

宮崎大学大学院

博士学位論文

集光型太陽光発電システムの
実環境下における高出力化

学位授与 2014 年 3 月

宮崎大学大学院農学工学総合研究科

物質・情報工学専攻

末藤 豪

目次

第1章 序論	1
1-1 本研究の背景	1
1-1-1 太陽光発電技術の背景	1
1-1-2 太陽電池の種類	3
1-1-3 集光型太陽光発電の特徴	4
1-1-4 集光型太陽光発電システムの特徴	6
1-1-5 レンズ方式の集光光学系（フレネルレンズ）	10
1-1-6 太陽光の種類	13
1-2 本研究の目的	14
1-3 本論文の構成	15
1-4 引用文献	17
第2章 散乱比による 太陽光発電システムの導入指標	21
2-1 緒言	21
2-2 実験方法	23
2-2-1 太陽光発電システム	23
2-2-2 散乱比の計算方法	25
2-3 結果および考察	26
2-3-1 散乱比の変動	26
2-3-2 散乱比による出力と日射量	28
2-3-3 散乱比によるシステムの優位性の境界条件	31
2-4 結言	33
2-5 引用文献	34

第3章 レンズ表面の汚れ付着と 光触媒コートによる砂の付着の抑制	37
3-1 緒言	37
3-2 暴露実験による光触媒効果の有効性	40
3-2-1 使用した試料および実験方法	40
3-2-2 光触媒コートによる透過率低下の抑制	44
3-3 砂漠環境を想定した砂の付着の抑制	46
3-3-1 実験装置と砂試料	46
3-3-2 砂の付着と静電電位	48
3-4 結言	52
3-5 引用文献	53
第4章 集光モジュールの温度上昇抑制	56
4-1 緒言	56
4-2 モジュールケースの厚さによる温度上昇抑制	57
4-2-1 820倍 CPV モジュール	57
4-2-2 モジュールケース厚みによる温度シミュレーション	59
4-2-3 温度上昇抑制効果と出力改善	61
4-3 結言	63
4-4 引用文献	64
第5章 結論	66
謝辞	67

第 1 章 序論

1-1 本研究の背景

1-1-1 太陽光発電技術の背景

近年、世界の経済成長、人口の増加は顕著であり、それに伴いエネルギー需要も増加を続けている。特に、発展途上国において、エネルギー需要の増加が激しい。世界のエネルギー需要が増加の一途をたどる一方、世界の 1 次エネルギーが枯渇することが懸念されている[1-3]。さらに、化石燃料(石油・石炭・天然ガス)の使用により排出される二酸化炭素などの温室効果ガスの発生量が増加しており、地球温暖化をはじめとする環境に対する影響、海面上昇や異常気象などが懸念されている[4-6]。そのため、化石燃料に依存しないクリーンエネルギーへの期待が高まっており、無尽蔵である太陽光エネルギーを直接電気エネルギーに変換する太陽電池はクリーンなエネルギーとして注目されている。また、様々な国において、太陽光発電システムの補助金制度や余剰電力の買取価格の改定などにより、今後太陽電池の生産量が急速に増加することが予想される[7, 8]。その期待の表れとしてドイツの気候変動諮問会議がまとめた「2100 年の世界エネルギービジョン」によると、2100 年には世界のエネルギーの約 7 割が太陽光発電で供給されるであろうと予想されている[9]。

太陽光発電システムの長所として、以下の4点が挙げられる。

●クリーンなエネルギーの発生

光から電気エネルギーへの変換は、半導体特有の量子効果（quantum effect）を用いているため、従来の発電機のように水車やタービンなどの回転機を必要としない。したがって、雑音や放射能漏れ、爆発の危険がなく、有害ガスの発生もない、文字通りクリーンエネルギー変換法である。

●維持が簡便で自動化、無人化が容易

従来の発電機のように回転機や高温高圧の部分がないということは、機械的に摩耗することもなく、潤滑油も不要である。つまり、人工衛星や無人灯台などの電源としてすでに実証されているように、運転、維持が簡便で、システムの無人化や自動化が容易である。

●モジュール構造のため量産性に優れ、スケールメリットが大きい

太陽電池は、コンパクトなモジュール構造として製造されるため、量産性に優れ、需要の拡大につれて連続自動化製造工程などによる低コスト化が図れる。

●太陽光発電は放棄エネルギーの有効利用

火力発電では、総合効率が38%といわれており、62%(100-38)の重油を無駄に燃やしていることになる。それに対し、太陽電池の変換効率が15%という場合、その原料は太陽光であり、地球に降り注ぐ太陽光を15%の電気エネルギーに変えて有効利用していることになるため、原材料費において、他の発電方法と大きな違いがある。

1-1-2 太陽電池の種類

確実にかつ深刻に進行している地球温暖化において、太陽光発電システムはこの問題に対しての有効な方法として世界的に注目を浴びており、様々な種類の太陽電池が研究されている[6]。

現在、実用されている太陽電池の主流は、単結晶シリコンおよび多結晶シリコンを用いたバルク結晶シリコン太陽電池である。第2番手の太陽電池として、低コスト化が期待されるアモルファスシリコン (a-Si) 太陽電池、微結晶シリコン薄膜太陽電池および CIGS (CuInGaSe_2) や CdTe などの化合物多結晶太陽電池も実用化されている。さらに、第3番手の太陽電池として集光型太陽電池が注目されている[10]。

IEA (国際エネルギー機関) による太陽光発電市場予測では、将来的に集光型太陽光発電システム (Concentrator Photovoltaic system : CPV system, 以下 CPV システムとする) を含む大規模太陽光発電システムが太陽光発電市場の半分を占めると予想されている。III-V 族化合物多接合型太陽電池を用いた CPV モジュールは 40% 以上の高効率化と 40 円/W 以下の低コスト化が期待でき、大規模太陽光発電システムとして有望である。

1-1-3 集光型太陽光発電の特徴

CPV に使用される太陽電池セルは元素周期律表Ⅲ族およびⅤ族の元素からなる化合物、砒化ガリウム (GaAs) や燐化インジウム (InP) などのⅢ-Ⅴ族化合物太陽電池であり、宇宙用太陽電池として実用化されている。高効率であることと、放射線耐性にすぐれていることから、宇宙用太陽電池として大部分にⅢ-Ⅴ族セルが用いられている。現在では、ゲルマニウム (Ge) 基板上的 GaAs セルが宇宙用として実用化されている[11]。実例として、火星探査ロボット「パースファインダー」は $2 \times 4 \text{ cm}^2$ の Ge 基板上的 GaAs 太陽電池が搭載されており、18 直列の太陽電池が 13 並列に接続されている。面積は 0.22 m^2 、重量は 0.34 kg 、出力は 16.5 W (地球上の AM1.0 では 40 W 相当)である[12]。

Si や化合物太陽電池などの単接合セルでは、変換効率 26-28%が限度である。さらに高効率化をはかるためには、太陽光スペクトルを有効に活用する必要がある。複数の材料からなる太陽電池層を積層した多接合型太陽電池は、太陽光スペクトルの有効活用による高効率化が期待できる。本研究で使用している CPV システム内の太陽電池セルは InGaP/InGaAs/Ge の 3 接合セルであり、波長領域 300-1800 nm の光を吸収でき、非集光で 37.9%、集光時には 44.4%の高効率を実現している[13]。

集光技術においては、レンズや反射鏡を用いた太陽光の集光によって、太陽電池の光変換効率向上に加え、太陽電池材料の使用量の飛躍的削減が可能で、省資源化や低コスト化などが期待できる。Ⅲ-Ⅴ族化合物多接合集光セルを用いたモジュールは、太陽電池セル、レンズや反射鏡の光学系、追尾系で構成される。集光倍率によるが、太陽電池の集光動作により、非集光時に比べて、絶対値で 7-10%の変換効率の向上がはかられ、CPV の魅力の一つである。集光動作下での太陽電池の温度上昇による特性低下、高集光動作下での太陽電池の信頼

性などの課題があったが、試作された CPV は、現用の非集光平板型太陽電池 (Flat-Panel Photovoltaic : FP-PV) モジュールに比べ、面積あたり 2 倍の出力が出ており、大規模太陽光発電所など新たな応用分野の創成が期待されている[14]。

1-1-4 集光型太陽光発電システムの特徴

CPV システムは、安価なレンズや鏡等で太陽光を集光し、小面積の太陽電池で発電するため、高価な太陽電池の使用量を大幅に削減でき、さらに光電流/暗電流比の増加により太陽電池の開放電圧が向上し、変換効率が向上するといった利点を有する。集光システムは、太陽光を追尾する装置が必要であり、直達光(平行光線)だけがレンズやミラーにより集光することが可能であるといった短所があるものの、変換効率の上昇や太陽光追尾による発電量の増加により、発電コストの低減が可能となる。CPV に主に用いられている InGaP/InGaAs/Ge の 3 接合太陽電池は、高効率と高信頼性により、人工衛星の電源等の宇宙用太陽電池として使用されているが、高価であることから、地上用発電システムに用いられることはなかった。高倍率集光システムの構想により、システムに占める太陽電池コストの大幅な削減が可能になったことや、システムのトータルコストを下げるためには、太陽電池の変換効率を向上させ、発電量を増加させることが不可欠であることから、InGaP/InGaAs/Ge の 3 接合太陽電池を用いた CPV システムが使用されている。以下に、①CPV の基本特性、②3 接合型太陽電池 InGaP/InGaAs/Ge、③集光光学系、④コストについて述べる。

①基本特性

CPV の短絡電流密度、開放電圧および変換効率は、一般に、集光比に対し次のような式の関係にある。

$$J_{sc2} = CR \times J_{sc1} \quad (1.1)$$

$$V_{oc1} = \frac{nkT}{q} \times \ln\left(\frac{J_{sc1}}{J_0} + 1\right) \quad (1.2)$$

$$V_{oc2} = \frac{nkT}{q} \times \ln\left(\frac{J_{sc2}}{J_0} + 1\right) \quad (1.3)$$

$$\eta_1 = J_{sc1} \times V_{oc1} \times \frac{FF_1}{P_{in}} \quad (1.4)$$

$$\eta_2 = J_{sc2} \times V_{oc2} \times \frac{FF_2}{P_{in} \times CR} \quad (1.5)$$

(CR: 集光比、 n , J_0 : ダイオード因子, 逆方向飽和電流値、 k : ボルツマン定数、 T : 温度、 q : 電荷、 J_{sc1} , J_{sc2} : 非集光時・集光時の短絡電流密度、 V_{oc1} , V_{oc2} : 非集光時・集光時の開放電圧、 FF_1 , FF_2 : 非集光時・集光時の曲線因子、 η_1 , η_2 : 非集光時・集光時の変換効率、 P_{in} : 非集光時の太陽光強度 (1 kW/m²))

短絡電流密度 J_{sc} は集光比 CR に比例して増加し、開放電圧 V_{oc} は、集光比 CR の対数に比例して増加する。また、曲線因子 FF は直列抵抗 R_s やスペクトル変化による影響がなければ、 V_{oc} の増加に伴って増加するため、集光時において V_{oc} の増加および FF の増加によって、変換効率 η_2 は増加する [11,15]。

②3 接合型太陽電池 InGaP/InGaAs/Ge

図 1.1 に太陽光スペクトル(AM1.5G, 1 kW/m²)、InGaP/InGaAs/Ge の 3 接合太陽電池セルの光吸収領域を示し、図 1.2 に 3 接合太陽電池セルの断面構造を示す。InGaP トップセルは 660 nm 以下、InGaAs ミドルセルは 660 ~ 890 nm、Ge ボトムセルは 890 ~ 2000 nm の波長領域の光を電気エネルギーに変換する。3 つの太陽電池はトンネル接合を介して直列に接続されており、開放電圧は 3 つのセルの起電圧の和、短絡電流は (各セルの接合にリークがなければ) 起電流の最小値に制限される[14]。

また、太陽光スペクトルを 3 分割する 3 接合太陽電池は、Si セルに比べて短絡電流密度が小さいために、直列抵抗 R_s でのエネルギー損失 (I^2R) が小さくなり、より高い集光比まで変換効率を増加させることができる。

③集光光学系

CPV システムは、集光技術を用いることで太陽電池の使用量を 10%から 0.1%まで減少させることができるといわれており、コストダウンを図る大きな要因として集光倍率の高倍率化が挙げられる[14]。

太陽電池に光を集めるための集光光学系は、主に反射鏡方式とレンズ方式に分けられる。反射鏡方式は、高倍率での集光が可能、集光における色収差がないといった利点があるものの、高湿環境下での反射率の維持や塵埃の堆積による集光特性の低下などが不安要素として懸念されている。一方、レンズ方式は反射鏡方式に比べ集光倍率が低く、色収差が発生するというような懸念事項はあるものの、低コストでの製作が可能であること、一般に耐候性に優れることから、CPV システムではレンズ方式が採用されていることが多い。また、レンズには平面型と非平面型があり、使用用途やシステムのコンセプトなどによって使い分けがなされている[14]。

④コスト[16]

Araki らは、CPV システムの定格発電電力当たりのシステムコストを 5 \$/W と見積もっている。現在一般的に普及している固定式平板型の太陽電池パネルは 3.25 \$/W であり、現在の CPV システム並の生産量であった 1976 年では 62 \$/W と現在のコストの約 20 倍であった。CPV システムに関しては産業化がはじまったばかりであり、CPV システムにおいても量産化によって大幅なコストダウンが期待されている。

