [23] K. Okamoto, D. Hirai, N. Yamada, Design and test of cell-in-cell-structured CPV modules for better solar energy conversion, WCPEC-6. **Best Poster Award**

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 集光型太陽電池モジュール及び集光型太陽光発電システム

発明者: 山田昇

権利者: 長岡技術科学大学

種類: 特許

番号: 特願 2014-187152

出願年月日: 2014年9月15日

国内外の別: 国内

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

<http://mcweb.nagaokaut.ac.jp/~n.yamada/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山田昇 (Noboru Yamada)

長岡技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号: 90321976

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者

桶真一郎 (Shinichiro Oke)

津山工業高等専門学校・電子制御工学科・准教授

研究者番号: 20362329