

令和 6 年 6 月 18 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04972

研究課題名（和文）新型タンデム構造太陽電池のエネルギー性能評価モデルの開発

研究課題名（英文）Energy yield modeling of novel tandem solar cells

研究代表者

太野垣 健（Tayagaki, Takeshi）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・エネルギー・環境領域・上級主任研究員

研究者番号：80422327

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：タンデム構造太陽電池は、標準試験条件においては高い発電性能を示すが、屋外での発電電力量（エネルギー性能）が明らかでなかった。本研究では、実験室における標準試験条件でのパワー性能と屋外における発電電力量を接続するための学術的な基盤を構築し、開発中の新型タンデム構造太陽電池に対してもエネルギー性能を予測できるような理論的モデルの開発を進めた。本研究では、理論・計算機シミュレーション・実験によるアプローチを融合し、新型タンデム構造太陽電池における発電電力量を定量的に算出する手法の開発を進めた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的独自性は、現在開発中の新構造太陽電池について、発電電力量を予測する技術の基盤を構築する点である。新型太陽電池について、モデルを用いた計算機シミュレーションにより発電電力量を予測する方法が得られると、新しい利用用途や従来にない設置環境における発電性能を予見するという現実の問題の解決に資する新しい手法になるとともに、そのような新型技術開発への投資判断にも活用されると期待される。

研究成果の概要（英文）：Tandem solar cells show high power generation performance under standard test conditions, but the amount of power generated outdoors (energy performance) was not clearly evaluated. In this research, we investigated fundamentals to connect the power performance under standard test conditions in the laboratory with the amount of electricity generated outdoors and explored the analytical model to predict the energy performance of the emergent tandem solar cells currently under development. We investigated theory, computer simulation, and experimental approaches to develop a method to quantitatively calculate the amount of power generated by a new type of tandem solar cell.

研究分野：太陽光発電

キーワード：太陽光発電

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

既存の太陽光発電システムでは、太陽光パネルが設置された屋外環境において得られる電力を時間的に積算した総発電電力量[ワットアワー(W_h)またはジュール(J)]により値づけられるエネルギー性能によって発電システムの特徴が示される。一方、新構造の太陽電池セルなどの太陽電池モジュールになどの新しい太陽光発電デバイスの開発においては、その性能を標準試験条件(1太陽日照度、25℃)において発電される電力[ワット(W)]により値付けられるパワー性能によって、より高い性能を示すデバイスの開発や材料の探索が進められている。パワー性能の評価は、実験室において、標準的なスペクトル形状の光を太陽電池デバイスに垂直入射した際に得られる発電電力を計測する性能評価手法であり、屋内で簡便に性能評価が行えるという利点がある。一方で、屋外環境において得られるような発電電力量の特性を直接的には反映しないような場もある。なぜなら、太陽が天球上を動く際に、太陽電池デバイスへ入射する光のスペクトルや入射する角度、照射光量が、時々刻々と変化し、太陽電池の設置された環境の温度も外気温や入射する太陽光の強度、風の有無などにより変化するためである。

既に広く実用化されている結晶シリコン太陽電池モジュールに対しては、太陽光発電システムにおいてエネルギー性能を評価する手法や将来の発電量を予想する技術が広く研究されてきた。国際電気標準会議(IEC)では、2018年に結晶シリコン太陽電池など典型的な太陽電池モジュールに関するエネルギー性能を評価する手法として、太陽電池モジュールの屋内での性能試験の試験結果と屋外における気象条件に関する日照や気温、風量などのデータセットをもとにして、1年間に発電する電力量を計算するモデル手法を示している。様々な設置環境(砂漠や熱帯雨林など)におけるエネルギー性能について、実測データとの比較によって、予測モデルの妥当性の検証が進められている。