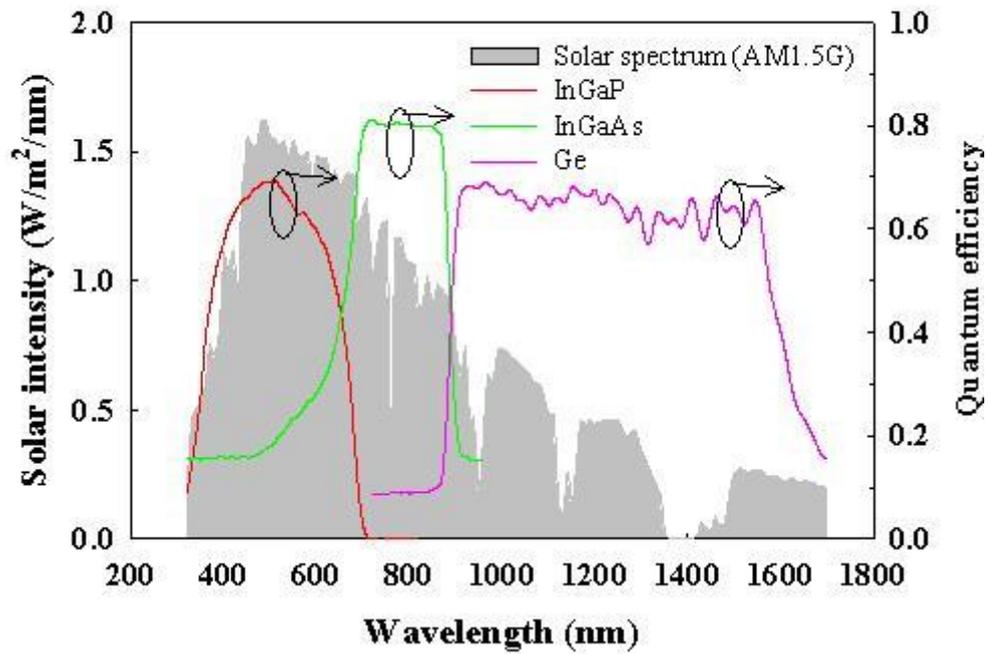


図 1.1 InGaP/InGaAs/Ge の 3 接合太陽電池セルの光吸収領域

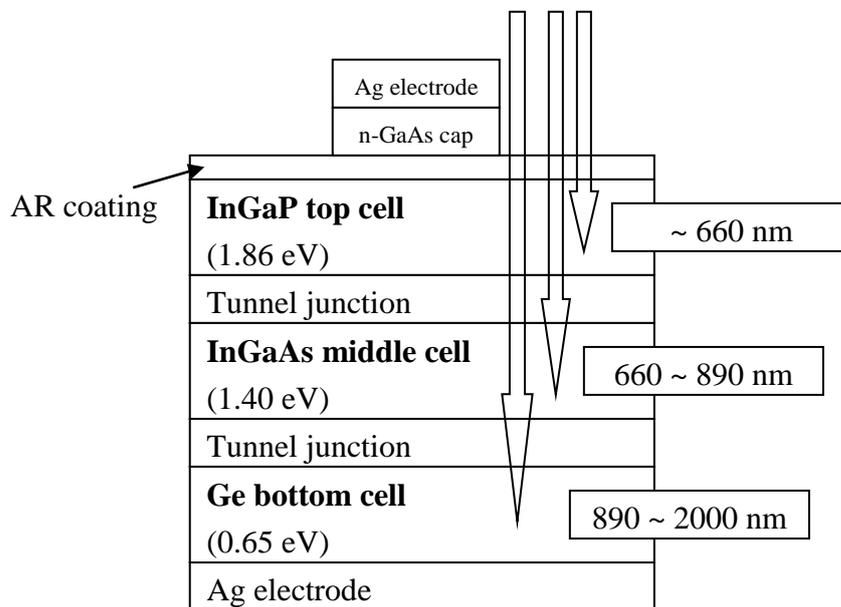


図 1.2 3 接合太陽電池セルの断面構造

1-1-5 レンズ方式の集光光学系（フレネルレンズ）

本研究では、図 1.3 に示すように、宮崎大学に設置された CPV システムを使用した。図 1.4 に示すレンズ方式の集光光学系での代表格であるフレネルレンズについて主に述べる。

集光光学系へ要求される特性として、(1)セルへの集光分布の均一化、(2)優れた信頼性、(3)レンズの低コストが主にあげられる。

(1) 集光分布の均一化

本研究で使用している CPV システムでは、非常に高い変換効率を有する 3 接合型太陽電池を使用しており、3 接合型太陽電池は広い範囲の波長領域の光を発電に利用するため、色収差の影響が発電性能を大きく左右する。そのため、集光光学系には、太陽電池全面に均一な集光分布が得られるような配慮が求められる[17, 18]。この要求に対し、非結像という光学設計方式、フレネルレンズ(一次光学系)の焦点を一点で結ばないことで、対象の面積に対して均一なエネルギー分布を得られるように設計されている[19]。また、セルの真上に 2 次光学系(ホモジナイザー)を用いることで、より集光分布を均一に近づけている。この光学設計を用いれば、追尾精度を粗くすることが許容され、追尾系を含めシステム全体の低コスト化にも寄与できる。

(2) 優れた信頼性

発電コストの低減のために、システムの長寿命化は非常に重要である。CPV システムも FP-PV システム並みの寿命（期待寿命で 20 年）が求められる。太陽光発電は、屋外で使用する上、CPV システムでは常時太陽に向かって追尾を行っているため、レンズの紫外線による劣化、塵埃によるレンズの傷などの影響

を考慮する必要がある。また、フレネルレンズの場合、ガラスを使用すると重量増になることと、レンズプリズムの加工の容易さを考え、PMMA (Poly Methyl Meth Acrylate)樹脂が使用されることが多い。PMMA 樹脂は、主に窓やショーケースなどに広く使用されており、耐候性がよいとされているが、耐衝撃性が劣るという材料である。他にも、ポリカーボネートなどの透明樹脂も考えられており、透過率や耐候性が改善されてきていることから、システム設置環境に応じて材料を選定することも可能になってきている。

(3) 低コスト

集光光学系は、FP-PV には使用されない部材を用いることから、低コストが求められる。CPV の場合、集光光学系は発電性能を左右する重要な機能部品であることから、集光性能とコストの両立が難しいが、環境に適したレンズ選択やレンズ製造方法を考慮することで低コストにつながる事が考えられる。

以上のように、超高効率太陽電池と組み合わせる CPV システムは、量産性のもとより、製造エネルギーとコスト、資源量、現用の FP-PV と比較して有利な位置にあり、将来的に大きなポテンシャルを持っていると考えられる[14]。



図 1.3 集光型太陽光発電システム (宮崎大学 14 kW)



図 1.4 本研究で使用される CPV モジュールのフレネルレンズ(20 cm × 20 cm)

1-1-6 太陽光の種類

地表で受け取ることができる日射は、太陽から直接入射する直達日射、大気中の水蒸気などで散乱された日射や雲などによって反射された散乱日射、地表や建造物などで反射された反射日射に大別される。これらの全ての成分を合わせたものを全天日射と呼ぶ[20]。このうち、CPV システムは集光光学系によって直達日射だけが発電に寄与し、FP-PV は全天日射が発電に寄与する。さらに本研究では追尾面、傾斜面という記述があり、ここで解説する。

追尾面は CPV システムなど、太陽光を追尾する装置の最大面積の面であり、太陽方向の法線方向を表す。傾斜面は非追尾式の一般的な FP-PV において、緯度により最適な発電をする角度があり、その角度面のことを表す。基本的には春分、秋分の日の中(地球上の北半球では南中、南半球では北中)時の太陽方向の法線方向を表す。

1-2 本研究の目的

1-1 では太陽電池、主に CPV に関する背景を説明した。CPV システムはいまだ発展途上であり、未解析分野が多く、その日射条件による発電量、砂漠や工業地帯など設置環境への対策に関する研究が現在盛んに行われている[21-29]。これから大いに活躍することが予測されるクリーンエネルギーの一つである太陽光発電、特に大規模太陽光発電を想定して、その設置環境において、太陽電池の種類による発電適正を明らかにすることは非常に重要である。

本研究では太陽光から CPV での光電変換における環境から受ける影響および最適な装置設備に関する調査を目的として、実験および解析を行った。これらの知見を活かすことにより、実環境下において高出力を得ることができる CPV システムの開発が可能となる。なお、各章ごとの詳しい目的は次節にまとめた。

1-3 本論文の構成

本論文は 5 章で構成され、第 1 章では太陽光発電の背景および本研究で使用する CPV システムについてまとめた。

太陽から放射される光エネルギーが CPV システムによって電気エネルギーに変換されるまでの通りの損失について考える。太陽光エネルギーは太陽から放射され、宇宙を直進し、地球大気中を通り、CPV システムに到達し、電気エネルギーに変換される。CPV システムで太陽光エネルギーが電気エネルギーに変換されるまでに、①地球大気中、②CPV システム表面レンズ、③太陽電池セル内部の 3 箇所において、大きくエネルギーを損失する。この 3 箇所に関する研究を行い、それぞれ第 2 章、第 3 章、第 4 章で論じる。

第 2 章では①地球大気中において、太陽光が空気中のエアロゾルによって散乱を起こすため、CPV 表面に到達する時には太陽光エネルギーは大きく減少しており、CPV システムを設置する地域、環境が適した場所であるかどうかの指標作製を目的として、直達日射量および散乱日射の解析を行い、CPV システムと FP-PV システムの出力比較を行った。

第 3 章では②CPV システム表面レンズにおける反射、散乱による太陽光エネルギー損失の要因であるレンズ表面汚れについて実験を行った。実験を通して得られた結果により光触媒コートによる汚れ付着の抑制について論じる。

第 4 章では③太陽電池セル内部として、太陽電池セルに太陽光が照射された際に電気エネルギー以外に熱エネルギーとなって、エネルギーの損失が発生する。熱の発生は太陽電池セルの変換効率を低下させるため、温度上昇抑制による出力の改善は大きな課題である。CPV は太陽電池の熱をモジュールケースに熱伝導させ、モジュールケースは熱放射、対流によって放熱している。そのた

め、熱伝導の点からモジュールケースの厚みによる温度上昇抑制について検討した。

第5章では第2章から第4章までの研究結果を総括した。

1-4 引用文献

- [1] IEEJ アジア/世界エネルギーアウトルック 2012.
- [2] 加古正幸, 杉井健治, “エネルギー需給の動向”, J. Jpn. Inst. Energy, **90**, 681-683 (2011).
- [3] 小島紀徳, “太陽光利用について考える”, 化学工学第 75 卷, 第 1 号, 2-6 (2011).
- [4] M. Isaac, D. P. van Vuuren, “Modeling global residential sector energy demand for heating and air conditioning in the context of climate change”, Energy Policy, **37**, 507–521 (2009).
- [5] 秋元圭吾, “地球温暖化とエネルギー展望: 温室効果ガス排出と温暖化影響”, J. Jpn. Inst. Energy, **91**, 7, 605-607 (2012).
- [6] 近藤道雄, “太陽電池と低炭素社会への展望”, 化学と教育 59 卷, 12 号, 620-625 (2011)
- [7] M. Ringel, “Fostering the use of renewable energies in the European Union: the race between feed-in tariffs and green certificates”, Renewable Energy, **31**, 1–17 (2006).
- [8] IEA-International energy agency. Renewable energy policy in IEA Countries (Volume II. Country Reports).Paris (1998).
- [9] WBGU (German Advisory Council on Change), “World in Transition-Towards Sustainable Energy Systems”, Earthsan, London (2003).
- [10] 清水正文, 沢井啓安, “太陽光発電技術の現状と今後の展開”, シャープ技報 第 93 号, 5-10 (2005).
- [11] 高本達也, 兼岩実, “集光型化合物太陽電池”, シャープ技報 第 93 号, 49-53 (2005).

- [12]山口真史, “火星探査ロボットの太陽電池-Ge 基板上の GaAs 太陽電池-“, 応用物理第 67 巻, 第 11 号, 1311-1314 (1998).
- [13]M. A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta, E. D. Dunlop, “Solar cell efficiency tables (version 42)”, Prog. Photovolt: Res. Appl, **21**, 827-837 (2013)
- [14]山口真史 監修「高効率太陽電池の開発と応用」, シーエムシー出版, (2009.11)
- [15]K. Nishioka, T. Takamoto, T. Agui, M. Kaneiwa, Y. Uraoka, T. Fuyuki, “Annual output estimation of concentrator photovoltaic systems using high-efficiency InGaP/InGaAs/Ge triple-junction solar cells based on experimental solar cell’s characteristics and field-test meteorological data”, Solar Energy Materials & Solar Cells, **90**, 57–67 (2006).
- [16]荒木建次, 近藤道雄, 山口真史, “集光太陽光発電用 2 次光学系の開発”, 電気製鋼第 73 巻, 4 号, 221-228 (2002).
- [17]M. Buljan, P. Benitez, R. Mohedano, J. C. Minanno, “IMPROVING PERFORMANCES OF FRESNEL CPV SYSTEM: FRESNEL-RXI KOHLER CONCENTRATOR”, proc of the 25thEUPVSEC, 930-936 (2010).
- [18]J.H.Karp, E. J. Tremblay, J. E. Ford, “Planar micro-optic solar concentrator”, OPTIC EXPRESS, **18**, 2, 1122-1133 (2010)
- [19]山田昇, 岡本和也, “負の屈折率層を有する非結像フレネルレンズの光学解析”, 太陽エネルギー, **37**, 4, 41-47 (2011).
- [20]気象庁「気象観測の手引き」 (1998)
- [21]G. S. Kinsey, K. Stone, J. Brown, V. Garboushian, “Energy prediction of a monix CPV solar power plants”, Prog. Photovolt: Res. Appl., **19**, 794–796 (2011).
- [22]H. W. Barker, G. L. Stephens, P. T. Partain, J. W. Bergman, B. Bonnel, K. Campana, E. E. Clothiaux, S. Clough, S. Cusack, J. Delamere, J. Edwards, K. F. Evans, Y.

- Fouquart, S. Freidenreich, V. Galin, Y. Hou, S. Kato, J. Li, E. Mlawer, J. J. Morcrette, W. O. Hirok, P. Raisanen, V. Ramaswamy, B. Ritter, E. Rozanov, M. Schlesinger, K. Shibata, P. Sporyshev, Z. Sun, M. Wendisch, N. Wood, F. Yang, “Assessing 1D Atmospheric Solar Radiative Transfer Models: Interpretation and Handling of Unresolved Clouds”, *JCLI*, **16**, 2676-2699 (2003).
- [23] N. Martin, J. M. Ruiz, “Calculation of the PV modules angular losses under field conditions by means of an analytical model”, *Solar Energy Materials & Solar Cells* **70**, 25-38 (2001).
- [24] A. M. Pavan, A. Mellit, D. D. Pieri, “The effect of soiling on energy production for large-scale photovoltaic plants”, *Solar Energy*, **85**, 1128–1136 (2011).
- [25] K. Nabemoto, Y. Sakurada, Y. Ota, K. Takami, H. Nagai, K. Tamura, K. Araki, K. Nishioka, “Effect of Anti-Soiling Layer Coated on Poly(methyl methacrylate) for Concentrator Photovoltaic Modules”, *JJAP*, **51**, 10, 10ND11-10ND11-3 (2012).
- [26] L. K. Verma, M. Sakhuja, J. Son, A. J. Danner, H. Yang, H.C. Zeng, C.S. Bhatia, “Self-cleaning and antireflective packaging glass for solar modules”, *Renewable Energy*, **36**, 2489-2493 (2011).
- [27] M. Garcia, L. Marroyo, E. Lorenzo, M. Perez, “Soiling and other optical losses in solar-tracking pv plants in Navarra”, *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, **10**, 1002-1004 (2010).
- [28] D. Faiman, D. Berman, E. Held, H. Oldenkamp, “Study of AC-module inverters under extreme desert conditions”, *Solar Energy Materials & Solar Cells* **75**, 629-635 (2003).
- [29] L. Moore, H. Post, H. Hayden, S. Canada, D. Narang, “Photovoltaic Power Plant Experience at Arizona Public Service: A 5-year Assessment”, *Prog. Photovolt: Res.*

Appl., **13**, 353–363(2005).

