

太陽電池の準安定性が積算発電量に 与える影響に関する研究

2020 年 3 月

佐賀大学大学院工学系研究科
システム創成科学専攻

佐藤 梨都子

目次

第 1 章 序論	4
1.1 太陽電池の特性	4
1.2 太陽電池の種類	6
1.3 太陽光発電システム	9
1.4 本研究の目的	10
第 2 章 本研究における太陽電池の評価方法	14
2.1 太陽電池の出力を変化させる環境要因	14
2.1.1 放射照度	14
2.1.2 スペクトル	16
2.1.3 デバイス温度	16
2.2 室内測定による特性評価	17
2.2.1 ソーラシミュレータ	17
2.3 実環境による屋外測定	18
2.3.1 取得している屋外測定データ	18
2.3.2 屋外データの解析手法	18
第 3 章 有機薄膜太陽電池の発電量および準安定性調査 .	21
3.1 実環境下における発電量の経年変化および季節変動	21
3.1.1 研究目的	21
3.1.2 実験方法	23
3.1.3 結果と考察	24

3.1.4	実環境下における発電量の経年変化および季節変動のまとめ	35
3.2	OPV の熱回復が発電量に与える影響	35
3.2.1	研究目的	36
3.2.2	実験方法	37
3.2.3	結果と考察	39
3.2.4	OPV の熱回復が発電量に与える影響のまとめ	43
第4章 結晶シリコン裏面パッシベーション太陽電池の発電量及び準安定性調査		45
4.1	研究目的	45
4.2	実験方法	47
4.3	結果と考察	49
4.3.1	曝露環境と各回路条件におけるモジュール裏面温度	49
4.3.2	短絡回路条件と開放回路条件における P_{\max} の室内計測値からの比較	51
4.3.3	MPPT 負荷条件における屋外計測値の変化	54
4.4	屋外曝露初期における PERC 太陽電池の光劣化についてのまとめ	56
第5章 OPV および PERC 太陽電池の積算発電量の検討		58
5.1	OPV の発電性能の減衰曲線の推定	58
5.2	PERC 太陽電池の発電性能の減衰曲線の検討	63
5.3	OPV および PERC 太陽電池における積算発電量の検討のまとめ	64
第6章 総括		66
参考文献		
業績リスト		
謝辞		

第1章 序論

世界経済の拡大と人口増加のため、IEA World Energy Outlook 2019 (WEO2019) によれば、世界のエネルギー需要は 2050 年まで 1%/年の割合で増加すると予想されている。太陽光発電による電気エネルギーは、再生可能エネルギーの一つとして低炭素・持続可能な社会の実現への課題である温室効果ガスの削減のため、導入が進められている。世界では、太陽光発電システムの累積設置容量は 2018 年に約 512 GW となり、2018 年の電力需要の 2.9%を占めた[1]。全体的に、再生可能エネルギーに関心が移行するにつれ、化石燃料による発電所の閉鎖が増加する傾向にあるものの、世界の電力需要に占める化石燃料および原子力発電のシェアは 72%であり、太陽光発電は依然として追い付くことができていない[2]。風力、潮力、地熱発電等の様々な再生可能エネルギー資源の中で、太陽光発電は日が照るところであれば地球上どこでも得ることができ、地理的に偏りのないことが特徴である。さらに、GW クラスの発電所から電卓までフレキシブルなシステムの設計が可能である。蓄電池と組み合わせ独立電源として使用できるため、インフラがない場所に設置される気象センサの電源や、工事現場で保安機材の電源としても用いられている。さらに低照度でも起電力を有する太陽電池も研究開発が進んでおり、Internet of Things (IoT) 電源の一つとしても注目されている。

1.1 太陽電池の特性

物質にある一定以上のエネルギーを有する光を照射した際、電子が放出されたり電流が流れたりする光電効果については、1839 年の Becquerel による報告が最初と言われている[3]。その後、1954 年に現在の太陽電池の原型となった Si 半導体の pn 接合を用いた試作品がベル研究所より発表された[4]。

原子が多数集まった結晶では、電子が取ることのできるエネルギー準位が連続的に分布して帯状の準位を形成する。半導体は、電子が存在できない禁制帯(バンドギャップ)を挟んで、電子がほとんど存在しない伝導帯と、電子が多数存在する価電子帯を形成する。価電子にバンドギャップを超えるエネルギーを与えると、正孔を生成して電子が価電子帯から伝導帯へ励起し、初めて伝導に寄与する電子が得られる。しかし、不純物がほとんどない真性半導体においては、電子が Fermi 分布に従って存在確率が 1/2 になるエネルギー準

位(Fermi 準位)がこの禁制帯のほぼ中央にあり、バンドギャップより小さい常温の熱エネルギーでは、ほとんど伝導性を示さない。そこで、真性半導体に不純物を添加して Fermi 準位を上下に移動させ、常温でも電流の担い手となるキャリアを励起できるようにする。正孔が多数キャリアのものを p 型半導体、電子が多数キャリアのものを n 型半導体といい、IV族元素の Si の場合は、B などのIII族元素を添加したものが p 型、P や As などのV族元素を添加したものが n 型半導体となる。pn 接合界面では、電子と正孔が結合しキャリアがない空乏層が形成されて内蔵電位が生じる。半導体の pn 接合部では内蔵電位によるドリフト電流と、キャリア密度の不均一から生じる拡散電流が生じ、外部回路に接続されていない状態では、pn 接合部のキャリアの移動がつり合って電流が零になる熱平衡状態にある。p 型が n 型に対して正の電位となるように、準バイアス方向に外部から電圧を印可すると、熱平衡状態が崩れて n 型から p 型への電子の移動、および p 型から n 型への正孔が容易になり電流が流れる。反対に、p 型が n に対して負の電圧となるように、逆バイアス方向に外部から電圧印可すると空乏層が広がり、電位障壁が高くなるため、n 型から p 型への電子の移動および、p 型から n 型への正孔の移動がほとんど起きなくなるため、電流はごくわずかしかな流れない。つまり、太陽電池は p 型領域から n 型領域へ電流が流れる整流特性を有するダイオードを形成し、暗状態での降伏現象を除いた電流—電圧(I - V)の関係は次式であらわされる。

$$I_d = I_0 \left\{ \exp \left(\frac{qV}{nkT} \right) - 1 \right\} \quad (1.1)$$

I_d は暗電流、 I_0 は飽和電流、 q は素電荷、 V はバイアス電圧、 n は理想因子、 k は Boltzman 定数、 T は絶対温度を示す。 n は通常 1~2 の間をとる。 n は pn 接合界面の結晶性などの品質に影響を受ける数値であり、理想的には 1、結晶性が悪く間接再結合が支配的になると 2 に近い数値をとる。太陽電池にバンドギャップを超える光エネルギーが照射されると、光電流 (I_{ph}) が順方向と反対へ流れるため、光照射時の I - V 特性は、

$$I = -I_0 \left\{ \exp \left(\frac{qV}{nkT} \right) - 1 \right\} + I_{ph} \quad (1.2)$$

となり、 $V=0$ の時に流れる電流の絶対値を短絡電流 (I_{sc})、 $I=0$ の時の電圧を開放電圧 (V_{oc}) という。 V_{oc} は内蔵電位できまり、 I はバンドギャップを超えるエネルギーを持ったフォトン
の入射量増加に従い大きくなる。太陽電池の最大出力値 (P_{max}) は、電流と電圧の積が最大となる値である。実際の太陽電池では、pn 接合周辺における漏れ電流などによって生じる並列抵抗成分や、素子各部を電流が流れる時の直列抵抗成分の影響を受けるため、 $n=1$ の理想的な太陽電池の I - V 特性と完全には一致しない。 I_{sc} と V_{oc} の積を P_{max} で除したものを曲線因子 (Fill factor: FF) といい、これが大きければ理想的な太陽電池の I - V 特性に近く、太陽電池の性能を表す一つの指標である。

1.2 太陽電池の種類

太陽電池は、セルの素材や構造によって分類される (図 1.1)。現在、市場に多く流通しているのは、結晶 Si 系および CIGS 系、CdTe 系太陽電池で、非集光型の平板モジュールとして多く見かけられる。市場にはほとんど流通していないが、有機系太陽電池は実用化に向けて研究されている。これらは光起電力を原理としているため、太陽電池とひとくくりにされているが、素材や発電機構の違いからその特性は種類によって異なる。図 1.2 に太陽電池モジュールの相対分光感度特性を示す。太陽電池の吸収波長は、劣化や封止材の影響もうけるがバンドギャップに大きく依存するため、素材によって異なる特性を示す。以下に、実用化に向けて開発途上の太陽電池もあわせて、各太陽電池について述べる。

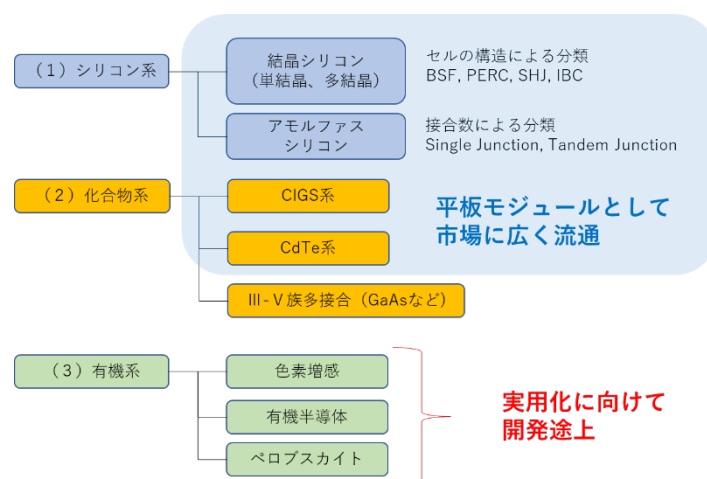


図 1.1 太陽電池の種類

(1) Si 系太陽電池

Si を素材に用いた太陽電池は、Si 結晶の塊であるインゴットをスライスしたウェハで作製する結晶系太陽電池と、電極層が設けられた基板上に、プラズマを用いて

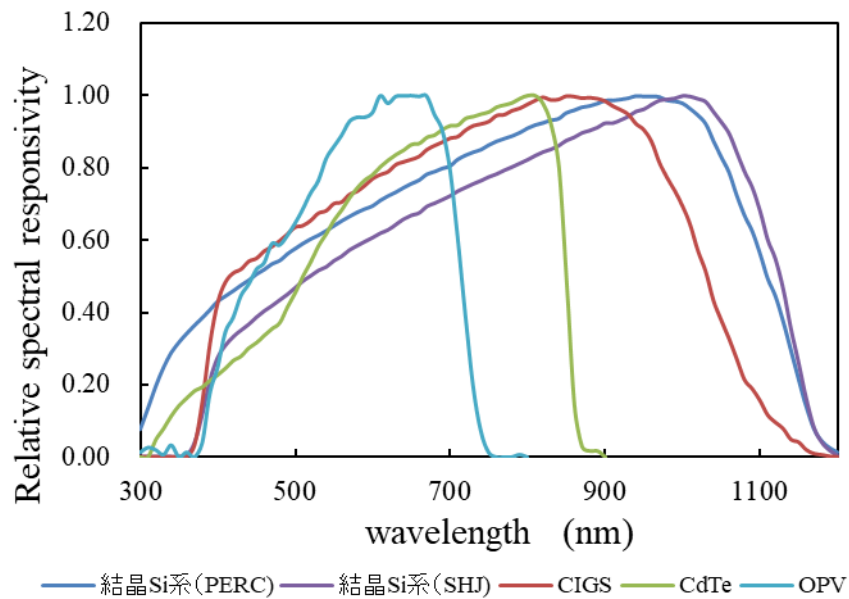


図 1.2 各種太陽電池の相対分光感度

水素化アモルファスシリコン (a-Si:H) を堆積させて作製する薄膜系太陽電池の 2 つに分類される。a-Si:H は構造上欠陥が多く、pn 接合を形成しても生成されたキャリアが欠陥に捕捉されるため、p 層と n 層の間にドーパントがなく比較的欠陥の少ない i 層を挿入する pin 接合を形成している。結晶 Si と異なり、製造工程数が少ないのが特徴だが、大面積の a-Si:H 太陽電池の製造に大きな設備が必要なうえ、化合物薄膜太陽電池の変換効率が向上したため、市場の流通量は著しく減少している。

市販されている結晶 Si 太陽電池には、単結晶 Si と多結晶 Si がある。多結晶 Si は結晶の乱れによる粒界があるため、単結晶 Si ほどの効率は出ない。しかし、多結晶 Si に用いる結晶育成の鋳造による製造方法は、コストがかからないため多く製造されてきた。単結晶 Si では、種結晶を坩堝内でゆっくり回転させながら引き上げて単結晶を作る Czochralski (Cz) 法が主流である。Cz 法では大きな単結晶のインゴットを成長させることができるが、石英で出来た坩堝から酸素が不純物として混入する。坩堝を使用しない結晶成長方法には、誘導加熱で多結晶 Si を溶融し、Si 融液を表面張力で保持して単結晶へと変化させる Floating Zone 法もあるが、大口径化が難しくコストが高い。Si インゴットをスライスしてできたウェハから、pn 接合や電極の形成などのほか、様々な工程を経て太陽電池セルが作られる。現在、市販されている結晶 Si 太陽電池のセル構造は、従来型の Al-BSF (Al-Back surface field) の他に SHJ

(Si hetero junction)や IBC (Interdigitated back contact)、PERC (Passivated emitter and rear cell) がある。従来型の p 型 Si 基板 Al-BSF のセル構造の例を図 1. 3 に示す。Al-BSF は、セルの焼成工程で裏面電極より Al が Si 基板内へ拡散して形成される p⁺層と、基板の p 層とのドーパントの濃度差によって界面に電位差をもたらし、光生成キャリアの裏面電極付近の再結合損失を防ぐ。

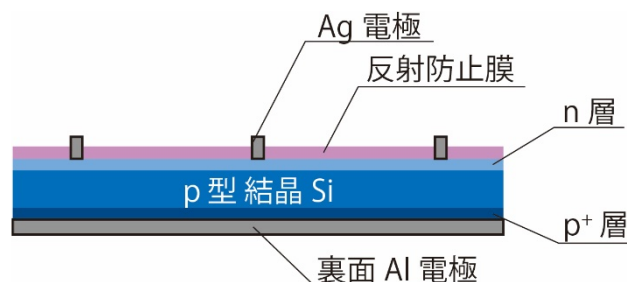


図 1. 3 p 型結晶 Si 基板を用いた Al-BSF セル構造

(2) 化合物系太陽電池

2 種類以上の元素からなる化合物半導体を用いた太陽電池を指す。化合物薄膜太陽電池は主に、窓層の透明導電膜、バッファ層、光吸収層(化合物半導体層)、電極という積層構造をとっている。化合物半導体は直接遷移型で光吸収係数が高いのが特徴である。CIGS 太陽電池は Cu、In、Ga、Se の 4 元素を原料とした I-III-VI₂ 族、CdTe 太陽電池は Cd と Te の 2 元素を原料とした II-VI 族からなる多元系半導体で、これら 2 種が市場に流通している。III-V 族化合物半導体太陽電池は、Ge 基板上に GaAs などを積層して形成され、40%以上の高い変換効率が得られている[5]。しかし、レアアースを多く用いコストが高いため、追尾式集光型太陽光発電システムや宇宙での応用に利用され、市場にはあまり流通していない。

(3) 有機系太陽電池

有機系太陽電池は実用化に向けて研究開発されている、新しい技術の太陽電池である。現在、変換効率については結晶 Si 系太陽電池に及ばないが、低照度でも起電力が生じることから IoT 電源などの室内用途が考えられている。

色素増感太陽電池は、pn 接合による光起電力ではなく、色素と電解液の酸化還元反応による電荷の受け渡しが電流生成に寄与する。入射光によって、二酸化チタンに吸着された色素中の電子が励起される。この励起された電子を二酸化チタンを介してアノードへと導き、直流として取り出す。送り出された電子は外部回路を経由してカソードに戻り、電極間に挟まれた電解質中のイオンを介して再び色素吸着

部へと戻る。用いる色素によって発電部の色を変えることが可能で、デザイン性が高い太陽電池の作製が可能だが、変換効率や封止技術の向上が求められている。

有機薄膜太陽電池（Organic photovoltaics: OPV）は Tang によって 1986 年に初めての試作品が発表され[6]、現在では、変換効率は 17.4%のセルが発表されている[5]。主な構造を図 1.4 に示す。光活性層で光によって励起されるのは、クーロン相互作用で束縛された励起子で電荷分離が十分でないため、そのままでは電流に寄与できない。そこで、正孔と親和性が高い有機物質を正孔輸送層に、電子と親和性が高い有機物質を電子輸送層として設け、励起子を電荷分離させ選択的に電荷を取り出している。

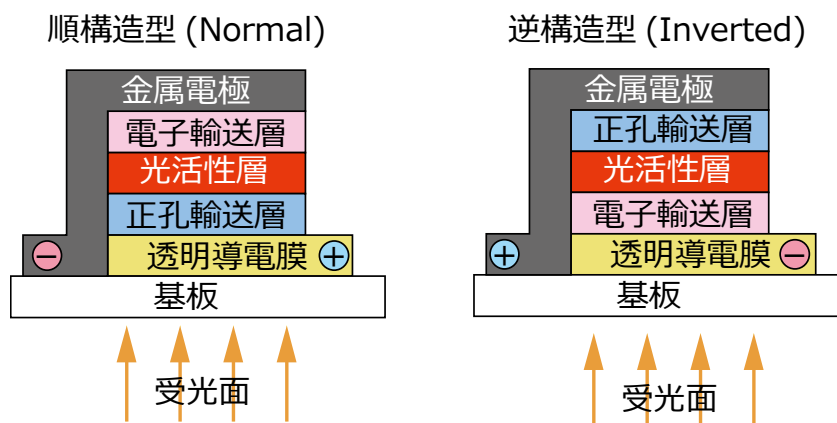


図 1.4 OPV の構造図

ペロブスカイト太陽電池は、有機系の中でも最も新しい分野だが、研究レベルで変換効率はペロブスカイト単体の太陽電池セルでは 25.2%、ペロブスカイトと Si 基板のタンデム太陽電池セルでは 28.0%に達している[5]。これまでの有機半導体と異なり、光照射によって励起子が生成されるのではなく、電子—正孔が電荷分離した状態で自由に運動しているという報告がある[7]。

1.3 太陽光発電システム

一般の消費者に製品として届く太陽電池は、光起電力を有する太陽電池セルを直並列で回路を組み、ガラスやバックシートなどによって封止され、コネクタや回路保護のためのダイオードなどとともにモジュール化されている。図 1.5 は市販されている単結晶 Si 太陽電池モジュールの写真で、左は受光面側を撮影したもの、右は裏面側を撮影したものである。裏面側のジャンクションボックスの中にバイパスダイオードが組み込まれ、アレイ



図 1.5 単結晶 Si 太陽電池モジュールの受光面側(左)と裏面側(右)の写真

構成ためのケーブルはそこから伸びている。太陽電池モジュールを、直並列に組んだかたまりを太陽電池アレイとよび、パワーコンディショナ（Power conditioner system: PCS）を通して電力系統に接続される（図 1.6）。PCS では、太陽電池アレイの出力が最大になる電圧を、最大電力点追従制御（Maximum power point tracking: MPPT）負荷によって制御している。可変抵抗によって入力される電圧をわずかに変化させ、その変化に対する出力の増減をフィードバックし、再び電圧を変化させる、その繰り返して最適動作点を追従している。PCS は太陽電池アレイの最適動作点追従のほか、発電された直流電力を系統電力に合わせ交流電力へ変換するインバーターの機能も備えている。

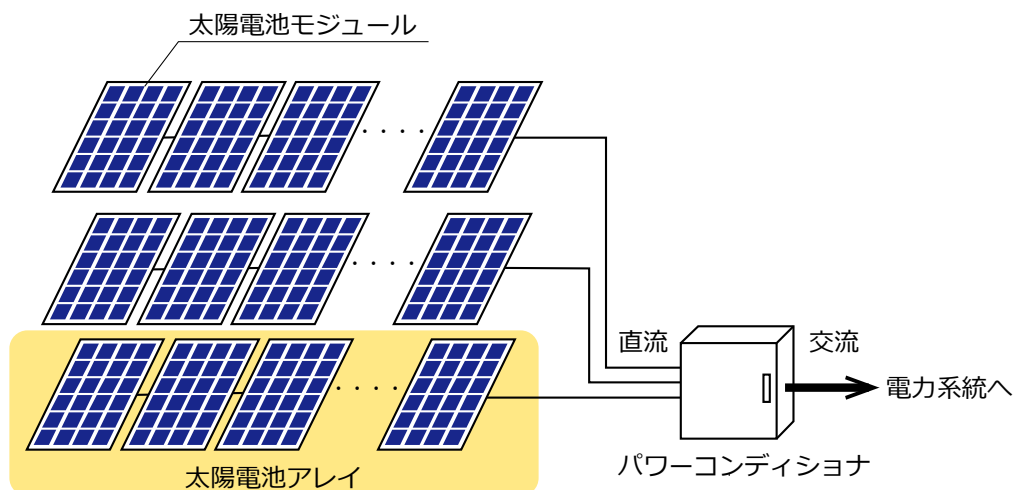


図 1.6 太陽光発電システムの構成

1.4 本研究の目的

日本では再生可能エネルギーに関して、2012 年に固定価格買取制度 (Feed-in-tariff: FIT)

が制定され、可動部がほとんどなく発電所の中でも比較的容易にシステムを組むことができることから、太陽光発電の市場は急激に拡大した。その一方で、制御できない自然環境によって出力が変化するため、需要に対する供給の調整や、ピーク出力に送電線が対応できないなど、電力系統への接続に課題を抱えている。エネルギー自給率が 9.5% の日本において[8]、再生可能エネルギーの導入促進は必須であり、長期安定化電源として成長するためには、これらの課題解決が求められている。

本研究で用いる曝露試験場における、実際の太陽光発電システムの発電量を示す（図 1.7）。太陽電池の出力に影響を与える要因は主に、1.1 節で触れたように照射される光のスペクトルや放射照度、およびデバイス温度で、実際の太陽電池の発電量は気候の影響を受け増減する。太陽電池が気象環境によってどのような性能変化を示すのか、屋外の評価に関する報告はこれまでもなされてきた。Minemoto らは、モジュールの温度とスペクトル放射照度分布の 2 つの環境パラメータが Si 系太陽電池の発電性能へどれくらい影響を与えるか調査報告している[9]。また、住宅用太陽光発電システムのような小規模発電所のスマートメータの積算発電量データと日照時間の解析をもとに、実際にアメダスで計測された日照時間データからリアルタイムの発電量を推定する手法が検討されている[10]。加えて、太陽電池の発電量に大きな影響を与える照度予測において、アンサンブル気象予測の精度についても研究されている[11]。これらの研究は、予測される需要に対して、気象環境というインプットから、その時々発電量を推定して、電力の需要と供給のバランスに役立てることを目的としている。太陽光発電システムを長期安定化電源として考えるならば、それに加え、劣化率から求められた積算発電量をもって太陽電池を評価する必要がある。

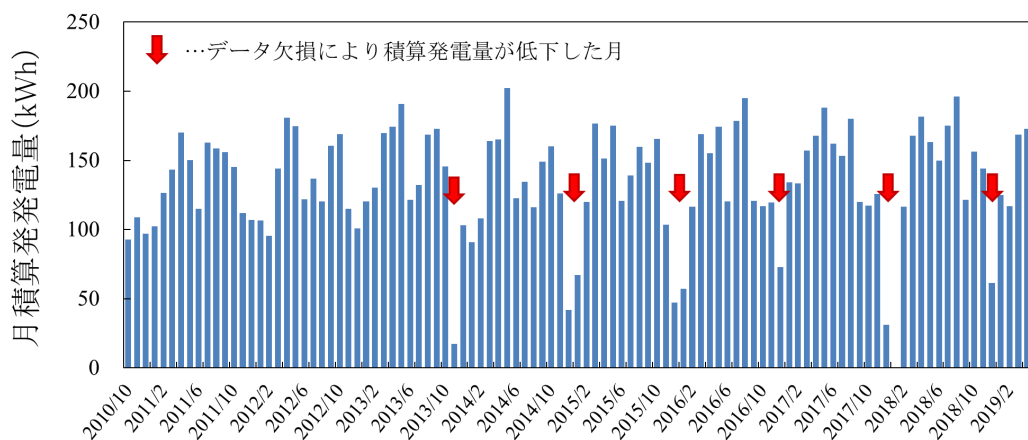


図 1.7 本研究に用いた屋外曝露試験場に設置している
単結晶 Si 太陽電池アレイ（公称出力 1.26 kW）の月積算発電量

る。しかし、アウトプットとしてユーザーに見える図 1.7 に示すような実際の積算発電量は、その時々における気象条件による変化だけでなく、フレッシュな太陽電池の状態が安定化するまでの過渡状態、封止材の加水分解や電極の酸化のような不可逆的变化など、異なるメカニズムが複数合わさった結果が示されている。発電量推定のためには、曝露開始からある時点における精密な発電性能を把握する必要があるが、一般的な運用では格段の不具合が示されない限り、一度設置した太陽電池を取り外して発電性能の変化を調べることはない。Osterwald らは、1994 年から 11 年間にわたって発電性能の調査を行い、結晶 Si 太陽電池の出力低下を $-3.74\%/year$ と報告している[12]。一方、Jordan と Kurtz による過去 40 年間の報告調査では、結晶 Si 太陽電池の発電性能の劣化率を $1\%/year$ 未満と報告しており[13]、両者の文献に示されていた劣化率に差がある。屋外曝露についての報告が集まれば、平均値や中央値を代表値として劣化率の傾向をつかむことはできるが、劣化率の差は曝露が長ければ長いほど積算発電量への影響は大きくなっていく。報告される劣化率の差は、主に屋外曝露の地理的条件や負荷、太陽電池の素材、構造、製造時期も異なることから生じていると考えられるが、それだけではない可能性がある。Lopez-Garcia と Sample は、市販されている太陽電池モジュールは、銘板値に対する出荷値の許容範囲がメーカーや出荷時期によって異なると述べ、結晶 Si 太陽電池モジュールにおいて、銘板値と出荷値の P_{max} の差が 10%あるものを報告している[14]。銘板値を初期値とし劣化率を算出した場合、メーカーの出荷値許容範囲次第で劣化率が変わってしまい、精密に太陽電池の劣化率を評価することはできない。

さらに、太陽電池の中には、その時与えられた温度や放射照度等の条件だけでなく、それまで経験した履歴によって発電性能が変化するものがある。例えば、CIGS 太陽電池では光照射に起因した光照射効果 (Light soaking effect) が知られており、製造直後よりも光照射後のほうが発電性能が向上する[15], [16]。この光照射効果は、発電設備導入初期にみられる振る舞いで、発電性能の向上後に性能が安定する。つまり、曝露開始から発電性能が安定するまでに時間を要する。また、a-Si:H 太陽電池では Staebler-Wronski 効果による光劣化と、その劣化が熱アニールにより回復することが知られている[17]。本研究で利用した屋外曝露試験場においても、系統連系負荷のもと曝露された a-Si:H 太陽電池のアレイ単位での計測および、取り外した後の標準試験条件下での室内測定から、夏季の熱アニールによる回復が確認された[18]。a-Si:H 太陽電池の夏季に見られた熱アニールによる回復は、冬季に見られないため、発電性能は冬季に低下し夏季に向上する規則性を持ちながら、ある

一定の発電量を示す。このように、インプットされる環境パラメータが同じであっても、曝露された履歴によりアウトプットである発電量が異なる値を示すような発電性能変化の特性を本研究では準安定性と呼ぶことにする。長期安定化電源としての太陽電池を評価するためには、準安定性が積算発電量へ与える影響の大小を明確にする必要がある。

産総研九州センターの屋外曝露試験場では、系統連系負荷のもと様々な太陽電池が屋外曝露されており、11 種 22 型式の太陽電池について、曝露期間中の発電量の計測および、取り外し室内測定の実施により発電性能の変化を高精度に観察している（2019 年現在）[18]–[22]。

本研究では、この屋外曝露試験場にて曝露されている太陽電池のうち、これから実用化される新技術である OPV および、これから市場を占有すると言われている PERC 太陽電池について調査した。まず本章では、太陽電池および太陽光発電システムについて一般的な内容をまとめている。第 2 章では本研究における評価方法について、第 3 章では OPV、第 4 章では PERC 太陽電池についての研究について述べる。第 5 章で、各太陽電池の発電性能について減衰曲線を推定し、準安定性が積算発電量に与える影響を検討する。第 6 章では本論文で得られた結果についてまとめ、今後の課題についても触れる。

第2章 本研究における太陽電池の評価方法

第1章でも述べたが、太陽電池モジュールの発電原理は、半導体のpn接合によるため、照射される光のスペクトルや、放射照度、デバイス温度によって出力が変化する。そのため、国際電気標準会議（International Electrotechnical Commission: IEC）において、太陽電池デバイスの光や温度に対する応答特性を考慮した評価方法の標準化規格が制定されている。太陽電池のデバイスの応答特性を考慮した経年変化の観察のため、実際に発電設備に組み込まれた太陽電池の発電特性を、実環境下における屋外測定と、設置している架台から定期的に取り外して条件統制された室内測定で評価している。室内評価では、条件統制のため再現性の高い測定が可能で発電性能の相対変化を精密に観察できるが、屋外曝露より取り外した時だけの“点”での評価になる。一方、屋外評価では“線”での評価が可能だが、デバイスの応答特性の影響を受けるため、得られた屋外データを標準試験条件における発電特性へと補正する必要がある。

本研究では国際規格を参照し、室内ではソーラシミュレータを用いてモジュール、屋外ではトレーサを用いてアレイの $I-V$ 特性を得て太陽電池の発電量評価を行っている。本章では、太陽電池の出力に影響を与える要因について、さらに本研究における評価方法について国際規格を交えながら説明する。