一方、新型の太陽電池の一つであるタンデム構造太陽電池においては、照射太陽光スペクトル変化に対して発電性能を調べた例などについては報告があるが、屋外環境において発電電力量の予想と実測値を比較した例はほとんどなかった。特に、タンデム構造太陽電池においては、入射する光のスペクトル形状によってその発電量が大きく変化する性質がある。これはタンデム構造太陽電池が、異なる材料からなる太陽電池の組み合わせにより構成されており、入射する光のスペクトル形状によって各太陽電池における発電量が異なるようになるためである。特に、2端子型と呼ばれるタンデム太陽電池においては各太陽電池の発電性能のバランスに依存してタンデム太陽電池全体の発電性能が左右されるという特徴がある。雲の有無や周辺環境、日照条件や気象条件によって、照射される光スペクトルが大きく変化するような設置環境(屋外)においては、タンデム構造太陽電池の発電電力量を推計することは容易でなくなる。また、屋外において発電電力量を実測することによりエネルギー性能を推計するというアプローチも考えられるが、様々な日照条件・気象条件における発電電力量を実験により網羅的に調べ上げることは困難である。そのため、新型タンデム構造太陽電池において、屋外での発電電力を時間的に積算した発電電力量を推計するエネルギー性能評価モデルの開拓は重要な課題となっていた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、新型タンデム構造太陽電池など、既存の結晶シリコン太陽電池パネルとは異なった新構造太陽電池について、発電電力量を予測する方法を開拓することである。これによって、開発中の太陽電池デバイスを作製都度に屋外で発電量を実際に測定することなしに、様々な屋外環境に設置した際に得られる発電電力量を推計することが出来るようになることを期待された。さらに、推計手法を用いることによって、実際の屋外での設置環境において高い発電電力量を示すようなデバイス構造を設計する指針や太陽光発電モジュールを設置する指針を得ることに有用であると期待された。特に、それまで取り組んできた新構造の太陽電池に即して、そのエネルギー性能を明らかにすることを本研究の目的とした。これまでの研究において、新たにデバイスを作製し、その基礎的な性能について研究を進めてきた3端子型タンデム構造デバイスに関して、既存の知見の蓄積をもとにして、屋外環境における発電電力量を予測できるような太陽光発電システム性能の予測方法の開拓を目指した。簡便に、モデルを用いた計算機シミュレーションを行えるようになり、発電電力量を予測することが出来るような手法を用いることによって、新しい利用用途や従来にない設置環境における発電性能を予測する際の基盤技術になることを目指した。

3. 研究の方法

本研究では、標準試験条件での性能と屋外における発電電力量を接続する理論的なモデル構築を進め、新型タンデム構造太陽電池における性能評価手法の開発を進めた。具体的には、タンデム構造太陽電池における発電電力量の理論的検討、3端子型タンデム構造太陽電池におけるエネルギー性能モデルの検討、屋外発電電力量の実験的検討、の各課題について研究を進めた。

タンデム構造太陽電池における発電電力量についての理論的検討については、タンデム構造太陽電池において、入射する太陽光のスペクトルや入射角度に対する発電電力を理論的に推計

するモデルを構築し、標準試験条件とは異なる条件におけるパワー性能を算出する。ガリウムインジウムリン/ガリウムヒ素タンDEM構造などの化合物タンDEM構造太陽電池とガリウムヒ素/シリコンタンDEM構造、鉛ペロブスカイト/シリコンタンDEM構造などのシリコンベースのタンDEM構造太陽電池など、既存のデバイスを対象として発電電力の推計を実施した。さらに、設置環境・気候条件により時々刻々と変化する入射太陽光スペクトルや入射角度について、既存のデータベースを利用することにより、時間的に積算された発電電力量を計算機シミュレーションによる推計を行った。

3端子型タンDEM構造太陽電池のエネルギー性能モデルについての検討については、3端子型タンDEM構造太陽電池について、入射する太陽光のスペクトル変化に対する発電電力を理論的に算出し、2端子型タンDEM構造に対する優位性を明らかにした。また、既存の照射光スペクトルを自在に制御することができる太陽電池性能評価装置を使用し、入射光スペクトルの時間的な変化に対する発電電力を実験的にも算出した。得られた実測データと理論的推計の比較により、推計の高度化を進めた。これにより、3端子型タンDEM構造における発電電力の特性を明らかにした。

屋外発電電力業についての実験的検討においては、既存の3端子型タンDEM構造太陽電池のデバイス評価装置を屋外において利用し、屋外における発電電力の計測を進めた。また、分光放射計システムで得られた太陽光スペクトルから発電電力を推計し、前項の理論的な推計との比較を行い、理論的モデルの検証を行い、太陽光スペクトルの計測に合わせた太陽電池デバイスの発電量計測を長期的に実施することにより、様々な日照条件における3端子型タンDEM構造太陽電池の発電特性を理論的・計算シミュレーション・実験の比較により明らかにする。モデルの改良を進め、様々な発電用途や設置環境における発電量推計を高精度に行えるような知見を蓄積した。