第2章 散乱比による

太陽光発電システムの導入指標

2-1 緒言

第1章で記述したように、CPVシステムは直達日射成分のみが発電に寄与し、散乱光成分は発電に寄与できない。直達日射成分のみが発電に寄与するため、CPVシステムは高精度で太陽に正対するように追尾させる[1, 2]。また、太陽電池の変換効率は、温度の上昇とともに減少するため[3-6]、CPVモジュールでは高密度の太陽エネルギーが太陽電池に照射され、集光下で、CPVモジュールの動作温度を管理することも重要である。さらに、日本において、乾季と雨季による湿度の違い、大陸からの黄砂や空気中のエアロゾルの季節変化[7-12]などによる直達日射量への影響があり、晴天日であっても時期によって散乱比が変化し、CPVシステムの発電量に大きな影響を与える。散乱比とエアロゾルの関係については、エアロゾル測定に透過光の散乱を用いるため、エアロゾルと散乱比は同義と言える。すなわち、エアロゾルが大きくなれば、散乱比も大きくなる。

このように実環境において、発電の効率が変化し得る環境条件が多く存在するため、本研究では大気中で散乱を起こした散乱光成分、散乱の比率に主眼を置き、システムの発電量比較を行う。また、CPVモジュールは現用のFP-PVモジュールに比べ、面積あたり2倍の出力が確認されており、大規模太陽光発電所など新たな応用分野が期待されている[13]。国内では我々のグループのほかに、(独)産業技術総合研究所を中心に実環境下でのCPVシステムの実証試験が実施されている[14]。しかしながら、普及しているFP-PVシステムとの出力比較等、

詳細な報告例はない。散乱比を交え、システムの発電量比較を行うことは、今後、日射条件に適した太陽光発電システムを選定する上で必要不可欠な知見を得ることになる。

本研究では、CPVシステムと、一般的に最も普及している平板型の非追尾多結晶シリコン太陽光発電システム(mc-Siシステム)の実環境下における発電量比較をおこなった。傾斜面全天日射量と太陽光の散乱比を指標として、CPVシステムとmc-Siシステムのどちらが多く発電するかを推定するための指針を提案した。

2-2 実験方法

2-2-1 太陽光発電システム

図2.1に集光型太陽電池モジュールの模式図を示す。16 cm × 16 cmのプラスチック製フレネルレンズで太陽光を500倍に集光し、レンズ下に設置された7 mm × 7 mmの太陽電池に照射することにより、太陽電池の使用面積を大幅に減少させている。太陽電池には、超高効率InGaP/InGaAs/Ge三接合型太陽電池が用いられており、モジュールの面積当たりの定格出力は、今回使用したmc-Siシステムと比べて1.5倍である。

本研究で使用したCPVシステムは、図1.3で示した宮崎大学に設置されているCPVシステム(大同特殊鋼株式会社)である。発電パネルは縦7 m、横10 m (70 m²)、1基あたり14 kWの日本最大級の定格出力を有する。太陽光を正面から受けるように自動でパネルを動かす追尾システムを備えている。

図2.2に宮崎大学附属図書館屋上に設置されているmc-Siシステムの写真を示す。mc-Siシステム(定格50 kW)は傾斜角20°で設置されており、モジュール面積は381 m²である。

これらの太陽光発電システムは、データ蓄積のためのシステムを備えており、CPVシステム、mc-Siシステムの屋外における発電量を計測・データ蓄積している。また、様々な気象環境も計測・データ蓄積しており、本研究の解析には、CPVシステムに設置された直達日射計、法線面全天日射計、および、mc-Siシステムに設置された傾斜面全天日射計により1分間隔で計測した各日射量を用いた。



図 2.1 集光型太陽電池モジュールの模式図



図 2.2 多結晶シリコン太陽光発電システム
(宮崎大学木花キャンパス附属図書館屋上)

2-2-2 散乱比の計算方法

散乱比とは全天日射量中の散乱日射の割合を示す。そのため、散乱比は法線面全天日射量と直達日射量から式(2.1)を用いて、

$$S = \frac{(G-D)}{G} \quad (2.1)$$

S : 散乱比 ($0 < S < 1$)

G : 法線面全天日射量(kWh/m²/day)

D : 直達日射量(kWh/m²/day)

と定義される。

本研究では2010年5月から2011年11月までの実測データを用いて解析した。

2-3 結果および考察

2-3-1 散乱比の変動

図 2.3 に 2011 年 1 月 1 日（晴天日）における CPV システムおよび mc-Si システムの単位パネル面積あたりの出力と散乱比の一日の動向を示す。一日を通して散乱比が低い一日である。mc-Si システムの場合、朝夕では太陽光が斜めから入射するため、実質の受光面積が小さくなり、発電量は小さくなる。一方、CPV システムでは、太陽光を追尾しているため、朝夕でも太陽を真正面から受けることができ、発電量は大きくなる。正午において、CPV システムの出力が mc-Si システムの約 1.5 倍となっているのは、前述したように、CPV システムの太陽電池部分に超高効率 InGaP/InGaAs/Ge 三接合型太陽電池を用いているためである。

図 2.4 に 2010 年 5 月から 2011 年 11 月までの晴天日（一日の積算法線面全天日射量が $7 \text{ kWh/m}^2/\text{day}$ 以上の日）における散乱比のグラフを示す。散乱比は 5 月から 6 月にかけて 0.6 付近まで高くなり、11 月から 12 月にかけて 0.1 付近まで低くなる傾向を示している。これは梅雨季には、空気中の水分量が多くなり散乱比が高くなるためである。黄砂やエアロゾルが季節により変化し散乱比に大きく影響を与えている[7-12]。そのため、4 月や 5 月の梅雨季以外においても散乱比が高くなるのは黄砂やエアロゾルが大きく影響していると考えられる。

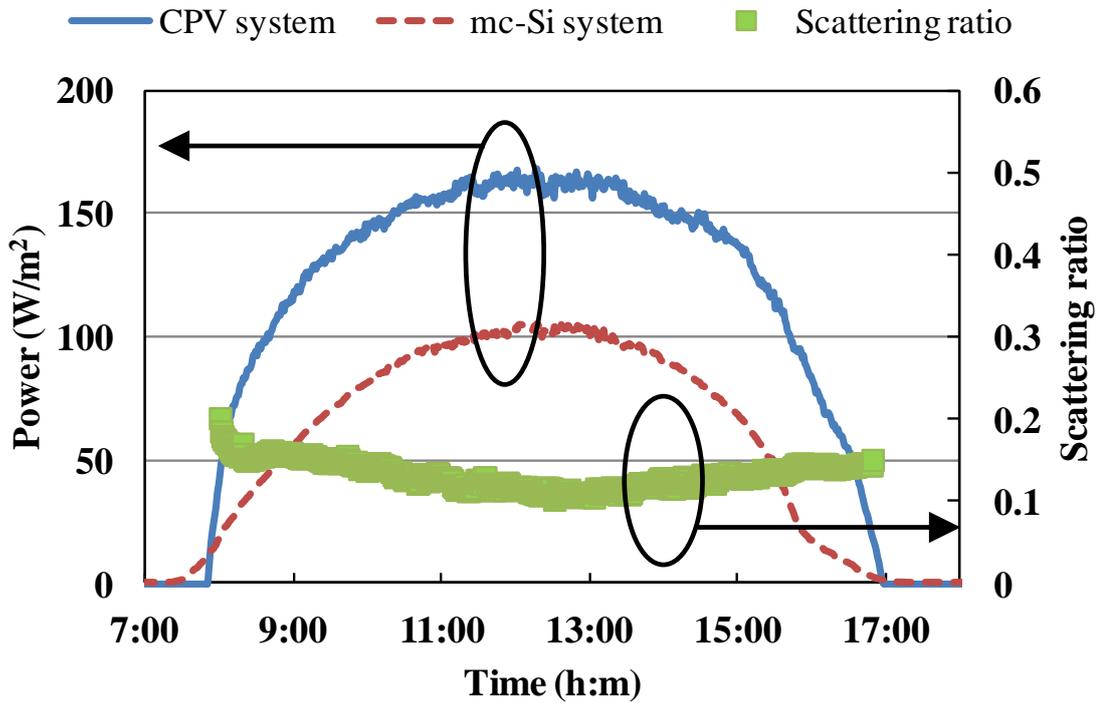


図 2.3 CPV システムおよび mc-Si システムの出力と散乱比

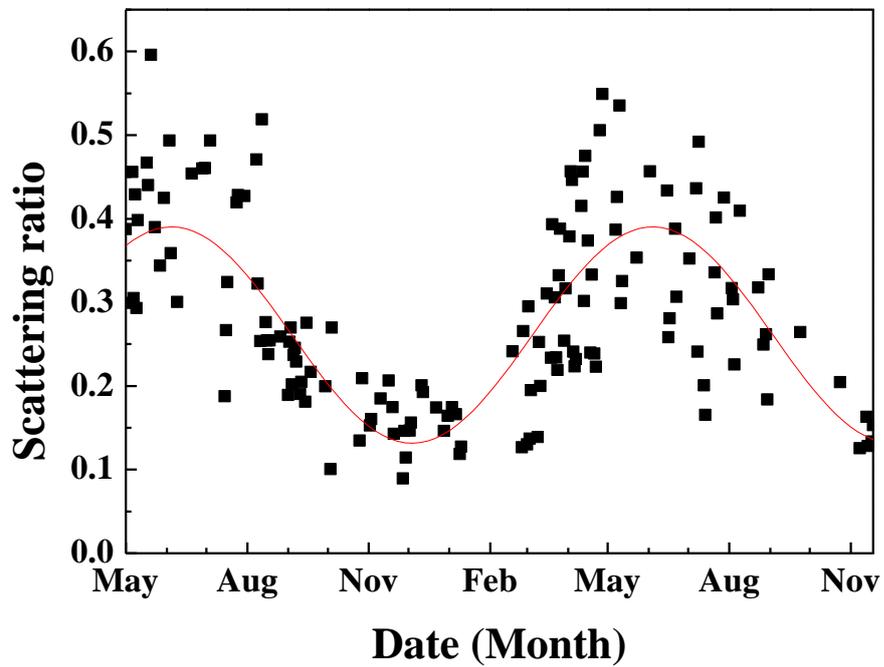


図 2.4 散乱比の季節変動

2-3-2 散乱比による出力と日射量

散乱比を0.2毎に分けた時の一日の積算直達日射量(kWh/m²/day)とCPVシステムとmc-Siシステムの出力比のグラフを図2.5に示す。Wcpv(kWh/m²/day)をCPVシステムの単位面積あたりの一日の積算出力量、Wmc(kWh/m²/day)をmc-Siシステムの単位面積あたりの一日の積算出力量とし、出力比はWcpv/Wmcで定義した。出力比が1を超えるとCPVシステムの出力のほうが多く、有利であることを示す。直達日射量と出力比には相関関係がみられ(相関係数:0.86)、直達日射量の増加に伴い、出力比が大きくなり、CPVシステムが有利になる。出力比が1となる直達日射量は約4kWh/m²/dayであり、一日の積算直達日射量がこれ以上の環境下においてはCPVを設置したほうがより多くの出力を得ることができる。また、図2.5中の◇(散乱比:0.0-0.2)や□(散乱比:0.2-0.4)で示すように、散乱比が小さい時には直達日射量が多い。

図2.5の結果より、太陽光発電システムの設置候補地における直達日射量がわかれば、直達日射量と出力比が相関関係を持つことより、CPVシステムか、平板のmc-Siシステムかのどちらが有利かを予測することが可能である。しかしながら、直達日射量を計測している箇所は、傾斜面全天日射量を計測している箇所に比べ非常に少なく、指標として用いるためには適応できる場所が限られる。一方、傾斜面全天日射量は、多くの場所で計測されており、傾斜面日射量を指標として用いることができれば、その汎用性が広がる。

図2.5と同じように散乱比を0.2毎に分けた時の一日の積算傾斜面全天日射量(kWh/m²/day)と出力比のグラフを図2.6に示す。積算傾斜面全天日射量と出力比には相関関係がみられるが、図2.5に示したような積算直達日射量と出力比の相関関係ほど顕著ではない。これは、同じ全天日射量でも、散乱比が大きく異なるためであり、例えば、同じ6kWh/m²/dayのときでも、散乱比は0から0.6ま

で広域に存在している。そのため、傾斜面全天日射量を用いて CPV システムと平板の mc-Si システムのどちらが有利かを知るためには、散乱比も考慮した指標の検討が必要となる。

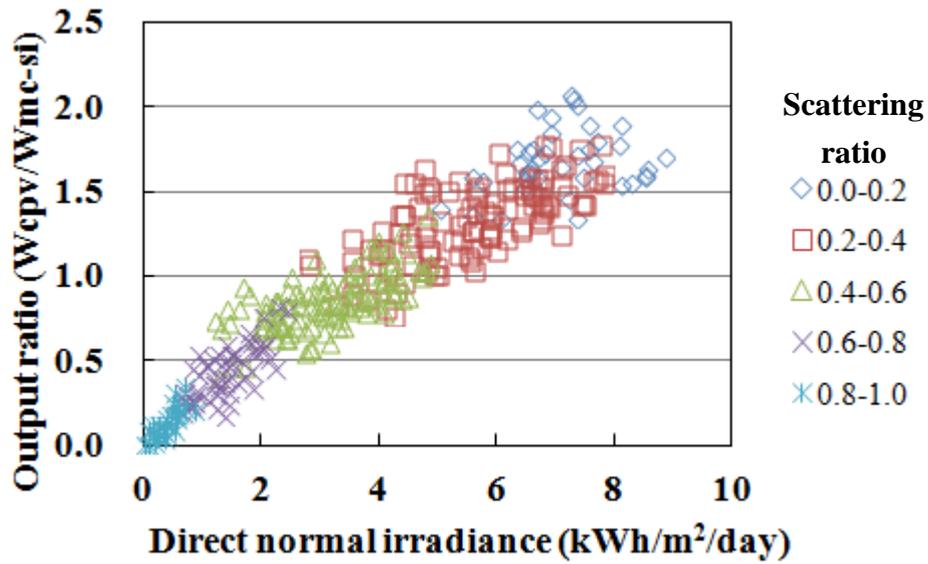


図 2.5 各散乱比における直達日射量と出力比の関係(相関係数 : 0.86)

