

平成 30 年度 長岡技術科学大学

大学院工学研究科 博士論文

光学-熱解析に基づく
次世代太陽電池モジュールの設計

*Design of next generation photovoltaic module based on
opto-thermal analysis*

専攻 エネルギー・環境工学

学籍番号 12303887

氏名 佐藤 大輔

指導教員 山田 昇 教授

目次

第1章 緒言	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究目的	4
1.3 本論文の構成	4
第2章 日射の定義と CPV モジュールの性能評価指標	6
2.1 日射の定義	6
2.1.1 直達光と散乱光.....	6
2.1.2 太陽光スペクトル.....	6
2.2 CPV モジュールの発電性能評価指標	7
第3章 省スペース向け高倍率部分集光モジュールの設計	15
3.1 はじめに	15
3.2 高倍率部分集光コンセプト.....	17
3.3 モジュール設計および試作.....	19
3.3.1 モジュール仕様および試作.....	19
3.3.2 モジュールサイズが各種性能に及ぼす影響.....	23
3.4 試作モジュール性能評価.....	28
3.4.1 高透過 CPV モジュールの散乱光透過率	28
3.4.2 屋外発電性能.....	31
3.4.3 追尾誤差に対するロバスト性.....	37
3.5 まとめと今後の課題.....	41
第4章 車載向け非追尾・低倍率部分集光モジュールの設計	43
4.1 はじめに	43
4.2 非追尾・低倍率部分集光コンセプト	45
4.3 モジュール設計および試作.....	47
4.3.1 モジュール仕様および試作.....	47
4.3.2 レンズ最適化設計.....	50
4.4 モジュール性能評価および設計の妥当性検証.....	56
4.4.1 光学的効率の入射角依存性.....	56
4.4.2 1日間の屋外発電性能.....	57

4.5	車載面の曲率が発電性能に及ぼす影響.....	65
4.6	年間モジュール効率 30%の実現に向けた考察	70
4.7	まとめと今後の課題.....	74
第 5 章	宇宙太陽発電システム用発送電一体パネルの熱設計.....	76
5.1	はじめに	76
5.2	発送電一体パネルの具体設計.....	79
5.3	発送電一体パネルの熱抵抗測定とシミュレーションモデルの構築	82
5.4	軌道周回中の温度時間変化シミュレーション	87
5.5	熱変形シミュレーション.....	92
5.6	波長選択コーティングによる温度プロファイルの改善.....	95
5.7	まとめと今後の課題.....	103
第 6 章	結言.....	105
	参考文献.....	109
	謝辞.....	120

第1章 緒言

1.1 研究背景

近年，地球温暖化，埋蔵資源の枯渇，環境問題の対応策の1つとして太陽光発電（Photovoltaics: PV），太陽熱利用などの太陽エネルギー利用技術の普及促進が喫緊の課題となっており[1]，世界各国で研究開発と導入が進められている．2017年に報告された世界の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[2]．

各種太陽電池セルの変換効率は年々向上し続けている[3]．現在最も普及しているシリコン（Si）セルの最高変換効率は26.7%であり[4]，理論変換効率（29.4%[5]）にほぼ到達している．一方，III-V族化合物半導体を用いた多接合セルは現在も変換効率が大きく向上し続けている．多接合セルは感度波長域が異なる半導体材料を積層した構造になっており，発電に利用できる波長域が単接合Siセルに比べて広いため変換効率が高くなる[6]．現在は5接合セルで38.8%の最高変換効率が報告されている[7]．しかし，これらの太陽電池セルは高価であり，平板PVモジュールとして大面積に設置することが困難である．そこで，ミラーやレンズなどの安価な集光器を用いて超高効率かつ高コストな多接合セルに太陽光を集光することで，高い発電量を現実的なコストで実現する集光型太陽光発電（Concentrator Photovoltaics: CPV）の研究が行われている[8]．多接合セルは集光を行うことで単位面積当たりの放射照度が増加し開放電圧が上昇するため，変換効率が向上する．例えば1000倍集光時の理論変換効率は3接合セルで60%を超え，6接合セルでは70%に達する[9]．集光用多接合セルの現在の最高変換効率として46%（508倍集光時）が報告されており[10]，変換効率50%

超えに向けたロードマップも示されている[10]-[12].

これまでは幾何学的集光倍率 (= 集光器開口面積 / 太陽電池セル面積) が 300 倍から 1000 倍の高倍率 CPV (High-concentration CPV: HCPV) が CPV システム導入量のほとんどを占めていたが, HCPV は集光点をモジュール内の同じ位置に保つため高精度の 2 軸太陽追尾が必要になる[8]. そのため, HCPV は太陽電池セルの使用量を削減できる (セルコストを削減できる) 一方で, 太陽追尾装置に掛かるコストが高くなるデメリットがある. また, HCPV システムは, 年間日射成分に占める散乱光 (大気中の雲や微粒子で散乱された太陽光線) の割合が大きい非サンベルト地域での優位性は低く, 世界の一部の地域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. もし散乱日射を含む全天日射から発電可能な HCPV システムがあれば, 設置面積当たりの発電量を向上させることができ, サンベルト地域のみならず非サンベルト地域での普及が期待できる. 特に, これまで CPV の導入が見送られてきた都市部 (都市街路, ビルの壁・屋根, 駐車場) など設置面積が限定される (省スペース) アプリケーションで大きなメリットがあり, これは新たな CPV の市場になり得る.

また, 運輸部門はその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, 欧米を中心に自動車の排ガス規制が厳しさを増し, 電気自動車 (Electric Vehicle: EV) やプラグインハイブリッド自動車 (Plug-in Hybrid Vehicle: PHV) の導入が始まったが, これらの自動車も再生可能エネルギー由来のクリーンな電力で駆動できなければ, エネルギー・環境問題緩和への寄与は限定される. この問題に鑑みて, 近年, PV モジュールを搭載した PHV が市場に出回ったが, その定格電力は約 180 W であり[13], 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定格電力 800 W の PV モジュールを搭載した PHV に置き換えた場合、全乗用車の走行エネルギーの 70%を太陽光で賄えると試算されている[14]。

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[15]。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。2007 年度 (平成 19 年度) に財団法人 無人宇宙実験システム研究開発機構が報告している「太陽光発電利用促進技術調査」[16]によれば、現時点で建設コストは 2.1 兆円、発電コストは 15.9 円/kWh と試算されている。建設コストのうち大きな割合を占めているのは太陽電池と低軌道までの打ち上げコストである。発電コストを基幹電源並み (10 円/kWh 以下) にするために、太陽電池コストを 50 円/W から 30 円/W に、低軌道までの打ち上げコストを 0.173 億円/ton から 0.1 億円/ton まで削減する目標が設定され、実現に向けた取り組みがなされている。

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、Si セルを用いた平板 PV モジュールを広大な場所に大規模展開するメガソーラーや住宅屋根へ設置する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。

1.2 研究目的

本研究では、PV システムの利用形態の多様化を目指し、これまで詳細に研究されていなかった以下の3種類の次世代 PV モジュールに着目し、その実現可能性および技術ポテンシャルを検討した。

- (1) 省スペース向け
- (2) 車載向け
- (3) 宇宙空間向け

(1)および(2)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、超高効率太陽電池セルと低コスト太陽電池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、屋内外性能評価を一貫して行った。(3)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送電一体パネルの具体構造の設計を行ない、軌道周回中の熱特性を明らかにするとともに専用の熱制御手法の設計を行った。

1.3 本論文の構成

本論文の構成は以下の通りである。

第1章 「緒言」

本研究の背景と目的について述べる。

第2章 「日射の定義と CPV モジュールの性能評価指標」

日射の定義および集光器性能，発電諸特性など CPV モジュールの性能評価指標についてまとめる。

第3章 「省スペース向け高倍率部分集光モジュールの設計」

光学-熱特性を考慮したモジュール最適設計，モジュール試作，数値解析シミュレーションおよび屋内外性能評価（散乱光透過率，屋外発電諸特性，追尾誤差に対するロバスト性）について述べる。

第4章 「車載向け非追尾・低倍率部分集光モジュールの設計」

車載面に入射する年間日射量の入射角分布を考慮した集光器最適設計，モジュール試作，数値解析シミュレーションおよび屋内外性能評価（光学的効率の入射角特性，日間発電諸特性，自動車ルーフ曲面の発電量への影響）について述べる。

第5章 「宇宙太陽発電システム用発電一体パネルの熱設計」

テザー型太陽発電衛星 (SPS) 用発電一体パネルの基本構造をモデリングし，実験および数値解析シミュレーションにより軌道周回中のパネル各部の温度とアンテナ面の変形角度を推定し，当パネルの熱制御用に専用設計した波長選択コーティングの効果について述べる。

第6章 「結言」

本研究で得られた知見をまとめる。

第2章 日射の定義と CPV モジュールの性能評価指標

2.1 日射の定義

2.1.1 直達光と散乱光

図 2-1 に示すように、地上に降り注ぐ太陽光には 2 つの成分があり、直達光（もしくは直達日射）と散乱光（もしくは散乱日射）と呼ばれている。直達光は地上からの視野角が $\pm 0.265^\circ$ の太陽の光球から直接届く光線であり、ほぼ平行光線であるため、レンズやミラーなどの集光器で高密度に集光することができる。一方、散乱光は直達光の一部が大気中の微粒子やガスで散乱された結果として地上に到達する光線であり、空全体（全天方向）から地面に入射する。太陽追尾面における全天日射量（Global Normal Irradiance: GNI）と直達日射量（Direct Normal Irradiance: DNI）の差分が追尾面の散乱日射量であり、散乱日射量が GNI に占める割合を散乱比 γ と称し、次式で定義する。

$$\gamma = (\text{GNI} - \text{DNI}) / \text{GNI} \quad (2-1)$$

2.1.2 太陽光スペクトル

太陽から放射された光は宇宙空間をふく射によって伝達され、地球の大気層を通過して地表に到達する。大気圏外の太陽光成分は全て直達光であるが、大気を通過する際に波長ごとに大気の様々な成分の影響を受ける。最も影響が大きいのは雲であり、日射の遮断や太陽との位置関係によって散乱日射を増大させる。雲以外の影響因子としてエアロゾル（大気中に拡散浮遊する固体・液体の微粒子）による散乱、大気による吸収・反射作用がある。地表に到達した日射の一

部は反射され、同じような相互作用を繰り返し、残りの部分が地表で吸収される。大気層の影響により宇宙空間で約 1350 W/m^2 であった日射量が、地表では約 1000 W/m^2 に減衰する。

図 2-2 に日射の波長分布として、宇宙空間のエアマス 0 (AM0) および地上での標準的なエアマス 1.5G, エアマス 1.5D (AM1.5G, AM1.5D) の太陽光スペクトルを示す[17]。ここで、G は全天日射、D は直達日射を意味している。エアマスとは標準状態の地球の大気 (標準気圧 1013 hPa) に垂直入射 (入射角: 0°) した直達光が通過する路程を AM1.0 として、それに対する比として表される。したがって AM1.5 は垂直入射に比べて大気を通過する距離が 1.5 倍であることを意味し、太陽高度は約 42° に相当する。また、太陽電池の標準試験条件 (Standard Test Conditions: STC) は、(1) 光のスペクトル: AM1.5G, (2) 太陽電池温度: 25°C , (3) 日射量: 1000 W/m^2 と定められている (IEC 60904-3)。

2.2 CPV モジュールの発電性能評価指標

A. 集光倍率 (Concentration ratio)

(1) 幾何学的集光倍率 (Geometrical concentration ratio: C_g)

集光器の開口面積を A_{conc} , 太陽電池セルの受光面積を A_{cell} とすると (図 2-3), C_g は両者の比として次式で定義される。

$$C_g = A_{\text{conc}} / A_{\text{cell}} \quad (2-2)$$

(2) 実効集光倍率 (Flux concentration ratio: C_f)

集光器の開口面に入射する光のエネルギー密度を I_{conc} , 太陽電池セルに入射する光のエネルギー密度を I_{cell} とすると (図 2-3), C_f は集光前後のエネルギー密度

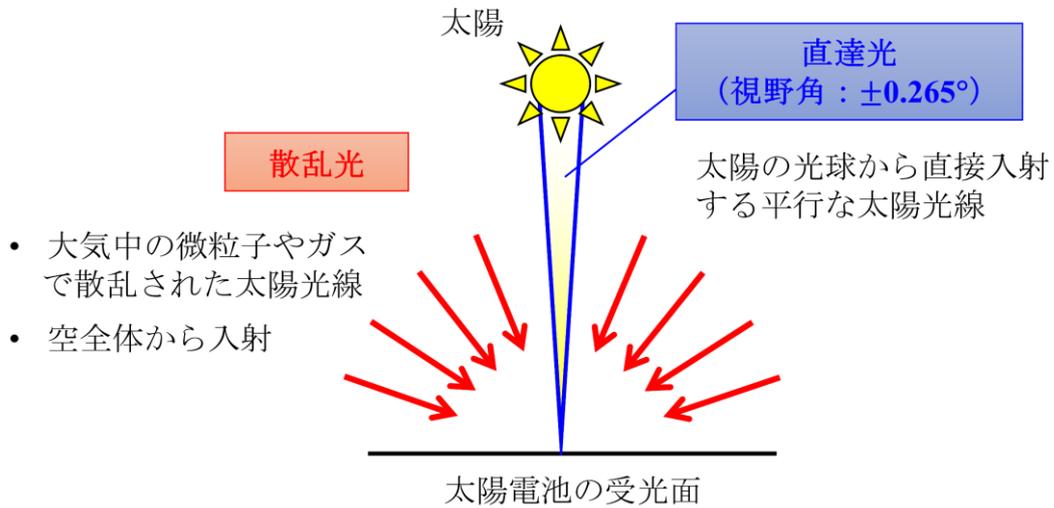


図 2-1 直達光と散乱光

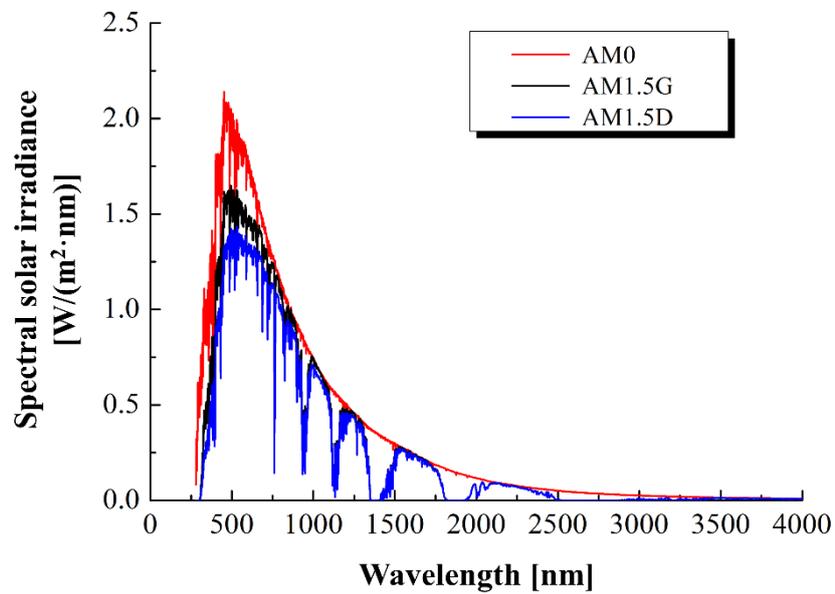


図 2-2 太陽光の分光放射照度

(ASTM G173-03 Reference Spectra Derived from SMARTS v.2.9.2)

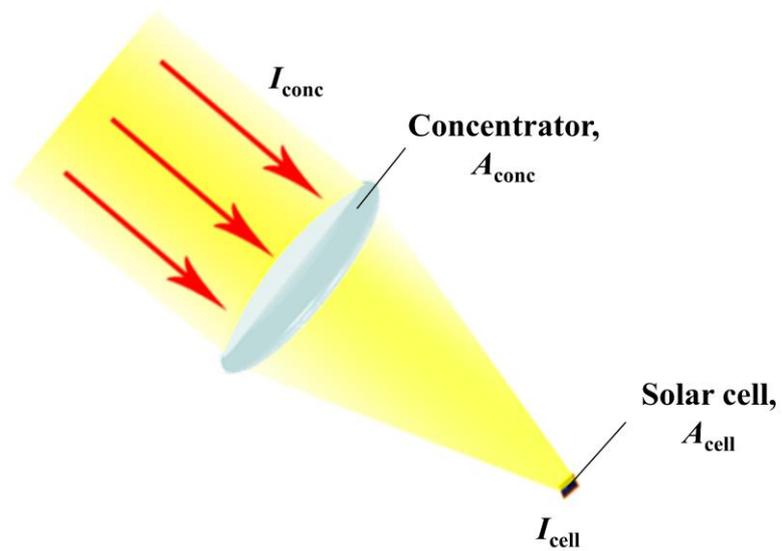


図 2-3 集光倍率を定義するパラメータ

の比として次式で計算される。

$$C_f = I_{\text{cell}} / I_{\text{conc}} \quad (2-3)$$

B. 光学的効率 (Optical efficiency: η_{opt})

集光器の開口面に入射した光量のうち太陽電池セルに到達する光量の割合を表しており、 C_f と C_g の比によって次式で計算される。

$$\eta_{\text{opt}} = C_f / C_g = (I_{\text{cell}} \times A_{\text{cell}}) / (I_{\text{conc}} \times A_{\text{conc}}) \quad (2-4)$$

理想的な集光器は $\eta_{\text{opt}} = 1$ であるが、異種材料界面でのフレネル反射ロス、集光器内部での吸収ロス、セル-集光器間の位置ずれ、集光器の形状誤差などにより、実用では1未満の値となる。

C. 許容入射半角 or 許容角 (Acceptance half angle: θ_a)

CPVの集光系では、図2-4に示すように集光系の光軸からある入射角 θ_a 以下の太陽光線のみが太陽電池セルに集光される。 θ_a を許容入射半角また単に許容角と呼び、 C_g と θ_a の間には次式の関係がある[18]。

$$C_g \leq \frac{n^2}{\sin^2 \theta_a} \quad (2-5)$$

ここで、 n は集光器の屈折率である。実用に際しては、 η_{opt} が垂直入射(入射角 0°)時の90%になる角度とみなすことが多い(図2-5)。

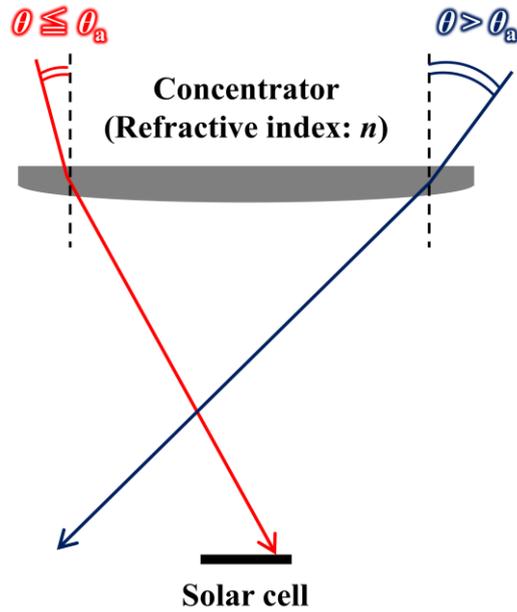


図 2-4 CPV 光学系の許容入射半角 θ_a

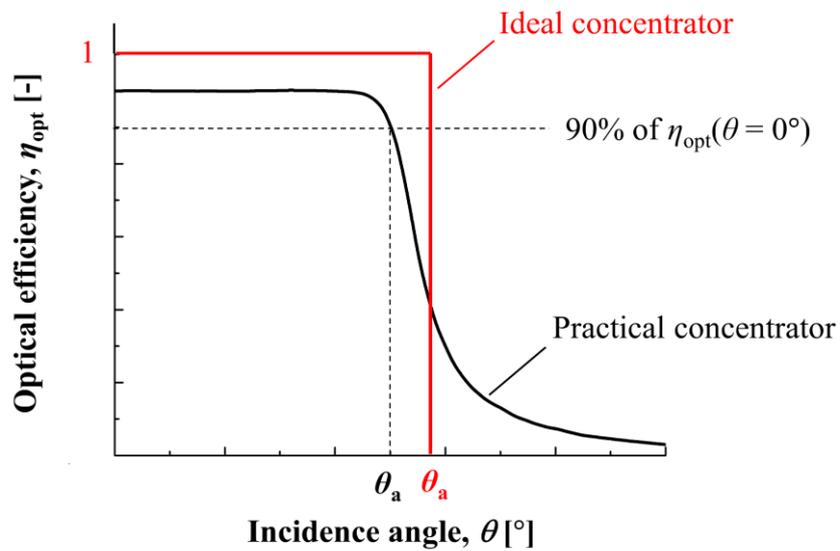


図 2-5 理想集光系と実際の集光系の入射角特性

D. 発電諸特性

太陽電池セル・モジュールの発電性能は図 2-6 に示す電流-電圧 (I-V) 曲線により評価する.

(1) 短絡電流 (Short circuit current: I_{sc})

太陽電池セル・モジュールから取り出せる最大電流であり, 太陽電池セルへの入射光量に比例して増減する. 非集光下での短絡電流を I_{sc1} , 集光下での短絡電流を I_{sc2} , 集光倍率を CR とすると次式の関係がある.

$$I_{sc2} = CR \times I_{sc1} \quad (2-6)$$

(2) 開放電圧 (Open circuit voltage: V_{oc})

太陽電池セル・モジュールから取り出せる最大電圧であり, 集光により増加する. その増加量は集光倍率の対数に比例する. また, 太陽電池セルの温度上昇により低下する. 非集光下での開放電圧を V_{oc1} , 集光下での開放電圧を V_{oc2} とすると次式の関係がある.

$$V_{oc2} = V_{oc1} + nkT/q \times \ln(CR) \quad (2-7)$$

ここで, n はダイオード因子, k はボルツマン定数, T は温度, q は電荷である.

(3) 曲線因子 (Fill factor: FF)

太陽電池セル・モジュールから取り出せる電力は直列抵抗 (電極・配線自体の抵抗や接触抵抗に起因) や並列抵抗 (太陽電池セル発電層の漏れ電流に起因),

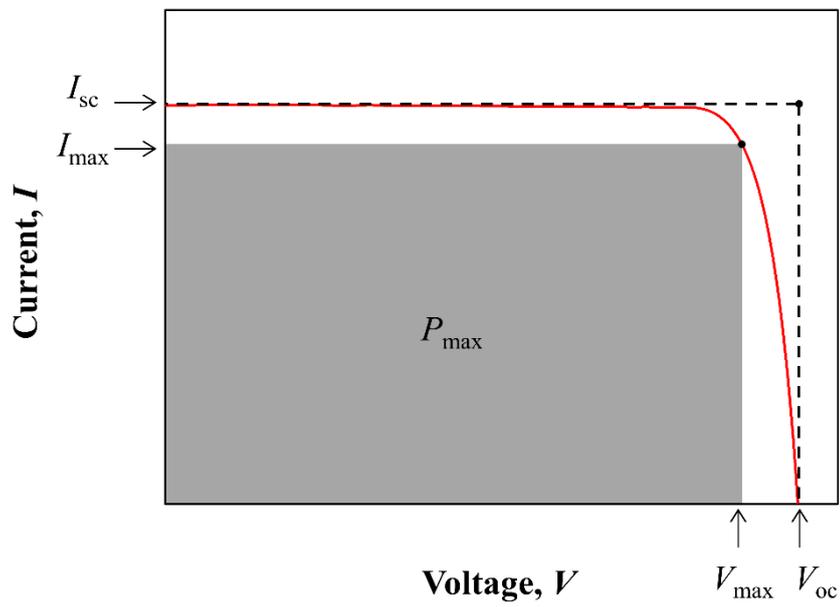


図 2-6 太陽電池セル・モジュールの電流-電圧 (I-V) 曲線

ダイオード損失の影響を受け、 I_{sc} と V_{oc} が作る矩形領域内に最大電力点 P_{max} を取る。最大電力点での電流、電圧をそれぞれ I_{max} , V_{max} とすると、FF は

$$FF = \frac{I_{max} \times V_{max}}{I_{sc} \times V_{oc}} = \frac{P_{max}}{I_{sc} \times V_{oc}} \quad (2-8)$$

で表される。 I_{sc} と V_{oc} が同じ太陽電池セル・モジュールの場合、FF が大きいほど発電量が大きくなる。

(4) 変換効率 (Conversion efficiency: η)

太陽電池セル・モジュールの開口面積を A 、その面に入射する日射量を E とすると、次式で定義される。

$$\eta = \frac{P_{max}}{A \times E} = \frac{I_{sc} \times V_{oc} \times FF}{A \times E} \quad (2-9)$$

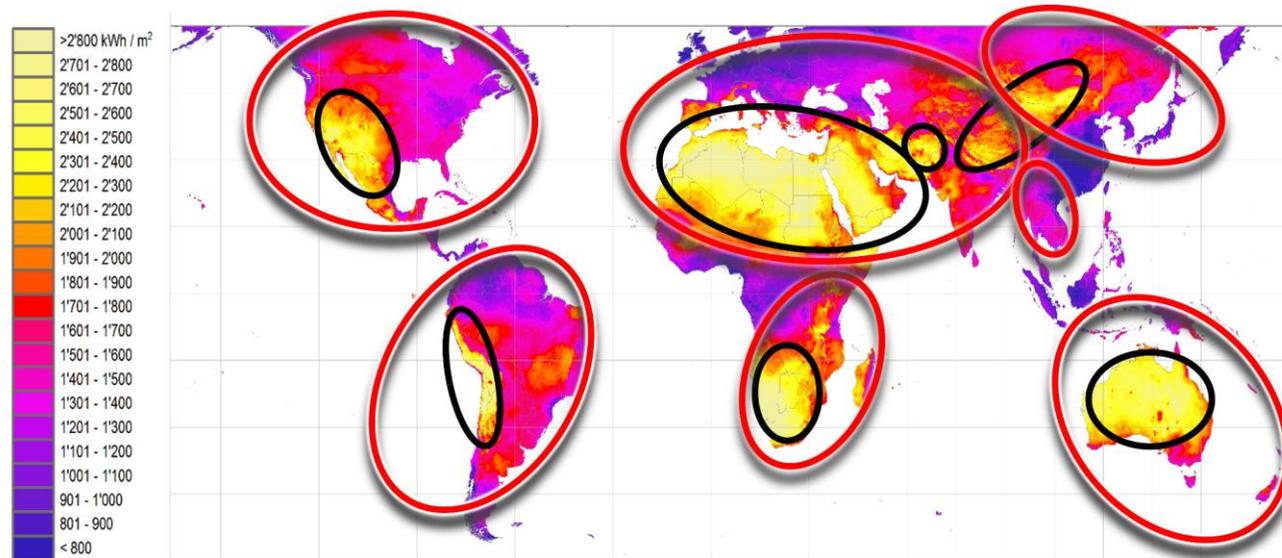
本論文では、分母の日射量を DNI にした場合を「DNI 基準の変換効率」、GNI にした場合を「GNI 基準の変換効率」のように表現する。 η は V_{oc} および FF に比例するため、太陽電池セルの温度上昇や直列抵抗の増加により低下する。

第3章 省スペース向け高倍率部分集光モジュールの設計

3.1 はじめに

1章で述べたように、集光用多接合セルの変換効率は年々向上している。CPVは、超高効率な反面高コストな多接合セルの使用量を削減しつつ、高い直達日射量(DNI)基準のモジュール変換効率(以下モジュール効率)を得ることができる。高集光倍率CPV(HCPV)のDNI基準の変換効率はモジュール・システム規模で30%を超えており[19]-[22]、サブモジュール(分割できない一つの基板に形成した発電可能な最小単位)規模では40%を超えている[23]。しかし、高倍率集光用の光学系は(2-5)式で定義される集光限界により、広い角度から入射する散乱光を集光することができないため、年間日射量に占める散乱日射量の割合(年平均散乱比)が大きい地域での優位性は低くなる。例えば、DNI基準のモジュール効率が35%であっても、年平均散乱比が0.4の地域に設置した場合、年間の全天日射(GNI)基準のモジュール効率は21%となり、Siセルを用いた従来の平板PVモジュールと同程度になる。商用気象データベース(METEOTEST, METEONORM 6.0)に基づいた解析によると、世界人口ランキング200位までの都市[24]のうち93%が年平均散乱比0.3-0.6の地域に分布している[25]。したがって、HCPVが直達光からのみではなく散乱光からも発電を行うことができれば、モジュール面積当たりの発電量を向上させることができ、結果的にHCPVの市場をサンベルト地域(年積算DNI>2000 kWh/m²)に限らず、非サンベルト地域(年積算DNI ≤ 2000 kWh/m²)まで拡大できる可能性がある(図3-1)。特に、設置スペースが限定される省スペースアプリケーションにおいて大きなメリットがあり、これまでCPVが導入されていなかった都市部(都市街路、ビルの壁・

Yearly sum of Direct Normal Irradiation (DNI)



Source: Meteonorm 7.1.5 (www.meteonorm.com); uncertainty 8%
Period: 1991 - 2010; grid cell size: 0.125°



図 3-1 散乱光利用による HCPV 市場の拡大

出典：商用気象データベース（METEOTEST, METEONORM 7.1.5）を基に作成

屋根、駐車場、EVステーションなど)への市場展開も期待できる。

3.2 高倍率部分集光コンセプト

上記 HCPV の課題解決に向け、これまでハイブリッド CPV もしくは CPV+ と呼ばれるコンセプトが提案されてきた。これらのコンセプトは図 3-2 に示すように、高効率セルと低コストセルを組み合わせた構造になっており、高効率セルに直達光のほとんどを集光し、低コストセルで残りの直達光および散乱光を捕集する。言い換えれば、太陽エネルギーの一部を高効率セルに部分的に集光していることから、本研究ではこのコンセプトを“部分集光 (Partial CPV)” と呼称する。HCPV を用いた部分集光モジュールは、2 軸太陽追尾装置に搭載され太陽に正対するため、常に直達光を可能な限り高効率セルに集光し、散乱光のみを低コストで捕集する完全直散分離の設計である。

高倍率部分集光に関する従来研究では、フレネルレンズを用いるタイプ[26]–[29]とマイクロ非球面レンズを用いるタイプ[30]–[35]が研究されてきた。本研究の先行研究として以下がある。岡本らは Si セルの電極の上に集光用 3 接合セルを機械的に接合し、それをシリコンレンズで封止したモジュールを試作した[33]。屋外実験で GNI 基準モジュール効率の向上を確認したが、Si セルの面積がレンズの開口面積よりも小さいため散乱光からの発電の寄与は大きくなかった。この課題を解決するため、集光用 3 接合セルおよび 2 次集光系 (Secondary Optical Elements: SOEs) をレンズ開口と面積が等しい Si セルの上に機械接合したモジュールを設計・試作した[34]。試作モジュールを用いた屋外実験で散乱光からの発電量の向上を確認し、散乱比 $\gamma = 0.19$ のときに GNI 基準モジュール効率 $\eta_{\text{GNI}} = 27.7\%$ を達成した。

