

結晶 Si 太陽電池モジュール発電性能劣化に関する
メカニズム解明と加速試験法確立

2017年3月

鈴木 聡

結晶 Si 太陽電池モジュール発電性能劣化に関する
メカニズム解明と加速試験法確立

鈴木 聡

システム情報工学研究科

筑波大学

2017年3月

目 次

第1章 序論

1.1 太陽光発電普及への期待.....	1
1.2 太陽電池モジュールの信頼性評価技術の課題.....	2
1.3 高温高湿試験の課題と既往研究.....	5
1.4 温度サイクル試験の課題と既往研究.....	7
1.5 新しい試験(DML, PID)とその課題と既往研究.....	7
1.6 本研究の目的と本論文の構成.....	8

第2章 高温高湿試験による発電特性劣化に関する劣化メカニズムに立脚した 加速試験法の確立

2.1 緒言.....	11
2.2 HAST / Air-HAST の概要と試験条件選定.....	12
2.3 測定方法および分析方法.....	15
2.4 試験結果および分析結果比較.....	16
2.5 in situ 計測による抵抗値の連続計測.....	30
2.6 劣化メカニズムの考察.....	34
2.7 結言.....	35

第3章 温度サイクル試験による発電特性劣化に関する劣化メカニズムに立脚した 加速試験法の確立

3.1 緒言.....	36
3.2 急速温度サイクル試験の条件選定.....	37
3.3 TC と RTC の比較.....	40
3.4 in situ 計測による抵抗値の連続測定.....	43
3.5 結言.....	49

第4章 Bending Cyclic Load Test による物理的な荷重負荷に関する劣化メカニズムの 解明と耐性評価方法の確立

4.1 緒言.....	50
4.2 DML の劣化モードの検討.....	50

4.3	Bending Cyclic Load Test の概要.....	53
4.4	BCL による劣化モードの基礎検討.....	58
4.5	数値シミュレーションによる劣化メカニズムの検討.....	62
4.6	TC との相関性の考察.....	79
4.7	BCL 試験による太陽電池モジュールの耐性評価.....	79
4.8	結言.....	81

第 5 章 塩水噴霧試験と Potential Induced Degradation 試験の組合せによる発電特性
劣化に関する加速試験方法の確立

5.1	緒言.....	82
5.2	塩水噴霧試験条件・PID 試験条件.....	83
5.3	試験結果.....	87
5.4	考察.....	100
5.5	結言.....	103

第 6 章 結論..... 105

謝辞.....	109
参考文献.....	111
公表論文リスト.....	116

第1章 序論

1.1 太陽光発電普及への期待

石油や石炭に代表される化石燃料は、我が国のエネルギー供給量の8割以上を占めており、そのほとんどを海外に依存している。近年の新興国の経済発展などを背景に世界的にエネルギーの需要が増大しており、化石燃料の市場価格が不安定化している。加えて、化石燃料の利用に伴って発生する温室効果ガスを削減することが重要な課題となっている。そこで太陽熱、水力、風力、バイオマス、地熱などの再生可能エネルギーは、化石燃料に代わるクリーンなエネルギー源として普及が期待されている。特に日本における太陽光発電の技術開発は、国家プロジェクトとして、古くはサンシャイン計画に始まり、ニューサンシャイン計画を経て2004年には「2030年に向けた太陽光発電ロードマップ(PV2030)」が策定され、太陽光発電の技術開発指針として広く利用されてきた¹⁻¹⁾。更に、2007年には「太陽光発電が2050年までにCO₂削減の一翼を担う主要技術になり、我が国ばかりでなくグローバルな社会に貢献できること」をコンセプトに「太陽光発電ロードマップ (PV2030+)」として見直しがなされた¹⁻²⁾。このときに技術開発の目標として、2017年までに発電コストを14円/kWh、モジュール製造コストを75円/W、モジュール寿命は20年とし、さらに2025年までに発電コスト7円/kWh、モジュール製造コストは50円/W、モジュール寿命は30年とされた¹⁻²⁾。太陽光発電ロードマップに基づき太陽光発電に関する技術開発を行ってきたが、太陽電池モジュール価格の大幅下落、価格競争力を有する中国等の新興国の企業のシェア拡大等、太陽光発電を取り巻く状況は大きく変化した¹⁻³⁾。2012年7月からは再生可能エネルギーの固定価格買い取り制度(Feed in Tariff, 以下FIT)が始まり、再生可能エネルギーの導入・運用が拡大している。特に、太陽光を利用する太陽光発電は、設置する地域に大きな制限がなく導入しやすく、屋根や壁などの未利用スペースに設置できるため、新しい用地の準備が最小限ですむ、送電線のない遠隔地の電源としての活用、災害時の非常用電源としての活用など、他の再生可能エネルギーと比較すると導入・運用の障壁が低く、住宅用の太陽光発電システムに加え、産業用や公共施設などでの導入が進んでいる¹⁻⁴⁾。このように、太陽光発電は国家プロジェクトとして技術開発・普及が進められており、2013年度末には累計で14.3GWまで拡大した。ただし、気象条件により発電出力が不安定になることやトータルコストの削減のための技術開発が期待されていることに加え、大量導入による電力系統への接続問題や、メンテナンス費用、景観・自然破壊などの新たな課題が浮き彫りになってきている。そこで2014年には「太陽光発電開発戦略 (NEDO PV Challenges)」が新たに策定された¹⁻³⁾。更に、FIT開始から3年を経る前に制度の見直しが行われ、2015年5月にFIT法改正法が成立した。この改正FITは2017年4月から施行される予定である¹⁻⁵⁾。このように、太陽光発電は国家プロジェクトとして大量普及が促され、紆余曲折を経ながらも確実に普及が進んでいる。

1.2 太陽電池モジュールの信頼性評価技術の課題

太陽光発電システムは可動部分がほとんどないことから導入後のメンテナンスフリーが言われているが、長期運用についてはその信頼性を明確に示す客観的指標がなく、発電効率の向上や製造コストの低減に加えて、信頼性の向上や長寿命化が課題となっている。特に導入量の多い結晶 Si 太陽電池モジュールの寿命を評価する技術は確立されておらず、長期信頼性を評価する手法が求められている。

1.2.1 結晶 Si 太陽電池モジュール構造と劣化因子¹⁻⁶⁾

結晶 Si 太陽電池モジュールの構造を図 1.1 に示す。結晶 Si 太陽電池セルは、n 型と p 型の半導体が接合したシリコン基板の表面に電極を形成することで完成する。日射強度が 1,000 W/m² で Air-mass 1.5、セルの温度が 25 °C の標準状態において、大きさ約 10 cm×10 cm のセル 1 枚が発電できる電力は直流で約 1.5 W (電圧 0.5 V, 電流 3 A)である。このため、目的に応じた出力値を得るためには、セルをインターコネクタと呼ばれる線材で直列に接続することで電圧を上げる必要がある。表面を強化ガラスで覆い、裏面材バックシート(Back sheet, 以下 BS)を用いて封止材とセルを挟み込み、ラミネートをした後、端子箱とフレームをつけると太陽電池モジュールが完成する。太陽電池モジュールの故障や劣化要因を表 1.1 に示す。太陽電池モジュールは作製する際に、セルにフィンガー電極を焼成する過程、セルにインターコネクタをはんだ付けする過程、EVA の間にセルを挟み、強化ガラスと BS を積層して、ラミネータでラミネートを行う過程が存在する。このように、セル作製の初期の段階から、はんだ付けや、複数の材料が積層されてラミネートされる段階で、熱の影響を受けていることがわかる。また、複数の材料が積層されていることから、熱膨張係数が異なった物質が組合わされて製品になっていると言える。さらに、屋外の様々な環境下に曝されながら、休むことなく稼働し続けることになる。このため、セル、モジュールの製造期から、製品が廃棄されるまでには、太陽電池モジュールの様々な箇所に様々なストレスが複合して負荷されるため、故障箇所や劣化要因が複雑になる。太陽電池モジュールには、自動車のエンジンのような、機械的に駆動する箇所がほとんどないことから、メンテナンスフリーが叫ばれた時期があるが、駆動部がないことで、太陽電池モジュールに不具合が発生していても、気づけない場合がある。特に今後ますます普及が見込まれるメガソーラのような大規模な太陽光発電システムでは、太陽電池モジュール 1 枚の性能劣化を見つけることは容易なことではないと考えられる。FIT の導入により太陽光発電を事業の一環として運用する場合は、発電性能の低下は収益に直結する問題となるため、メンテナンスにより不具合や劣化を早期に発見することは重要である。耐用年数が長い太陽電池モジュールを導入することで、投資効果をあげることができると考えられる。そのためには、太陽電池モジュールの導入コストを下げるとともに、太陽電池モジュールの長期信頼性が重要となってくる。

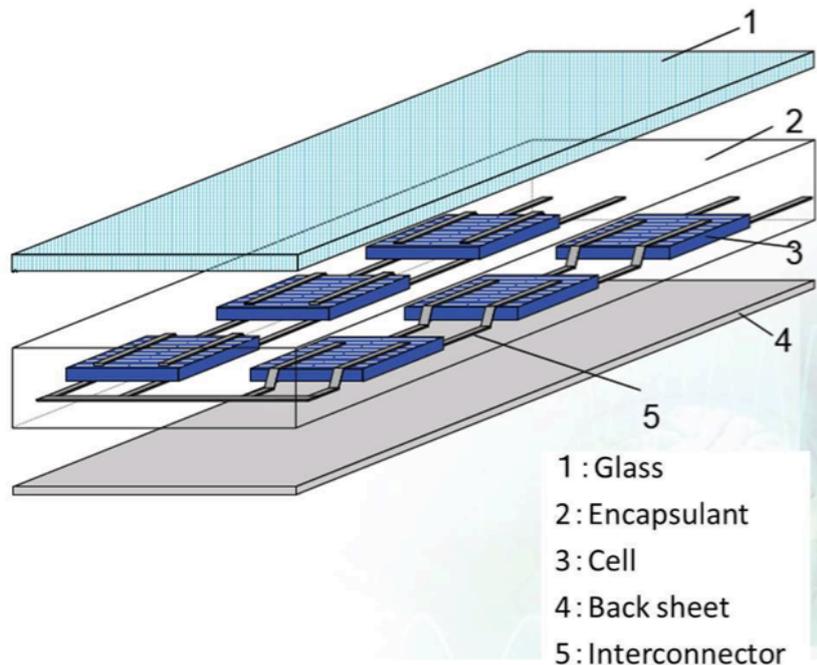


図 1.1. 結晶 Si 太陽電池モジュール構造

表 1.1. 太陽電池モジュールの故障・劣化要因の一例

インターコネクタ断線	端子ボックス故障	バイパスダイオード故障
封止材：剥離，変色，弾性損失，接着力消失		
はんだ接合故障	ガラス破壊	ホットスポット
地絡	腐食	接合部故障
構造的故障	セル破壊・セルクラック	アーク

1.2.2 結晶 Si 太陽電池モジュール形式認証試験規格¹⁻⁷⁾

IEC61215 (2005)ならびに JIS C 8990 (2009)「地上設置の結晶シリコン太陽電池モジュール-設計適格性確認及び形式認証のための要求事項」は、屋外での長期運転に適した地上設置太陽電池モジュールに関する設計適格性確認及び形式認証における要求事項である。ここで実施する一連の試験は、太陽電池モジュールの電氣的及び温度的特性を決定し、かつ費用及び時間の制約内で可能な限りモジュールが一般的な屋外の気候に長期間さらされても耐えうることを確認することを目的とし、初期不良の除去を含むスクリーニング試験が想定されている。図 1.2 に環境試験のシーケンスを示す。高温高湿試験(Damp Heat Test, 以下 DH)や温度サイクル試験(Thermal Cycle Test, 以下 TC)、結露凍結試験(Humidity Freeze Test, 以下 HF)などの試験が規定されているが、規定された試験時間では、太陽電池モジュールに劣化を生じさせるのは難しく、長期信頼性を評価する際の課題となっている。

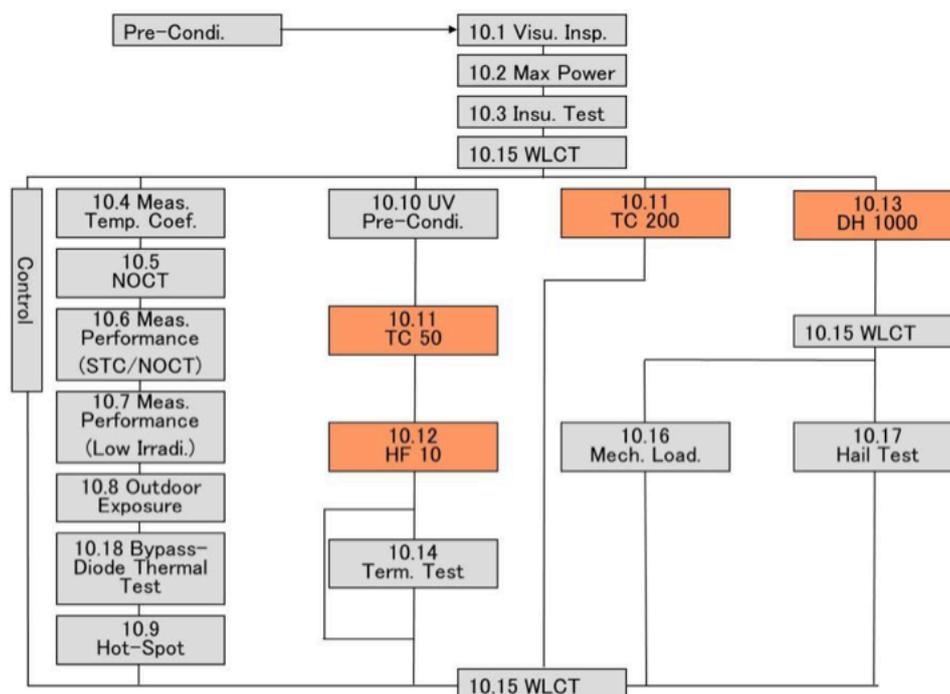


図 1.2. IEC 61215(2005) 試験シーケンス

1.2.3 Test to Failure Protocol¹⁻⁸⁾

Wohlgemuth による報告¹⁻⁹⁾では、表 1.2 に示すように、あるフィールドで発生していた故障の割合を調査した結果、太陽電池モジュールの不具合は、腐食が 45.3%、セルやインターコネクタの破断が 40.7%の割合で発生していることがわかった。また、米国の国立再生可能エネルギー研究所(National Renewable Energy Laboratory, 以下 NREL)からは、温湿度環境ストレスを増大した場合のモジュール寿命から信頼性・寿命の定量的評価基準を導き出そうとする試み(Test to Failure Protocol, 以下 TTFP)が提案されており、温度サイクル試験 200 サイクルや高温高湿試験 1,000 時間を基準とし、太陽電池モジュールの発電特性に破壊的低下が生じるまで、それぞれの試験を繰り返すことや高温高湿試験と温度サイクル試験の組合せを繰り返し行うことが提案され¹⁻⁸⁾、研究例も報告されている¹⁻¹⁰⁾。一方で、太陽電池モジュールに劣化が発生するまでの試験時間が長いことが課題となっている。

表 1.2. フィールド故障の観察結果

Types of Failures	% of Total Failures
Corrosion	45.3
Cell or Interconnect Break	40.7
Output Lead Problem	3.9
Junction Box Problem	3.6
Delamination	3.4
Overheated wires, diodes or terminal strip	1.5
Mechanical Damage	1.4
Defective Bypass Diodes	0.2

(出典, J. Wohlgemuth, “Task Group3 : PVQA Testing for Humidity, Temperature, and Voltage”, NREL Photovoltaic Module Reliability Workshop 2013, 2013)

1.3 高温高湿試験の課題と既往研究

既往研究¹⁻¹¹⁾では屋外曝露サイトで曝露されていた太陽電池モジュールに発生していた故障現象を観察・整理し、Failure Mode and Effect Analysis (以下 FMEA) 解析から劣化原因の要因分析を実施した。その結果、温度サイクル試験と高温高湿試験が太陽電池モジュールの劣化に影響が大きいことが推察された。この結果を下にフィジビリティースタディとして、高温高湿試験の加速試験として Highly Accelerated Temperature and Humidity Stress Test (以下 HAST) が実施された¹⁻¹²⁾。105 °C, 100%, 120 °C, 100% の試験条件を実施した結果を図 1.3 に示す。HAST 105 °C, 100%, 1,000 時間で、最大出力低下率 ΔP_{\max} は 13% であった。HAST 120 °C, 100%, 400 時間で ΔP_{\max} は 17% 低下であった。また、図 1.4 に HAST 120 °C, 100%, 400 時間後のモジュール外観図を示す。試験後に BS が崩落してしまう結果となった。これは 120 °C, 100% の湿熱ストレスが強く、劣化メカニズムが従来 of 高温高湿試験とは異なる可能性を示唆した。