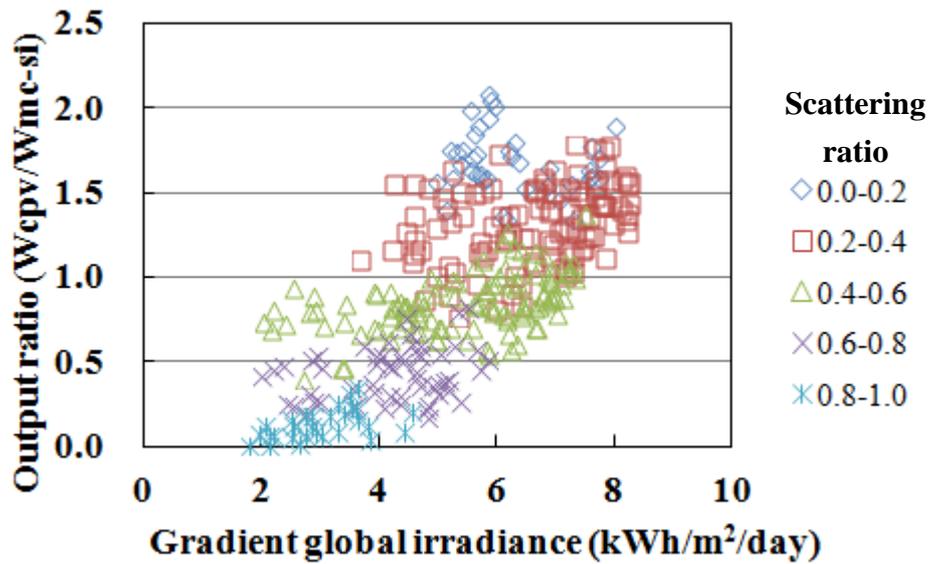


図 2.6 各散乱比における傾斜面全天日射量と出力比の関係(相関係数 : 0.56)

2-3-3 散乱比によるシステムの優位性の境界条件

2-3-1 において、散乱比を考慮した指標が必要であると記した。この節では、散乱比をさらに細かく分け、関係性を出力比によって調査した。

散乱比をさらに細かく、0.1 毎に分け(散乱比を 0.2-0.3, 0.3-0.4 など)、各散乱比における積算傾斜面全天日射量と出力比に関する最小二乗近似法による近似直線を描いた。得られた近似直線から出力比が 1 となる積算傾斜面全天日射量を求めた。ただし、積算傾斜面全天日射量が 0 kWh/m²/day の時、出力比が 0 に近づくものとし、近似式の切片は 0 とした。一例として、図 2.7 に散乱比 0.3~0.4 における積算傾斜面全天日射量と出力比を示す。近似直線から出力比が 1 となる傾斜面全天日射量は 5.5 kWh/m²/day と見積もることが可能である。

他の散乱比の範囲においても同様に見積もり、各散乱比範囲における、出力比 1 となる実環境下で取り得る範囲の積算傾斜面全天日射量を取り出したものが導入指標となる。図 2.8 に散乱比と積算傾斜面全天日射量を使用した導入指標と、例として 5 地域における散乱比と積算傾斜面全天日射量の年間平均値を示す。導入指標の上部の環境条件においては CPV システムの出力が大きくなり、下部の環境条件においては mc-Si システムの出力が大きくなる。ここでは例として、実験データを取得し、日本国内において、日射量の高い宮崎、比較的安定して、年間日射量が高い岐阜、日本海側に位置し、散乱比が高いとされる金沢、梅雨が到来しないとされる北海道長沼、一日の日射量が最も高い那覇の 5 地点を用いた。これらの結果より、日射量が高いだけでなく、散乱比が小さい地域においてのみ CPV システムは有利になる。また、本結果である導入指標を用いることにより、設置する地域の散乱比と積算傾斜面全天日射量を測定すれば、CPV システムか、平板の mc-Si システムかのどちらが有利かを予測することが可能となる。

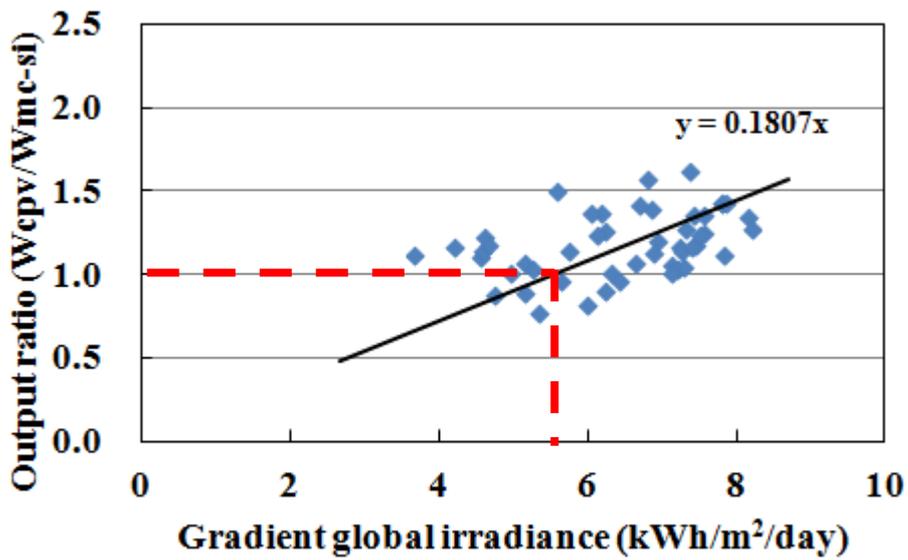


図 2.7 散乱比 0.3~0.4 における積算傾斜面全天日射量と出力比(相関係数:0.64)

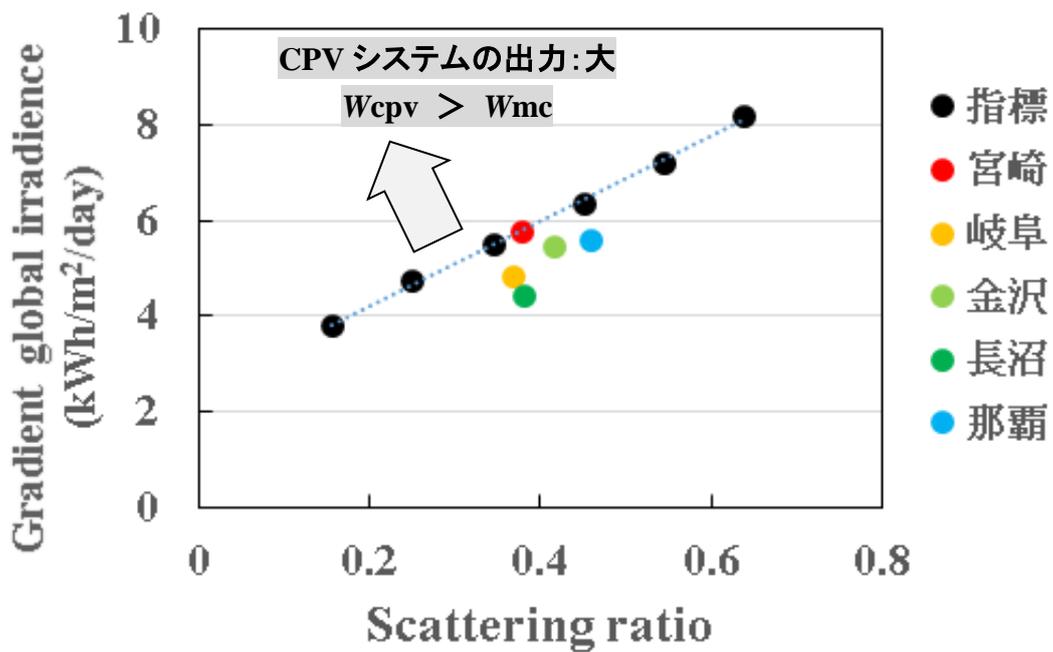


図 2.8 散乱比と傾斜面全天日射量を用いた太陽光発電システムの導入指標と各地域における年間平均値

2-4 結言

本章ではCPVシステムと、一般的に最も普及しているmc-Siシステムの実環境下における発電量比較を行い、傾斜面全天日射量と太陽光の散乱比を指標として、CPVシステムとmc-Siシステムのどちらが多い発電出力かを推定するための指針を提案した。得られた結果を以下にまとめる。

- ① 直達日射量で発電量比較を行った場合、積算直達日射量が約4 kWh/m²/day以上の環境下においてはCPVを設置したほうがより多くの出力を得ることが可能である。
- ② 傾斜面全天日射量と散乱比による太陽光発電システムの導入指標を作成した。本手法を用いることにより、太陽光発電システムの設置候補地の日射条件から得られる指標が導出でき、CPVシステムとmc-Siシステムのシステム選定が可能となる。

2-5 引用文献

- [1] K. Araki, T. Yano, Y Kuroda, “30 kW Concentrator Photovoltaic System Using Dome-shaped Fresnel Lenses”, *Optics Express*, **18**, S1, A53-A63 (2010).
- [2] V. Salas, E. Olias, A. Barrado, A. Lazaro, “Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems”, *Solar Energy Materials & Solar Cells* **90**, 1555-1578 (2006).
- [3] K. Nishioka, T. Hatayama, Y. Uraoka, T. Fuyuki, R. Hagihara, M. Watanabe, “Field-test analysis of PV system output characteristics focusing on module temperature”, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **75**, 665-671 (2003).
- [4] K. Nishioka, T. Takamoto, T. Agui, M. Kaneiwa, Y. Uraoka, T. Fuyuki, “Annual output estimation of concentrator photovoltaic systems using high-efficiency InGaP/InGaAs/Ge triple-junction solar cells based on experimental solar cell’s characteristics and field-test meteorological data”, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **90**, 57-67 (2006).
- [5] G. Peharz, J. P. Ferrer Rodrigues, G. Siefer, A. W. Bett, “Investigations on the temperature dependence of CPV modules equipped with triple-junction solar cells”, *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, **19**, 54–60 (2011).
- [6] M. D. Yandt, J. F. Wheeldon, J. Cook, R. Beal, A. W. Walker, O. Theriault, H. Schriemer, T. J. Hall, K. Hinzer, “Estimating Cell Temperature In A Concentrating Photovoltaic System”, *AIP Conf. Proc.*, **1477**, 172-175 (2012).
- [7] A. Matsuki, Y. Iwasaki, K. Osada, K. Matsunaga, M. Kido, Y. Inomata, D. Trochkin, C. Nishita, T. Nezuka, T. Sakai, D. Zhang, S. Kwon, “Seasonal dependence of the long-range transport and vertical distribution of free tropospheric aerosols over east Asia: On the basis of aircraft and lidar measurements and

- isentropic trajectory analysis”, *J. Geophys. Res.*, **108**, 23, ACE31-1 - ACE31-12(2003).
- [8] 荒生公雄, 青木一真, “長崎地方における 1999~2000 年春の黄砂現象”, 長崎大学総合環境研究, 第 4 巻, 第 1 号, 1-17 (2002).
- [9] R. B. Husar, D. M. Tratt, B. A. Schichtel, S. R. Falke, F. Li, D. Jaffe, S. Gasso, T. Gill, N. S. Laulainen, F. Lu, M. C. Reheis, Y. Chun, D. Westphal, B. N. Holben, C. Gueymard, I. McKendry, N. Kuring, G. C. Feldman, C. McClain, R. J. Frouin, J. Merrill, D. DuBois, F. Vignola, T. Murayama, S. Nickovic, W. E. Wilson, K. Sassen, N. Sugimoto, W. C. Malm, “Asian dust events of April 1998”, *J. Geophys. Res.*, **106**, D16, 18,317-18,330, (2001).
- [10] K. Aoki, Y. Fujiyoshi, “Sky Radiometer Measurements of Aerosol Optical Properties over Sapporo, Japan”, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **81**, 3, 493-513 (2003).
- [11] B. N. Holben, T. F. Eck, I. Slutsker, D. Tanre, J. P. Buis, A. Setzer, E. Vermote, J. A. Reagan, Y. J. Kaufman, T. Nakajima, F. Lavenue, I. Jankowiak, A. Smirnov, “AERONET — A Federated Instrument Network and Data Archive for Aerosol Characterization”, *Remote Sensing Environ.*, **66**, 1-16 (1996).
- [12] B. N. Holben, D. Tanre, A. Smirnov, T. F. Eck, I. Slutsker, N. Abuhassan, W. W. Newcomb, J. S. Schafer, B. Chatenet, F. Lavenue, Y. J. Kaufman, J. V. Castle, A. Setzer, B. Markham, D. Clark, R. Frouin, R. Halthore, A. Karneli, N. T. O’Neill, C. Pietras, R. T. Pinker, K. Voss, G. Zibordi, “An emerging ground-based aerosol climatology: Aerosol optical depth from AERONET”, *J. Geophys. Res.*, **106**, D11, 12,067-12,097 (2001).
- [13] 山口真史 監修 「高効率太陽電池の開発と応用」, シーエムシー出版,

p.3-6(2009.11)

- [14]J. Hashimoto, S. Kurtz, K. Sakurai, M. Muller, K. Otani, “Performance Of CPV System Using Three Types Of III-V Multi-Junction Solar Cells”, AIP Conf. Proc., **1477**, 372-375 (2012).