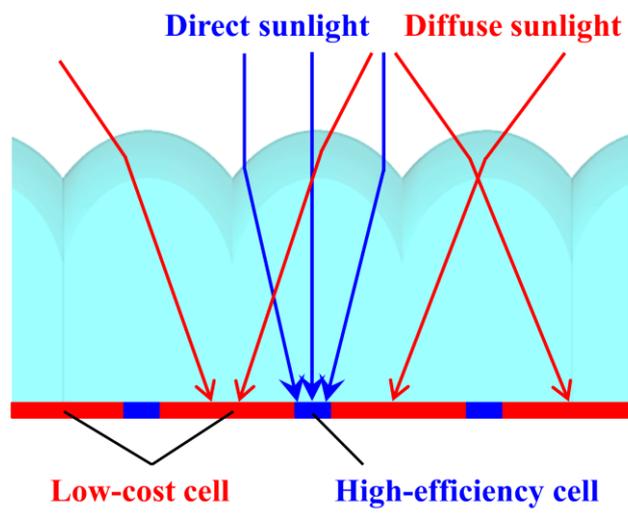


図 3-2 高倍率部分集光コンセプト

本研究では文献[34]のモジュールからさらなる性能向上を目指し、以下のアプローチを試みた。

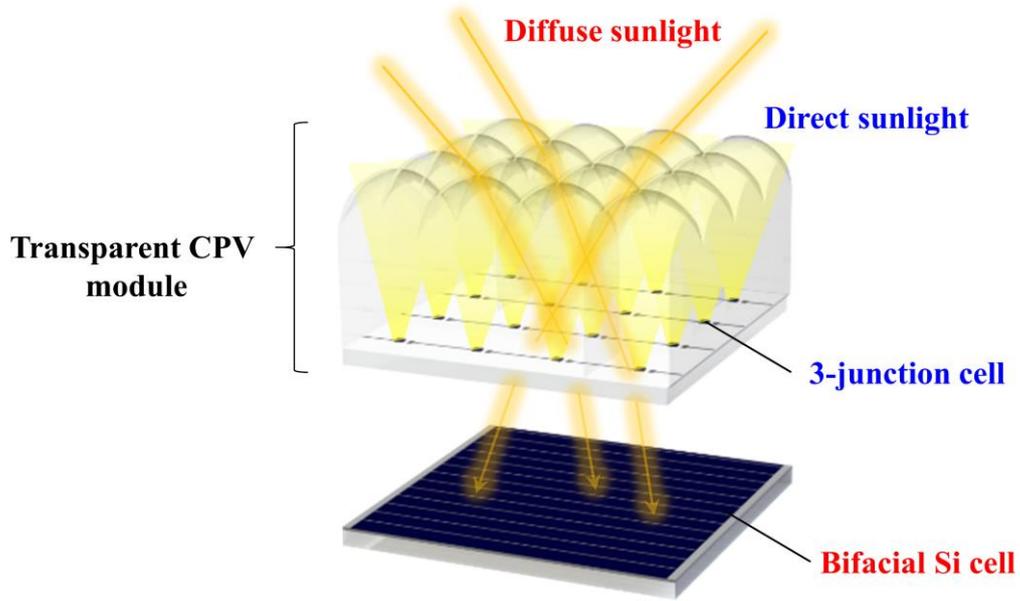
- (1) 太陽電池セルをレンズで封止した構造とし、モジュールに入射した太陽光線が太陽電池セルに到達するまでに通過するレンズ-空気界面を1つ減らす(3接合セル, Siセルへの光学的効率の向上)。
- (2) 3接合セルと回路パターンによるガラス基板上の不透明部分の面積を小さくする (Siセルへの光学的効率の向上)。
- (3) 2次集光系 (SOEs) を用いないことにより SOEs で反射されてモジュールの外部に出ていく散乱光も Siセルで捕集する (Siセルへの光学的効率の向上)。

以降の節ではモジュールの光学-熱設計解析, モジュール試作, 性能評価 (散乱光透過率, 発電性能, 追尾誤差に対するロバスト性) を行い, 先行研究からの性能向上および従来 CPV に対する優位性を確認した。

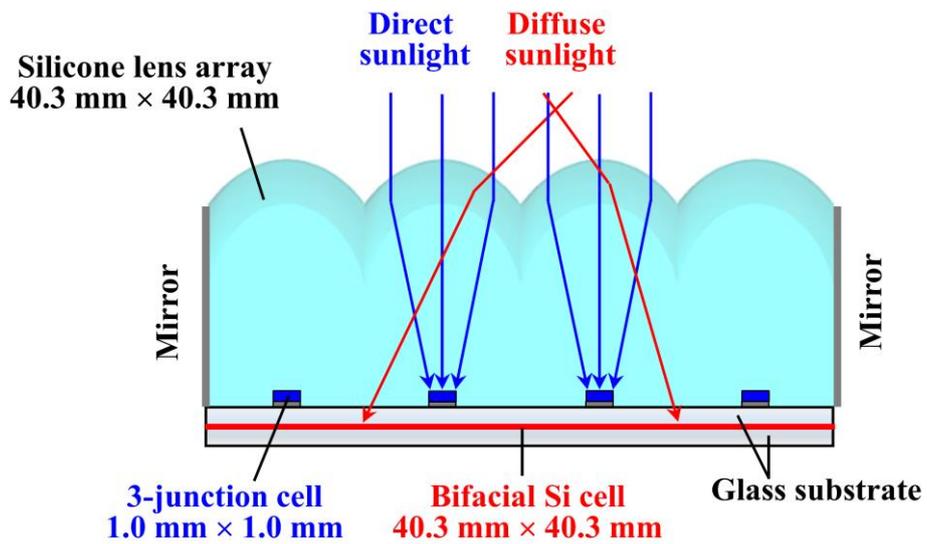
3.3 モジュール設計および試作

3.3.1 モジュール仕様および試作

図 3-3 に 4×4 レンズアレイ, 3 接合セル (GaInP/GaInAs/Ge), 両面受光 Si セル (以下両面 Si セル) からなる III-V/Si 部分集光モジュールの概要図を, 図 3-4 に試作モジュールの写真を示す。両面受光セルとは表裏両面で発電可能な太陽電池セルであり, 両面 Si セルを用いた部分集光モジュールは片面受光 Si セル (以下片面 Si セル) よりもモジュール面積当たりの発電量を高くできることが報告されている[34]。本研究で設計したモジュールは 3 接合セルがシリコンレンズで封止された高透過 CPV モジュールを両面 Si セルの上に積層させた 4 端子ス

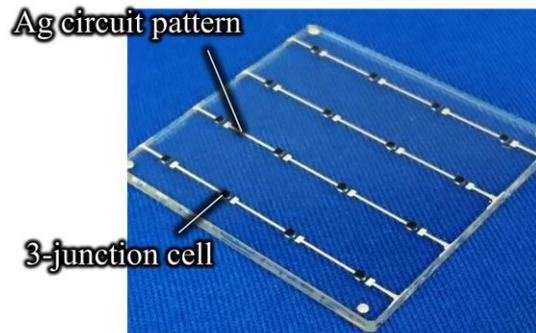


(a) コンセプトイメージ

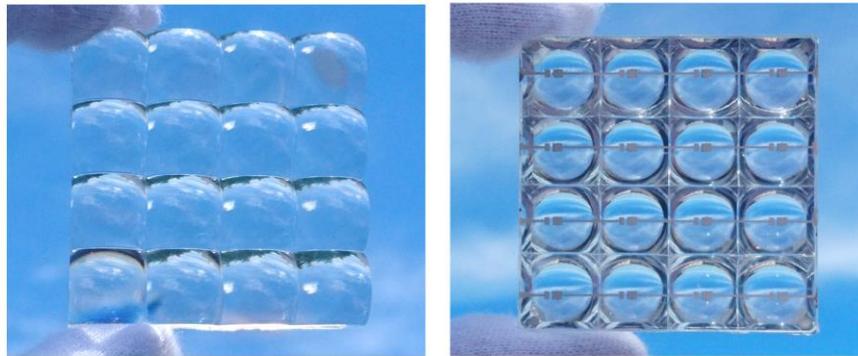


(b) 断面図および構成要素の寸法

図 3-3 部分集光モジュールの概要



(a) 回路パターンをスクリーン印刷したガラス基板と 3 接合セル



(b) 高透過 CPV モジュールの上面 (左) および底面 (右)



(c) 部分集光モジュール (高透過 CPV モジュール+両面 Si セル)

図 3-4 試作部分集光モジュール

タックであり、直達光を3接合セルに集光し、散乱光を両面Siセルで捕集する。

4 端子設計は、各太陽電池ストリングに対して独立に最大電力点追従制御 (Maximum Power Point Tracking: MPPT) を行うため配線コストが倍増するが、電流整合が必要ないため各太陽電池セルの発電量変化に対するロバスト性が高いというメリットがある。また、本モジュールでは3接合セルおよびSiセルがそれぞれサブモジュール化されており、それらをスタックした構造になっている (図3-3(a))。このため、実用では本モジュール専用にSi平板モジュールを専用設計せずに中古のSi平板モジュールを用いること (レトロフィッティング) も可能である。

モジュール試作プロセスは以下の通りである。まず、Ag回路パターンをガラス基板にスクリーン印刷した。ここで、Siセルに到達する散乱日射量を可能な限り大きくするため回路パターン面積がガラス基板面積に占める割合を最小限にした (4.3%)。次に、3接合セルを回路パターンの上にダイボンディングによって搭載し、ワイヤーボンディングによりセルの電極とスクリーン印刷したAg電極をAuワイヤーで導通させた。その上にシリコーン樹脂 (旭化成ワッカーシリコーン株式会社, ELASTOSIL® RT601) 製の集光レンズを射出成型し、高透過CPVモジュールとした。高透過CPVモジュールと両面Siセルをシリコーン光学接着剤 (モメンティブ・パフォーマンス・マテリアルズ・ジャパン合同会社, TSK5353) で接合し、部分集光モジュールとした。

今回のモジュールでは3接合セルに対する幾何学的集光倍率を $C_g = 100\times$ (単位レンズ開口面積: $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$, 3接合セル面積: $1.0\text{ mm} \times 1.0\text{ mm}$) とした。レンズと3接合セルのサイズは次節で述べる光学-熱特性および試作時のセル-レンズ間のアライメント精度を考慮して決定した。非球面レンズの形状はコーニク面とし、次式で表される。

$$z = \frac{c(x^2 + y^2)}{1 + \sqrt{1 - (1 + k)c^2(x^2 + y^2)}} \quad (3-1)$$

ここで、 k はコーニック定数、 c [mm^{-1}]は曲率である。商用光学解析ソフトウェア (Synopsys, Inc.; LightTools 8.4.0) と大域最適化アルゴリズムにより 3 接合セルに入射するエネルギー量が最大になる非球面係数 (k , c) およびレンズ厚さ t を探索した。最適化したレンズの形状パラメータは $k = -0.459$, $c = 0.183 \text{ mm}^{-1}$, $t = 17.1 \text{ mm}$ となった。類似のレンズ封止型 CPV モジュールで DNI 基準のモジュール効率 37.1%が報告されている[36].

3.3.2 モジュールサイズが各種性能に及ぼす影響

単位モジュールの最適サイズを決定するため、モジュールサイズと太陽電池セル温度、変換効率、シリコンレンズの直達光に対する 3 接合セルへの光学的効率の関係を 3 次元伝熱解析シミュレーションおよび 3 次元光線追跡シミュレーションにより調査した。伝熱解析シミュレーションには商用有限要素法 (Finite Element Method: FEM) 解析ソフトウェア (ANSYS, Inc.; ANSYS 17.0) を、光線追跡シミュレーションには商用光学解析ソフトウェア (Synopsys, Inc.; LightTools 8.4.0) を使用した。

図 3-5 に 3 次元シミュレーションモデルを示す。シミュレーションモデルはシリコンレンズ、3 接合セル、回路パターン、ガラス基板、Si セルからなる単位モジュールとした。

伝熱解析シミュレーションでは、3 接合セルの光電変換ロスによる発熱 Q_{3J} [W] およびシリコンレンズの光吸収による発熱 Q_{lens} [W]を次式によってモデル化した。

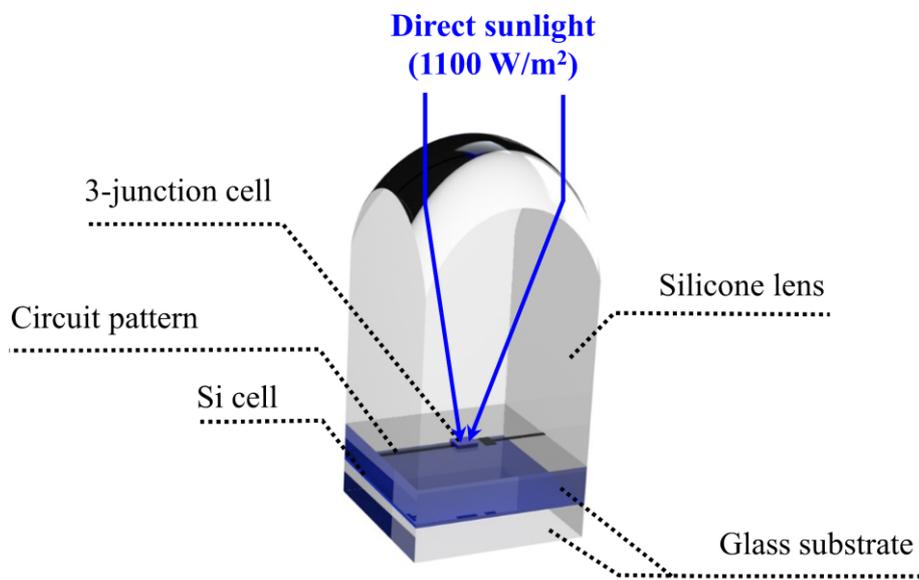


図 3-5 3次元伝熱解析および光線追跡シミュレーションモデル

$$Q_{3J} = B \times A_{\text{lens}} \times \eta_{\text{opt_D}} \times (1 - \eta_{3J}) \quad (3-2)$$

$$Q_{\text{lens}} = B \times A_{\text{lens}} \times \alpha_{\text{lens}} \quad (3-3)$$

ここで、 B [W/m^2]は直達日射量 (DNI), A_{lens} [m^2]はレンズ開口面積 (投影面積), $\eta_{\text{opt_D}}$ はレンズの直達光に対する3接合セルへの光学的効率, η_{3J} は3接合セルの変換効率, α_{lens} はレンズの太陽光吸収率である. $\eta_{\text{opt_D}}$, α_{lens} は光線追跡シミュレーションにより計算し, η_{3J} は温度の関数として計算した. なお, Siセルの光電変換ロスによる発熱密度は3接合セルのそれと比較して約1/300と非常に小さいため, 本シミュレーションではSiセルの発熱を無視した. 代わりに, 快晴日のDNIより若干大きな値 $B = 1100 \text{ W}/\text{m}^2$ を与え, 実環境での動作時よりも3接合セルの温度が若干高くなる条件とした. モジュール表面は外気と対流熱伝達およびふく射によって熱交換するものとし, 境界条件として以下を与えた. (1) 外気温を 35°C に設定し, (2) モジュール表面から外気への熱伝達係数は自然対流 (無風状態) を模擬して $4.8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ を与えた[37]. (3) セルーレンズアレイモジュール[30]を模擬するため, 単位モジュールの側面に周期境界条件 (断熱条件) を設定した. (4) シリコンレンズの赤外放射率として分光放射率の測定値から見積もった 0.95 を入力した. モジュール構成要素の熱伝導率として, 文献[38]とシリコンメーカーから提供された物性値を基に, シリコンレンズ: $0.2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 3接合セル (Ge): $60.2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 回路パターン (Ag): $429 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, ガラス基板: $1.0 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, Siセル: $168 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ を与えた. なお, 3接合セルの熱伝導率として Ge の値を用いた理由は, 3つのサブセルのうち Ge ボトムセルがトップセル, ミドルセルに比べて十分厚く, 伝熱特性への影響が支配的なためである.

光線追跡シミュレーションでは, 異種材料界面でのフレネル反射ロスおよび

レンズ内部での吸収ロスを考慮した。周期構造を模擬するため、単位モジュールの側面に完全反射面（反射率 100%）を仮定した。レンズ直上にレンズ開口と同じ形状、同じ面積の光源を配置し、モジュールに向かって直達光線（AM1.5D スペクトル、平行度 $\pm 0.27^\circ$ ）を照射した。光学的効率 $\eta_{\text{opt_D}}$ は 3 接合セルに到達するエネルギー量と光源から放射されるエネルギー量の比として計算した。

3 接合セルおよび Si セルの 25°C での変換効率をそれぞれ 40%、20%とし、各セルの変換効率の相対温度係数としてそれぞれ $-0.15\%/^\circ\text{C}$ 、 $-0.45\%/^\circ\text{C}$ を与えた。以上の条件を入力し、反復計算によりすべての変数値が平衡するセル温度を決定した。

図 3-6 に幾何学的集光倍率 $C_g = 100\times$ における、単位モジュールサイズとセル温度、変換効率、レンズの光学的効率の関係を示す。ここで、レンズ辺長、厚さ、体積および Si セルの辺長は 3 接合セルの辺長に比例して変化させたが、3 接合セル、Si セルおよびガラス基板の厚さはそれぞれ 0.185 mm、0.2 mm、2.0 mm で一定に保った。シミュレーション結果はスケールダウンに伴いモジュール性能が向上することを示している。具体的には、モジュールサイズ（3 接合セルサイズ）が小さいほど、セル温度は低くなる[39]。同じ太陽電池セル使用量（総発熱量）の下で集光倍率を保ったままモジュールサイズを小さくすることは、太陽電池セルを分割して単位モジュールの数を増やすことに相当する。分割された各セルの側面も伝熱面となるため、モジュールサイズが小さくなるほど（太陽電池セルの分割数が多くなるほど）セル側面からの放熱量が大きくなる。また、レンズ厚の減少により内部吸収損失が低減する。レンズ厚さが 171 mm、86 mm、43 mm、17 mm、8.6 mm と薄くなるにつれ、レンズの光吸収率 α_{lens} は 26.7%、19.5%、13.5%、7.3%、4.3%と減少し、それに伴い光学的効率 $\eta_{\text{opt_D}}$ は 68.3%、75.5%、81.5%、87.7%、90.7%と増加した。3 接合セルからの発熱は主に回路パターンを

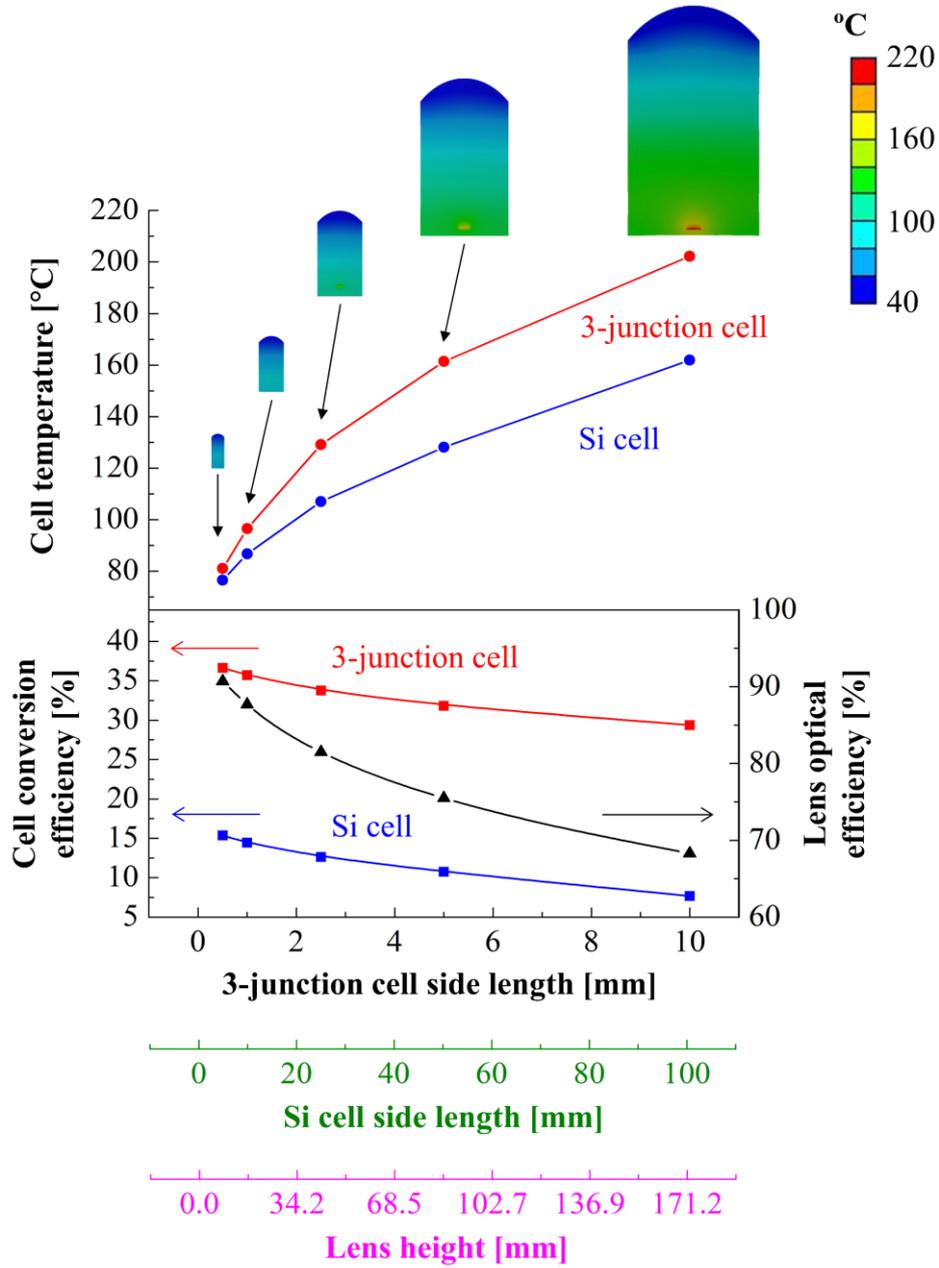


図 3-6 幾何学的集光倍率 $C_g = 100\times$ における，単位モジュールサイズとセル温度，変換効率，レンズの光学的効率の関係

經由してガラス基板への熱伝導によって放熱されるが、一方でシリコンレンズへの伝導熱は熱抵抗が大きい（シリコンの熱伝導率が低くかつレンズが厚い）ため、小さくなる。ガラス表面およびレンズ表面に伝わった熱は主に外気への対流熱伝達によって放熱される。3 接合セル温度を 100°C 以下、レンズの光学的効率を 85%以上にするためには、3 接合セルの辺長を 1.0 mm にする必要があることがわかった。1.0 mm × 1.0 mm の 3 接合セルを使用した場合、3 接合セル温度とレンズの光学的効率はそれぞれ 97°C、87.7%となる。

3.4 試作モジュール性能評価

3.4.1 高透過 CPV モジュールの散乱光透過率

高透過 CPV モジュール（図 3-4(b)）の散乱光透過率を光線追跡シミュレーションおよび実験により評価した。

シミュレーションには図 3-5 に示すモデルを使用した。モジュールを半球光源の中央に配置し、そのモジュールに向かって AM1.5G スペクトルの光線を照射した。大学キャンパス内での観測データによると、入射角 50°以下の範囲に散乱成分の約 80%が含まれていることから[40]、散乱光を入射角 0°–50°の範囲から入射させ、放射照度は等方角度分布とした。散乱光透過率は Si セルに到達するエネルギー量とレンズ上面に入射するエネルギー量の比として計算した。シミュレーションの結果、散乱光透過率は Si セルの分光感度波長範囲（350–1050 nm）で 82.6%と見積もられた。

シミュレーション結果の妥当性を確認するため、高透過 CPV モジュールの散乱光透過率を商用ソーラーシミュレータ（岩崎電気株式会社，ESC0436-H134）から放射される疑似散乱光を用いて測定した。このソーラーシミュレータは IEC 60904-9 で定義されているスペクトル合致度の C 等級を満たしており、疑似散乱

光の照度はほぼ等方角度分布を示している。図 3-7 に実験装置の構成を示す。モジュールを透過した光量はモジュールのガラス基板直下に配置した Si セルによって測定し、その有効面積はレンズ開口面積と同じとした。散乱光透過率は高透過 CPV モジュールが上にある状態での Si セルの短絡電流値とモジュールがない状態での短絡電流値の比として算出した。散乱光透過率の測定値は 82.0%であり、シミュレーション結果 (82.6%) とよく一致した。

以上の実験に加えて、高透過 CPV モジュールの分光散乱光透過率も測定した。図 3-7 の装置構成で、Si セルの代わりに分光放射計 (英弘精機株式会社, MS-720) の受光部 (直径 29.5 mm) をモジュールのガラス基板の下中央に配置した。受光部の有効面積はガラス基板上の回路パターンが作る影によって 3.3%減少した。分光散乱光透過率 τ_λ はモジュールが受光部の上にある状態での分光放射照度とモジュールがない状態での分光放射照度の比として見積もった。図 3-8 上段には τ_λ と測定した分光放射照度を示す。分光散乱光透過率は測定波長範囲 (350–1050 nm) にわたりほぼ一定の値であった。全散乱光透過率 τ を次式により定義した。

$$\tau = \frac{\int_{350 \text{ nm}}^{1050 \text{ nm}} \tau_\lambda S E_{\text{AM1.5G}} d\lambda}{\int_{350 \text{ nm}}^{1050 \text{ nm}} S E_{\text{AM1.5G}} d\lambda} \quad (3-4)$$

ここで、 S [A/W] は部分集光モジュールに使用した両面 Si セル表面の分光感度、 $E_{\text{AM1.5G}}$ [W/(m²·nm)] は AM1.5G 太陽光スペクトルの分光放射照度、 λ [nm] は波長であり、それぞれ図 3-8 下段に示す。全散乱光透過率 τ は、AM1.5G スペクトルの分光放射照度と Si セルの分光感度の積を分光散乱光透過率 τ_λ で重みづけした平均値とし、80.0%と算出された。この値は、シミュレーション結果 (82.6%) および上記の実験結果 (82.0%) とよく一致した。

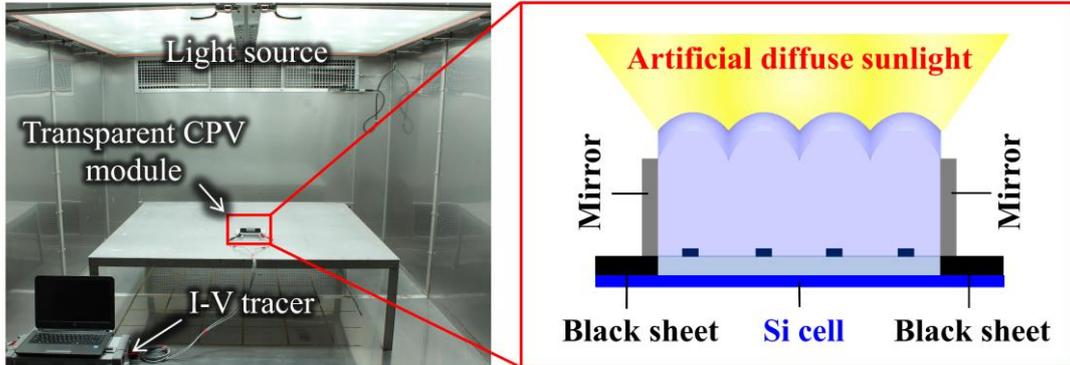


図 3-7 高透過 CPV モジュールの散乱光透過率測定のための装置構成

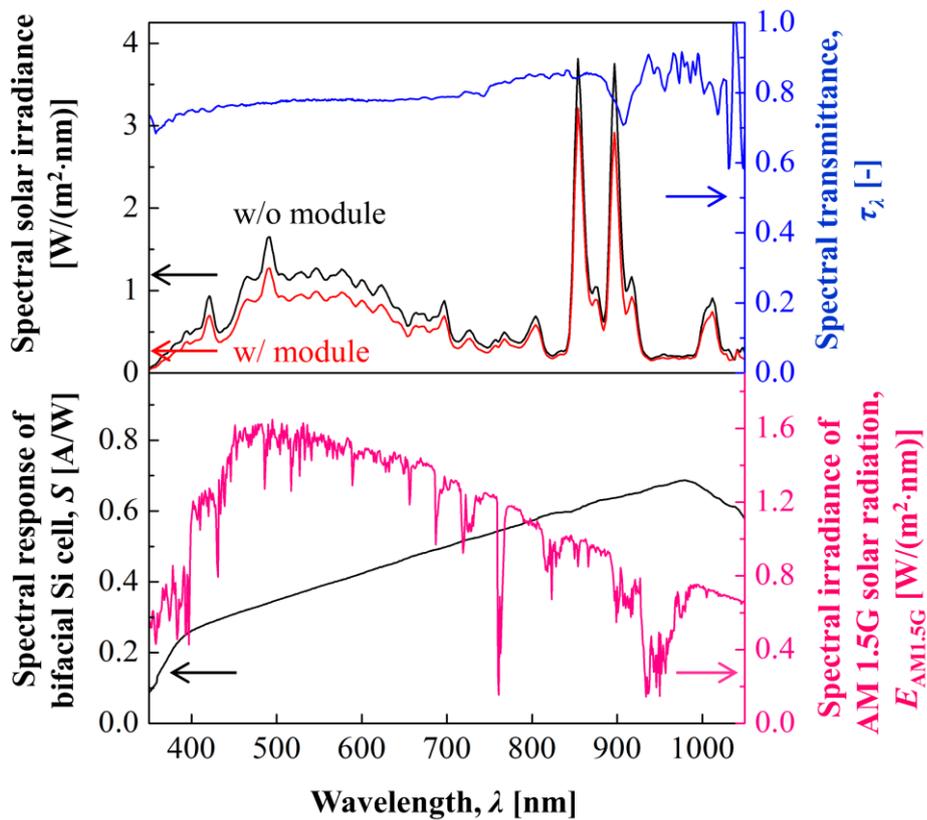


図 3-8 【上段】疑似散乱光の分光放射照度（黒線，赤線），高透過 CPV モジュールの分光散乱光透過率（青線）。【下段】両面 Si セル表面の分光感度（黒線），AM1.5G 標準スペクトルの分光放射照度（桃色線）