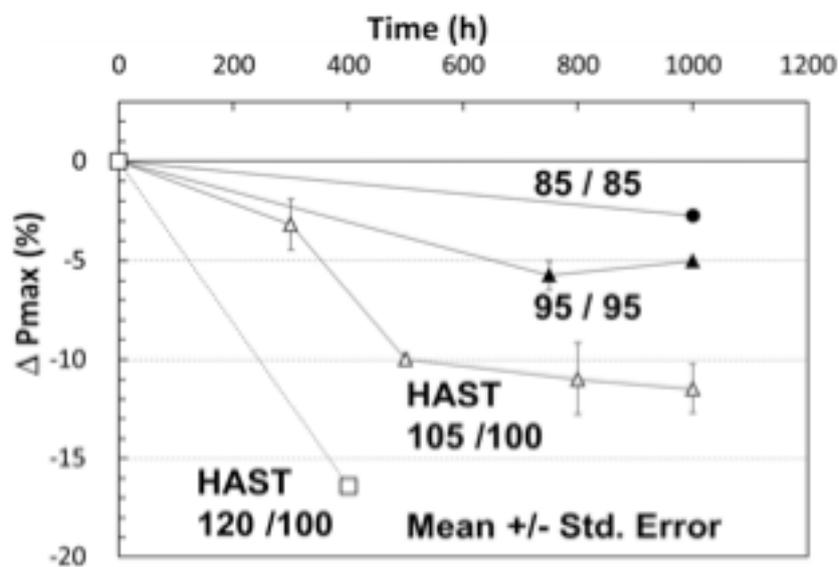


図 1.3. HAST 試験における P_{max} の経時変化

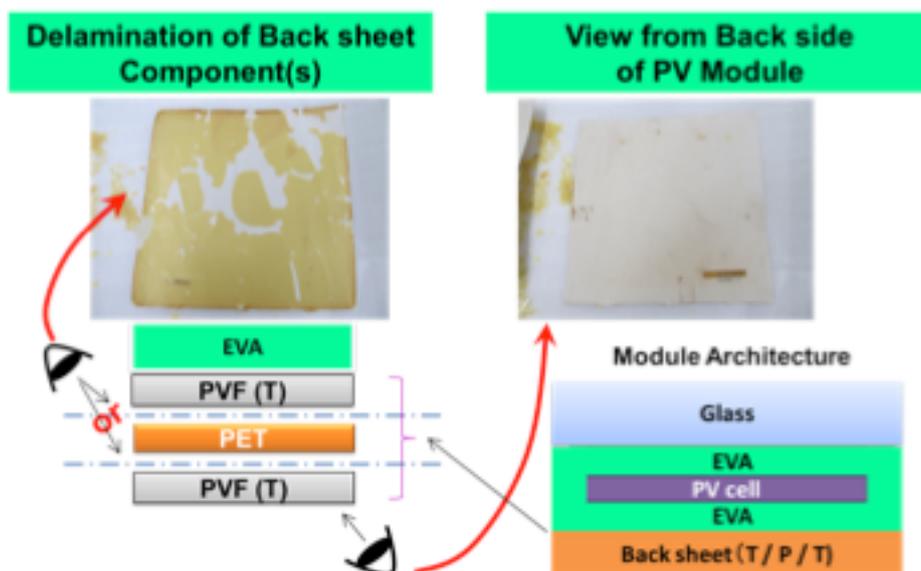


図 1.4. HAST 120°C, 100%, 400 時間後の外観観察結果

(出典, Soh Suzuki et al., “Sensitivities of I-V Parameters in c-Si PV Modules to Hygrothermal Stress”, NREL PV Module Reliability Workshop 2013, 2013)

1.4 温度サイクル試験の課題と既往研究

Aoki ら¹⁻¹³⁾により温度サイクル試験の加速試験として、急速温度サイクル試験が検討された。規格で決められている温度サイクル試験の温度変化率は 100 °C / 時間であるのに対し、急速温度サイクル試験では 400 °C / 時間 とした。また、定温に曝す時間を短縮することで試験時間の短縮に取り組んだ。一般的に、試験による劣化状況の確認は一定試験時間ごとに試験を中断し、ソーラシミュレータによる太陽電池モジュールの発電特性の測定と EL 測定により劣化の進行を確認する手法が行われているが、試験中に測定できないことが課題である。そこで、4 端子法によるインピーダンス測定法により直列抵抗成分の増加を測定することで試験中に劣化の進行を確認する方法も検討された。この結果、急速温度サイクル試験では 200~300 サイクルで最初の故障の兆候を捉えることができ、温度サイクル試験で想定していたはんだ接合部の劣化促進の傾向を捉えることが可能であることを示唆した。

1.5 新しい試験(DML, PID)とその課題と既往研究

1.5.1 Potential Induced Degradation の出現

大規模太陽光発電システムの建設に伴い、高電圧下で運用した太陽電池モジュールの発電量が大幅に低下する Potential Induced Degradation(以下 PID)現象が新しい信頼性課題として出現してきており、発生メカニズムの解明と対策が求められている。p 型セルの PID の発生要因としては、大規模太陽光発電システムにおいて、電圧は高電圧化しており、高効率化を求められたインバータはトランスレス型が増加している。これにより、接地されたフレームとセル内部回路間に大きな電位差が生じる。このフレームとセル間に漏れ電流が発生する影響で、PID が発生すると考えられている。PID 現象のメカニズムは、フレームとセル間の電位差と漏れ電流の発生により、白板ガラスに含まれる Na⁺がセル表面に拡散し、セル表面で n 型層の電荷を相殺し、オーミック的な特性になることと、セル内部で不純物準位を形成することで再結合による効率の低下が言われている。p 型の PID に関しては、様々な研究が報告され^{1-14,15,16)}、さらに、セルの表面処理を変えることや、封止材を変更するなどの PID 対策も報告されている¹⁻¹⁷⁾。一方で、n 型のセルでも PID 現象が発生するとの報告¹⁻¹⁸⁾もあり、完全な解決をみせるまでには至っていない。

1.5.2 Dynamic Mechanical Loading Test の応用

太陽電池モジュールは様々な場所に設置され、過酷な自然環境に何十年も曝される工業製品である。このため、風や雪、氷などの静的な荷重の影響に対する耐性を評価する試験が IEC 規格で規定されている。試験条件としては風速 63 m / s の突風を想定した 2,400 Pa の静

荷重をモジュールの表面および裏面に 1 時間負荷する。これを 1 サイクルとして 3 サイクル繰返す試験である。また、雪や氷の最大荷重を想定した場合には、3 サイクル目の表面からの荷重を 5,400 Pa に増やすことが要求される。この試験に対し、温度サイクル試験の加速試験方法として、温度サイクル試験と Dynamic Mechanical Loading Test(以下 DML)を組み合わせて試験時間を短縮する方法が提案されている。この時の試験条件は、荷重が±1,000 Pa で 1 分間に 1~3 サイクルを 1,000 サイクル繰返すことが提案されている。このときの DML は TC を 2.5 倍加速することを目的としている。しかし、DML によるセル・モジュールの劣化メカニズムや温度サイクル試験との相関性に関しては議論が始まったばかりである¹⁻¹⁹⁾。

1.6 本研究の目的と本論文の構成

太陽光発電を取り巻く環境はめまぐるしく変化しており、発電効率の高効率化や発電コストをトータルで下げる方法として、また発電事業として安定した稼働を続けるために、太陽電池モジュールの長期信頼性は重要である。一方で、長期信頼性を評価する技術は確立されておらず、屋外に長期間曝露されている太陽電池モジュールの観察や解析、TTFP による延長試験や組合せ試験により劣化の促進や劣化メカニズムの解明が進められているなど様々な取り組みが行われている。図 1.5 に結晶 Si 太陽電池モジュールの劣化を分類し、対応する規格試験を示した。結晶 Si 太陽電池モジュールの劣化は大きく 3 つに分けることができる。1 つは温度や湿度などの影響により、化学反応が進むことにより劣化が促進される場合で、腐食劣化や黄変などが考えられる。特に屋外での故障の割合が高かった腐食劣化に関しては、モジュール内部への水分浸入を促進する試験として高温高湿試験 85 °C, 85%, 1,000 時間がある。2 つめはモジュールに対して、自重や風、雪など直接的に力が加わる場合や、モジュール作製時の熱応力などにより潜在的に負荷されている内部応力など、物理的、機械的な負荷によって劣化が促進される場合で、はんだ接合部の剥がれや破断、インターコネクタの破断などが考えられる。はんだ接合部への影響など熱膨張係数差による劣化の確認には温度サイクル試験、-40 °C ⇄ 85 °C, 200 サイクルが、風や雪などの荷重への耐性試験としては DML が実施されている。また 3 つめは、大規模太陽光発電システムなどの高電圧システムでの発生が懸念される、電圧誘起劣化があげられる。これは PID 試験としてチャンバー法 60 °C, 85%, 1,000 V, 96 時間などが規定されている。ここで紹介した試験はモジュールの初期故障を検出するスクリーニング試験の意味合いが強い。また各試験におけるモジュールの劣化メカニズムが明らかになっていない場合もあり、モジュールで劣化を再現するために、試験時間が長期化するという課題がある。そこで、本研究では、各試験での劣化メカニズムを明確にするとともに、劣化メカニズムに立脚した加速試験方法を確立することで試験時間短縮を図ることを目的とした。さらに、太陽電池モジュールの信頼性評価試験では、試験の途中で試験を中断し、室温の状態ですべての太陽電池モジュールの特性評価を実施している。このため、試験のどの時点で劣化が進行しているか、温度依存性

があるかなどは、正確にはわかっていない。この課題を解決するために、試験中の劣化の進行の兆候や温度依存性を明らかにすることを目的とし、交流インピーダンス法による in situ 計測の検討を行った。

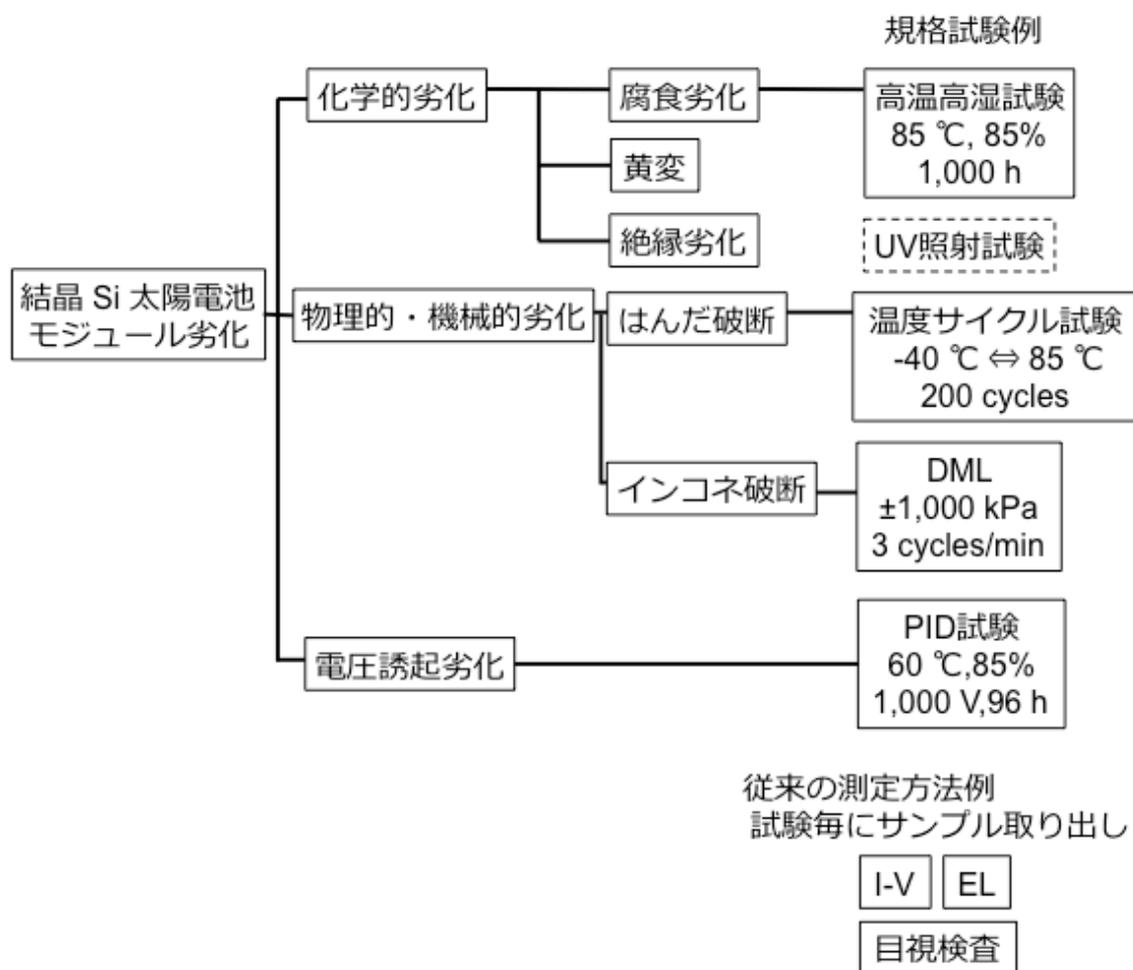


図 1.5. 結晶 Si 太陽電池モジュールの劣化分類と規格試験例・測定方法例

以下本論文の構成について説明する。

第 1 章では、序論として本研究の背景と課題および目的について述べる。

第 2 章では、高温高湿試験の劣化メカニズムを解明するとともに、Air-HAST 試験を用いた劣化メカニズムに立脚した加速試験方法の確立について述べる。

第 3 章では、温度サイクル試験の加速試験方法確立をめざし、急速温度サイクル試験の更なる検討と交流インピーダンス法による in situ 計測の成果を述べる。

第 4 章では、DML の劣化メカニズムの解明をめざし、DML の基礎データの取得と Bending Cyclic Load 試験機を新たに開発した結果、さらにはモジュール面にかかる荷重負荷の基礎

的なデータ取得とその劣化メカニズムの解明について述べる。

第 5 章では、沿岸域に設置される大規模太陽光発電システムの長期信頼性で懸念される塩害の影響と PID の関係性の検討結果について述べる。一般的に PID は短期間に、大幅に太陽電池モジュールの出力が低下する現象であるが、長期運用でモジュールに経年劣化が生じた場合の PID 耐性についての研究はほとんど進んでいない。この課題を解決するために、塩水噴霧試験による前処理を実施した後に PID 試験を連続で実施することで、太陽電池モジュールに起こる変化の検討と、外的要因に対する PID 現象の有無および劣化メカニズムの解明について述べる。

第 6 章では、結論として本研究の成果を総括するとともに今後の課題と展望について述べる。

第2章 高温高湿試験による発電特性劣化に関する劣化メカニズムに立脚した加速試験法の確立

2.1 緒言

結晶Si太陽電池モジュールにおける高温高湿試験(Damp Heat Test, 以下DH)は高温高湿環境下での吸湿による高分子材料の構造的変化の明確化や、電極・配線部分の電氣的化学腐食の発生・成長や剥離を促進し、太陽電池モジュールの劣化を評価する試験である。試験条件は温度85℃、相対湿度85%の環境下で1,000時間保持となる。屋外で使用されたモジュールの発電性能の劣化状態との比較から、1,000時間のDHがマイアミでの20年の屋外曝露に相当するなどの報告もあるが²⁻¹⁾、劣化メカニズムの解明とともに加速試験としての相関関係については検討が続けられている。国立再生エネルギー研究所(National Renewable Energy Laboratory, 以下NREL)の調査では規格試験としてDHはもっとも多く実施されている試験である²⁻²⁾。一方で、近年の太陽電池モジュールのDHへの性能向上により規格試験の時間では劣化が進行しにくくなっている。NRELではTest-to-Failure Protocol (以下TTFP)を提案している。これはDHや温度サイクル試験 (Thermal Cycling Test, 以下TC)を基本にした試験を単独やこれら2試験を組合せて、劣化が生じるまで試験を繰り返すことが提案されている。PVモジュールに劣化を生じさせることで、劣化の傾向や劣化モードを明らかにすることができ、PVモジュールの長期信頼性に対する定量的なデータの蓄積に役立つとともに、モジュールの構成材料を変更した場合やモジュールの作製工程を変更した場合などに、相对比较をする場合などに利用されている。具体的にはDH 85℃, 85%, 1,000時間、TC -40℃ ⇄ 85℃, 200サイクル、TC・200サイクルとDH・1,000時間の3種類の試験を連続して実施する試験である。TTFPでの劣化の定義は、これが提案された時点¹⁻⁸⁾では、出力が初期値の50%に低下するまでであった。現在は、ほとんどの太陽電池モジュール製造メーカーが、20年(25年)以内に出力が初期値より20%低下するようなことがあれば無償で交換できる太陽電池モジュールの製品保証を付けて販売しており、このことから、出力が初期値から20%に低下した状態が太陽電池モジュールの劣化の定義とみなされている。

DHの加速試験方法としての先行研究では、高度加速寿命試験(Highly-Accelerated Temperature and Humidity Stress Test, 以下HAST)が実施されており、出力低下や直列抵抗値の変化で比較すると、HAST 130℃, 100%, 96時間がDH 85℃, 85%, 2,000時間に相当するとの報告がある²⁻³⁾。一方で、Suzukiらによる報告では、HAST 120℃, 100%, 400時間で、発電性能特性の低下が15%以上であるが、BSの外装が剥がれてしまい、ストレスが過剰であることと、劣化モードに違いがあることが提唱されている¹⁻¹²⁾。またこの時は詳細な分析を実施しておらず、DHとHASTとの相関性や劣化メカニズムの解明が課題であった。

2.2 HAST/ Air-HASTの概要と試験条件選定

本章では、DHの劣化メカニズム解明を検討し、メカニズムに立脚した加速試験方法を確立することを目的とし、TTFPの考え方から、DHを4,000 時間まで実施した。先ほど述べたようにTTFPの故障の定義では出力が初期値から20%以下となっているが、出力が20%の低下ではモジュールの劣化が進行中であり、メカニズムの解明の観点から、出力低下による劣化の定義は導入しておらず、劣化の促進が十分にみられる試験時間とした。

2.2.1 太陽電池モジュールの構成部材

本章で用いた太陽電池モジュールの構成部材を表2-1に示す。また太陽電池モジュールの外観を図2.1に示す。太陽電池モジュールは180 mm×180 mmの単セルモジュールとした。太陽電池セルには、セルサイズは156 mm×156 mmで、セル厚さは $t = 180 \mu\text{m}$ 、3本バスバーで変換効率が16.2%のQ-Cellsの多結晶シリコンセルを使用した。配線材には、主材が銅で、鉛入りはんだで表面が覆われている幅1.5 mmの日立電線製の配線材を使用した。この配線材とセルをエヌ・ピー・シー製セル自動配線装置(NTS-150-S-H-3K)にセットして自動配線を行った。カバーガラスには、サイズが180 mm×180 mmで、厚さは $t = 3.2 \text{ mm}$ の旭硝子製の白板強化ガラスを使用した。封止材はEVAのFAST Cureタイプで、厚さは $t = 450 \mu\text{m}$ でガラスサイズに合わせてカットして使用した。バックシート(以下、BS)は、Tedlar / PET / Tedlar (以下、TPT)で構成されたBSを使用しモジュール作製を行った。TPTの厚さは、Tedlarが $t = 38 \mu\text{m}$ で、PETが $t = 250 \mu\text{m}$ でトータル326 μm である。これらの部材を重ね合わせて、エヌ・ピー・シー製の真空ラミネータ LM50×50Sにより150 °Cでラミネートを行い、モジュールを作製した。なおこれらのモジュールの周囲はフレームの設置を行っていない。なお、全ての環境試験はPVセルの両電極を接続せずに、開放状態で実施した。