第3章 レンズ表面の汚れ付着と 光触媒コートによる砂の付着の抑制

3-1 緒言

第2章において、散乱比を使用した指標では太陽光成分の重要性が確認した。CPV では直達日射成分だけが発電に寄与する。しかし、直達日射成分が大気中を通過しても、レンズ表面で反射、散乱しては発電に寄与できない。レンズ表面で散乱成分になる要因はレンズの汚れ、キズ等によるものであり、特に大きな散乱になる。また、そのため、太陽電池パネルや集光用レンズの表面汚れによる発電特性への影響の研究は、太陽電池を安定して動作させるために必要不可欠である。

これまでの汚れの研究で、レンズに付着する汚れ（微粒子の付着、微粒子によるレンズの浸食、水滴痕などの凝結物など）やレンズ表面の傷は、レンズ表面での入射光の反射、散乱、吸収などによって、太陽電池の発電特性に大きく影響することが報告されてきた[1-5]。図3.1は一部を洗浄したFP-PVを示す[3]。汚れの原因として、土埃、鳥の糞、花粉などが挙げられるが、設置する環境で気象条件が異なるため、レンズ汚れの原因や影響の大きさは多様である。

第1章で記述したように、太陽光発電システムには従来の発電システムにはないメリットが存在する。しかし、太陽光はエネルギー密度が低いため、大量の発電を行うためには大面積の発電システムを設置する必要がある。この問題の解決策として、図3.2に示すように砂漠に太陽光発電システムを設置することが期待されている[6]。

世界に広がる砂漠には高い日射量と広大な未利用地がある。例えば、日本の東京と中国の内モンゴルのゴビ砂漠の年間全天日射量を比較した場合、東京は $1,268 \text{ kWh/m}^2/\text{year}$ であるが、ゴビ砂漠は東京よりも高緯度に位置するにもかかわらず、 $1,701 \text{ kWh/m}^2/\text{year}$ と日射量が非常に多い。さらに、赤道付近のサハラ砂漠を例にとれば、 $2,685 \text{ kWh/m}^2/\text{year}$ という東京の約2倍の日射量が存在する[7]。理論的には、システム効率 10%の太陽光発電システムをゴビ砂漠へ 50%の面積率で設置したとすれば、約 367 EJ の発電量を見込むことができ、これは 1997 年の世界の 1 次エネルギー消費量とほぼ等しいことになる[8, 9]。

砂漠への大規模太陽光発電システムの設置が実現すれば、環境を傷つけず、地球温暖化、エネルギー問題の解決に大きく貢献することは明らかである[8-10]。また、発展途上国への大規模太陽光発電システムの設置には多くの雇用創出が見込め、使用する機材を現地においても生産することから、商工業の発展等の国の経済発展が期待できる[11, 12]。

これらの現状を踏まえ、レンズ表面への汚れの抑制手段として、光触媒効果による防汚層が期待されている。本章では光触媒効果について、暴露試験による実験、および砂漠環境に CPV システムの設置を想定した砂の付着実験を行いレンズの汚れについて調査した。



図 3.1 一部分を洗浄した FP-PV[3]



図 3.2 15MW 北アメリカ大規模太陽光発電システム[6]

3-2 暴露実験による光触媒効果の有効性

3-2-1 使用した試料および実験方法

CPVシステムで使用されているレンズには主にPMMA樹脂が用いられている。本実験では試料として、面積が4 cm × 4 cm、厚さが2 mmの平板のPMMA樹脂(SUMIPEX-E000, Sumitomo Chemical Co., Ltd.)を使用した。図 3.3 左に通常のPMMA樹脂、右に光触媒コーティング(防汚コート)されたPMMA樹脂を示す。光触媒コートによる外見の変化はない。光触媒コーティングは、道路上のカーブミラーなどに使用されており、現在盛んに研究されている[13, 14]。図 3.4 に光触媒コーティングされたPMMA基板の模式図を示す。図 3.4 の右側にはそれぞれの層の厚さと屈折率を示している。アクリルウレタンキャッピング層は、PMMA表面より滲み出すオリゴマーを防止するブロッキング層として機能し、成分傾斜層との密着性を向上させる。また、この層の厚さ $d=2\ \mu\text{m}$ 、屈折率 $n=1.49$ となっている。次に成分傾斜層は無機(SiO_2 , TiO_2)/有機(PMMA)ナノ中間層(Ube-Nitto Kasei)として、材質をPMMA成分から TiO_2 成分、 SiO_2 成分へと成分比を緩やかに変化させることで屈折率を変化させており、反射率の低減およびPMMA基板を光触媒層から保護する役割を持っている。この層の厚さと屈折率は、 $d=0.1\ \mu\text{m}$, $n=1.49\sim 1.40$ となっている。次に最も表面に形成されている光触媒層は光触媒機能を持つ WO_3 (ILUMIO®, Sumitomo Chemical)および部分加水分解オルトケイ酸テトラエチル(Wako Pure Chemical Industries)により形成されている。光触媒層に太陽光の照射および降雨により光反応性および超親水性を発揮し、セルフクリーニング機能が発揮される[15]。

光触媒コーティング無しの試料は図 3.4 に示すPMMA基板のみで構成される。このように光触媒コーティング層を有したPMMA試料とコーティングなしのPMMA試料の2種類の試料を用いて暴露実験を行った。

図 3.5 に宮崎大学工学部の屋上(地上 8 階建)に南向き、角度 45° で試料を設置した写真を示す。試料は一週間毎に分光光度計 (JASCO : V-570) を用いて透過率を測定した。以後、光触媒コーティング層を有した PMMA 試料を With Coating、コーティングなしの PMMA 試料を Without Coating と表記する。

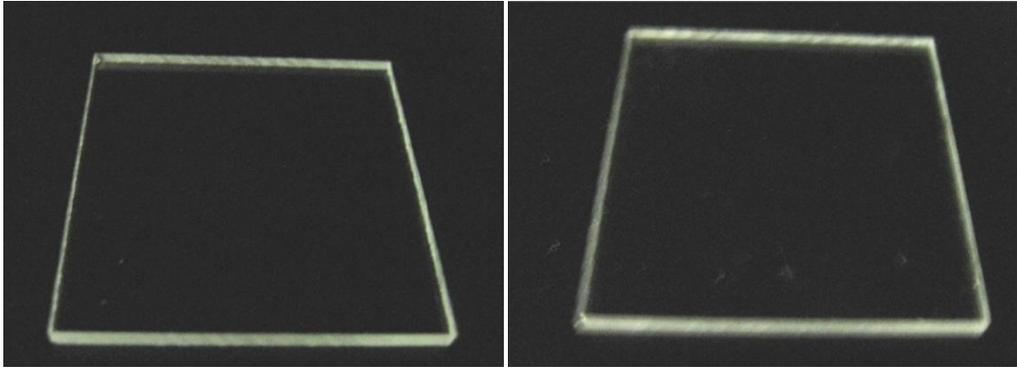


図 3.3 左 通常の PMMA 樹脂平板
 右 光触媒コーティングされた PMMA 樹脂平板

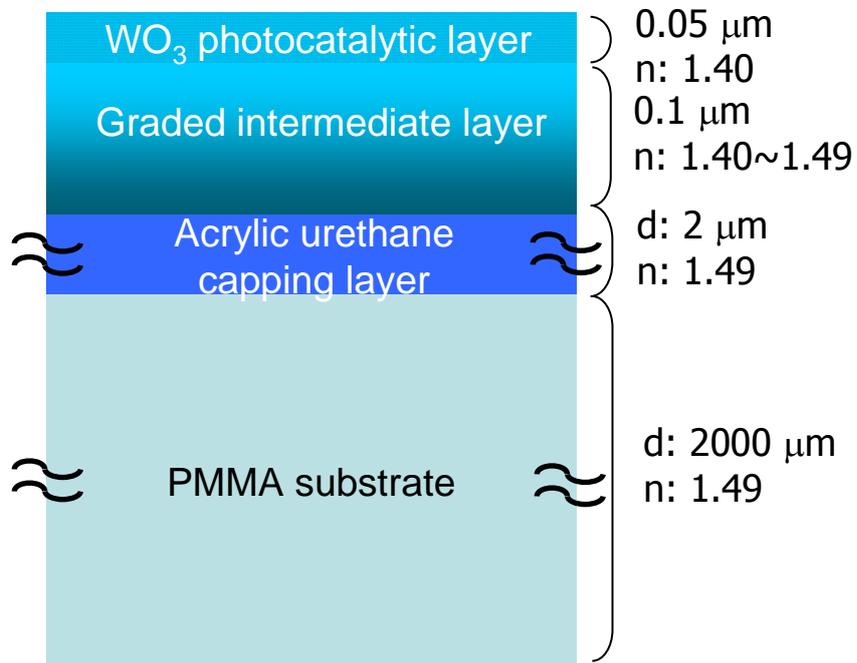


図 3.4 光触媒コーティング PMMA 基板の模式図



図 3.5 宮崎大学工学部の屋上(地上 8 階)屋外暴露実験

3-2-2 光触媒コートによる透過率低下の抑制

図 3.6 に光の波長 500 nm における透過率の変化と暴露日数および降雨量の関係を示し、図 3.7 に全天日射と直達日射スペクトルを示す。光の波長 500 nm では、太陽光日射強度が大きく、最もエネルギー損失が顕著にみられる波長が 500 nm であったため、図 3.6 では 500 nm を基準に暴露試験の経過を示した。図 3.6 より With coating の透過率が高く、測定開始後 3 月から 8 月までの 6 カ月間は Without coating、With coating の差は 1-2% 程度であり、共に大きく透過率は低下していない。しかし、10 月以降である、暴露開始 7 カ月目以降では両者の透過率の低下量に変化がみられ、Without coating の方が大きく低下し、透過率は 5% 程の差がみられた。これは測定開始直後から 6 カ月目までは梅雨や夏季による安定した降雨により、汚れが洗い流され、汚れの付着の影響が大きく表れなかったためである。その後、降雨が減少したため、光触媒が効果を発揮し、透過率に大きな差がみられた。

これらのことから、光触媒コートによる透過率低下の抑制によって、CPV の出力低下抑制が十分に期待される。

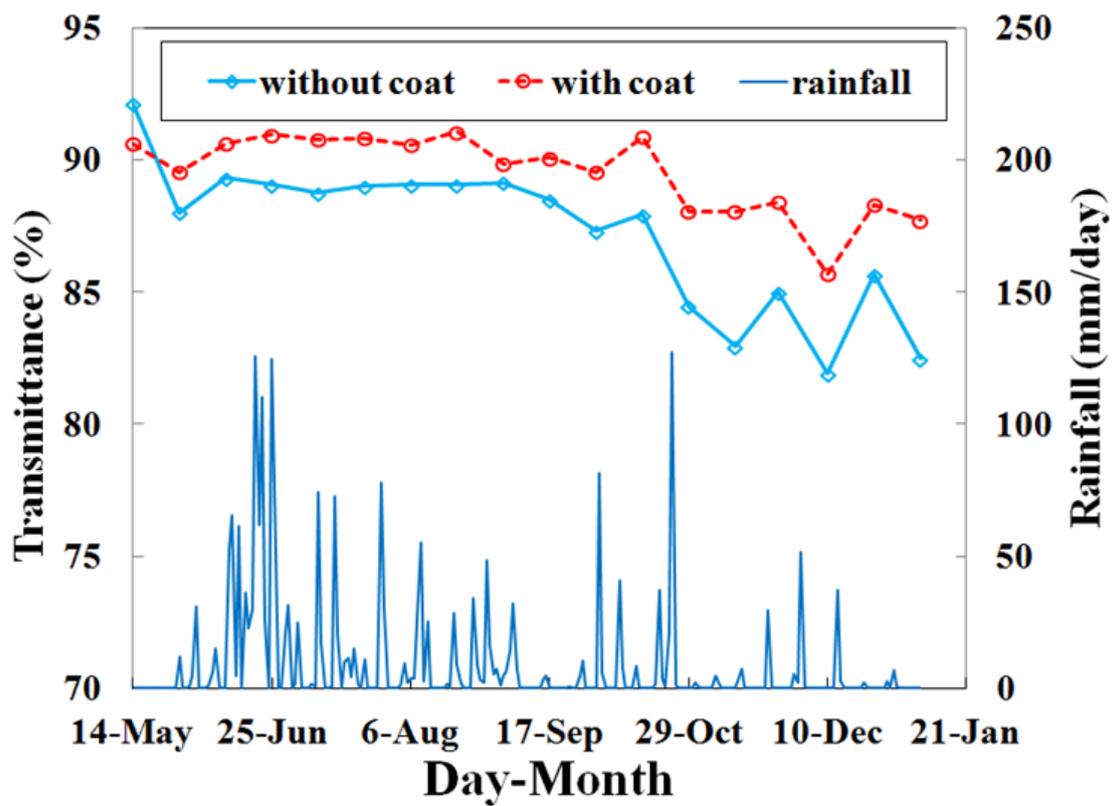


図 3.6 光の波長 500 nm における透過率の変化と暴露日数および降雨量

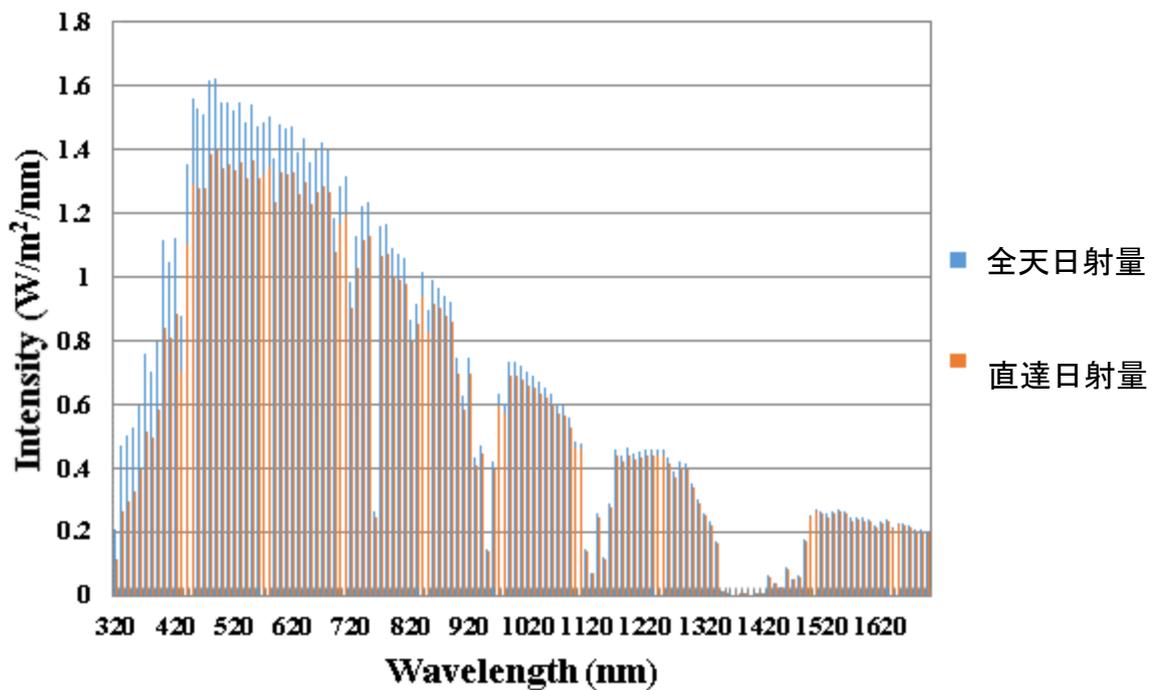


図 3.7 太陽光スペクトル

3-3 砂漠環境を想定した砂の付着の抑制

3-3-1 実験装置と砂試料

砂漠環境下において、CPV システムのレンズ上への砂の付着を想定し、砂の自由落下による実験を行うために、図 3.8 に落砂装置写真および落砂試験概略図に示す装置を用いた。装置上部から砂を落下させ、装置下部に設置したレンズ表面に落下させ、砂を衝突させた。