3.4.2 屋外発電性能

試作部分集光モジュールの発電性能を評価するため大学キャンパス内にて屋外試験を行った。図 3-9 に実験装置の構成を示す。試作モジュールを 2 軸太陽追尾装置（英弘精機株式会社，STR-22）に搭載した。追尾面に搭載した全天日射計（英弘精機株式会社，MS-402）および直達日射計（英弘精機株式会社，MS-54）で全天日射量（GNI），直達日射量（DNI）を測定し，散乱比 γ を計算した。 γ は追尾面の散乱日射量が GNI に占める割合を表しており，(2-1)式に従い $\gamma = (GNI - DNI) / GNI$ として計算される。 γ は曇りの度合いを表す指標であり， $\gamma = 1$ は完全な曇天を意味しモジュール開口には散乱光のみが入射する。灰色紙（AM1.5G 標準スペクトルに対する半球反射率：0.38）を両面 Si セルの裏面から 300 mm 離れた位置に敷き，地表面での反射日射を再現した。なお，地表面の反射率（アルベド係数）は材質や表面の状態によって異なり，0.1（浅黒い湿潤土壌）から 0.9（新雪）まで広く変化する。土壌，ガラス，砂地の反射率は 0.4 以下であり，コンクリートの反射率は約 0.5 である[41]。このことを考慮し，本研究では，地表面の反射率として 0.3–0.4 の値を採用した。

試作モジュール内の 3 接合セルおよび両面 Si セルの電流–電圧（I-V）特性を 2 チャンネルのソース/メジャーユニット（Keysight Technologies，B2902A）を用いて独立かつ同時に測定した。

図 3-10 に「快晴日」および「晴れ時々曇りの日」における開放電圧 V_{oc} ，モジュール面積当たりの発電量 P_{max} ，日射量の時間変化を示す。「快晴」は低散乱比（ $\gamma < 0.30$ ）の状態を，「晴れ時々曇り」は中散乱比 $0.30 \leq \gamma \leq 0.60$ もしくは高散乱比（ $\gamma > 0.60$ ）の状態を意味している。モジュールの発電量 P_{max} は 3 接合セルと両面 Si セルそれぞれの最大発電量の和と定義する。図 3-10(a)に示すように，快晴日は日射が高い値で安定し， P_{max} はほぼ一定値で推移した。 P_{max} は 3 接合セ

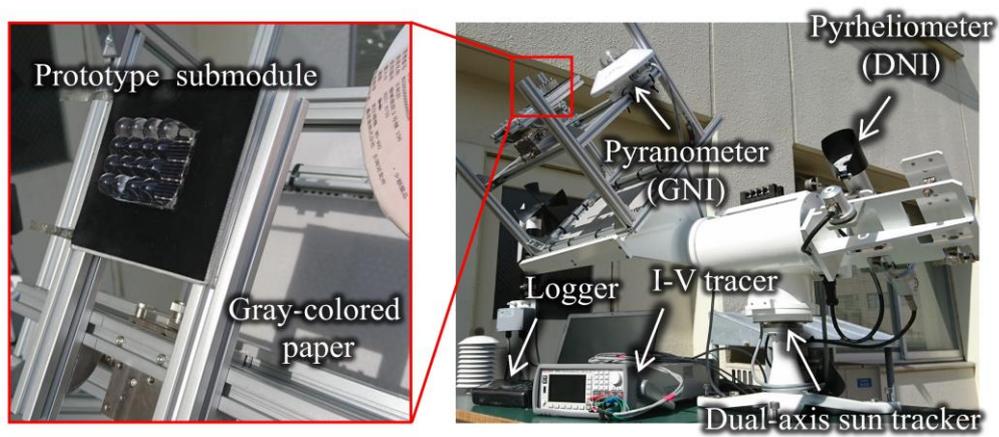
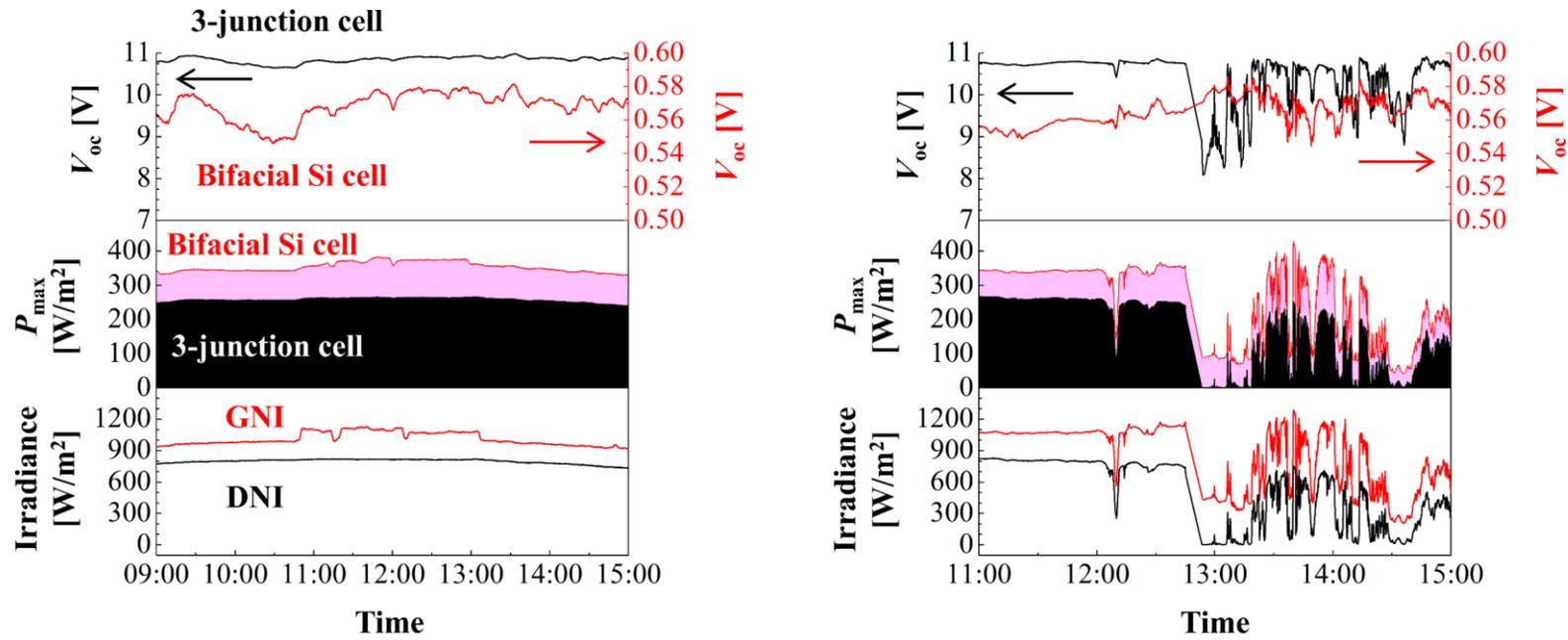


図 3-9 屋外試験の装置構成



(a) 快晴日 (2017年4月24日)

(b) 晴れ時々曇り (2017年5月17日)

図 3-10 大学キャンパス内で測定した開放電圧 V_{oc} , モジュール発電量 P_{max} , 日射量 (GNI, DNI) の時間変化

ルの発電量の寄与がほとんどであるが、両面 Si セルの発電量は日積算発電量の 27%を占めた。また、測定中の 3 接合セルの最高温度は、 V_{oc} の測定値を基に室温での V_{oc} とセルメーカーから提供された温度係数 ($-4.57 \text{ mV}/^\circ\text{C}$) を用いて 76°C と概算され、メーカーが推奨している動作温度限界 (110°C) よりも十分低いことが確認できた。一方で、3 接合セルによるモジュール内部の局所加熱はセル自身および周囲の材料に熱応力を引き起こす恐れがあるため、その影響を十分に調査する必要がある。図 3-10(b)に示すように、晴れ時々曇りの日は、DNI の減少に伴い 3 接合セルの発電量が減少したが、対照的に両面 Si セルの散乱光からの発電量が大きくなった。

セル面に照度むらがあると FF が低下する。今回のスタック構造の場合、ガラス基板上の回路パターンが Si セル上に部分影を作るが、それが Si セルの FF に及ぼす影響は無視できるほど小さいことがわかった。実際、部分集光モジュール内の Si セルの FF 値は、予め屋外の均一照射 ($\text{約 } 1000 \text{ W}/\text{m}^2$) 下で測定した両面 Si セルの FF 値 (76%) とほぼ同じ値であった。

図 3-11 に GNI 基準モジュール効率 η_{GNI} と散乱比 γ の関係を示す。これは 2017 年 4 月から 6 月の間の 15 日間の測定で得られたデータをプロットしたものである。ここで、両面 Si セルの裏面を完全に遮光した場合を片面 (Single-sided) と表記する。 η_{GNI} は Si セル裏面に入射する日射量を考慮していないため、グラフには片面 Si セルの場合のみをプロットした。また、比較のため、従来 CPV モジュール (3 接合セルのみ)、先行研究のモジュール[34]および太陽追尾平板 PV モジュールの η_{GNI} もプロットし、平板 PV モジュールの効率は本研究で使用した両面 Si セル表面の効率と同じ $\eta_{\text{GNI}}=19.4\%$ を仮定した。本研究のモジュール (青プロット) は $\gamma=0.17$ のときに最高変換効率 $\eta_{\text{GNI}} = 30.7\%$ を達成し、先行研究のモジュール (緑プロット) [34]から 2.6 パーセンテージポイント(p.p.)の向上を確

認した。 $\gamma=1.0$ (モジュール開口には散乱光のみが入射) における η_{GNI} を比較すると、本研究のモジュール(青プロット)は先行研究のモジュール(緑プロット)[34]よりも1.4倍高い値を示し、散乱光透過率の大きな向上を確認した。

図3-12に太陽追尾平板PVモジュールと比較した発電量の増加割合(= $P_{\text{max}} / P_{\text{flat_PV}}$)を示す。ここで、部分集光モジュールの P_{max} は図3-11のプロット群の直線回帰とし、両面Siセルを用いた場合も追加している。 $P_{\text{flat_PV}}$ は太陽追尾平板PVモジュール($\eta_{\text{GNI}}=19.4\%$)の推定発電量である。両面Siセルを用いることで片面Siセルを用いた場合よりもさらに発電量が向上し、どの散乱比においても平板PVモジュールより高い発電量を示した。具体的には、散乱比0.17–1.0の範囲で、片面Siセルを用いた場合よりも1.1–1.3倍高い発電量を、平板PVモジュールよりも1.1–1.8倍高い発電量を示した。非サンベルト地域(東京、年平均 $\gamma=0.47$)に設置した場合、部分集光モジュールの年間発電量は平板PVモジュールの1.5倍(両面Siセル)、1.3倍(片面Siセル)になるが、従来CPVモジュール(3接合セルのみ)では0.88倍となり、本研究の部分集光モジュールは非サンベルト地域でも平板PVモジュール以上の発電量を得られることがわかった。同様に、サンベルト地域(フェニックス、年平均 $\gamma=0.20$)に設置した場合、部分集光モジュールの年間発電量は平板PVモジュールの1.7倍(両面Siセル)、1.6倍(片面Siセル)になる。以上の結果から、本研究の部分集光モジュールにより面積あたりの発電量が向上し、サンベルト地域のみならず、非サンベルト地域でもHCPV導入のメリットが示された。

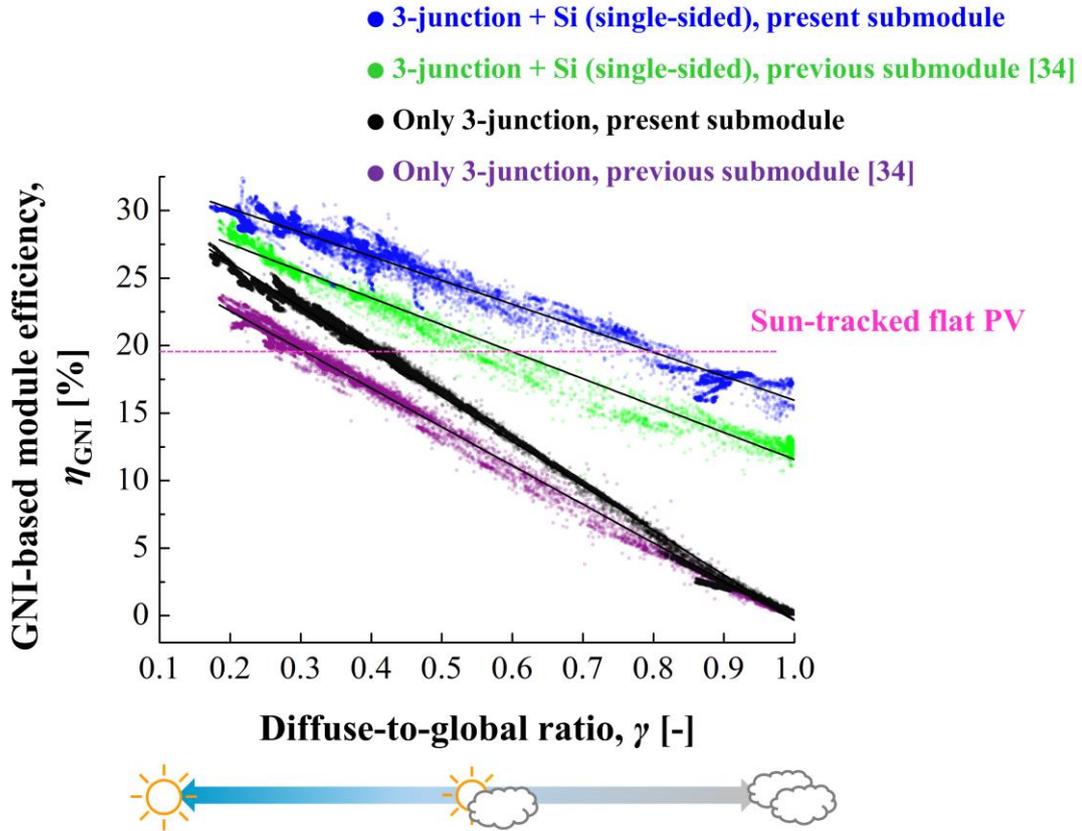


図 3-11 GNI 基準モジュール効率 η_{GNI} と散乱比 γ の関係

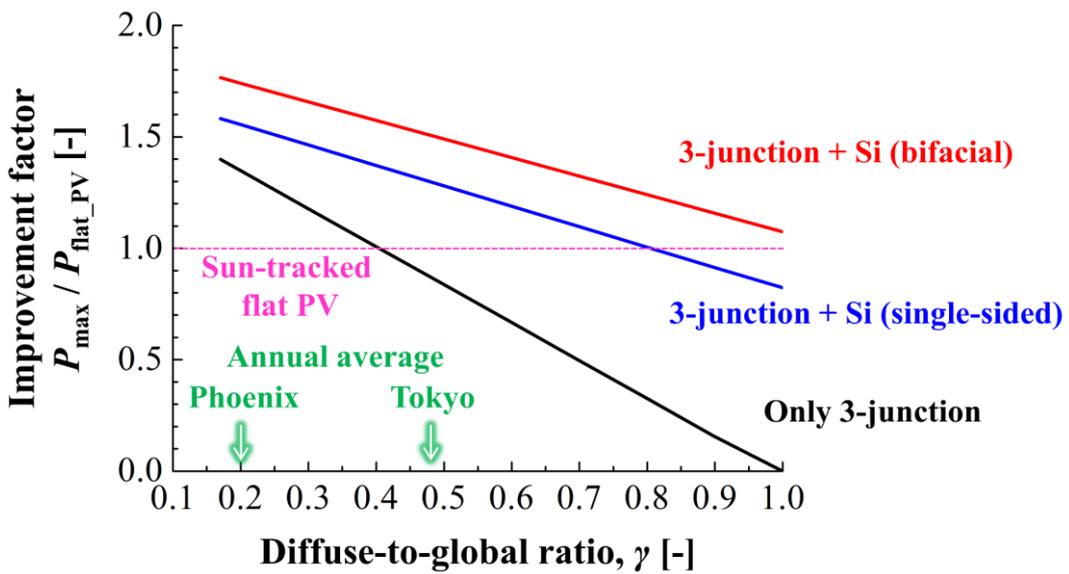
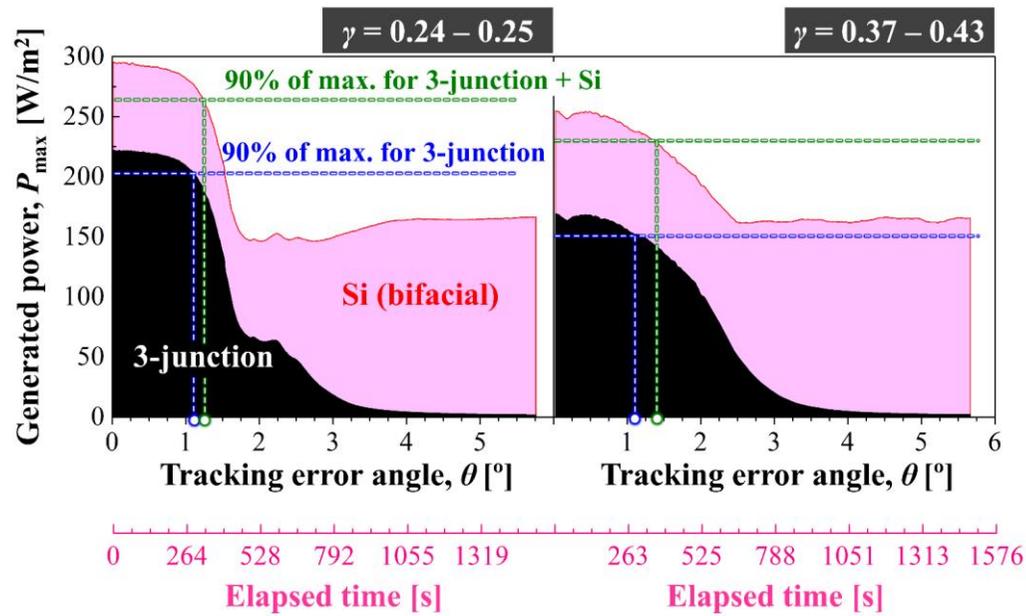


図 3-12 太陽追尾平板 PV モジュール ($\eta_{\text{GNI}} = 19.4\%$) と比較した発電量増加割合

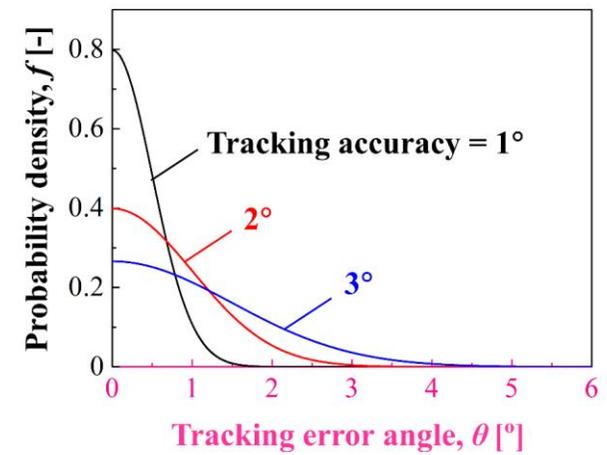
3.4.3 追尾誤差に対するロバスト性

追尾誤差センサー（Black Photon Instruments, SE-202-TA）を取り付けた2軸太陽追尾装置に試作モジュールを搭載し、太陽追尾を止めた状態でモジュールの発電量を25分間測定し続けた。図3-13(a)に快晴（ $\gamma=0.24-0.25$ ）および薄曇り（ $\gamma=0.37-0.43$ ）状態における試作モジュール（両面Siセル）の発電量 P_{\max} と追尾誤差角度 θ の関係を示す。第一横軸の追尾誤差角度 θ は追尾誤差センサーの出力と測定時間中の太陽軌道を用いて計算した。この方法で得られる発電量と追尾誤差角度の関係は太陽軌道によって変化するため、季節や時間によって若干異なる。図3-13(a)の緑色と青色の破線はそれぞれ部分集光モジュール（3接合セル+Siセル）および従来CPVモジュール（3接合セルのみ）の最大発電量（ $\theta=0^\circ$ での P_{\max} ）の90%の発電量を示している。従来CPVモジュールではその発電量に対応する角度は許容入射半角（許容角）として定義されており、第一横軸に破線に対応する色でプロットした。快晴時（ $\gamma=0.24-0.25$ ）では、従来CPVモジュールの許容角は 1.1° であったが、部分集光モジュールは $\theta=1.5^\circ$ でそれと同じ発電量まで低下し、それ以上の追尾誤差角度でも従来CPVモジュールの最大発電量の62%以上の発電量を維持した。 $\theta=1^\circ$ での部分集光モジュールの発電量は同角度での従来CPVモジュールの発電量より1.3倍高かった。薄曇り時（ $\gamma=0.37-0.43$ ）では、いずれの追尾誤差角度においても、部分集光モジュールの発電量は従来CPVモジュールの最大発電量の90%（青破線）よりも高い値となった。これらの結果は部分集光によって追尾誤差に対するロバスト性が改善したことを示唆している。

しかし、実際の太陽追尾装置は追尾誤差角度分布を示すと考えられるため、ある追尾誤差角度における発電量を比較するだけでは、実際の太陽追尾システムの性能を評価するには不十分である。そこで、追尾精度 X° の太陽追尾装置の追



(a)



(b)

図 3-13 (a) 2 種類の日射条件 (散乱比 γ) における発電量 P_{\max} と追尾誤差角度 θ の関係
 (b) 太陽追尾装置 (追尾精度 X°) の追尾誤差角度の確率密度関数 (正規分布) . X は正規分布の 2σ に相当

尾誤差角度分布を正規分布でモデリングし、発電量への影響を評価した。フィードバック制御を行う太陽追尾装置の挙動を想定し、このモデルでは追尾誤差角度の平均を 0° 、 X が正規分布の 2σ (95%信頼区間) に相当すると仮定した。追尾精度が発電量に及ぼす影響を定量化するため、評価因子 ζ をこの追尾誤差モデルを考慮した発電量と追尾誤差がない場合の発電量の比として次式で計算した。

$$\zeta = \frac{2 \int_{0^\circ}^{5^\circ} P_{\max}(\theta) f(\theta) d\theta}{P_{\max}(\theta=0^\circ)} \quad (3-5)$$

ここで、 θ [$^\circ$]は追尾誤差角度、 $P_{\max}(\theta)$ [W/m^2]はある追尾誤差角度 θ での発電量 (図 3-13(a))、 $f(\theta)$ は追尾誤差角度の確率密度関数 (図 3-13(b)) である。表 3-1 に 2 種類の日射 (散乱比) 条件および 3 種類の追尾精度の組み合わせに対して ζ を計算した結果を示す。快晴 ($\gamma=0.24-0.25$) および薄曇り ($\gamma=0.37-0.43$) 状態ともに、部分集光モジュール (3 接合セル+Si セル) の発電量は、追尾精度が 2° および 3° の場合でも追尾誤差がない場合の 90% および 80% 以上の発電量を維持できる。一方、従来 CPV モジュール (3 接合セルのみ) の発電量は同じ条件でもそれらの値を下回る。したがって、正規分布に基づく追尾誤差角度分布を仮定した場合、本研究の部分集光モジュールは従来 CPV モジュールよりも追尾誤差に対するロバスト性が優れていることがわかった。

表 3-1 追尾誤差角度分布が発電量に及ぼす影響 ζ [%]
 (追尾誤差角分布を考慮した発電量と追尾誤差がない場合の発電量の比)

Diffuse-to-global ratio γ [-]	0.24-0.25			0.37-0.43		
	1	2	3	1	2	3
Conventional CPV (3-junction cell only)	99.0	87.6	73.0	96.0	88.1	79.4
Partial CPV (3-junction cell + Si cell)	99.3	91.3	82.4	96.7	93.7	88.7

3.5 まとめと今後の課題

本章では、省スペース向け PV モジュールとして高倍率部分集光モジュールに着目した。幾何学的集光倍率 $C_g = 100\times$ のモジュールを光学-熱特性を考慮して設計し、試作モジュールを用いて性能を実験検証した結果以下の知見を得た。

- (1) 太陽電池セルのレンズ封止構造，ガラス基板上の回路パターン面積の削減，2次集光系 (SOEs) を用いないことにより，高透過 CPV モジュールの散乱光透過率が 80%以上まで向上し，散乱光からの発電量を高めることができた。これにより，片面 Si セルを用いた部分集光モジュールで散乱比 $\gamma=0.17$ のときに GNI 基準のモジュール効率 $\eta_{\text{GNI}}=30.7\%$ を達成した。
- (2) 両面 Si セルを用いた部分集光モジュールでさらなるモジュール面積当たりの発電量向上を確認した。具体的には散乱比 0.17–1.0 の範囲で，片面 Si セルを用いた部分集光モジュールの 1.1–1.3 倍，太陽追尾平板 PV モジュール ($\eta_{\text{GNI}}=19.4\%$) の 1.1–1.8 倍の発電量が得られることがわかった。
- (3) 両面 Si セルを用いた部分集光モジュールは従来 CPV モジュールよりも追尾誤差に対するロバスト性が高いことが明らかになった。正規分布に基づく追尾誤差角度分布を仮定した場合，太陽追尾装置の追尾精度が 2° および 3° の場合でも，追尾誤差がない場合の 90% および 80% 以上の発電量を維持できることを示した。

以上より，本モジュール設計が限られた設置面積で発電量を向上でき，かつ従来 CPV よりも追尾誤差耐性に優れるといった性能面での優位性を確認できた。

今後の課題として、詳細なコスト評価および信頼性・寿命の評価を行い、実用に向けてモジュール設計の完成度を高めることが挙げられる。コスト評価では、モジュール構成材料と併せて支配的なトレードオフ因子すなわち、「追加の Si セルによる発電量増加とコスト増加（材料、実装、配線、電力制御システムなど）」、「幾何学的集光倍率 C_g と太陽追尾精度（ C_g が大きくなるほど高価な集光用セルの使用量を削減できるが高精度の太陽追尾が要求される）」を考慮し、性能とコスト面で最適な仕様を決定するモデルの構築を検討している。信頼性・寿命評価では屋外での長期暴露試験や加速劣化試験を実施し、集光レンズの湿度、汚れ、デブリなどへの耐性や、温度変化サイクル（熱応力サイクル）がモジュール構成要素の機械強度に及ぼす影響を注意深く調査する必要がある。

第4章 車載向け非追尾・低倍率部分集光モジュールの設計

4.1 はじめに

国土交通省の調査によると、日本の乗用車の約70%は1日の走行距離が30 km以下である[42]。商用プラグインハイブリッド自動車（PHV）の電力消費率（電費）は現在8.8 km/kWhであるが、将来、車体重量が600 kgまで減少し電費が17.0 km/kWhまで向上すると見込まれている。そのPHVに定格出力800 WのPVモジュールを搭載した場合、日本の年間日射量の下で1日平均1.8 kWhが得られ、PVのみで1日当たり31 kmの走行が可能になると試算されている[43]。PVモジュールの搭載可能面積が限られた自動車の屋根およびボンネットのみでその電力を生み出すためには、図4-1に示すように30%以上の“年間”モジュール効率が必要とされている[44]。年間モジュール効率とは、垂直入射時のみではなく、1年を通じた太陽の軌道、すなわち高入射角での反射ロスを考慮した変換効率を意味している。搭載モジュール面積、年間モジュール効率、走行可能距離の関係は次式に基づいている。

$$R_{\text{drive}} = E_{\text{car-roof}} \times A_{\text{module}} \times \eta_{\text{annual}} \times X_{\text{loss}} \times \nu \quad (4-1)$$

ここで、 R_{drive} [km/day]は日平均走行可能距離、 $E_{\text{car-roof}}$ は日平均車載面日射量(3.23 kWh/m²)、 A_{module} [m²]は搭載モジュール面積、 η_{annual} は年間モジュール効率、 X_{loss} は電力損失係数(0.739)、 ν は電力消費率(17.0 km/kWh)である。なお、電力損失係数 X_{loss} にはパワーコンディショナーによるDC/DC変換効率(0.9)、蓄電池への充電損失係数(0.95)、温度補正係数(0.91)、最大電力点追従(MPPT)損失

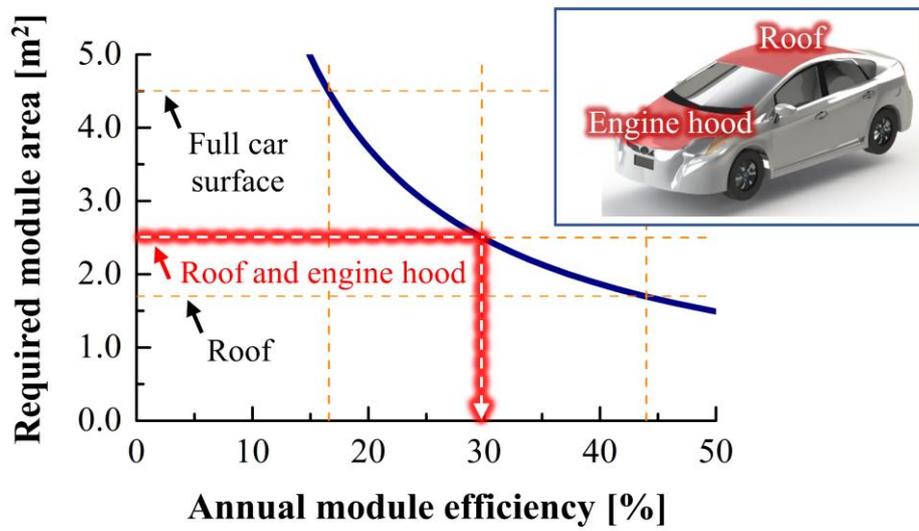


図 4-1 31 km/day の走行に必要なモジュールの面積と年間モジュール効率の関係

係数 (0.95) が考慮されている。

現在最も普及している Si セルの最高変換効率は約 27% [4] であるが、この値はほぼ理論限界効率 (29.43% [5]) に到達している。したがって、Si セルのみを用いて 30% 以上の年間モジュール効率を得ることは不可能である。一方、III-V 族化合物半導体を用いた多接合セルの変換効率は着実に向上しており [3], [45], 地上の 1 sun (1000 W/m^2) 非集光下での変換効率はすでに 30% を超えている [7], [46], [47]。しかし、これらの多接合セルは依然として高コストであり、自動車の屋根 ($2-3 \text{ m}^2$) 程度の小面積にさえ平板モジュールとして搭載するのは困難である。

高いモジュール効率を維持しながら太陽電池セルの使用量を削減できる技術として集光型太陽光発電 (CPV) がある。自動車の屋根に CPV モジュールを搭載する場合、大型の太陽追尾装置を用いることなく (非追尾) かつ、自動車の向きに依存せず日中を通して高い発電量を得ることが求められる。すなわち、車載向け CPV では集光倍率を一桁まで下げ、集光レンズの許容入射半角を数十度まで広げる必要がある。増田らは車載向け集光レンズの光学設計を行い、所望の入射角特性が実現可能であることを報告している [14]。しかしながら、レンズ間の隙間によりレンズアレイの充填率 (= レンズの発電有効面積/モジュール開口面積) は 70% 程度に留まり、モジュール面積当たりの発電量を大きくできないことが課題となっている。