表 2.1. 太陽電池モジュールの構成部材

Material	Specification	Size	Supplier
Cell	Multi-crystalline Si cell	156 mm×156 mm t = 180 μ m	Q Cells
Glass	Semi-tempered glass	180 mm ×180 mm t = 3.2 mm	AGC
Encapsulant	EVA (Fast Cure)	t = 450 μ m	SANVIC
Interconnector	A-SPS (Leaded, Ag)	W = 1.5 mm	Hitachi Cable
Back sheet	TPT	T : t = 38 μ m P : t = 250 μ m TPT : t = 326 μ m	Nondisclosure

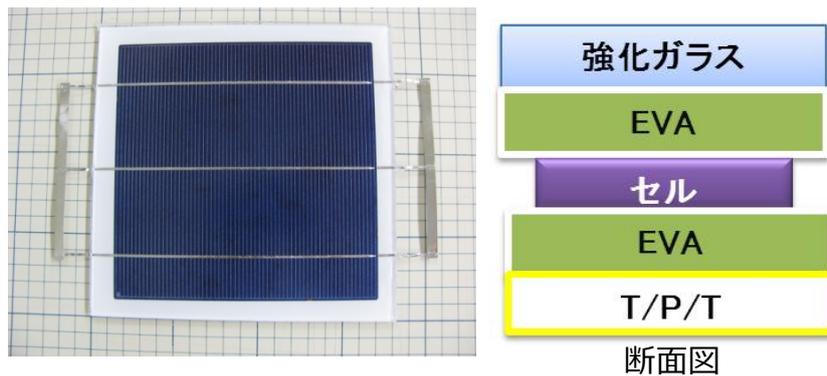


図2.1. 太陽電池モジュール外観

2.2.2 DH試験条件

今回試験に用いた環境試験器の外観を図2.2に示す。DHには恒温恒湿試験器(エスペック製：PL-2KP)を用いた。また、100℃を超える試験については不飽和型HAST装置(エスペック製：EHS-221)を用いた。表2.2に今回実施した環境試験の条件を示す。IEC61215で実施されているDHは温度85℃湿度85% 1,000時間が基準であるが、今回の試験では、TTFPの考え方から、DHを4,000時間まで実施した。

2.2.3 HAST / Air-HASTの条件選定

DHの加速試験方法を検討するため、HAST 110 °C, 85%の試験を実施した。ここで試験条件及び環境試験器の槽内の空気分圧と水蒸気分圧の関係を表2.3に示す。DH 85 °C, 85%では空気分圧と水蒸気分圧の比が約1:1である。一方HASTでは、槽内はほぼ水蒸気のみでDHの槽内環境とは異なる。そこで、HASTの槽内に空気を残すAir-HAST試験を実施した。Air-HASTの試験条件は110 °C, 85%とした。この時の槽内の空気分圧は0.128 MPa abs.(理論値)であり、空気分圧と水蒸気分圧の比が約1:1となる。槽内に空気を残すことで、酸素の存在による酸化・腐食に関する劣化が加速出来るかの検討も行った。なお、Air-HASTのみ、試験時間毎に別サンプルで試験をしている。



図2.2. (a) 恒温恒湿試験器の外観



(b) HAST試験器の外観

表 2.2. 環境試験条件

Test condition	Temperature/ humidity	Test time
DH	85 °C / 85%	4,000 h
HAST	110 °C / 85%	800 h
Air-HAST	110 °C / 85%	800 h

表2.3. 環境試験条件と環境試験器の槽内の空気分圧と水蒸気分圧の関係

Condition	Temperature (°C)	Humidity (% rh)	Total pressure (kPa)	Water vapor pressure (kPa)	Air pressure (kPa)	Air pressure / water vapor pressure	Air pressure / total pressure
Atmosphere	25	60	101.3	1.6	99.7	62.3	0.98
Damp heat	85	85	101.0	49.2	51.8	1.1	0.51
HAST	110	85	121.6	121.6	0.0	0.0	0.00
air-HAST	110	85	249.8	121.6	128.2	1.1	0.51

2.3 測定方法および分析方法

試験後の太陽電池モジュールの測定および分析を以下の方法で実施した。

2.3.1 I-V測定およびEL測定

試験前及び各試験における所定の試験時間経過後、太陽電池モジュールの発電特性測定(以下I-V特性測定)、外観検査及びElectroluminescence(以下EL)測定を行うことにより、各太陽電池モジュールの特性劣化などを確認した。I-V測定とは、疑似太陽光を受光状態の太陽電池モジュールにおいて、電流電圧特性を測定する手法で、得られたデータをプロットするとI-V曲線が得られる。電圧が0 V時の電流を短絡電流(short-circuit current, 以下 I_{sc})と呼び、太陽電池に電流が流れていない時の電圧を開放電圧(open-circuit voltage, 以下 V_{oc})と呼ぶ。太陽電池から最大の電力を取り出すには、電圧と電流の積が最大になる点で動作させることが必要であり、この点を最大出力(maximum power, 以下 P_{max})と呼ぶ。I-V特性測定には日清紡メカトロニクス製のソーラーシミュレータ SPI-SUN SIMULATOR 1116Nを使用した。暗状態において、太陽電池は大型のフラットpnダイオードである。暗状態で逆バイアスを印加し、I-V測定をすることにより、ダイオード特性そのものを評価することが可能であり、これをDark I-V測定と呼ぶ。Dark I-V測定により、ダイオード特性(直列抵抗・並列抵抗・逆電圧飽和電流など)を計測することができる。Dark I-V特性を測定するにはワコム電創製のWPSS-500S-50, 1.5Gを使用した。I-V特性測定、Dark I-V特性測定ともに5回測定し、その平均値を測定結果とした。太陽電池モジュールに対し、順方向にバイアス電流を注入することで生じるpn接合部からのEL発光を検出し、これを画像化することで、光学像では見えにくいセルクラックやフィンガー電極の断線などの不具合を可視化する方法をEL測定と呼ぶ。EL測定はアイテス製のEL測定装置 PVX100を使用した。測定条件は絞り2.8、露出30秒、電流4 A、電圧3 Vで行った。

2.3.2 イオンクロマトグラフィーによる残留酢酸イオン濃度の測定

イオンクロマトグラフィーとは、イオン交換樹脂への各種イオンの吸着・解離強度の差を利用して、供試溶液中の特定イオンを分離・定量する分析手法であり、液体試料中の各種イオン濃度を、ppbレベルで高感度に分析することができる。本研究では、各試験を実施したモジュールの中央付近と端部のガラス面とBS面の封止材を3cm²に切り取り、耐圧セルに純水と一緒に入れ、100 °Cで12 時間高温に保った。その後、室温まで冷却して抽出溶液中に析出した残留酢酸イオンの定量を行った。

2.3.3 測色計を用いた外観変化観察

試験後のモジュールの変色を定量的に観察するために、分光測色計(コニカミノルタ製, CR-13)を用いた。測定箇所はガラス側のセルのある箇所、ない箇所とBS側のそれぞれで、4隅と中央の5カ所を測定し、その平均値を測定値とした。

2.3.4 高解像度SEMによるフィンガー電極の断面観察および元素マッピング

試験後の試料の断面を観察するために、高解像度の走査型電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope, 以下SEM)を用いた。試料はダイヤモンドホイールにて20 mm×20~30 mmに切断した後、ワイヤーソーにて樹脂埋め可能なサイズにまで切断した。その後、エポキシ樹脂にて埋め込み、研磨によりフィンガー電極長手方向に断面出しを行い、アルコール系溶剤で仕上げ研磨をした後、イオンミリングを施した。断面観察の際には試料にPt-Pd蒸着を行い、FE-SEM装置(日本電子社製: JSM7100F)にてSEM観察及びEDX分析を実施した。

2.4 試験結果および分析結果比較

2.4.1 I-V特性およびELの経時変化

図2.3 (a)にDHおよびHAST, Air-HASTの最大出力低下率 ΔP_{\max} の経時変化を示す。上の横軸はDHの試験時間であり、下の横軸はHASTおよびAir-HASTの試験時間である。縦軸が各試験での経時変化を初期と比較した変化率 ΔP_{\max} である。○はDHを、□はHASTを●はAir-HASTを示している。エラーバーはそれぞれの試験での標準偏差を示している。DHでは2,000 時間以降から ΔP_{\max} の減少がみられ、3,000 時間までは緩やかに減少が続くが、3,000 時間以降で急激に ΔP_{\max} の減少が進み、4,000 時間では、 ΔP_{\max} が60%減少した。HASTやAir-HASTでは400 時間以降から ΔP_{\max} の減少がみられ、600 時間以降で急激に ΔP_{\max} の減少が進み、800 時間では、 ΔP_{\max} が80%減少した。図2.3 (b)にDHの初期から4,000 時間までとHASTやAir-HASTの初期から800 時間までを比較したEL像を示す。DHのEL像では3,000 時間でセルの端部に暗部が現れはじめ、4,000 時間で暗部がセル端部からセル内部に進行している様子がわかった。HASTおよびAir-HASTのEL像では600 時間でセルの端部に暗部が現れはじめ、800 時間で暗部がセル端部からセル内部に進行している様子がわかった。これらのことから、 ΔP_{\max} の経時変化で比較した場合、HASTおよびAir-HASTはDHの経時変化を5倍ほど加速しながら、同じ傾向での劣化カーブを描いていることがわかった。また、EL像の比較でも、DHの変化に対してHASTおよびAir-HASTは5倍ほど速い時間で同様の変化をしていることが確認できた。

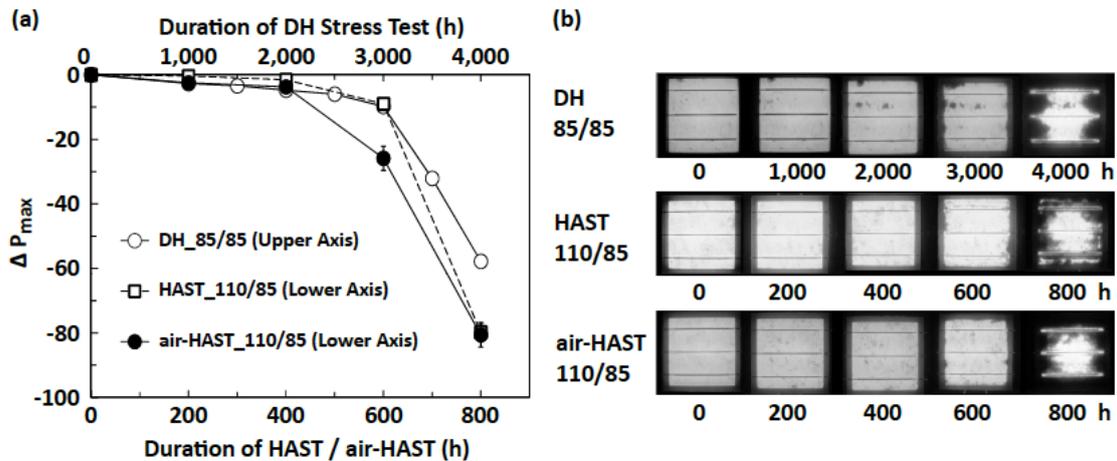


図 2.3. DHおよびHAST / Air-HASTの (a) ΔP_{max} の経時変化, (b) EL像の経時変化

2.4.2 I-V特性評価による各パラメータ比較

図2.4に各試験における ΔP_{max} の変化と各パラメータの変化(ΔV_{oc} , ΔI_{sc} , ΔFF)の相関関係を比較した結果を示す。横軸は各試験での P_{max} の経時変化を初期と比較した変化率 ΔP_{max} を、縦軸は各試験での各パラメータの経時変化を初期値と比較した各々の変化率 ΔV_{oc} , ΔI_{sc} , ΔFF を示している。(a)と(d)は ΔP_{max} と ΔV_{oc} の相関関係を示しており、(b)と(e)は ΔP_{max} と ΔI_{sc} の相関関係を示しており、(c)と(f)は ΔP_{max} と ΔFF の相関関係を示している。図中の○はDHを、□はHASTを、●はAir-HASTを示している。エラーバーはそれぞれの試験での ΔP_{max} と各パラメータと標準偏差を示している。(a)から(c)は縦軸・横軸を0%から-100%で示しており、(d)から(f)は0から-15%までを拡大して示している。破線の直線は相関関係が一致していることを示している。 ΔP_{max} と ΔV_{oc} の相関関係では、全ての試験で、 ΔP_{max} が低下しても、 ΔV_{oc} はほとんど減少していないことがわかった。 ΔP_{max} と ΔI_{sc} および ΔFF の相関関係では、全ての試験で、 ΔP_{max} の変化に対して ΔI_{sc} および ΔFF は同じように低下していることがわかり、 ΔP_{max} の変化は ΔI_{sc} および ΔFF に強い相関性があることがわかった。図2.5に各試験のI-Vカーブを示す。(a)がDHで(b)がHAST, (c)がAir-HASTのI-Vカーブである。ここでも各試験の試験時間におけるカーブの傾向は似ていることがわかった。

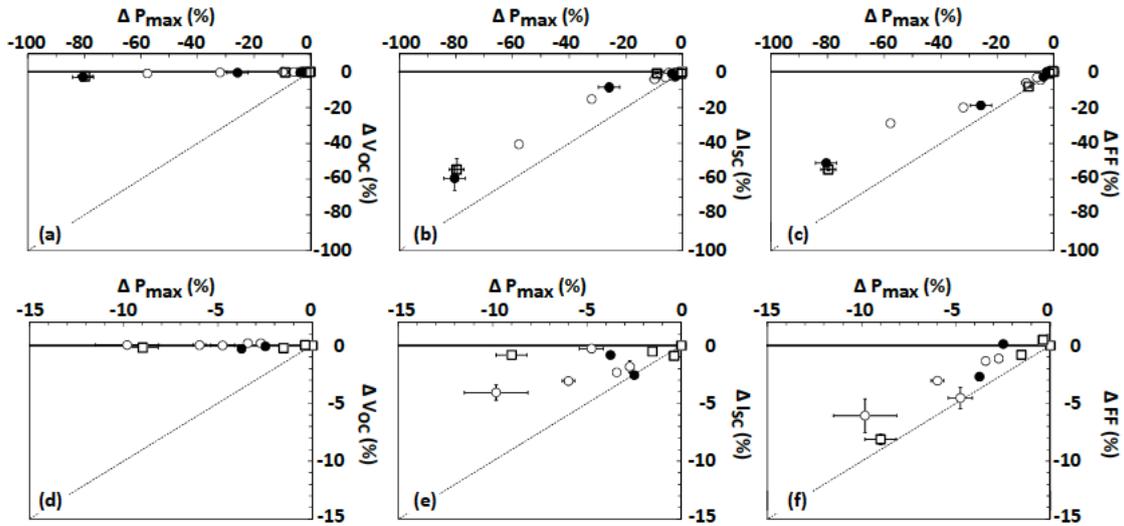


図 2.4. 各試験後における ΔP_{max} と各パラメータ (ΔV_{oc} , ΔI_{sc} , ΔFF) の相関関係

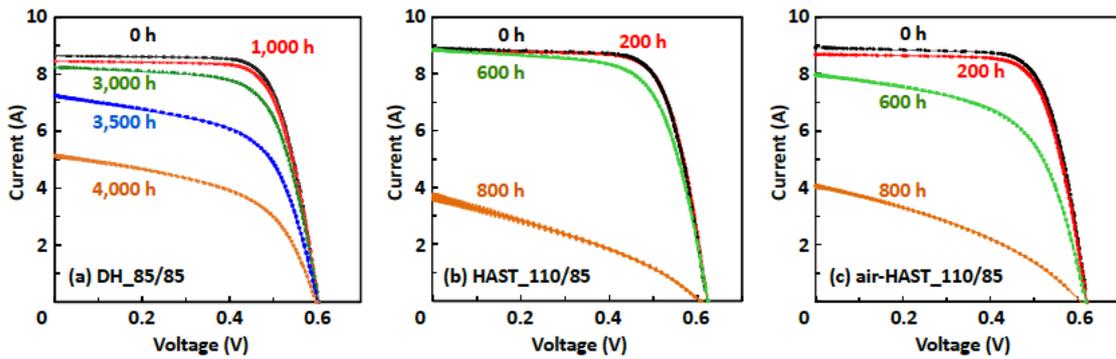


図 2.5. 各試験後における I-V カーブ (a) DH, (b) HAST, (c) Air-HAST

2.4.3 Dark I-Vによる劣化要因の推定

直列抵抗成分の変化を調べるために、HASTおよびAir-HASTのDark I-Vを測定した結果を図2.6に示す。横軸は電圧(V)で、縦軸は電流(A)であり、さらに0.4 Vから0.7 V付近を拡大した図を図中に示した。この結果から、0.5 V近傍の初期値とHASTおよびAir-HASTの800 時間後を比較するとVが変化していることが見てとれる。このことから、直列抵抗成分が増加していることが示された。また、高温高湿ストレスにおいて並列抵抗成分は増加していないことが確認され、これらの結果から、高温高湿ストレス試験(DH, HAST, Air-HAST)ではFFの減少は並列抵抗成分の減少ではなく、直列抵抗成分の増加に起因することが示された。

