

論文内容の要旨

氏名 佐藤 大輔

近年報告された太陽光発電 (Photovoltaics: PV) 市場の推移予測では 2030 年までに PV 市場を 5–10 TW まで拡大するロードマップが示されている。現在最も普及しているシリコン(Si)太陽電池セルの最高変換効率は 26.7%であり、理論変換効率 (29.4%) にほぼ到達している。一方、III-V 化合物半導体を用いた多接合セルは現在も変換効率が向上し続けている。しかし、多接合セルは超高効率な反面高コストであるため、平板 PV モジュールとして大面積に設置することは困難である。そこで、ミラーやレンズなどの安価な集光器を用いて太陽光を小面積の多接合セルに集光することで高効率化・低コスト化を目指した集光型太陽光発電 (Concentrator Photovoltaics: CPV) が研究されている。

CPV は高効率発電を行うポテンシャルがあるにも関わらず、年間日射量が高いサンベルト地域のみでの普及に留まっている。これは集光倍率が高くなるほど集光器の許容角が狭くなり、空全体から幅広い角度で入射する散乱光を太陽電池セルに集光できないことが原因である。このため年間日射量に占める散乱光成分の割合が大きい非サンベルト地域での優位性は低い。世界の主要都市の多くは非サンベルト地域に分布しているため、散乱光からも発電可能な CPV モジュールがあれば設置面積当たりの発電量を向上でき、都市部など設置面積が限定される場所での導入が期待できる。また、運輸部門ではエネルギー需要の大部分を化石燃料に頼っているのが現状である。近年は Well to Wheel の概念が重要視され、電気自動車の駆動電力を再生可能エネルギー由来とする取り組みがなされている。PV モジュールを搭載したプラグインハイブリッド自動車 (PHV) が開発されたが、現在の発電量 (定格電力 180 W) ではルーフのみへの設置で自動車の主動力とするには不十分であるとされている。もしすべての乗用車を PV モジュール (定格電力 800 W) を搭載した PHV に置き換えた場合、全乗用車の走行エネルギーの 63%を太陽光で賄えると見込まれている。さらに、天候、昼夜、季節の影響を受けず、日射の減衰もない宇宙空間に巨大な PV パネルを展開して太陽光発電を行い、発電した電力を地上に無線伝送する宇宙太陽発電システム (Space Solar Power System: SSPS) が提案されている。宇宙空間では常に太陽光を得ることができるため、SSPS は PV システムの設備利用率を高めることができ CO₂ フリーの大規模基幹電源としての役割が期待されているが、実現に向けた様々な技術課題が残されている。

以上の背景から、上記の PV 市場拡大ロードマップを実現するためには、平板 PV モジュールを広大な土地に大規模展開するメガソーラーや住宅屋根への設置といった従来の利用形態に加えて、利用形態のさらなる多様化が求められている。すなわち、導入の恩恵が大きいにも関わらずこれまで詳細に研究されていなかった上記のような用途に適する次世代 PV モジュールの開発が喫緊の課題となっている。

本研究では、次世代 PV モジュールとして(1)省スペース向け、(2)車載向け、(3)宇宙空間向けの 3 種類の利用形態に着目し、その実現可能性および技術ポテンシャルを検討した。省スペース向けおよび車載向けについては、モジュール面積当たりの発電量を最大化する

ことを目的とし、超高効率セルと低コストセルを組み合わせた“部分集光”コンセプトを提案、モジュールの光学 - 熱設計解析、試作モジュールを用いた屋内外性能評価を行った。宇宙空間向けについては、太陽光発電、マイクロ波変換・送電の機能を一枚のパネルに集約した発電送電一体パネルの熱設計に着目し、具体構造の設計、軌道周回中の熱特性を明らかにするとともにパネルの光学特性の最適化による熱制御手法の設計と検証を行った。

本論文は「光学 - 熱解析に基づく次世代太陽電池モジュールの設計」と題し、以下の 6 章により構成される。

第 1 章では、本研究の背景として、従来 PV モジュールの利用形態および課題、次世代 PV モジュールの必要性に関して述べている。

第 2 章では、PV モジュールの性能を議論する上で必要な日射の定義および性能評価指標に関してまとめている。

第 3 章では、省スペース向け高倍率部分集光モジュールの設計について説明している。光学 - 熱特性を考慮してモジュール構造を設計し、試作モジュールを用いた屋内外試験により性能を評価した。実験結果から、従来平板 PV モジュールよりもサンベルト地域で 1.7 倍、非サンベルト地域で 1.5 倍高い年間発電量が得られることが示され、モジュール面積当たりの発電量向上が確認された。また、いかなる日射条件においても従来 CPV より追尾誤差耐性に優れていることが示された。

第 4 章では、車載向け非追尾・低倍率部分集光モジュールの設計について説明している。車載面に入射する年間日射量の入射角分布を考慮して集光レンズの設計を行った。設計したレンズは年間日射量の 46.6%、36.4%をそれぞれ 3 接合セルおよび Si セルに集光できることが確認された。また、屋外試験の結果、年間モジュール変換効率 27.3%のポテンシャルとともに、自動車ルーフの曲面が日積算発電量に及ぼす影響は従来の曲面 PV モジュールと同程度であることが示された。

第 5 章では、宇宙太陽発電向け発電送電一体パネルの光学 - 熱設計について説明している。発電送電一体パネルの基本構造をモデリングし、軌道周回中の温度日変化および熱変形をシミュレーションした結果、送電アンテナ面の変形量は許容値に対して十分余裕があるものの、温度プロファイル改善の必要性が明らかとなった。発電送電一体パネル専用の熱制御手法として太陽電池面に波長選択コーティング (Spectrally Selective Coating: SSC) を付与する方法に着目し、多層膜 SSC の光学設計を行った。結果として SSC の付与により温度プロファイル全体を高温側へシフトしつつ温度振幅を低減できることが示された。

第 6 章では、本研究で得られた知見をまとめている。