4.2 非追尾・低倍率部分集光コンセプト

上記課題を解決するため、本研究では部分集光を用いることにした。車載向けの非追尾・低倍率部分集光は 3 章の高倍率部分集光のように直達光と散乱光を完全に分離するのではなく、図 4-2 に示すように常に直達光・散乱光を含めた全

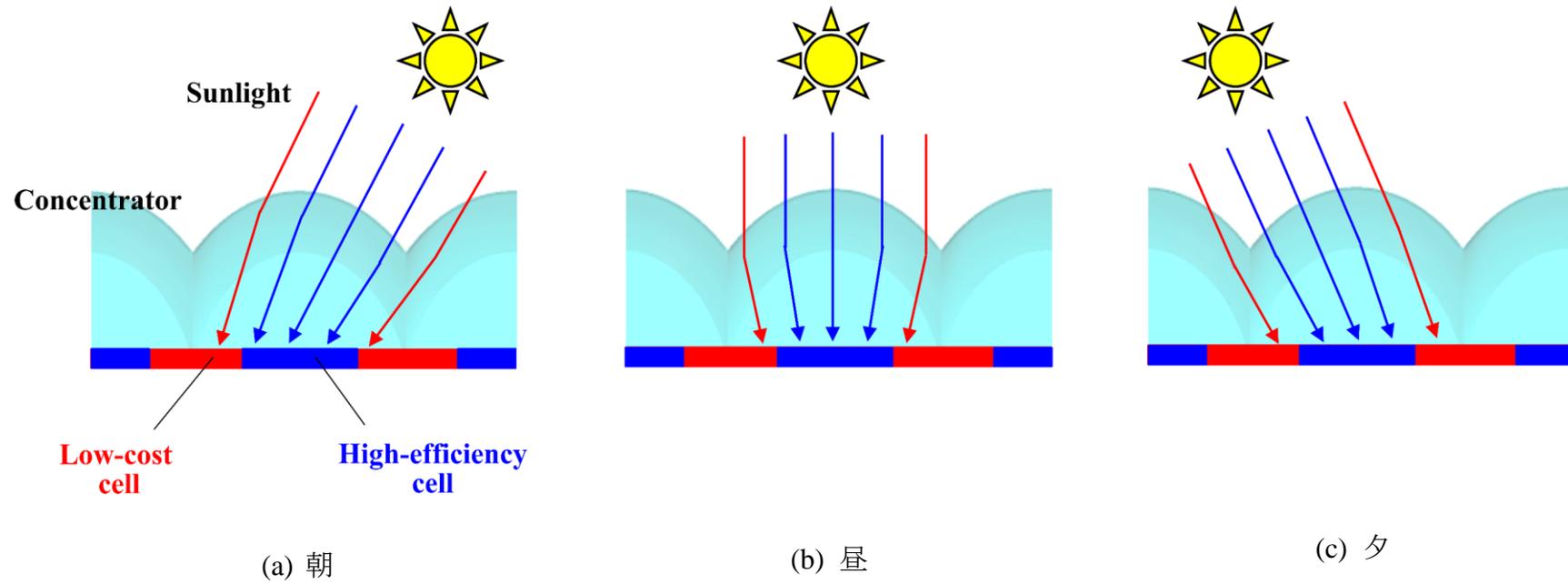


図 4-2 非追尾・低倍率部分集光コンセプト

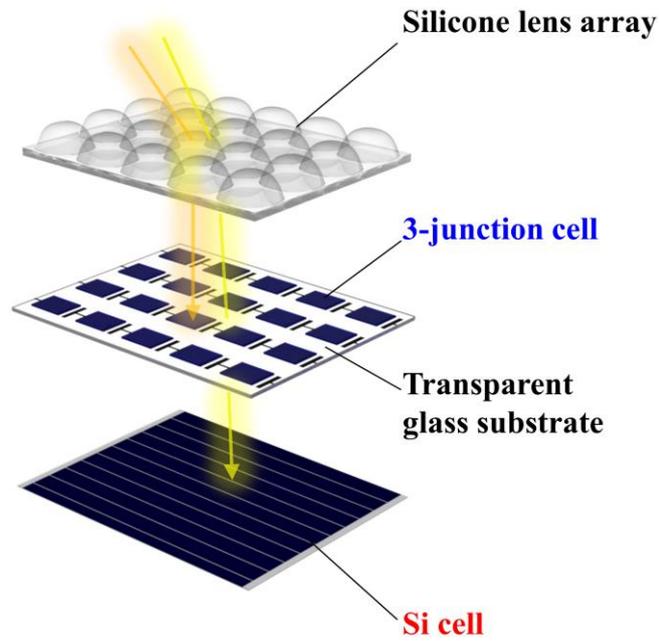
天日射の一部を“部分的に”高効率セルに集光し、残りを低コストセルで捕集する。これによりモジュール開口全面で全天日射から発電が行えるため、モジュール変換効率を向上させることができると考えた。3章で示したように高倍率部分集光によるモジュール面積当たりの発電量向上についてはいくつかの研究例があるが、非追尾・低倍率部分集光に関する詳細な研究は今のところなされていない。部分集光コンセプトの非追尾・低倍率 CPV への適用ポテンシャルを検討するため、以降の節では、車載面年間日射量の入射角分布を考慮した光学系の設計を行い、試作モジュールを用いた屋内外試験により各種性能（光学的効率の入射角依存、屋外発電諸特性、自動車ルーフ曲面の発電量への影響）を評価した。

4.3 モジュール設計および試作

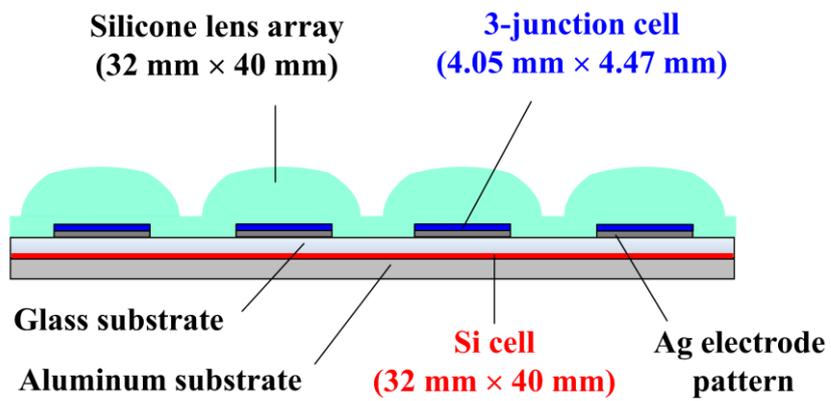
4.3.1 モジュール仕様および試作

図 4-3 に 4×5 シリコンレンズアレイ、3 接合セル(GaInP/GaInAs/Ge), Si セルからなる試作モジュールの構造を図示し、図 4-4 に試作モジュールの写真を示す。モジュール構造は、3章でモジュール面積当たりの発電量向上が確認できたシリコンレンズ封止 CPV モジュールと Si セルの 4 端子スタックとした。この構造に対して車載向け CPV の要求特性を満たすように幾何学的集光倍率、レンズ形状、モジュール厚さを決定した。車載用途ではモジュールの厚さを可能な限り薄くすることが望ましいため、今回の設計では部分集光モジュール(図 4-3(b))の総厚を約 6.0 mm とした。

モジュールの試作プロセスは 3.3.1 節と同様である。ガラス基板に Ag 回路パターンを最小限の面積でスクリーン印刷し、その上に 3 接合セルをダイボンディングおよびワイヤーボンディングで実装した。そのガラス基板上にシリコンレンズを射出成型し、Si セルを接合して部分集光モジュールとした。

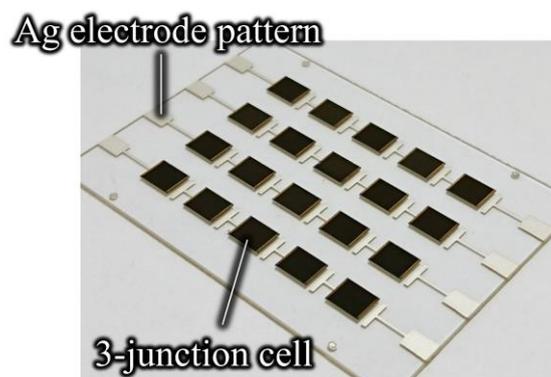


(a) コンセプトイメージ



(b) 断面図および構成要素の寸法

図 4-3 部分集光モジュールの概要



(a) 回路パターンをスクリーン印刷したガラス基板と3接合セル



(b) シリコンレンズ封止 CPV モジュール



(c) 部分集光モジュール (CPV モジュール+ Si セル)

図 4-4 試作モジュールの写真

モジュールの向き，すなわち方位角によらず同じ発電性能が求められることと3接合セルの形状が長方形であることから，レンズ形状として非軸対称非球面レンズを採用した．3接合セルに対する幾何学的集光倍率は $C_g = 3.5\times$ （単位レンズ開口面積：8 mm × 8 mm，3接合セル面積：4.05 mm × 4.47 mm）とし，レンズ形状は光線追跡法を用いた光学解析によって最適化した．詳細は次節で述べるが，レンズ形状の最適化では3接合セルへの年間光学的効率を最大化できる形状パラメータを探索した．

4.3.2 レンズ最適化設計

集光レンズは車載面（水平面）に入射する年間日射量の入射角分布を考慮して設計した．本研究では，3接合セルへの年間光学的効率 $\eta_{\text{opt_3J}}$ が最大になるレンズを最適レンズとし，光線追跡法を用いた光学解析および大域最適化アルゴリズムによってレンズ形状パラメータを探索した． $\eta_{\text{opt_3J}}$ は次式で計算される．

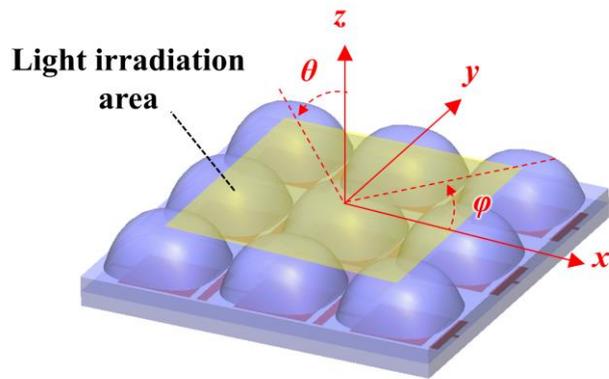
$$\eta_{\text{opt_3J}} = \frac{\int_{0^\circ}^{90^\circ} E_{3J}(\theta) d\theta}{\int_{0^\circ}^{90^\circ} E_{\text{car-roof}}(\theta) d\theta} \quad (4-2)$$

ここで， θ [°]は入射角， $E_{3J}(\theta)$ [kWh/m²]は3接合セルに到達する入射角 θ の年間日射量， $E_{\text{car-roof}}(\theta)$ [kWh/m²]は車載面に入射する入射角 θ の年間日射量である．今回のレンズ設計では $E_{\text{car-roof}}(\theta)$ として文献[14]で報告されたものを使用した．この文献では車載面年間日射量の入射角分布をモデリングするため，新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）が提供している気象データベース（METPV-11）から日本の主要47地点における20年間（1990年－2009年）の水平面上の年平均日射データ（直達日射，散乱日射）を抽出し，車載面特有の周囲の障害物

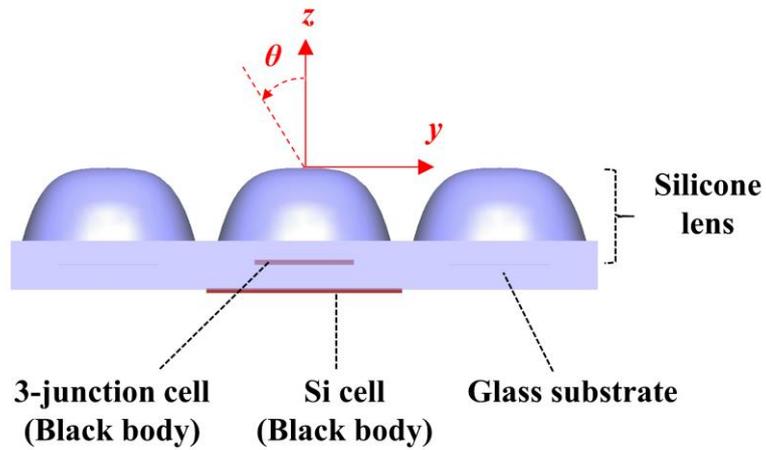
による日陰の影響を考慮している。障害物は太陽の位置によらず全方位に発生するものとし、障害物の発生確率は車載面から高さ 5° 方向で 100%、高さ 60° 方向で 0%になるよう線形的に変化すると仮定している[48]。なお、 $E_{\text{car-roof}}(\theta)$ は方位角、すなわち自動車の向きには依存しない。最適レンズの形状パラメータは幾何光学理論に基づく商用光学解析ソフトウェア (Synopsys, Inc.; LightTools 8.4.0) を用いた光線追跡シミュレーションと自主開発した大域最適化マクロプログラムにより探索した。このレンズ設計手法は、垂直入射光 (入射角 0°) のみに対して光学的効率を最大化する従来の太陽追尾型高集光倍率 CPV 向けレンズの設計アプローチとは異なり、車載面日射量の入射角特性に適合するように光学的効率の入射角特性を持たせることに特色と独創性がある。

図 4-5 に非軸対称非球面レンズの 3 次元光線追跡シミュレーションモデルを示す。隣接するレンズによる陰の影響を考慮するため 3×3 のアレイとした。アレイ中央のレンズに対して 3 接合セルと Si セルを配置し図 4-3 に示すスタック構造を再現した。図 4-5(a) に示す光線照射面に AM1.5G スペクトル (300–2000 nm)、平行度 $\pm 0.265^\circ$ (太陽視半径) の光線を半球光源から照射した。各入射角の光線エネルギーを図 4-6 の青線で示す $E_{\text{car-roof}}(\theta)$ で重みづけし、光線エネルギーの入射角分布を与えた。このことは入射角が小さい光線よりも、入射角が中程度の光線をより多く集光するのが望ましいことを意味している。モジュール構成要素の光学物性値の波長分散と異種材料界面でのフレネル反射ロスおよび内部吸収ロスを考慮した。3 接合セル、Si セルおよび回路パターンは黒体 (完全吸収体) と仮定した。非軸対称非球面レンズの形状は次式で表される。

$$z = \frac{c(x^2 + y^2)}{1 + \sqrt{1 - (1 + k) c^2 (x^2 + y^2)}} + \sum_{j=2}^{66} a_j x^m y^n \quad (4-3)$$



(a) 概観と光線照射面および座標系



(b) 断面図とセルの配置

図 4-5 非軸対称非球面レンズの3次元光線追跡シミュレーションモデル

ここで、 $c[\text{mm}^{-1}]$ は曲率、 k はコーニック定数、 α_j は多項式係数である。 j は $m+n \leq 10$ の条件を満たす m と n に対して $j = \{(m+n)^2 + m + 3n\} / 2 + 1$ として計算される値である。レンズ形状が x 軸および y 軸それぞれに対して線対称であることを考慮すると、レンズ形状は偶関数で表され、奇数次を含む項($x, y, xy, x^3, x^2y, xy^2, y^3, \dots, xy^9$)は取り除くことができる。これにより、(4-3)式の右辺第2項は以下の20個の項に展開される。

$$\sum_{j=2}^{66} \alpha_j x^m y^n = (X2)x^2 + (Y2)y^2 + (X4)x^4 + (X2Y2)x^2y^2 + (Y4)y^4 + \dots \\ + (X6Y4)x^6y^4 + (X4Y6)x^4y^6 + (X2Y8)x^2y^8 + (Y10)y^{10} \quad (4-4)$$

ここで、 $(XmYn)$ は $x^m y^n$ の項の多項式係数である。レンズ厚さを4.0 mmに固定した状態で η_{opt_3l} が最大になるレンズ形状パラメータを大域最適化プログラムを用いて探索した。表4-1に設計したレンズの形状パラメータを示す。

図4-6に設計したレンズにより3接合セルおよびSiセルに集光できる年間日射量($E_{3j}(\theta)$, $E_{\text{Si}}(\theta)$)および車載面年間日射量($E_{\text{car-roof}}(\theta)$)の入射角特性を示す。シミュレーション結果から設計したレンズにより車載面に入射する年間日射量の46.6%を3接合セルに、36.4%をSiセルに集光できる一方で17.0%の光学損失が生じることがわかった。この光学損失の原因および内訳は、異種材料界面でのフレネル反射(空気-レンズ界面:8.0%, レンズ-ガラス基板界面:0.3%), モジュール構成材料による内部吸収(シリコンレンズ:4.5%, ガラス基板:1.0%), ガラス基板上の不透明Ag電極パターンによる影(3.2%)である。

今回設計した部分集光モジュールの年間モジュール効率是一次式で定義される。

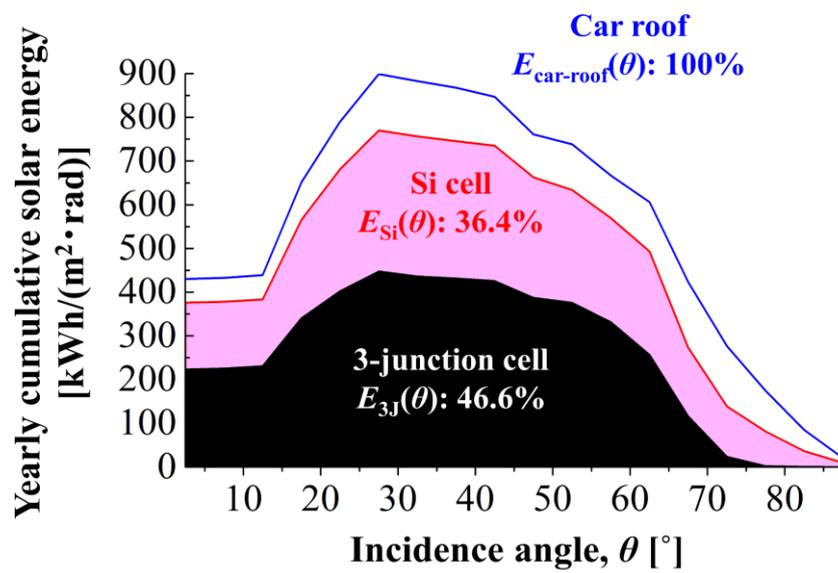


図 4-6 設計したレンズにより 3 接合セルおよび Si セルに集光できる車載面年間日射量の入射角特性

表 4-1 設計したレンズの形状パラメータ

Parameter	Symbol	Value
Curvature	c [mm^{-1}]	0
Conic constant	k [-]	0
Polynomial coefficients	α_j (X2) [mm^{-1}]	0.029274
	(Y2) [mm^{-1}]	0.022829
	(X4) [mm^{-3}]	0.011089
	(X2Y2) [mm^{-3}]	0.011707
	(Y4) [mm^{-3}]	0.014756
	(X6) [mm^{-5}]	-6.1256E-05
	(X4Y2) [mm^{-5}]	-3.4999E-05
	(X2Y4) [mm^{-5}]	-1.7669E-05
	(Y6) [mm^{-5}]	1.1784E-05
	(X8) [mm^{-7}]	9.4394E-06
	(X6Y2) [mm^{-7}]	9.5797E-06
	(X4Y4) [mm^{-7}]	5.0489E-06
	(X2Y6) [mm^{-7}]	-1.4891E-06
	(Y8) [mm^{-7}]	6.2308E-06
(X10) [mm^{-9}]	6.4896E-07	
(X8Y2) [mm^{-9}]	2.0960E-07	
(X6Y4) [mm^{-9}]	4.6413E-07	
(X4Y6) [mm^{-9}]	1.9799E-07	
(X2Y8) [mm^{-9}]	3.7837E-07	
(Y10) [mm^{-9}]	6.9978E-07	

$$\eta_{\text{annual}} = \eta_{\text{opt_3J}} \times \eta_{3\text{J}} + \eta_{\text{opt_Si}} \times \eta_{\text{Si}} \quad (4-5)$$

ここで、 η_{opt} 、 η はそれぞれ年間光学的効率、セル変換効率を意味しており、添え字 3J, Si はそれぞれ 3 接合セル, Si セルを表している。もし、1 sun (1000 W/m²) 照射下での最高変換効率セル ($\eta_{3\text{J}} = 37.9\%$ [46], $\eta_{\text{Si}} = 26.7\%$ [4]) を用いてかつ、レンズの光学的効率 ($\eta_{\text{opt_3J}} = 46.6\%$, $\eta_{\text{opt_Si}} = 36.4\%$) およびセル変換効率が年間を通じて変化しないと仮定した場合、年間モジュール効率は最大で $\eta_{\text{annual}} = 27.4\%$ に達する。(4-1)式よりこの年間効率を有するモジュールを屋根とボンネット (2.5 m²) に搭載した場合、1 日当たり 27 km 走行できる。なお、実際の動作環境では、太陽電池セルの温度上昇や太陽スペクトル変化の影響を受け、さらに実用サイズへ拡張した際には電気回路損失や保護部材による光学損失なども生じるため、実際の効率はこの値よりも若干小さくなる。

4.4 モジュール性能評価および設計の妥当性検証

4.4.1 光学的効率の入射角依存性

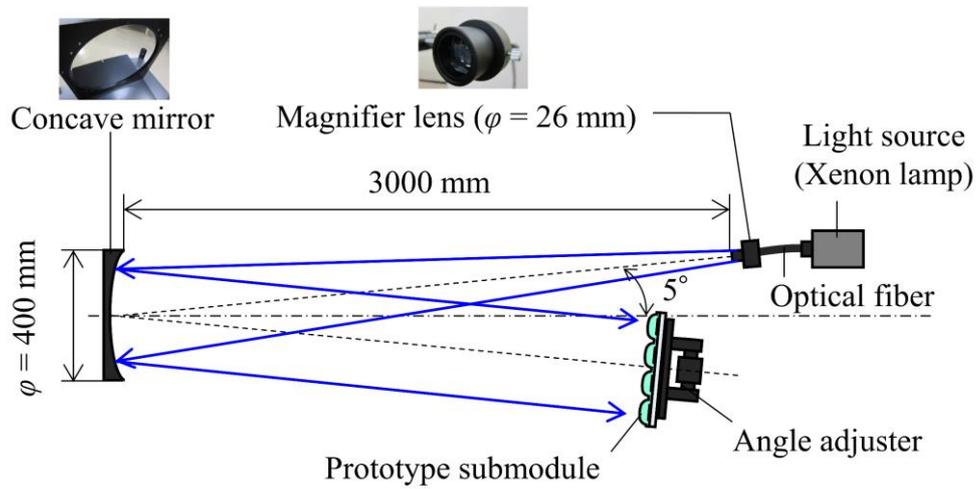
モジュール設計の妥当性を検証するため、屋内試験により試作モジュールの光学的効率の入射角依存性を調査した。試作モジュール内の各セルへの光学的効率は、各セルが受ける光量に対するモジュール開口に入射する光量の比として定義した。光学的効率は研究室内で構築した低照度/高平行度ソーラーシミュレータ[34]を用いて測定した。このソーラーシミュレータから照射される疑似太陽光は平行度 $\pm 0.2^\circ$ 以下(太陽視半径は $\pm 0.265^\circ$)、照度は 0.01 sun (10 W/m²)である。図 4-7 に実験装置構成を示す。試作モジュールを高精度サーボモータで駆動する 2 軸角度調整器に搭載した。光学的効率の入射角依存は $\varphi = 0^\circ$ (モジュールを x 軸周りに回転させた場合、方向 1) と $\varphi = 90^\circ$ (モジュールを y 軸周りに回転

させた場合、方向 2) に対して測定した。各入射角に対する 3 接合セルへの光学的効率は試作モジュール (図 4-4(c)) 内の 3 接合セルの短絡電流値とレンズをつけていない 3 接合セル (図 4-4(a), 非集光時) の短絡電流値の比を幾何学的集光倍率 ($C_g=3.5\times$) で除した値として計算した。同様に, Si セルへの光学的効率は試作モジュール (図 4-4(c)) 内の Si セルの短絡電流値と CPV モジュール (図 4-4(b)) がない状態での Si セルの短絡電流値の比として計算した。

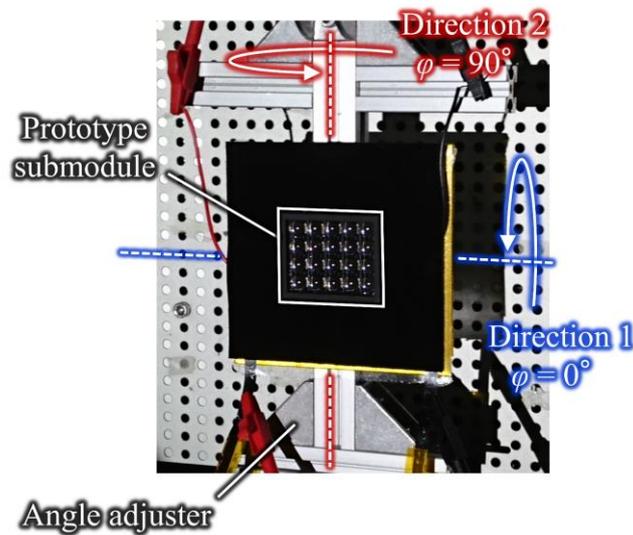
図 4-8 に光学的効率の入射角依存の測定値およびシミュレーション結果を示す。いずれの場合も測定値とシミュレーション結果はよく一致した。どちらの回転方向に対しても, 3 接合セルへの光学的効率は入射角 $\theta=0^\circ$ のとき約 50% であり, 許容角 ($\theta=0^\circ$ での光学的効率の 90% になる角度) は約 60° であった。Si セルへの光学的効率は $\theta=0^\circ$ のとき約 40% であり, $\theta=60^\circ$ まではほぼ一定値で推移し, その後 $\theta=60^\circ-75^\circ$ にかけて増加した。また, $\theta=0^\circ-60^\circ$ の範囲では両セルへの光学的効率の合計は約 90% に達し, モジュール開口に入射する光の 90% を発電に利用できることがわかった。図 4-6 に示す車載面年間日射量の入射角分布 $E_{\text{car-roof}}(\theta)$ の 0° から 60° までの積分値は総年間日射量の 85% を占める。以上の結果から, 設計したレンズは車載面の日射特性に適合した光学的効率の角度特性を示すことが確認できた。

4.4.2 1 日間の屋外発電性能

試作モジュールの 1 日間の発電性能を評価するため, 大学キャンパス内で屋外試験を行った。図 4-9 に屋外試験の装置構成を示す。部分集光モジュールおよび同モジュールに使用されている太陽電池セルと同じ種類の 3 接合セルと Si セルを用いたリファレンスモジュールを水平面に設置した。リファレンスモジュールの開口面積は試作モジュールと同じであり, Si モジュールは表面にガラス

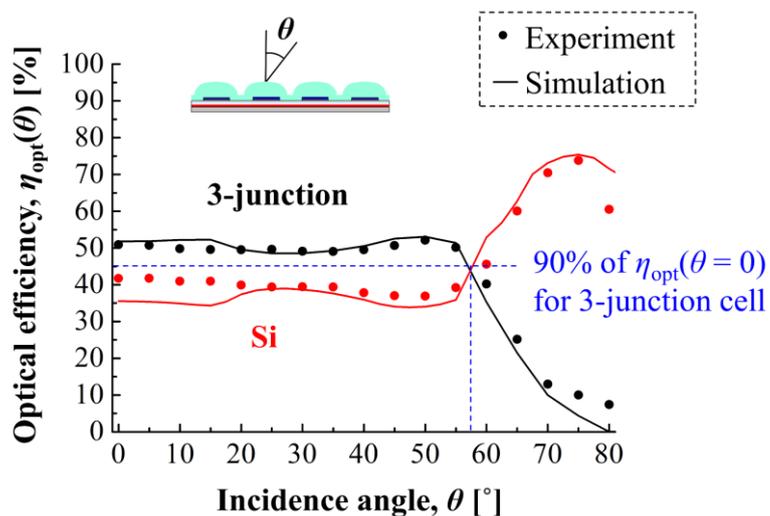


(a) 低照度/高平行度ソーラーシミュレータの光学系配置

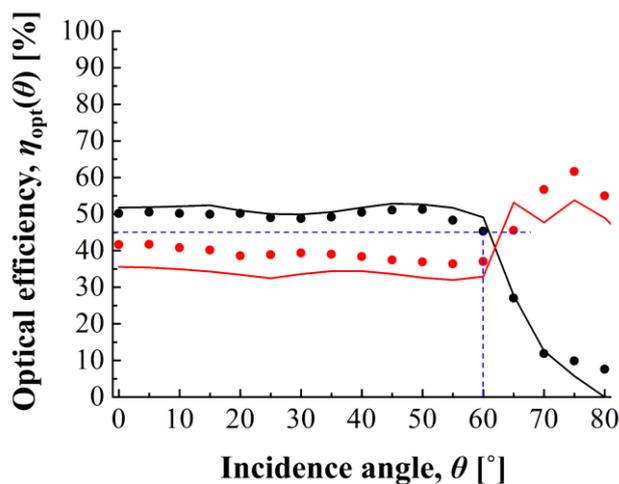


(b) 試作モジュール周辺の拡大図および回転方向

図 4-7 光学的効率測定のための実験装置構成



(a) $\varphi = 0^\circ$ (Direction 1)



(b) $\varphi = 90^\circ$ (Direction 2)