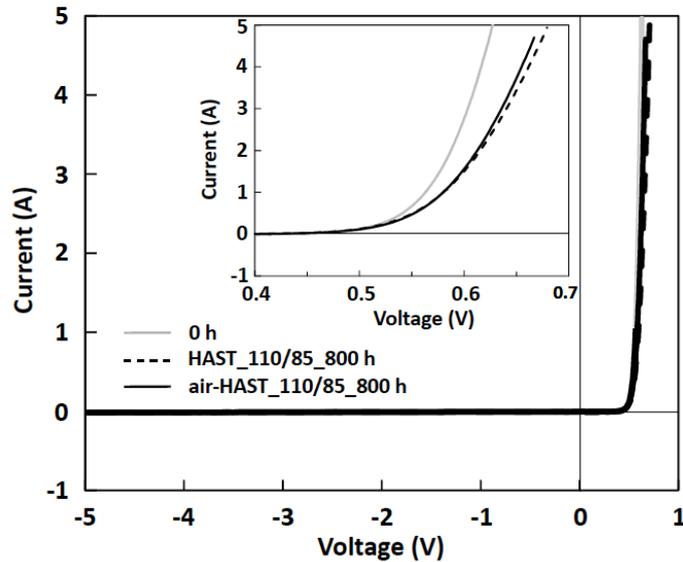


図 2.6. 初期およびHAST, Air-HAST 800 時間のDark I-V

2.4.4 イオンクロマトグラフィーによる酢酸定量化

イオンクロマトグラフィーによって求めた各試験後の残留酢酸イオン量を図2.7に示す。初期の酢酸イオン残留量はセル中央ガラス側とBS側では、BS側での残留量がわずかに多かった。セル端部ガラス側とBS側ではほぼ同等であった。Air-HAST試験400 時間では、セル中央ガラス側とBS側では、BS側での残留量が4倍になっていた。セル端部ガラス側とBS側ではガラス側での残留量が少し多かった。600 時間では、セル中央ガラス側とBS側ではBS側での残留量が2.5倍で推移していた。セル端部ガラス側とBS側ではガラス側でほぼ倍の残留量であった。800 時間では、セル中央ガラス側とBS側では、BS側での残留量が多かった。セル端部ガラス側とBS側ではガラス側で約3倍の残留量であった。HAST 800 時間では、セル中央ガラス側とBS側では、ガラス側で残留量が約2倍多かった。セル端部ガラス側とBS側では、ガラス側で約4倍の残留量であった。DH 4,000 時間ではセル中央ガラス側とBS側ではガラス側での残留量が多かった。セル端部ガラス側とBS側では、ガラス側で2.6倍であった。Air-HAST 800 時間とDH 4,000 時間のセル中央のガラス側ではほぼ同等の残留酢酸イオン量であることがわかった。セル端部の酢酸イオンの残留量を見てみると、ガラス側とBS側では、初期は両側とも同等であったが、試験後はガラス側での残留量が多いことが分かった。BS側はセル中央部と端部では殆ど同じ値であることも分かった。セル中央部でのイオン残留量では、HASTやDHでは、ガラス側で残留量が多いのに対し、Air-HASTではBS側での残留量が多いことが分かった。これは、HASTやDHでは、発生した酢酸イオンがBS側から抜け出ており、BS平面で平衡している可能性があることを示している。また、ガラス側のセル端部とセル中央部を比較すると、セル端部で残留酢酸イオン量が多いことがわ

かった。一方、Air-HASTでは、セル中央部ではガラス側よりもBS側の方が、また、ガラス側では、セル中央よりもセル端部の方が、残留酢酸イオン量が多い結果であった。外部圧力の違いによる透過率の違いを推定すると、DHやHASTでは圧力差 dP は正になり、酢酸がBSを通して外に透過できる。一方、Air-HASTでは圧力差 dP は負となり酢酸が外部に透過し難い状態にあることが推定できる。

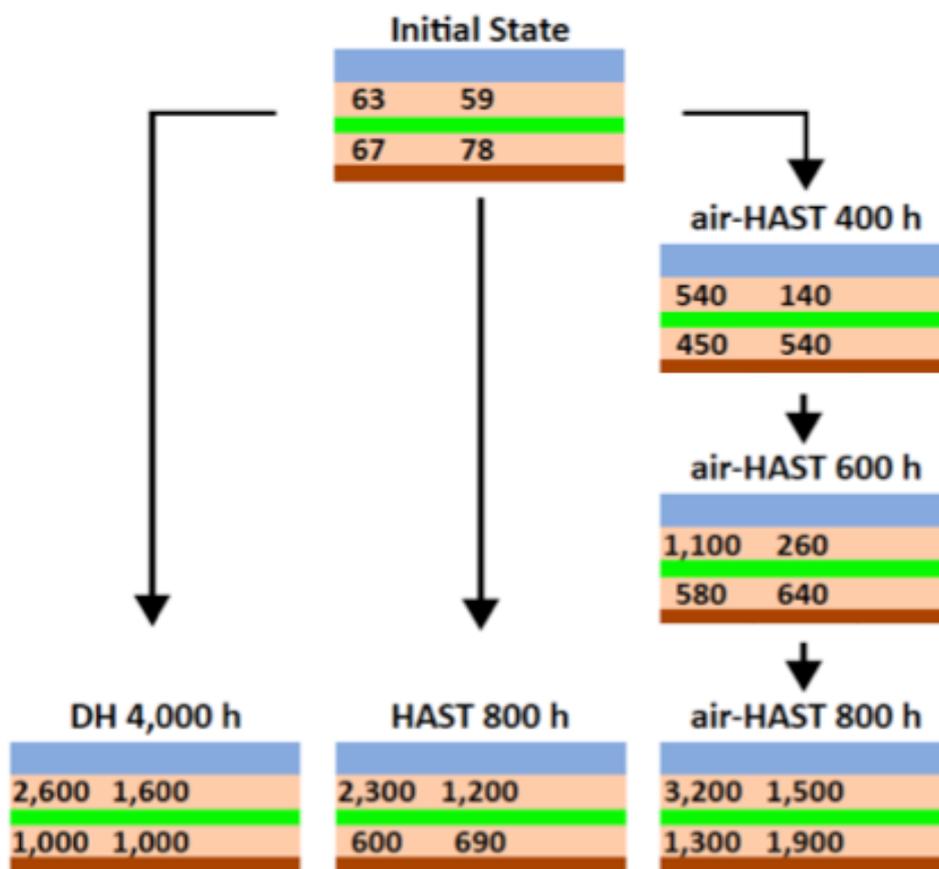


図 2.7. イオンクロマトグラフィーにより求めた残留酢酸イオン量の推移

各試験での P_{max} の変化率 ΔP_{max} と残留酢酸イオン量を比較した結果を図2.8に示す。○がAir-HASTのガラス側中央、●がAir-HASTのガラス側セル端部、□がHASTのガラス側中央、■がHASTのガラス側セル端部、△がDHのガラス側中央、▲がDHのガラス側セル端部、○がAir-HASTのBS側中央、●がAir-HASTのBS側セル端部、□がHASTのBS側中央、■がHASTのBS側セル端部を示す。ガラス側のセル端部では、全てのモジュールで、 ΔP_{max} の減少と残留酢酸イオン量の増加に相関性が見られた。

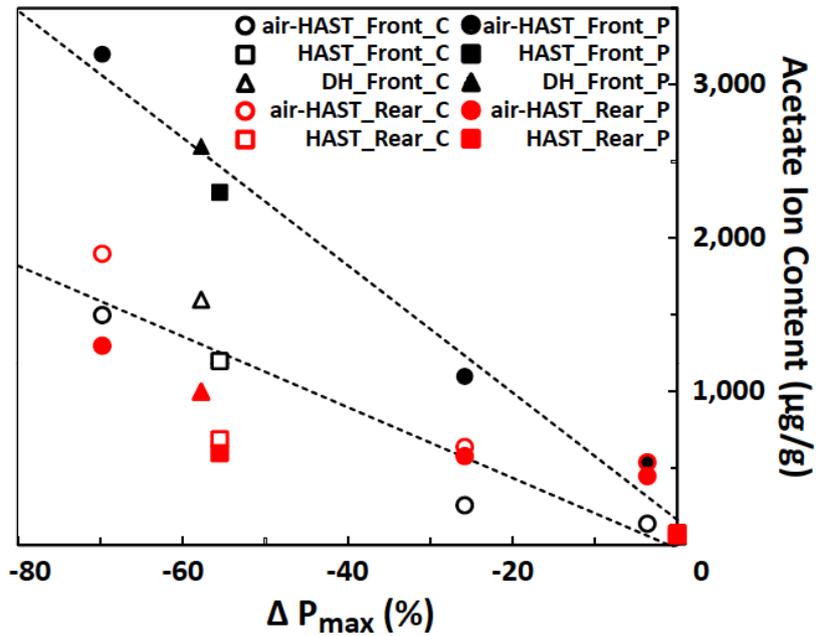


図 2.8. 各試験での ΔP_{max} と残留酢酸イオン量の関係

DHとAir-HASTのガラス側セル中央部の残留酢酸イオン量を図2.9に示す。上の横軸がDHの試験時間で、下の横軸がAir-HASTの試験時間である。これを見ると試験時間の経過と共に残留酢酸イオン量が増加しており、その量はDHとAir-HASTで同等量であることがわかった。

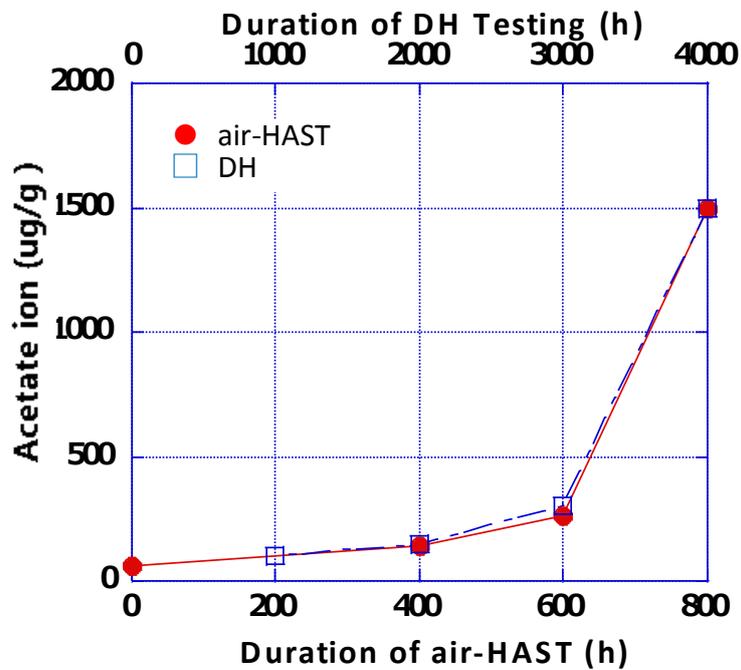


図 2.9. DHとAir-HASTのガラス側セル中央部の残留酢酸イオン量の経時変化

2.4.5 測色計による外観変化比較

各試験後の外観を比較した結果を図2.10に示す。DHの4,000 時間とAir-HASTの800 時間では変色が見られたが、HASTの800 時間では変色はあまり見られなかった。この色の変化を数値化するために測色計を用いての測定を行った。測定箇所はガラス側のセルがある部分とない部分とBS側である。結果を図2.11に示す。IEC規格で規格化されているCIE L*, a*, b* 表色系で表示している。L*は明度を、a*、b*は色相と彩度を示す色度を表す。L*が10のときのa*とb*の変化を示しており、○がDHのガラス側のセルがない場所、●がAir-HASTのガラス側のセルがない場所、□がHASTのガラス側のセルがない場所を示している。この結果から、全ての結果で、b*がプラス方向に移動しており、これは黄方向に変化していることを示している。DHとAir-HASTはHASTよりもb*が大きいことがわかる。CIE L*, a*, b*表色系を円筒座標系に変換した。明度をz, 彩度をr, 色相を ϕ とし、初期からの色変化を距離dで示した結果を図2.12に示す。(a)がガラス側のセルのない箇所、(b)がBS側、(c)がガラス側のセルのある箇所での結果で、○がDH、●がAir-HAST、□がHAST、×が基準モジュールである。上の横軸がDHの試験時間で、下の横軸はHAST, Air-HASTの試験時間である。この結果から、ガラス側のセルのない箇所での変色では、HASTは緩やかに変化しているのに対し、Air-HASTとDHでは傾きが等しい変化をしていることがわかった。時間スケールを考慮すると、ガラス側のセルのない箇所での変色は、Air-HASTはDHの10倍程度であることがわかった。また距離と各パラメータ(z, r, ϕ)との関係を図2.13に示す。(a)はガラス側のセルのない箇所、(b)はBS側である。明度(z)は、BS側では全ての試験で同傾向で、試験が経過する毎に低下していた。ガラス側ではDHとAir-HASTが同傾向で低下していたがHASTは緩やかに低下していた。色相(ϕ)はガラス側、BS側の両方で、DHでは2,000 時間以降、HAST, Air-HASTでは200 時間以降で、試験が経過してもほとんど変化がなかった。彩度(r)はガラス側ではDHとAir-HASTが同傾向の変化をしており、HASTは緩やかであった。BS側は3試験とも同様の傾向であった。これらのことから、モジュールの変色は明度と彩度が変わっており、ガラス側のセルのない箇所では、DHとAir-HAST は明度、彩度ともに同傾向の変化であり、変色を10倍程度加速していることがわかった。一方でHASTでは明度、彩度ともに変化が緩やかであった。DHとAir-HASTとHASTに変色の違いが現れた一因として槽内の空気の影響が考えられる。