2.1 太陽電池の出力を変化させる環境要因

太陽電池は、光源からの放射照度、スペクトル、温度によって出力が変化し、太陽電池の種類によって出力変化の振る舞いが異なる。太陽電池間の性能比較を精密に行うためには、測定環境が制御された同一条件での測定が必要である。太陽電池デバイスの評価方法は、IEC60904 シリーズにおいて太陽電池の種類ごとに標準化が進められており[23]、またIEC61215 シリーズにて型式認証試験が定められている[24]。それらの規格において、太陽電池の $I-V$ 特性を測定する標準試験条件は、放射照度 1000 W/m^2 および AM1.5 に適合する光源を用い、測定温度は 25°C と定義されている。まずは太陽電池の出力に影響を与える環境要因と試験規格について以下にまとめた。

2.1.1 放射照度

実運用において太陽電池は、太陽から放射されるエネルギーを受ける。地球はその表面

を大気の膜に覆われているため、地上に到達する太陽からの放射エネルギーは大気を通しての過程で、空気や浮遊微粒子による散乱や、水蒸気やオゾン、酸素分子、二酸化炭素の吸収によって減衰する。よって、浮遊微粒子や水蒸気量が多い場合や、太陽高度が低く通過する大気が厚いと地上設置の太陽電池が受けることができる放射エネルギーは低下する。太陽と地球がその平均距離にある時において、太陽光線に垂直な単位面積に単位時間に入射する放射エネルギーは大気上端で 1370 W/m^2 であり、標準試験条件である放射照度 1000 W/m^2 は、人口が多い中緯度地域の地上に到達する太陽光を想定しているものである。図 2.1 は本研究を実施している曝露試験場（北緯 33.2 度、東経 130.3 度）における、ある晴天日の太陽電池モジュールの受光面と同じ斜面全天日射照度の時間推移を、冬は青線で夏は赤線で示している。前述の通り、朝・夕・季節といった太陽高度だけでなく大気の状態によっても値が変動するが、太陽高度が南中にあるとき放射照度は標準試験条件に最も近くなる。

太陽電池の出力は、バンドギャップを超えるエネルギーを持ったフォトンが入射量が増加すれば、電流に寄与するキャリアが増加するため、受光する放射照度に大きく依存する。朝夕の日射量が低い時間帯は、その出力は標準試験条件における値よりも小さくなる。太陽電池モジュールは、およそ $300 \sim 1000 \text{ nm}$ の範囲で放射照度に対する出力変化が線形相関を示し[25], [26]、IEC60904-10 にて太陽電池デバイスのパラメータの線形相関の程度を測定するための詳細手順について規格が定められている[27]。

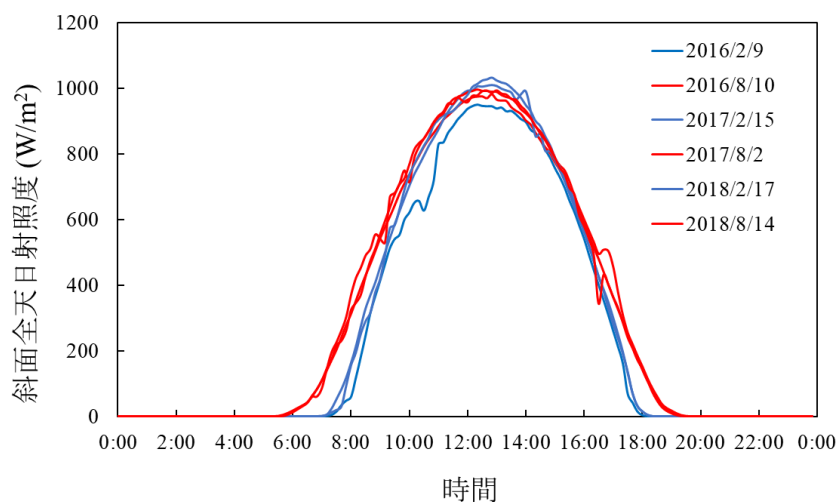


図 2.1 晴天日における斜面全天日射照度の時間変動

2.1.2 スペクトル

太陽の放射エネルギーの分光分布は、近似的に 5780 K の黒体放射であらわされる。先に述べたように、放射エネルギーは地球表面へ到達する過程で減衰し、分光分布は大気の影響を受けて変化する。天頂に太陽があるときに大気を通過する(地球に対し垂直入射する)光路長と、任意の太陽高度における太陽光が地上に入射するときの大気の通過距離の比を Air mass(AM)と表し、次式で与えられる。

$$AM = \frac{L}{L_0} = \frac{1}{\cos z} \quad (2.1)$$

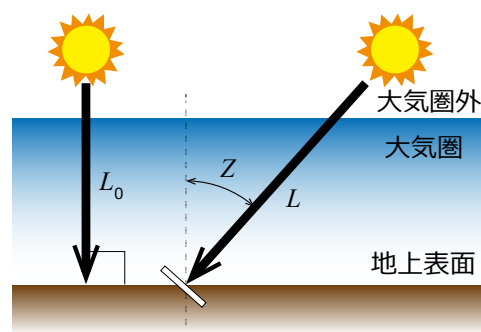


図 2.2 太陽光の光路長と入射角

L は任意の太陽高度における光路長、 L_0 は垂直入射した時の海拔 0 m における光路長、 z は太陽と天頂に挟まれた角度である (図 2.2)。太陽電池の標準試験条件に定められている、光源の分光分布を示す AM1.5 は、 $z=48.2^\circ$ であり、季節や昼夜で変化する太陽高度の中央値であるため、中緯度地域における年間全体の平均を表す代表値として採択された。現在、標準光源の分光分布は ASTM G-173[28]および IEC 60904-3[29]で定義され、SMARTS (Simple model of the atmospheric radiative transfer of sunshine, <https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/smarts.html>)コードでシミュレートされた値が採択されている。

太陽電池のバンドギャップ以上のエネルギーを持つ光子が入射することにより起電力が発生することから、入射波長に対する感度はデバイスの種類によって異なる (図 1.2)。そのため、標準試験条件に用いられるソーラシミュレータに要求されるスペクトル合致度は、太陽電池の種類ごとに積算される波長帯が決められている。

2.1.3 デバイス温度

太陽電池は他の半導体デバイスと同様、温度によって動作が変化する温度特性を示す [30]–[32]。通常使用される放射照度および温度範囲では、温度に対してそのデバイス特性は線形相関を示すため、IEC にて補正係数の算出および補正方法が定義されている [33]。パラメータの値を温度の関数としてプロットして得られた回帰直線の傾きを温度係数とし、一般的に P_{\max} における温度係数を γ 、 I_{sc} における温度係数を α 、 V_{oc} における温度係数を

β とする。回帰直線は最小二乗近似法によって求められ、温度係数の単位は各パラメータの変化量を標準試験条件における値で規格化した%/°C と示されることが多い。結晶 Si 太陽電池における P_{\max} の温度係数は約-0.40%/°C と報告されている[34], [35]。太陽電池の種類やモジュールの構造、部材によって温度係数は異なるため型式認証試験を受けたモジュールはデータが公表されている。

2.2 室内測定による特性評価

実環境では、環境に応じて発電量が変化するため、経年変化の精密観察を目的に、屋外曝露している太陽電池モジュールを定期的に室内へ持ち込み、標準試験条件にて測定を実施している。測定条件の再現性を高めることで、経年変化を精密に観察できる。

2.2.1 ソーラシミュレータ

ソーラシミュレータの性能は、試験平面における放射照度の場所むら、太陽電池の種類ごとに定めたスペクトル分布の一致度、装置の不安定性といった指標によって分類されている[36]。本研究に用いられたソーラシミュレータは、結晶 Si 太陽電池の規格 AAA を満たしている。表 2.1 にソーラシミュレータに要求される、太陽電池のスペクトル合致度の基準を種類ごと示す[36]。スペクトル合致度クラス AAA は、各波長帯の積分放射照度が、指定範囲の全放射照度に占める相対エネルギー分布の±25%範囲内に入ることが要求さ

表 2.1 太陽電池用ソーラシミュレータのスペクトル合致度要求事項[36]

結晶Si太陽電池		a-Si:H太陽電池		CIGS太陽電池	
波長帯域 (nm)	相対エネルギー分布	波長帯域 (nm)	相対エネルギー分布	波長帯域 (nm)	相対エネルギー分布
400～500	18.4%	350～400	6.2%	400～500	16.8%
500～600	19.9%	400～450	11.8%	500～600	18.1%
600～700	18.4%	450～500	14.9%	600～700	16.7%
700～800	14.9%	500～550	14.6%	700～800	13.6%
800～900	12.5%	550～600	14.3%	800～900	11.3%
900～1100	15.9%	600～650	13.8%	900～1100	14.5%
合計	100.0%	650～700	12.9%	1100～1300	9.0%
		700～750	11.5%	合計	100.0%
		合計	100.0%		

れる。太陽電池の種類ごとにソーラシミュレータの基準モジュールを変更するよう定められている。本研究においては、基準モジュールの変更は実施していないが、発電性能の経年変化を精密に観察できるよう、毎月コントロールモジュールの測定および照度の場所むらの測定を実施し、光源の再現性を確認している。

2.3 実環境による屋外測定

佐賀県鳥栖市（北緯 33.2 度、東経 130.3 度）にある屋外曝露試験場は 2010 年に完成し、9 月 30 日より 5 種の太陽電池について屋外測定が開始された。架台は真南を向いており、モジュールの設置角度は 26 度である。太陽電池モジュールへの負荷は、アレイの状態ですべて PCS を通して系統に連系され、一般的な発電設備と同様の使用状態にある。PCS 1 台につき 8 アレイ接続することができ、MPPT 負荷はアレイ別に分けられている。MPPT 負荷のアルゴリズムには、一般的な山登り法が用いられており、アレイの電圧変化に対してフィードバックされた太陽電池アレイ出力の増減から、最大出力点を追従している。これら実使用下の太陽電池アレイは 10 分間に一度系統より切り離されて、アレイごとの I - V 特性がリレー測定によって得られている。

2.3.1 取得している屋外測定データ

太陽電池の発電特性に影響のある日射や気温等の環境要因に関するデータを取得している。傾斜角で日射強度が異なるため、曝露されている太陽電池と同傾斜角の水平面に二次標準日射計を設置し (Model: SR20-T1, Hukseflux Thermal Sensors B.V., the Netherlands) 全天日射量を得ている。太陽電池の種類ごとに、施工上の問題がない限りアレイの中央の 1 枚を選定し、モジュール裏面の中央付近に T 型熱電対をカプトンテープで固定し、モジュールの裏面温度を取得している。アレイごとの I - V 特性は PV アナライザ (Model: PVA01950, 日本カーネルシステム, 日本) を用いて計測され、そこからアレイの P_{\max} を得ている。

2.3.2 屋外データの解析手法

太陽電池の発電量が最も影響を受ける環境要因は日射量であるため、晴天日であれば太陽高度で変化する日射量と発電量の相関がかなり強くみられる。日射量は太陽高度だけでなく、雲の塊で太陽がかけると急激に低下する、あるいは雲のエッジによる散乱で日射量が瞬間的に増加することもある。本研究では PV アナライザは 8 回路リレーで計測しているため、日射データと出力データの間の時間差から測定誤差が生じる。そのため急激な日

射変動がないデータ、つまり日射量が 700 W/m^2 以上かつ、前 20 分および後 20 分にわたり日射変動が連続して 5% 以下である時の測定データを抽出して解析を行った。

環境要因を除いた評価を目的に、日射量や温度によって変化する発電量を、標準試験条件の値に補正して評価する。標準試験条件にて測定した初期値との比較のため、屋外計測によって得られた太陽電池アレイの発電量を標準試験条件における放射照度で補正し規格化したパフォーマンスレシオ(Performance Ratio: PR)は、以下の式で与えられる。

$$PR = \frac{P_{\max}}{P_{\max(\text{STC})}} \times \frac{G_{(\text{STC})}}{G} \quad (2.2)$$

ここで、 P_{\max} はアレイの最大出力、 $P_{\max(\text{STC})}$ は標準試験条件におけるモジュールの最大出力値の合計、 $G_{(\text{STC})}$ は標準試験条件における放射照度 1000 W/m^2 、 G は斜面全天日射量である。これにより、放射照度の違いを除いた発電量の評価が可能となる。さらに、太陽電池のデバイスの温度特性を考慮し、標準試験条件である 25°C へ補正した $PR_{T=25}$ は以下の式で与えられる。

$$PR_{T=25} = \frac{P_{\max}}{P_{\max(\text{STC})}} \times \frac{G_{(\text{STC})}}{G} \times \frac{1}{1 + \gamma(T - T_{(\text{STC})})} \quad (2.3)$$

ここで、 γ は評価対象モジュールの P_{\max} の温度係数、 T は測定されたモジュール裏面温度、 $T_{(\text{STC})}$ は標準試験条件におけるモジュール温度 25°C である。放射照度および温度による補正を行うことで、デバイスの特性による変化を除いた出力変動の詳細な観察が可能となる。劣化がほとんどなく、太陽電池の発電性能に変化がない場合は、 $PR_{T=25}$ は経年変化せず一定の値を示し続ける。

本来ならば、屋外曝露期間中のスペクトルの季節変動を考慮したミスマッチ補正を考慮しなくてはならない。しかし、本研究で用いた太陽電池モジュールの大きさに対応する測定装置を具備していないため、長期曝露で変化する相対分光感度に対応したスペクトルの補正ができない。今回の研究では、都度与えられる環境パラメータにより変化する発電量ではなく、曝露履歴により変化する発電性能の特性である準安定性に焦点を絞っているため、太陽電池の発電性能の高精度な経時変化については、再現性の高い光源を用いた室内

測定から観察し、スペクトル補正は今後の課題とした。

第3章 有機薄膜太陽電池の発電量および準安定性調査

準安定性が太陽電池の生涯発電量にどの程度の影響を及ぼすのかを検討するため、準安定の期間や大きさについて、各種太陽電池の中でも新しい技術に属している OPV を解析した。OPV は素材を塗布して低温形成が可能なものであり、ロールツーロールによる生産で量産によるコスト削減が予想できる。一方で、光酸化や吸湿性が高い有機素材を使用することから、高い封止技術が求められるため、主力電源としての実用化には至っていない。しかし、セルレベルで近年 17.4% の発電効率が発表され[5]、注目を受けているものの一つである。実用化の準備段階にあるが、まだ屋外曝露での性能変化の報告例は少なく、とりわけ PCS を通して電力系統へ連系された状態での数年にわたる屋外曝露の報告例は、我々の知り得る限りはない。OPV において多く報告されているセルあるいはミニモジュールでの屋外曝露[37], [38]と、本論文に示すような商用モジュールに対する系統連系下での屋外曝露では、その発電量ならびに曝露にともなう性能変化に差異が生じることが予想される。本研究では、セミコマーシャルの OPV を屋外実環境下に曝露し、標準試験条件における室内測定データだけではなく、実環境における太陽電池アレイの出力の振る舞いから、発電量および曝露初期における準安定性を調査した。その結果、OPV の発電性能は初期の急激な劣化と緩やかな二次劣化を示した。これはミニモジュールでの先行研究から予測しうる振る舞いであったが、新たに長期曝露によって、二次劣化における発電量が季節変動することがわかった。さらに実験を行い、二次劣化における発電量の季節変動がデバイスの温度特性だけではなく、熱回復に起因したものであることを明確にした。本章では、まずは実運用下における発電量の振る舞いについて 3.1 節で述べ、次に発電量の季節依存性が何に起因するかを検証した結果を 3.2 節にて述べる。

3.1 実環境下における発電量の経年変化および季節変動

3.1.1 研究目的

OPV に用いられる素材は多く、構造の違いも考慮すべき劣化メカニズムは多岐にわたる。劣化メカニズムの解明および太陽電池モジュールの信頼性向上のために The International Summit on Stability of Organic and Perovskite Solar Cells (ISOS)[39]において、OPV の加速劣化試験のガイドラインが議論されている。OPV の経年変化による発電性能の推移は、

室内加速試験などによる結果から、その材料や構造の違いで多少の違いはあるものの、急激な初期劣化と緩やかな二次劣化があることが知られている[40]–[42]。初期の急激な劣化については、OPV の製造工程で残留した不純物による有機物の酸化や、光や熱によってヘテロ接合の活性層が巨視的相変化を起こすなどの内因性のメカニズムが議論されている[41]–[45]。緩やかな長期劣化については、大気からの水の浸入や酸素の侵入による電極や有機素材の酸化が挙げられている。一般に、加速劣化試験では実使用環境より過酷な試験条件が設定されている。例えば、型式認証標準規格(性能認証規格)IEC61215 において[24]、恒温槽を用いたダンプヒート試験やサーマルサイクル試験の条件が定められているが、装置の中では暗状態であるなど日中光照射されている太陽電池の実環境とは異なる。Sakurai らによると暗状態での劣化加速試験において、CIGS 太陽電池に実使用と異なる劣化モードが認められており[46]、加速試験での劣化は必ずしも実使用を反映するものではない。つまり、加速劣化試験で得られた劣化モードから推定されたモデルが、実際の生涯発電量推定に当てはまるとは限らず、実運用下における曝露試験もまた重要だと考えている。

OPV ミニモジュールの屋外曝露についての論文を紹介する。Bristow と Kettle は、受光面に Ag 銀ナノワイヤを用いた有効面積 64.8 cm^2 の逆構造型フレキシブル OPV のミニモジュールを 12 週間曝露し、初期の 6 日間で出力が 2 割低下する急激な劣化および、そのあとの緩やかな劣化を報告している[47]。彼らの研究では、二次劣化は主に FF と V_{oc} の低下に起因したが I_{sc} は回復しており、ZnO 層において日中の UV 照射により酸素脱離が生じるものの、夜間の酸素再吸着によりトラップが減少して朝の I_{sc} の上昇を引き起こすと主張している。一方で、Mathilde らは光アニーリングによって、ZnO の導電率が改善することで OPV の出力が向上すると述べており[48]、Verbakel らもまた光あるいは順方向バイアスによって ZnO ナノ結晶内の酸素が脱離し、意図しない n 型ドーピングがもたらされる述べている[49]。6~8 か月の比較的長期にわたる屋外曝露試験は Owens らによって報告されている[38]。彼らは、製造方法の異なる OPV セルを開放状態で屋外曝露し、室内および屋外評価を行った。製造方法や曝露地域が異なるため OPV セルの劣化程度は異なるものの、いずれも急激な初期劣化と、緩やかな二次劣化が示された。

本研究では、フルサイズの商用 OPV モジュールを 3 年以上の長期にわたり曝露した。PCS を通した系統連系下にある屋外発電量を調査し、OPV の準安定性が生涯発電量に与える影響を検討する。

3.1.2 実験方法

2014年12月より屋外曝露を開始したOPVアレイを図3.1に示す。曝露サイトの詳細は2.3節に示した。試験OPVモジュールは1アレイ当たり4直列にしたものを4並列に接続し、計2アレイがPCSを介して系統連系されている。試験OPVモジュールはロールツーロールで作製されたOPVフィルムを、バリアフィルム(水蒸気透過率： 10^{-4} g/m²·day)とアルミ樹脂複合材で封止し、建材としてモジュール化された受注生産の商用グレードのものを使用している。図3.1にはモジュールの構成図も示す。OPVモジュールの大きさは縦：1630 mm、横：1080 mmで、重さは16 kgである。OPVフィルムにはバリア性のないポリマー基材が用いられ、光活性層のn層にはフラーレン関連素材、受光面側に電子輸送層を有する逆構造型である。透明導電膜は複層のものが用いられている。発電層は約400 nm、上下バッファ層も含めると約900 nmの厚みを有する。

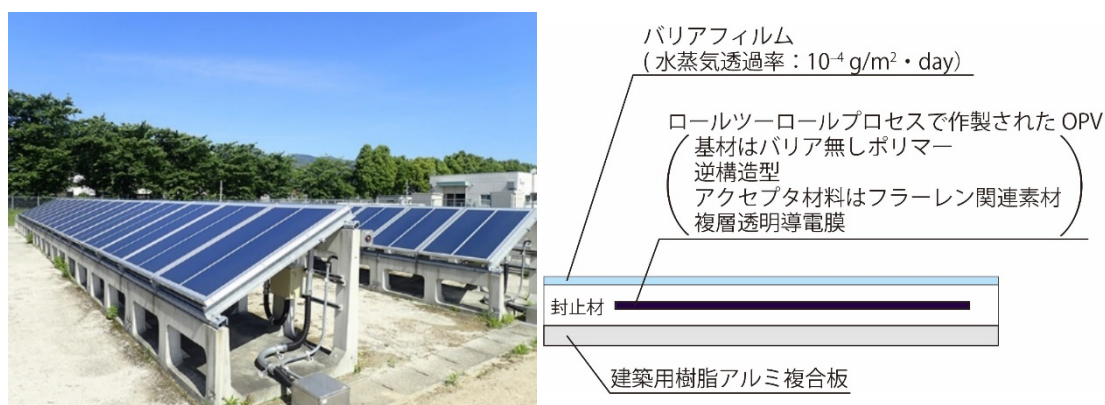


図 3.1 (左)系統連系されている OPV アレイと(右)OPV モジュールの構成

OPV の準安定性が生涯発電量へ与える影響を検討するため、発電量の経年変化の観察は屋外計測と室内計測の二つの面からアプローチした。2014 年 12 月から 2018 年 5 月までの屋外計測データから、式 (2.2) を用いて PR を算出し、発電量の経年変化をプロットする。PR は日射強度で規格化されているため、実環境の温度の季節変化を反映したアレイ発電特性の変化が分かる。さらに室内計測では、個々の OPV モジュールを、架台から取り外し曝露開始から約 1 年後、2 年後、3 年後の計 3 回標準試験条件 (AM1.5, 25°C, 1000 W/m²)での測定を実施した。再現性の高い室内計測により、発電特性の経年変化を高精度に評価できる。モジュール単位でのデータを得ることで、OPV アレイ発電量の劣化が、特定のモジュールに起因しているのか、それとも試験 OPV モジュールの全体に起因しているのか観察できる。

太陽電池デバイスを製品として開発するためには、実環境に即した設計が必要になるが、これまでの OPV における先行研究では、長期屋外曝露の例は少なく、実運用下での積算発電量や屋外環境負荷についての知見はほとんど得られていない。本研究では、OPV がさらされる環境負荷についても、斜面全天日射量や気温、モジュール裏面温度の影響をまとめる。

3.1.3 結果と考察

3.1.3-1 屋外試験サイトの気象条件

図 3.2 は本研究における解析期間である、2014 年 12 月から 2018 年 5 月までの積算日射量と最高／最低気温、OPV モジュールの最高／最低温度を月毎に集計したものである。屋外曝露サイトは、Köppen の気候区分によると Cfa に分類される。最も寒い月の気温は -3 から 18°C の範囲で、冬は比較的穏やかである。また、月積算雨量が最も多い月は夏に観測されるが、通年通して雨が降るため乾季はない。図 3.2 において冬の積算日射量が低い、これは太陽高度が低く日照時間が短くなること、さらに曇りの日が多いことに起因する。春から夏にかけて積算日射量は増加するが、6 月末から 7 月中旬の梅雨の影響で 5 月または 8 月に月積算日射量が最大となる。また、モジュール裏面温度は日射強度と強い相関があるため、最低モジュール裏面温度を記録するのは真夜中であり、外気温にもっとも近くなる。一方、最高モジュール裏面温度は日中に記録され、最高気温から 20°C 上回ることがある。屋外曝露試験サイトでの OPV モジュール動作温度は、夏は 11.7°C から 62.6°C で、冬は -7.5°C から 41.7°C であった。低温にて作製可能な OPV であるが、その製造工程

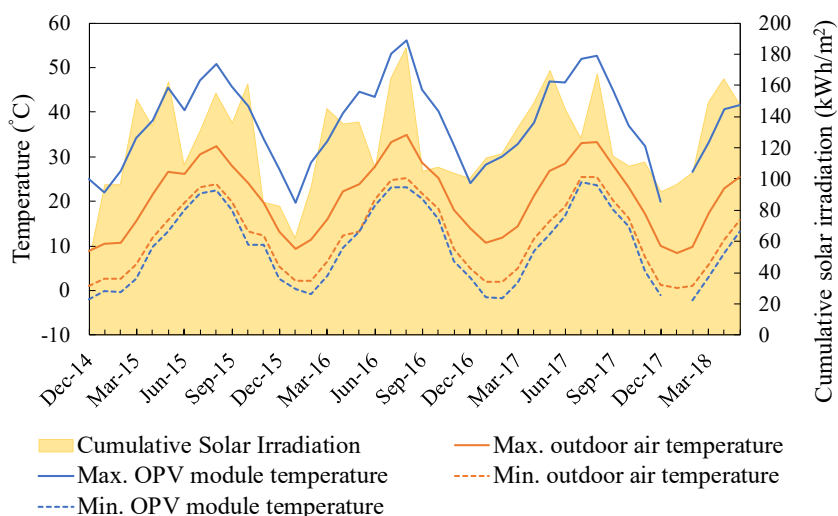


図 3.2 積算日射量と気温および OPV モジュール温度の月次推移

では光活性層のアニール温度に 130°C[50]、ロールツーロールによる製造工程でも 90°Cのホットプレートで乾燥及び結晶化を行う[51]。本屋外試験サイトの気象条件下では、夏の高温によって重篤な故障をもたらすことはないを考える。

3. 1. 3-2 OPV アレイの屋外計測

発電性能の経年変化を観察するため、屋外曝露開始から 3 年以上にわたる OPV アレイ (array 1, array 2) の Monthly PR の経時変化を図 3. 3 に示す。二つのアレイ間に経時変化の大きな差は見られず、発電能力を著しく損なうような故障 OPV モジュールは見受けられない。Monthly PR は特徴的な 3 つの変化を示した。一つ目は、初期劣化である。2014 年 12 月の屋外曝露開始から 2015 年の 5 月あたりまで、急激な低下を示した。二つ目に、2015 年 7 月以降に見られる緩やかな二次劣化である。初期の急激な劣化と、緩やかな二次劣化は先行研究においても報告があるが、本研究では三つ目の変化として、二次劣化における発電量の季節変動が示された。毎年、夏季に Monthly PR がわずかに増加し、冬季には Monthly PR がわずかに減少している。長期曝露時の発電量の変化によって示された、これら 3 つの変化についてさらに詳しく分析する。

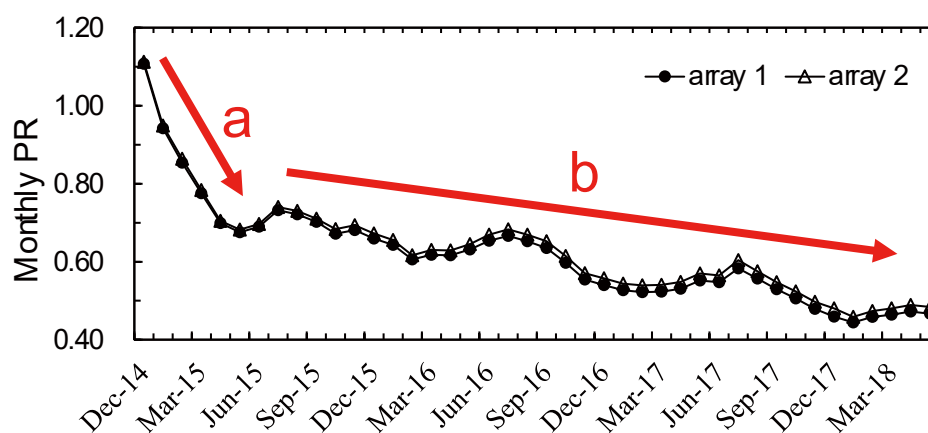


図 3.3 OPV アレイにおける Monthly PR の経時変化

まずは、初期劣化および二次劣化中の OPV アレイの I - V 特性を調査した。2015 年 5 月以降 Monthly PR は回復しているが、出力の温度依存変化による可能性や初期劣化と異なる機構の回復が見られている可能性があるため、これだけでは初期劣化が収束する時定数を明確に決定できない。斜面全天日射強度が 1000 W/m² 程度を示した際のデータから、図 3. 4 (左) は屋外曝露開始直後の 2014 年 12 月 13 日、および 2015 年 6 月 4 日、2015 年 8 月 1 日を、図 3. 4(右)は屋外曝露開始直後と曝露開始 40 週 (2015 年 9 月 3 日) 以降の OPV アレイ 1 の屋外 I - V 特性を示している。図 3. 4 (左) に示すように、2014 年 12 月か