図 4-8 3 接合セルおよび Si セルへの光学的効率の入射角依存性

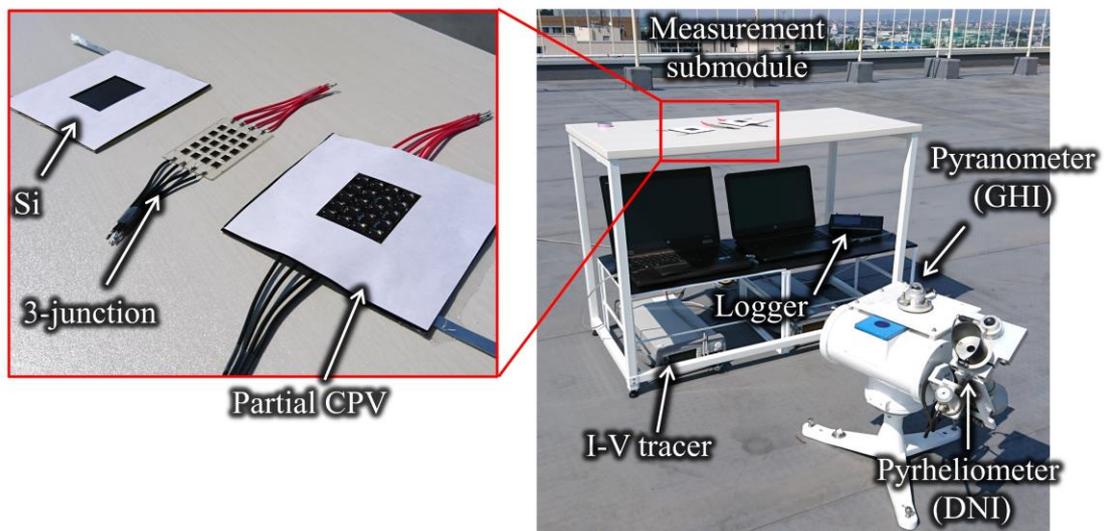


図 4-9 屋外試験の装置構成

カバーを付与せず1枚のセルを Ethylene-Vinyl Acetate (EVA) で封止した構造とした。レンズの非軸対称設計の発電性能への影響を確認するため、南中時刻(約12:00)を境にモジュールの設置方位角を90°回転させた。すなわち、3接合セルの直列接続の方向を12:00までは東西に向け、12:00以降は南北に向けた。太陽追尾面直達日射量(DNI)と水平面全天日射量(GHI)を直達日射計(英弘精機株式会社, MS-54)および全天日射計(英弘精機株式会社, MS-602)を用いて測定し、測定したDNIと太陽軌道から水平面直達日射量(DHI)を算出した。試作モジュール内の3接合セルとSiセルの電流-電圧(I-V)特性を2チャンネルのソース/メジャーユニット(Keysight Technologies, B2902A)を用いて独立かつ同時に測定した。また、リファレンスモジュールのI-V特性も発電量の比較および光学的効率計算のため測定した。

図4-10に快晴日(2018年5月22日)の測定で得られたGHI基準モジュール効率 η_{GHI} 、モジュール面積当たりの総発電量 P_{max} 、および日射量(GHI, DHI)の時間変化を示す。モジュールの総発電量 P_{max} は3接合セルとSiセルの最大発電量の和と定義した。 η_{GHI} の最大値は21.7%であり、日中(7:00-16:00)にわたりほぼこの値を維持し、モジュールの設置方位角の発電性能への影響はほとんどないことがわかった。部分集光モジュールの日積算発電量(1.61 kWh/m²)はリファレンスSiモジュールの日積算発電量(1.22 kWh/m²)の1.32倍となった。開放電圧 V_{oc} と曲線因子FFはセル面上の不均一遮光により低下する。今回の部分集光モジュールではガラス基板上の回路パターンがSiセル上に不均一遮光を形成するが、リファレンスSiモジュール(不均一遮光無し)と比較した V_{oc} およびFFの相対低下は約5%と小さかった。

図4-11に光学的効率の屋内試験結果および屋外試験結果の比較を示す。光学的効率は4.4.1節と同様の方法により、部分集光モジュール内の各セルの短絡電

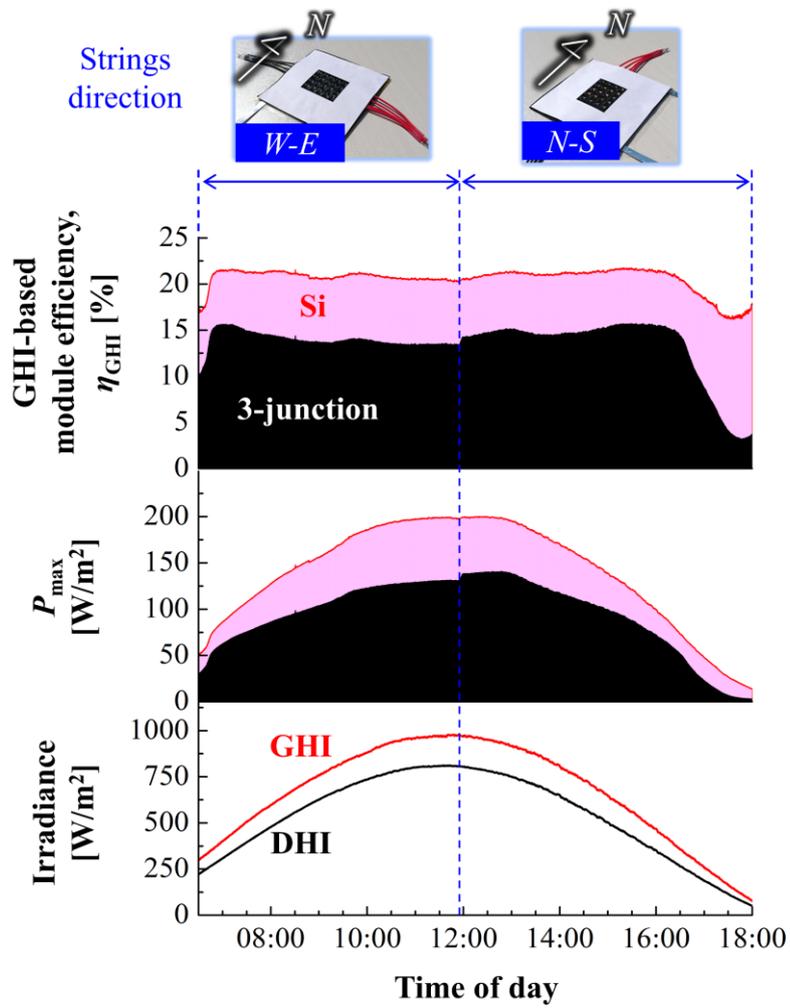


図4-10 快晴日のGHI基準モジュール効率 η_{GHI} 、モジュール面積当たりの総発電量 P_{max} 、および日射量(GHI, DHI)の時間変化

流値と各リファレンスモジュールの短絡電流値の比を用いて計算した。屋外試験結果は屋内試験結果と入射角 60° 以下ではよく一致し、それより大きな入射角で誤差がやや大きくなった。しかし、日積算日射量のうち入射角 60° 以上の成分の割合は 10% と大きくないため、1 日の総発電量を評価する上では問題ないと考えられる。

図 4-12 に部分集光モジュールおよび各リファレンスモジュールの日平均 η_{GHI} (= 日積算発電量/日積算 GHI) を示す。また、この結果から最高効率セルを用いた場合に見込まれるモジュール効率も示す。今回の部分集光モジュールの日平均 η_{GHI} は使用したセルの変換効率が低い (標準試験条件 (STC) で 3 接合セル : 30.5%, Si セル : 18.4%) ため 20.8% に留まった。もし、現在の最高変換効率セルを用いた場合、3 接合セルの変換効率は 30.5% から 37.9% [46] まで上昇し、Si セルの変換効率は 18.4% (単結晶) から 26.7% (ヘテロ接合バックコンタクト) [4] まで上昇する。これらの値から直線外挿を行うと部分集光モジュールの日平均 η_{GHI} は 27.3% まで向上すると見込まれ、年間モジュール効率のシミュレーション結果 (27.4%) とよく一致した。実験結果を精査した結果、以下の事が明らかになった。1) 温度上昇によりセル変換効率が低下した。2) 1 日間の光学的効率がシミュレーション結果よりも若干高かった。この差異は実験と年間シミュレーションで日射の入射角分布が異なることが原因である。効率計算で考慮した総日射量のうち入射角 $0^\circ - 60^\circ$ (試作モジュールがピークの光学的効率を維持できる範囲) の成分が占める割合は実験で 90%、年間シミュレーションで 85% であった。以上のような誤差要因はあるものの、実験により設計の妥当性および車載面上での年間モジュール効率約 27% のポテンシャルを確認できた。

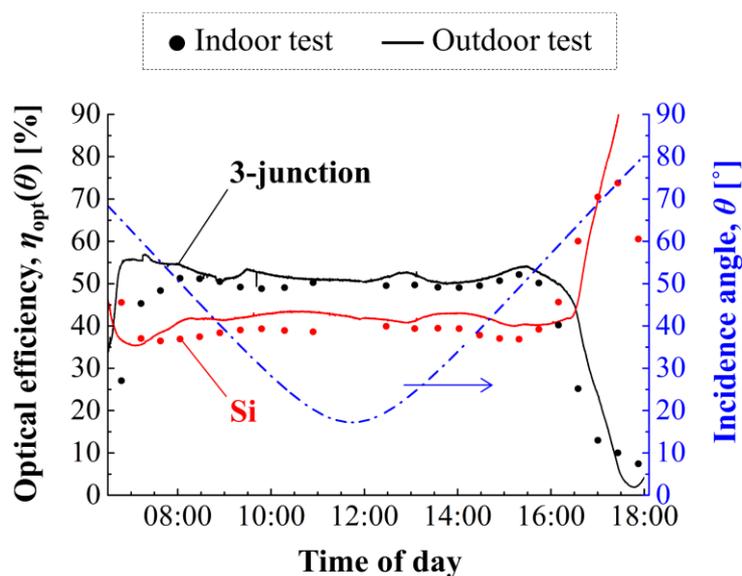


図 4-11 光学的効率の屋内試験結果と屋外試験結果の比較

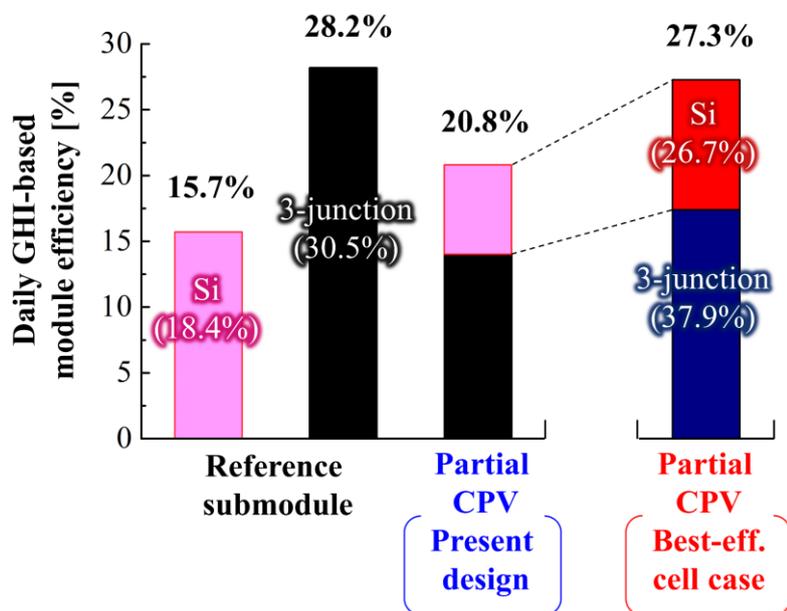


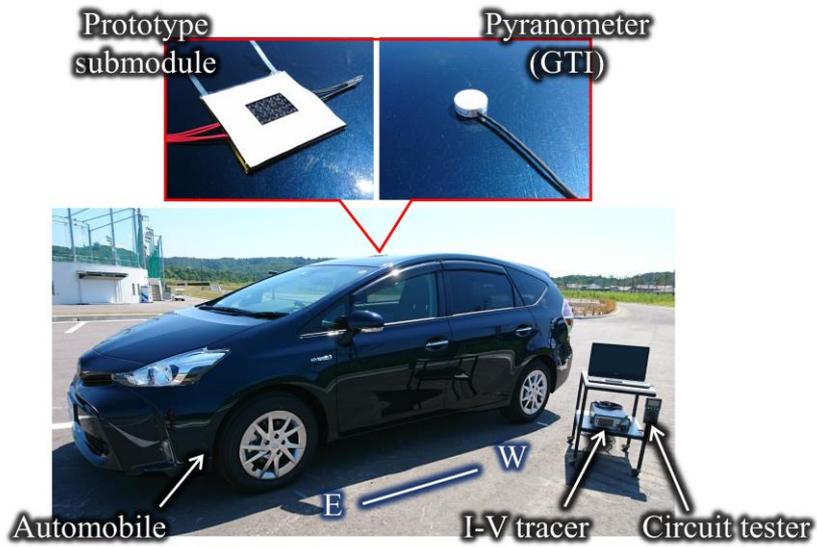
図 4-12 部分集光モジュールおよびリファレンスモジュールの日平均 GHI 基準モジュール効率. 現在の最高効率セルを用いた場合に見込まれるモジュール効率も示す. 標準試験条件 (STC) でのセル変換効率を括弧内に示す.

4.5 車載面の曲率が発電性能に及ぼす影響

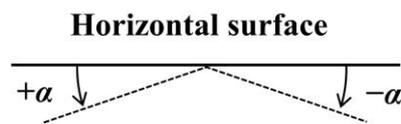
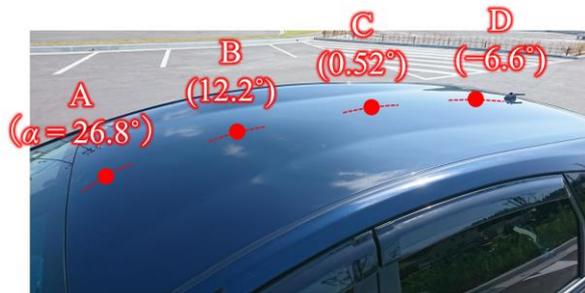
自動車ルーフの曲率が発電性能に及ぼす影響を明らかにするため、試作モジュールを実際の自動車ルーフに搭載し、発電量の時間変化を測定した。図 4-13(a)に実験装置の構成を示す。快晴日（2018年7月31日）に、周囲に障害物がない平地に自動車（トヨタ自動車株式会社、PRIUS α ）を東西向きに駐車した。4.4.2節で用いた部分集光モジュールおよびリファレンス Si モジュールの電流-電圧 (I-V) 特性を2チャンネルのソース/メジャーユニット（Keysight Technologies, B2902A）を用いて測定した。測定点は図 4-13(b)に示す傾斜角の異なる4点（ $-6.6^\circ \leq \alpha \leq 26.8^\circ$ ）とし、自動車ルーフをほぼ2次元曲面とみなし中心軸上に分布させた。各測定点で I-V 測定後すぐにモジュールを小型日射計（英弘精機株式会社, ML-02）に置き換え、傾斜面全天日射量（Global tilted irradiance: GTI）も測定した。測定は7:00 から 17:00 の間1時間ごとに行い、各時間での一連の測定は5分以内（太陽の高度角変化が 1° 以下）で行った。

図 4-14 に4測定点での GTI および発電量 P_{\max} の時間変化を示す。左側の積み重ね棒グラフ（桃色+黒色）は部分集光モジュール、右側の棒グラフ（桃色）はリファレンス Si モジュールの発電量を示している。どの測定点においてもほぼすべての時間で、部分集光モジュールの発電量はリファレンス Si モジュールの発電量よりも高くなっており、日積算発電量は測定点によらずリファレンス Si モジュールの1.2-1.3倍高くなった。しかしながら、 P_{\max} の時間変化の傾向が4測定点間で異なっており、これはモジュールを大面積に展開した際のモジュール内の発電量ミスマッチングロスの原因になりうる。

自動車ルーフ上の P_{\max} のばらつきを定量化するため、評価因子 ζ [-] を4測定点間の P_{\max} の最大値と最小値の比率として定義した。図 4-15 に部分集光モジュールおよびリファレンス Si モジュールの ζ の時間変化を示す。この図から ζ

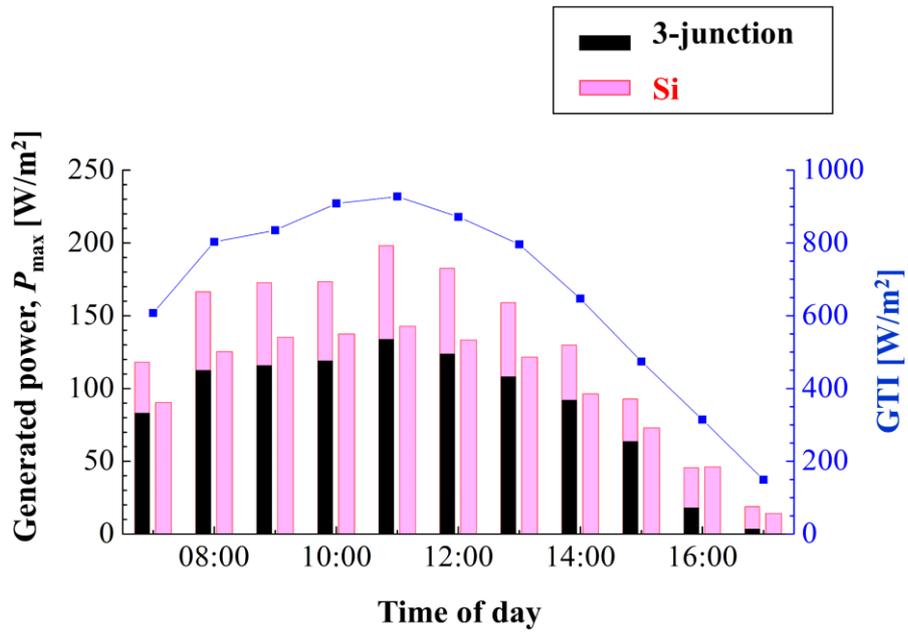


(a) 装置構成

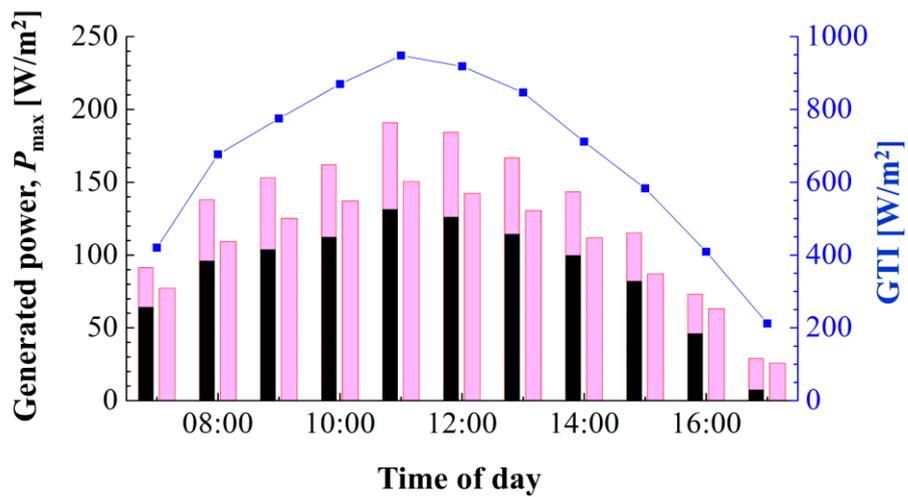


(b) 自動車ルーフ上の測定点および傾斜角

図 4-13 自動車ルーフ上試験の装置構成および測定点

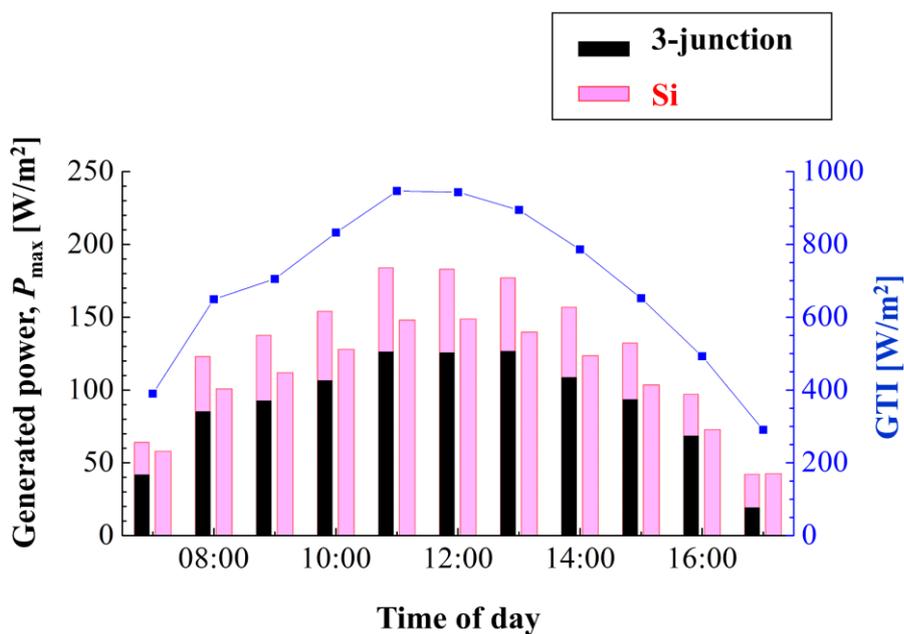


(a) Position A ($\alpha = 26.8^\circ$)

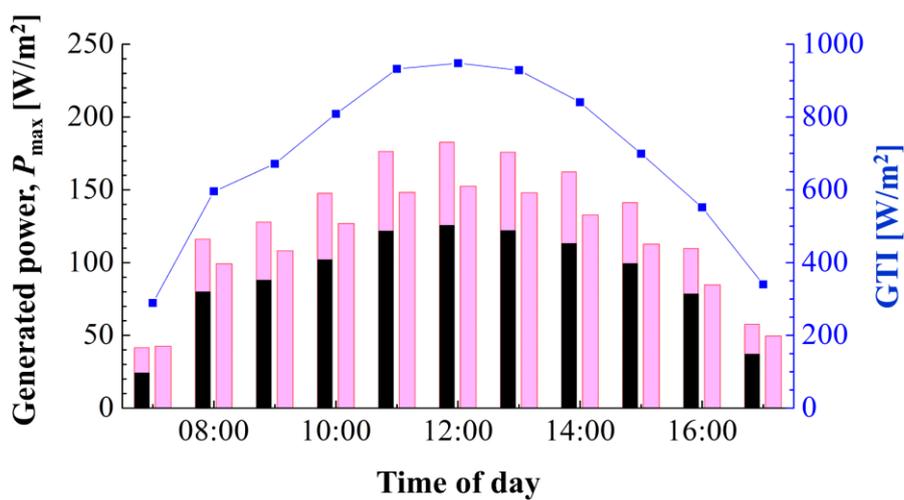


(b) Position B ($\alpha = 12.2^\circ$)

図 4-14 図 4-13(b)の 4 測定点における部分集光モジュール、リファレンス Si モジュールの発電量および GTI の時間変化



(c) Position C ($\alpha = 0.52^\circ$)



(d) Position D ($\alpha = -6.6^\circ$)

図 4-14 図 4-13(b)の 4 測定点における部分集光モジュール、リファレンス Si モジュールの発電量および GTI の時間変化

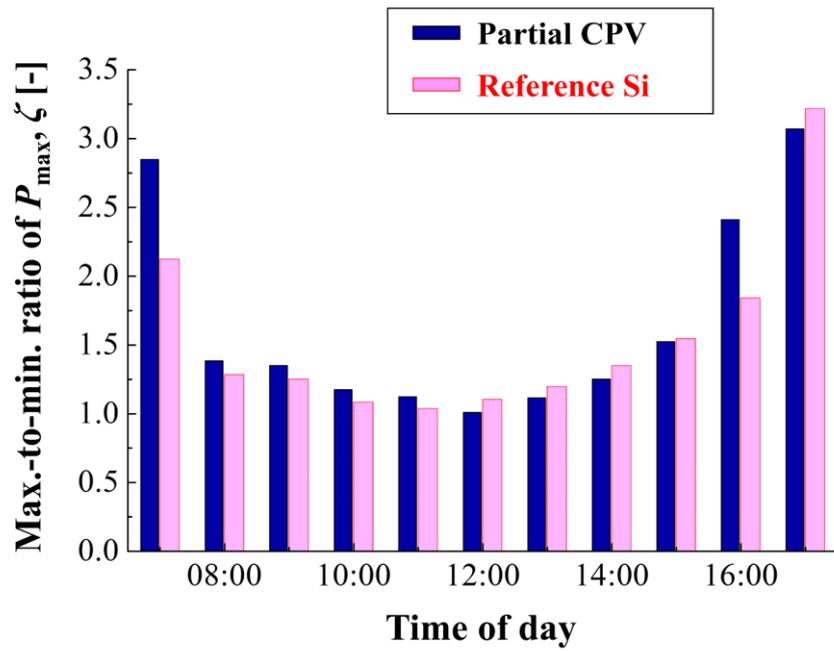


図 4-15 4 測定点間の発電量 P_{\max} の最大値と最小値の比率 ζ の時間変化

は朝方と夕方が大きくなっていることがわかる。日中のほとんどの時間で部分集光モジュールとリファレンス Si モジュールの ζ の差は 0.1 以下であったが、朝方 (7:00) と夕方 (16:00) で一時的に ζ の差が 0.7 まで大きくなった。これは 4 測定点への入射角が部分集光モジュールの許容入射半角 ($\theta_a \sim 60^\circ$) 以下の点とそれ以上の点に分かれるためである。具体的には、7:00 では A 点と B 点への入射角は θ_a 以下であるが、C 点と D 点への入射角は θ_a 以上になり、この関係は 16:00 では逆転する。以上の測定データを用いて発電量ミスマッチングロスが自動車ルーフ上の日積算発電量に及ぼす影響を評価した。部分集光モジュール内の 3 接合セルと Si セルをそれぞれ 4 測定点間で直列接続すると仮定した場合、各時間での出力電流はストリング内のセルの最小電流値に律速される。これにより、日積算発電量は水平面設置 (発電量ミスマッチングロスなし) の場合の 85.0% となった。一方で、リファレンス Si モジュールのそれは 86.3% であった。これらの結果は、自動車ルーフ曲面はその形状により自身の一部に陰を作るため、特に朝夕でルーフ面内での発電量不均一が生じるが、部分集光モジュールの広い許容入射半角により、その影響は平板 (曲面) PV モジュールと同程度に抑えられることがわかった。

4.6 年間モジュール効率 30%の実現に向けた考察

以上までの節で、本研究で設計したモジュールが年間効率 27% のポテンシャルがあることを明らかにした。その結果を踏まえて本節では目標である年間効率 30% の実現可能性について考察する。

本研究の集光レンズは、3 接合セルへの年間光学的効率 (3 接合セルに集光できる車載面年間日射量) を最大化することを目指して設計されたものである。設計したレンズにどの程度性能改善の余地があるかを把握するため、まず車載面

年間日射量に対する3接合セルへの光学的効率の理論限界について検討した。

(2-5)式で表される幾何学的集光倍率 C_g と集光限界角度 θ_a の関係は、エテンデューの保存 [18] から導かれる。エテンデューはハミルトニアン光学の中で位相空間内の体積として定義され、光の面積と角度の広がりの特徴付けている。屈折率 n の媒質中にある微小要素 dA に対して光が入射角 θ で入射する場合、その光のエテンデューは次式で定義される。

$$dG = n^2 dA \cos\theta d\Omega = n^2 dA \cos\theta \sin\theta d\theta d\varphi \quad (4-6)$$

ここで、 G [m^2] はエテンデュー、 n は周囲媒質の屈折率、 A [m^2] は光が入射する面の面積、 Ω は立体角、 φ は方位角である。本研究のCPVモジュールでは、図4-16に示す光学系においてレンズ開口に入射する光および太陽電池セルに集光される光のエテンデューが保存される。レンズ開口に入射する光のエテンデューは dG_{conc} を任意の方位角範囲および高度角範囲 (図4-17) にわたって積分したものであり、次式で表される。

$$G_{\text{conc}} = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} dG_{\text{conc}} = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} n_{\text{air}}^2 dA_{\text{lens}} \cos\theta \sin\theta d\theta d\varphi \quad (4-7)$$

同様に、太陽電池セルに集光される光のエテンデューは次式で表される。

$$G_{\text{cell}} = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \int_0^{\beta} dG_{\text{cell}} = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \int_0^{\beta} n_{\text{lens}}^2 dA_{\text{cell}} \cos\theta \sin\theta d\theta d\varphi \quad (4-8)$$

方位角方向全域にわたって積分し ($\varphi_1 = 0^\circ$, $\varphi_2 = 360^\circ$)、エテンデューの保存 (G_{conc}

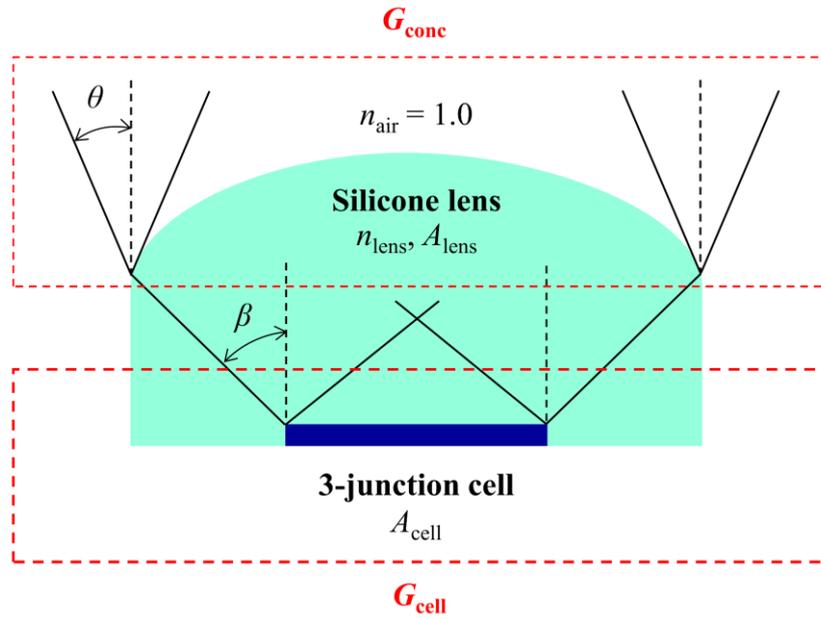


図 4-16 CPV 光学系におけるエテンデュー

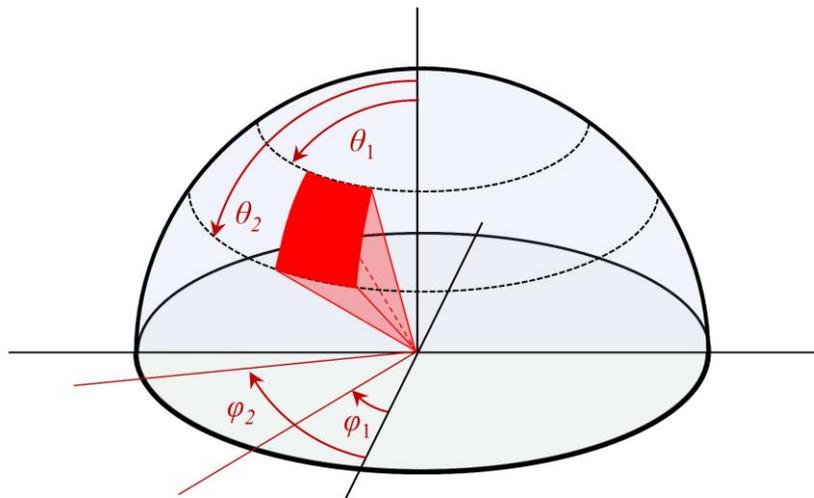


図 4-17 半球積分角度の定義

$= G_{\text{cell}}$) を適用すると、最大集光時の幾何学的集光倍率 C_g と入射角範囲 θ_1, θ_2 の関係は次式として算出される。

$$C_g = \frac{A_{\text{lens}}}{A_{\text{cell}}} = \frac{n_{\text{lens}}^2}{n_{\text{air}}^2} \frac{\sin^2 \beta}{\sin^2 \theta_2 - \sin^2 \theta_1} = \frac{n_{\text{lens}}^2}{\sin^2 \theta_2 - \sin^2 \theta_1} \quad (4-9)$$