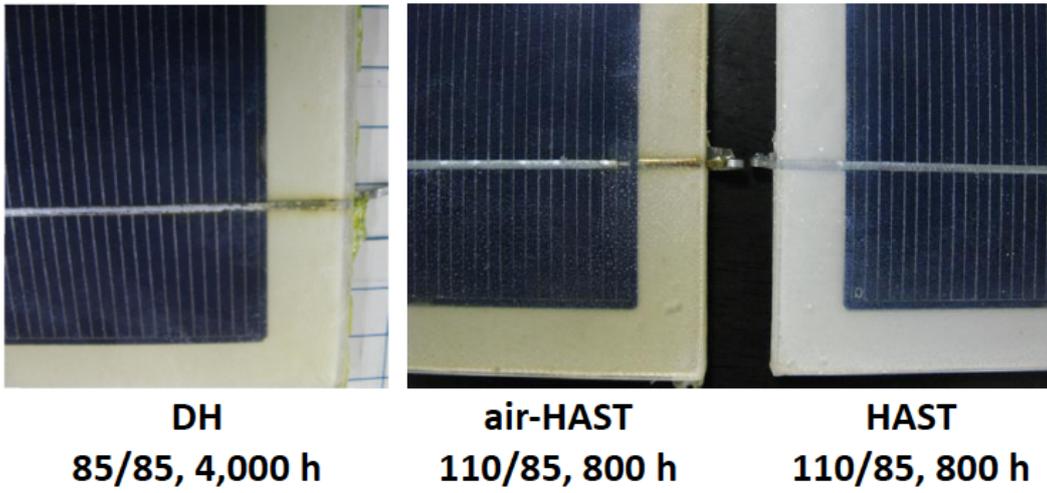


図 2.10. 各試験における変色の外観比較

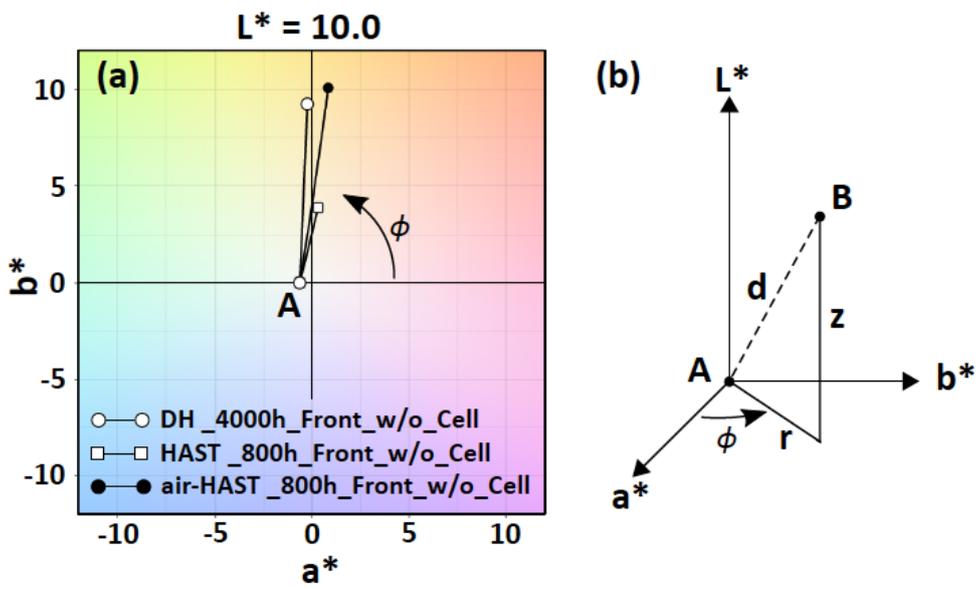


図 2.11. (a) CIE L^* , a^* , b^* 表示系による変化, (b) 座標系の変更

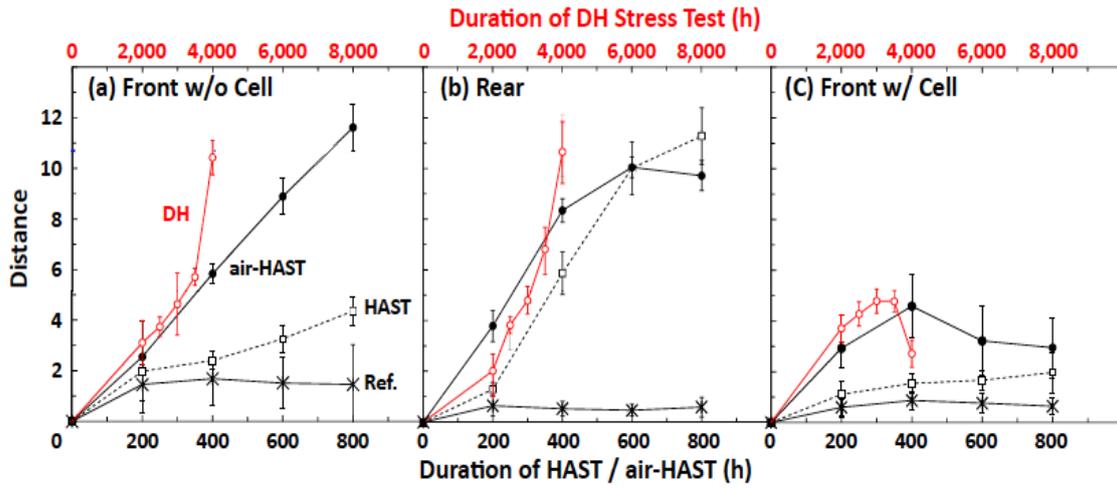


図 2.12. 円筒座標系変換後の初期値からの距離の試験時間依存性
 (a) ガラス側セルなし, (b) BS側, (c) ガラス側セルあり

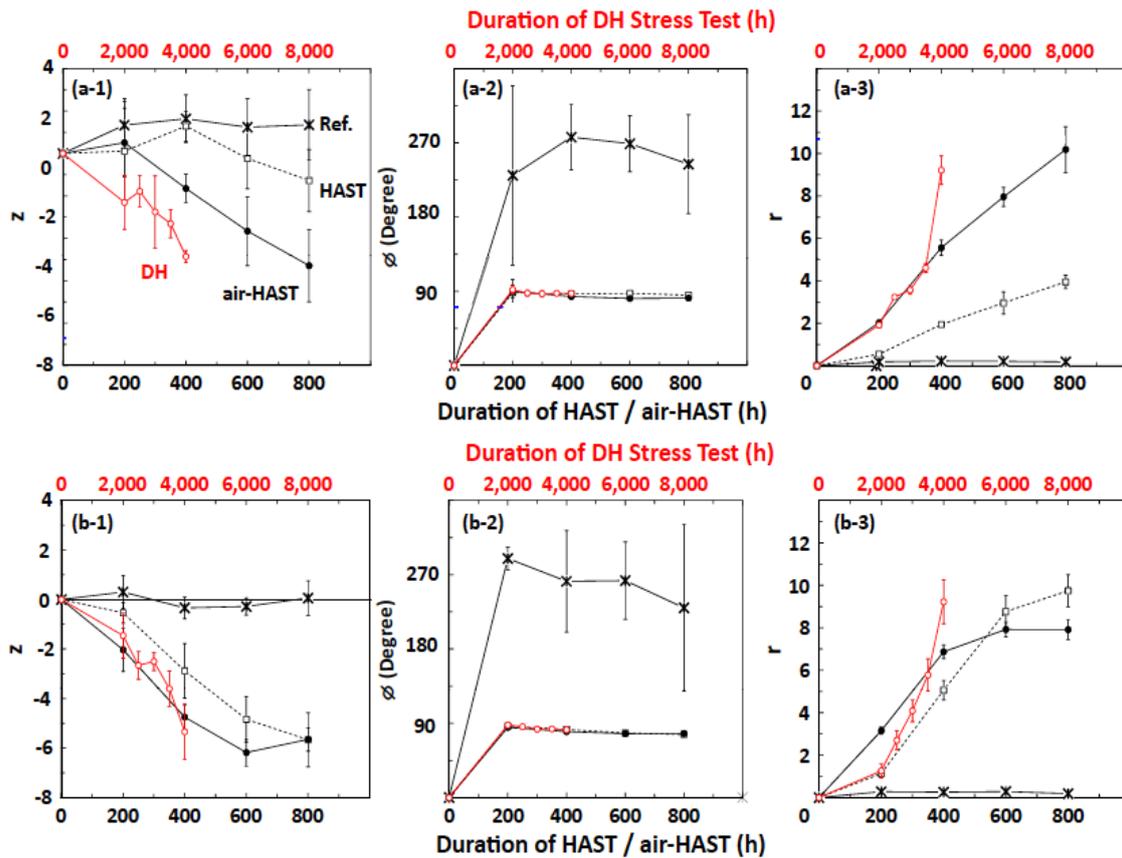


図 2.13. 円筒座標系変換後の各パラメータの試験時間依存性
 ガラス側セルなし (a-1) 明度(z), (a-2) 色相(ϕ), (a-3) 彩度(r)
 BS側 (b-1) 明度(z), (b-2) 色相(ϕ), (b-3) 彩度(r)

2.4.6 高解像度SEMによるフィンガー電極断面観察

図2.14に試験前のフィンガー電極とSi界面付近の断面SEM像を示す。白い箇所がAg電極で、その下部がSiである。SiとAg電極界面での剥離はみられなかった。次に、各試験を実施したモジュールのEL暗部と明部を切り出したサンプルにおけるフィンガー電極とSi界面付近の断面SEM像を図2.15に示す。中央の白い箇所がAg電極で、その下部がSiである。EL明部の界面付近に着目して観察すると、界面のSiとAgは全体的に接着しているが、一部で剥離している部分が観察された。また、フィンガー電極が無くなっている部分も観察された。一方EL暗部付近では界面のSiとAgは全体的に剥離しており、接着している部分は一部であった。HAST 800 時間のEL明部付近のフィンガー電極では界面のSiとAgが剥離している箇所と接着している箇所が点在していた。また、フィンガー電極の一部が消失している箇所がいくつか確認できた。EL暗部付近のフィンガー電極では界面のSiとAgは全体的に剥離しており、接着している部分が殆ど観察されなかった。Air-HAST 400 時間ではELに明暗の差が殆ど無かったので、セル中央付近と端部のフィンガー電極の断面観察を行った。中央付近のフィンガー電極の界面では、界面のSiとAgは全体的に接着しており、一部剥離はあるものの、その距離はDHやHASTなどと比べると狭いことがわかった。端部付近のフィンガー電極の界面も同様で全体的に接着しており、剥離も中央付近よりは少し多い程度であった。Air-HAST 800 時間のEL明部付近のフィンガー電極では界面が全体的に接着していたが、剥離している箇所も見受けられた。剥離の距離は400 時間よりも大きい。EL暗部付近のフィンガー電極では界面が全体的に剥離していた。これらの結果より、EL暗部では明部に比べてフィンガー電極の界面のSiとAgが剥離している割合が大きい傾向があることが分かった。また、フィンガー電極の一部が消失していることや剥離の度合いから、接合界面の接着力が低下していることが示唆される。Air-HAST800 時間後の分析位置Aにおけるフィンガー電極のEDXによる分析を行った。分析位置を図2.16に結果を表2.4に示す。剥離部でのNaやPbの偏析による濃化は観察されなかった。

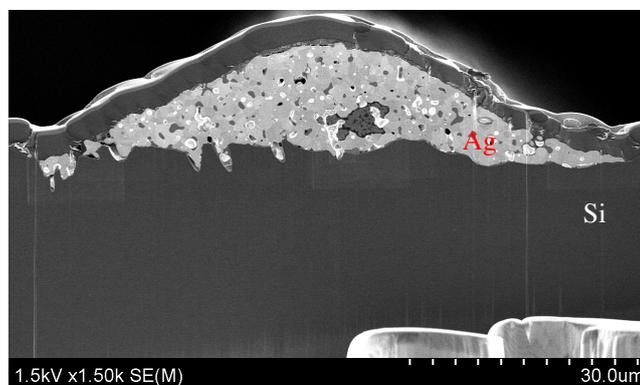


図2.14. 試験前のフィンガー電極断面観察 反射電子像, 倍率: 1,500 倍, 印加電圧 : 15 kV

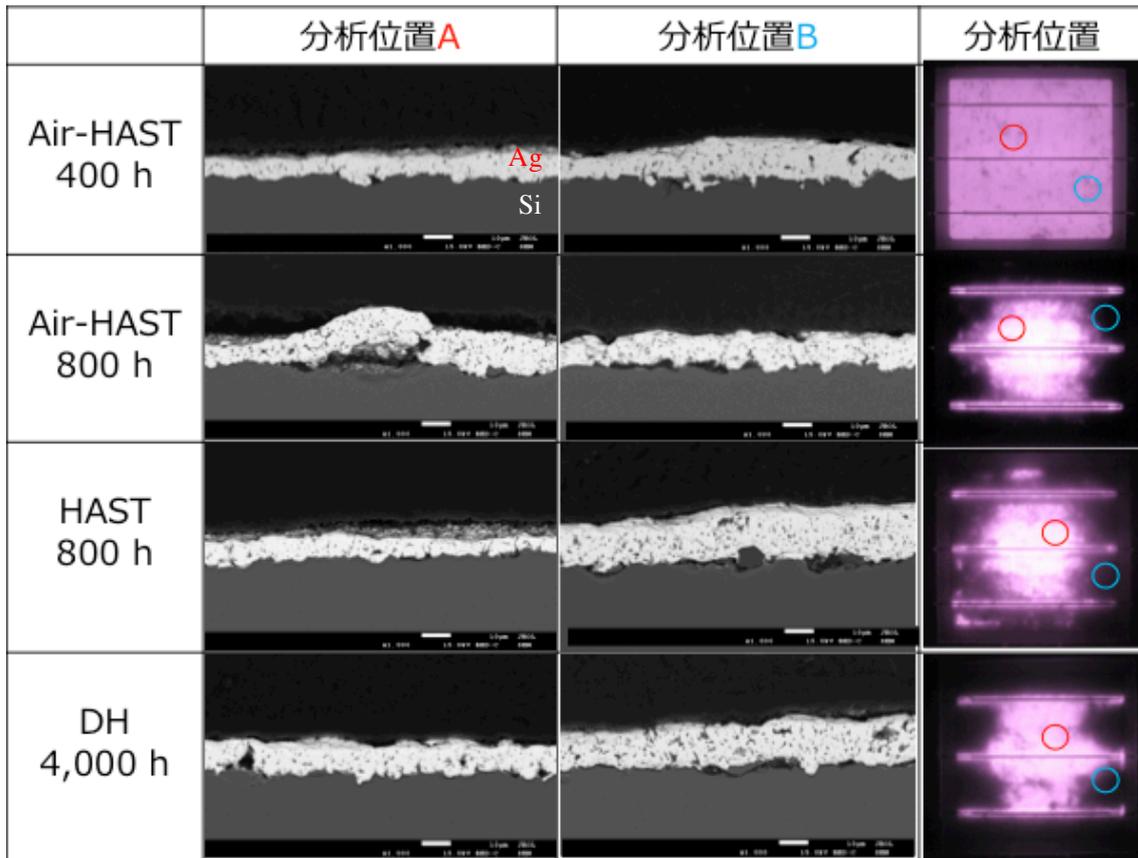


図 2.15. 各試験の断面観察 反射電子像, 倍率 : 1,000 倍, 印加電圧 : 15 kV

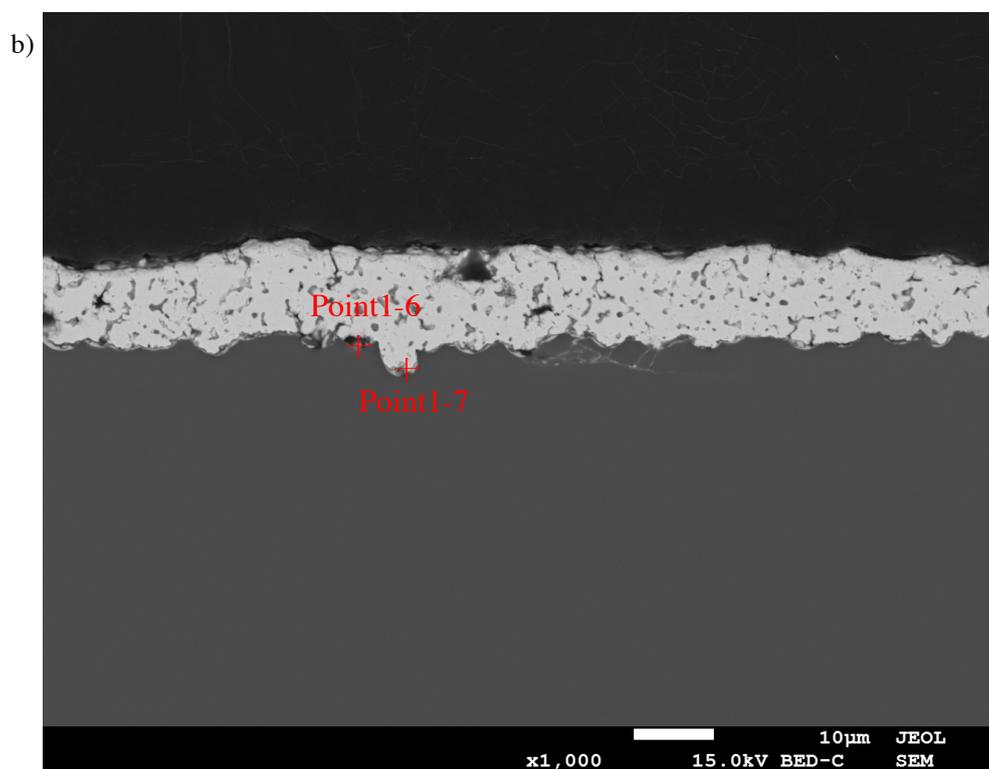
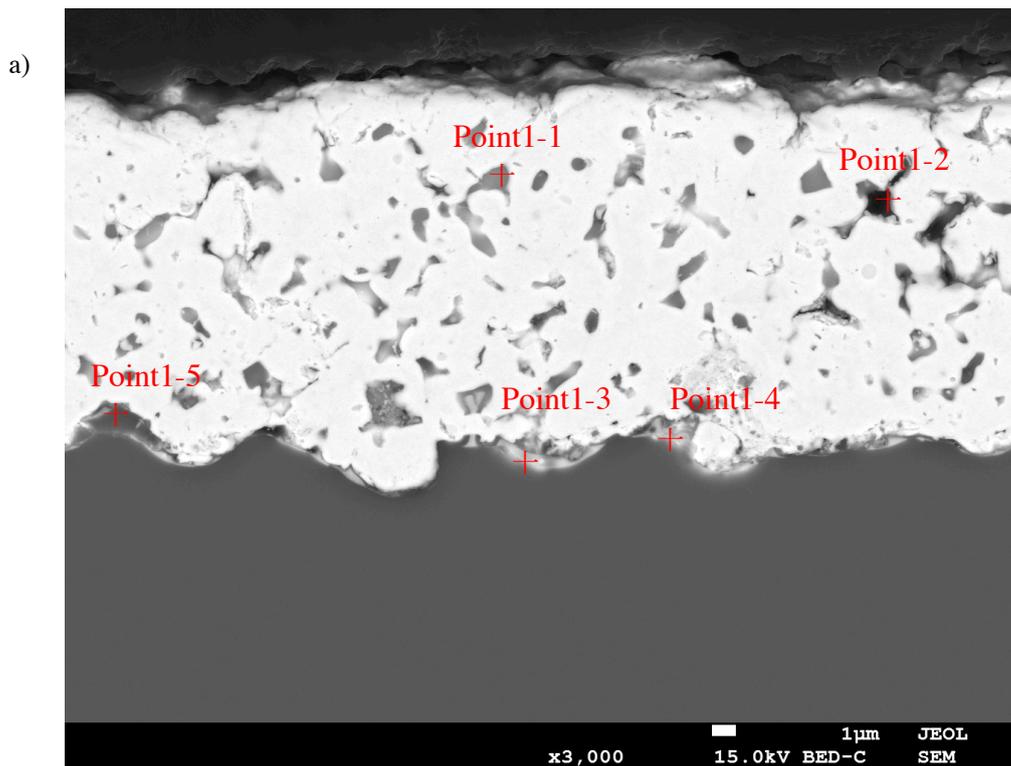


図 2.16. Air-HAST, 800 時間後の分析位置AでのEDX定性分析位置倍率
a) 3,000 倍, 印加電圧 : 15 kV, b) 1,000 倍, 印加電圧 : 15 kV

表 2.4. Air-HAST, 800 時間後の分析位置AのEDX 分析結果

表示: 重量%

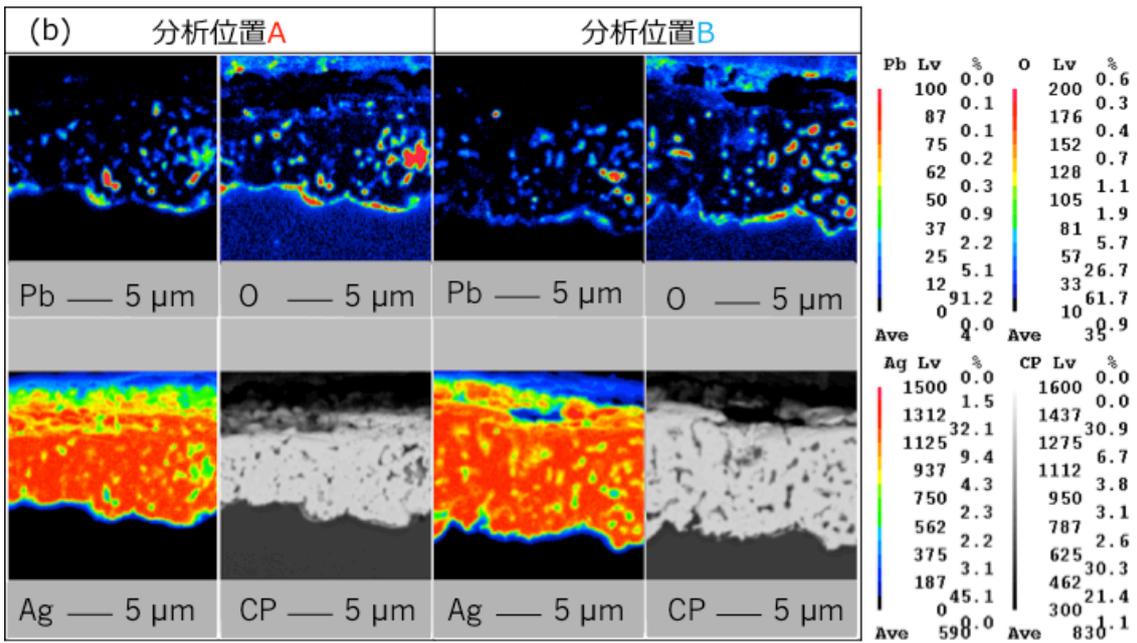
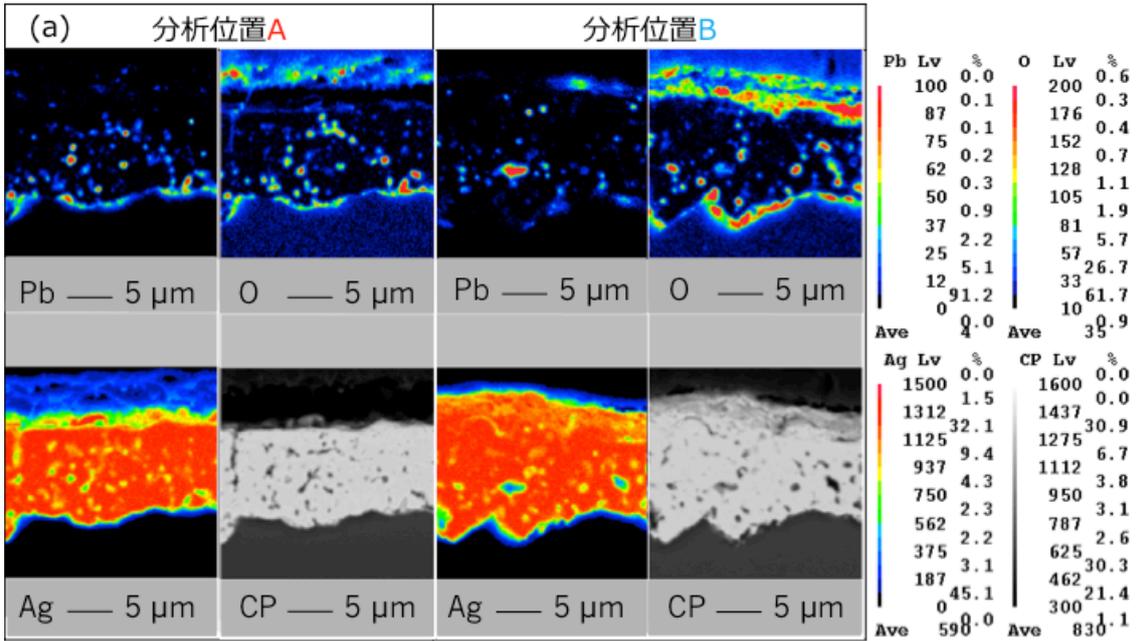
	Point1-1	Point1-2	Point1-3	Point1-4	Point1-5	Point1-6	Point1-7
C-K	2	17	10	80	7	11	25
N-K	-	-	2	-	-	-	-
O-K	17	3	3	1未満	4	4	2
Na-K	1	-	1未満	-	-	1未満	-
Al-K	1	-	-	-	-	-	-
Si-K	4	1未満	43	6	58	13	31
Ag-L	61	78	34	12	26	64	29
Pb-M	14	2	7	2	6	9	12