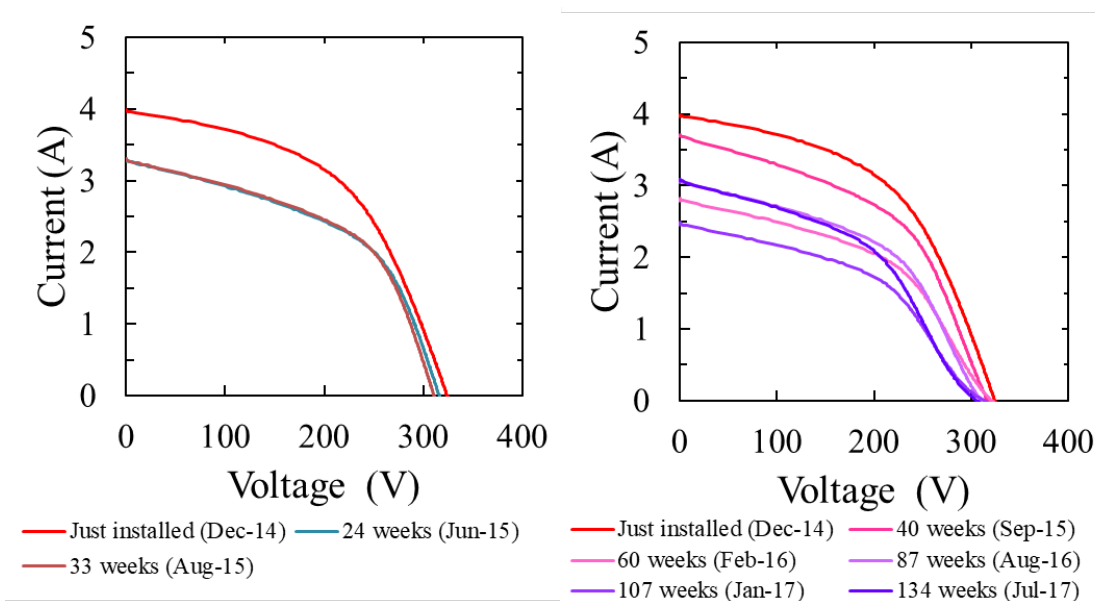


図 3.4 (左)曝露開始から 33 週まで、(右)曝露開始直後と 40 週以降の
OPV アレイ 1 の I - V 特性

ら 2015 年 6 月にかけて I_{sc} の大幅減少と V_{oc} の減少がみられた。Burlingame らは、フラーレンを用いた OPV において光照射に伴う光二量化反応による I_{sc} の低下を報告している [43]。OPV の初期劣化はバーンイン効果と言われる報告例と同じような振る舞いであった [42]–[45] が、初期劣化の期間はこれらの報告よりも長かった。図 3.3(右)に示されるように、二次劣化では I_{sc} が曝露初期と同じように減少していたが、 V_{oc} 近傍の I - V 特性を見ると徐々に直列抵抗 (R_s) が増大していた。これらの劣化の振る舞いの違いから、初期劣化と二次劣化では異なる劣化機構が働いていると考えられる。急激な初期劣化と、緩やかな二次劣化の出力特性の変化は、Peters らによって報告されている典型的な OPV セルの劣化曲線 [41] と類似している。

次に、二次劣化中に見られた発電量の季節変動について述べる。図 3.3 に示すように、Monthly PR には季節変動がある。他の種類の太陽電池との比較のため、本研究で用いた屋外曝露サイトにて試験中の、単結晶 Si(mono-c-Si)太陽電池アレイと a-Si:H 太陽電池アレイの Monthly PR の変化を図 3.5 に示す。mono-c-Si 太陽電池では P_{max} の温度係数が負であるため、PR は夏に低く冬に高い。この PR に温度係数による補正を適用すると季節変動はなくなる。一方で、a-Si:H 太陽電池でも P_{max} の温度係数は負であるが、その Monthly PR は夏に高く冬に低い、つまり mono-c-Si 太陽電池アレイとは反対の振る舞いを示す。これは、熱アニールによって出力が回復する光劣化の一つである Staebler–Wronski 効果に

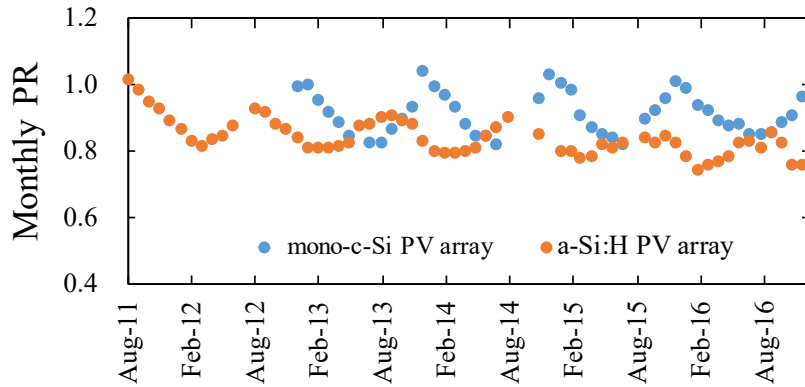


図 3.5 mono-c-Si 太陽電池アレイおよび
s-Si:H 太陽電池アレイの Monthly PR の経時変化

よるものであり、光劣化によって低下した出力が夏季の高温曝露によって回復するため、温度係数による補正後でも Monthly PR は季節変動する。実際に、架台より取り外し標準試験条件下における室内測定を行ったところ a-Si:H 太陽電池モジュールの P_{\max} は冬よりも夏に高いことが確認されている[18]。もし OPV に劣化だけでなく回復が起こる場合、a-Si:H 太陽電池のような発電性能の季節変動が予想される。研究対象である OPV アレイの Monthly PR の振る舞いは、a-Si:H 太陽電池アレイと同様の傾向を示しているが、まずはデバイスの温度特性を調査する必要がある。太陽電池アレイの温度係数は、Monthly PR とモジュール裏面温度の相関から求められるが、試験 OPV アレイの温度による出力変化よりも経年劣化が大きく、温度係数の算出ができなかった。Monthly PR の季節変動が消失するためには、図 3.6 に示すよう、OPV の温度係数 γ は $0.60\%/^{\circ}\text{C}$ と大きな値をとらな

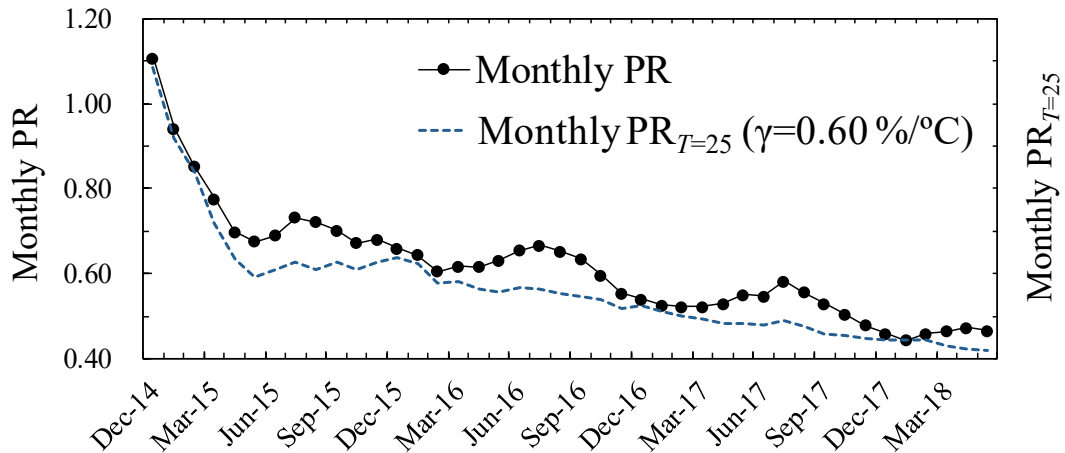


図 3.6 温度係数を $0.60\%/^{\circ}\text{C}$ と仮定した場合の OPV アレイ 1 の $\text{PR}_{T=25}$

くはならず、Bristow と Kettle の報告にある 0.07 %/K[52] よりもかなり大きい。出力の温度依存性だけでなく、発電性能が向上するような他の影響も考える必要がある。

さらに、季節変動を詳細に分析するために、夏と冬の OPV アレイ 1 の I - V 特性を比較した。図 3.7 (a) ~ 3.7 (g) は、順に屋外曝露 1 年目の冬、1 年目の夏、2 年目の冬、2 年目の夏、3 年目の冬、3 年目の夏、4 年目の冬の OPV アレイ 1 の斜面全天日射強度が 1000 W/m² 程度における I - V 特性を実線で示している。図中の破線は、実線で示した I - V 特性の半年前の季節の I - V 特性を指す。図 3.7 より R_s に季節変動がみられることがわかる。初期劣化の時期に相当する、曝露を開始した冬 [図 3.7 (a)] から、1 年目の夏 [図 3.7 (b)] の間には R_s の変動はない。しかし、曝露 2 年目の冬 [図 3.7 (c)] は 1 年目の夏に比べ R_s の増大がみられた。対照的に、図 3.7 (d) にみられるように、2 年目の冬から 2 年目の夏にかけては R_s の変化はなかった。冬から次の夏にかけて変化がなく、夏から次の冬までに R_s が増大するこの傾向は、曝露 3 年目にも観察され、二次劣化中に共通した現象だと考えられる。メカニズムの解明には至っていないが、OPV モジュールの出力が熱アニールによって回復できる報告がある [53]–[55]。Kawano と Adachi は OPV セルにおいて、光劣化によって低下した FF と V_{oc} が、40~150°C の範囲内の熱アニーリングにより回復したと報告している [54]。夏の間、屋外の OPV モジュールの温度は約 20~60°C の範囲内であることを考慮すると、実使用下にて OPV モジュールの出力が熱アニールによって回復する可能性は十分にある。また、Bhattacharya らは光照射によって、可逆的に回復しうる欠陥が光活性層の界面に生成することと、活性層のポリマー主鎖を破壊する酸化のような不可逆劣化が同時に発生していると報告している [55]。さらに、Bhattacharya らは可逆的な光誘起欠陥が生成されない層にとって、熱アニールが劣化につながる可能性を述べており、熱に対して回復と劣化という反対の現象が同時に起きていることを示唆している [55]。

OPV アレイの屋外計測の結果から、OPV には光劣化と熱アニーリングによる回復が同時に発生する可能性が示唆された。屋外環境では日射照度とモジュール温度は強い相関があり、日射照度が高いときはモジュール温度も上昇する。累積日射量に対応して光劣化が増加すると同時に、OPV モジュールの温度が上昇し出力が回復する、劣化と熱アニーリングによる回復のつり合いによって発電性能が季節変動する可能性がある。ただし、本研究ではスペクトルの季節変動を考慮していない。OPV の相対分光感度が 350~750 nm と短波

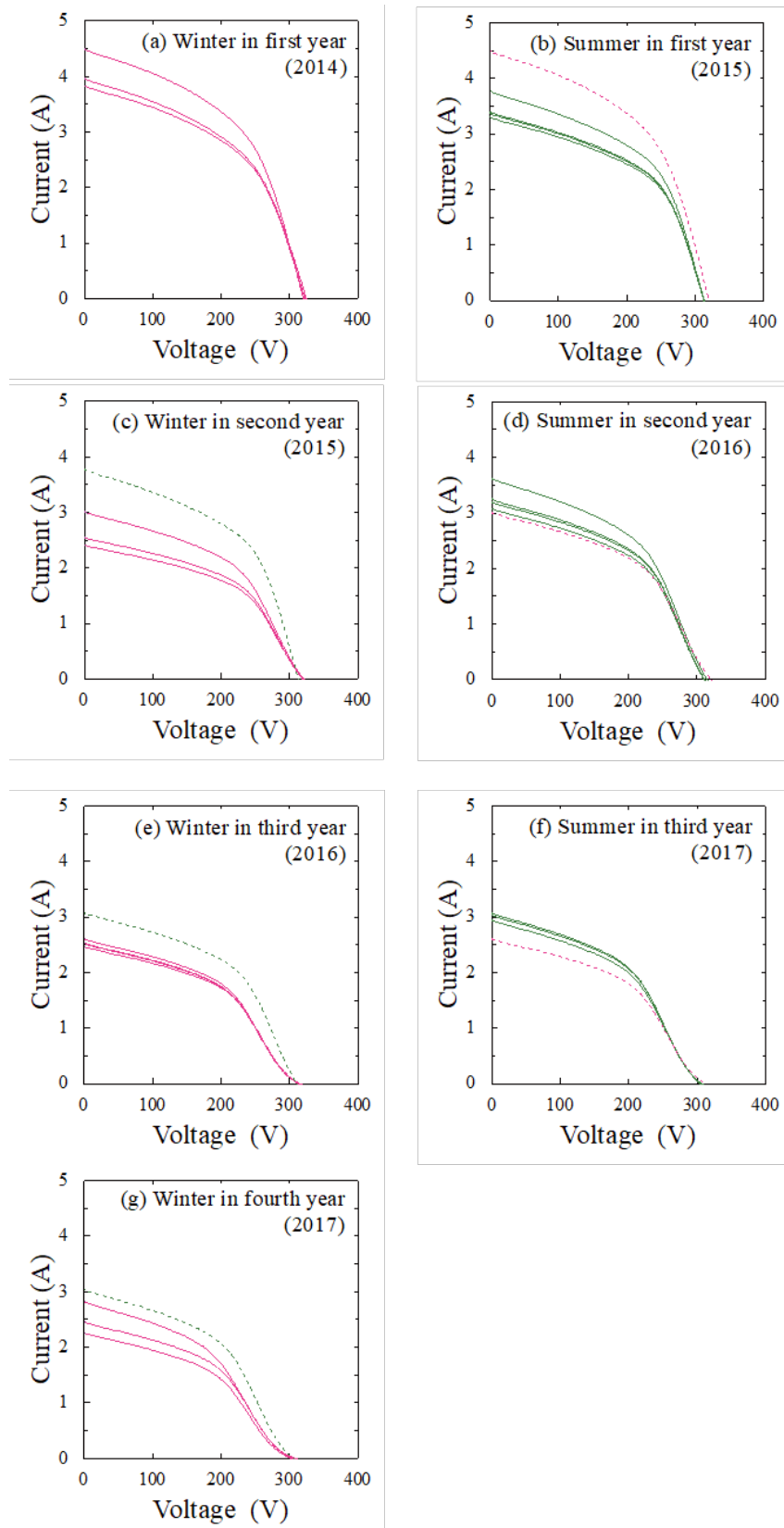


図 3.7 (a), (c), (e), (g) 冬季および (b), (d), (f) 夏季の日射照度約 1000 W/m^2 における OPV アレイの I - V 特性

長に偏っていることを考えると、太陽高度が高くなる夏季には相対的に屋外光の短波長成分が大きくなるため、夏季の発電量が増加すると考えられる。本研究では、発電量の季節変動をもたらす要因のうち、まず熱アニールの影響を調査することとし、今後の課題として日射スペクトルの影響を検討する。3.1 節での検証では OPV アレイの温度係数および OPV モジュールの熱回復について明らかにすることが困難であったため、3.2 節にてその検証結果について述べる。

3.1.3-3 OPV モジュールの室内計測

OPV モジュールの出力特性の経年変化を精密に調査するため、2016 年 1 月、2016 年 11 月、2017 年 12 月の計 3 回、標準試験条件下の室内測定を実施した。図 3.8 は、アレイ 1 を構成している 16 枚の OPV モジュールについて、メーカーより提供された出荷値で規格化した P_{\max} の経年変化を、各モジュールごとに示している。OPV アレイは、直列に接続されたモジュール 4 枚からなる一つのストリングを 4 つ並列に接続して構成されており、

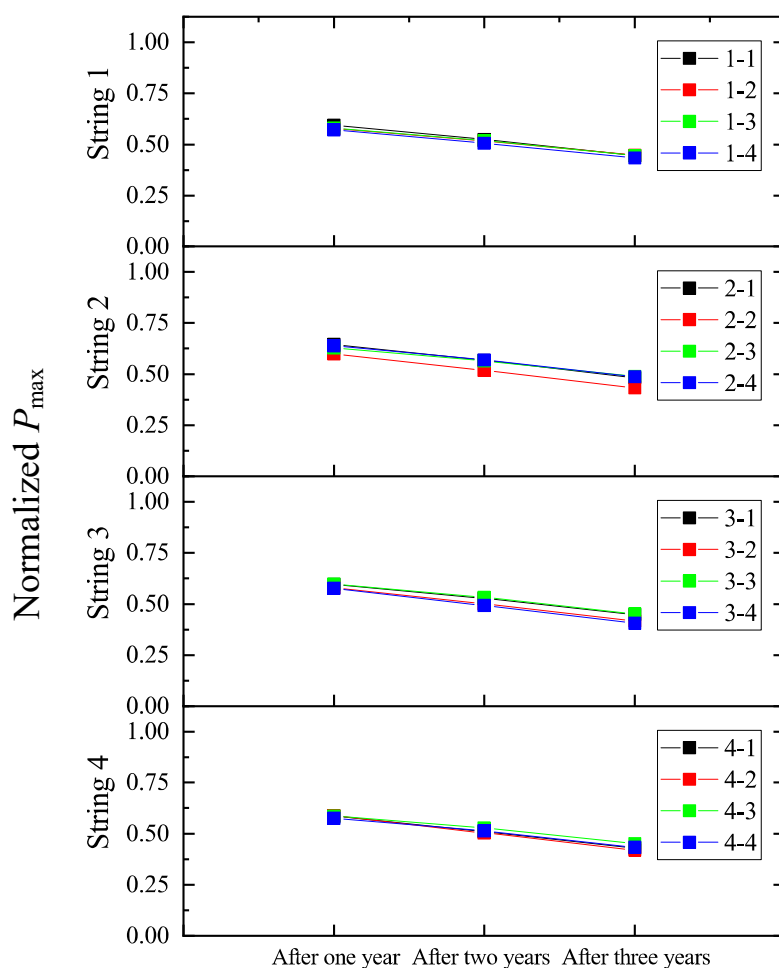


図 3.8 アレイ 1 を構成している各 OPV モジュールの室内測定における P_{\max} の経時変化

各ストリングにおいて、モジュール番号が最小のものは対地電位が高いモジュールを表している。図 3.8 に示しているように、屋外曝露開始 1 年で各 OPV モジュールは P_{\max} が大きく低下したが、OPV モジュールの劣化程度は一様で、深刻な劣化を伴う特定のモジュールは見られなかった。太陽電池の中には、電圧誘起劣化 (Potential induced degradation: PID) というシステム起因の劣化を示すものが存在しているが、本研究の範囲では OPV の出力変動はアレイ構成と対地電位に依存しないことがわかった。

図 3.9 は、2016 年 1 月、2016 年 11 月、2017 年 12 月におけるモジュール 1-1 の標準試験条件下で得られた I - V 特性を示している。 I - V 特性は R_s 増大により S 字型の傾向を示し、 I_{sc} も V_{oc} も毎年同じ程度の劣化が進んでいる。経年変化の振る舞いは PR によって示された OPV アレイの劣化と類似しており、PR の経年変化はアレイなどのシステムロスに関係なく OPV モジュールの経年劣化を反映していると言えるだろう。Mateker と McGehee によると、OPV モジュールの経年劣化要因は、光照射、温度、大気 (酸素と水)、および電気バイアスと述べられており、これらの劣化要因の組み合わせが屋外での発電量低下につながる [40]。本研究で観察された発電量の振る舞いの原因について過去の報告事例から考察する。初期劣化では、主に光照射によってフラーレン関連素材の構造が変化することで、 I_{sc} が低下し発電性能が急激に低下したと考えている。光二量化による変化は、指数関数的に I_{sc} が低下すると言われており [43]、劣化の振る舞いが本研究で得られた結果と似ている。二次劣化では、この光二量化による劣化に加え、さらに R_s の増加や V_{oc} の低下から、受光面側のバリアフィルムからの酸素の侵入や水の浸入による金属電極の酸化や

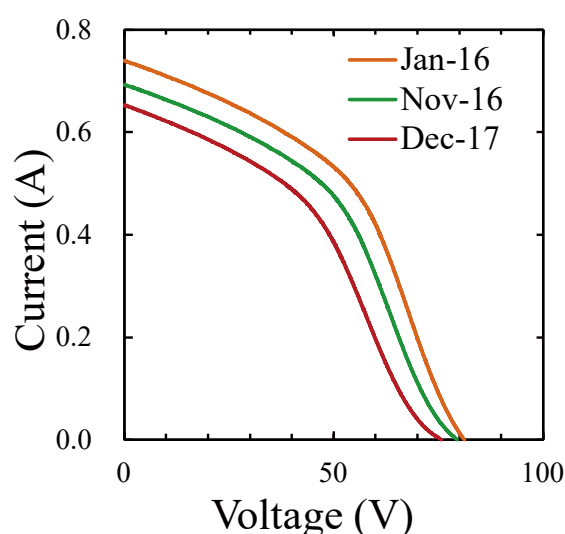


図 3.9 曝露開始 1 年目、2 年目、3 年目の OPV モジュール 1-1 の室内測定による I - V 特性

有機素材の酸化が徐々に進行しているものと考えている。端部からの水の浸入によって OPV モジュールの劣化が一気に進み故障する報告が多々あるなか、試験 OPV モジュールは端部から発電層まで距離をとり、ガラス封止でないにもかかわらず、約 3 年半の屋外曝露を経ても発電性能を有していた。

3. 1. 3-4 光照射と暗所保管による発電性能の変化

本研究では、OPV アレイの曝露開始時に、曝露されたものと同じ製造ロットの OPV モジュールをコントロールとして室温暗室にて保管している。劣化品と未劣化品の比較を行うため、OPV アレイの屋外曝露開始から 1 年後、屋外曝露していた OPV モジュールの測定と併せて曝露履歴のないコントロールモジュールも標準試験条件下での測定を行った。図 3. 10 に示すように、屋外曝露 1 年を経た OPV モジュールは I_{sc} が低下し、初期劣化を受けたことが分かる。一方、曝露による劣化がないはずのコントロールモジュールにおいては、 I_{sc} の値が高いものの R_s が大きく、 I - V 特性は S 字形状を強く示していた。パルス型ソーラシミュレータの測定では、モジュール毎に 5 試行計測を行っているが、図 3. 11 に示すように、ほとんどの OPV モジュールにおいて、パルス光照射回数に応じて出力がわずかながら増加する傾向があった。CIGS 太陽電池モジュールなどで見られる光照射効果での出力増加が OPV にも見られるのではないかと考え、確認のため、約 1 年間暗所保管していたコントロールモジュールに対して光照射試験を行った。光源は屋外光を用い、時間経過（3.5、6.0、8.5 時間）ごとに室内に取り込んで標準試験条件下の I - V 特性を取得し

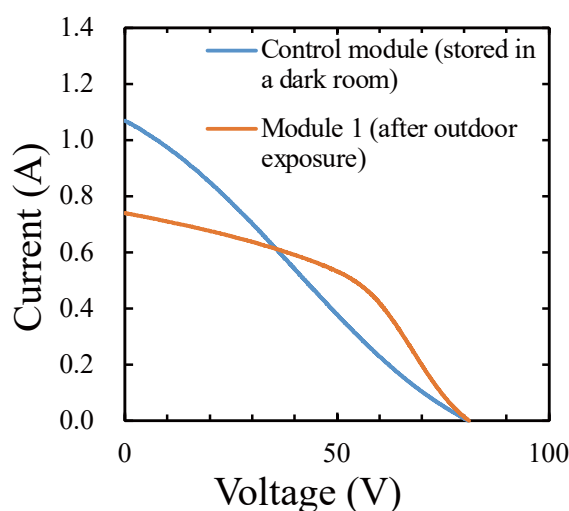


図 3. 10 暗所保管されていた OPV モジュールと屋外曝露されていた OPV モジュールの室内測定による I - V 特性

た。結果を図 3.12 (左) に示す。 光照射 3.5 時間で I_{sc} の増加と FF の改善が見られ、その後光照射が累計 8.5 時間までの I - V 特性には変化が見られず、極めて短時間で変化が飽和することがわかった。光照射累積時間に対して V_{oc} にほとんど変化はなく、8.5 時間で I_{sc} は初期値比 1.17 で FF は初期値比 1.96 となり、これに起因して P_{max} は初期値比 2.3 となり、OPV モジュールの光照射効果を確認した。次に、光照射効果で出力が上昇したコントロールモジュールを再び暗所保管して、経過時間に対する発電特性の変化を観察した。図 3.12 (右) に、経過時間に対する P_{max} 、 I_{sc} 、 V_{oc} 、および FF の変動を示す。横軸の経過時間は、暗所保管のみならず出力上昇が飽和した 8.5 時間の光照射時間も含む。いったん出力上昇が飽和した OPV モジュールにおいて、暗所保管を続けると出力が低下することがわかった。出力低下は光照射効果に比べると、かなり長い時定数を有する。低下しているパラメータは I_{sc} と FF で、これは OPV モジュールの出力の増加が光照射によるものであ

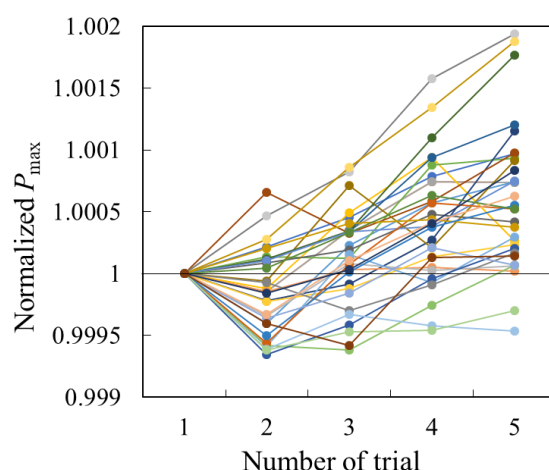


図 3.11 測定回数に対する規格化 P_{max} の変化

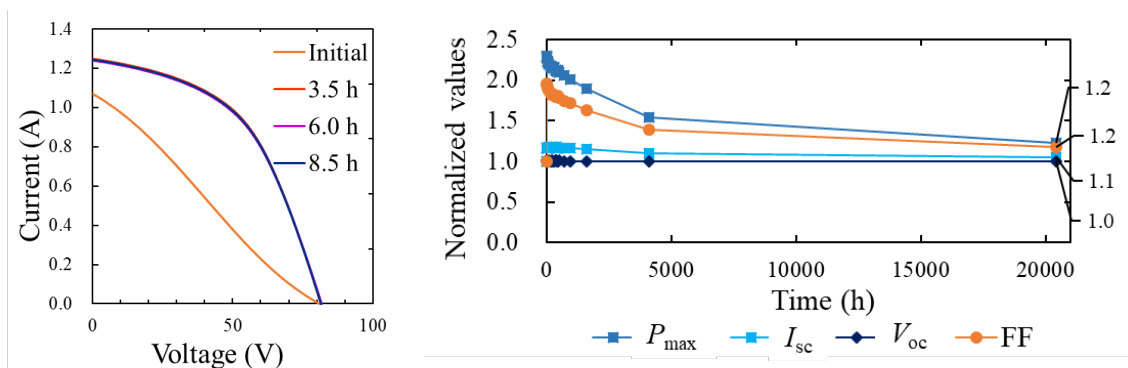


図 3.12 コントロール OPV モジュールの (左) 光照射時間による I - V 特性の変化、
(右) 暗所保管下におけるパラメータの経時変化

ることを裏付けており、実際に暗所保管で出力が低下した OPV モジュールに再び光照射をすると性能が上がる可逆変化を示す。いくつかの研究では、ZnO 層を用いた OPV モジュールにおいて、光照射により ZnO の導電率が増加することが示されている [48], [49], [56], [57]。そこで提案されているメカニズムは、UV 励起もしくは順方向バイアスによるバンドベンディングで正孔を受け取った ZnO の酸素が離脱し、電気伝導に寄与する酸素空孔が増加すると述べられている。試験 OPV モジュールの素材は明らかにされていないが、フレキシブルであり曲げ耐性が求められていることを鑑みると、透明導電膜は ITO ではなく ZnO が用いられている可能性がある。光照射と暗所保管による可逆的变化は OPV 材料の光ドーピングに起因する可能性があり、現在 OPV モジュールに使用される材料の調査を検討している。

さらに、屋外測定と室内測定の結果も比較した。表 3. 1 は、2016 年 1 月、2016 年 11 月、2017 年 12 月に二つの OPV アレイについて、室内測定から得られた規格化 P_{\max} と屋外測定から得られた Monthly PR を記しているが、どの年も Monthly PR のほうが高い。また、2016 年 1 月の Monthly PR と規格化 P_{\max} の差は 0.04~0.05 で、他の値よりも大きかった。2016 年 11 月及び 2017 年 12 月の室内測定では、屋外の架台から取り外し洗浄後、すぐに室内測定を実施したのに対し、2016 年 1 月は屋外架台から取り外し室内測定まで 4 日間暗所に OPV モジュールを保管していたことに起因している可能性がある。図 3. 12(右)から、光照射効果が飽和したコントロールモジュールは、95.5 時間の暗所保管で P_{\max} が 4%低下していた。極端な高緯度地域でない限り、屋外実使用下では毎日日照時間があるため、OPV の長期発電量評価においては、光照射効果による出力上昇は実使用において考慮しなくともよい。しかし、室内評価においてはモジュールの保管条件と期間を考慮する必要がある。

表 3. 1 室内測定値と Monthly PR の比較

Date (month-year)	Array 1		Array 2	
	Indoors	Outdoors	Indoors	Outdoors
	Normalized P_{\max}	Monthly PR	Normalized P_{\max}	Monthly PR
Jan-2016	0.60	0.64	0.61	0.66
Nov-2016	0.52	0.55	0.54	0.57
Dec-2017	0.44	0.46	-	0.48

3.1.4 実環境下における発電量の経年変化および季節変動のまとめ

本節では、実用化に向けて研究開発されている OPV について、セルやミニモジュールのようなラボベースでなく、ロールツーロールプロセスによって作製された、セミコンシャル OPV モジュールを用いて、実使用下での発電量の調査を行った。OPV モジュールは、3 年以上の長期にわたって発電設備として系統連系し、結晶 Si など実用化されて久しい他の種類の太陽電池と同じ方法によって評価された。単に発電量の調査だけでなく、経年変化を詳細に調査するため、標準試験条件下での室内測定をおこなった。その結果、OPV アレイの Monthly PR には、(1) 急速な初期劣化、(2) 緩やかな二次劣化、(3) 季節変動という 3 つの特徴が示された。初期劣化、および二次劣化の振る舞いはこれまで報告があったが、発電量の季節変動については著者の知る限りでは報告がない。OPV モジュールの出力特性の変化は、これまで報告された光劣化と酸素の侵入や水の浸入だけでなく、熱アニールと光照射効果の影響を受けることが分かった。実使用における OPV アレイの出力は、熱アニールにより季節変動する。一方、光照射効果と暗所保管による出力低下は可逆変化であり、光照射効果による出力上昇飽和に比べて暗所保管による出力低下は時定数が長い。ため、屋外発電量の評価において大きな影響はないことが分かった。ただし、室内測定のみの評価においては、その保管状況を鑑み安定化処理する必要がある。室内測定は、環境統制された状態のため再現性が高く精密な相対評価が可能であり、屋外測定は実際の動作における発電の挙動を観察できる。OPV のような準安定性を示す太陽電池の積算発電量を評価するには、室内と屋外の両方の測定が必要である。本章で示された、劣化挙動や熱アニールによる回復、光照射効果のメカニズム調査のために、素材の情報を得る分析手法を今後の課題として検討している。本節では温度係数を明確にできず、熱によってもたらされる OPV アレイの発電量の季節変動の詳細を調査できなかったため、次節にて検討する。