砂(浮遊粒子)は成分、粒径が砂漠の砂に近いものを用いた。砂漠の砂の主な成分はシリカ(SiO_2)であり、その粒径は地表から高さ 3.5 m において図 3.9 に示すような 30~500 μm 程度の分布をもつという報告がある[16]。本実験では粒径 63~250 μm 、成分(SiO_2 : 93.6%, Al_2O_3 : 3.25%, Fe_2O_3 : 0.35%)の砂(6号-3 TOYO MATELAN Co., Ltd.)を使用した。また、CPV レンズ試料として 3-2-1 で記述した PMMA 樹脂基板、With coat, Without coat を使用した。

落砂装置を用いて、砂量を 1 g ずつ落下させ、合計 10 g まで CPV 用の集光レンズ材料である PMMA 樹脂に衝突させ、落砂質量 1 g ずつの砂の付着質量を電子天秤によって測定し、静電電位計(KSD-2000, Kasuga Electric Works Ltd., Japan)を使用して試料表面の静電電位を測定した。

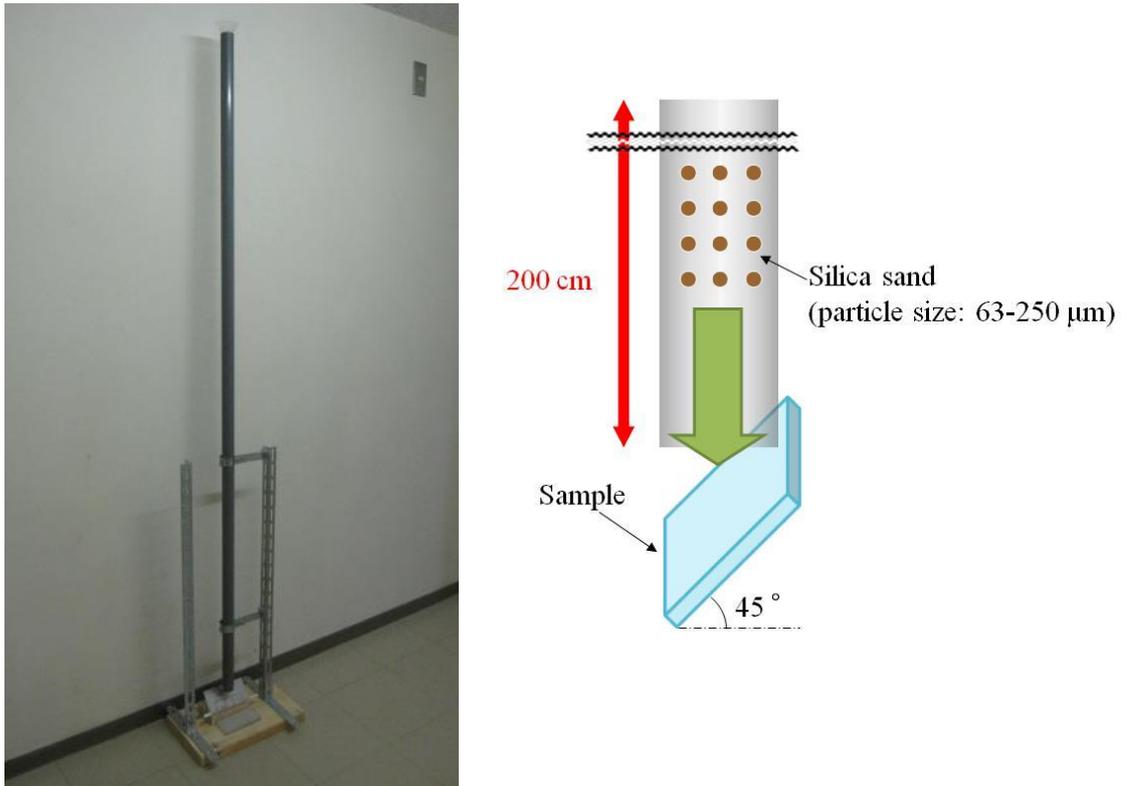


図 3.8 左 落砂装置写真

右 落砂試験概略図

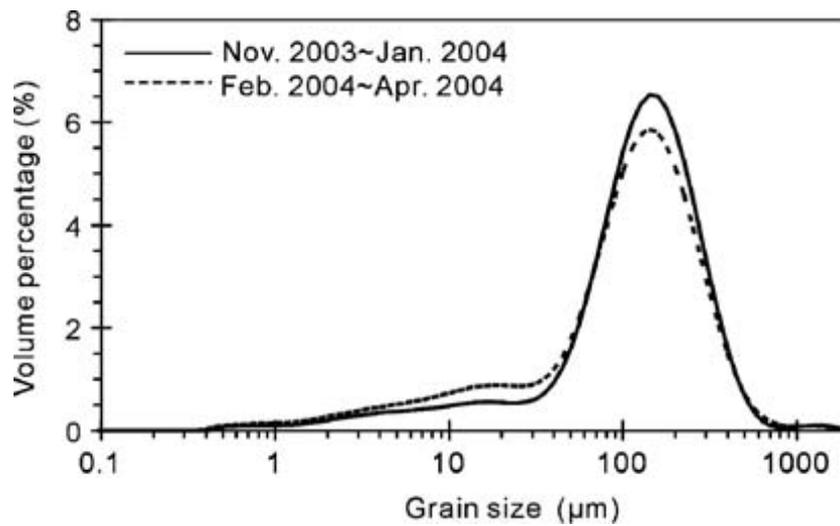


図 3.9 中国ゴビ砂漠(Qinghai-Tibetan Plateau)の砂の粒径分布 [16]

3-3-2 砂の付着と静電電位

図 3.10 に砂を 1 g ずつ、合計 10 g 落下させた時の付着した砂の質量のグラフを示す。With Coating と Without Coating で砂の付着量に差が見られ、With Coating ではおよそ 0.005 g の付着が確認された。また、Without Coating では With Coating のおよそ二倍である 0.01 g の砂の付着が確認された。

次に、図 3.11 に砂を 1 g ずつ、合計 10 g 落下させた時の静電電位のグラフを示す。こちらでも質量と同様の差が見られ、With Coating ではおよそ 0.1 kV の静電電位が測定され、Without Coating では With Coating のおよそ二倍である 0.2 kV の静電電位が確認された。

図 3.10、3.11 のどちらのグラフでも合計 2 g の衝突で質量、静電電位が飽和し、それ以上の砂を衝突させても、質量、静電電位のどちらも大きな変化が見られなかった。これらのことから静電電位と砂の付着が密接に関係していることが考えられる。

図 3.12 に砂を 1 g ずつ落下させ、合計 10 g 落下させた後のレンズの表面写真を示す。Without Coating の表面に砂が多く付着している様子が確認できる。一方、With Coating 上の砂ははるかに少なく、光触媒防汚コートが砂の付着に対して、有効性を示している。

実験結果から、レンズの表面上の静電電位が砂の付着の主な要因であったと判断し、静電電位は光触媒防汚コートによって抑制することが可能であると考えた。

光触媒防汚コートの表面は WO_3 である。 WO_3 の層は水酸基 (-OH) が含まれやすく、水酸基は親水性である[17]。そのため WO_3 表面には、空気中の水分を吸湿し、分子レベルの水の薄い層によって、静電電位の発生を妨げる。例として、図 3.13 に同じ光触媒である TiO_2 の光誘起親水性の原理を示す。酸化チタン

の禁制帯幅より大きいエネルギーに対応する波長の光を照射すると、電子と正孔が生成される。これらは、活性酸素種の生成に用いられ、正孔の一部は Ti-O-Ti 結合のブリッジ酸素にトラップされる。その際、Ti-O 結合の結合距離が長くなり、空気中の水蒸気が解離吸着することで Ti-OH の量が増加し、表面が親水性になる。WO₃ においても同様の反応が起こり、光触媒効果が発揮される。これらのことより、静電電位が空気中に排出されることで、砂の付着を抑えていたことが考えられる。

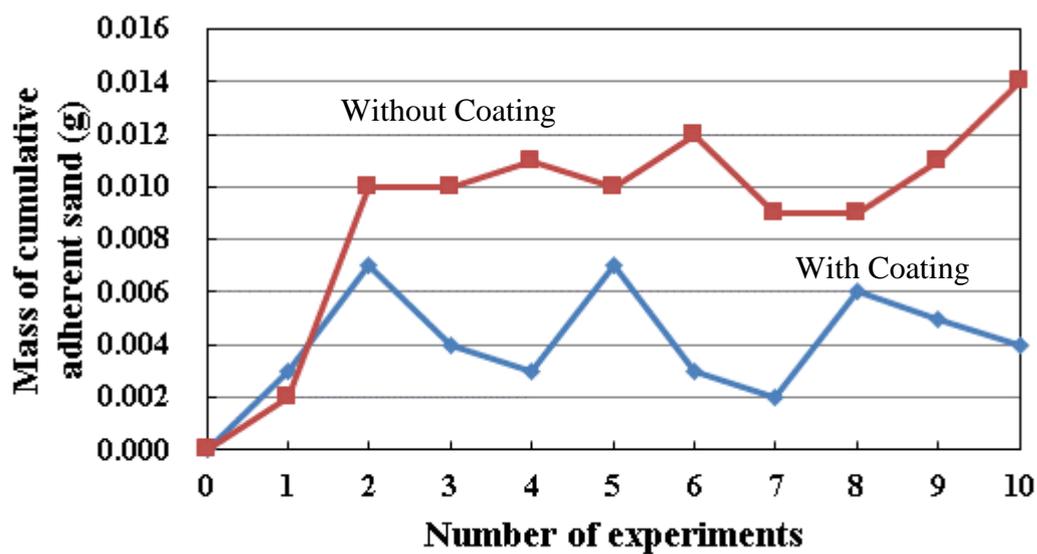


図 3.10 落砂質量と累加付着質量の関係

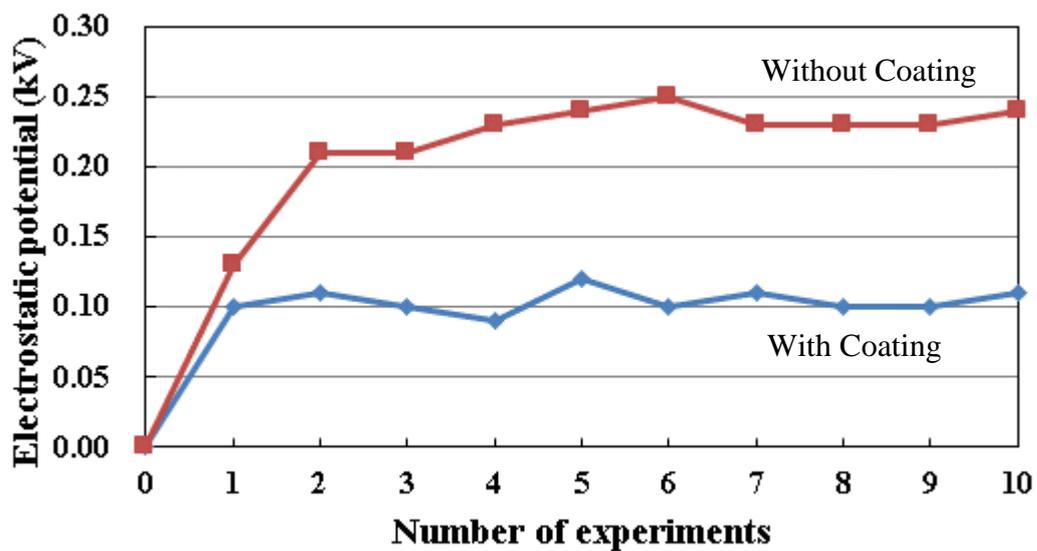


図 3.11 落砂試験回数と静電電位の関係

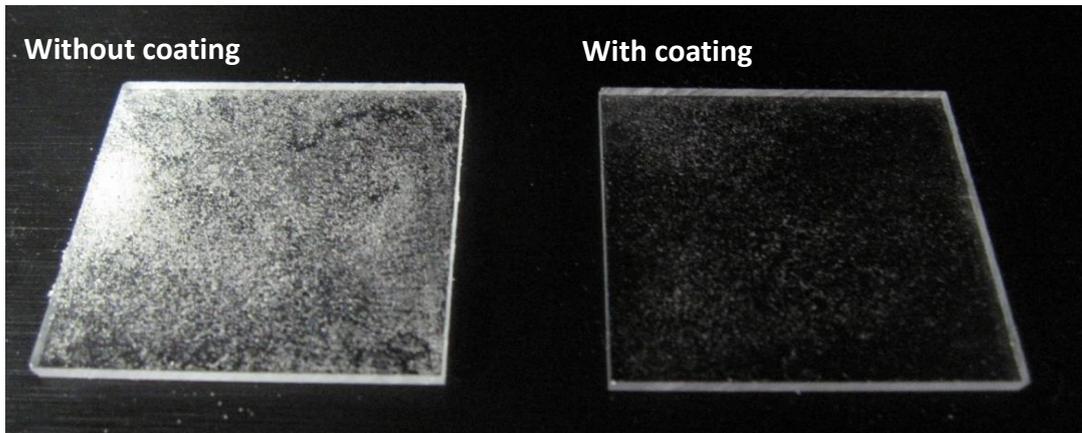


図 3.12 落砂試験後の試料写真 (各 4 cm × 4 cm)