4. 研究成果

(1) タンDEM構造太陽電池における発電電力量についての理論的検討を行った。入射する太陽光のスペクトルや入射角度に対する発電電力を理論的に推計するモデルを構築し、標準試験条件とは異なる条件におけるパワー性能を算出した。様々なシリコンベースタンDEM構造太陽電池について発電電力の推計を実施した。設置環境・気候条件により時々刻々と変化する入射太陽光スペクトルや入射角度に関するデータベースを利用し、発電電力量を計算機シミュレーションにより推計した。また、3端子型タンDEM構造太陽電池のエネルギー性能についての検討も行い、2端子型タンDEM構造との発電性能の差異が顕在化する地域・日照条件を明らかにした。

2端子タンDEM太陽電池は太陽スペクトルの変化に敏感であることが知られているため、年間エネルギー収量を検討する際には、日中および年間を通じたスペクトル変動を考慮した。本研究では、IEC 61853-4に記載されている1. 熱帯湿潤地域、2. 亜熱帯乾燥地域、3. 亜熱帯沿岸地域、4. 温帯沿岸地域、5. 高地地域、および6. 温帯大陸地域における、放射照度の平均光子エネルギーの分布から、6つの地域における平均フォトンエネルギーのアンサンブル平均を算出した。6つの地域の標準参照気候プロファイルを使用して、シリコンベースのタンDEM太陽電池の年間エネルギー収量に対するスペクトル変動の影響を分析した。シリコン太陽電池、ガリウムインジウムリン/ガリウムヒ素/シリコン、ガリウムインジウムリン/ガリウムヒ素、薄いペロブスカイト/シリコン、厚いペロブスカイト/シリコンからなるタンDEM太陽電池の外部量子効率曲線を計算に用いた。また、年間放射照度で正規化したエネルギー収量、および平均フォトンエネルギーの関数として示したエネルギー収量の変動をシミュレーションにより求めた。分析によると、ガリウムインジウムリン/ガリウムヒ素/シリコンタンDEM太陽電池は、場所に応じて、標準テスト条件と比較してエネルギー収量が4%~6%減少した。この値はわずかな減少であり、1%~5%の減少を示した単接合シリコン太陽電池の場合と同程度であった。さらに、薄いペロブスカイト/SiタンDEM太陽電池は、標準テスト条件と比較して年間エネルギー収量が高くなった。これらの結果からは、標準スペクトルデータセットが屋外条件下でのタンDEM型太陽電池と単接合型太陽電池のエネルギー収量を比較する際に有用であることが示された。

(2) 屋外実用条件における発電量の計測について実験的検討を進めた。タンDEM太陽電池デバイスの最大電力点を追跡し、発電量を連続計測するために、制御装置および計測装置の整備を進めた。また、屋外実用条件における発電電力量に重要であるデバイス温度の計測について実験的検討を実施した。さらに、タンDEM太陽電池を構成する単接合サブセル太陽電池について、屋外での発電量の計測試験を実施した。屋外における最大出力制御においては、一般的に用いられている計測装置では太陽電池素子の特性によっては最大出力を正しく制御できなくなる可能性のあることがわかり、これらの問題点を解決する必要があることが分かった。計測制御ソフトなどを含む計測装置の改善を実施し、個々の太陽電池デバイスの特性に応じた出力制御方法の検討を実施した。しかし、サンプル特性が広範にわたるようなタンDEM太陽電池の場合には、太陽電池性能の詳細を考慮した計測制御手法が必要であり、今後、より包括的に利用可能な計測アルゴリズムについての検討を進める予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Tayagaki Takeshi, Yoshita Masahiro	4. 巻 12
2. 論文標題 Simulation of Diffuse Irradiance Impact on Energy Yield of Curved Photovoltaic Modules Using Climatic Datasets	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Journal of Photovoltaics	6. 最初と最後の頁 526 ~ 532
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/JPHOTOV.2022.3143496	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 太野垣 健、吉田 正裕
2. 発表標題 参照気候データセットを用いたエネルギー収量シミュレーション： タンデム太陽電池と曲面太陽電池について
3. 学会等名 第18回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takeshi Tayagaki, Masahiro Yoshita
2. 発表標題 Energy yield simulation of silicon-based tandem solar cells: impact of spectral variations calculated using reference climatic datasets
3. 学会等名 The 31st International PV Science and Engineering Conference (PVSEC-31) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------