3.2 OPV の熱回復が発電量に与える影響

OPV の積算発電量を評価するために、実使用下における発電性能の変化を調査する。前節で述べたように、系統連系された OPV アレイの発電量に、三つの特徴的な変化がみられた。一つ目は急激な初期劣化、二つ目は初期劣化後の緩やかな二次劣化、そして三つ目に二次劣化中の季節変動であった。この季節変動をもたらし環境要因を検討するために、本節では熱履歴に焦点を当て実験を行った。

3.2.1 研究目的

当研究サイトの OPV モジュールは 2014 年 12 月より系統連系されており、3.1 節では約 3 年半の曝露期間における OPV アレイの発電量の解析から、これまでセルやミニモジュールで確認されてきた急激な初期劣化と、緩やかな二次劣化[40]–[42], [58]を確認した。さらに PR の経時変化から、実使用下の OPV アレイの発電量が季節変動を示すことを、新たに発見した。本節では、3.1 節にて詳細を検討できなかった OPV の温度係数、および発電量の季節変動要因について、2018 年 5 月以降も継続して取得している屋外曝露のデータを追加し調査した。

OPV に影響を与える環境要因は、主に空気（水、酸素）、光、温度であり、OPV の各層に用いられるそれぞれの材料に対して影響を与える。例えば、水の浸入と酸素の侵入によって引き起こされる電極の腐食や有機材料の酸化は不可逆な劣化を示す[59]。また、光照射によって有機材料が酸化する[45]、光活性層の界面で電荷が蓄積するなどの光劣化の報告がある[54], [60], [61]。一方で劣化だけでなく、光劣化した OPV が熱アニーリングにより回復する報告もある[53]–[55], [62]。このように、OPV の劣化は不可逆変化と可逆変化の混合によって特徴付けられる。さらに、熱回復の報告もある温度環境については、光活性層のヘテロ接合に対してはストレスとなり巨視的相分離による劣化を引き起こすことも知られており[44], [63]、一つの環境がもたらす影響は、回復だけでなく劣化もある。OPV の複雑な環境に対する反応のうち、発電性能の可逆変化が、OPV アレイの発電量の季節変動をもたらすのではないかと考えた。

発電量の指標である PR が季節変動する要因として考えられるのは、デバイスの性能の温度依存性、季節に依存したスペクトル変動、光照射効果による出力増加、および熱アニーリングによる回復である。そのうち光照射効果については、3.1 節にて光照射によって P_{\max} がきわめて短時間で増加し、その後の暗所保管では長い時定数で P_{\max} が減少する可逆変化を確認した。OPV モジュールの室内評価時には、光に対する安定性を考慮する必要があるが、時定数を考えると出力の季節依存性の要因とは考えられない。次に、PR の季節変動に対する温度の影響も考慮する必要がある。太陽電池デバイスの性能は温度に依存するため、その温度係数は国際標準規格にて定義されている[24]。 P_{\max} の温度係数は、結晶シリコン太陽電池では $\gamma = -0.4 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$ [32], [64], [65]、および a-Si:H 太陽電池の場合 $\gamma = -0.2 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$ [34], [66]程度と報告されている。さらに、OPV 太陽電池デバイスへの温度環境の影響は温度係数だけでなく、その温度履歴も考えなくてはならない。3.1.3-2 項にて述べ

ているように熱回復の特徴を有する a-Si:H 太陽電池は、温度係数が負にもかかわらず気温の高い夏に性能が改善され発電量が増加する。報告されている OPV セルの熱回復の温度環境は、85 °Cや 100 °Cのように実際の動作範囲よりも高温である。この節では、OPV モジュールの二次劣化中にみられる発電量の季節変動の原因を、温度に焦点を絞り実験を行った結果について述べる。本研究では、スペクトルの季節変動は今後の課題として検討しており、まずは環境条件を統制可能な室内試験にて熱回復の有無を調査した。この研究が、実際の動作温度での熱アニーリングによって、セミコマーシャル OPV モジュールの回復を観察した初めての報告になると考えられる。

3.2.2 実験方法

恒温槽を用いて OPV モジュールの温度環境を一定に保ち、設定温度別に影響を調査する。一定温度に保持された OPV モジュールを恒温槽から取り出し、ソーラシミュレータによる $I-V$ 特性の取得後、再び恒温槽へ戻す。これを繰り返すことにより、OPV モジュールの温度履歴によってもたらされる経時変化を観察した。さらに、発電量の指標である PR を温度補正した $PR_{T=25}$ を求めるために、モジュール測定温度が安定化処理後の温度から室温に変化する範囲の $I-V$ 特性とそれに対応するモジュール裏面温度の取得を行い、温度係数を求めた。実使用範囲での温度環境にて、性能の変化がデバイスの温度特性のみで決定づけられるのならば、 $PR_{T=25}$ は季節変動を示さないと考えた。

恒温槽へ投入する OPV モジュールは、2014 年 12 月より系統連系されていた OPV アレイの構成から 1 スtring、つまり直列に接続されていた 4 枚を取り外して使用した。取り外しは、初期劣化が飽和し二次劣化中の 2018 年 6 月に行い、その後、室温暗所にて 5 か月保管した。図 3.13 は、OPV モジュールが屋外曝露されていた時の、ある晴れた夏

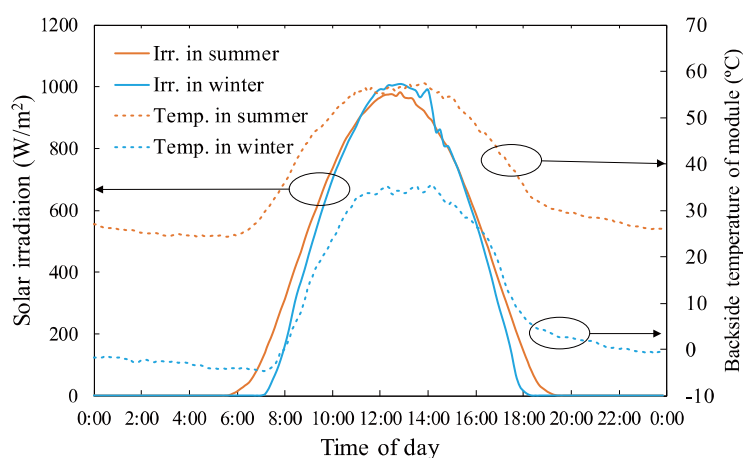


図 3.13 夏季と冬季の晴天日における日射照度および気温

(2016/8/10) と冬 (2017/2/15) の日射量とモジュール裏面温度を示している。OPV の実際の晴天日における動作温度は、夏の昼間は約 60 °C、冬の昼間は約 30 °C であった。これら 4 枚の OPV モジュール A-D について、実際の動作温度を参考に恒温槽での保持温度をそれぞれ -10、10、30、および 60 °C とした。前節にて示したように、特別に故障した OPV モジュールはなく、本実験が開始された時点の、出荷値による規格化 P_{\max} の平均は 0.43 であった。それぞれのモジュールについて、恒温槽での保持温度および、これまでの履歴として系統連系開始以降の室内での標準試験条件における測定結果を表 3.2 に合わせて示す。

表 3.2 試験 OPV モジュールの曝露開始からの室内測定値と
恒温槽を用いた一定保持温度

	Holding temperature	Shipment value	Outdoor exposure for one year	Outdoor exposure for two years	Outdoor exposure for three years	Dark room storage at room temperature for five months
Module A	-10°C	45.0 <1.00>	27.5 <0.61>	23.9 <0.53>	19.5 <0.43>	18.9 <0.42>
Module B	10°C	45.8 <1.00>	27.3 <0.60>	24.0 <0.52>	19.7 <0.43>	18.8 <0.41>
Module C	30°C	45.5 <1.00>	28.3 <0.62>	25.6 <0.56>	21.2 <0.47>	20.7 <0.46>
Module D	60°C	46.0 <1.00>	27.2 <0.59>	24.5 <0.53>	20.2 <0.44>	19.6 <0.43>

P_{\max} (W) <Ratio to shipment value>

OPV モジュールは、恒温槽（SMS-2S、エスペック社製）を使用して一定温度に保持された。保持温度における出力特性の経時変化を観察するために、OPV モジュールは間欠的に恒温槽より取り出され、ソーラシミュレータを使用して測定した。ソーラシミュレータでの測定条件は、AM1.5 かつ 1000 W/m² であったが、測定温度については恒温槽から取り出した直後に測定を開始し、保持温度から室温までの複数の測定温度で I - V 特性を取得した。例えば、60 °C 保持温度条件のモジュール D は、恒温槽より取り出した直後の 60 °C 近い温度から、室温 25 °C へと変化する過程において、 I - V 特性を複数取得している。

また、屋外発電量を評価する指標である PR をデバイスの温度特性で補正するため、OPV モジュールを安定化処理したのち、温度係数 γ を求めるための測定を行った。温度係数 γ は、最小二乗法により測定温度と P_{\max} の相関から計算され、次式であらわされる。

$$\gamma = \left(\frac{\Delta P_{\max}}{P_{\max}(\text{STC})} / \Delta T \right) \quad (3.1)$$

ここで、 ΔT と ΔP_{\max} はそれぞれ、測定された任意のモジュール裏面温度と P_{\max} のデータセット間の差を示す。また、 $P_{\max(\text{STC})}$ は複数の室内測定値から最小二乗法で推定される標準試験条件での OPV モジュールの最大出力である。得られた温度係数 γ を 2.3.2 項に示した式 (2.3) に代入すると、照度補正だけでなく、温度補正された $\text{PR}_{T=25}$ が与えられる。

これらの方法によって、OPV アレイの発電量の季節変動が何に起因しているのかを検証するため、温度環境に焦点を当て、実際の動作範囲内の温度での熱回復および温度係数について調査検討した。

3.2.3 結果と考察

3.2.3-1 保持温度条件の比較

図 3.14 (a) ~ (d) は、測定温度に対する P_{\max} の経時変化を、それぞれ恒温槽での保持温度 (-10 、 10 、 30 、 60 $^{\circ}\text{C}$) 別に示している。保持温度が $-10 \sim 30$ $^{\circ}\text{C}$ では、温度一定

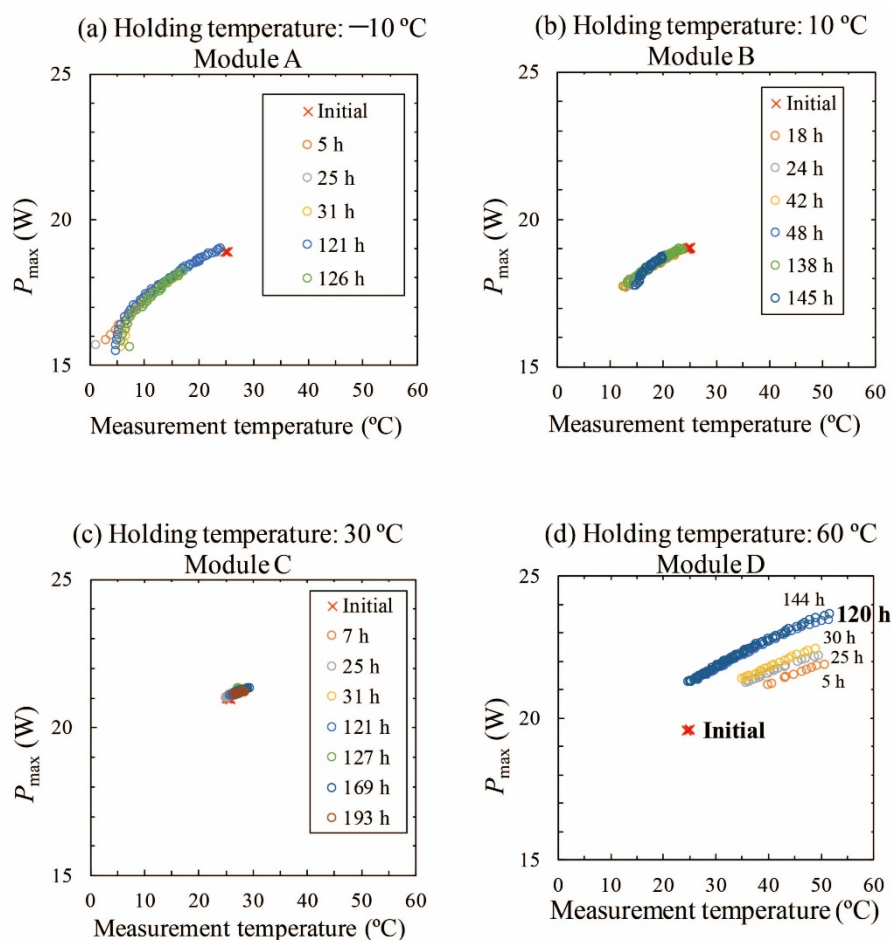


図 3.14 保持温度 (a) -10 $^{\circ}\text{C}$ (b) 10 $^{\circ}\text{C}$ (c) 30 $^{\circ}\text{C}$ (d) 60 $^{\circ}\text{C}$ における測定温度に対する P_{\max} の経時変化

に保持された時間に関係なく、 P_{\max} の測定温度依存性の経時変化はなかった。 対照的に、恒温槽での保持温度が 60°C の場合、各測定温度に対する P_{\max} は保持された時間に応じて増加した。温度 60°C にて 144 時間まで保持した結果、 P_{\max} の増加は遅くとも 120 時間で飽和し、試験直前と比較して 1.5 W（出荷値の 3.3%）増加した。図 3. 13 に示すように、屋外での OPV 裏面温度は、冬の日中と夏の夜間で 30°C 、夏の日中で 60°C であった。これらの結果は、熱回復が夏の日中に起こり、冬には起こらないことを示唆している。さらに、モジュール D の場合、室温に保たれているにもかかわらず、5 か月間の暗所保管により、 P_{\max} は 0.6 W 減少した（表 3. 2）。通常屋外では暗状態が 5 か月も続くことはなく、暗所保管によって引き起こされるこの P_{\max} 低下がないと考えられるため、熱回復による P_{\max} の増加は 1.5 W 以上になる可能性がある。

図 3. 15 に、モジュール D における測定温度に対する I_{sc} 、 V_{oc} 、FF の変化を 60°C 保持経過時間別に示した。保持温度 60°C のモジュール D の各パラメータの変化なら、 P_{\max} の増加が I_{sc} と V_{oc} の増加に起因することがわかる。参考文献[54]や[62]では、光劣化で低下

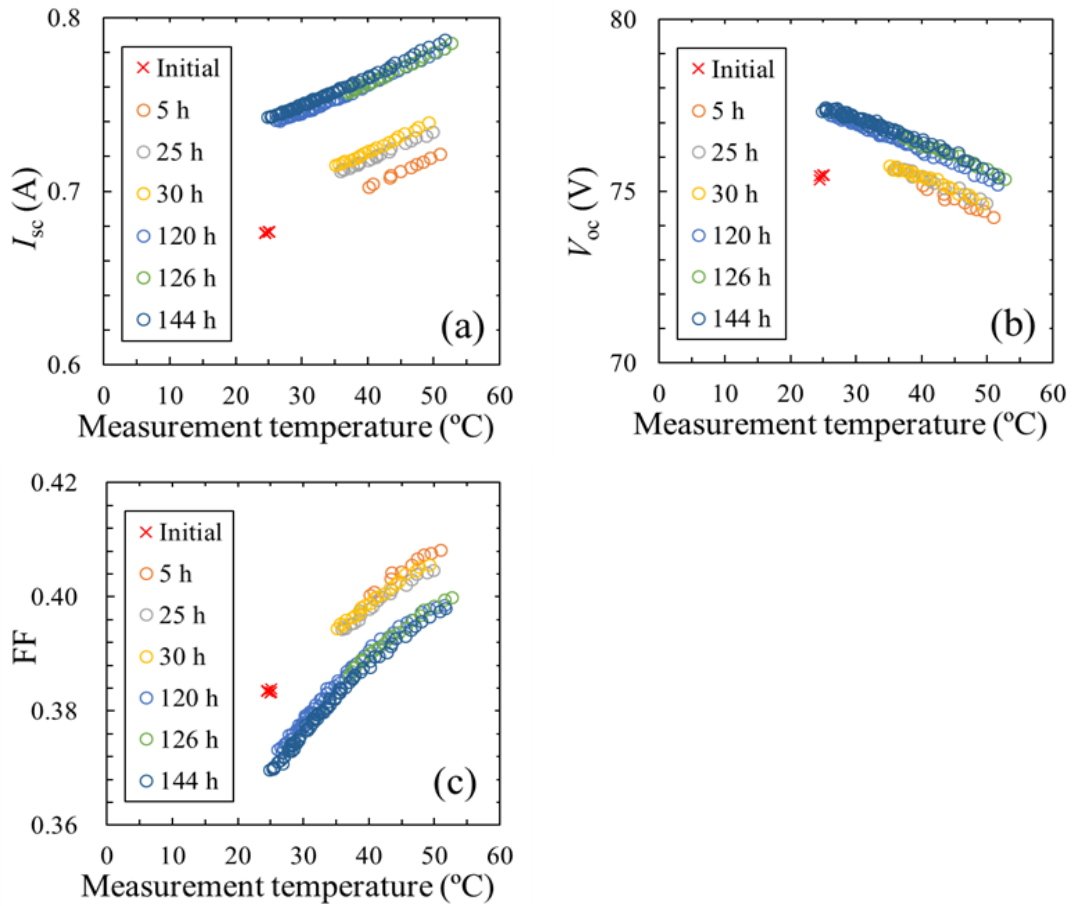


図 3. 15 モジュール D における測定温度に対する
(a) I_{sc} 、(b) V_{oc} 、(c) FF の経時変化

した FF が熱アニールにより回復していたが、本試験では FF の減少という異なる結果が示された。本研究で調査対象としている OPV モジュールは暗所で出力が低下することが確認されており、今回 FF の回復が見られなかったのは、暗所で熱アニールしたことが関係しているのではないかと考えている。測定に用いるソーラシミュレータは光源がパルスタイプであり、測定時の光により OPV モジュールは十分に安定化されないためである。よって、光劣化と熱回復の可逆的変化が、光活性層界面に蓄積する電荷によるという報告を否定しないと考えている[54], [62]。

3.2.3-2 OPV の温度係数

OPV モジュールにおいて、 I_{sc} は正の温度係数を、 V_{oc} は負の温度係数を示し、 P_{max} は正の温度係数を示した(図 3.14、3.15)。Bristow と Kettle は P_{max} の温度係数を $+0.007\ \%/K$ と報告しており[52]、正の温度係数という点において本研究の結果と一致した。有機半導体は van der Waals 力で凝集して分子性固体を形成しているため、局在化したエネルギー準位帯を持っており、外部電界を駆動力として準位間をホッピング移動するホッピング伝導モデルが知られている。熱エネルギーによりホッピング可能な準位に励起した電子が伝導に寄与し、 I_{sc} は正の温度係数を示していると考えている。より正確な温度係数を得るには、パルス型ソーラシミュレータを使用した測定の繰り返しでは、光照射に対する安定性が不十分である。屋外光を用いて安定化処理したモジュール B と D と、比較のため屋外曝露による劣化履歴がないモジュールの 3 枚について、温度係数算出のための室内測定を実施した。結果を図 3.16 に示す。破線は最小二乗法によって求められた回帰直線である。 P_{max} の温度係数は、モジュール B と D の双方とも $\gamma = 0.39\ \%/^{\circ}C$ であり、劣化履歴のないモジュールは $\gamma = 0.23\ \%/^{\circ}C$ であった。OPV では温度係数が劣化を経ることによって

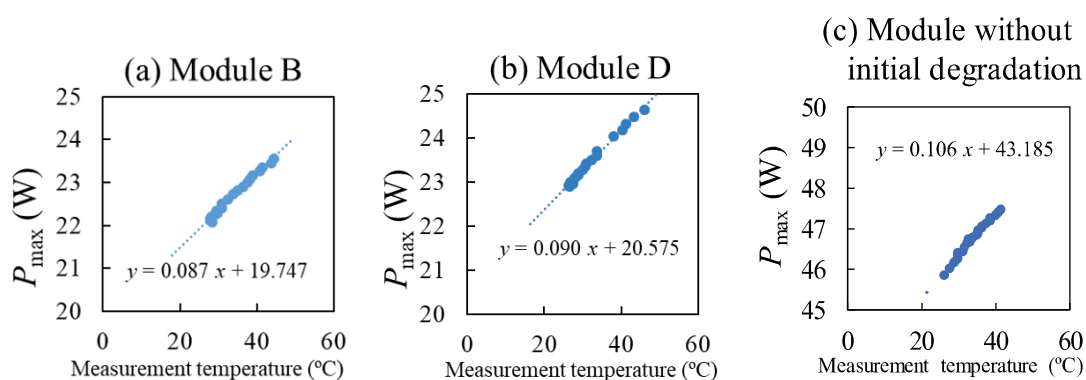


図 3.16 (a)、(b) 約 3 年半の屋外曝露履歴がある OPV モジュールと
(c) 初期劣化がない OPV モジュールにおける P_{max} の温度依存性

変化することが示唆され、積算発電量推定においてこの変化を考慮すべきことが分かった。この研究においては、二次劣化中の季節変動に焦点を当てているため、Monthly PR の温度補正には $\gamma = 0.39 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$ を用いる。結果を図 3. 17 に示す。図 3. 17 の紫色のプロットは標準試験条件下での室内測定値を示しており、これによると 2016 年 1 月を除き、室内測定値と $\text{Monthly PR}_{T=25}$ はほぼ一致した。本研究で得られた温度係数は、参考文献で報告された値[52]より大きかったが、 $\gamma = 0.39 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$ は妥当と考えられる。2016 年 1 月の室内測定値と $\text{Monthly PR}_{T=25}$ の差は、初期劣化が 2016 年 1 月までに飽和せずに、この時点では $\gamma = 0.39 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$ が妥当な温度係数でなかったことに起因する。

3. 2. 3-3 $\text{PR}_{T=25}$ の季節変動をもたらす要因

図 13. 17 の $\text{Monthly PR}_{T=25}$ が示すように、デバイスの温度特性を考慮しても夏季に発電量が増加する季節変動は消えなかった。季節で大きく変わる気象パラメータは、気温の他に積算日射量がある。この 2 つの変数を別々に考慮するため、図 13. 18 に積算日射量に対する $\text{Monthly PR}_{T=25}$ とモジュールの温度履歴を示した。熱回復が起こる温度は、恒温槽での温度保持試験から少なくとも 30°C 以上であることがわかったため、モジュールの温度履歴は、モジュール裏面温度が 30°C を超えた時間の月積算として表現されている。また、4 回にわたる標準試験条件での室内測定で得られた P_{\max} から、最小二乗近似で求めた回帰直線を推定 $\text{PR}_{T=25}$ とした。図 3. 13 に示したように、冬季のモジュール裏面温度は最大でも 30°C 程度であり、熱回復は起きない。よって、冬季に実施している室内測定によって得られた推定 $\text{PR}_{T=25}$ は、熱回復していない状態を推定した発電量であり、回帰直線の相

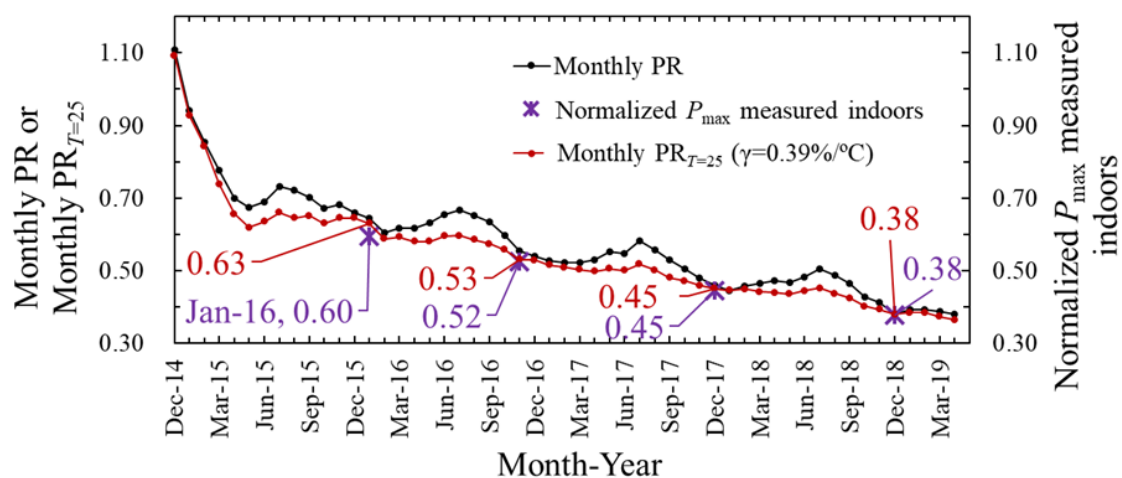


図 13. 17 OPV アレイの Monthly PR と $\text{Monthly PR}_{T=25}$ 、および室内測定値の比較

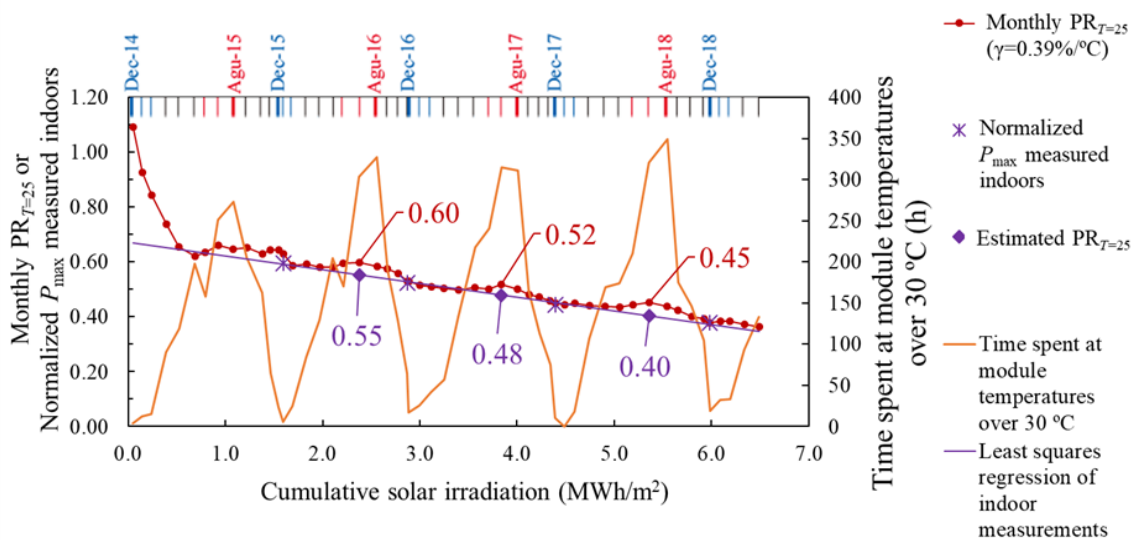


図 3.18 積算日射量に対する $\text{Monthly PR}_{T=25}$ の変化と温度履歴の関係

関係数は $R^2=1.00$ であることから、OPV の二次劣化は熱回復がなければ積算日射量に強く依存すると言える。この推定 $\text{PR}_{T=25}$ と $\text{Monthly PR}_{T=25}$ を比較すると、毎年 7 月に約 0.05（出荷値の 5%）と差が最も開き、恒温槽による温度保持試験でみられた 3.3% の熱回復による増加よりも大きかった。さらに、モジュール裏面温度が 30°C を超えた時間が月積算 100～150 時間を超えると、 $\text{Monthly PR}_{T=25}$ は推定 $\text{PR}_{T=25}$ よりも高くなることから、熱回復による性能の向上は、光劣化による劣化を上回ると考えられる。このように、夏季の発電量の増加は、モジュールの温度履歴に依存し、モジュール裏面温度が高温になる時間の増減と関連していた。

恒温槽を用いた保持温度の比較および屋外発電量の解析から、実際の運用下における OPV アレイ発電量の季節変動は熱回復に起因していることが明らかになった。二次劣化中の OPV の振る舞いは、累積日射量に比例して発電量が減少する光劣化と、温度履歴に依存して発電量が回復する熱回復が同時に発生することが示された。OPV は光劣化という弱点を抱えているが、実使用では日射強度の増加に伴いモジュールの温度が上昇するため、光照射下にあっても高温で性能が回復する。さらに熱回復だけでなく、OPV は正の温度係数を持つため、高温環境での使用が適している太陽電池である。

3.2.4 OPV の熱回復が発電量に与える影響のまとめ

3.2 節では、OPV アレイの発電量の季節変動について温度に焦点を当て、初期劣化した OPV モジュールを使用して熱履歴に対する発電量の挙動を調査した。 30°C 以下に温度を保持した OPV モジュールでは熱回復が見られなかったが、 60°C に温度を保持したモ