左 Without coating

右 With coating

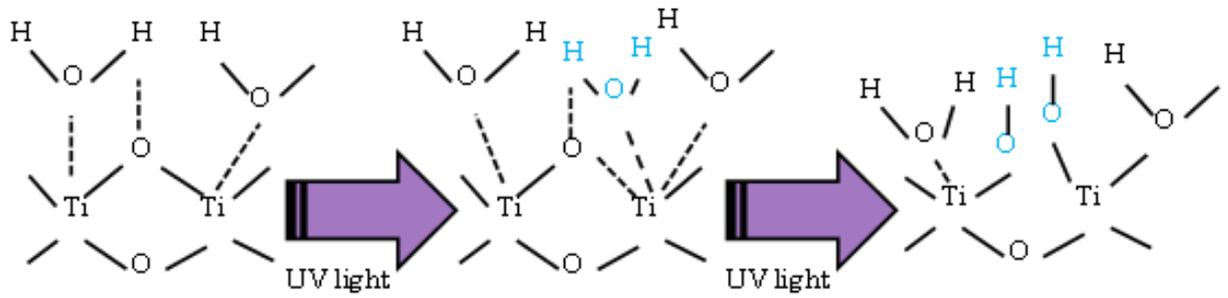


図 3.13 光誘起親水性原理

3-4 結言

本章では CPV システムの表面であるレンズ上へ汚れについて実験を行った。CPV システムのレンズ表面において、汚れの付着は太陽光を散乱、反射させるため発電に大きな影響を与える。付着の抑制および砂の付着の原因について得られた結果を以下にまとめる。

- ① PMMA 樹脂基板上に WO_3 による光触媒コートを施し、その効果について検討した。試料の屋外暴露の結果、透過率の減少量に差が生じ、この差には降雨の影響があることを明らかにした。降雨量が多い場合には、降雨によって汚れが洗い流され、透過率に差が生じず、降雨量少ない場合には、光触媒コートが効果を発揮して、透過率に 5%程度の差が生じた。
- ② 砂漠環境を想定した砂の落砂試験を行った結果、砂の付着の要因は、砂とレンズの摩擦から発生する静電電位であることを突き止めた。また、 WO_3 光触媒コートは砂の付着を抑制した。 WO_3 中の水酸基 (-OH) が親水性であり、試料表面に分子レベルの水の層が形成され、静電電位を抑制した。

3-5 引用文献

- [1] M. Garcia, L. Marroyo, E. Lorenzo, M. Perez, “Soiling and optical losses in solar-tracking pv plants in navara”, *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, **10**, 1002-1004 (2010).
- [2] D. C. Miller, S. R. Kurtz, “Durability of Fresnel lenses: A review specific to the concentrating photovoltaic application”, *Solar Energy Materials & Solar cells*, **95**, 2037-2068(2011).
- [3] M. Vivar, R. Herrero, I. Anton, F. Martinez-Moreno, R. Moreton, G. Sala, A.W. Blakers, J. Smeltink, “Effect of soiling in CPV systems”, *Solar Energy*, **84**, 1327-1335(2010).
- [4] H. K. Elminir, A. E. Ghitas, R.H. Hamid, F. El-Hussainy, M. M. Beheary, K. M. Abdel-Moneim, “Effect of dust on the transparent cover of solar collectors”, *Energy Conversion and Management*, **47**, 3192-3203(2006).
- [5] A. M. Pavan, A. Mellit, D. D. Pieri, “The effect of soiling on energy production for large-scale photovoltaic plants”, *Solar Energy*, **85**, 1128–1136(2011).
- [6] L. Moore, H. Post, H. Hayden, S. Canada, D. Narang, “Photovoltaic Power Plant Experience at Arizona Public Service: A 5-year Assessment”, *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, **13**,353–363(2005).
- [7] 小島紀徳, “太陽光利用について考える”, *化学工学*第 75 卷, 第 1 号, 2-6(2011)
- [8] M. Ito, K. Kato, K. Komoto, T. Kichimi, K. Kurokawa, “A Comparative Study on Cost and Life-cycle Analysis for 100 MW Very Large-scale PV (VLS-PV) Systems in Deserts Using m-Si, a-Si, CdTe, and CIS Modules”, *Prog. Photovolt: Res. Appl.* **16**, 17-30 (2008).
- [9] M. Ito, K. Kato, H. Sugihara, T. Kichimi, J. Song, K. Kurokawa , “A preliminary

- study on potential for very large-scale photovoltaic power generation (VLS-PV) system in the Gobi desert from economic and environmental viewpoints”, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **75**, 507-517 (2003).
- [10] A. Adiyabat, K. Kurokawa, K. Otani, N. Enebish, G. Batsukh, M. Battushig, D. Ochirvaani, B. Ganbat, “Evaluation of Solar Energy Potential and PV Module Performance in the Gobi Desert of Mongolia”, *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, **14**, 553-566(2006).
- [11] 浜川圭弘, 桑野幸徳, 「太陽エネルギー工学 太陽電池」, 培風館, (1994.05).
- [12] 伊藤雅一, 加藤和彦, 河本桂一, 杉原裕征, 吉見哲夫, 黒川浩助 : 平成 14 年度日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー協会合同研究発表会 PV システム VI 2002.11.7-8 仙台
- [13] A. Fujishima, T. N. Rao, D. A. Tryk, “Titanium dioxide photocatalysis”, *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews* **1**, 1–21 (2000).
- [14] N. S. Allen, M. Edge, J. Verran, J. Stratton, J. Maltby, C. Bygott, “Photocatalytic titania based surfaces: Environmental benefits”, *Polymer Degradation and Stability*, **93**, 1632–1646 (2008).
- [15] K. Nabemoto, Y. Sakurada, Y. Ota, K. Takami, H. Nagai, K. Tamura, K. Araki, K. Nishioka, “Effect of Anti-Soiling Layer Coated on Poly(methyl methacrylate) for Concentrator Photovoltaic Module”, *Jpn J. Appl. Phys.* **51**, 10ND11 (2012).
- [16] M. Qiang, F. Chen, A. Zhou, S. Xiao, J. Zhang, Z. Wang, Impacts of wind velocity on sand and dust deposition during dust storm as inferred from a series of observations in the northeastern Qinghai – Tibetan Plateau, China”, *Powder Technology*, **175**, 82-89(2007).
- [17] Y. Horiuchi, H. Yamashita, “Design of mesoporous silica thin films containing

single-site photocatalysts and their applications to superhydrophilic materials”,
Appl. Catal., A **400**, 1-8 (2011).

第4章 集光モジュールの温度上昇抑制

4-1 緒言

CPV は、変換効率の向上や省資源、低コストなど期待は大きいですが、非集光時に比べて温度上昇による特性低下の課題が残されている[1-6]。

CPV は、安価なレンズや鏡などにより太陽光を集光することで高い発電効率を得られる太陽電池である。小面積の太陽電池で発電するため、高価な太陽電池を使用し、太陽電池の使用面積を大幅に削減することが可能である。しかし、CPV は集光された高強度な光が太陽電池に照射されるため、一般的な非集光型太陽電池に比べ温度上昇が及ぼす影響について、極めて注意が必要となる。モジュールの温度上昇による変換効率の低下は、 1°C の温度上昇に対して0.25-0.3%減少するが算定されている[7]。

温度の上昇を抑制する方法として、水冷式の研究[8]や、温度上昇を逆に熱電変換させる研究なども行われている[9]。本研究で使用している CPV システムは、自然冷却効果を用いている。CPV の構造はアルミ製のモジュールケースで囲まれており、太陽電池の熱をモジュールケースに伝導させ、モジュールケースは熱放射、対流によって放熱している[10, 11]。

CPV 内の太陽電池セルの温度上昇抑制による変換効率の改善は非常に重要である。そこで、モジュールケースによる放熱として、ケースの厚さを変化させた場合の太陽電池セルの温度変化を調査した。

4-2 モジュールケースの厚さによる温度上昇抑制

4-2-1 820倍 CPV モジュール

図 4.1 に本実験で使用した 820 倍 CPV モジュール(Daido Steel Co., Ltd.)を示す。レンズとセルのペアから成り、太陽電池は InGaP/InGaAs/Ge の三接合型太陽電池を使用している。フレネルレンズのサイズは 200 mm × 200 mm であり、太陽光を約 820 倍に集光し、7 mm × 7 mm の太陽電池セルに照射される。太陽光はフレネルレンズで焦点をレンズ下の太陽電池に合わせることで、太陽電池の使用面積を大幅に減少させている。レンズとセルのペアを 5 × 5 個に配列するため、モジュールの大きさは 1005 mm × 1005 mm × 235 mm H、質量は 19 kg である。モジュールはアルミニウムケースで覆われており、自然空冷で温度上昇を抑制する。

次に図 4.2 にモジュール内部の模式図を示す。セル温度は三接合型太陽電池の下の測温抵抗体 (Pt100) をデータロガー (HIOKI E.E. CORP.: MEMORY HILOGGER LR8401) に接続し、温度を測定した。モジュールの発電特性は I-V カーブトレーサー(MP-160、英弘精機株式会社)を用いて測定した。これらの測定を 2011 年 11 月 24 日の 14:30-13:00 に行った。



図 4.1 820 倍 CPV モジュール

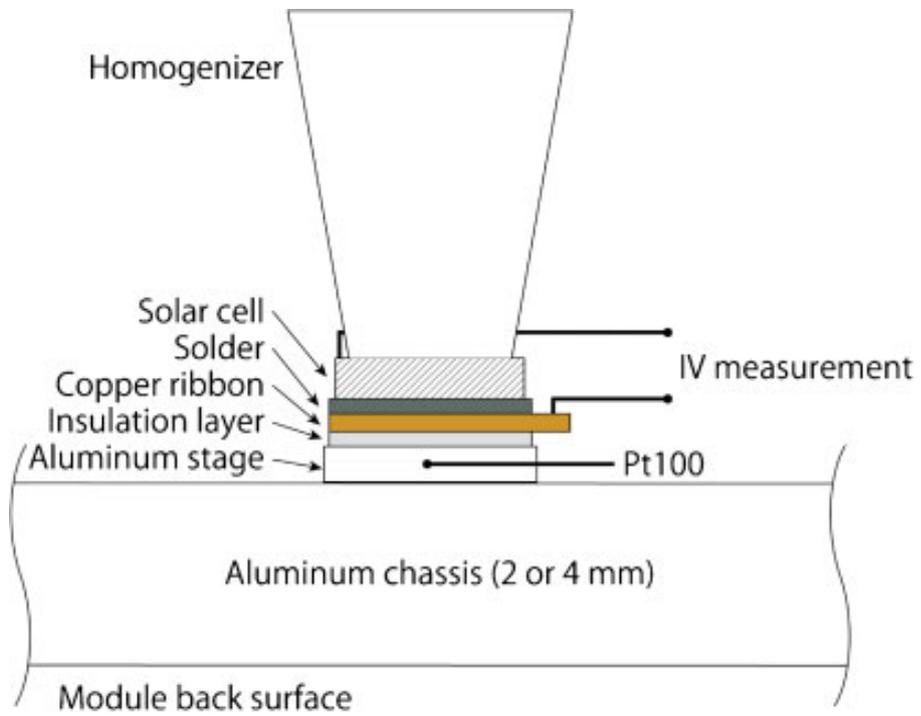


図 4.2 CPV モジュール内部

4-2-2 モジュールケース厚みによる温度シミュレーション

CPV モジュール内の太陽電池セルが太陽光から受ける熱量(熱源) P についての計算式を以下に示す[12]。

$$P = DNI \times \eta_{op} \times A_{lens} \times (1 - \eta) \quad (4.1)$$

$$T_{cell} = T_{module} + R_{th(cell-heat sink)} \times P \quad (4.2)$$

P : 熱源(セルの太陽光照射による熱量)

DNI : 直達日射量

η_{op} : 光学効率

A_{lens} : レンズ面積

η : 変換効率

T_{cell} : 太陽電池セル温度

T_{module} : モジュール温度

$R_{th}(cell-heat sink)$: 熱抵抗(セルからアルミケース)

この計算式では、直達日射がレンズで集光され、太陽電池セルにおいて電気エネルギーに変換されなかったエネルギーが熱に変換されるとし、太陽電池セルを熱源として、太陽電池温度を求めた。太陽電池セルからモジュール裏面までの熱抵抗は、アルミケースの厚さ以外の構造物が同一と仮定した場合、アルミケースの厚みで変化する。これらを伝熱シミュレーションにより計算すると、太陽電池セルの温度は図 4.3 のようになる。厚みを増せば、太陽電池温度が減少し、およそ 4 mm から温度減少が緩やかになり、モジュールの質量増加を考えると 4 mm が適した厚みであると考えられるため、現在 2 mm 厚であるモジュールケースを 4 mm 厚に変化させ、実験を行った。