2.4.7 EPMAによる元素マッピング

上記で断面観察したフィンガー電極の試料を用いてEPMA装置(日本電子製: JXA-8200)による元素分析を行い、試料間の比較を行った。測定条件を表2.5に示す。分析した位置は先ほどの断面観察箇所と同じである。DH 4,000 時間における元素マッピングの結果を図2.17 (a)に示す。ELの明部と暗部における、Pbの分布とOの分布に着目する。EL明部では、PbはSiとAg電極界面付近に多く存在するが、EL暗部ではSiとAg電極界面から電極上部まで拡散していることがわかる。OはEL明部、暗部の両方で、SiとAg電極界面と封止材の界面に多く存在している。図 2.17 (b),(c)に示すHAST 800 時間やAir-HAST 800 時間でも同様の傾向であることがわかった。これらの結果から、DHの4,000 時間とHASTとAir-HASTの800 時間の断面での組成は同傾向であることがわかった。

表 2.5. EPMA分析測定条件

項目	内容・条件
加速電圧	15 kV
ビーム電流	50 nA
分析領域	25 μ m \times 25 μ m
積算時間	40 ms
分析元素	Ag, Pb, O



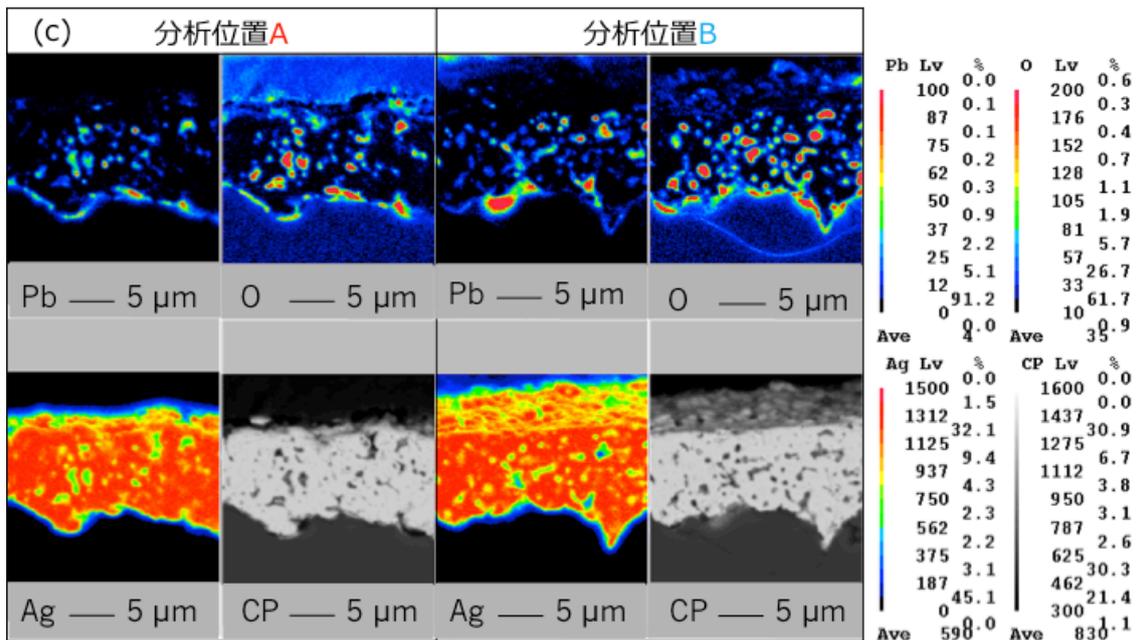


図 2.17. 各試験後のEPMA観察結果比較

(a) DH 4,000 時間, (b) HAST 800 時間, (c) Air-HAST 800 時間

2.5 in situ計測による抵抗値の連続測定

2.5.1 太陽電池モジュール等価回路

太陽電池モジュールの試験を実施する際の課題の一つに測定がある。一般的にはある一定時間試験を実施した後に試験器から太陽電池モジュールを取り出し、発電性能特性やEL像を撮影し、劣化の確認を行う。この場合、劣化がどのタイミングで発生しているか、劣化に温度特性がある場合には検出することが難しい。そこでHASTにおいて交流インピーダンス法によるin situ連続計測を実施し、劣化の兆候の検出の可能性について検討を行った。

太陽電池モジュールの交流等価回路を図2.18と式(1)~(3)で定義する。インピーダンスの大きさ $|Z|$ は以下の式で表すことが出来る。ここで R_s は直列抵抗成分、 C_s はコンデンサ成分、 R_p は並列抵抗成分、 $\Theta = \arg Z$ はコンデンサ成分に由来する電圧と電流の位相差、 f は周波数、 ω は角周波数を表す。

$$|Z| = \frac{\sqrt{(R_s + R_p)^2 + (\omega C_s R_s R_p)^2}}{\sqrt{1 + (\omega C_s R_p)^2}} \dots (1)$$

$$\arg Z = -\tan^{-1} \left(\frac{\omega C_s R_p^2}{R_s + R_p + R_s (\omega C_s R_p)^2} \right) \dots (2)$$

$$\omega = 2\pi f \dots (3)$$

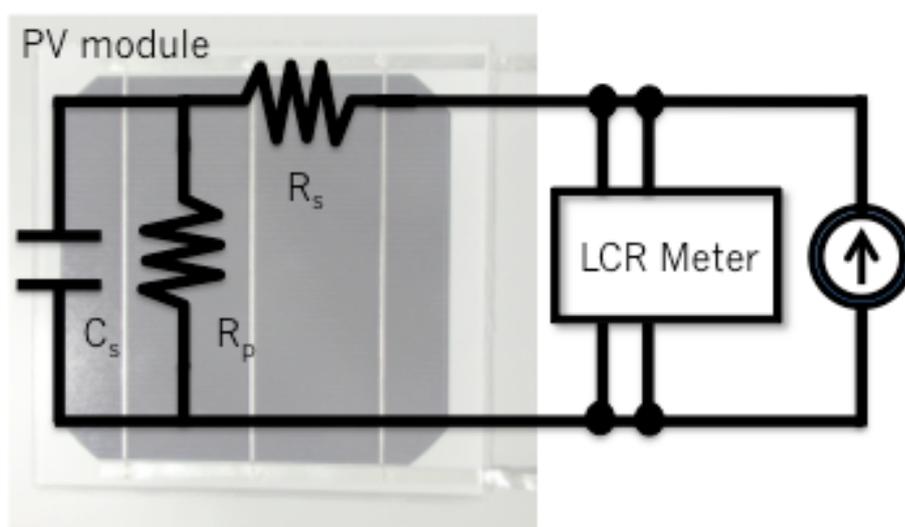


図 2.18. 太陽電池モジュールの交流等価回路とLCR測定回路

使用したサンプルの部材は全て市販品であり、6インチの単結晶Siセルを3.2 mm厚の白板強化ガラスとTPTのBSを用いEVAで封止した単セルモジュールを用いた。試験条件は120 °C, 95%, 583 時間まで実施した。初期と583 時間までのI-V特性を比較した結果を示す。●は初期、●は200 時間後、●は383 時間後、●は583 時間後のソーラーシミュレータの実測値を示す。-は初期、-は200 時間後の実測値から計算したI-Vカーブを示す。200 時間以降の計測結果は値がふらついており、電流が低下していた。583 時間後の電流値は0 V付近まで低下していた。図2.20に、583 時間後のEL像を示す。EL像はセル内部に暗部が広がっており、セル端部とセル中央部のバスバー電極付近で明部が見られた。次に試験 2時間後から577 時間後までの周波数毎の|Z|とθを図2.21に示す。この結果から、30 kHz付近に共振点があることがわかった。この共振点以下の周波数において観察したインピーダンス特性(ナイキストプロット)の経時変化を図 2.22に示す。380 時間を越えた付近からプロットが大きく右側に移動し、 R_s が増大し始めていることがわかった。このことより、交流インピーダンス法によるin situ計測を行うことでモジュールの R_s の変化の兆候を捉える可能性が示された。

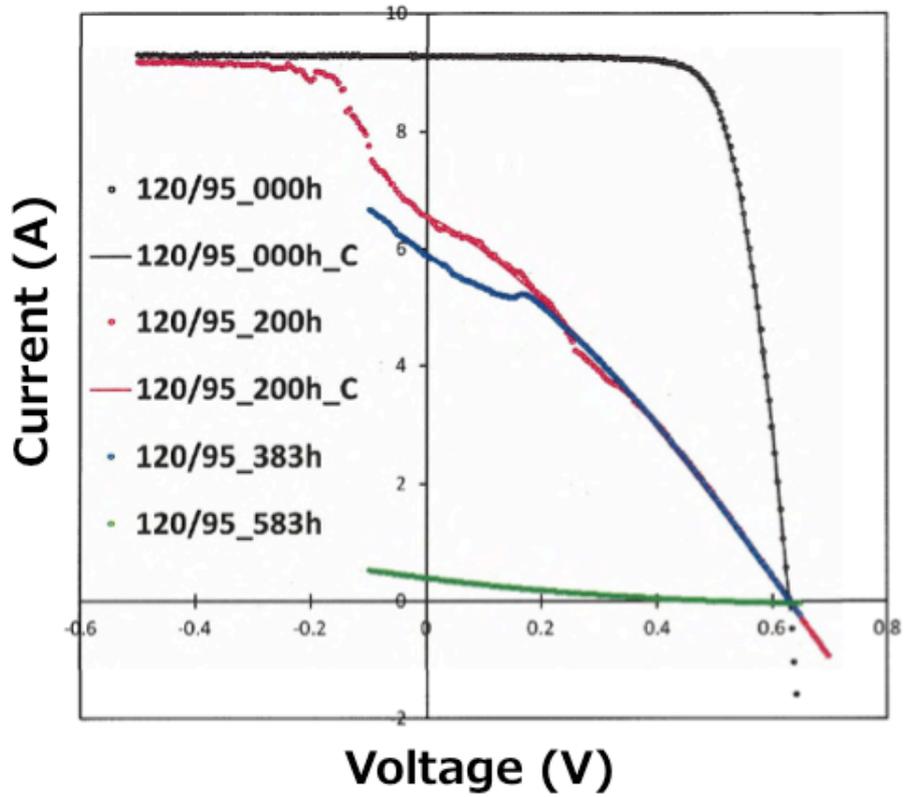


図2.19. 初期値と試験毎のI-V特性比較

- : 初期, ● : 200 時間後, ● : 383 時間後, ● : 583 時間後の
ソーラーシミュレータによる実測値,
- : 初期, - : 200 時間後, - : 200 時間後, - : 200 時間後の
実測値より計算した I-V カーブ