ジュールでは熱回復が発生し、 P_{\max} の増加は 120 時間以内に飽和した。さらに、OPV の P_{\max} の温度係数が、二次劣化中のモジュールと劣化履歴がないモジュールで異なり、実運用下の OPV アレイの温度係数が屋外曝露により変化した可能性が示唆された。二次劣化中のモジュールから計算された $\gamma = 0.39 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$ を使用して Monthly PR を補正したが、発電量の季節変動は消えなかった。恒温槽を使用した室内試験から示されたように、OPV の発電電力の季節変動は、デバイスの温度特性だけでなく熱回復によっても引き起こされることが明らかになった。実際の動作で安定化された OPV は、正の温度係数を持ち、30～60 °C の範囲で回復するため、高温環境での動作に適していると判断される。

標準試験条件下の測定から算出された推定 $\text{PR}_{T=25}$ と、実運用下の発電量である Monthly $\text{PR}_{T=25}$ の夏季の差は 0.05 であり、発電量の評価において熱回復が与える影響は小さくない。また、公称値として公表されている温度係数は、算出方法の規格から劣化のない状態での値であることが予測されるため、積算発電量評価の際に注意が必要である。初期劣化は長くとも 1 年程度で飽和するとみられるが、低下が大きいため P_{\max} の公称値は初期劣化後の値が望ましい。

第4章 結晶シリコン裏面パッシベーション太陽電池の発電量及び準安定性調査

近年、SHJ 太陽電池、IBC 太陽電池、PERC 太陽電池などの高効率結晶 Si 太陽電池が研究開発を通じて商業化されている。PERC 太陽電池の製造プロセスは、Al-BSF 太陽電池の製造プロセスと似ており[67]、大規模な設備の追加投入なく高効率化が達成できるため、市場シェアを大きく伸ばしている[68]。本章では、すでに市場に流通しているが、新しい技術のため実際に長期曝露による影響は未知である PERC 太陽電池の発電量について、準安定性を検討する。

4.1 研究目的

Al-BSF では p 型結晶 Si 基板の裏面に Al ペーストを焼成し、Al が拡散された p⁺層が形成されている。基板の p 層と p⁺層のドーパントの濃度差によって界面に電位差をもたらし、光生成キャリアの裏面電極付近の再結合を防いでいる。PERC 太陽電池は、Si 基板と Al 電極界面で起こる再結合損失を、パッシベーション膜 (SiN_x, SiO_x, AlO_x など) を導入することにより低減したものである。パッシベーション膜は絶縁体のため、裏面の金属電極とはポイントコンタクトをとっている。Al-BSF 太陽電池と比較して、PERC 太陽電池は、裏面再結合が低減するため長波長でのスペクトル応答が改善されている[69]。

PERC 太陽電池は、光誘起劣化 (Light induced degradation: LID) および光誘起再生 (light induced regeneration: LIR) による準安定性が報告されている。結晶シリコンのように安定性が高い基板を用いている Al-BSF 太陽電池においても LID が示されていたが、PERC 太陽電池の LID による効率損失は、Al-BSF 太陽電池よりもかなり大きい[70]。PERC 太陽電池における LID のメカニズムは十分に明らかにされておらず、様々な報告がなされている。光照射によって生成されるキャリアに注目し、キャリア誘起劣化 (Carrier induced degradation: CID) として報告され[71]、暗所での熱アニーリング条件下のキャリア注入によっても劣化が確認されている[72]。このように、光だけでなく高温状態でも劣化が加速することから LeTID (Light and elevated temperature induced degradation) とも言われている。LeTID のメカニズムを明らかにするために、光強度、温度、および電流注入の条件を変えて、加速 LeTID 試験条件も検討されているが[71], [72]、加速試験は劣化

メカニズムの調査に役立つものの、実際の使用による経年劣化と必ず同じ現象を引き起こすとは限らない[46]。既に市場で普及している PERC 太陽電池について、実環境における長期信頼性の知見は多くなく、実際の使用環境における調査が必要である。

Al-BSF 太陽電池の LID は、Cz 法で作製された p 型結晶 Si において、B-O 複合欠陥による再結合中心の形成によって引き起こされる報告がある[73]–[75]。Cz 法で作製された Si インゴットには、ドーパントとして添加された B だけでなく、坩堝から C や O が混入する。O は Si の置換型不純物 B と結合して、キャリアをトラップする B-O 複合欠陥を形成する。また、Si 結晶中に拡散した重金属もバルク欠陥を形成するが、商用太陽電池セルの金属汚染は、製造プロセスでのゲッタリングとエッチングによって除去される[74]。一方で製造方法が似ていると言っても、PERC の LID は、B でなく Ga ドープのウェハ、または n 型ウェハでも発生が確認されている[76], [77]。さらに、多結晶 Si PERC 太陽電池セルにおいて、O 濃度と劣化率は相関がないという報告もある[72]。加えて、同じ Cz 法 p 型 Si ウェハを使用した場合でも、PERC 太陽電池セルと Al-BSF 太陽電池セルの劣化率は異なる。これらのことから、PERC 太陽電池の LID は、B-O 複合欠陥のみに起因するとは考えられない。

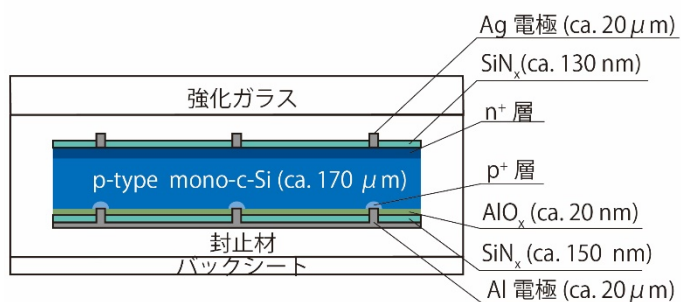
最近の研究において、LeTID が H の振る舞いと関連していると報告されている[71], [77]–[79]。参考文献[78]では、プラズマ化学気相成長によって作製された SiN_x 膜中の H の量と、CID によって引き起こされる欠陥密度は相関すること、さらに CID の挙動は PERC 太陽電池セルのピーク焼成温度に関係していることが示された。LID 低減のための焼成プロセスの適切な温度は 598°C と述べられている。Si 結晶中への過剰な H 拡散により、焼成プロセス中に欠陥が事前に形成される可能性を示唆している。

本章では、本研究に用いた曝露試験場に導入しているメーカーが異なる市販 PERC 太陽電池モジュールについて、累積日射量の影響を比較した。系統連系された様々な種類の太陽電池モジュールのこれまでの調査から、実際の環境下での発電量評価が必要であると考えている。例えば、a-Si:H 太陽電池アレイでは、季節によって発電性能が変動することを確認した[18]。第 3 章では、OPV アレイについて発電量の季節変動と、初期の急速な劣化について議論した。LID のメカニズムは明確に解明されていないにもかかわらず、すでに PERC 太陽電池モジュールは、様々な発電設備に導入されている。発電設備として動作している市販 PERC モジュールについて、先行研究で劣化現象として報告されている LID に焦点をあて、長期発電量への影響を検討する。

4.2 実験方法

2 型式の PERC 太陽電池モジュール（PERC a および PERC b）を屋外曝露試験場にて光照射を行い、積算照度に対する出力特性の変化を室内測定によって観察する。図 4.1 は、コンクリートラックに設置して屋外に曝露した PERC 太陽電池モジュールの 2 つの型式の写真および構造を示す。モジュールのサイズは、PERC a が 1650 mm×992 mm×35 mm、PERC b が 1675 mm×1001 mm×33 mm でセルサイズはともに 156 mm×156 mm であった。PERC a は 5 本バスバー、PERC b は 3 本バスバーを有し、60 直列の p 型単結晶 Si セルで構成されていた。これらのモジュールは双方とも 2016 年に購入したものである。走査電子顕微鏡による断面観察とエネルギー分散型 X 線分光法にて各々のセルの構造を調査した。PERC a のセル構造は、Ag フィンガー電極（ $\sim 20 \mu\text{m}$ ）/ SiN_x （ $\sim 130 \text{ nm}$ ）/ Si 基板（ $\sim 170 \mu\text{m}$ ）/ AlO_x （ $\sim 20 \text{ nm}$ ）/ SiN_x （ $\sim 150 \text{ nm}$ ）/ Al 裏面電極（ $\sim 20 \mu\text{m}$ ）であった。一方、PERC b のセル構造は、Ag フィンガー電極（ $\sim 20 \mu\text{m}$ ）/ SiN_x （ $\sim 90 \text{ nm}$ ）/ Si 基板（ $\sim 150 \mu\text{m}$ ）/ SiO_x （ $\sim 30 \text{ nm}$ ）/ SiN_x （ $\sim 150 \text{ nm}$ ）/ Al 裏面電極（ $\sim 20 \mu\text{m}$ ）であり、PERC a とは裏面のパッシベーション層に違いがみられた。残念ながら、製造プロセ

(a) PERC a



(b) PERC b

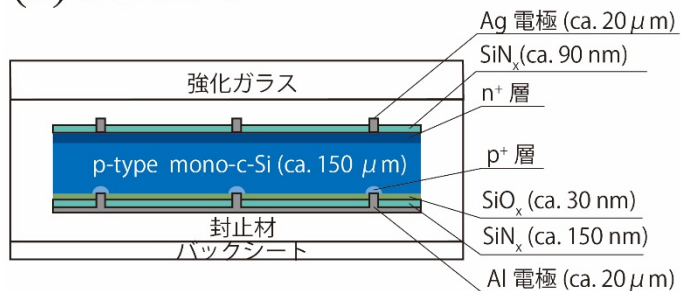


図 4.1 屋外曝露している PERC 太陽電池モジュールの構造と写真

スに関する情報は開示されておらず、裏面のパッシベーション層の違いが LID の振る舞いに与える影響は不明である。Kersten らによると、光照射中の回路条件によって LID および LIR の振る舞いに変化する[72]。本研究では、曝露中の回路条件は、短絡回路、開放回路、および PCS による MPPT の 3 つとした。表 4.1 に示す通り、短絡および開放回路条件では、条件ごとにモジュール 1 枚ずつが曝露され、不定期に室内に持ち込みソーラシミュレータによる標準試験条件下での I - V 測定が行われた。一方、MPPT 条件では 5 枚の PERC 太陽電池モジュールを直列接続したアレイの状態、系統に接続されている。この PERC 太陽電池アレイは、10 分おきに系統から切り離され、実環境下での I - V 特性が測定されている。気温の他、いずれの回路条件でも屋外曝露中は、モジュールと同傾斜角に設置された全天日射計により積算日射量を、さらには T 型熱電対を太陽電池モジュール裏面の中央に貼り付け温度データを取得している。測定装置や、屋外曝露試験場の詳細は第 2 章にて述べている通りである。

表 4.1 各回路条件で試験を行った屋外曝露時の PERC 太陽電池モジュールの数

Measurement	Indoors		Outdoors
Exposure period	About 6 months		About 10 months
Circuit condition	Short	Open	MPPT
PERC a	1	1	5 (1 array)
PERC b	1	1	5 (1 array)

まずは、PERC 太陽電池が屋外曝露によって受けた環境履歴について、気温、積算日射量およびモジュール裏面温度を調査する。次に、屋外曝露によって照射された日射量に対する出力変化を、短絡および開放回路条件下のモジュールの室内測定の結果から検証し、その結果 LID を観察した。さらに、MPPT 条件下での PERC 太陽電池アレイの屋外発電量の指標には 2.3.2 項に示した式 (2. 3) によって与えられる $PR_{T=25}$ を用いる。日射および温度特性を考慮することによって、標準試験条件下での測定で得られた値との比較ができる。なお、温度係数は IEC 61215 に定められている測定によって得られ[24]、それぞれ PERC a は $\gamma = -0.390 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$ 、PERC b は $\gamma = -0.409 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$ であった。PERC 太陽電池が従来の結晶 Si 太陽電池と同様に、環境履歴の影響を大きく受けなければ、 $PR_{T=25}$ は第 3 章で示した OPV に見られた季節による変動は示さないはずである。これらの結果から、LID

の長期発電量への影響を検討する。

4.3 結果と考察

4.3.1 曝露環境と各回路条件におけるモジュール裏面温度

4.1 節にて述べたように、温度履歴は太陽電池モジュールの LID に影響を与える要因として議論されており、まず屋外曝露期間中の気象条件とモジュールの動作温度を調査した。図 4.2 は、曝露期間中の日積算日射量および日最高気温と、回路条件ごとのモジュール裏面温度を示している。図 4.2 から、日最高気温と日積算日射量が季節によって異なることがわかる。冬の 12 月から 2 月にかけて、モジュールの温度が 50 °C 未満の日がほとんどで、日積算日射量も夏より少なかった。一方夏は、晴れた日のモジュール裏面温度が 60 °C を超えていた。PERC 太陽電池セルの屋内加速試験に関するいくつかの報告に示される温度条件は 100 °C を超える高温であり、実際の動作温度とは乖離している[71]。Kersten の研究では、50~85 °C という実際の環境と比較的近い条件下で室内試験が実施されており、本研究で用いた屋外曝露試験場での夏季の温度に近い[72]。ただし Cho らは、37 °C、0.8 SUN、48 時間の試験条件で LID を観察しており[69]、LID に必ずしも高温が必要というわけではない。本研究で用いた曝露試験場において最もモジュール裏面温度が低くなる冬季であっても、モジュール裏面温度は 50 °C に達するため、PERC 太陽電池モジュールの LID は年間を通して発生する可能性があると言える。

図 4.3 (a) および (b) は、各回路条件ごとにモジュール裏面温度と気温の差の関係を示したものである。よく知られているように、日射強度とモジュール温度の間には強い相

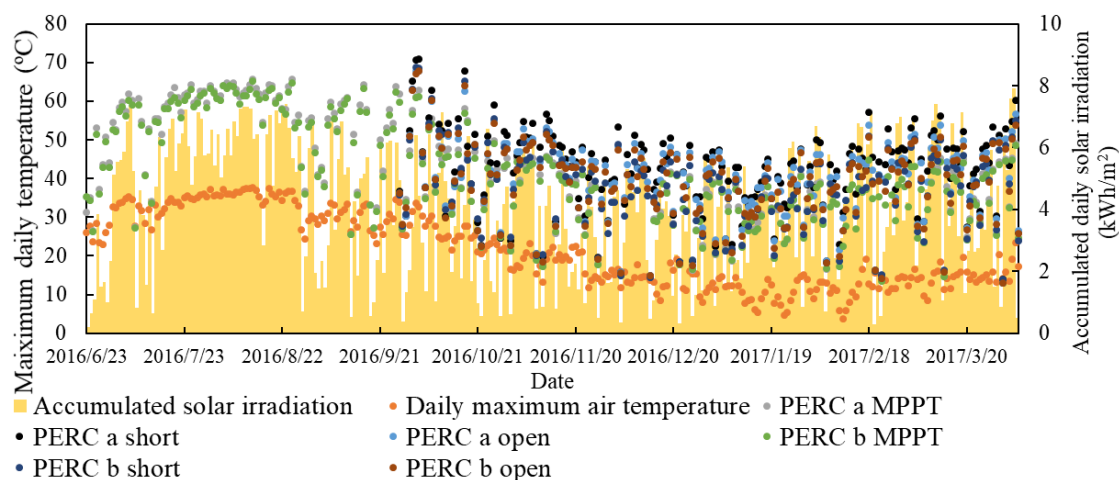


図 4.2 日積算日射量と日最高気温、および各モジュールの日最高裏面温度

関がある。モジュール裏面温度と気温の差 T_{diff} は、PERC a および PERC b の双方の太陽電池モジュールにおいて、MPPT 条件が最も低いことがわかった。PERC a 太陽電池モジュールの場合、短絡回路条件の T_{diff} は開放回路条件の T_{diff} よりも高くなった。しかし、PERC b 太陽電池モジュールの場合、短絡回路条件の T_{diff} は開放回路条件の T_{diff} よりも低くなった。サーモカメラを用いて、曝露試験中の双方の PERC 太陽電池モジュールの受光面を観察したところ、開放回路条件ではモジュール表面の温度はほぼ均一であったが、対照的に短絡回路条件では、一部の太陽電池セルの表面温度が高くなっていた。太陽電池モジュールにおける温度むら現象として、抵抗発熱によるホットスポットがよく知られて

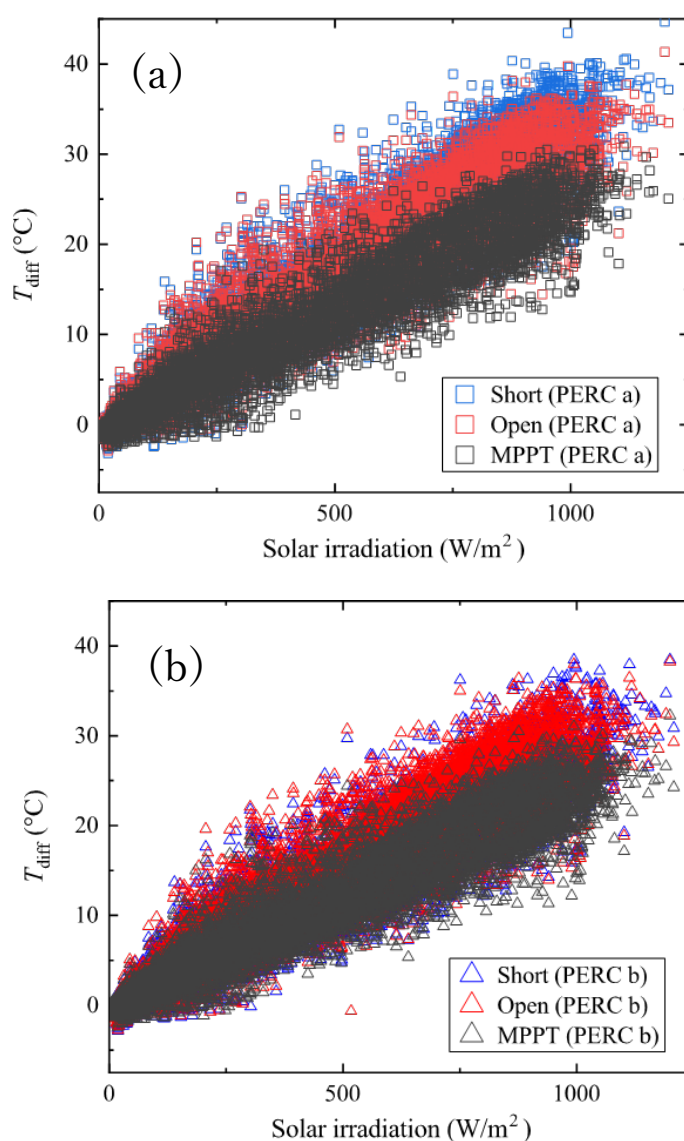


図 4.3 (a) PERC a、(b) PERC b 太陽電池における回路条件ごとの T_{diff} と日射

いる[80]–[82]。各セルの抵抗値の違いが、太陽電池セルの温度の差を引き起こしていると考えられる。太陽電池モジュールの面内に温度むらがあるため、短絡回路条件では測定温度が熱電対の取り付け位置に強く依存していた。なお、PERC a および b の双方の太陽電池モジュールで、屋外曝露中にバスバー近辺での顕著な温度上昇は観察されなかったため、初期設置段階においては、バスバーの本数の違いは抵抗発熱に影響を与えないと考えられる。

4.3.2 短絡回路条件と開放回路条件における P_{\max} の室内計測値からの比較

図 4.4 (a) は、短絡と開放回路条件下における PERC a および PERC b 太陽電池モジュールの積算日射量に対する P_{\max} の変化を示している。どちらの型式においても、開放回路条件下に比べ短絡回路条件下での光照射によって P_{\max} が低下した。この P_{\max} の低下は LID だけでなく、前述のように、ホットスポット起因の劣化の可能性が考えられる[82]。また、PERC a と PERC b 太陽電池モジュールでは、 P_{\max} の低下傾向が異なることがわかった。PERC a 太陽電池モジュールの場合、積算日射量が 86 kWh/m^2 までの屋外曝露では、 P_{\max} の低下に回路条件による差は見られなかった。しかし、積算日射量 102 kWh/m^2 において、短絡回路条件下で 1.45%、開放回路条件下で 1.18% 減少し、積算日射量が 687 kWh/m^2 においては、短絡回路条件下で 1.84%、開放回路条件下で 1.52% 減少と、回路条件による差がみられた。

一方で、PERC b 太陽電池モジュールの場合、両回路条件においてわずか 3 kWh/m^2 までの屋外曝露で P_{\max} は 4.4% 減少し、光照射に対して非常に敏感な特性を示した。屋外曝

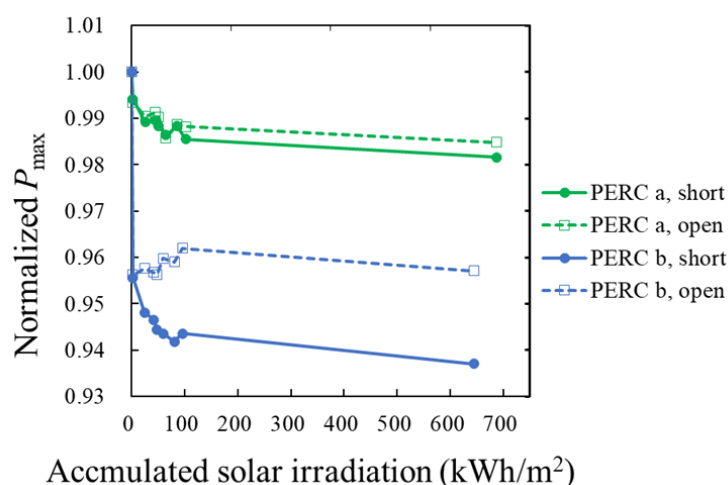


図 4.4 短絡回路条件と開放回路条件における積算日射量に対する各 PERC 太陽電池の P_{\max} の変化

露の極めて初期段階で、PERC b 太陽電池モジュールの低下率は、PERC a 太陽電池モジュールの低下率よりも高かった。PERC b 太陽電池モジュールは初期低下の後、開放回路条件下では約 102 kWh/m² の積算日射量において P_{\max} は 0.6% 回復し LIR を示した。しかし、積算日射量 687 kWh/m² までの屋外曝露によって再び低下し、最終的には規格化 P_{\max} は 0.957 となった。対照的に、短絡回路条件下では、約 102 kWh/m² の積算日射量で P_{\max} は回復せず、LIR がみられることなく 687 kWh/m² の積算日射量で規格化 P_{\max} は 0.937 となった。Ishii と Masuda は、従来型の p 型単結晶 Si 基板を用いた Al-BSF 太陽電池について、LID および LIR を調査しているが、3 年間にわたる屋外曝露では LID 後の LIR は観察されていない[22]。本研究では、どちらの回路条件下でも P_{\max} は徐々に低下しているが、PERC b 太陽電池モジュールの発電性能の変化では LIR が見られ、p 型結晶 Si が用いられているという点は同じであるにもかかわらず、彼らの結果と異なった。

図 4.5 は、屋外曝露中に太陽電池モジュールが受けた環境履歴を示しており、積算日射量における日最高気温およびモジュールの裏面日最高温度を、各回路条件ごとにプロットしている。開放回路条件下にある PERC b 太陽電池モジュールの LIR が観察された積算日射量までは、60 °C 以上のモジュール裏面日最高温度がみられていた。その後は、モジュール裏面日最高温度は高くとも 40~50 °C へと変化したことがわかる。Kersten らによる 4 か月間の屋外曝露試験では、LID とその後の LIR によって、ほとんど初期値まで性能が回復することが観察されていたが、モジュールの裏面に断熱材を取り付けて温度を上げてい

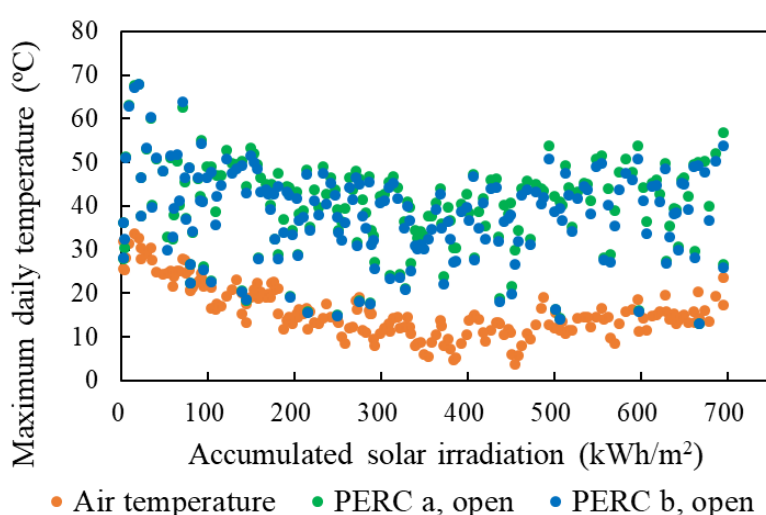


図 4.5 積算日射量に対する日最高気温および開放回路条件における各型式の日最高 PERC 太陽電池モジュール温度

た[72]。本研究では、図 4.6 に示すよう 102 kWh/m^2 を超える積算日射量でのモジュール裏面温度が、LIR を引き起こすほど高くなかったために、LID が優勢となり劣化を示したと考えている。LIR は LID に比べ高温を必要とすることが示唆された。

図 4.6 (a) および (b) は、開放回路条件下の屋外曝露後の室内測定によって得られた、PERC a と PERC b 太陽電池モジュールの I - V 特性と、積算日射量に対する各パラメータの変化を示している。PERC a 太陽電池モジュールは、積算日射量 687 kWh/m^2 までの屋外曝露で、主に低下したのは I_{sc} で初期値から 0.8% 減少した。一方、 I_{sc} と比べて V_{oc} と FF の変化は小さく、どちらも初期値から 0.4% 減少した。積算日射量 102 kWh/m^2 までの屋外曝露では I_{sc} が 0.4% 減少、 V_{oc} が 0.3% 減少、FF が 0.2% 減少しており、どのパラメータ

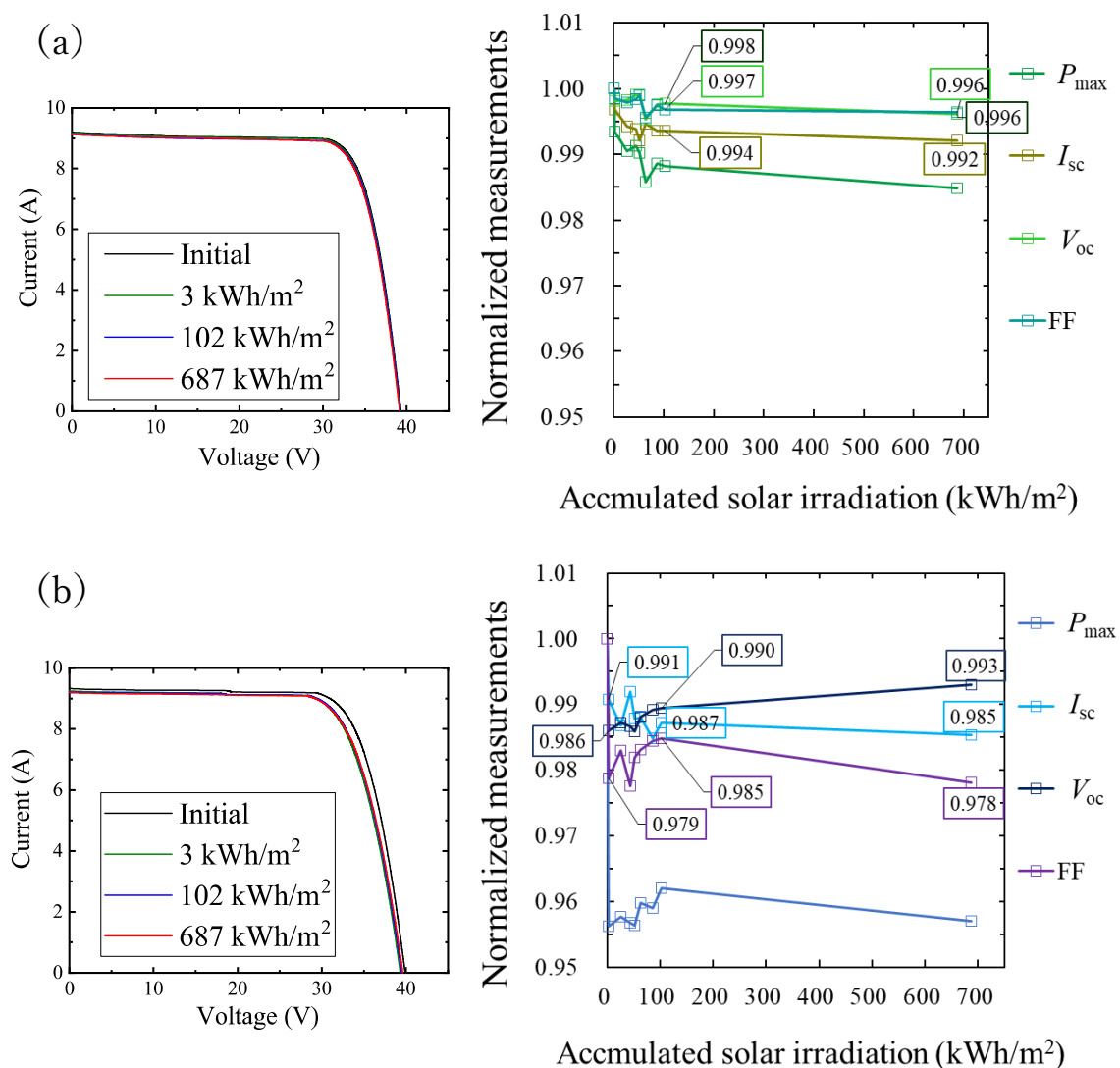


図 4.6 (a) PERC a、(b) PERC b 太陽電池における開放回路条件での曝露後に室内測定で得られた I - V 特性および積算日射量に対する各パラメータの変化