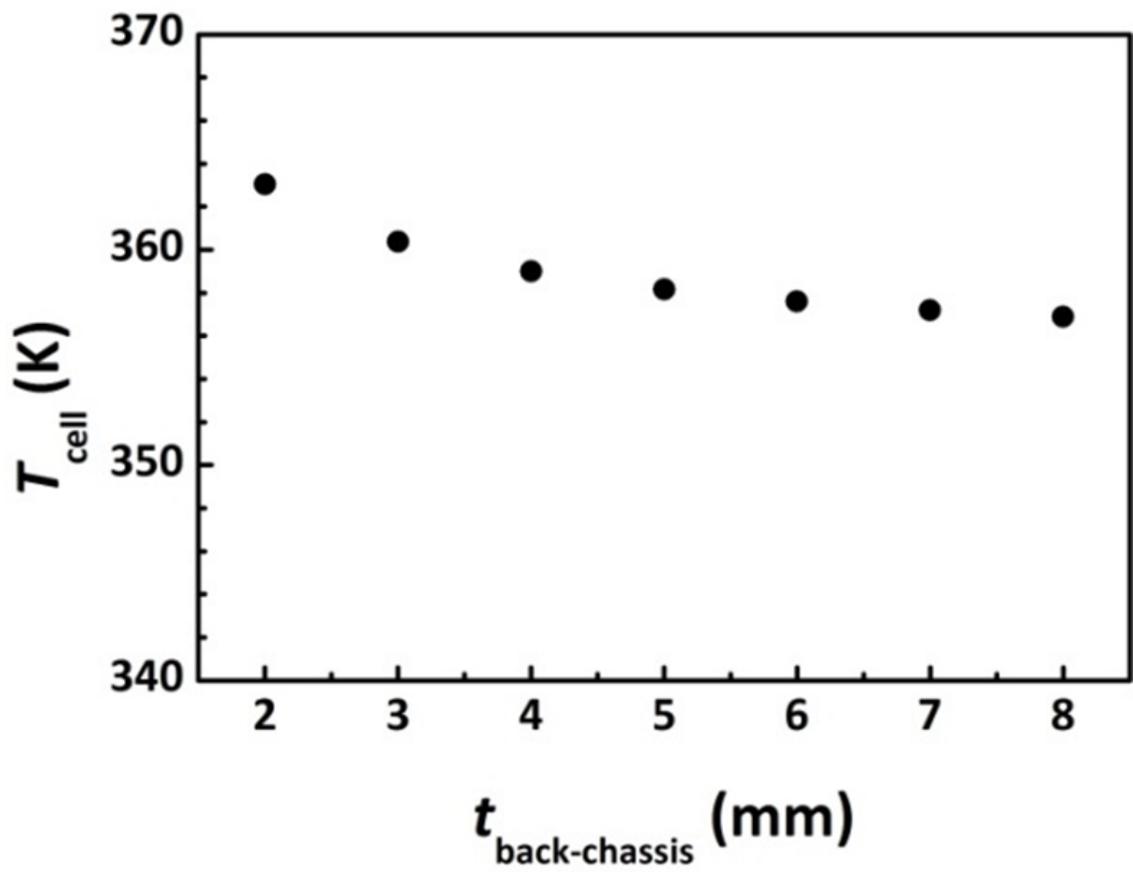


図 4.3 モジュールケース厚みと太陽電池セルの温度

4-2-3 温度上昇抑制効果と出力改善

図 4.4 にモジュールケース厚さが 2 mm と 4 mm のモジュール内太陽電池温度を示す。図 4.4(左)より 2 mm ケース内のモジュール中央の太陽電池は 70.1°C で最高温度になった。モジュール端との温度差が 15°C あり、モジュール内の標準偏差は 2.82 となり、温度分布に大きな差が確認できた。また、2 mm ケースの平均温度は 66.3°C であった。次に、図 4.4(右)より 4 mm ケースでは最高温度が 56.3°C であり、2 mm ケースに比べると 13.8°C 温度を減少させた。また、平均温度は 54.6°C であり、2 mm ケースと比較すると、11.7°C 減少させた。4 mm ケースではモジュール内の標準偏差が 1.95 であり、2 mm ケースに比べ、温度分布の均一性が大幅に改善された。

図 4.5 にケース厚さが 2 mm と 4 mm のモジュールの変換効率を示す。変換効率の温度係数は-0.05%/K と報告されており[13]、平均値の差が 11.7°C のため 0.59%の変換効率の改善が見込まれるが、図 4.5 の変換効率の差は 1.5%であった。これは、温度上昇による CPV ケースのゆがみが生じているためであると考えられる。CPV モジュールの出力特性の低下は、CPV ケースのゆがみによる光学系と太陽電池間の焦点のずれが原因である[14]。そのためケースの厚さを増すことは、温度上昇の抑制に加え、モジュールゆがみを防ぎ、出力特性の改善が期待される。

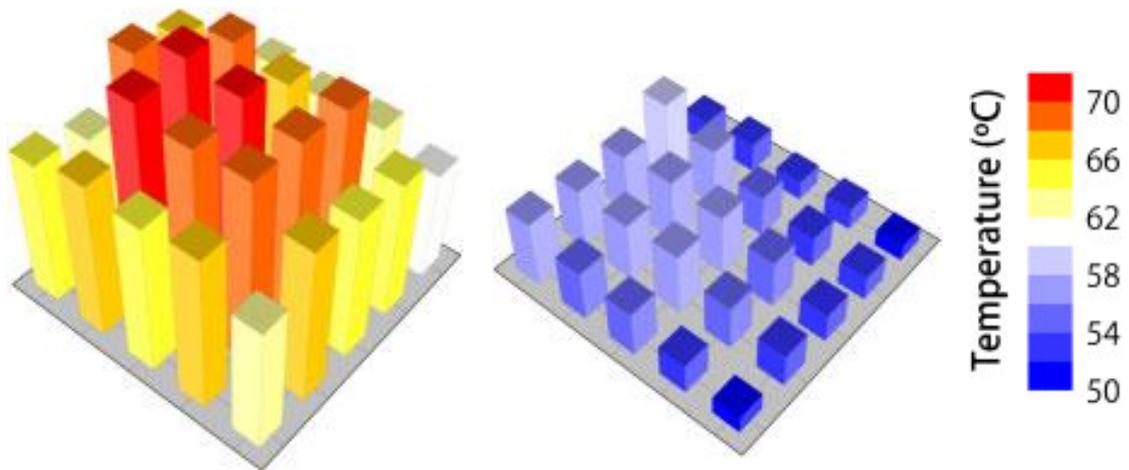


図 4.4 モジュールケース厚さ(左)2 mm と(右)4 mm の太陽電池温度

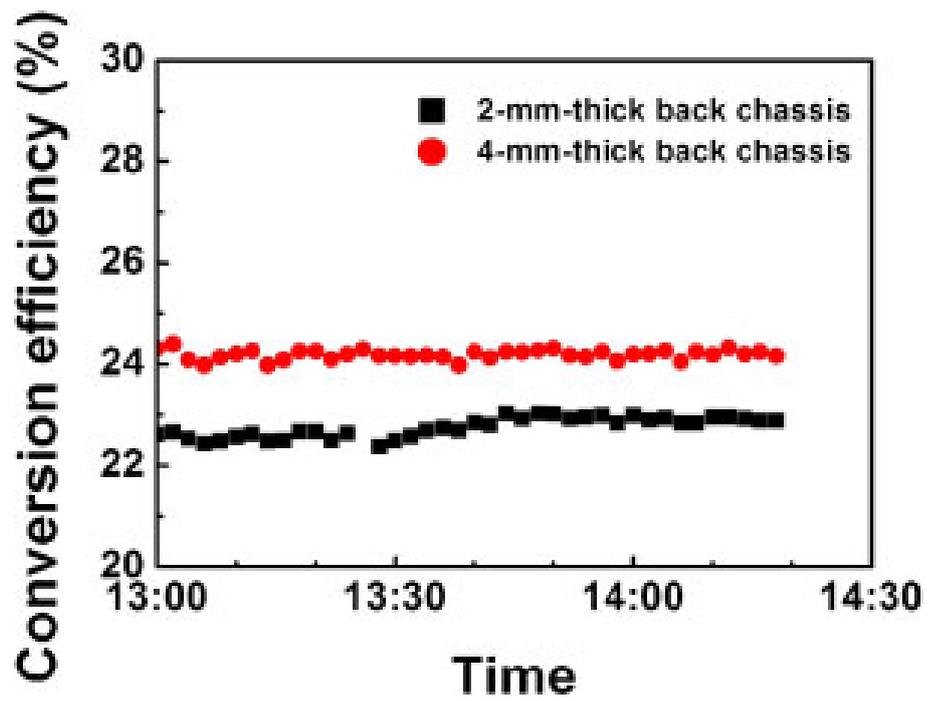


図 4.5 モジュールの変換効率の比較

4-3 結言

本章では CPV 内の太陽電池の温度上昇抑制について、モジュールケースの厚さを変化させ、検討を行った。得られた結果を以下にまとめる。

- ① 伝熱シミュレーションによって計算すると、厚みを増せば、太陽電池温度が減少し、およそ 4 mm から温度減少が緩やかになったため、モジュールの質量増加と温度減少量を考え、2 mm と 4 mm のモジュールケース厚みによる実験を行った。
- ② ケースの厚さを 2 mm から 4 mm に増すことで、最高温度を 13.8°C、平均温度を 11.7°C 減少させた。また、モジュール内の標準偏差を 2.82 から 1.95 へと抑制し、モジュール内温度分布の均一性が大幅に改善された。
- ③ 温度上昇抑制の結果から、CPV モジュールは変換効率を 1.5% 改善した。この結果はこれまで報告されてきた変換効率の温度係数による計算値よりも、変換効率が改善されており、これは温度上昇を抑制することで、モジュールゆがみを防ぎ、光学系と太陽電池間の焦点のずれを抑えたためと考えられる。

4-4 引用文献

- [1] K. Nishioka, T. Hatayama, Y. Uraoka, T. Fuyuki, R. Hagihara, M. Watanabe, “Field-test analysis of PV system output characteristics focusing on module temperature”, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **75**, 665-671 (2003).
- [2] K. Nishioka, T. Takamoto, T. Agui, M. Kaneiwa, Y. Uraoka, T. Fuyuki, “Annual output estimation of concentrator photovoltaic system using high-efficiency InGaP/InGaAs/Ge triple-junction solar cells based on experimental solar cell’s characteristics and field-test meteorological data”, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **90**, 57-67 (2006).
- [3] G. Peharz, J. F. Rodriguez, G. Siefer, A.W. Bett, “Investigations on the temperature dependence of CPV modules equipped with triple-junction solar cells”, *Prog. Photovoltaics, Res.appl.* **19**, 54-60 (2011).
- [4] M. D. Yandt, J.F. Wheeldon, J. Cook, R. Beal, A. W. Walker, O. Theriault, H. Schriemer, T. J. Hall, K. Hinzer, “Estimating Cell Temperature In A Concentrating Photovoltaic System”, *AIP Conf. Proc.* **1477**, 172-175 (2012).
- [5] S. Yoon, V. Garboushian, “REDUCED TEMPERATURE DEPENDENCE OF HIGH-CONCENTRATION PHOTOVOLTAIC SOLAR CELL OPEN-CIRCUIT VOLTAGE (V_{oc}) AT HIGH CONCENTRATION LEVELS”, *Proc of the First WCPEC, Waikoloa*, 1500–1504 (1994).
- [6] S.M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices*, Wiley-Interscience Publication, New York, pp. 640-653 (1981)
- [7] 見目喜重, 宮川昌幸, 江上敏夫, 荒木建次, 榊原建樹, “集光型太陽光発電システムのモジュール温度への日射・外気温の影響”, *太陽/風力エネルギー講演論文集(2003)*, pp.201-204

- [8] X.Q. Zhai, M. Qu, Y. Li, R.Z. Wang, “A review for research and new design options of solar absorption cooling systems”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **15**, 4416–4423 (2011).
- [9] G. Mittelman, A. Kribus, A. Dayan, “Solar cooling with concentrating photovoltaic/thermal (CPVT) systems”, *Energy Conversion and Management*, **48**, 2481–2490 (2007).
- [10] M.J. O’Neill, A. J. McDanal, M. F. Piszczor, M. I. Eskennazi, P. A. Jones, C. Carrington, D. L. Edwards, H.W. Brandhorst, “Development of Terrestrial Concentrator Modules Incorporating High-Efficiency”, *Proc of the 28th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, Anchorage, pp. 1161 (2000).
- [11] V.D. Rumyantsev, V. M. Andreev, A. W. Bett, F. Dimroth, M. Heine, G. Lange, M. Z. shvarts, O. V. Sulima, “Progress in Development of All-Glass Terrestrial Concentrator Modules Based on Composite Fresnel Lenses and III-V Solar Cells”, *Proc of the 28th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, Anchorage, pp. 1169 (2000).
- [12] I. Anton, M. Martinez, F. Rubio, R. Nunez, R. Herrero, C. Dominguez, M. Victoria, S. Askins, G. Sala, “Power rating of CPV systems based on spectrally corrected DNI”, *AIP Conf. Proc.* 331 (2012).
- [13] G. Segev, G. Mittelman, A. Kribus, “Equivalent circuit models for triple-junction concentrator solar cells”, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **98**, 57-65 (2012).
- [14] Y. Ota, T. Sueto, H. Nagai, K. Araki, K. Nishioka, “Influence of temperature distribution on 25 series-connected 820X CPV module output during outdoor operation”, *Proc of the 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conf.*, p.000961 (2012).

第5章 結論

本研究では、太陽光が太陽から CPV での光電変換に達するまでのエネルギー損失、最適な設置環境の指標を目的として、実験および解析を行った。

第2章において、CPVシステムと、一般的に最も普及している平板型のmc-Siシステムの実環境下における発電量比較を行い、傾斜面全天日射量と太陽光の散乱比を指標として、CPVシステムとFP-PVシステムのどちらが多く出力を得ることが可能であるかを予測する指針を提案した。太陽光発電システムの設置候補地の日射条件から得られる指標が導出でき、CPVシステムとmc-Siシステムのシステム選定が可能となった。

第3章では、CPVシステムのレンズ表面上への砂の付着の抑制方法および砂の付着の原因について検討した。落砂試験を行い、砂の付着質量と静電電位が比例しているため、砂の付着の要因は砂とレンズの摩擦から発生する静電電位であることが分かった。また、有機物質の防汚コートとして使用される WO_3 光触媒は静電電位および砂の付着を抑制した。これは WO_3 中の水酸基 (-OH) が親水性であり、試料表面に水分が吸湿しやすくなり、導電率を変化させ、静電電位を抑制した。そのため、有機物質の防汚コートとして使用されていた WO_3 は同時に無機物質の付着を抑制する働きがあることを確認した。

第4章では、CPV内の太陽電池の温度上昇抑制について、モジュールケースの厚さによる温度上昇抑制効果を検討した。モジュールケースの厚さを増すことは温度上昇の抑制に加え、モジュールゆがみを防ぎ、出力特性を改善できることを明らかにした。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、宮崎大学電子物理工学科 西岡賢祐准教授には丁寧なる御指導・ご鞭撻を賜りました。深く感謝を申し上げます。また、本論文を纏めるに当たり、有益な御助言、御教示頂きました宮崎大学農学部森林緑地環境科学科 細川吉晴教授、宮崎大学工学部電子電気システム工学科 淡野公一教授、環境ロボティクス学科 穂高一条教授、物理工学科 福山敦彦准教授および吉野賢二准教授に謹んで感謝の意を表します。

大同特殊鋼株式会社 荒木建次様には CPV モジュールの提供、CPV に関して御協力、有益な御教示をいただきました。厚く御礼申し上げます。

本研究に関し、研究員の太田靖之さんには御助言、御指導を頂きました。厚く御礼申し上げます。

また、本研究の遂行に当たり、実験・解析に多大な協力をいただき、学生生活に多大な御支援をいただきました宮崎大学 西岡研究室の皆様には厚く御礼申し上げます。

最後に、本研究を続けるに当たり、多大な支援をして頂きました両親に深く感謝いたします。