なお、 $n_{\text{air}} = 1.0$ 、 $\beta = 90^\circ$ (最大集光) を代入している。

今回設計したシリコンレンズの仕様 ($C_g = 3.5\times$ 、 $n_{\text{lens}} = 1.41$) に対して、(4-9)式を満たしかつ、3 接合セルに集光される車載面年間日射量 (図 4-6 青線) を最大化できる入射角範囲は $\theta_1 = 0^\circ$ 、 $\theta_2 = 48.9^\circ$ であることが分かった。このとき、3 接合セルへの年間光学的効率は $\eta_{\text{opt_3J}} = 70.0\%$ (理論最大効率) であるが、本研究で設計したレンズは $\eta_{\text{opt_3J}} = 46.6\%$ に留まった。この大きな原因はモジュール開口面積に占めるレンズ間隙間の面積 (集光に無効な領域: デッドエリア) の割合が大きい (28.8%) ことである。部分集光はこのデッドエリアによる損失を補うことが可能であるが、さらなる年間モジュール効率向上に向け 3 接合セルへの光学的効率を改善する必要がある。

以上より、3 接合セルおよび Si セルへの年間光学的効率がそれぞれ $\eta_{\text{opt_3J}} = 70.0\%$ 、 $\eta_{\text{opt_Si}} = 30.0\%$ のとき部分集光モジュールの年間効率が最大になる。このことと最高変換効率セル ($\eta_{3J} = 37.9\%$ [46]、 $\eta_{\text{Si}} = 26.7\%$ [4]) の使用を想定した場合、(4-5)式に示す年間モジュール効率 η_{annual} は最大 34.5% まで向上でき、部分集光による年間効率 30% 超えのポテンシャルが示された。今後はレンズ間のデッドエリアをなくすため、非球面レンズのみならず、様々なレンズ形状を広く検討する必要がある。

4.7 まとめと今後の課題

本章では車載向け高効率 PV モジュールとして非追尾・低倍率部分集光モジュールに着目した。車載面年間日射量の入射角特性を考慮してレンズを設計し、試作モジュールを用いて性能を実験検証した結果以下の知見を得た。

- (1) 3 接合セルと Si セルの 4 端子スタックをシリコンマイクロレンズで封止したモジュールを設計した。シリコンレンズは車載面（水平面）年間日射量の入射角特性に適合するように形状を最適化した。設計したレンズは車載面に入射する年間日射量の 46.6% および 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わかった。
- (2) 設計したレンズの 3 接合セルへの光学的効率は車載用 CPV に適した入射角特性を示した。具体的にはピークの光学的効率は約 50% と低いものの、許容入射半角を約 60° まで広げることができた。また、この入射角特性を試作モジュールを用いて実験検証し、設計の妥当性を確認した。
- (3) 快晴日に試作モジュールを水平面に設置し 1 日の屋外発電性能を測定した。日中 (7:00–16:00) を通じて GHI 基準モジュール効率の最大値を維持できた。また、各セルの最高変換効率を想定して年間モジュール効率を推定した結果 27.3% に達し、PV のみで 1 日 27 km 走行できるポテンシャルを示した。
- (4) 実際の自動車ルーフに試作モジュールを搭載し、ルーフの曲率が発電量に及ぼす影響を評価した。部分集光モジュールはルーフ曲面の位置によらず 1 日のほぼ全ての時間で Si 平板モジュールより高い発電量を示した。また、ルー

フ曲面 (モジュール内の発電量ミスマッチングロス) が日積算発電量に及ぼす影響は曲面 PV モジュールと同程度であることがわかった。

以上より、本モジュール設計の車載応用の技術ポテンシャルを確認できた。

今後の研究では、目標である年間モジュール効率 30%の実現に向けて、以下の3項目について検討し、モジュール設計の完成度を高めていく。

- 1) 本研究では光学系として非球面レンズしか考慮しておらず、他のレンズ形状についても広く検討する。
- 2) 光学的効率の向上に向けて光学損失の低減が必要である。フレネル反射は空気-レンズ界面への反射防止膜の付与により、レンズやガラス基板による内部吸収は厚さを薄くすることにより改善可能である。また、ガラス基板上の電極パターンによる影の影響は透明導電材料の使用により緩和できる。
- 3) 集光倍率 (3 接合セルの面積) についても検討の余地がある。集光倍率を高めることによって3 接合セルの変換効率が向上するが、一方で許容角が狭くなる。このトレードオフの中に存在する最適集光倍率を探索する。

また、汚れのリスクや洗浄、デザイン性の観点からモジュール表面は平らであることが望ましい。レンズ表面に平らで透明な保護層 (ガラスカバーなど) を付与した場合の光学的効率への影響も併せて評価する。

第5章 宇宙太陽発電システム用送電一体パネルの熱設計

5.1 はじめに

宇宙空間では、季節、天候、昼夜の影響および大気によるエネルギーの減衰がないため、地上の約10倍の太陽エネルギーを利用することができる。このため、宇宙太陽発電システム（Space Solar Power System: SSPS）が実現できれば地上のPVシステムの課題である「設備利用率の低さ（15%）」および「設置場所の制限」を緩和する手段になり得る。SSPSの中で主要な構成要素の一つが太陽発電衛星（Solar Power Satellite: SPS）である。SPSは宇宙空間に巨大な太陽光発電パネルを展開し、発電した電力を地上に無線伝送する技術である。Glaser博士のアイデア提唱以降[15]、米国、欧州、日本で様々な形式のSPS[49]–[53]が研究されてきたが、各々が有する技術課題により未だ実現に至っていない。例えばNASA/DOEによるリファレンスシステム[49]では、巨大な太陽指向のPVモジュールと地球指向の送電アンテナ間での回転駆動部を介した大電力伝達や、PVモジュールから送電部までの長距離電力伝送の面で技術課題があった。また、これらは単一障害点になるため、長期信頼性の面でも課題があった。また、これまで研究されてきたSPSのほとんどは太陽追尾を行うか、反射鏡で太陽光を集光して常に発電し続けるコンセプトである[49]–[53]。しかし、太陽追尾システムは構造の複雑化を招き、大規模なPVパネル、集光鏡の姿勢を任意に制御することは困難な技術であった。

これらとは異なるアプローチとして、宇宙航空研究開発機構（Japan Aerospace Exploration Agency: JAXA）は技術課題を最小限にしたシンプルな構造の「テザー型SPS」を早期実現に向けたパイロットモデルと位置づけ研究を行っている

[54]. 図 5-1 にテザー型 SPS のシステム構成および各要素の目標効率を示す. テザー型 SPS は太陽追尾や集光システムを用いないため, 太陽電池セルを上下面両方に搭載したとしても設備利用率は約 60%に留まるが (太陽追尾を行った場合はほぼ 100%), 以下の利点がある. 1) PV モジュール (発電部), 直流-マイクロ波 (DC-RF) 変換部, 送電アンテナが 1 枚のパネルに集約された送電一体パネルを搭載することで構造をシンプルにできる. 2) 平板サンドイッチ構造にすることで, 大面積 (2.5 km \times 2.4 km) のパネルを周期構造に分割し, 打ち上げ時にはコンパクトに折り畳むことができる. 3) 重力傾斜のみで送電アンテナ面が地球を向くようにパネルの姿勢を制御できる. テザー型 SPS の実現に向け, マイクロ波送電[55]-[62]や高効率太陽電池セル[12], [63], [64]などの要素技術の研究は着実に進んでいるが, 送電一体パネルの具体構造設計に関する研究は今のところ詳細になされていない.

本研究では, システムの長期性能・信頼性維持に不可欠な熱設計に着目した. 熱設計の先行研究として, Jaffe らは集光型 SPS 用のサンドイッチモジュールの具体設計を行い, 集光時の定常温度を評価している[65]. テザー型 SPS は太陽追尾を行わないため, 静止軌道周回中, パネル面への太陽光入射角が時間変化し, それに伴い構成要素の温度が周期的に変化する. また, その温度変化によって生じる送電アンテナ面の熱変形がマイクロ波送電精度を低下させることが懸念されている. 本章では, これまで詳細に研究されていなかった送電一体パネルの基本構造のモデリング, 試作パネルを用いた実環境に近い条件での実験および数値解析シミュレーションにより軌道周回中の熱特性を明らかにした. さらに, パネル温度変化を設計要求範囲内に維持するため, 波長選択コーティング (Spectrally Selective Coating: SSC) を太陽電池面に付与する方法に着目し, 軌道周回中の温度プロファイルに与える効果を検討した.

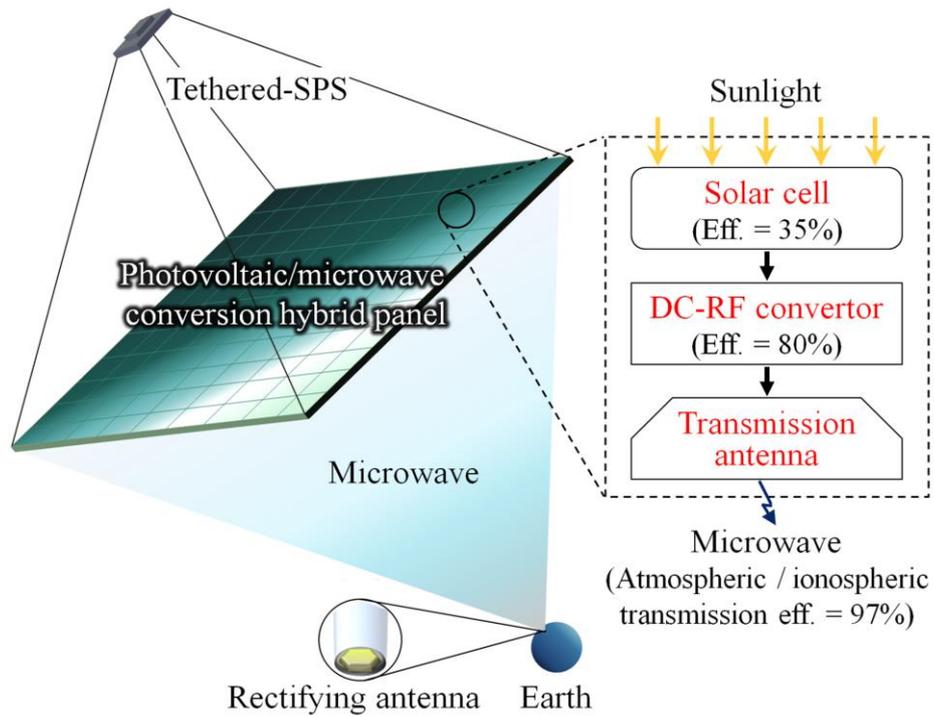


図 5-1 テザー型 SPS の構成および各要素の目標効率

5.2 発電一体パネルの具体設計

図 5-2 に本研究で設計した発電一体パネルの構造を図示する。発電一体パネルは発電層，DC-RF 変換層，送電層の 3 つの機能層がアルミハニカムコアで支持されたサンドイッチ構造とした。

発電層では高効率かつ軽量の多接合セル（例：Space solar sheet [63]）により太陽光発電を行う。DC-RF 変換層は太陽電池セルで発電した電力をマイクロ波に変換し，送電層は表面のフェーズドアレイアンテナによりマイクロ波を地上へ伝送する役割を担う。本研究では発電一体パネルの単位周期（158 mm × 158 mm）に 4 個のパワーアンプを使用するものとし，単純化のため DC-RF 変換層の構成をパワーアンプと回路基板のみとし，他の電子機器（移相器，配線ケーブル等）は考慮しないこととした。これは，パワーアンプが DC-RF 変換系の電子機器の中でもサイズおよび電力消費（発熱密度）が特に大きく，熱設計への影響が支配的と予想されるためである。また，日積算発電量を大きくするため，発電層に用いた太陽電池セルを送電層のアンテナ以外の面にも取り付けを想定している。

発電一体パネルの熱設計に際し，適正な動作を保証するための設計要求として，本研究では以下の 3 つの要求を考慮した。

- (1) 質量の要求として，打ち上げ・建設コストの観点からパネル面積当たりの質量を 4.2 kg/m^2 以下にする必要がある[66]。これは 1.5 mm 厚のアルミニウム板に相当する。表 5-1 に本研究で設計したパネルの構成要素の厚さと密度を示す。この寸法の場合，パネル面積当たりの質量は 4.1 kg/m^2 となり設計要求を満たしている。

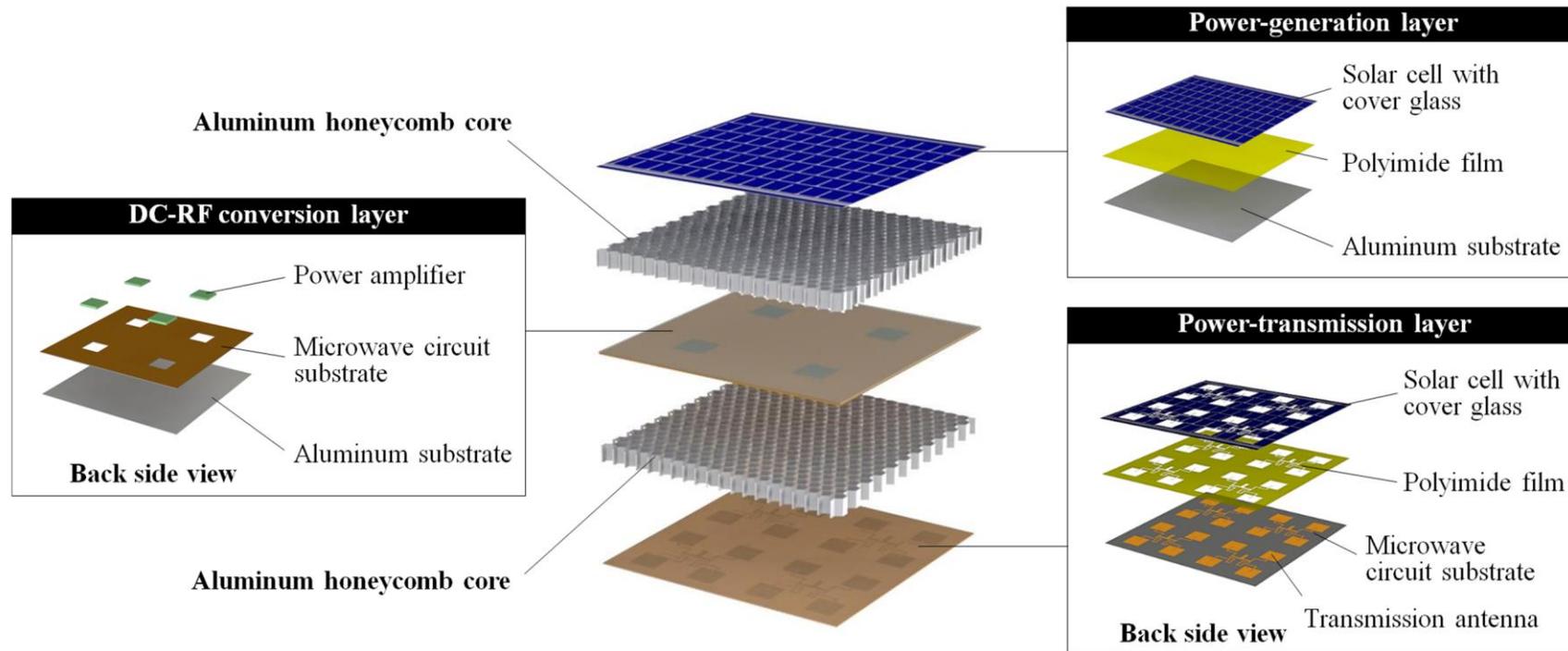


図 5-2 設計した発電一体パネルの構造

表 5-1 発電一体パネルの構成要素と設計パラメータ

Layer	Component	Thickness [mm]	Density [kg/m ³]
Power-generation layer	Cover glass	0.05	2500
	Solar cell	0.015	8148
	Polyimide film	0.07	1420
	Aluminum substrate	0.2	2685
Aluminum honeycomb core		5.0	37
DC-RF conversion layer	Aluminum substrate	0.2	2685
	Microwave circuit substrate	0.4	2230
	Power amplifier (Area: 10 mm × 10 mm)	3.5	6150
	Aluminum honeycomb core	5.0	37
Power-transmission layer	Microwave circuit substrate	0.4	2230
	Polyimide film	0.07	1420
	Solar cell	0.015	8148
	Cover glass	0.05	2500

- (2) 温度の設計要求として、長期システム性能維持の観点から太陽電池セルおよびマイクロ波回路内の電子機器（パワーアンプで代表）の動作保証温度を維持する必要がある。太陽電池セルおよびパワーアンプの動作保証温度範囲はそれぞれ $-150^{\circ}\text{C}\sim 110^{\circ}\text{C}$ [67], $-40^{\circ}\text{C}\sim 192^{\circ}\text{C}$ である。ここで、本研究では従来のシリコン（Si）もしくはガリウムヒ素（GaAs）パワーアンプよりも高温動作に適している窒化ガリウム（GaN）パワーアンプの使用を想定した[68].
- (3) マイクロ波送電精度を維持するため、軌道周回中の熱変形によるアンテナ面法線の変形角度をパネル全域にわたり $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 以内に維持する[66]. 変形角度がこの範囲に維持されないとマイクロ波を地上の受電アンテナ（レクテナ）の適正な位置に送信できない。

5.3 発電電一体パネルの熱抵抗測定とシミュレーションモデルの構築

発電電一体パネルは多数の構成要素と 7 層の接着剤層からなるサンドイッチ構造であり、その温度特性を正確にシミュレーションするためには接着剤層の熱抵抗も考慮する必要がある。しかし、これらの接着剤層の厚さは横（面内）方向に対して均一ではなくかつ、パネル製造後に測定するのは困難であるため、実用パネル内の接着剤層の熱抵抗を数値解析のみから知るのは基本的に困難である。そこで本研究では図 5-3 に示す試作パネルを用いて熱真空試験を行い、熱抵抗を実験的に見積もった。試作パネルには実際の太陽電池セルと同じ面積、熱伝導率、赤外放射率をもつ模擬セルを使用した。ハニカムパネル製作では、実際の宇宙機の製造に使用されているフィルム接着剤（Cytec, FM 73M OST film

adhesive .06PSF) および加工技術を用い、模擬セルの接着には実際の宇宙機製造で使用実績のあるシリコーン接着剤 (Wacker, RTV-S 691) を使用した。また、熱伝導接着剤 (信越化学工業株式会社, KE-3467) を使用して、電気ヒーターをアルミニウム基板に接着した。これらの電気ヒーターはパワーアンプの構造と発熱を模擬するためのものである。パネル内各部の温度を測定するため、図 5-4 に示す 16 カ所に K 型熱電対を取り付けた。

図 5-5 に熱真空試験の装置構成を示す。宇宙空間を再現するため、スペースチャンバーの内壁温度を -150°C 以下、真空度を $1.0 \times 10^{-2} \text{ Pa}$ に維持した。試作パネルの模擬セル面をスペースチャンバーのガラス窓に正対させ、ソーラーシミュレータ (山下電装株式会社, YSS-100-5H) を用いて疑似太陽光 (AM0 スペクトル, 1350 W/m^2) を模擬セル面に照射した。その状態で各測温点の定常温度を測定し、接着剤層の熱抵抗の計算に使用した。熱抵抗は次式で定義される。

$$R_{ij} = \frac{T_i - T_j}{Q} \quad (i, j = 1-16, i \neq j) \quad (5-1)$$

ここで、 $R_{ij} [\text{K/W}]$ は図 5-4 に示す温度 $T_i [\text{K}]$ および $T_j [\text{K}]$ の 2 測温点間の熱抵抗、 $Q [\text{W}]$ は入熱量である。各測温点での Q は未知のため、接着剤層の熱抵抗を実験結果からのみではなく、シミュレーション結果も用いて算出した。シミュレーションでは商用 FEM 解析ソフトウェア (ANSYS, Inc.; ANSYS 15.0) を用いた 3 次元伝熱解析を行い、接着剤層がないパネルをモデリングし熱真空試験の再現を行った。シミュレーションモデルでアルミハニカムコアは等価な熱伝導率をもつ均質体で近似した。実験結果およびシミュレーション結果の両方に(5-1)式を適用すると、各々次式で表される。

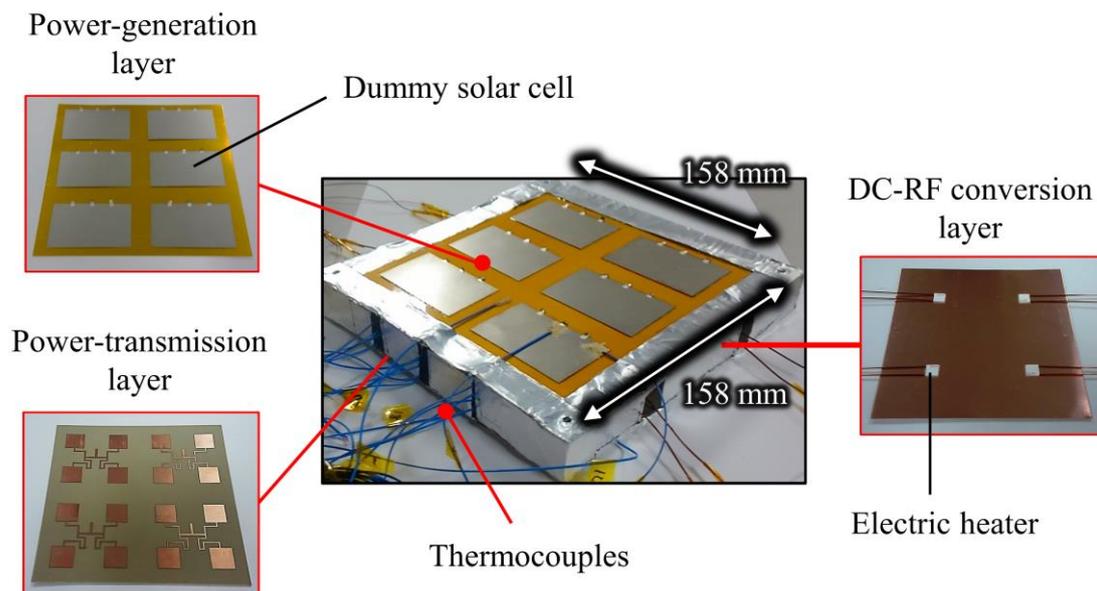


図 5-3 接着剤層の熱抵抗測定用の試作発電電一体パネル

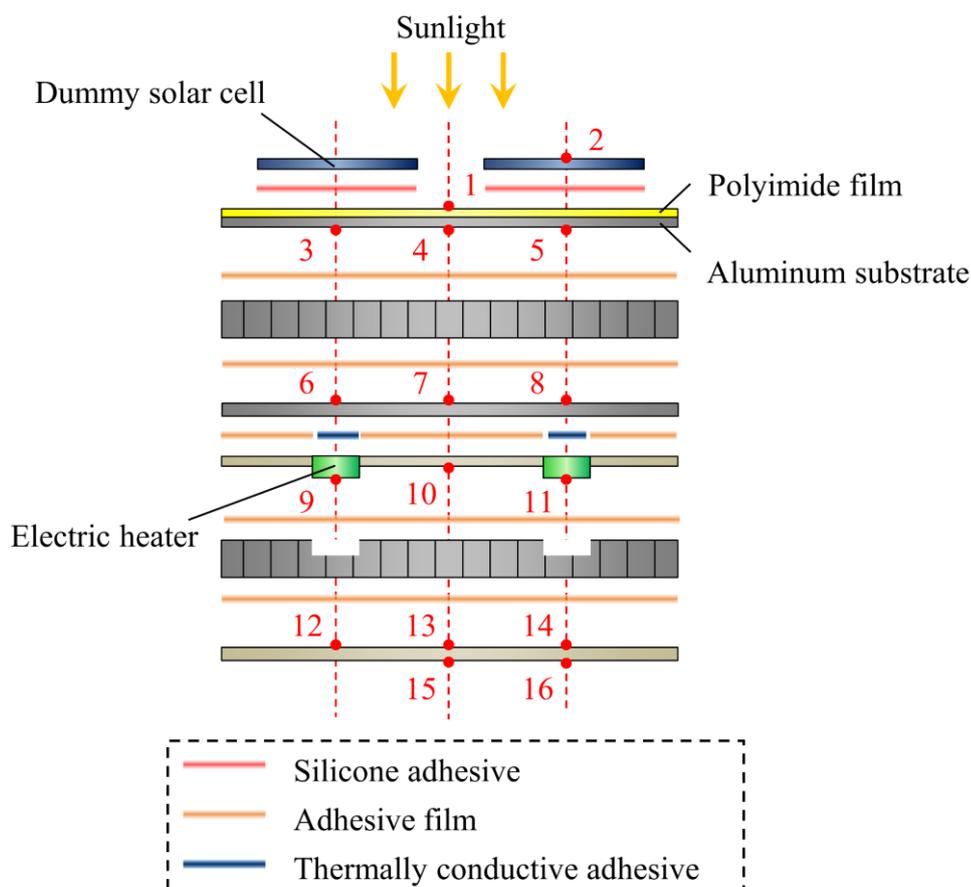


図 5-4 試作発電電一体パネルの断面図と測温点

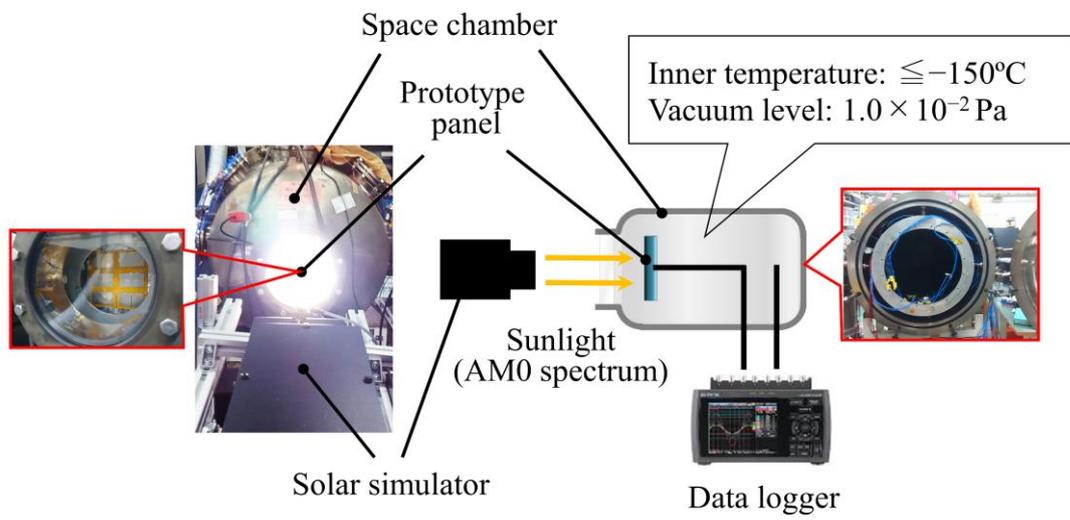


図 5-5 熱真空試験の装置構成

$$R_{e_ij} = \frac{T_{e_i} - T_{e_j}}{Q_e} \quad (5-2)$$

$$R_{s_ij} = \frac{T_{s_i} - T_{s_j}}{Q_s} \quad (5-3)$$

ここで、添え字“e”と“s”はそれぞれ実験結果、シミュレーション結果を意味している。\$Q_e\$ と \$Q_s\$ はともに疑似太陽光の日射量とパネル表面のふく射特性に起因するため、両者は等しいと仮定すると、\$R_{e_ij}\$ は次式で与えられる。

$$R_{e_ij} = \frac{T_{e_i} - T_{e_j}}{T_{s_i} - T_{s_j}} R_{s_ij} \quad (5-4)$$

\$R_{e_ij}\$ は接着剤層の熱抵抗を含む2測温点間の熱抵抗、\$R_{s_ij}\$ は同じ測温点間の接着剤層を含まない熱抵抗である。したがって、\$R_{s_ij}\$ は測温点間に含まれるすべてのパネル構成要素の熱抵抗の和として次式で与えられる。

$$R_{s_ij} = \sum \frac{l}{\kappa} \quad (5-5)$$

ここで、\$l\$ [m]、\$\kappa\$ [W/(m·K)] はそれぞれパネル構成要素の厚さおよび熱伝導率であり、既知である。最終的に測温点間に含まれる接着剤層の熱抵抗 \$R_{a_ij}\$ [K/W] は \$R_{e_ij}\$ から \$R_{s_ij}\$ を差し引くことで次式のように計算される。

$$R_{a_ij} = R_{e_ij} - R_{s_ij} = \left(\frac{T_{e_i} - T_{e_j}}{T_{s_i} - T_{s_j}} - 1 \right) \sum \frac{l}{\kappa} \quad (5-6)$$

中心軸対称の測温点（例えば図 5-4 中の測温点 3, 5）の平均温度を \$T_i, T_j\$ に入

力した。例えば、図 5-4 中のシリコン接着剤の熱抵抗を算出する場合、 T_i は測温点 2 の温度、 T_j は測温点 3 と 5 の平均温度を用いる。測温点 2, 3 および 2, 5 の間に含まれるパネル構成要素は模擬セル、ポリイミドフィルム、アルミニウム基板である。したがって、これらの熱抵抗の和が $R_{s_{ij}}$ に相当する。

上記の方法で得られた接着剤層の熱抵抗を 3 次元シミュレーションモデルに入力した。図 5-6 に熱真空試験の実験結果および再現シミュレーションの結果を示す。シミュレーション結果は実験結果とよく一致しており、両者の温度差の平均は 1.4°C であった。以上の結果から得られた接着剤層の熱抵抗およびシミュレーションモデルの妥当性が確認できた。