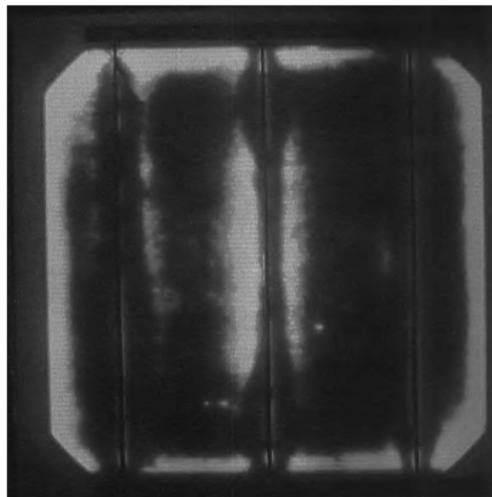


図 2.20. HAST 120 °C, 98%, 583 時間後のEL像

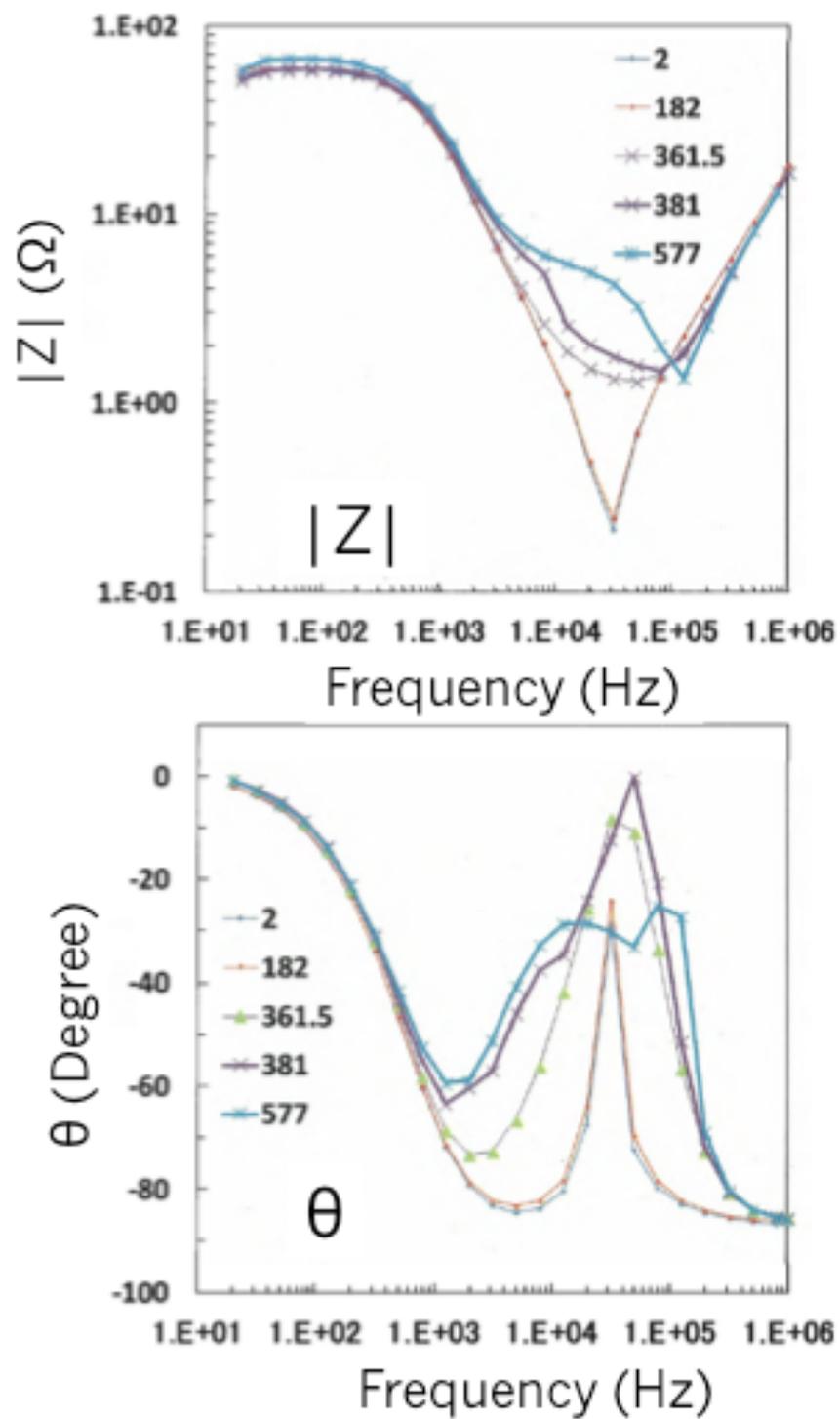


図 2.21. 交流インピーダンス法による $|Z|$ と θ の経時変化

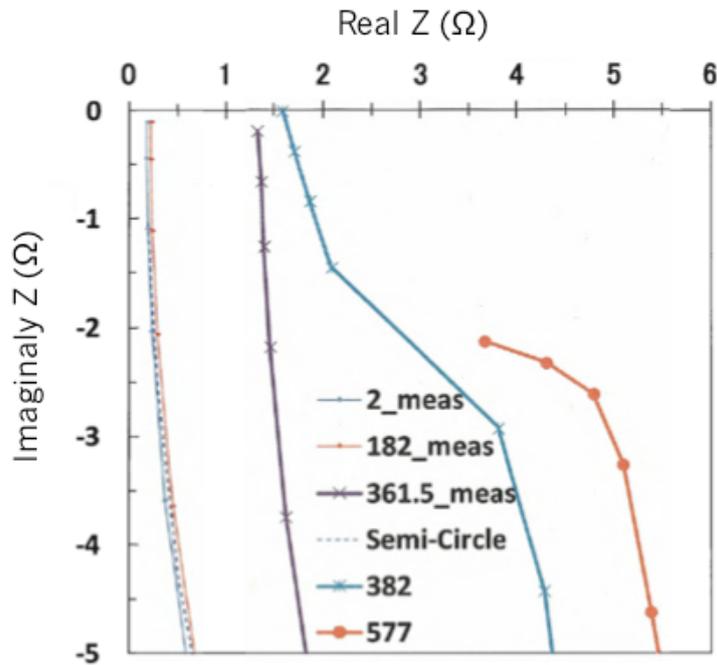


図 2.22.2 時間後, 182 時間後, 361.5 時間後の平均値と 382 時間後, 577 時間後の測定データより算出したZのナイキストプロット

2.6 劣化メカニズムの考察

今回実施した多結晶Si太陽電池1セルモジュールについて、DHの劣化メカニズムについて考察する。Miyashitaらの研究²⁻⁴⁾によると、DHによりBS側とモジュール端部から内部に水分が浸入することが明らかになった。内部に浸入した水分が封止材のEVAと反応し、酢酸イオンが発生する。本研究でもモジュール内部に酢酸が多く残っていることが示された。元素分析では界面の剥離部分や電極内の隙間にOやPbが観察できたが、試験や場所による差は見られなかった。これらのことより、Dark I-Vで示された直列抵抗成分の増加は界面における特定元素の酸化による抵抗の増加ではなく、界面の接合強度の低下による接続面積の低下や剥離による抵抗の増加を示唆すると考えられる。フィンガー電極はAgペーストをガラスフリットとして焼成する方法を用いて作製されている。このガラスフリットは酸性水溶液に溶ける可能性が示唆されており、高温高湿環境下におけるモジュール内への水分浸入によるEVAからの酢酸発生により、ガラスフリットが溶解し、界面における電極の導電性の低下や、接合強度が脆くなっているため接続抵抗の増加や剥離が引き起こされていると考えられる。Agのガラスフリット中にPbを入れ、耐食性が良く、電子伝導性の良いPbO₂として利用しており、界面にPbO₂は多く存在すると考えられる。元素マッピングの結果からもELの明部ではAg電極界面でPbO₂の分布が見られるが、EL暗部ではPbが電極全体に拡散している。酢酸鉛は可溶性であるため、酢酸にさらされることにより腐食されPb²⁺と不安定な

状態になる。酢酸塩と大気中の炭酸ガスを含む水溶液中では保護性の PbO_2 が侵されて、 $2\text{PbCO}_3 \cdot \text{Pb}(\text{OH})_3$ となり耐食性が失われる。うすい酢酸の場合は溶存酸素によって腐食が進行する。このため、導電性の良い PbO_2 が減り、ガラスフリットの接合強度が低下する。断面観察において、接合強度の低下したAg電極界面での剥離が観察された。酢酸による電極剥離を再現するために、85 °C 酢酸濃度20%水溶液にセルを浸し7 時間放置したところ、バスバー電極の剥離とAg電極の剥離が観察できた。Ag電極の剥離によりAg電極の集電効率が低下することで発電性能が低下していることがわかった。

2.7 結言

DHの劣化メカニズムを解明し、劣化メカニズムに立脚した加速試験方法を確立するために、多結晶Si太陽電池1セルミニモジュールを用いて、HAST, Air-HAST試験を実施し、以下の知見を得た。

1. TTFP に基づき DH 85 °C, 85%の延長試験 4,000 時間を実施した。DH の加速方法の検討として HAST 試験、Air-HAST 試験を 800 時間実施した。その結果、DH 4,000 時間と Air-HAST 110 °C, 85%, 800 時間では試験後の発電性能特性や EL、外観比較において、相関性があることが確認できた。
2. HAST 試験は 110 °C, 85%, 800 時間では、試験後の発電性能特性、EL は DH 4,000 時間と相関性があるものの、外観比較において着色に違いが現れた。着色の差は、槽内の残留空気の影響による。
3. Dark I-V 測定により、DH や Air-HAST では、直列抵抗の増加が劣化要因であることが推定された。
4. イオンクロマトグラフィー法による酢酸定量化では P_{\max} の変化率と残留酢酸イオン量に相関性を見出した。また、DH と Air-HAST の残留酢酸イオン量の経時変化も相関性が高いことを示した。
5. 高解像度 SEM 及び EPMA による断面観察、元素分析では DH、HAST、Air-HAST とともに Si、Ag 界面で剥離が発生していることが確認できた。これらのことより、DH の劣化は Si と Ag 電極の剥離による集電効率の低下が発電性能劣化を引き起こすことを明らかにした。
6. in situ 計測により試験の早い段階で、直列抵抗値の上昇を捉えることができ、劣化の兆候を押さえることができた。

これらのことより、今回実施した、多結晶Si太陽電池1セルミニモジュールにおいて、Air-HAST試験は、DH試験の劣化モードとの相関性を維持しながら、試験時間を5倍短縮できることがわかり、劣化メカニズムに立脚した加速試験方法を確立できた。

第3章 温度サイクル試験による発電特性劣化に関する劣化メカニズムに 立脚した加速試験法の確立

3.1 緒言

本章では、温度サイクル試験(Thermal Cycle Test, 以下 TC)の劣化メカニズムに基づいた加速試験方法の確立を目的とし、Aoki ら¹⁻¹³⁾が提唱した急速温度サイクル試験 (Rapid Thermal Cycle Test, 以下 RTC)の試験条件を検討する。図 3.1 に TC の試験プロファイルを示す。太陽電池モジュールは複合部材を積層し、ラミネートにより接着することで製品となっている。TC は-40 °Cの低温と 85 °Cの高温の温度変化を繰り返し行うことで、各部材の熱膨張係数の違いによる、収縮・膨張の影響を確認する試験であり、セルとインターコネクタのはんだ接合部や端子箱内の配線接続部といった箇所の耐久性を確認する試験である。TC の試験条件は、温度条件が-40 °C ⇔ 85 °Cであり、この温度の上下動を 1 サイクルとして、50 回もしくは 200 回のサイクルを繰返す試験である。また、温度移行速度が最大で 100 °C / 時間、低温、高温ともに温度が安定してから、温度を保持する時間が最短で 10 分間必要であり、1 サイクルは最短で 2 時間 50 分となる。また、1 サイクル最大で 6 時間の制限もある。1 サイクルが約 3 時間とし、200 サイクルの試験を実施した場合で 600 時間、1 サイクルを 6 時間で 200 サイクルとした場合は 1,200 時間かかる試験である。これまでの報告³⁻¹⁾では、TC を 200 サイクル実施した場合の最大出力の低下は 0.5 ~ 2% 程度にすぎず、1,500 サイクルまで試験を延長した結果でも、4%程度の減少にとどまった。一方、TC のサイクルを 400 サイクルに伸ばした場合に最大出力が 8%程度減少した報告³⁻²⁾や、さらに、TC 500 サイクルが屋外曝露の 25 年に相当するとの報告²⁻¹⁾もされている。これらの研究では、試験回数を延長することで劣化の促進を図っているが、最大出力の低下がわずかであり、さらに試験が長期化することが懸念される。一方、Aoki らが行った RTC は温度移行速度を現行の 100 °C/ 時間から 400 °C/ 時間とし、1 サイクルを約 1.5 時間と短時間で急激な温度変化を太陽電池モジュールに負荷する試験である。さらに in situ 計測による連続計測を実施した。この結果、200 ~ 300 サイクルで、高温時のモジュールインピーダンスが増加することを明らかにするとともに、300 サイクルで最大出力が 30%低下することを見いだした。この時の RTC の試験条件を変更することで更なる加速が可能かの検討を行った。

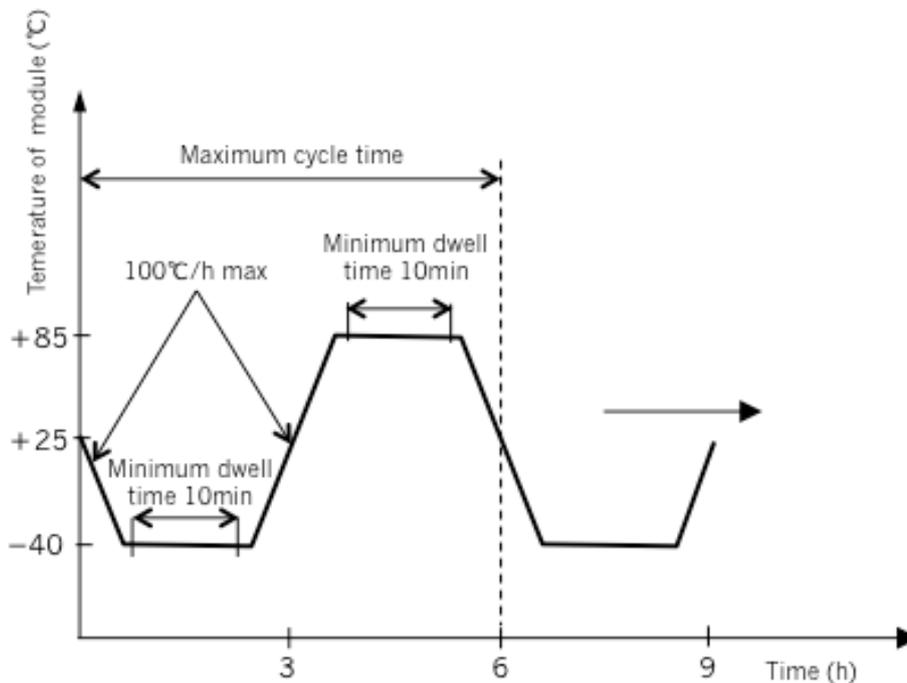


図 3.1. 温度サイクル試験 試験プロファイル

3.2 急速温度サイクル試験の条件選定

3.2.1 太陽電池モジュール構成部材

TC, RTC で用いた太陽電池モジュールの構成部材を表 3.1 に示す。また太陽電池モジュールの外観図を図 3.2 に示す。太陽電池モジュールは 540 mm×200 mm の 3 セルミニモジュールとした。太陽電池セルは、セルサイズは 156 mm×156 mm で、セル厚さは $t = 180 \mu\text{m}$ 、3 本バスバーで変換効率が 16.2% の Q-Cells の多結晶シリコンセルを使用した。配線材には、主材が銅で、鉛入りはんだで表面が覆われている幅 1.5 mm の日立電線製の配線材を使用した。この配線材とセルをエヌ・ピー・シー製セル自動配線装置(NTS-150-S-H-3K)にセットして自動配線を行った。カバーガラスには、サイズが 540 mm×200 mm で、厚さは $t = 3.2 \text{ mm}$ の旭硝子製の白板強化ガラスを使用した。封止材は EVA の FAST Cure タイプで、厚みは $t = 450 \mu\text{m}$ でガラスサイズに合わせてカットして使用した。バックシート(以下、BS)は、Tedlar / PET / Tedlar (以下、TPT)で構成された BS を使用しモジュール作製を行った。TPT の厚さは、Tedlar が $t = 38 \mu\text{m}$ で、PET が $t = 250 \mu\text{m}$ でトータル $326 \mu\text{m}$ である。これらの部材を重ね合わせて、エヌ・ピー・シー製の真空ラミネータ LM50×50S により 150 °C でラミネートを行い、モジュールを作製した。なおこれらのモジュールの周囲はフレームの設置を行っていない。なお、全ての環境試験は太陽電池セルの両電極を接続せずに、開放状態で実施した。

表 3.1. 太陽電池モジュールの構成部材

Material	Specification	Size	Supplier
Cell	Multi-crystallineSi cell	156 mm×156 mm t = 180 μ m	Q Cells
Glass	Semi-tempered glass	540 mm×200 mm t = 3.2 mm	AGC
Encapsulant	EVA (Fast Cure)	t = 450 μ m	SANVIC
Interconnector	A-SPS (Leaded, Ag)	W = 1.5 mm	Hitachi Cable
Back sheet	TPT	T : t = 38 μ m P : t = 250 μ m TPT : t = 326 μ m	Nondisclosure

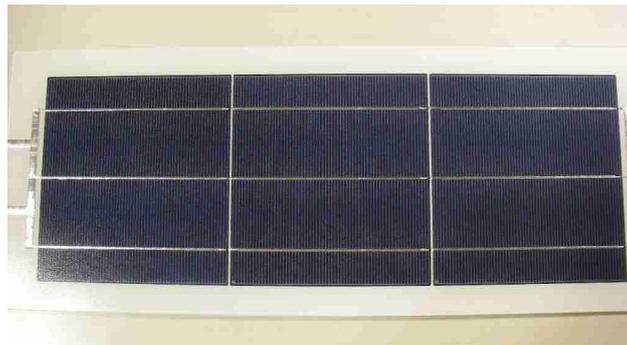


図 3.2.3 セルミニモジュール外観

3.2.2 RTC の試験条件

RTC にはエスペック製の冷熱衝撃試験装置 TSA 101S-W を使用した(図 3.3)。この装置は上部に高温に温度を保っている部屋があり、下部は低温に温度を保っている部屋になる。中央の試験室に試料を設置する。試験室に通じるダンパーを開け閉めすることで急速に温度を入れ替えることで温度勾配を上げて、到達温度までの時間を短縮することが可能となる装置である。TC と RTC 試験条件を表 3.2 に示す。RTC は温度範囲が TC と同条件の $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \Leftrightarrow 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ と高温域を上昇させた $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \Leftrightarrow 110\text{ }^{\circ}\text{C}$ を実施した。温度変動幅は $\Delta 125\text{ }^{\circ}\text{C}$ と $\Delta 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ となる。上限の温度を $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ に上げることで、温度変動幅 Δt を大きくとり、熱膨張係数の違いによる材料係数のミスマッチで起こる不具合をより早く起こそうというのが狙いとなる。また、モジュールを一定温度に曝す時間を通常よりも短くすることで、1サイクルの低温高温での保持時間を短縮することも試みた。温度移行速度は $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \Leftrightarrow 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ で $400\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{時間}$ とし、 $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \Leftrightarrow 110\text{ }^{\circ}\text{C}$ で $600\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{時間}$ とした。低温高温それぞれの保持時

間は 15 分とし 1 サイクルを 1 時間とした場合と、保持時間を 30 分とし、1 サイクルを約 1.5 時間とした試験を実施した。図 3.4 に試験での槽内温度と太陽電池モジュール温度の結果の一部を示す。太陽電池モジュールの温度は BS 側の中央 1 点に熱電対をはりつけ測定している。この結果から、保持時間が低温高温ともに 15 分以上保持できていることが確認できる。



図 3.3. 冷熱衝撃試験装置の外観

表 3.2. RTC と TC の試験条件比較

	RTC	TC
温度範囲 (温度変動幅)	-40 °C ⇔ 85°C (Δt=125 °C) -40 °C ⇔ 110 °C (Δt=150 °C)	-40 °C ⇔ 85 °C (Δt=125 °C)
温度移行速度	400 °C / 時間 (-40 °C ⇔ 85 °C) 600 °C / 時間 (-40°C ⇔ 110 °C)	100 °C / 時間
保持時間	低温: 15 分 / 高温: 15 分 低温: 30 分 / 高温: 30 分	低温: 60 分 / 高温: 60 分
1 サイクルの時間	1 時間～1.11 時間 1.5 時間～1.63 時間	4.5 時間

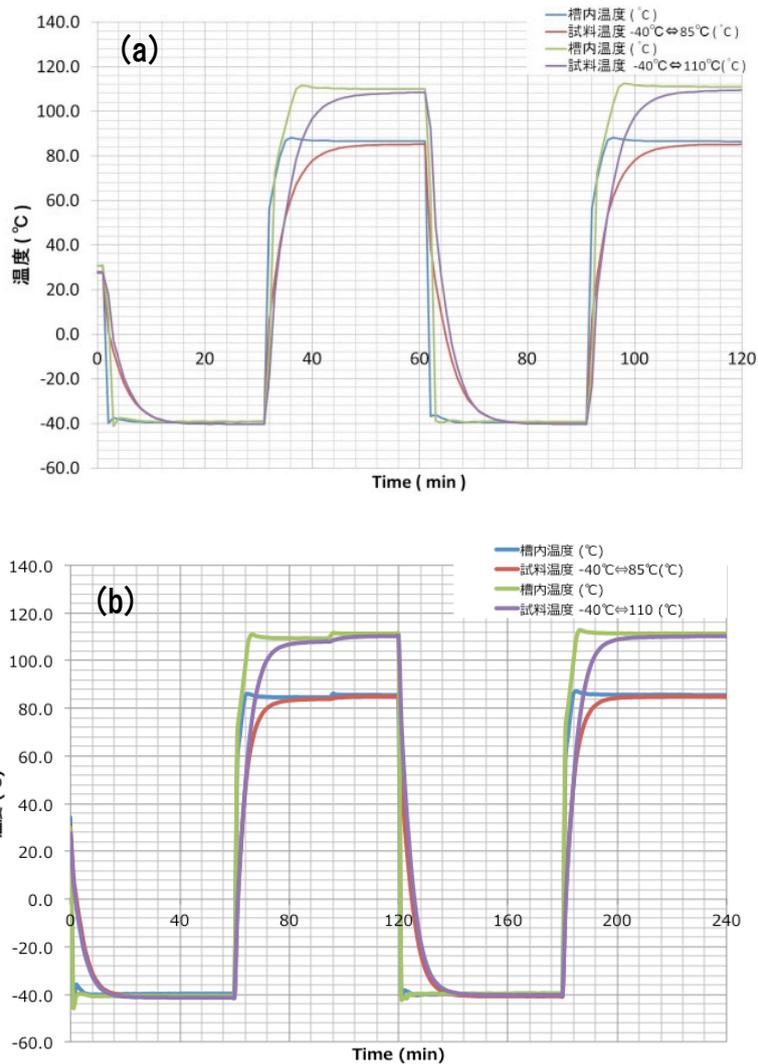


図 3.4. RTC の槽内温度と太陽電池モジュール温度の温度プロファイル
(a) 1h / cycle, (b) 2h / cycle

3.3 TCとRTCの比較

TC, RTC を実施した ΔP_{\max} の経時変化を図 3.5 に示す。横軸は試験時間を示している。1 サイクルが約 1 時間の RTC は 1,200 サイクルで 1,200 時間～ 1,332 時間, 1 サイクルが約 1.5 時間の RTC は 1,000 サイクルで 1,500 時間～ 1,625 時間, TC は 1,800 サイクルで 8,100 時間となる。縦軸は ΔP_{\max} の経時変化を示している。●は RTC で保持時間が 15 分、試験温度が $-40^{\circ}\text{C} \Leftrightarrow 85^{\circ}\text{C}$, ○は RTC で保持時間が 15 分、試験温度が $-40^{\circ}\text{C} \Leftrightarrow 110^{\circ}\text{C}$, ▲は RTC で保持時間が 30 分、試験温度が $-40^{\circ}\text{C} \Leftrightarrow 85^{\circ}\text{C}$, △は RTC で保持時間が 30 分、試験温度が $-40^{\circ}\text{C} \Leftrightarrow 110^{\circ}\text{C}$, ■と□は TC である。TC は 8,100 時間で ΔP_{\max} は 5% 程度の減少であった。これは既報³⁻¹⁾の結果とほぼ同等の値であった。RTC では 1 サイクルを約 1 時間で実