も曝露初期にいったん大きく減少した後は、緩やかな減少を示した。初期低下が大きかった PERC b 太陽電池モジュールは、わずか 3 kWh/m^2 までの屋外曝露で I_{sc} は 0.9% 、 V_{oc} は 1.4% 、FF は 2.1% 初期値から減少した。その後、 I_{sc} は減少し続けて積算日射量が 687 kWh/m^2 においては初期値から 1.5% 減少した。しかし、 V_{oc} は初期の急激な低下を見せた後は回復し続け、積算日射量 687 kWh/m^2 までの屋外曝露において初期値から 0.7% 減少となった。FF も初期の急激な低下の後に回復し、積算日射量 102 kWh/m^2 までの屋外曝露で初期値比 0.985 となったが、以降は減少して積算日射量 687 kWh/m^2 までの屋外曝露で初期値比 0.978 となった。 I - V 特性の V_{oc} 付近の傾きから、積算日射量 $102 \sim 687 \text{ kWh/m}^2$ において R_s がわずかに増加してゆく傾向が分かる。 R_s は積算日射量 3 kWh/m^2 までの屋外曝露で初期値比 1.20 となったが、積算日射量 102 kWh/m^2 までの屋外曝露で初期値比 1.08 となった。PERC b における P_{max} の増加は V_{oc} と FF 変化に影響を受けていたが、積算日射量 102 kWh/m^2 以降では FF の減少に伴い P_{max} が低下したことが分かった。

PERC b 太陽電池モジュールにおいて、短絡および開放回路条件下での屋外曝露では、 P_{max} の大幅な減少を伴う LID が観察され、開放回路条件下では V_{oc} の増加を伴う LIR が確認された。一方 PERC a 太陽電池モジュールにおける LID は、 P_{max} の低下はわずかで V_{oc} と FF の双方で有意な減少は見られず、LIR は観察されなかった。いくつかの論文では、anti-LID 処理が PERC 太陽電池の LID 抑制に効果的であることが報告されている[72], [79], [83]。本研究に用いられている太陽電池の製造プロセスは明らかにされていないが、二つの型式による違いは製造プロセスの違いを表している可能性がある。両型式の PERC 太陽電池モジュールにおける LID の振る舞いで共通しているのは、程度は異なるが積算日射量の増加につれて I_{sc} が減少したことであった。光に対して劣化する現象は一つに見えているが、 I_{sc} の減少を伴う LID と V_{oc} の減少を伴う LID が同時に進行している可能性がある。 I_{sc} の減少を伴う LID は長い時定数をかけて緩やかに進行し、本研究においては回復がみられなかった。 V_{oc} 低下を伴う LID の場合は、積算日射量の増加につれて回復するが、 P_{max} の回復には R_s が回復する高温状態が必要なのではないかと考えている。

4.3.3 MPPT 負荷条件における屋外計測値の変化

図 4.7 (a) および (b) は、屋外曝露期間における PERC a および PERC b 太陽電池アレイの積算日射量に対する $PR_{T=25}$ の変化を示している。第 2 章にて示している方法でデータを抽出しているが、 $PR_{T=25}$ は、計測システムの測定誤差やスペクトル変化を含んで大きく日変化する。図 4.7 中の 1050 kWh/m^2 前後の $PR_{T=25}$ のスパイクは、おそらく測定誤差

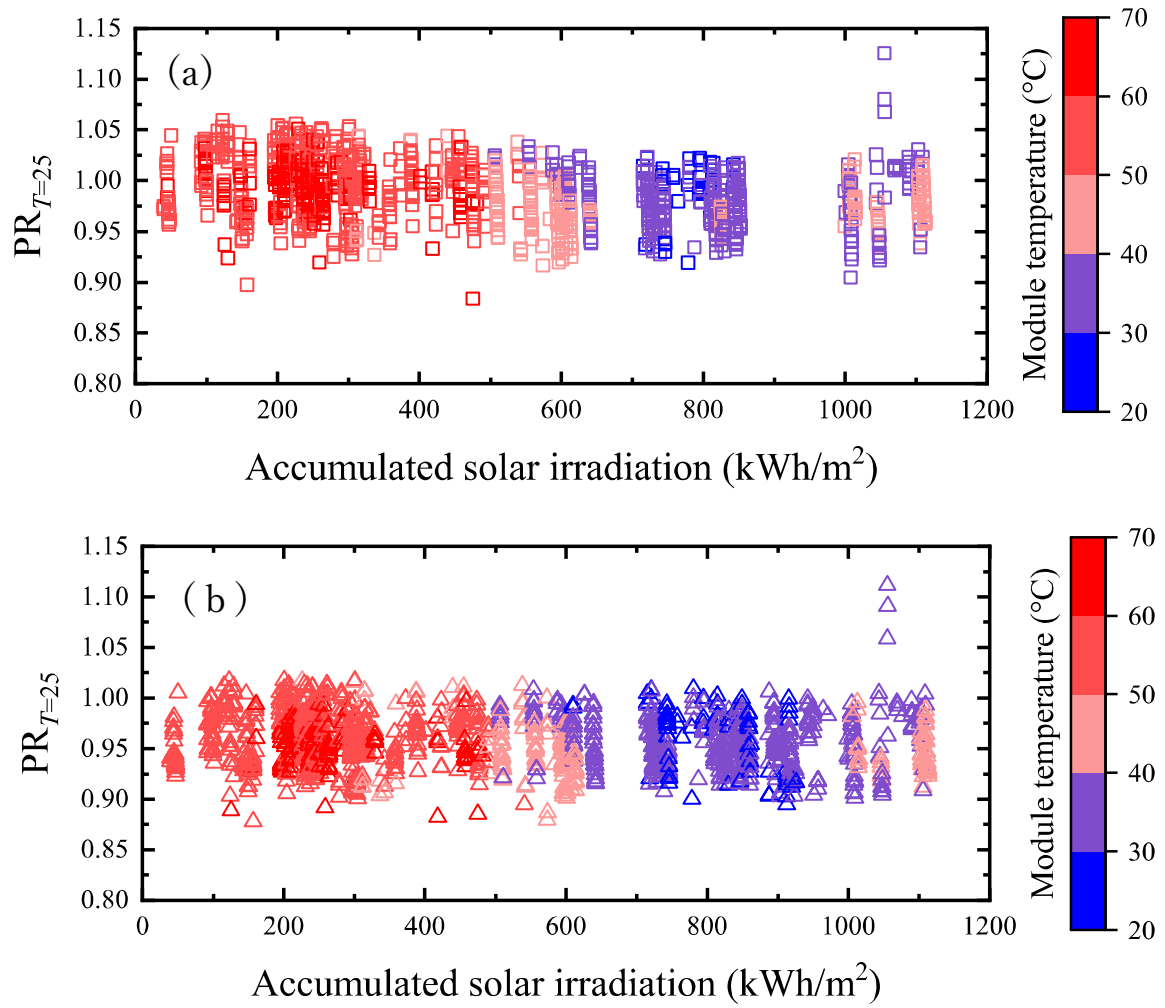


図 4.7 (a) PERC a、 (b) PERC b 太陽電池における積算日射量に対する $PR_{T=25}$ の変化のデータフィルタリングが不十分だったため、クラウドエッジからの強化効果によるものである[84], [85]。これらの理由のため、図 4.7 はデータ全体をとらえて傾向に着目する必要がある。PERC a 太陽電池において、短絡および開放回路条件下にあったモジュールは、図 4.4 に示したように、約 102 kWh/m² までの曝露で初期劣化がみられていたが、MPPT 負荷条件下のアレイでは、 $PR_{T=25}$ は約 1110 kWh/m² まで徐々に減少傾向を示していた。一方 PERC b 太陽電池においては、アレイでは積算日射量が約 50 kWh/m² を超えたところすでに $PR_{T=25}$ が 1.0 未満に減少しており、短絡および開放回路条件下にあったモジュールで示されたように、きわめて初期に急激な劣化が発生したと考えている。しかし、PERC b 太陽電池アレイでは、開放回路条件下にあった太陽電池モジュールと異なり、約 1110 kWh/m² までの屋外曝露では LIR は観察されず、 $PR_{T=25}$ はおおよそ 0.95 前後を推移していた。ここで、図 4.3 に示すように MPPT 条件におけるモジュールの T_{diff} が、3 つの

回路条件の中で最も低かったことに着目した。図 4.7 に示すように、約 500 kWh/m^2 までモジュール裏面温度は 50°C 以上であったが、以降は季節が冬となりモジュール裏面温度が低いままであった。モジュールだけでなくアレイにおいても LID 後の LIR の発生には高温条件が必要であると考えている。しかし、4.3.2 節の開放回路における PERC b 太陽電池モジュールでは積算日射量 $3\sim 102 \text{ kWh/m}^2$ において、すでに LIR が見られていた。MPPT 条件と開放回路条件下の屋外曝露は開始時期が異なるため、日最高温度で集計されていない時間帯の温度履歴や、日射強度は今回の考察では反映されていない。また、MPPT 条件では最適動作点の追従の為、日射照度に合わせシステム電圧が変動している。LIR の有無がこのような回路条件の違いの影響を受けたのか、それとも環境履歴に影響が大きいのか、より詳細な解析が必要である。MPPT 条件下の屋外曝露では、PERC 太陽電池にとって、低温状態の継続は LID 後の回復が不十分で、回復のためには 50°C 以上の温度が十分に継続される必要があると示唆された。MPPT 条件下での曝露において、両型式の PERC 太陽電池アレイは、本研究における試験期間および気候で安定化に達していないと考えられる。

PERC a および PERC b 太陽電池アレイの双方で、LID が観察された。しかし、本研究の試験期間においては屋外曝露中に LIR は見られなかった。この点は、開放回路条件下の太陽電池モジュールで観察される点と異なる。曝露試験中の回路の状態によって、出力変化の振る舞いに違いが生じるため、MPPT 負荷下での太陽電池アレイの調査は、実際の発電設備における長期発電量を推定するために重要である。本研究は試験期間が短く、安定化に必要な期間を決定できないため、長期にわたって発電性能がどのような劣化曲線を示すのかを知るためにも試験を継続する必要がある。

4.4 屋外曝露初期における PERC 太陽電池の光劣化についてのまとめ

2 型式の PERC 太陽電池モジュールの性能は、屋外曝露直後に低下した。規格化 P_{\max} の振る舞いは、型式および屋外曝露中の回路条件によって異なった。どちらの型式においても、短絡回路条件下での光照射による劣化は、開放回路条件下での劣化よりも大きかった。これは、セルの抵抗差による部分発熱による劣化などの、LID 以外の劣化にも起因している可能性がある。2 型式のうち一つの PERC 太陽電池モジュールでは、曝露後の積算日射量が増加するに伴い P_{\max} は徐々に減少した。加えて、回路条件に関係なく屋外曝露中に LIR は観察されなかった。対照的に、もう一方の PERC 太陽電池モジュールの P_{\max} は、開放回

路条件下で太陽光による光照射が積算 3 kWh/m² までは減少したが、その後いったん増加した。しかし、MPPT 条件下の太陽電池アレイでは $PR_{T=25}$ に LIR は観察されなかった。MPPT 条件下ではモジュール裏面温度が最も低い状態で動作しており、開放回路条件下でのモジュール裏面温度の履歴を考慮すると、 P_{\max} の回復は日射ではなく温度と強く関連があると考えられる。なお、劣化が大きかった PERC 太陽電池では、積算日射量が約 1110 kWh/m² までの屋外曝露で、 $PR_{T=25}$ は約 0.95 であった。発電設備において、きわめて初期の段階で劣化が 5% あり、この劣化が将来にわたって回復しないとなると、長期にわたって得られる積算発電量にとって無視できないものである。LIR によって回復が見込めるとしても、本研究で確認された回復に要するモジュール裏面温度は 50 °C 以上であり、本曝露試験場における夏季にあたる状態が長く続く必要がある。このように、発電性能の変化の振る舞いは、太陽電池のモデルの違いだけでなく回路条件や環境履歴によっても異なる。PERC 太陽電池の積算発電量を評価するためには、実際の環境において少なくとも 1 年以上の観察が必要となるだろう。

第5章 OPV および PERC 太陽電池の積算発電量の検討

第3章では OPV について、第4章では PERC 太陽電池について、その準安定性の振る舞いを調査した。本章では、本研究で得られた知見をもとに、各太陽電池の発電性能について減衰曲線を推定し、準安定性が積算発電量に与える影響を検討する。太陽電池の種類によって、用途や性能変化の振る舞いが異なるため、想定運転期間は各太陽電池で検討して決定する。

5.1 OPV の発電性能の減衰曲線の推定

OPV は実用化に向けて開発途上にあり、屋外長期使用の積算発電量に関する研究例は知る限りではない。系統電源に接続され、発電設備として使用している OPV の信頼性および耐久性に関する評価では初めての報告と考えている。実試験データより減衰曲線を推定し、初期の性能がどれほどの期間維持されるかを示す。また、熱回復の有無が積算発電量に与える影響も検討する。

本研究で明らかになった、OPV における発電量の振る舞いは3つある。一つ目は、系統連系接続された実運用下において、2段階の劣化モードが確認されたことである。各々の劣化モードを比較すると、低下するパラメータが異なることから、異なる劣化メカニズムが働いていることが示唆された。二つ目は、光が要因となる発電性能の可逆変化である。光照射により、きわめて短時間で出力増加とその飽和がみられ、光照射後の暗所保管において長い時定数をかけて出力が低下していく。三つ目は、温度履歴によって発電性能が向上する熱回復である。暗状態で OPV モジュールを、 -10°C 、 10°C 、 30°C 、 60°C と異なる温度条件で保持したところ、 60°C 保持のみにおいて時間経過とともに発電性能が向上し、その向上は遅くとも120時間以内に飽和した。また、表5.1に示すように[40]、OPV を劣化させる主なストレス要因は大気からの水と酸素、温度、光の3つであるが、多くの素材で複層構造を形成していることから、それぞれの要因に対して発生している劣化は多岐にわたる。劣化や回復など異なる挙動が同時進行すると考えると、OPV の発電性能の減衰曲線は次の式で表現できる。

$$f(x) = D_1(x) + D_2(x) + R_1(x) + R_2(x) \quad (5.1)$$

積算日射量 x の関数である発電性能 $f(x)$ は、 $D_1(x)$ は初期劣化、 $D_2(x)$ は二次劣化、 $R_1(x)$ は光照射効果、 $R_2(x)$ は熱回復の和で表されると考える。本研究において、 $D_1(x)$ が示す初期劣化は急激な性能低下と飽和という指数関数的減衰が観察されており、先行研究で報告されている Burn-in loss と呼ばれるものと考えられる[40], [43]–[45], [47], [86]。試験モジュールにはフラーレン関連物質が用いられていることから、光二量化によるフラーレンの官能基の形態変化からの相分離を想定している。また、標準試験条件下において得られた室内測定による経年観察から、 $D_2(x)$ が示す二次劣化は、積算日射量に対し直線的に変化することが分かっている。さらに光照射効果は、第3章にて述べたように、きわめて短時間で出力上昇が飽和する一方で、暗所保管による出力低下は著しく長い時定数を有することを確認している。従って、昼夜繰り返す屋外曝露において、 $R_1(x)$ は考慮しなくてよいと考えられる。一方、 $R_2(x)$ が示す熱回復は $PR_{T=25}$ で 0.05 の向上、つまり発電性能が初期の 5% 上昇することが実験から示されており、無視できる大きさではない。しかし本研究において、保持温度 30 °C から 60 °C の間の熱回復による経時変化について、数式化するためのデータが不足している。熱回復が積算発電量に与える影響は、推定式の中に $R_2(x)$ を含めるのではなく、

表 5.1 OPV のストレス要因と劣化の振る舞いおよびメカニズムの例[40]

ストレス要因	発電性能の振る舞い	調査・試験法	メカニズム
水と酸素 (大気から)	封止を透過する水の浸入や酸素の浸入速度に対応して、長期間かつ直線的にゆっくり劣化する。	レーザ光誘起電流 (Laser Beam Induced Current: LBIC) によるマッピングでデバイスの損失領域を調査する。	電極として使用される仕事関数が低い金属が水と反応する。
	封止が破れ突然故障する。		有機物が酸化し、ブリーチが引き起こされる。
温度 (室温、使用温度、高温)	光がない状態で封止された OPV が劣化する。製造直後から長期にわたって観察される。	金属電極をはがして再適用すると効率が回復する。	電極界面に電荷ブロッキング層が形成される。
		J_{sc} の低下とフォトルミネッセンスの増加。	フラーレンとポリマーまたは分子の巨視的な相分離。
光 (可視光を含む)	光照射初期に急激な劣化が観察される。出力低下は指数関数的に進行し、時間とともに緩やかになる。	J_{sc} の損失・劣化したものはフラーレン吸収に新しいピーク。	光二量化によってフラーレンの官能基が変化する。
		V_{oc} の低下とホール移動度の損失。	非フラーレン素材の光誘起トラップが状態密度の増加を引き起こす。

熱回復がある場合とない場合の二つの減衰曲線を推定し比較することとする。以上のことから、

$$D_1(x) = Ae^{-Bx}$$

$$D_2(x) = Cx + k$$

$$R_1 = 0$$

$$R_2 = 0$$

とし、式 (5.1) へ代入するとフィッティングモデルは次式となる。

$$f(x) = Ae^{-Bx} + Cx + k \quad (5.2)$$

熱回復がある場合の推定には、二次劣化中の熱回復による性能向上が飽和していると考えられる $PR_{T=25}$ の増減の変曲点にある月のデータを解析に用いる。ただし、曝露開始直後の最初のデータは熱回復が発生しない冬季データを用いることとなる。熱回復がない場合の推定には、OPV モジュールの裏面温度が 30°C を超える時間が 100 時間を超えない月の $PR_{T=25}$ を解析に用いる。以上のことをふまえ、実運用下における発電性能を示している $PR_{T=25}$ を用いて、非線形最小二乗法によるフィッティングを行った。

図 5.1 は式 (5.2) を用いて OPV アレイの $PR_{T=25}$ の屋外データに対して行ったフィッティング結果である。図中の赤丸は、熱回復による性能向上が最も大きかった $PR_{T=25}$ であり、赤線は熱回復が最大の場合の減衰曲線を示す。青四角はモジュールの裏面温度が 30°C を超える時間が 100 時間に満たない月の $PR_{T=25}$ で、青線は熱回復がない場合の減衰曲線を示す。赤線、青線ともに破線部は屋外測定データがなく、フィッティングにより得られた推定減衰曲線を示している。曝露サイトの 1 年間の積算日射量は約 1.5 MWh/m^2 であるため、経年変化の目安となる。熱回復がない場合の減衰曲線の推定式は

$$f(x) = 0.54e^{-4.28x} - 0.05x + 0.66 \quad (5.3)$$

であり、熱回復がある場合の減衰曲線の推定式は

$$f(x) = 0.56e^{-7.29x} - 0.05x + 0.70 \quad (5.4)$$

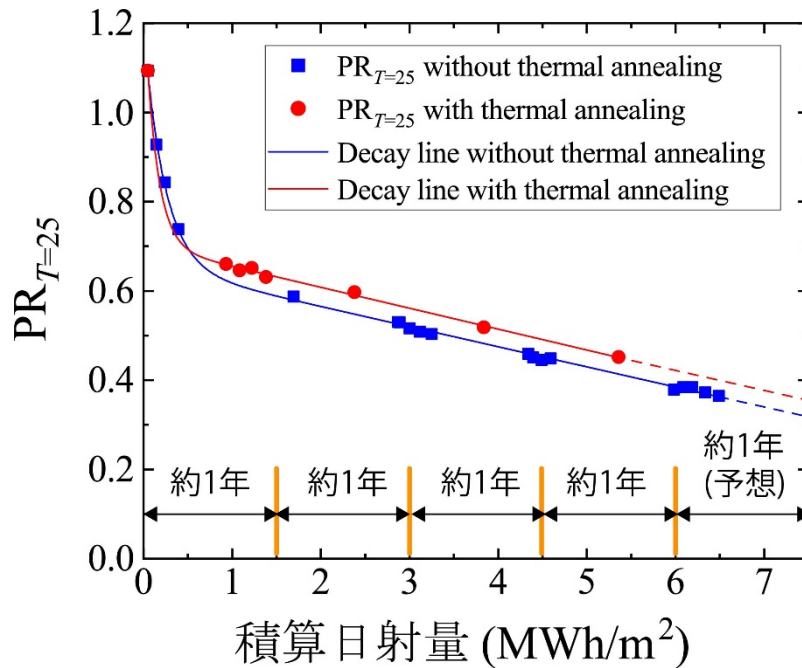


図 5.1 熱回復がある場合と熱回復がない場合の
積算日射量に対する $PR_{T=25}$ からのフィッティング結果

であった。

初期劣化 (D_1) は早くても半年、遅くとも 1 年で収束傾向にあることが確認された。この初期劣化は無視できない大きさだが、2 年目以降は二次劣化 (D_2) による直線傾向が支配的になり劣化予測がしやすい。 D_2 部分の傾きは熱回復の有無で変わらない。また、劣化が進行し $PR_{T=25}$ が低下した状態であっても、熱回復による性能向上が見込め、その大きさは劣化した状態に対する割合でなく、初期値に対する割合を維持している。熱回復の由来は、経年変化する箇所ではないことが示唆されている。さらに得られた推定式を用いて、同じ気象条件が今後も繰り返されると仮定し、初期の性能がどれほど維持されるかを示したものが図 5.2 である。本研究に用いた曝露サイトでは気温が季節変動するため、実際の減衰曲線は、二つの推定減衰曲線の間を、波を描きながら推移すると考えられる。数年単位での使用を想定した場合、初期劣化が収束している積算日射量 1.5 MWh/m^2 の推定 $PR_{T=25}$ を初期発電性能と考えて実使用期間の検討を行った。これによると、積算日射量 4.5 MWh/m^2 において、初期発電性能の 80%を下回っていた。したがって、系統接続の電源としては 2 年半から 3 年程度が実使用期間であると考えられる。しかし、低照度における経年変化が同じ振る舞いであるか確認が必要ではあるものの、照度が低い室内用途であれば、屋外使

用年数を超える耐久性が予想できる。IoT センサなどの独立電源として使用する場合は、製品が要求する発電性能で寿命が変わる。

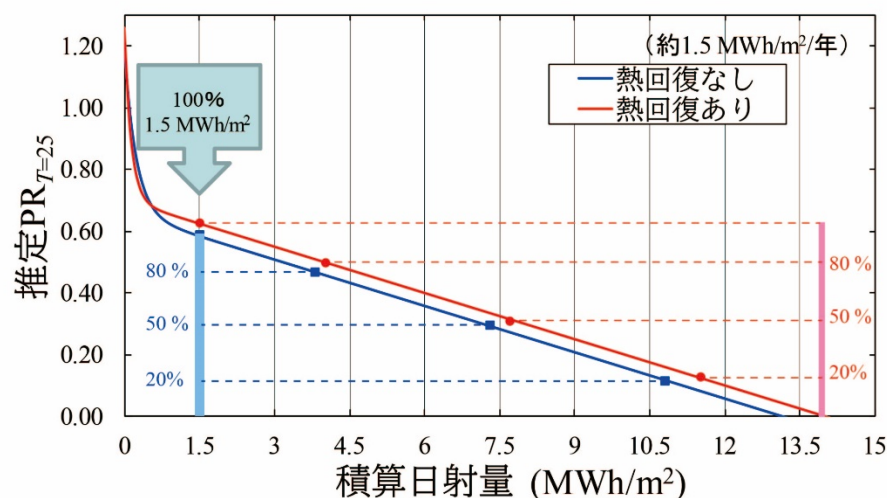


図 5.2 OPV 発電性能の推定減衰曲線

熱回復がある場合の積算発電量は熱回復がない場合に比べ、曝露開始から 1 年間は約 1.5%増であったが、曝露開始が 12 月であり熱回復がしばらく発生していない時期のデータであることと、今回初期劣化中の温度係数の変動については考慮していないことから、正確な評価はできていないと考えられる。二次劣化中の、熱回復がある場合の積算発電量と熱回復がない場合とを比較すると、曝露開始から 1~2 年の間は約 7.3%増、曝露開始から 2~3 年の間は約 8.5%増と、年を経るごとに熱回復の有無で積算発電量の差が開いていった。これは、熱回復による発電性能の改善が、初期性能からの性能維持率に依らないからであり、長期間使用することで熱回復による積算発電量の増加が見込めることが分かった。曝露開始から積算日射量約 6.5 MWh/m² までの実使用において、発電性能がまったく失われるような故障モジュールは発生していない。推定式では積算日射量 13.5 MWh/m² 程度で完全に発電性能を失うが、その前に故障や異なる劣化モード等の発生も考えられる。OPV のミニモジュールやセルの屋外曝露における故障報告では、端部から封止が破断し急激に発電性能を失う故障モードがある[37],[40]。本試験で用いた OPV モジュールは、モジュール端部から有効発電エリアまで最小で 55 mm 離隔しており、端部からの封止破断は比較的起きにくいと考えられる。しかし、ストレス要因に対して間接的に劣化が進むこともある。結晶 Si 太陽電池のフィンガー電極は、封止材が加水分解されることで発生する酢酸で腐食することが知られている[87]。試験 OPV の受光面はガラスではなくフィルム封止となって

おり、表面からの水の浸入や酸素の侵入を完全に防ぐことはできない。現在見られている劣化とは異なる劣化が、発電性能が完全になくなる前に現れる可能性もある。

OPV は多層構造で多くの有機素材が用いられており、各々劣化メカニズムが異なる可能性や、相互作用の可能性もあるため、OPV モジュールの劣化についての詳細な議論は難しいと考えていた。しかし、実発電量の解析では比較的単純なフィッティングモデルで発電性能の劣化予測ができることが分かった。

5.2 PERC 太陽電池の発電性能の減衰曲線の検討

2019 年度において、日本の FIT のなかで、500 kW 以上の太陽光発電設備には入札制が適用されており、その調達期間は 20 年と定められている。PERC 太陽電池は、今後シェアを伸ばし Al-BSF 太陽電池に代わると予想される。今後の PERC 太陽電池の普及を考えると、太陽光発電設備の資金調達可能性から、使用期間を 20 年と考え生涯発電量を評価したい。本研究の解析対象期間は曝露開始より 10 か月程度であり、使用期間のうちきわめて初期の振る舞いの調査となった。

第 4 章にて PERC 太陽電池の準安定性の振る舞いを、LID に注目し調査した。積算日射量が約 1110 kWh/m² までの屋外曝露において、系統連系された 2 型式の PERC 太陽電池アレイに LID を観察した。LID の程度は 2 型式で異なり、PERC a では緩やかな劣化であったが、PERC b においては初期に急激な劣化を示し、最終的には初期発電性能の 0.95 程度となり、LIR は見られなかった。しかし PERC b 太陽電池において、開放回路条件にて 6 か月ほど屋外曝露したモジュールでは、先行研究で報告されているような完全回復には至らなかったが、LIR がみられた。モジュール裏面温度の解析から、LIR にとって温度が重要な要素であることが示唆されたため、PERC b 太陽電池アレイでは、今後モジュール裏面温度が高温になる夏に LIR が発生する可能性がある。Ishii と Masuda の研究では、2010 年に曝露開始した単結晶 Si 太陽電池において、曝露後 3~5 年間には発電性能に変化が見られず、2012 年に曝露開始した単結晶 Si 太陽電池においては、曝露 1 年後に 2.6% の発電性能の低下と、曝露後 2-3 年目に 0.4%/年の回復がみられていた[22]。これらのことから、薄膜よりも構造が安定している結晶 Si 太陽電池でも、安定化（定常状態）まで少なくとも 3 年はかかることが示唆される。運用開始から 10 か月で発電性能が著しく低下し、その後 LIR が発生しないとすると、20 年の積算発電量へ与える影響はかなり大きい。さらに、Jordan と Kurtz は、古くから発表されてきた劣化率に関する複数の論文を調べ、20 年間に発表さ

れている文献調査によって結晶 Si 太陽電池では 0.7%/年の劣化率を示すと述べており[13]、結晶 Si 基板の PERC 太陽電池でも、初期の著しい劣化だけでなく、長期にわたる劣化も考えられる。また、従来型の太陽電池より PERC 太陽電池の変換効率が高いとしても、LID が発生するならば、時定数とその大きさをもって、20 年間の積算発電量へ与える影響を検討しなくてはならない。本研究で用いた試験場に曝露している従来型の Al-BSF 結晶 Si 太陽電池の公称モジュール変換効率は 15.0%、PERC a は 17.7%、PERC b は 17.6%である。残念ながら、本研究で PERC 太陽電池の減衰曲線を推定するまでのデータを得ることはできなかった。

5.3 OPV および PERC 太陽電池における積算発電量の検討のまとめ

系統電源に接続された、実使用下における OPV および PERC 太陽電池について、発電性能の減衰曲線を求め、積算発電量への準安定性への影響を検討した。OPV においては、これまでの光照射効果および熱回復についての調査結果と、系統連系接続された実使用下の屋外計測データより、フィッティングモデルを提示し推定減衰曲線を求めた。結果、OPV の初期劣化は遅くとも 1 年以内に収束傾向にあること、また初期劣化は大きく無視できないが、2 年目以降は劣化が直線的であり発電性能を予測しやすいことが分かった。曝露より 1 年程度の性能を初期値と考えると、系統連系する電源としては 3 年程度が寿命と考えられる。ただし、照度が低い室内用途であれば、屋外使用年数を超える耐久性が予想できる。詳細な発電量の予測のためには、初期劣化における温度係数の検討、および熱回復と保持温度・保持時間の詳細解析が必要となる。