5.4 軌道周回中の温度時間変化シミュレーション

夏至における発電電一体パネルの温度時間変化を予測するため、図 5-2 に示すパネル構造にシミュレーションモデルを更新し、各層間に前節で得られた接着剤層の熱抵抗を入力した。また、パネル面積を実際の構成単位である $1106\text{ mm} \times 1106\text{ mm}$ に拡大し、パネル構成要素の厚さを表 5-1 に示す値にした。図 5-7 にテザー型 SPS が静止軌道周回中に受ける熱入力を図示する。テザー型 SPS 内の発電電一体パネルは太陽日射、地球赤外放射、地球反射日射（アルベド日射）、パワーアンプからの発熱によって加熱される。パネル上面は太陽日射のみによって加熱されるが、パネル底面（アンテナ面）は太陽日射に加えて地球赤外放射、地球反射日射によっても加熱される。夏至では、発電電一体パネルは地球の公転面の法線から 23.4° 傾斜した状態で、赤道上空約 36000 km の静止軌道上を $15^{\circ}/\text{hour}$ の速度で周回する。

パネルの上面および底面に入射する日射量 $q_s [\text{W}/\text{m}^2]$ は次式で定義される。

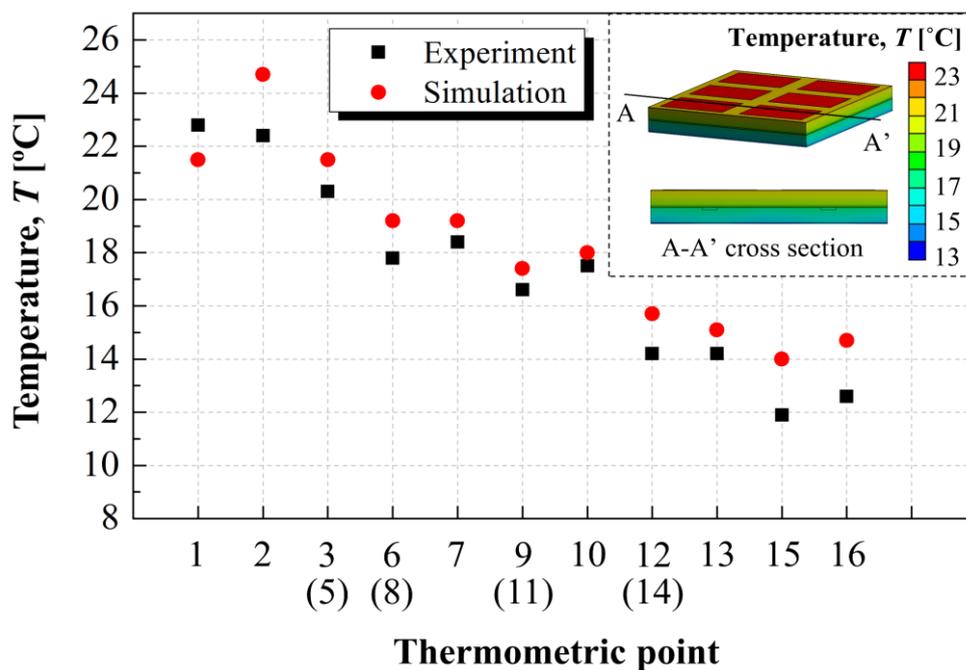


図 5-6 図 5-4 に示す各測温点温度の実験とシミュレーション結果の比較

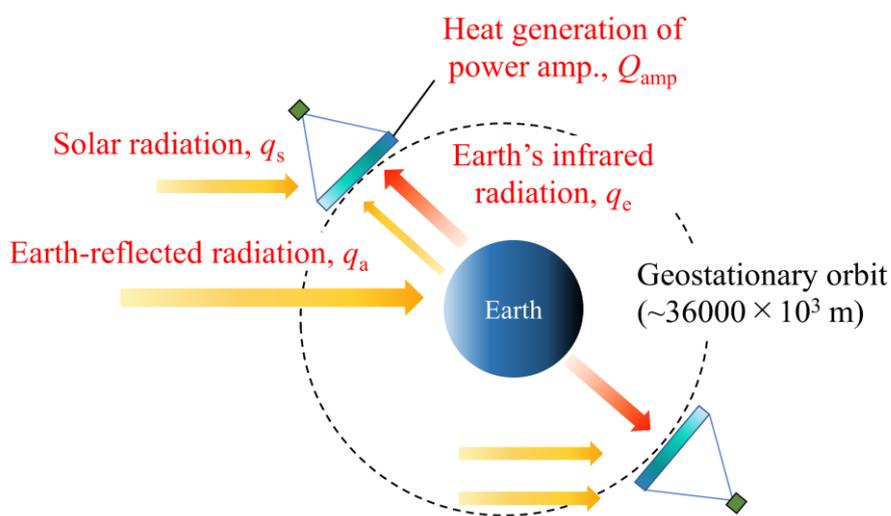


図 5-7 テザー型 SPS が静止軌道周回中に受ける熱入力

$$q_s = G \cos(23.4^\circ) |\cos(15t^\circ)| \quad (5-7)$$

ここで、 G は太陽定数 ($= 1366 \text{ W/m}^2$ [69]), t [h] は 0:00 からの経過時間である。 $0 \leq t < 6$ および $18 < t \leq 24$ のときはパネル上面が、 $6 < t < 18$ のときはパネル底面が日射を受ける。

静止軌道上で発電電一体パネルが受ける地球赤外放射の照度 q_e [W/m^2] は次式で与えられる[70].

$$q_e = H \frac{r_{\text{rad}}^2}{r_{\text{orbit}}^2} \quad (5-8)$$

ここで、 H [W/m^2] は地球から放出される赤外放射照度の年平均 ($= 237 \text{ W/m}^2$), r_{rad} [m] は地球の放射半径 ($= 6371 \times 10^3 \text{ m}$), r_{orbit} [m] は静止軌道の高度 ($= 36000 \times 10^3 \text{ m}$) である。

発電電一体パネルが受ける地球反射日射量 q_a [W/m^2] は次式で与えられる。

$$q_a = 0.3G \frac{r_{\text{rad}}^2}{r_{\text{orbit}}^2} \quad (5-9)$$

ここで、地球表面の反射率 (アルベド係数) は 0.3 と仮定した。地球での反射をランバード面の放射と仮定し、半球方向に一定の照度で放射されるものとした。したがって、 $0 \leq t < 6$ および $18 < t \leq 24$ のときは 12.8 W/m^2 一定となるが、 $6 \leq t \leq 18$ のときは 0 となる。アンテナ面が地球指向のため、パネル底面のみが軌道周回中に地球赤外放射および地球反射日射によって加熱される。

DC-RF 変換層内でのすべての変換ロスをパワーアンプからの発熱で代表した。その発熱量 Q_{amp} [W/pcs]は太陽電池セルの発電量すなわち太陽電池セル面への日射量に比例し、次式で与えられる。

$$Q_{\text{amp}} = \frac{q_s \alpha A \eta_{\text{cell}} (1 - \eta_{\text{amp}})}{N_{\text{amp}}} \quad (5-10)$$

ここで、 α 、 A [m²]、 η_{cell} はそれぞれ太陽電池セルの太陽光吸収率、面積、変換効率であり、 η_{amp} はパワーアンプの変換効率、 N_{amp} は太陽電池セル面積 A [m²]当たりのパワーアンプの数である。 η_{cell} および η_{amp} にはそれぞれ目標変換効率である0.35 [54]および0.8 [71]を入力した。

図 5-8 に(5-7)式から(5-10)式に示す熱入力の時間変化を示す。地球赤外放射および地球反射日射は太陽日射と比較して非常に小さな値である。

これらの熱入力に対して、発電電一体パネルはパネル表面から宇宙空間へのふく射によって放熱を行う。パネル表面から放射されるふく射量 q_{out} [W/m²]は Stefan-Boltzmann の法則より次式で与えられる。

$$q_{\text{out}} = \varepsilon \sigma (T^4 - T_{\text{space}}^4) \quad (5-11)$$

ここで、 ε はパネル表面の赤外放射率、 σ は Stefan-Boltzmann 定数 (= 5.67×10^{-8} W/(m²·K⁴)), T [K]および T_{space} [K]は発電電一体パネル表面の温度および宇宙空間の等価黒体温度 (= 2.7 K) である。

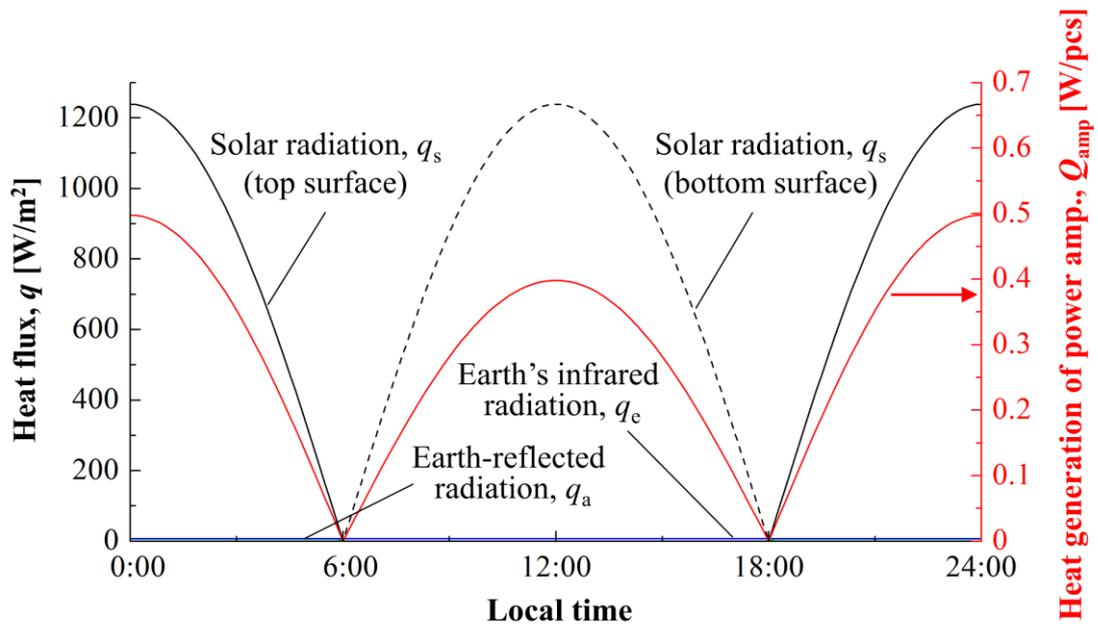


図 5-8 発電電一体パネルへの熱入力の時間変化

表 5-2 に非定常伝熱シミュレーションに用いた発電一体パネル構成要素の熱物性値を示す。アルミハニカムコアは前節と同様に等価な熱伝導率を有する均質体で近似した。

図 5-9 にパネル上面、パワーアンプ、パネル底面の静止軌道周回中の温度時間変化を示す。なお、この結果は各部の平均温度を示している。軌道周回中の太陽電池セル温度は -109°C から 37°C の範囲で変化し、5.2 節で示した設計要求の許容温度範囲 ($-150\sim 110^{\circ}\text{C}$) 内に維持されている。しかしながら、パワーアンプの温度は -109°C から 36°C の範囲で変化し、許容温度下限を (-40°C) を下回っている。パネル上面および底面に太陽光が十分に入射しない 6:00 および 18:00 付近で許容温度下限を下回っており、18:10 のとき最大で 69°C 下回っていることがわかった。最高温度は許容値に対して 156°C 余裕があることから温度プロファイル全体を高温側へシフトさせる必要性が明らかとなった。また、太陽電池セルとパワーアンプの温度がほぼ等しいことを考慮すると、パワーアンプの温度は両者の許容温度範囲を満足する $-40\sim 110^{\circ}\text{C}$ の範囲に維持する必要がある。この場合、軌道周回中の許容温度振幅は 150°C となるが、シミュレーション結果の温度振幅は 145°C であり 5°C しか余裕がない。したがって、安全な運用のために温度を高めるのみではなく、温度振幅も可能な限り低減する工夫が必要である。

5.5 熱変形シミュレーション

5.4 節の温度時間変化シミュレーションの結果に基づいて、アンテナ面の最大熱変形量をシミュレーションした。アンテナ面の熱変形はフェーズドアレイアンテナから放射されるマイクロ波の方向、すなわち送電精度に影響を及ぼす。本シミュレーションでは発電一体パネルの全構成要素の初期温度を 20°C とし、

表 5-2 発電一体パネル構成要素の熱物性値

Component	Thermal conductivity [W/(m·K)]	Specific heat [J/(kg·K)]	Density [kg/m ³]	Emissivity [-] (infrared region)	Absoptance [-] (solar region)
Cover glass	1	753	2500	0.90	0 (completely transparent)
Solar cell (GaAs)	55	330	5317	N/A	0.92
Polyimide film	0.16	Neglected	Neglected	N/A	N/A
Aluminum substrate	138	963	2685	N/A	N/A
Aluminum honeycomb core	1.9	963	37	N/A	N/A
Power amplifier (GaN)	130	490	6150	N/A	N/A
Microwave circuit substrate	0.261	950	2230	N/A	N/A
Antenna pattern (Copper foil)	Neglected	Neglected	Neglected	0.15	0.28

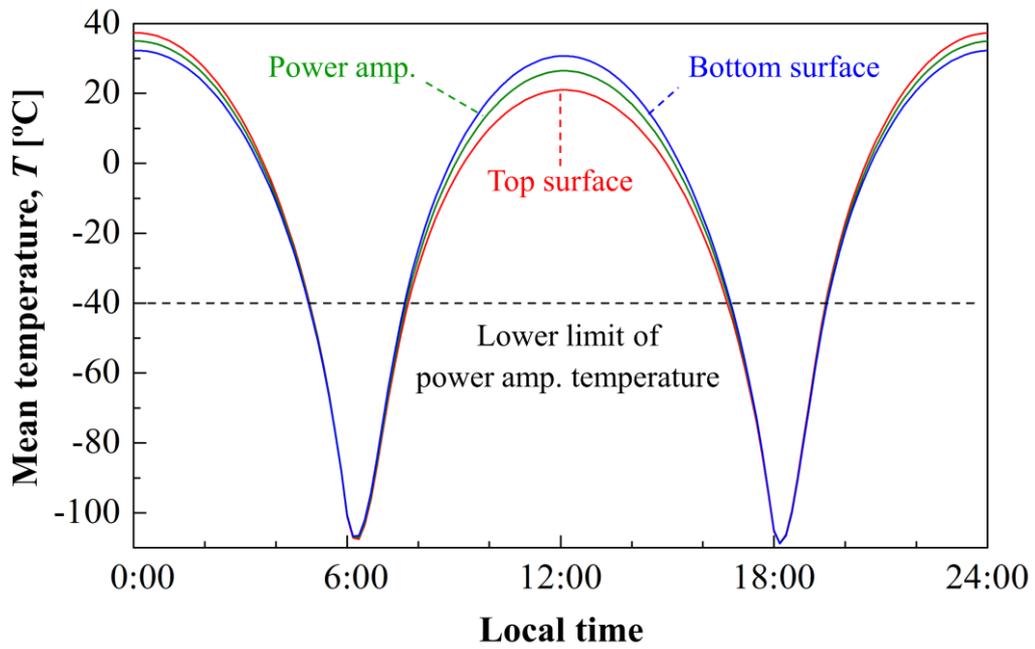


図 5-9 発送電一体パネル主要部の温度時間変化

このときを全く変形がない状態とした。アンテナ面の最大熱変形は初期状態 (20°C) からの温度差が最も大きくなる時に生じる。表 5-3 にシミュレーションに用いた発電電一体パネル構成要素の構造解析物性値を示す。アルミハニカムコアの構造解析物性値は商用 FEM ソフトウェア ANSYS 用のアドインプログラム (サイバネットシステム株式会社, Multiscale.Sim) を用いて近似した。サンドイッチパネル構成要素の物性値の違いのみに起因する熱変形特性を明らかにするため、拘束条件を与えず、すなわちパネルの支持フレームは考慮せずに熱変形をシミュレーションした。

図 5-10 に 6:00 および 18:00 付近で生じる最大熱変形時のパネル形状およびアンテナ面の法線方向 (z 方向) への変位量を示す。なお、変形後の形状を理解しやすくするため、30 倍の変形量で誇張表示している。変形後のアンテナ面の形状を 3 次関数で近似し、アンテナ面の局所変形角度を計算した結果、最大変形角度は 1.8° であった。したがって、パネル面積 $1106 \text{ mm} \times 1106 \text{ mm}$ 内のアンテナ面の熱変形は設計要求である「軌道周回中を通して $\pm 5^\circ$ 以内」に維持できていることがわかった。

5.6 波長選択コーティングによる温度プロファイルの改善

5.4 節では、発電電一体パネルの軌道周回中の温度プロファイル全体を高温側へシフトし、かつ温度振幅を低減する必要性が明らかになった。発電電一体パネルの熱制御においては、質量増加および電力消費が必要なデバイスを用いることは好ましくない。そこで本研究ではパネル表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た。アンテナ面への SSC の付与はマイクロ波送電に影響を及ぼす恐れがあるため、太陽電池面のみには付与するものとした。この場合、SSC には太陽光波長域 (300–4000 nm) で

表 5-3 発電一体パネル構成要素の構造解析物性値

Component	Young's modulus [GPa]	Poisson's ratio [-]	Shear modulus [GPa]	Coefficient of thermal expansion [$\times 10^{-6}/K$]
Cover glass	71.6	0.23	29.1	8.5
Solar cell	Neglected	Neglected	Neglected	Neglected
Polyimide film	Neglected	Neglected	Neglected	Neglected
Aluminum substrate	69.3	0.30	26.7	24
Aluminum honeycomb core	$x: 0.213$	$xy: 0.94$	$xy: 0.0370$	$x: 30$
	$y: 0.208$	$yz: 0.0078$	$yz: 1.10$	$y: 14$
	$z: 5.49$	$xz: 0.017$	$xz: 1.09$	$z: 23$
Power amplifier (GaN)	181	0.35	66.9	5.6
Microwave circuit substrate	30	0.17	12.8	$x: 25$
				$y: 34$
				$z: 252$

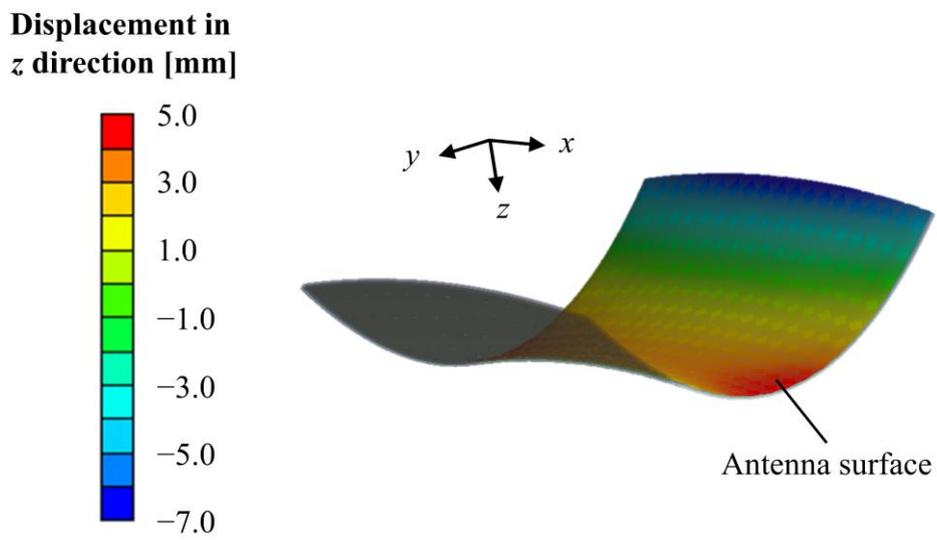


図 5-10 発電電一体パネルの最大熱変形時の形状と
アンテナ面の法線方向への変位量

の高い透過率が要求される。

図 5-11 に発電一体パネルの熱制御を行うための SSC のコンセプトを示す。SSC は太陽電池セル上のカバーガラス面に付与するものとした。カバーガラスは太陽光波長域で高い透過率を示し、熱ふく射波長 (4–20 μm) 全域にわたり高い赤外放射率を示す。SSC を用いてカバーガラスに 9 μm より長波長の熱ふく射を反射する特性を付与し、すなわち熱ふく射のうち波長 9 μm 以下の成分は SSC を通して外部に放出させ、それより長波長の成分は SSC により遮断する。ウィーンの変位則によれば、黒体放射スペクトルのピークは温度上昇に伴い短波長側にシフトする、すなわち高温時にはふく射熱量のうち短波長側の成分が占める割合が大きくなる。したがって、この SSC を用いることで赤外放射率を温度によって制御できる、つまり高温時には冷却を促進するために赤外放射率を高くし、低温時には加熱を促進するために赤外放射率を低くできると考えた。

多層膜は SSC を形成するための代表的な光学技術である。多層膜による SSC の従来研究では、太陽光波長に対して高い反射率を付与するもの[72], [73]や太陽光波長内のみの分光特性を制御するもの[74]についての報告例がある。また、宇宙機などの赤外放射率を制御する方法として、素子温度によって赤外放射率が変化するサーモクロミック材料[75]–[79]を用いた Smart Radiation Device (SRD)の報告例がある。しかしながら、サーモクロミック材料は太陽光透過率が低く、太陽電池セル面への付与には適していない。したがって、本研究で提案するコンセプト、「太陽光波長に対して高い透過率を有し、温度によって赤外放射率を制御可能」な SSC は今のところ研究されていない。

そこで本研究では、発電一体パネルの温度制御のため、多層膜 SSC の設計を行い、実験およびシミュレーションによりその効果を検証した。多層膜は屈折率が異なる複数の光学薄膜の積層体であり、材料 (屈折率, 消衰係数), 厚さお

よび層数を適当に選択することで光学特性を制御することができる。本研究では商用薄膜設計ソフトウェア (Software Spectra, Inc.; TFCalc) で用いられているニードル最適化[80][81]プログラムにより多層膜の設計を行った。今回の設計では、高屈折率材料として硫化亜鉛 (ZnS) を、低屈折率材料としてフッ化マグネシウム (MgF₂) をそれぞれ採用した。本コンセプトでは太陽光波長域での透過率を高めつつ、赤外域での反射率を高める必要があることから、高屈折率材料としてバンドギャップが大きく (3 eV 以上) かつ赤外波長域での屈折率が高い材料を選定した。ZnS はバンドギャップが 3.6 eV と半導体の中でも高く、太陽光波長において 344 nm より長い波長の光を透過する。低屈折率材料として SiO₂ を使用する場合が多いが、MgF₂ は反射を高めたい 9 μm 以上の波長域において消衰係数が SiO₂ よりも小さく[82]、吸収を抑えることができるため、今回の用途により適していると考えた。最適化の結果、総膜厚 5.9 μm の 55 層からなる多層膜 SSC が得られた。また、薄膜設計の妥当性を確認するためガラス基板上にこの多層膜 SSC を形成し、分光特性を測定した。

図 5-12 にガラス基板上に形成した多層膜 SSC の分光赤外放射率を示す。赤外放射率の温度依存を評価するため、各温度における全放射率を次式で計算した。

$$\varepsilon_T = \frac{\int_{4\ \mu\text{m}}^{20\ \mu\text{m}} \varepsilon_\lambda E_{b\lambda T} d\lambda}{\int_{4\ \mu\text{m}}^{20\ \mu\text{m}} E_{b\lambda T} d\lambda} \quad (5-12)$$

ここで、 ε_λ は図 5-12 上段に示す SSC の分光赤外放射率、 $E_{b\lambda T}$ [W/(m²·μm)] は図 5-12 下段に示す温度 T [K] の黒体の単色放射能である。図 5-13 に(5-12)式より計算した SSC の全放射率の温度依存を示す。温度が 173 K (-100°C) から 373 K (100°C) まで変化した時、全放射率の変化量は 0.37 (Ideal coating), 0.14 (Designed coating)

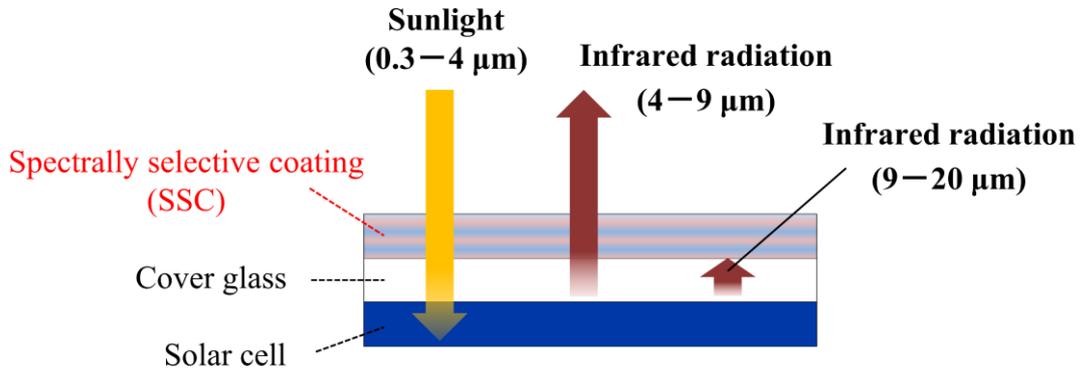


図 5-11 発電電一体パネル用波長選択コーティングのコンセプト

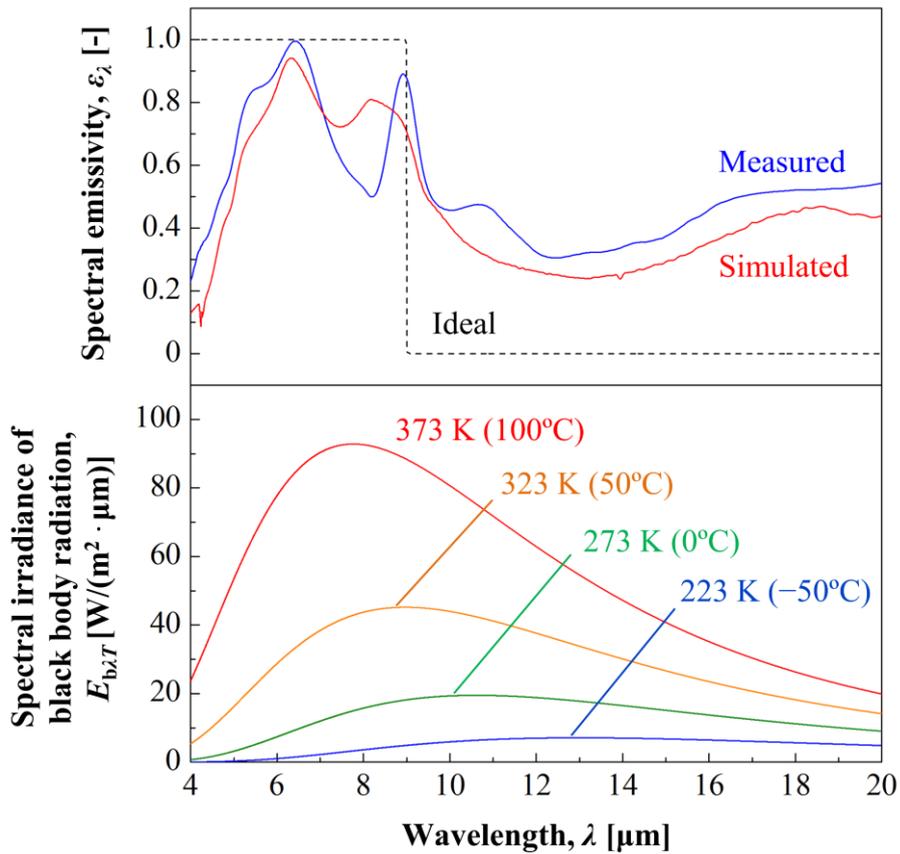


図 5-12 ガラス基板上に形成した多層膜 SSC の分光赤外放射率と各温度の黒体放射スペクトル

with simulated emissivity), 0.11 (Designed coating with measured emissivity) となった。また, AM0 スペクトルの垂直入射光に対する透過率は 0.89 (シミュレーション) および 0.84 (実験) であった。試作した SSC の透過率は設計値よりもわずかに低い, 技術的な実現可能性が伺える値である。以上で得られた太陽光透過率と 3 次元関数で近似した全放射率の温度依存をシミュレーションモデルに入力した。図 5-14 に SSC を発電一体パネル表面に付与した場合の静止軌道周回中のパワーアンプ温度の時間変化 (シミュレーション結果) を示す。境界条件は 5.4 節と同様に設定した。ここで, 図中の “Ideal coating”, “Designed coating (with simulated emissivity)”, “Designed coating (with measured emissivity)” はそれぞれ全放射率が図 5-13 の黒線, 赤線, 青線に沿って変化した場合の結果である。また, “No coating” は表面がカバーガラス (全放射率が 0.90 で一定) の場合の結果である。結果として, SSC を付与した場合でもパワーアンプ温度は許容温度下限 (-40°C) を下回っているが, 最低温度は -109°C (No coating, 黒破線) から -65°C (Designed coating with simulated emissivity, 赤線) まで 44°C の大きな改善を示した。さらに, 温度振幅も SSC を付与しない場合と比較して 7°C 低減した。試作した SSC の赤外放射率を用いた場合 (Designed coating with measured emissivity, 青線) の改善量は設計値 (赤線) よりもわずかに小さいが, 両者の傾向はよく一致しており, このコンセプトの実現可能性および技術ポテンシャルを確認できた。

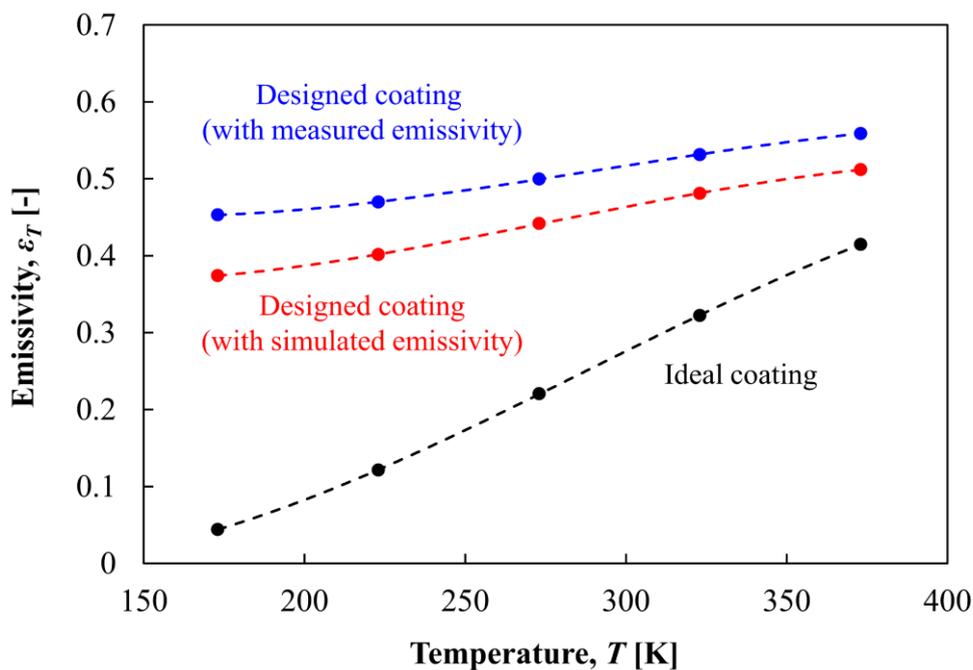


図 5-13 ガラス基板上に形成した SSC の全放射率の温度依存
 (図 5-12 を基に算出)

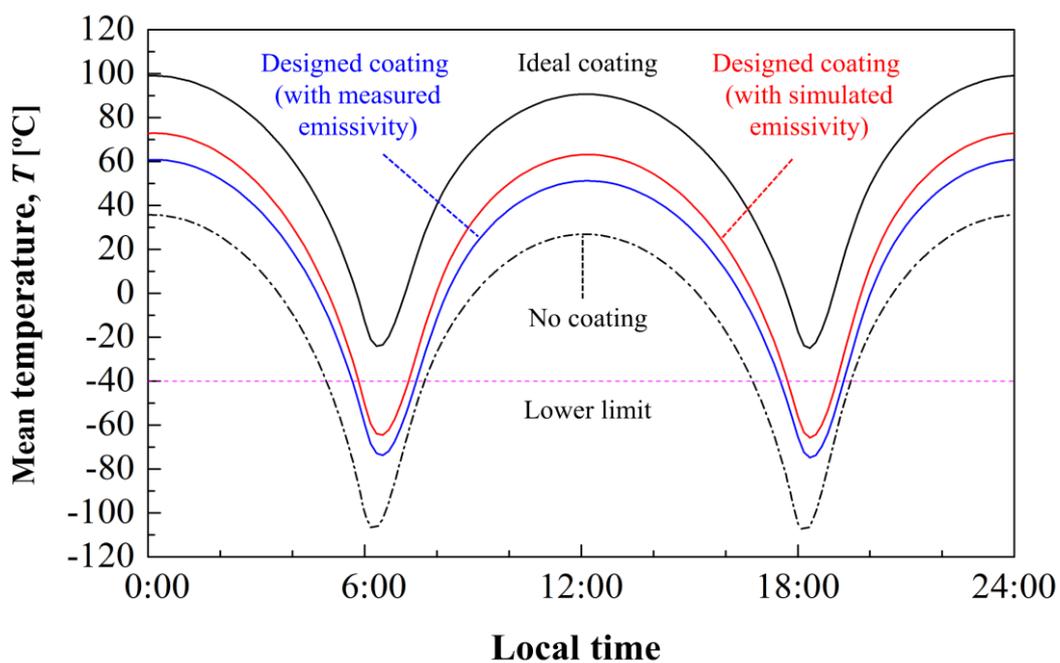


図 5-14 SSC の有無による静止軌道周回中のパワーアンプの
 温度時間変化の比較

5.7 まとめと今後の課題

本研究ではテザー型太陽発電衛星（SPS）用発電一体パネルの具体設計を行い、実験および数値解析シミュレーションにより軌道周回中の各部の温度とアンテナ面の変形角度を推定するとともに専用の熱制御手法の設計を試みた。得られた知見を以下に記す。

- (1) サンドイッチ構造を有する発電一体パネルの具体構造の設計を行い、実用サイズである $1106\text{ mm} \times 1106\text{ mm}$ のシミュレーションモデルを構築した。静止軌道周回中のパネル温度の時間変化をシミュレーションした結果、温度プロファイル全体を高温側へシフトするとともに温度振幅を低減する必要性が明らかになった。
- (2) 上記で得られた温度プロファイルを基に軌道周回中のパネルの熱変形をシミュレーションし、アンテナ面法線の角度変化を解析した。20°C を変形がない状態とした場合、温度差 100°C 以上の最大熱変形状態でもアンテナ面法線の角度変化は最大 1.8° であり許容値の 5° に対して少なくとも 64% の余裕があることがわかった。
- (3) 温度プロファイルを改善する方法として太陽電池面に波長選択コーティング（SSC）を付与する方法に着目し、多層膜 SSC を光学設計、試作した。結果として、SSC を付与しない状態からパワーアンプの最低温度が 44°C 改善し、温度振幅も 7°C 低減できていることから温度シフトおよび温度振幅低減の両面でその効果が確認できた。

今後の課題として、シミュレーション結果の実証実験を行うとともに、本研究で得られた知見をマイクロ波回路の設計にフィードバックし、低温動作が可能な回路を検討するほか、質量および温度の設計要求を再検討し、新たな熱設計要求を満足するパネル構造および熱制御手法を提案することなどが挙げられる。また、今回の多層膜 SSC の設計では、熱ふく射波長（赤外波長）の光学物性値を利用できる材料が限られていた。理想の分光放射特性に近づけるためさらなる最適材料の探索が必要である。また、宇宙環境下での長期性能・信頼性の評価も不可欠であり、温度サイクル（熱応力サイクル）、紫外線、原子状酸素、各種放射線などが多層膜の機械強度や光学特性に及ぼす影響を吟味する必要がある。

第6章 結言

本研究では太陽光発電システムの利用形態の多様化を目指し、次世代太陽電池 (PV) モジュールとして「省スペース向け高倍率部分集光モジュール」, 「車載向け非追尾・低倍率部分集光モジュール」, 「宇宙太陽発電システム用発電一体パネル」の3種類に着目し、モジュール設計、数値解析シミュレーション、屋内外実験を通じて各コンセプトの実現可能性および技術ポテンシャルを検証した。得られた知見を以下に示す。

3章では、省スペース向け高倍率部分集光モジュールによる面積当たりの発電量向上について以下の知見を得た。

- (1) 「太陽電池セルのレンズ封止構造」, 「ガラス基板上の回路パターン面積の削減」, 「2次集光系 (SOE) を用いないこと」を特徴とする部分集光モジュールの光学-熱設計を行った。試作モジュールを用いた屋外実験の結果、片面 Si セルを用いたモジュールで散乱比 $\gamma = 0.17$ のときに GNI 基準モジュール変換効率 $\eta_{\text{GNI}} = 30.7\%$ を達成した。
- (2) 両面 Si セルを用いることでさらにモジュール面積当たりの発電量が向上し、従来の太陽追尾平板 PV モジュールに対する優位性、省スペースアプリケーションでの有用性が示された。具体的には散乱比 $\gamma = 0.17 - 1.0$ の範囲で、片面 Si セルを用いたモジュールの 1.1 - 1.3 倍、太陽追尾平板 PV モジュール (変換効率 19.4%) の 1.1 - 1.8 倍の発電量が得られることがわかった。

-
- (3) 発電量の追尾誤差角度依存と太陽追尾装置の追尾誤差角度モデル（正規分布）を用いて追尾誤差に対するロバスト性を検証した。両面 Si セルを用いた部分集光モジュールの場合、太陽追尾装置の追尾精度が 2°および 3°でも、追尾誤差がない場合の 90%および 80%以上の発電量を維持でき、従来 CPV モジュールよりも追尾誤差耐性に優れていることを示した。

4 章では、車載向け非追尾・低倍率部分集光モジュールの実現可能性および技術ポテンシャルについて以下の知見を得た。

- (1) 3 接合セルと Si セルの 4 端子スタックをシリコンマイクロレンズで封止したモジュールを設計した。車載面（水平面）年間日射量の入射角分布を考慮してレンズ形状を最適化した結果、車載面に入射する年間日射量の 46.6% および 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わかった。
- (2) 設計したレンズの 3 接合セルへの光学的効率の入射角特性として、ピークが約 50%と低いものの許容入射半角を約 60°まで広げることができた。また、試作モジュールを用いてこの特性を実験検証し、設計の妥当性を確認した。
- (3) 試作モジュールは快晴日の日中（7:00–16:00）を通じて GHI 基準モジュール変換効率の最大値を維持できた。また、最高変換効率を有する 3 接合セルおよび Si セルを用いた場合、年間モジュール効率は最大 27.3%に達し、PV のみで 1 日約 27 km 走行できるポテンシャルを明らかにした。

-
- (4) 部分集光モジュールは自動車ルーフ曲面上の位置によらず1日のほぼ全ての時間で曲面 PV モジュールより高い発電量を示した。また、ルーフ曲面全体に展開した際のモジュール内の発電量ミスマッチングロスが日積算発電量に及ぼす影響は曲面 PV モジュールと同程度であることがわかり、設計したレンズは車載用 CPV に適した入射角特性であることが確認できた。

5章では、宇宙太陽発電用発電電一体パネルの熱特性および熱制御手法について以下の知見を得た。

- (1) 静止軌道周回中のパネル温度の時間変化をシミュレーションした結果、太陽電池温度は -109°C から 37°C の範囲で変化し、許容範囲の -150°C から 110°C の範囲に維持された。一方、パワーアンプ温度は -109°C から 36°C の範囲で変化し、最低温度が許容下限の -40°C を大きく下回っていることから、温度プロファイル全体を高温側へシフトする必要性が示された。
- (2) 軌道周回中のパワーアンプ温度と太陽電池温度がほぼ等しいことからパワーアンプ温度は両者の許容温度範囲を満たす -40°C から 110°C の範囲に維持する必要がある。この場合の許容温度振幅 150°C に対してシミュレーション結果は 145°C と 5°C しか余裕が無いことがわかった。このことから、温度シフトに加えて温度振幅低減の必要性も明らかとなった。
- (3) 軌道周回中の温度プロファイルを基にパネルの熱変形をシミュレーション

し、アンテナ面の変形角度を解析した。20°C を変形がない状態とした場合、温度差 100°C 以上の最大変形状態でもアンテナ面法線の角度変化は最大 1.8° であり許容値の 5° に対して少なくとも 64%の余裕があることがわかった。

- (4) 発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 (SSC) を付与する方法に着目し、ZnS と MgF₂ からなる多層膜 SSC を光学設計、試作した。結果として、SSC を付与しない状態からパワーアンプの最低温度が 44°C 改善し、温度振幅も 7°C 低減できたことから、温度シフトおよび温度振幅低減の両面でその効果が確認できた。

本研究では、光学解析、伝熱解析、構造解析などを組み合わせた複合解析により次世代 PV モジュールの仕様設計を行った。屋内外試験を通して各モジュールの優位性および設計の妥当性を確認し、次世代 PV モジュールの設計手法および指針を提示できた。いずれの結果も、エネルギー・環境問題を背景に今後利用形態が多様化し、研究開発がさらに加速すると見込まれる太陽光発電分野において、学術的・工業的に有益なものとなった。

参考文献

- [1] 齋藤武雄, ヒートアイランド 灼熱化する巨大都市. 講談社, 1997, pp. 140-178.
- [2] E. R. Weber, “Photovoltaics moving into the terawatt age,” in *SPIE Optical Engineering + Applications*, 2017, p. 1036803.
- [3] National Renewable Energy Laboratory, “Best research-cell efficiencies.” [Online]. Available: <https://www.nrel.gov/pv/>. [Accessed: 03-Jul-2018].
- [4] K. Yoshikawa *et al.*, “Silicon heterojunction solar cell with interdigitated back contacts for a photoconversion efficiency over 26%,” *Nat. Energy*, vol. 2, no. 5, p. 17032, 2017.
- [5] A. Richter, M. Hermle, and S. W. Glunz, “Reassessment of the limiting efficiency for crystalline silicon solar cells,” *IEEE J. Photovolt.*, vol. 3, no. 4, pp. 1184–1191, 2013.
- [6] N. V. Yastrebova, “High-efficiency multi-junction solar cells: Current status and future potential,” [Online]. Available: <http://sunlab.eecs.uottawa.ca/wp-content/uploads/2014/pdf/HiEfficMjSc-CurrStatusFuturePotential.pdf>. [Accessed: 02-Nov-2018].
- [7] P. T. Chiu *et al.*, “35.8% space and 38.8% terrestrial 5J direct bonded cells,” in *2014 IEEE 40th Photovolt. Spec. Conf. (PVSC-40)*, 2014, pp. 0011–0013.
- [8] M. Wiesenfarth, S. P. Philipps, A. W. Bett, K. Horowitz, and S. Kurtz, “Current status of concentrator photovoltaic (CPV) technology,” Fraunhofer Institute for

-
- Solar Energy Systems ISE and National Renewable Energy Laboratory, ver. 1.3, Apr. 2017. [Online]. Available:
<https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/cpv-report-ise-nrel.pdf>. [Accessed: 02-Nov-2018].
- [9] S. Kurtz, D. Myers, W. E. McMahon, J. Geisz, and M. Steiner, “A comparison of theoretical efficiencies of multi-junction concentrator solar cells,” *Prog. Photovolt. Res. Appl.*, vol. 16, pp. 537–546, 2008.
- [10] F. Dimroth *et al.*, “Four-junction wafer-bonded concentrator solar cells,” *IEEE J. Photovolt.*, vol. 6, no. 1, pp. 343–349, 2016.
- [11] A. Luque, “Will we exceed 50 % efficiency in photovoltaics ?,” *J. Appl. Phys.*, vol. 110, p. 031301, 2011.
- [12] D. Aiken *et al.*, “Lattice-matched solar cells with 40% average efficiency in pilot production and a roadmap to 50%,” *IEEE J. Photovolt.*, vol. 3, no. 1, pp. 542–547, 2013.
- [13] 三好達也, “ソーラー充電システム ～プリウスはついに太陽光を走るエネルギーに～,” *日本AEM学会誌*, vol. 25, no. 4, pp. 379–382, 2017.
- [14] T. Masuda *et al.*, “Static concentrator photovoltaics for automotive applications,” *Sol. Energy*, vol. 146, pp. 523–531, 2017.
- [15] P. E. Glaser, “Power from the Sun: Its Future,” *Science*, vol. 162, pp. 857–861, 1968.

- [16] 財団法人 無人宇宙実験システム研究開発機構, “平成19年度 太陽光発電
利用促進技術調査,” 2008.
- [17] National Renewable Energy Laboratory, “Reference Air Mass 1.5 Spectra.”
[Online]. Available: <https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/spectra-am1.5.html>. [Accessed: 06-Nov-2018].
- [18] C. Algora, I. Rey-Stolle, Eds., *Handbook of Concentrator Photovoltaic
Technology*, 1st ed. Chichester, U.K.: Wiley, 2016, pp. 187–238.
- [19] G. S. Kinsey, W. Bagienski, A. Nayak, M. Liu, R. Gordon, and V. Garboushian,
“Advancing efficiency and scale in CPV arrays,” *IEEE J. Photovolt.*, vol. 3, no.
2, pp. 873–878, 2013.
- [20] D. J. Friedman, R. R. King, R. M. Swanson, J. Mcjannet, and D. Gwinner,
“Toward 100 gigawatts of concentrator photovoltaics by 2030,” *IEEE J.
Photovolt.*, vol. 3, no. 4, pp. 1460–1463, 2013.
- [21] K. Ghosal *et al.*, “Semprius field results and progress in system development,”
IEEE J. Photovolt., vol. 4, no. 2, pp. 703–708, 2014.
- [22] M. Steiner *et al.*, “FLATCON® CPV module with 36.7% efficiency equipped
with four-junction solar cells,” *Prog. Photovolt. Res. Appl.*, vol. 23, pp. 1323–
1329, 2015.
- [23] M. Steiner, G. Siefer, T. Schmidt, M. Wiesenfarth, F. Dimroth, and A. W. Bett,
“43 % sunlight to electricity conversion efficiency using CPV,” *IEEE J.
Photovolt.*, vol. 6, no. 4, pp. 1020–1024, 2016.

-
- [24] Demographia, “Demographia world urban areas,” [Online]. Available: <http://www.demographia.com/>. [Accessed: 20-Jul-2018].
- [25] 岡本和也, “集光型太陽光発電システムの包括的設計解析および試験検証,” 平成26年度 長岡技術科学大学 大学院工学研究科 博士論文, 2015, p. 12.
- [26] P. Benitez, J. C. Miñano, and R. Alvarez, “Photovoltaic concentrator with auxiliary cells collecting diffuse radiation,” U.S. Patent 12/622,664, Nov. 20, 2009.
- [27] N. Yamada and K. Okamoto, “Experimental measurements of a prototype high concentration Fresnel lens CPV module for the harvesting of diffuse solar radiation.,” *Opt. Express*, vol. 22 Suppl 1, pp. A28-34, 2014.
- [28] J. F. Martinez, M. Steiner, M. Wiesenfarth, and F. Dimroth, “4-terminal CPV module capable of converting global normal irradiance into electricity,” in *14th Int. Conf. Concentrator Photovolt. Syst. (CPV-14)*, 2018.
- [29] V. M. Emelyanov, E. S. Aronova, M. V. Nakhimovich, and M. Z. Shvarts, “Output energy predictions for hybrid concentrator III-V / planar thin-film modules,” in *14th Int. Conf. Concentrator Photovolt. Syst. (CPV-14)*, 2018.
- [30] N. Yamada, T. Ijio, W. Goto, K. Okamoto, K. Dobashi, and T. Shiobara, “Development of silicone-encapsulated CPV module based on LED package technology,” in *2013 IEEE 39th Photovolt. Spec. Conf. (PVSC-39)*, 2013, pp. 0493–0496.
- [31] M. W. Haney, T. Gu, and G. Agrawal, “Hybrid micro-scale CPV/PV

-
- architecture,” in *2014 IEEE 40th Photovolt. Spec. Conf. (PVSC-40)*, 2014, pp. 2122–2126.
- [32] S. Paap *et al.*, “Cost analysis of flat-plate concentrators employing microscale photovoltaic cells for high energy per unit area applications,” in *2014 IEEE 40th Photovolt. Spec. Conf. (PVSC-40)*, 2014, pp. 2926–2929.
- [33] K. Okamoto, D. Hirai, and N. Yamada, “Design and test of cell-in-cell-structured CPV modules for better solar energy conversion,” in *The 6th World Conf. Photovolt. Energy Convers. (WCPEC-6)*, 2014, pp. 847–848.
- [34] N. Yamada and D. Hirai, “Maximization of conversion efficiency based on global normal irradiance using hybrid concentrator photovoltaic architecture,” *Prog. Photovolt. Res. Appl.*, vol. 24, pp. 846–854, 2016.
- [35] K.-T. Lee *et al.*, “Concentrator photovoltaic module architectures with capabilities for capture and conversion of full global solar radiation,” *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, vol. 113, no. 51, pp. E8210–E8218, 2016.
- [36] N. Hayashi *et al.*, “High-efficiency thin and compact concentrator photovoltaics with micro-solar cells directly attached to a lens array,” *Opt. Express*, vol. 23, no. 11, pp. A594–A603, 2015.
- [37] D. A. Adkins, “Wind convection coefficient correlations for CPV modules,” in *2013 IEEE 39th Photovolt. Spec. Conf. (PVSC-39)*, 2013, pp. 3421–3425.
- [38] 日本熱物性学会編, 新編熱物性ハンドブック, 養賢堂, 2008, p. 20, 21, 300.

-
- [39] H. Arase *et al.*, “A novel thin concentrator photovoltaic with microsolar cells directly attached to a lens array,” *IEEE J. Photovolt.*, vol. 4, no. 2, pp. 709–712, 2014.
- [40] D. Hirai, K. Okamoto, and N. Yamada, “The effect of circumsolar and diffuse solar radiation on cell-in-cell-structured CPV module,” in *The 6th World Conf. Photovolt. Energy Convers. (WCPEC-6)*, 2014, pp. 817–818.
- [41] A. McEvoy, T. Markvart, and L. Castaner, Eds., *Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications*, 2nd ed. Waltham, MA, USA: Academic, 2011, pp. 636–637.
- [42] Japanese Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, “Road traffic census,” [Online]. Available: <http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-data/ir-data.html>. [Accessed: 03-Jul-2018].
- [43] T. Masuda *et al.*, “Next environment-friendly cars: Application of solar power as automobile energy source,” in *2016 IEEE 43rd Photovolt. Spec. Conf. (PVSC-43)*, 2016, pp. 0580–0584.
- [44] 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）, “太陽光発電システム搭載自動車検討委員会 中間報告書,” 2018.
- [45] M. A. Green, Y. Hishikawa, E. D. Dunlop, D. H. Levi, J. Hohl-Ebinger, and A. W. Y. Ho-Baillie, “Solar cell efficiency tables (version 52),” *Prog. Photovolt. Res. Appl.*, vol. 26, pp. 427–436, 2018.
- [46] K. Sasaki, T. Agui, K. Nakaido, N. Takahashi, R. Onitsuka, and T. Takamoto,

-
- “Development of InGaP/GaAs/InGaAs inverted triple junction concentrator solar cells,” in *9th Int. Conf. Concentrator Photovolt. Syst. (CPV-9)*, 2013, pp. 22–25.
- [47] Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, “31.3 percent efficiency for silicon-based multi-junction solar cell,” [Online]. Available: https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/en/documents/News/2017/0917_News_31_Percent_for-Silicon-based-multi-junction-solar-cell_e.pdf. [Accessed: 11-Jul-2018].
- [48] K. Araki, L. Ji, G. Kelly, and M. Yamaguchi, “To do list for research and development and international standardization to achieve the goal of running a majority of electric vehicles on solar energy,” *Coatings*, vol. 8, no. 7, p. 251, 2018.
- [49] “Satellite power system; concept development and evaluation program,” DOE/NASA, Washington, DC, USA, Rep. DOE/ER-0023, 1978.
- [50] J. C. Mankins, “A technical overview of the ‘SunTower’ solar power satellite concept,” *Acta Astronaut.*, vol. 50, no. 6, pp. 369–377, 2002.
- [51] W. Seboldt, M. Klimke, M. Leipold, and N. Hanowski, “European sail tower SPS concept,” *Acta Astronaut.*, vol. 48, no. 5, pp. 785–792, 2001.
- [52] H. Suzuki, K. Kisara, M. Niino, and M. Mori, “Overview of studies on space solar power systems and elemental technology development,” *Mater. Sci. Forum*, vol. 631–632, pp. 3–8, 2009.
- [53] J. C. Mankins, “SPS-ALPHA: The first practical solar power satellite via

-
- arbitrarily large phased array,” Artemis Innovation Management Solutions LLC, Santa Maria, CA, USA, Final Rep. 2011-2012 NASA NIAC Phase 1 Project, 2012.
- [54] S. Sasaki *et al.*, “A new concept of solar power satellite: Tethered-SPS,” *Acta Astronaut.*, vol. 60, no. 3, pp. 153–165, 2007.
- [55] S. Mihara *et al.*, “Microwave transmission experiment on the ground for the future SSPS,” in *30th Int. Symp. Space Technol. Sci.*, 2015, Art. no. 2015-q-04.
- [56] N. Shinohara, “Beam control technologies with a high-efficiency phased array for microwave power transmission in Japan,” *Proc. IEEE*, vol. 101, no. 6, pp. 1448–1463, 2013.
- [57] Y. Homma *et al.*, “New phased array and rectenna array systems for microwave power transmission research,” in *IEEE MTT-S Int. Microw. Workshop Ser. Innovative Wireless Power Transmiss.: Technol., Syst., Appl.*, 2011, pp. 59–62.
- [58] K. Tanaka, K. Maki, M. Takahashi, and S. Sasaki, “Microwave power transmission experiment using breadboard model for small scientific satellite toward SPS,” in *Int. Conf. Electromagn. Adv. Appl.*, 2012, pp. 666–669.
- [59] K. Yamanaka *et al.*, “Internally-matched GaN HEMT high efficiency power amplifier for space solar power stations,” in *Asia-Pacific Microw. Conf.*, 2010, pp. 119–122.
- [60] K. Honjo, R. Ishikawa, and Y. Takayama, “Ultra high efficiency microwave power amplifier for wireless power transmission,” in *42nd Eur. Microw. Conf.*, 2012, pp. 1339–1342.

-
- [61] T. Miyakawa *et al.*, “Preliminary experimental results of beam steering control subsystem for microwave power transmission ground experiment,” in *IEEE MTT-S Int. Microw. Workshop Ser. Innovative Wireless Power Transmiss.: Technol., Syst., Appl.*, 2012, pp. 111–114.
- [62] K. Tanaka *et al.*, “WPT experiment in orbit using small satellite toward solar power satellite,” in *29th Int. Symp. Space Technol. Sci.*, 2013, Art. no. 2013-q-04.
- [63] H. Yamaguchi *et al.*, “Development of space solar sheet with inverted triple-junction cells,” in *42nd IEEE Photovolt. Spec. Conf. (PVSC-42)*, 2015.
- [64] P. T. Chiu *et al.*, “Direct semiconductor bonded 5J cell for space and terrestrial applications,” *IEEE J. Photovolt.*, vol. 4, no. 1, pp. 493–497, 2014.
- [65] P. Jaffe *et al.*, “Sandwich module prototype progress for space solar power,” *Acta Astronaut.*, vol. 94, no. 2, pp. 662–671, 2014.
- [66] 財団法人 無人宇宙実験システム研究開発機構, “太陽光発電利用促進技術調査成果報告書 別冊,” 2007.
- [67] J. R. Wertz and W. J. Larson, *Space Mission Analysis and Design*, 3rd ed. Norwell, MA, USA: Kluwer, 2003, pp. 428–458.
- [68] Y. Cai *et al.*, “High-temperature operation of AlGaIn/GaN HEMTs directcoupled FET logic (DCFL) integrated circuits,” *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 28, no. 5, pp. 328–331, 2007.
- [69] World Radiation Center, Davos, Switzerland, “Solar Constant: Construction of a composite total solar irradiance (TSI) time series from 1978 to the present,”

-
- [Online]. Available at: <http://www.pmodwrc.ch/pmod.php?topic=tsi/composite/SolarConstant>. (Data available at: ftp://ftp.pmodwrc.ch/pub/data/irradiance/composite/DataPlots/composite_42_65_1605.dat.) [Accessed: 16-Nov-2018].
- [70] J. A. Foster and G. S. Aglietti, “The thermal environment encountered in space by a multifunctional solar array,” *Aerosp. Sci. Technol.*, vol. 14, no. 3, pp. 213–219, 2010.
- [71] S. Sasaki, K. Tanaka, and K. Maki, “Microwave power transmission technologies for solar power satellites,” *Proc. IEEE*, vol. 101, no. 6, pp. 1438–1447, 2013.
- [72] S. Tachikawa, A. Ohnishi, K. Matsumoto, Y. Nakamura, and A. Okamoto, “Multi-layer coating for smart radiation device with solar absorptance 0.13,” in *39th Int. Conf. Environ. Syst.*, 2009, Art. no. 2009-01-2574.
- [73] A. P. Raman, M. A. Anoma, L. Zhu, E. Rephaeli, and S. Fan, “Passive radiative cooling below ambient air temperature under direct sunlight,” *Nature*, vol. 515, pp. 540–544, 2014.
- [74] C. Shou *et al.*, “Investigation of a broadband TiO₂/SiO₂ optical thin-film filter for hybrid solar power systems,” *Appl. Energy*, vol. 92, pp. 298–306, 2012.
- [75] S. Tachikawa *et al.*, “Smart radiation device based on a perovskite manganese oxide,” in *9th Int. Symp. Mater. Space Environ.*, 2003, pp. 41–47.
- [76] D. Fan, Q. Li, Y. Xuan, and Y. Xia, “Thermal radiation from silicon microcavity coated with thermochromic film,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 144, pp.

- 331–338, 2016.
- [77] D. Fan, Q. Li, Y. Xuan, H. Tan, and J. Fang, “Radiative properties of thermochromic material with solar reflection films,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 112, pp. 52–56, 2013.
- [78] X. Wang, Y. Cao, Y. Zhang, L. Yan, and Y. Li, “Fabrication of VO₂-based multilayer structure with variable emittance,” *Appl. Surf. Sci.*, vol. 344, pp. 230–235, 2015.
- [79] A. Hendaoui, N. Émond, S. Dorval, M. Chaker, and E. Haddad, “Enhancement of the positive emittance-switching performance of thermochromic VO₂ films deposited on Al substrate for an efficient passive thermal control of spacecrafts,” *Curr. Appl. Phys.*, vol. 13, no. 5, pp. 875–879, 2013.
- [80] A. V. Tikhonravov, M. K. Trubetskov, and G. W. Debell, “Application of the needle optimization technique to the design of optical coatings,” *Appl. Opt.*, vol. 35, no. 28, pp. 5493–508, 1996.
- [81] B. T. Sullivan and J. A. Dobrowolski, “Implementation of a numerical needle method for thin-film design,” *Appl. Opt.*, vol. 35, no. 28, pp. 5484–5492, 1996.
- [82] R. Kitamura, L. Pilon, and M. Jonasz, “Optical constants of silica glass from extreme ultraviolet to far infrared at near room temperature,” *Appl. Opt.*, vol. 46, no. 33, p. 8118, 2007.

謝辞

本論文は筆者が長岡技術科学大学 大学院工学研究科 博士後期課程 エネルギー・環境工学専攻在籍中に、エネルギー工学研究室（山田昇研究室）で行った研究の成果をまとめたものである。

本研究を遂行し学位論文をまとめるに当たり、お世話になった方々に感謝申し上げます。指導教員である山田昇教授には、学部時代の配属から7年間、厳しくも温かいご指導と共に多くの励ましの言葉を頂きました。そして、7年前には決して想像できなかつた幾多の貴重な経験をさせて頂いたこと心より感謝申し上げます。また、博士論文審査委員を務めて頂いた明田川正人教授、門脇敏教授、武田雅敏教授、田中久仁彦准教授に深く御礼申し上げます。

共同研究では、国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所の田中孝治准教授、所属学生の皆様には研究立ち上げへのご助言、試料の提供、実験へのご協力を賜り心より御礼申し上げます。豊田工業大学の山口真史名誉教授、荒木建次招聘研究員、Kan-Hua Lee様、トヨタ自動車株式会社の増田泰造様には本研究を推進するに当たり、有益なご意見、ご助言や試験材の提供を賜り厚く御礼申し上げます。

本研究の一部はJSPS科研費26289373の助成事業、にいがた産業創造機構

(NICO) の支援を受け実施されたものです。ここに感謝申し上げます。

日々の研究室生活では、山田研究室博士後期課程3年の中谷誠和さん、Luong Phu Khanhさん、修士課程2年の阿部晃大さん、Vuong Van Thaiさん、5年一貫制博士課程2年の早川佳孝さん、修士課程1年の山形裕貴さん、伊丹大地さん、中西明日可さん、長谷知将さん、小竹裕也さん、岩田花恵秘書、卒業・修了された先輩、同輩、後輩諸氏ならびに学部生の皆様には大変お世話になりました。ここに感謝の意を表します。特に現長岡技術科学大学 馬場将亮助教には研究室配属から現在まで私のお手本となり多方面でサポートして頂いたこと心より御礼申し上げます。

最後に、私の進学を快諾し、長期間にわたる学生生活を温かく見守り支えて頂いた家族に心から感謝の意を表し、謝辞の締めくくりとさせていただきます。