PERC 太陽電池において、使用期間を 20 年とし、発電性能の減衰曲線を検討したが、解析対象期間では曝露期間が短く推定式は得られなかった。PERC 太陽電池は型式で異なる発電性能変化を示し、一方の PERC 太陽電池では導入の極めて初期に約 5%の性能低下を見せた。従来型の Al-BSF 結晶 Si 太陽電池よりも、変換効率が高い PERC 太陽電池だが、LIR が発生しないとすると、積算発電量では Al-BSF 結晶 Si 太陽電池のほうが優位になる可能性がある。PERC 太陽電池の使用期間を考えると、LID 後に LIR が起きるか否かは、生涯発電量評価にとって重要であることが分かった。今後、PERC 太陽電池において LIR が発生することが考えられるため、実使用下における発電量の振る舞いを継続調査する必要がある。本研究で LIR は温度履歴の影響を受けることが示唆されたため、LIR への温度履歴の

寄与を調査するには、電流注入しながら温度保持ができる恒温槽を用いた経時観察が必要と分かった。

得られた結果は、実験データによる経験的推定にとどまるため、試験モジュールの劣化について、素材の特定および変化についての調査も必要である。

第6章 総括

太陽電池は日照のあるところであれば、地球上どこでも電力を得ることができ、GW クラスの発電所から電卓用途まで世界中で普及している。しかし、再生可能エネルギーの一つとして、太陽光発電が長期安定化電源となるには、まだ課題もある。太陽光発電システムを長期安定化電源として考えるならば、積算発電量をもって太陽電池を評価する必要がある。太陽電池の発電量は、積算日射量や気温などの気象条件によって変化することは知られているが、太陽電池の中には、曝露された環境履歴によって発電性能が変化して、以前と同じ日射照度や温度であっても異なる発電量を示すものがある。本研究では、そのような発電性能変化の特性を準安定性と呼び、準安定性が積算発電量へ与える影響について、実用化に向け開発研究される OPV と、太陽電池の市場シェアを伸ばすといわれる PERC 太陽電池を調査した。

第 1 章では、太陽電池の種類や特性、太陽光発電システムの概要など一般的なことについて述べ、太陽光発電の現状および本研究の目的を示した。

第 2 章では、本研究における太陽電池の評価方法を、国際規格を交えながら説明した。まずは太陽電池の出力に影響を与える環境要因と試験規格についてまとめ、標準試験条件における室内測定について述べた。屋外曝露された太陽電池モジュールを定期的に設置架台より取り外して、標準試験条件下の I - V 特性を取得しており、再現性の高い室内測定で発電性能の経時変化を高精度に評価できる。さらに実環境による屋外測定では、太陽電池アレイの I - V 特性と共に、全天日射照度および太陽電池モジュール裏面温度を取得した。得られた屋外測定データを用いて、標準試験条件における日射照度で発電量を補正した PR と、さらに標準試験条件である 25°C で PR を補正した $PR_{T=25}$ を得て、発電性能の経時変化を評価した。 $PR_{T=25}$ を用いることで、系統連系している太陽電池の発電性能の経時変化を常時観察可能とした。

第 3 章では、3 年半にわたる OPV の屋外曝露の結果をもとに、実環境下における発電量の経年変化および季節変動について述べた。OPV に用いられる素材は多く、構造の違いも考慮すべき劣化メカニズムは多岐にわたる。室内劣化加速試験による劣化挙動やメカニズムの報告は多数あるものの、それに比べ屋外曝露による劣化解析の報告は極めて少ない。本研究では、まず発電設備の一つとして系統に連系されている、セミコマーシャルの OPV アレイについて発電量を解析した。その結果、これまで報告されている、初期の急激な劣

化と、続く二次劣化における緩やかな発電量の低下を確認した。OPV アレイの I - V 特性の経時観察から、初期劣化では I_{sc} の大幅減少と V_{oc} の減少がみられ、先行研究で報告されている Burn-in と類似の振る舞いを示した。それに加え、二次劣化では R_s の増大も見られ、一時劣化と異なる劣化モードが進行していることが示された。屋外測定データからは、初期劣化と二次劣化の他に、二次劣化中に発電量が夏季に上昇し冬季に低下する季節変動を見出した。また、室内測定の結果から、OPV モジュールの劣化はシステム電位によらないことが確認された。封止の破断といった故障モジュールは見られず、すべてのモジュールの劣化率に大きな差はなかった。さらに、屋外曝露されていた劣化 OPV モジュールにおいて、パルス型ソーラシミュレータの繰り返し測定にて、わずかに出力が上昇する傾向がみられた。光照射により OPV モジュールの出力が上昇する可能性が示唆されたため、1 年間暗所保管していた OPV モジュールを用いて光照射試験を行った。暗所保管されていた OPV モジュールは、光照射前の I - V 特性が S 字形状を強く示していたが、わずか 3.5 時間の光照射で P_{max} は初期値比 2.3 まで上昇し、飽和した。その後、OPV モジュールを暗所にて保管し続けたところ、 P_{max} は低下したが非常に長い時定数を有しており、20000 時間経過後の P_{max} は光照射前の初期値比 1.2 であった。本研究で用いた OPV モジュールは、光照射効果による発電性能の向上と、暗所保管による発電性能の低下という特徴を有し、さらにこれらが可逆変化であることを確認した。光照射効果による出力上昇飽和に比べ、暗所保管による出力低下は時定数が長いと、屋外曝露における積算発電量の評価において大きな影響はないことが分かった。

OPV アレイの発電量の季節変動の原因として、スペクトルの季節変動と過去の研究報告から熱アニールによる回復が考えられた。本研究ではまず、OPV モジュールの発電性能への熱の影響について調査した。熱履歴によって発電性能が変化するかを検証するため、二次劣化中の OPV モジュール 4 枚を曝露試験場の架台より取り外して、温度一定環境に保持することで発電性能が変化するかをソーラシミュレータを用いて経時的に観察した。実使用下におけるモジュール温度にて熱回復が起こりえるかを調べるため、実際の屋外測定データから恒温槽での保持温度を、 -10°C 、 10°C 、 30°C 、 60°C とした。その結果、 30°C 以下に保持した OPV モジュールでは熱回復が見られなかったが、 60°C に保持したモジュールでは熱回復が発生し、 P_{max} の増加は 120 時間以内に飽和した。さらに、測定温度を変化させてソーラシミュレータで繰り返し測定し、温度係数を求めたところ、二次劣化中のモジュールと劣化履歴がないモジュールで異なり、実運用下の OPV アレイの温度係

数が屋外曝露により変化したことが示唆された。二次劣化中のモジュールから計算された温度係数 $\gamma = 0.39 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$ を使用して求めた Monthly $\text{PR}_{T=25}$ から季節変動は消えなかった。恒温槽を使用した室内試験の結果及び $\text{PR}_{T=25}$ の季節変動から、OPV アレイの発電量の季節変動は気温の変動だけでなく熱回復によってももたらされることが明らかになった。

第4章では、これから市場のシェアを占めるといわれている PERC 太陽電池の発電量について、これまでに報告されている LID に焦点を絞り、導入初期の発電性能の変化について述べた。2 型式の PERC 太陽電池モジュールを対象に、光照射時の回路条件を変えて屋外曝露し、曝露している架台より間欠的に取り外して室内測定を行った。いずれの PERC 太陽電池も、屋外曝露開始直後に P_{\max} が低下し LID が観察されたが、開放回路条件においては一方だけ LIR が見られた。LIR が見られた PERC 太陽電池の P_{\max} は、他方の PERC 太陽電池よりも低下が大きく、積算日射量が僅か 3 kWh/m^2 までの屋外曝露で、いったん初期値比 95.6 まで低下し、その後約 102 kWh/m^2 までに僅かに LIR が見られた。さらに 687 kWh/m^2 までの屋外曝露を実施したところ、 P_{\max} は低下して初期値比 0.957 となった。さらに、系統連系され PCS を通して MPPT 負荷がかけられている PERC アレイの屋外測定データを解析した。10 か月間の屋外曝露によって、一方の PERC 太陽電池の $\text{PR}_{T=25}$ には緩やかな低下が見られ、他の回路条件と同様に LIR は観察されなかった。しかし、もう一方の PERC 太陽電池は、開放回路条件下で LIR が見られていたにも関わらず、MPPT 負荷条件において $\text{PR}_{T=25}$ は LIR を示さなかった。MPPT 負荷条件において LIR が見られなかったのは、曝露試験中の PERC 太陽電池モジュールの裏面温度の解析から、LID に比べ LIR に 50°C 以上の高温状態が必要であるからだと考えており、今後気候の変化でモジュールの温度が上昇すれば、LIR が見られる可能性がある。PERC 太陽電池の積算発電量を評価するためには、実際の環境において少なくとも 1 年以上の観察が必要であり、今後も測定を継続したい。

第5章では、第3章及び第4章で得られた知見から、OPV と PERC 太陽電池の発電性能について減衰曲線を推定し、準安定性が積算発電量に与える影響を検討した。積算日射量 x の関数である OPV の発電性能 $f(x)$ は、劣化を示す項である初期劣化 $D_1(x)$ と二次劣化 $D_2(x)$ および、回復を示す項である光照射効果 $R_1(x)$ と熱回復 $R_2(x)$ から成ると考え、劣化と回復の和で減衰曲線のモデルを提案した。初期劣化 $D_1(x)$ は過去の研究報告から、指数関数的劣化が示唆されている。また、二次劣化 $D_2(x)$ は標準試験条件下の室内測定により、積算日射量に対して強く直線性が示されることが明らかにされている。光照射効果はその時定

数から屋外の積算発電量に影響はないことが明らかなため $R_1=0$ とした。熱回復の項については、回復が必要とする温度条件の詳細データが不足しており、この項についてのモデル構築が困難なため、 $R_2=0$ とし、熱回復がある場合とない場合を想定しデータを抽出して、フィッティングを行った。その結果、OPV の初期劣化は遅くとも 1 年以内に収束傾向にあり、初期劣化は無視できないほど大きい、曝露開始 2 年目以降は劣化が直線的であり発電性能を予測しやすいことが分かった。初期劣化が収束する 1 年目の発電性能を 100% とすると、発電性能が 80% を維持できるのは曝露開始から 3 年程度であり、屋外にて系統連系された OPV の寿命と考えられる。現在議論されている OPV の室内用途であれば、照度が低いため、OPV の寿命はより長いと考えられる。また、熱回復による発電性能の回復割合は、初期値に対して一定のままであるため、長く使えば使うほど積算発電量に与える影響は大きい。一方、PERC 太陽電池において、使用期間を 20 年とし、発電性能の減衰曲線を検討したが、本研究の解析対象期間では曝露期間が短く推定式は得られなかった。本研究に用いた PERC 太陽電池 2 型式のうちの 1 型式では導入の極めて初期に約 5% の性能低下を見せており、LIR が起きない場合には積算発電量にとって無視できる大きさではない。本研究に用いた PERC 太陽電池は、まだ定常状態になっていないことが考えられるため、さらに調査を続けていく予定である。

本論文では、太陽電池の準安定性が積算発電量に与える影響について述べてきた。安定化までの時定数が長ければ長いほど、あるいは低下あるいは回復が大きい場合、積算発電量への影響は大きくなる。たとえば OPV において、光照射効果は積算発電量への影響はほとんどないが、熱回復による発電性能の向上は積算発電量への影響があった。OPV に使用される素材は多種あり、劣化メカニズムは多様であるが、発電性能の推定は丁寧にデータを解析することで、単純な式で求めることができた。一方で、PERC 太陽電池については安定化までに長い時間を要することが示唆され、積算発電量への影響について明確にするには、さらなる屋外曝露を要する。PERC 太陽電池の、屋外曝露における安定化までの時定数や、温度や照度といった安定化に必要な条件の詳細について、調査および解析を今後の課題として取り組んでいきたい。さらに、OPV の発電性能を推定する減衰曲線モデルにおける熱回復の項についての検討、室内用途を想定した低照度環境での発電性能の振る舞いの調査も今後の課題である。本論文では、都度与えられる環境パラメータにより変化する発電量ではなく、曝露履歴により変化する発電性能の特性である準安定性に焦点を絞った。長期安定化電源として資金獲得性を考慮した太陽光発電システムの設計には、劣化や

準安定性で変化する発電性能に加え、日射照度、温度、スペクトルなどの環境パラメータを考慮した発電量評価が必要であり、本論で実施できなかったスペクトルの影響について調査したい。

参考文献

- [1] International Energy Agency, “Trends in Photovoltaic Applications 2019”, Report IEA PVPS T1-36, 2019.
- [2] International Energy Agency, “Snapshot of Global Photovoltaic Markets 2019” Report IEA PVPS T1-35 2019.
- [3] A. E. Becquerel, “Mémoire sur les effets délectriques produits sous l’influence des rayons solaires”, *Comptes Rendus de l’Académie des Sciences*, vol. 9, pp. 561–567, 1839.
- [4] D. M. Chapin, C. S. Fuller, and G. L. Pearson, “A new silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electrical power”, *J. Appl. Phys.*, vol. 25, no. 5, pp. 676–677, 1954.
- [5] National Renewable Energy Laboratory, “Best Research-Cell Efficiencies Rev. 11-05-2019”, 2019.
- [6] C. W. Tang, “Two-layer organic photovoltaic cell”, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 48, no. 2, pp. 183–185, 1986.
- [7] Y. Yamada, T. Nakamura, M. Endo, A. Wakamiya, and Y. Kanemitsu, “Photocarrier recombination dynamics in perovskite $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ for solar cell applications”, *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 136, no. 33, pp. 11610–11613, 2014.
- [8] 経済産業省 資源エネルギー庁, “平成30年度エネルギーに関する年次白書”, 2019.
- [9] T. Minemoto, H. Takahashi, Y. Nakada, and H. Takakura, “Outdoor performance evaluation of photovoltaic modules using contour plots”, *Curr. Appl. Phys.*, vol. 10, no. 2, pp. 5257–9260, 2010.
- [10] K. Kamono and Y. Ueda, “Real-time estimation of areal photovoltaic power using weather and power flow data”, *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 9, no. 2, pp. 754–762, 2018.
- [11] F. Uno, H. Ohtake, M. Matsueda, and Y. Yamada, “A diagnostic for advance detection of forecast busts of regional surface solar radiation using multi-center grand ensemble forecasts”, *Sol. Energy*, vol. 162, pp. 196–204, 2018.
- [12] C. R. Osterwald, J. Adelstein, J. A. del Cueto, W. Sekulic, D. Trudell, P. McNutt, R. Hansen, S. Rummel, A. Anderberg and T. Moriarty, “Resistive loading of photovoltaic modules and

- arrays for long-term exposure testing”, *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 14, no. 6, pp. 567–575, 2006.
- [13] D. C. Jordan and S. R. Kurtz, “Photovoltaic degradation rates—an analytical review”, *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, vol. 21, no. 1, pp. 12–29, 2013.
- [14] J. Lopez-Garcia and T. Sample, “Evolution of measured module characteristics versus labelled module characteristics of crystalline silicon based PV modules”, *Sol. Energy*, vol. 160, pp. 252–259, 2018.
- [15] Y. Ohtake, K. Kushiya, M. Ichikawa, A. Yamada, and M. Konagai, “Polycrystalline Cu(InGa)Se₂ thin-film solar cells with ZnSe buffer layers”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 34, no.11, pp. 5949–5955, 1995.
- [16] K. Kushiya, T. Nii, I. Sugiyama, Y. Sato, Y. Inamori, and H. Takeshita, “Application of Zn-compound buffer layer for polycrystalline CuInSe₂-based thin-film solar cells”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 35, no. 8, pp. 4383–4388, 1996.
- [17] D. L. Staebler and C. R. Wronski, “Reversible conductivity changes in discharge-produced amorphous Si”, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 31, no. 4, pp. 292–294, 1977.
- [18] S. Choi, T. Ishii, R. Sato, Y. Chiba, and A. Masuda, “Performance degradation due to outdoor exposure and seasonal variation in amorphous silicon photovoltaic modules”, *Thin Solid Films*, vol. 661, pp. 116–121, 2018.
- [19] S. Choi, R. Sato, T. Ishii, Y. Chiba, and A. Masuda, “Time-dependent changes in copper indium gallium (di)selenide and cadmium telluride photovoltaic modules due to outdoor exposure”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 56, no. 8S2, p. 08MD06, 2017.
- [20] Y. Chiba, T. Ishii, R. Sato, S. Choi, and A. Masuda, “Overall analysis of change in power generation with outdoor exposure of photovoltaic modules installed at AIST Kyushu Center”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 57, no. 8S3, p. 08RG04, 2018.
- [21] T. Ishii, R. Sato, S. Choi, Y. Chiba, and A. Masuda, “Development of a practical method of estimating electric power from various photovoltaic technologies with high precision”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 56, no. 8S2, p. 08MD05, 2017.
- [22] T. Ishii and A. Masuda, “Annual degradation rates of recent crystalline silicon photovoltaic modules”, *Prog. Photovoltaics Res: Appl.*, vol. 25, no. 12, pp. 953–967, 2017.
- [23] International Electrotechnical Commission, “Photovoltaic devices - ALL PARTS”, *IEC*

60904:2020 SER Series, 2020.

- [24] International Electrotechnical Commission, “Terrestrial photovoltaic (PV) modules - Design qualification and type approval - Part 1: Test requirements”, *IEC 61215-1:2016*, Ed. 1.0, 2016.
- [25] M. Bliss, T. Betts, R. Gottschalg, E. Salis, H. Müllejans, S. Winter, I. Kroeger, K. Bothe, D. Hinken and J. Hohl-Ebinger, “Interlaboratory comparison of short-circuit current versus irradiance linearity measurements of photovoltaic devices”, *Sol. Energy*, vol. 182, pp. 256–263, 2019.
- [26] H. Müllejans and E. Salis, “Linearity of photovoltaic devices: Quantitative assessment with *N*-lamp method”, *Meas. Sci. Technol.*, vol. 30, no. 6, p.065008, 2019.
- [27] International Electrotechnical Commission, “Photovoltaic devices - Part 10: Methods of Linearity Measurement”, *IEC 60904-10:2009*, Ed. 2.0, 2009.
- [28] ASTM International, *Reference Solar Spectral Irradiances: ASTM G-173*.
- [29] International Electrotechnical Commission, “Photovoltaic devices -Part 3: Measurement principles for terrestrial photovoltaic (PV) solar devices with reference spectral irradiance data”, *IEC 60904-3:2019*, Ed. 4.0, 2019.
- [30] M. A. Green, “General temperature dependence of solar cell performance and implications for device modelling”, *Prog. Photovoltaics: Res.*, vol. 11, no. 5, pp. 333-340, 2003.
- [31] C. R. Osterwald, “Translation of device performance measurements to reference conditions”, *Sol. Cells*, vol. 18, nos. 3-4, pp. 269-279, 1986.
- [32] Y. Hishikawa, M. Yoshita, H. Ohshima, K. Yamagoe, H. Shimura, A. Sasaki and T. Ueda, “Temperature dependence of the short circuit current and spectral responsivity of various kinds of crystalline silicon photovoltaic devices”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 57, no. 8S3, pp. 08RG17, 2018.
- [33] International Electrotechnical Commission, “Photovoltaic devices – Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics”, *IEC 60891:2009*, Ed. 2.0, 2009.
- [34] Y. Riesen, M. Stuckelberger, F. -J. Haug, C. Ballif, and N. Wyrsh, “Temperature dependence of hydrogenated amorphous silicon solar cell performances”, *J. Appl. Phys.*, vol. 119, no. 4, p. 044505, 2016.

- [35] A. R. Gxasheka, E. E. Van Dyk, and E. L. Meyer, "Evaluation of performance parameters of PV modules deployed outdoors", *Renew. Energy*, vol. 30, no. 4, pp. 611–620, 2005.
- [36] International Electrotechnical Commission, "Photovoltaic devices - Part 9: Solar simulator performance requirements", *IEC 60904-9:2007*, Ed. 2.0, 2007.
- [37] S. A. Gevorgyan, M. V. Madsen, H. F. Dam, M. Jørgensen, C. J. Fell, K. F. Anderson, B. C. Duck, A. Mescheloff, E. A. Katz, A. Elschner, R. Roesch, H. Hoppe, M. Hermenau, M. Riede and F. C. Krebs, "Interlaboratory outdoor stability studies of flexible roll-to-roll coated organic photovoltaic modules: Stability over 10,000 h", *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 116, pp. 187–196, 2013.
- [38] C. Owens, G. M. Ferguson, M. Hermenau, E. Voroshazi, Y. Galagan, B. Zimmermann, R. Rosch, D. Angamo, G. Teran, C. Uhrich, R. Andriessen, H. Hoppe, U. Wurfel, M. Lira-Cantu, F. Krebs and D. Tanenbaum, "Comparative indoor and outdoor degradation of organic photovoltaic cells via inter-laboratory collaboration", *Proc. 42nd IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 2015.
- [39] M. O. Reese, S. A. Gevorgyan, M. Jørgensen, E. Bundgaard, S. R. Kurtz, D. S. Ginley, D. C. Olson, M. T. Lloyd, P. Morvillo, E. A. Katz, A. Elschner, O. Haillant, T. R. Currier, V. Shrotriya, M. Hermenau, M. Riede, K. R. Kirov, G. Trimmel, T. Rath, O. Inganäs, F. Zhang, M. Andersson, K. Tvingstedt, M. Lira-Cantu, D. Laird, C. McGuiness, S. Gowrisanker, M. Pannone, M. Xiao, J. Hauch, R. Steim, D. M. DeLongchamp, R. Rösch, H. Hoppe, N. Espinosa, A. Urbina, G. Yaman-Uzunoglu, J. B. Bonekamp, A. J. J. M. van Breemen, C. Girotto, E. Voroshazi and F. C. Krebs, "Consensus stability testing protocols for organic photovoltaic materials and devices", *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 95, no. 5, pp. 1253–1267, 2011.
- [40] W. R. Mateker and M. D. McGehee, "Progress in understanding degradation mechanisms and improving stability in organic photovoltaics", *Adv. Mater.*, vol. 29, no. 10, p. 1603940, 2017.
- [41] C. H. Peters, I. T. Sachs-Quintana, J. P. Kastrop, S. Beaupré, M. Leclerc, and M. D. McGehee, "High efficiency polymer solar cells with long operating lifetimes," *Adv. Energy Mater.*, vol. 1, no. 4, pp. 491–494, 2011.
- [42] R. Roesch, K. -R. Eberhardt, S. Engmann, G. Gobsch, and H. Hoppe, "Polymer solar cells

- with enhanced lifetime by improved electrode stability and sealing”, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 117, pp. 56-66, 2013.
- [43] Q. Burlingame, X. Tong, J. Hankett, M. Sloatsky, Z. Chen, and S. R. Forrest, “Photochemical origins of burn-in degradation in small molecular weight organic photovoltaic cells”, *Energy Environ. Sci.*, vol. 8, no. 3, pp. 1005–1010, 2015.
- [44] R. Roesch, T. Faber, E. von Hauff, T. M. Brown, M. Lira-Cantu, and H. Hoppe, “Procedures and practices for evaluating thin-film solar cell stability,” *Adv. Energy Mater.*, vol. 5, no. 20, pp. 1501407, 2015.
- [45] C. H. Peters, I. T. Sachs-Quintana, W. R. Mateker, T. Heumueller, J. Rivnay, R. Noriega, Z. M. Beiley, E. T. Hoke, A. Salleo and M. D. McGehee, “The mechanism of burn-in loss in a high efficiency polymer solar cell”, *Adv. Mater.*, vol. 24, no. 5, pp. 663–668, 2012.
- [46] K. Sakurai, H. Tomita, D. Schmitz, S. Tokuda, K. Ogawa, H. Shibata, and A. Masuda, “Exploring suitable damp heat and potential induced degradation test procedures for Cu(In,Ga)(S,Se) photovoltaic modules”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 57, no. 8S3, p. 08RG02, 2018.
- [47] N. Bristow and J. Kettle, “Outdoor organic photovoltaic module characteristics: Benchmarking against other PV technologies for performance, calculation of Ross coefficient and outdoor stability monitoring”, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 175, pp. 52–59, 2018.
- [48] M. R. Lilliedal, A. J. Medford, M. V. Madsen, K. Norrman, and F. C. Krebs, “The effect of post-processing treatments on inflection points in current-voltage curves of roll-to-roll processed polymer photovoltaics”, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 94, no. 12, pp. 2018–2031, 2010.
- [49] F. Verbakel, S. C. J. Meskers, and R. A. J. Janssen, “Electronic memory effects in diodes from a zinc oxide nanoparticle-polystyrene hybrid material”, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 89, no. 10, p. 122103, 2006.
- [50] Y. Liu, J. Zhao, Z. Li, C. Mu, W. Ma, H. Hu, K. Jiang, H. Lin, H. Ade and H. Yan, “Aggregation and morphology control enables multiple cases of high-efficiency polymer solar cells”, *Nat. Commun.*, vol. 5, p.5293, 2014.
- [51] L. H. Rossander, L. H. Rossander, H. F. Dam, J. E. Carlé, M. Helgesen, I. Rajkovic, M. Corazza, F. C. Krebs and J. W. Andreasen, “In-line, roll-to-roll morphology analysis of

- organic solar cell active layers”, *Energy Environ. Sci.*, vol. 10, no. 11, pp. 2411–2419, 2017.
- [52] N. Bristow and J. Kettle, “Outdoor performance of organic photovoltaics: Diurnal analysis, dependence on temperature, irradiance, and degradation,” *J. Renew. Sustain. Energy*, vol. 7, no. 1, p. 013111, 2015.
- [53] S. Shah and R. Biswas, “Atomic pathways underlying light-induced changes in organic solar cell materials”, *J. Phys. Chem. C*, vol. 119, no. 38, pp. 20215–20271, 2015.
- [54] K. Kawano and C. Adachi, “Evaluating carrier accumulation in degraded bulk heterojunction organic solar cells by a thermally stimulated current technique”, *Adv. Funct. Mater.*, vol. 19, no. 24, pp. 3934–3940, 2009.
- [55] J. Bhattacharya, P. H. Joshi, R. Biswas, and V. L. Dalal, “Pathway for recovery of photo-degraded polymer solar cells by post degradation thermal anneal”, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 164, pp. 70–79, 2017.
- [56] T. Kuwabara, K. Yano, T. Yamaguchi, T. Taima, K. Takahashi, D. Son, and K. Marumoto, “Mechanistic investigation into the light soaking effect observed in inverted polymer solar cells containing chemical bath deposited titanium oxide”, *J. Phys. Chem. C*, vol. 119, no. 10, pp. 5274–5280, 2015.
- [57] T. Kuwabara, C. Tamai, Y. Omura, T. Yamaguchi, T. Taima, and K. Takahashi, “Effect of UV light irradiation on photovoltaic characteristics of inverted polymer solar cells containing sol-gel zinc oxide electron collection layer”, *Org. Electron.*, vol. 14, no. 2, pp. 649–656, 2013.
- [58] R. Di Pietro, D. Fazzi, T. B. Kehoe, and H. Sirringhaus, “Spectroscopic investigation of oxygen- and water-induced electron trapping and charge transport instabilities in n-type polymer semiconductors”, *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 134, no. 36, pp. 14877–14889, 2012.
- [59] T. Nagamori and K. Marumoto, “Direct observation of hole accumulation in polymer solar cells during device operation using light-induced electron spin resonance”, *Adv. Mater.*, vol. 25, no. 16, pp. 2362–2367, 2013.
- [60] T. Kubodera, M. Yabusaki, V. A. S. A. Rachmat, Y. Cho, T. Yamanari, Y. Yoshida, N. Kobayashi and K. Marumoto, “Operando direct observation of charge accumulation and the correlation with performance deterioration in PTB7 Polymer Solar Cells”, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 10, no. 31, pp. 26434–26442, 2018.
- [61] T. Yamanari, H. Ogo, T. Taima, J. Sakai, J. Tsukamoto, and Y. Yoshida, “Photo-degradation

- and its recovery by thermal annealing in polymer-based organic solar cells”, *Proc. 35th IEEE Photovoltaic Speciality Conference*, pp. 1628–1631, 2010.
- [62] Q. Burlingame, X. Tong, J. Hankett, M. Slootsky, Z. Chen, and S. R. Forrest, “Photochemical origins of burn-in degradation in small molecular weight organic photovoltaic cells”, *Energy Environ. Sci.*, vol. 8, no. 3, pp. 1005–1010, 2015.
- [63] M. Kasu, J. Abdu, S. Hara, S. Choi, Y. Chiba, and A. Masuda, “Temperature dependence measurements and performance analyses of high-efficiency interdigitated back-contact, passivated emitter and rear cell, and silicon heterojunction photovoltaic modules”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 57, no. 8S3, p. 08RG18, 2018.
- [64] Y. Hishikawa, T. Doi, M. Higa, K. Yamagoe, H. Ohshima, T. Takenouchi and M. Yoshita, “Voltage-dependent temperature coefficient of the I - V curves of crystalline silicon photovoltaic modules,” *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 8, no. 1, pp. 48–53, 2018.
- [65] M. Shima, M. Isomura, K. Wakisaka, K. Murata, and M. Tanaka, “The influence of operation temperature on the output properties of amorphous silicon-related solar cells”, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 85, no. 2, pp. 167–175, 2005.
- [66] T. Dullweber and J. Schmidt, “Industrial silicon solar cells applying the passivated emitter and rear cell (PERC) concept -A review”, *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 6, no. 5, pp.1366-1381, 2016.
- [67] Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA), “International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV)”, 2019.
- [68] E. Cho, A. Rohatgi, and Y. W. Ok, “Comparison of light-induced degradation and regeneration in P-type monocrystalline full aluminum back surface field and passivated emitter rear cells”, *Curr. Appl. Phys.*, vol. 18, no. 12, pp. 1600–1604, 2018.
- [69] F. Kersten, F. Kersten, F. Fertig, K. Petter, B. Klöter, E. Herzog, M. B. Strobel, J. Heitmann and J. W. Müller, “System performance loss due to LeTID”, *Energy Procedia*, vol. 124, pp. 540–546, 2017.
- [70] D. Chen, D. Chen, M. Kim, B. V. Stefani, B. J. Hallam, M. D. Abbott, C. E. Chan, R. Chen, D. N.R. Payne, N. Nampalli, A. Ciesla, T. H. Fung, K. Kim and S. R. Wenham, “Evidence of an identical firing-activated carrier-induced defect in monocrystalline and multicrystalline silicon”, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 172, pp. 293–300, 2017.

- [71] F. Kersten, P. Engelhart, H. C. Ploigt, A. Stekolnikov, T. Lindner, F. Stenzel, M. Bartzsch, A. Szpeth, K. Petter, J. Heitmann and J. W. Müller, “Degradation of multicrystalline silicon solar cells and modules after illumination at elevated temperature”, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 142, pp. 83–86, 2015.
- [72] A. Herguth, G. Schubert, M. Kaes, and G. Hahn, “Investigations on the long time behavior of the metastable boron-oxygen complex in crystalline silicon”, *Prog. Photovoltaics: Res. Appl.*, vol. 16, no. 2, pp. 135-140, 2008.
- [73] J. Lindroos and H. Savin, “Review of light-induced degradation in crystalline silicon solar cells”, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 147, pp. 115–126, 2016.
- [74] B. Lim, K. Bothe, and J. Schmidt, “Impact of oxygen on the permanent deactivation of boron-oxygen-related recombination centers in crystalline silicon”, *J. Appl. Phys.*, vol. 107, no. 12, pp. 123707, 2010.
- [75] C. Bin Mo, S. Park, S. Bae, S. J. Park, Y. -S. Kim, J. Yang, H. Kim, D. Suh and Y. Kang, “Minimizing light-induced degradation of the Al_2O_3 rear passivation layer for highly efficient PERC solar cells”, *ECS J. Solid State Sci. Technol.*, vol. 7, no. 12, pp. Q253–Q258, 2018.
- [76] D. Chen, P. G. Hamer, M. Kim, T. H. Fung, G. Bourret-Sicotte, S. Liu, C. E. Chan, A. Ciesla, R. Chen, M. D. Abbott, B. J. Hallam and S. R. Wenham, “Hydrogen induced degradation: A possible mechanism for light- and elevated temperature- induced degradation in n-type silicon”, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 185, pp. 174–182, 2018.
- [77] C. Vargas, K. Kim, G. Coletti, D. Payne, C. Chan, S. Wenham and Z. Hameiri, “Carrier-induced degradation in multicrystalline silicon: dependence on the silicon nitride passivation layer and hydrogen released during firing”, *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 8, no. 2, pp. 413–420, 2018.
- [78] H. Huang, J. Lv, Y. Bao, R. Xuan, S. Sun, S. Sneck, S. Li, C. Modanese, H. Savin, A. Wang and J. Zhao, “20.8% industrial PERC solar cell: ALD Al_2O_3 rear surface passivation, efficiency loss mechanisms analysis and roadmap to 24%”, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 161, pp. 14–30, 2017.
- [79] C. Olalla, Md. N. Hasan, C. Deline, and D. Maksimović, “Mitigation of hot-spots in photovoltaic systems using distributed power electronics”, *Energies*, vol. 11, no. 4, p. 726,

2018.

- [80] A. Compagnin, M. Meneghini, M. Barbato, V. Giliberto, A. Cester, M. Vanzi, G. Mura, E. Zanoni, and G. Meneghesso, “Thermal and electrical investigation of the reverse bias degradation of silicon solar cells”, *Microelectron. Reliab.*, vol. 53, nos. 9–11, pp. 1809–1813, 2013.
- [81] M. Simon and E. L. Meyer, “Detection and analysis of hot-spot formation in solar cells”, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 94, no. 2, pp. 106–113, 2010.
- [82] W. Wu, Z. Zhang, F. Zheng, W. Lin, Z. Liang, and H. Shen, “Efficiency enhancement of bifacial PERC solar cells with laser-doped selective emitter and double-screen-printed Al grid”, *Prog. Photovoltaics: Res. Appl.*, vol. 26, no. 9, pp. 752–760, 2018.
- [83] G. Wirth, E. Lorenz, A. Spring, G. Becker, R. Pardatscher, and R. Witzmann, “Modeling the maximum power output of a distributed PV fleet”, *Prog. Photovoltaics: Res. Appl.*, vol. 23, no. 9, pp. 1164–1181, 2015.
- [84] G. Chicco, V. Cocina, P. Di Leo, F. Spertino, and A. Massi Pavan, “Error assessment of solar irradiance forecasts and AC power from energy conversion model in grid-connected photovoltaic systems”, *Energies*, vol. 9, no. 1, p. 8, 2016.
- [85] E. Voroshazi, B. Verreet, T. Aernouts, and P. Heremans, “Long-term operational lifetime and degradation analysis of P3HT:PCBM photovoltaic cells”, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 95, no. 5, pp. 1303–1307, 2011.
- [86] A. Masuda, N. Uchiyama, and Y. Hara, “Degradation by acetic acid for crystalline Si photovoltaic modules”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 54, no.4S p. 04DR04, 2015.

業績リスト

① 査読付き論文

- 1) Tetsuyuki Ishii, **Ritsuko Sato**, Sungwoo Choi, Yasuo Chiba, Atsushi Masuda, "Development of a practical method of estimating electric power from various photovoltaic technologies with high precision", Japanese Journal of Applied Physics, vol. 56, pp. no. 8S2, 08MD05-1-5, 2017.7.19. DOI: 10.7567/JJAP.56.08MD05
- 2) Sungwoo Choi, **Ritsuko Sato**, Tetsuyuki Ishii, Yasuo Chiba, Atsushi Masuda, "Time-dependent changes in copper indium gallium (di)selenide and cadmium telluride photovoltaic modules due to outdoor exposure", Japanese Journal of Applied Physics, vol. 56, no. 8S2, pp. 08MD06-1-5, 2017.7.25. DOI: 10.7567/JJAP.56.08MD06
- 3) Yasuo Chiba, Tetsuyuki Ishii, **Ritsuko Sato**, Sungwoo Choi, Atsushi Masuda, "Overall analysis of change in power generation by outdoor exposure of photovoltaic modules installed at AIST Kyushu Center", Japanese Journal of Applied Physics, vol. 57, no. 8S3, pp. 08RG04-1-5, 2018.7.6. DOI: /10.7567/JJAP.57.08RG04
- 4) Sungwoo Choi, Tetsuyuki Ishii, **Ritsuko Sato**, Yasuo Chiba, Atsushi Masuda, "Performance degradation due to outdoor exposure and seasonal variation in amorphous silicon photovoltaic modules", Thin Solid Films, vol. 661, pp. 116-121, 2018.9.1. DOI: 10.1016/j.tsf.2018.07.017
- 5) **Ritsuko Sato**, Yasuo Chiba, Masayuki Chikamatsu, Yuji Yoshida, Tetsuya Taima, Makoto Kasu, Atsushi Masuda, "Investigation of the power generation of organic photovoltaic modules connected to the power grid for more than three years", Japanese Journal of Applied Physics, vol. 58, no. 5, pp. 052001-1-9, 2019.4.10. DOI: 10.7567/1347-4065/ab0742
- 6) **Ritsuko Sato**, Tetsuyuki Ishii, Sungwoo Choi, Yasuo Chiba, Makoto Kasu, Atsushi Masuda, "Output power behavior of passivated emitter and rear cell photovoltaic modules during early installation stage: Influence of light-induced degradation", Japanese Journal of Applied Physics, vol. 58, no. 10, pp. 106510-1-7, 2019.10.4. DOI: 10.7567/1347-4065/ab42ba
- 7) **Ritsuko Sato**, Yasuo Chiba, Masayuki Chikamatsu, Yuji Yoshida, Tetsuya Taima, Makoto Kasu, Atsushi Masuda, "Characteristics change in organic photovoltaics by thermal recovery and photodegradation", Japanese Journal of Applied Physics, vol. 59, no. SC, pp. SCCD04-1-7,

② 国際会議プロシーディングス

- 1) Keiichiro Sakurai, Ryo Morinaga, **Ritsuko Sato**, Masanao Inoue, Kohjiro Hara, Atsushi Masuda, "Outdoor PID acceleration testing in Japan: a comparison with indoor testing and known results", Proceedings of 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, pp. 3355-3356, 2014. DOI: 10.4229/EUPVSEC20142014-5DV.3.9
- 2) Keiichiro Sakurai, Ryo Morinaga, **Ritsuko Sato**, Minoru Akitomi, Atsushi Masuda, "Outdoor PID acceleration testing in Japan: Effects of regular wetting and interruption", Proceedings of 31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, pp. 2513-2514, 2015. DOI: 10.4229/EUPVSEC20152015-5CV.2.19
- 3) Tetsuyuki Ishii, **Ritsuko Sato**, Sungwoo Choi, Yasuo Chiba, Atsushi Masuda, "Potential-induced degradation of photovoltaic modules composed of interdigitated back contact solar cells observed in an actual photovoltaic system", Proceedings of 33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, pp. 1414-1417, 2017. DOI: 10.4229/EUPVSEC20172017-5CO.6.3
- 4) **Ritsuko Sato**, Sungwoo Choi, Yasuo Chiba, Tetsuyuki Ishii, Atsushi Masuda, "Change in output power by light soaking for high efficiency crystalline silicon photovoltaic modules", Proceedings of 33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, pp. 1720-1722, 2017. DOI: 10.4229/EUPVSEC20172017-5BV.4.76
- 5) Yasuo Chiba, **Ritsuko Sato**, Tadashi Hirayama, Shuma Kawabata, Yukio Yoshimura, Atsushi Masuda, "Analyses of photovoltaic modules influenced by volcanic ashes at Kagoshima in Japan", Proceedings of 33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, pp. 1802-1804, 2017. DOI: 10.4229/EUPVSEC20172017-5DV.3.23
- 6) Yasuo Chiba, Tetsuyuki Ishii, **Ritsuko Sato**, Sungwoo Choi, Atsushi Masuda, "Comparison between estimated and actual power generation amounts of photovoltaic modules at Tosu City in Japan", Proceedings of 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, pp. 681-683, 2018. DOI: 10.1109/PVSC.2018.8548104
- 7) Tetsuyuki Ishii, Sungwoo Choi, **Ritsuko Sato**, Yasuo Chiba, Atsushi Masuda, "Annual degradation rates of recent c-Si PV modules under subtropical coastal climate conditions", Proceedings of 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, pp. 705-708, 2018.

- 8) Tetsuyuki Ishii, Sungwoo Choi, **Ritsuko Sato**, Yasuo Chiba, Atsushi Masuda, "Annual degradation rates estimated from outdoor and indoor performance under STC", Grand Renewable Energy 2018 Proceedings, 2018.

③ 国際会議発表

- 1) Keiichiro Sakurai, Ryo Morinaga, **Ritsuko Sato**, Masanao Inoue, Kohjiro Hara, Atsushi Masuda, "Outdoor PID acceleration testing in Japan: a comparison with indoor testing and known results", 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 5DV.3.9, Amsterdam, The Netherlands, 2014.9.25.
- 2) Keiichiro Sakurai, **Ritsuko Sato**, Masanao Inoue, Minoru Akitomi, Atsushi Masuda, "Outdoor PID acceleration by regular water spraying", AIST-NREL Joint Workshop on Photovoltaics, P8, Koriyama, Fukushima, Japan, 2014.11.21.
- 3) Keiichiro Sakurai, **Ritsuko Sato**, Minoru Akitomi, Ryo Morinaga, Atsushi Masuda, "Outdoor PID acceleration testing in Japan: Effects of regular wetting and interruption", 31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 5CV.2.19, Hamburg, Germany, 2015.9.16.
- 4) Sungwoo Choi, **Ritsuko Sato**, Tetsuyuki Ishii, Yasuo Chiba, Atsushi Masuda, "Time-dependent changes in CIGS and CdTe photovoltaic modules due to outdoor exposure", 26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference, 4.3.2b, Singapore, 2016.10.26.
- 5) Tetsuyuki Ishii, **Ritsuko Sato**, Sungwoo Choi, Yasuo Chiba, Atsushi Masuda, "Development of a methodology to estimate electric power from various photovoltaic technologies", 26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference, 4.4.2b, Singapore, 2016.10.26.
- 6) Yasuo Chiba, Sungwoo Choi, **Ritsuko Sato**, Tetsuyuki Ishii, Atsushi Masuda, "Relationship between performance ratio and indoor power output measurements for various photovoltaic modules at AIST Kyushu Center", 26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference, 5_4-0007, Singapore, 2016.10.27.
- 7) Sungwoo Choi, **Ritsuko Sato**, Tetsuyuki Ishii, Yasuo Chiba, Atsushi Masuda, "Degradation characteristics of thin film photovoltaic modules by outdoor exposure", Global Photovoltaic Conference 2017, 2017.3.16.
- 8) **Ritsuko Sato**, Sungwoo Choi, Yasuo Chiba, Tetsuyuki Ishii, Atsushi Masuda, "Change in output

power by light soaking for high efficiency crystalline silicon photovoltaic modules", 33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 5BV.4.76, Amsterdam, The Netherlands, 2017.9.26.

- 9) Tetsuyuki Ishii, **Ritsuko Sato**, Sungwoo Choi, Yasuo Chiba, Atsushi Masuda, "Potential-induced degradation of photovoltaic modules composed of interdigitated back contact solar cells observed in an actual photovoltaic system", 33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 5CO.6.3, Amsterdam, The Netherlands, 2017.9.27.
- 10) Yasuo Chiba, **Ritsuko Sato**, Tadashi Hirayama, Shuma Kawabata, Yukio Yoshimura, Atsushi Masuda, "Analyses of photovoltaic modules influenced by volcanic ashes at Kagoshima in Japan", 33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 5DV.3.23, Amsterdam, The Netherlands, 2017.9.28.
- 11) Yasuo Chiba, **Ritsuko Sato**, Sungwoo Choi, Tetsuyuki Ishii, Atsushi Masuda, "Analyses of change in power generation by outdoor exposure of photovoltaic modules installed at AIST Kyushu Center from 2010 to 2016", 27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference, 7MoO6.6, Otsu, Shiga, Japan, 2017.11.13.
- 12) Tetsuyuki Ishii, Sungwoo Choi, **Ritsuko Sato**, Yasuo Chiba, Atsushi Masuda, "Reliability investigation of five technologies under actual operating conditions for six years", 27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference, 7TuPo.206, Otsu, Shiga, Japan, 2017.11.14.
- 13) Sungwoo Choi, **Ritsuko Sato**, Tetsuyuki Ishii, Yasuo Chiba, Atsushi Masuda, "Degradation and seasonal effects of amorphous silicon modules due to outdoor expose by indoor and outdoor measurements", 27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference, 7TuPo.211, Otsu Shiga, Japan, 2017.11.14.
- 14) **Ritsuko Sato**, Yasuo Chiba, Masayuki Chikamatsu, Yuji Yoshida, Atsushi Masuda, "Change in output power of organic photovoltaic module connected the electric power grid for 2 years", "27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference, 4ThO3.4, Otsu, Shiga, Japan, 2017.11.16.
- 15) Yasuo Chiba, Tetsuyuki Ishii, **Ritsuko Sato**, Sungwoo Choi, Atsushi Masuda, "Comparison between estimated and actual power generation amounts of photovoltaic modules at Tosu city in Japan", 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, J4 220, Waikoloa, HI, USA,

2018.6.11.

- 16) Tetsuyuki Ishii, Sungwoo Choi, **Ritsuko Sato**, Yasuo Chiba, Atsushi Masuda, "Annual degradation rates of recent c-Si PV modules under subtropical coastal climate conditions", 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, J10 226, Waikoloa, HI, USA, 2018.6.11.
- 17) Tetsuyuki Ishii, Sungwoo Choi, **Ritsuko Sato**, Yasuo Chiba, Atsushi Masuda, "Annual degradation rates estimated from outdoor and indoor performance under STC", Grand Renewable Energy 2018 International Conference and Exhibition, O-Pv-4-1, Yokohama, Kanagawa, Japan, 2018.6.20.
- 18) Sungwoo Choi, Tetsuyuki Ishii, **Ritsuko Sato**, Yasuo Chiba, Atsushi Masuda, "Degradation of photovoltaic performance due to outdoor exposure at AIST Kyushu Center in Japan", 35th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 5BO.12.3, Brussels, Belgium, 2018.9.25.
- 19) **Ritsuko Sato**, Yasuo Chiba, Masayuki Chikamatsu, Yuji Yoshida, Makoto Kasu, Tetsuya Taima, Atsushi Masuda, "Metastability of power generation amount in organic photovoltaics experienced by different temperature conditions", 7th International Symposium on Organic and Inorganic Electronic Materials and Related Nanotechnologies, SB-7, Nagano, Japan, 2019.6.21.
- 20) Yasuo Chiba, Tetsuyuki Ishii, **Ritsuko Sato**, Sungwoo Choi, Atsushi Masuda, "Estimated power generation amounts calculated by using the degradation rate of photovoltaic modules exposed outdoors in Japan", 29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference, Xi'an, Shaanxi, China, 2019.11.8.
- 21) Tetsuyuki Ishii, Sungwoo Choi, Ritsuko Sato, Yasuo Chiba, Atsushi Masuda, "Annual degradation rates of high-efficiency crystalline silicon photovoltaic technologies estimated from indoor and outdoor measurements", 4th International Workshop on the Sustainable Actions for "Year by Year Aging" under Reliability Investigations in Photovoltaic Module, Tokyo, Japan, 2019.11.18.

④ 国内会議発表

- 1) 石井 徹之、崔 誠佑、佐藤 梨都子、増田 淳、「各種結晶シリコン太陽電池の実使用下における発電特性の経年変化」、第 13 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム、M-21、新潟県長岡市、2016.5.19.
- 2) 佐藤 梨都子、崔 誠佑、石井 徹之、増田 淳、「実運用下における薄膜シリコン系太陽電池モジュールの経年変化について」、第 13 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム、M-24、新潟県長岡市、2016.5.19.
- 3) 崔 誠佑、佐藤 梨都子、石井 徹之、増田 淳、「化合物系薄膜太陽電池モジュールの屋外曝露による経年劣化」、第 13 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム、M-25、新潟県長岡市、2016.5.19.
- 4) 崔 誠佑、佐藤 梨都子、石井 徹之、千葉 恭男、増田 淳、「薄膜系太陽電池モジュールの屋外曝露による経時変化の検討」、第 77 回応用物理学会秋季学術講演会、14a-A34-7、新潟県新潟市、2016.9.14.
- 5) 千葉 恭男、崔 誠佑、佐藤 梨都子、石井 徹之、増田 淳、「屋外曝露した薄膜系太陽電池モジュールのシステム出力係数と屋内測定値の相関」、第 77 回応用物理学会秋季学術講演会、15p-P13-17、新潟県新潟市、2016.9.15.
- 6) 崔 誠佑、佐藤 梨都子、石井 徹之、千葉 恭男、増田 淳、「薄膜系太陽電池モジュールの屋外発電量評価と屋内測定評価」、平成 28 年度九州・沖縄産業技術オープンイノベーション、福岡県福岡市、2016.12.7.
- 7) 千葉 恭男、崔 誠佑、佐藤 梨都子、石井 徹之、増田 淳、「化合物系薄膜太陽電池モジュールに対する光照射の検討」、第 64 回応用物理学会春季学術講演会、15p-P16-1、神奈川県横浜市、2017.3.15.
- 8) 佐藤 梨都子、崔 誠佑、千葉 恭男、石井 徹之、増田 淳、「光照射による高効率結晶シリコン太陽電池モジュールの出力変化」、第 64 回応用物理学会春季学術講演会、16p-211-1、神奈川県横浜市、2017.3.16.
- 9) 石井 徹之、佐藤 梨都子、崔 誠佑、千葉 恭男、増田 淳、「近年に製造された結晶シリコン太陽電池モジュールの年劣化率の評価」、第 64 回応用物理学会春季学術講演会、16p-211-2、神奈川県横浜市、2017.3.16.
- 10) 崔 誠佑、佐藤 梨都子、石井 徹之、千葉 恭男、増田 淳、「屋外曝露された結晶シリコン系太陽電池の室内測定による劣化率の検討」、第 14 回「次世代の太陽光発電システ

- ム」シンポジウム、M-5、愛知県名古屋市、2017.7.20.
- 11) 千葉 恭男、佐藤 梨都子、平山 斉、川畑 秋馬、吉村 幸雄、増田 淳、「降灰地域に設置された太陽電池モジュールの解析」、第 14 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム、M-8、愛知県名古屋市、2017.7.20.
 - 12) Jaffar Abdu、原 重臣、佐藤 梨都子、千葉 恭男、増田 淳、嘉数 誠、"Temperature characteristics of photovoltaic modules"、第 14 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム、M-26、愛知県名古屋市、2017.7.20.
 - 13) 石井 徹之、佐藤 梨都子、崔 誠佑、千葉 恭男、増田 淳、「実使用下にあるバックコンタクト太陽電池にみられる PID 現象」、第 14 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム、愛知県名古屋市、2017.7.21.
 - 14) 崔 誠佑、千葉 恭男、佐藤 梨都子、石井 徹之、増田 淳、「屋外曝露した各種太陽電池モジュールの劣化率の検討」、第 78 回応用物理学会秋季学術講演会、5p-PB3-22、福岡県福岡市、2017.9.5.
 - 15) 石井 徹之、崔 誠佑、佐藤 梨都子、千葉 恭男、増田 淳、「実使用下のバックコンタクト太陽電池にみられる PID 現象」、第 78 回応用物理学会秋季学術講演会、7a-A204-4、福岡県福岡市、2017.9.7.
 - 16) 櫻井 啓一郎、小川 錦一、佐藤 梨都子、秋富 稔、森永 亮、井上 昌尚、増田 淳、「屋外での PID 現象加速試験設備の構築と実験例」、第 78 回応用物理学会秋季学術講演会、7a-A204-5、福岡県福岡市、2017.9.7.
 - 17) 崔 誠佑、佐藤 梨都子、石井 徹之、千葉 恭男、増田 淳、「各種太陽電池モジュールの屋外曝露による経年劣化」、平成 29 年度九州・沖縄産業技術オープンイノベーション、福岡県北九州市、2017.10.11-13.
 - 18) 千葉 恭男、崔 誠佑、佐藤 梨都子、石井 徹之、増田 淳、「産総研九州センター（鳥栖市）における太陽電池の研究開発－モジュールの発電量評価技術開発－」、平成 29 年度九州・沖縄産業技術オープンイノベーション、福岡県北九州市、2017.10.11-13.
 - 19) 石井 徹之、佐藤 梨都子、崔 誠佑、千葉 恭男、増田 淳、「6 年間の実使用下における太陽電池モジュールの劣化と故障に関する調査」、平成 29 年度日本太陽エネルギー学会日本風力エネルギー学会合同研究発表会、11、新潟県長岡市、2017.10.26.
 - 20) 千葉 恭男、崔 誠佑、佐藤 梨都子、石井 徹之、増田 淳、「佐賀県鳥栖市における太陽電池モジュールの実発電量と推定発電量の比較」、第 65 回応用物理学会春季学術講

- 演会、18p-D101-8、東京都新宿区、2018.3.18.
- 21) 石井 徹之、崔 誠佑、佐藤 梨都子、千葉 恭男、増田 淳、「高効率結晶シリコン太陽電池の実運用下での初期発電性能の変化」、第 65 回応用物理学会春季学術講演会、18p-D101-9、東京都新宿区、2018.3.18.
- 22) 崔 誠佑、千葉 恭男、佐藤 梨都子、石井 徹之、増田 淳、「薄膜シリコン系太陽電池モジュールの屋外曝露による劣化特性」、第 65 回応用物理学会春季学術講演会、20a-P9-12、東京都新宿区、2018.3.20.
- 23) 千葉 恭男、石井 徹之、佐藤 梨都子、崔 誠佑、増田 淳、「佐賀県鳥栖市における結晶シリコン系太陽電池モジュールの実発電量と推定発電量の比較」、第 15 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム、PD-01、北海道札幌市、2018.7.12.
- 24) 崔 誠佑、千葉 恭男、佐藤 梨都子、石井 徹之、増田 淳、「薄膜系太陽電池モジュールの室内測定による劣化特性と発電量の相関」、第 15 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム、PD-02、北海道札幌市、2018.7.12.
- 25) 石井 徹之、崔 誠佑、佐藤 梨都子、千葉 恭男、増田 淳、「実使用条件下のヘテロ接合型太陽電池の発電性能の経時変化」、第 15 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム、PD-03、北海道札幌市、2018.7.12.
- 26) 崔 誠佑、千葉 恭男、佐藤 梨都子、石井 徹之、増田 淳、「化合物系薄膜太陽電池モジュールの室内測定による劣化特性と発電量の相関」、第 79 回応用物理学会秋季学術講演会、19p-PB5-14、愛知県名古屋市、2018.9.19.
- 27) 千葉 恭男、崔 誠佑、佐藤 梨都子、石井 徹之、増田 淳、「佐賀県鳥栖市における太陽電池モジュールの実発電量と推定発電量の比較 (II)」、第 79 回応用物理学会秋季学術講演会、21p-133-2、愛知県名古屋市、2018.9.21.
- 28) 石井 徹之、崔 誠佑、佐藤 梨都子、千葉 恭男、増田 淳、「実使用条件下のシリコンヘテロ接合型太陽電池の発電性能の経時変化」、第 79 回応用物理学会秋季学術講演会、21p-133-3、愛知県名古屋市、2018.9.21.
- 29) 石井 徹之、崔 誠佑、佐藤 梨都子、千葉 恭男、増田 淳、「高効率結晶シリコン太陽電池の実運用下における発電性能の経時変化」、平成 30 年度日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー学会合同研究発表会、50、島根県松江市、2018.11.9.
- 30) 千葉 恭男、石井 徹之、佐藤 梨都子、崔 誠佑、増田 淳、「産総研九州センター（鳥栖市）における太陽電池の研究開発ーモジュールの発電量評価技術開発ー」、平成 30

- 年度九州・沖縄産業技術オープンイノベーションデー、宮崎県宮崎市、2018.11.16.
- 31) 千葉 恭男、石井 徹之、佐藤 梨都子、崔 誠佑、増田 淳、「産総研九州センター（鳥栖市）における太陽電池の研究開発－推定発電量と実発電量の比較－」、平成 30 年度九州・沖縄産業技術オープンイノベーションデー、宮崎県宮崎市、2018.11.16.
- 32) 千葉 恭男、崔 誠佑、佐藤 梨都子、石井 徹之、増田 淳、「佐賀県鳥栖市における太陽電池モジュールの実発電量と推定発電量の比較（III）」、第 66 回応用物理学会春季学術講演会、10p-W611-12、東京都目黒区、2019.3.10.
- 33) 石井 徹之、崔 誠佑、佐藤 梨都子、千葉 恭男、増田 淳、「高効率結晶シリコン太陽電池の発電性能の経時変化」、第 66 回応用物理学会春季学術講演会、10p-W611-14、東京都目黒区、2019.3.10.
- 34) 佐藤 梨都子、千葉 恭男、近松 真之、吉田 郵司、嘉数 誠、當摩 哲也、増田 淳、「有機薄膜太陽電池の準安定性に影響を与える温度の検討」、第 66 回応用物理学会春季学術講演会、12a-S221-6、東京都目黒区、2019.3.12.
- 35) 千葉 恭男、石井 徹之、佐藤 梨都子、崔 誠佑、増田 淳、「佐賀県鳥栖市における結晶シリコン系太陽電池モジュールの劣化率を用いた実発電量と推定発電量の比較」、第 16 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム、PA-4、宮崎県宮崎市、2019.7.4.
- 36) 石井 徹之、崔 誠佑、佐藤 梨都子、千葉 恭男、増田 淳、「実運用された高効率結晶シリコン太陽電池の発電性能の経時変化」、第 16 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム、PA-5、宮崎県宮崎市、2019.7.4.
- 37) 石井 徹之、崔 誠佑、佐藤 梨都子、千葉 恭男、増田 淳、「実使用条件下の結晶シリコン太陽電池の長期信頼性の評価」、第 80 回応用物理学会秋季学術講演会、19p-B12-7、北海道札幌市、2019.9.19.
- 38) 千葉 恭男、崔 誠佑、佐藤 梨都子、石井 徹之、増田 淳、「佐賀県鳥栖市における太陽電池モジュールの実発電量と推定発電量の比較（IV）」、第 80 回応用物理学会秋季学術講演会、21p-B12-4、北海道札幌市、2019.9.21.

謝辞

学位論文を提出するにあたってお世話になった関係各位に、この場を借りて厚くお礼申し上げます。

お忙しい中、ご指導くださいました嘉数誠先生に感謝申し上げます。心が折れそうなときに、温かく見守り励ましの言葉をいただき、執筆をつづけることができました。また、大石敏之先生、田中徹先生、原重臣先生にもご指導いただきました。誠にありがとうございました。

筆が遅く、締め切りぎりぎりまでご指導、議論いただき産業技術総合研究所の増田淳様、千葉恭男様に深く感謝いたします。有機薄膜太陽電池の執筆においては、産業技術総合研究所の吉田郵司様、近松真之様、金沢大学の當摩哲也様には有益なアドバイスを頂き、本当にありがとうございました。屋外測定値を用いた評価においては、電力中央研究所の石井徹之様に丁寧なご指導と叱咤激励をいただきました。崔誠佑様の太陽電池モジュールの地道な測定により、本論をまとめることができました。お二人のご尽力に深く感謝申し上げます。

また、産業技術総合研究所のモジュール信頼性チームの皆様には、ソーラシミュレータの再現性の確保や曝露試験場の管理、太陽電池モジュールの室内測定にご尽力いただきました。原浩二郎様、小川錦一様、秋富稔様、藤田加津子様、本当にありがとうございました。ここまで私を支えてくれた家族にも、感謝の意を表したいと思います。

皆様、本当にありがとうございました。

本研究は NEDO の委託により実施いたしました。研究会にてご議論いただいた皆様に感謝申し上げます。