施した試験では、温度変動幅の違いはほぼなく、1,200 時間で ΔP_{\max} は 3% 程度の減少であった。1 サイクルを約 1.5 時間で実施した RTC は、750 時間で $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \Leftrightarrow 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ の場合で ΔP_{\max} が 8% 程度、 $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \Leftrightarrow 110\text{ }^{\circ}\text{C}$ の場合で ΔP_{\max} が 5% 程度減少していた。さらに 1,500 時間では $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \Leftrightarrow 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ の場合で ΔP_{\max} が 13% 程度、 $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \Leftrightarrow 110\text{ }^{\circ}\text{C}$ の場合で ΔP_{\max} が 10% 程度減少した。この結果から、RTC で温度域を上昇させたことによる加速はあまり見られなかった。また、保持時間も 15 分よりも 30 分保持したほうが、劣化が早く進んでいる結果となった。低温から高温への温度変化する際にはんだ接合部に熱膨張係数差による応力が加わる。この応力を緩和するために、はんだにはひずみが生じるが、高温での保持時間が、はんだのひずみの進行に影響を及ぼしたことが考えられる。

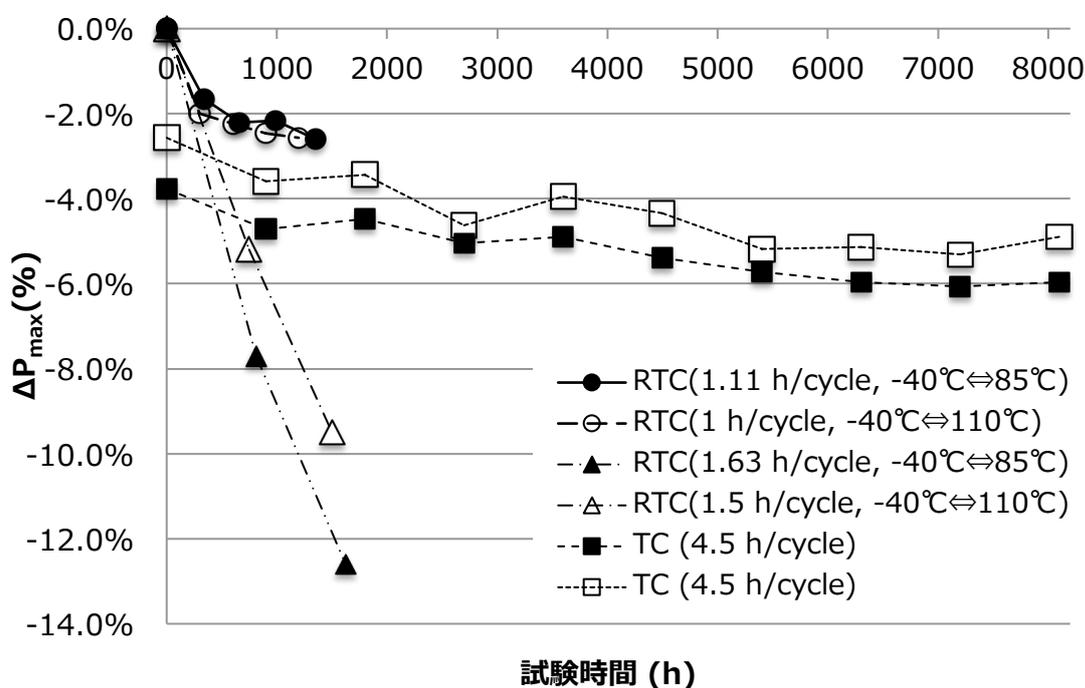


図 3.5 . TC, RTC 試験後の ΔP_{\max} の経時変化

次に各試験後の EL 像を図 3.6 に示す。1 サイクルが約 1 時間の RTC では温度変動幅に関係なく、300 サイクルでセルのフィンガー電極に沿ってバーコード状の変化が現れた。これはフィンガー電極がバスバーとの交点で破断したことによって発生する。これ以降で 1,200 サイクルまではフィンガー電極の破断の進行は見られなかった。1 サイクルが約 1.5 時間の RTC では 500 サイクルで、両条件でバーコード状の変化が見られたが、 $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \Leftrightarrow 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ の方がフィンガー電極の破断が多く見られた。1,000 サイクルでは $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \Leftrightarrow 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ の右下のセルに集電のアンバランスが見られた。これは裏面のはんだ接合部の剥がれにより発生していると考えられる。TC の EL 像では 400 サイクルでフィンガー電極に沿ってバーコード状の変化が見られた。また、1,800 サイクルでの変化はわずかであった。これらの結

果から、TC,RTC で発生する劣化は、低サイクルで、バスバーとの交点でフィンガー電極の破断がみられるが、その後はゆっくりと変化していくことがわかった。これは、材料の熱膨張係数差により、フィンガー電極に生じた応力を緩和するため、応力が緩和されて以降の変化は緩やかになると考えられる。この緩やかな変化は ΔP_{\max} の低下率にも現れていることがわかった。その後、1.5 h/ cycle では 500 サイクルが経過すると、はんだに起因する劣化が進行していくことがわかった。この結果から、3 セルミニモジュールにおいて RTC は TC の劣化メカニズムに立脚しながら試験時間を短縮できることがわかった。

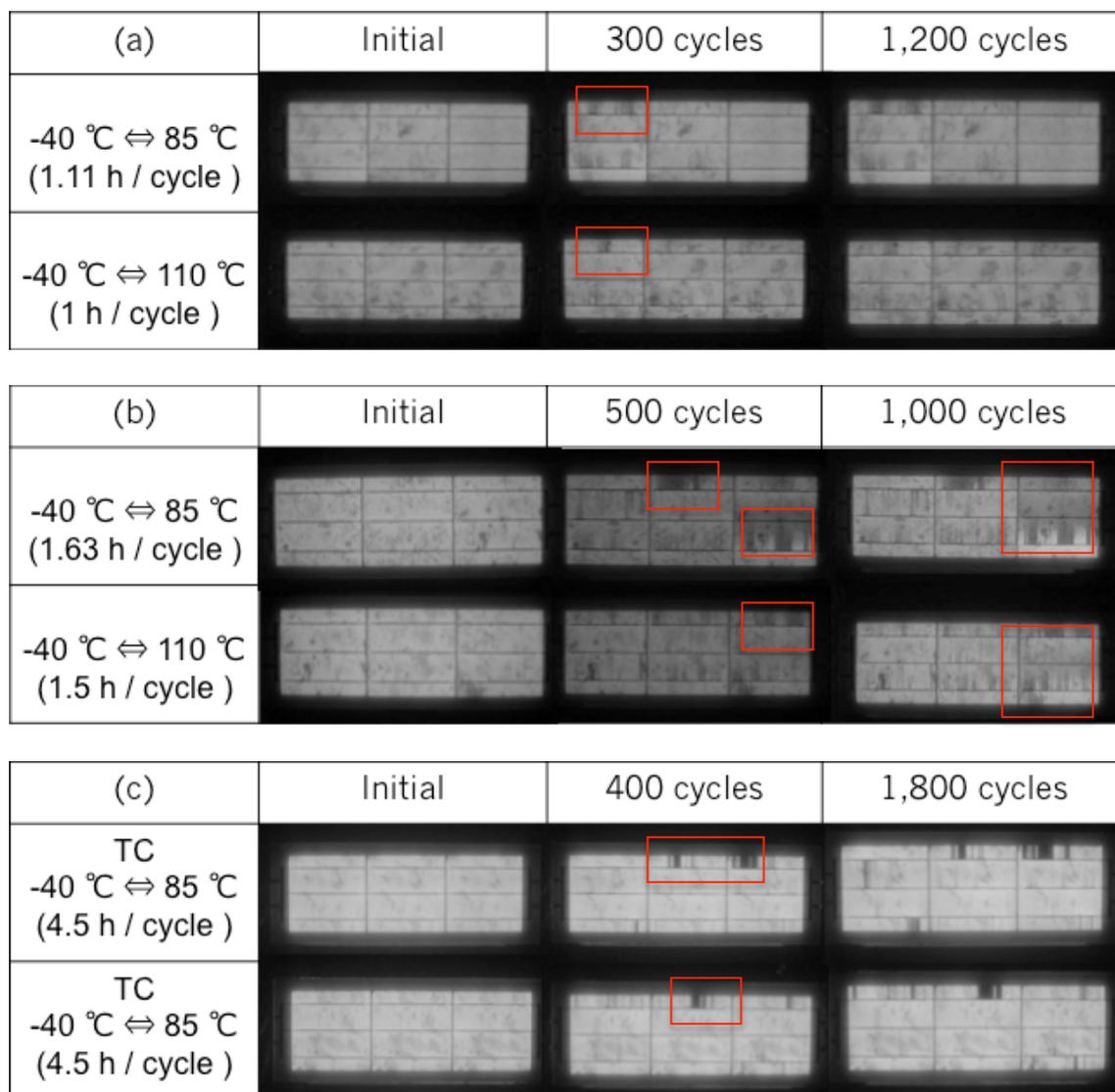


図 3.6. 各試験後の EL 像 (a) RTC(約 1 h / cycle), (b) RTC(約 1.5 h / cycle),
(c) TC (4.5 h / cycle)

3.4 in situ計測による抵抗値の連続測定

3.4.1 太陽電池モジュール等価回路

太陽電池モジュールの交流等価回路を図 3.7 と式(1)~(3)で定義する。インピーダンスの大きさ $|Z|$ は以下の式で表すことが出来る。ここで R_s は直列抵抗成分、 C_s はコンデンサ成分、 R_p は並列抵抗成分、 $\arg Z$ はコンデンサ成分に由来する電圧と電流の位相差、 f は周波数、 ω は角周波数を表す。

$$|Z| = \frac{\sqrt{(R_s + R_p)^2 + (\omega C_s R_s R_p)^2}}{\sqrt{1 + (\omega C_s R_p)^2}} \dots (1)$$

$$\arg Z = -\tan^{-1}\left(\frac{\omega C_s R_p^2}{R_s + R_p + R_s(\omega C_s R_p)^2}\right) \dots (2)$$

$$\omega = 2\pi f \dots (3)$$

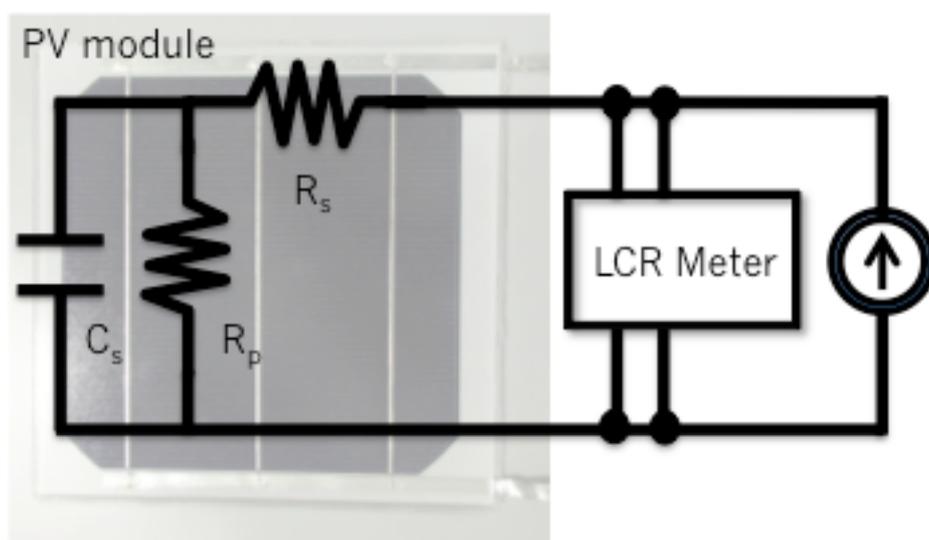


図 3.7. 太陽電池モジュールの等価回路と LCR 測定回路

3.4.2 交流インピーダンス測定方法

薄型セルを使用した RTC を実施するとともに、交流インピーダンス法による周波数特性を考慮した in situ 測定を行った。本測定ではエスペック製の容量温度特性評価システム AMQ-0008-C(以下, AMQ)を使用した。AMQ はインピーダンスの他に静電容量や誘電正接($\tan \delta$)を測定することが可能であり、測定周波数は 20 Hz~1 MHz, 誘電正接($\tan \delta$)は 0.0001~10,000, インピーダンスは 10 m Ω ~100 M Ω の範囲で測定ができる。

3.4.3 太陽電池モジュール構成部材

コスト削減とモジュール重量の軽量化を目指し、薄型セルや薄型ガラスを用いた太陽電池モジュールの開発が進んでいる。そこで本検討では、薄型セルと薄型ガラスを用いた太陽電池モジュールの耐久性評価を目的とし、RTC を実施した。薄型セルと薄型ガラスを使用した太陽電池モジュールの構成部材を表 3.3 に示す。単結晶の n 型で厚さが 100 μ m のセルを使用した。さらにカバーガラスには化学強化した 0.8 mm 厚のガラスを使用した。作製した太陽電池モジュールの外観を図 3.8 に示す。

表 3.3. 薄型セルモジュール構成部材

Material	Specification	Size	Supplier
Cell	MonocrystallineSi cell	156 mm×156 mm t = 100 μ m	FREA Lab.
Glass	Chemical strengthen glass	400 mm × 400 mm t = 0.8 mm	AGC
Encapsulant	EVA (Fast Cure)	t = 450 μ m	SANVIC
Interconnector	A-SPS (Leaded, Ag)	W = 1.3 mm	Hitachi Cable
Back sheet	TPT	T : t = 38 μ m P : t = 250 μ m TPT : t = 326 μ m	Nondisclosure
Junction box	No bypass diode	-	Onamba
Frame	Aluminium	407 mm × 407 mm	KIS



図 3.8. 薄型セル・ガラスを使用したモジュール外観

3.4.4 RTC の試験条件

RTC の試験条件は、試験温度が $-60\text{ }^{\circ}\text{C} \Leftrightarrow 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、温度移行速度が $600\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{時間}$ 、保持時間を温度移行時間含め 30 分、1 サイクル/ 時間とし 3,000 サイクルまで実施した。上記の結果で保持時間が長い方が、劣化が進む傾向が見られたが、今回はガラスやセルが薄いため、温度への馴染みが速いことが期待できる。よって、保持時間は移行時間を含めて 30 分とした。RTC で用いた試験装置を図 3.9 に示す。エスペック製の冷熱衝撃装置 TSD-100 を使用した。この装置は、テストエリアが高温のエリアと低温のエリアに昇降することで温度移行時間の短縮を行っている。



図 3.9. TSD-100 の外観と太陽電池モジュール設置状況

3.4.5 in situ 計測結果

試験前に 100 mA、バイアス印加なしで測定した各温度で周波数特性結果を図 3.10 に示す。共振点が 30 kHz 付近にあることが確認できた。そこで、RTC 試験をする際の in situ 連続計測の測定条件は 30 kHz, AC 100 mA とした。3,000 サイクル付近での EL 像を図 3.11 に示す。(b)の EL 像は、インピーダンス($|Z|$, θ)の変化前であり、(c)の EL 像はインピーダンスの変化後を示している。(b)の時点での EL 像は、バスバー電極とフィンガー電極の交点付近でフィンガー電極の断線によるバーコード状の EL 発光がみられるが、インピーダンスが変化した(c)では、EL 像はほとんど変化が見られなかった。RTC 中のインピーダンス $|Z|$ と θ を測定した結果を図 3.12 に示す。3,000 サイクル付近で $|Z|$ の増大とそれに同期した θ の低下を確認できた。また、詳細に変化をみると(図 3.13, 3.14)、温度変化時にのみインピーダンス特性の変化が見られた。特に高温時から低温時へ温度移行する際に $|Z|$ 、 θ ともに変化していた。これは、はんだ接合部の劣化を示しており、 $|Z|$ が極大化し、 θ が極小化した際にはんだ接合部の剥離を示唆していると考えられる。 -60 °C 馴化時にの低周波数域で $|Z|$ が増大していることがわかった。一方で、 100 °C 馴化時はインピーダンス $|Z|$ 、 θ とも初期温度特性と類似していた。このことより、3,000 cycles 程度の温度サイクルではんだ接合不良が観察可能であり、連続インピーダンス測定によりはんだ接合不良を確認可能であることがわかった。さらに、はんだ接合部の不良は、温度変化時に生じる過渡的な現象のため、試験後の EL 測定などでは確認が難しく、in situ 計測でのみ確認が可能であることがわかった。

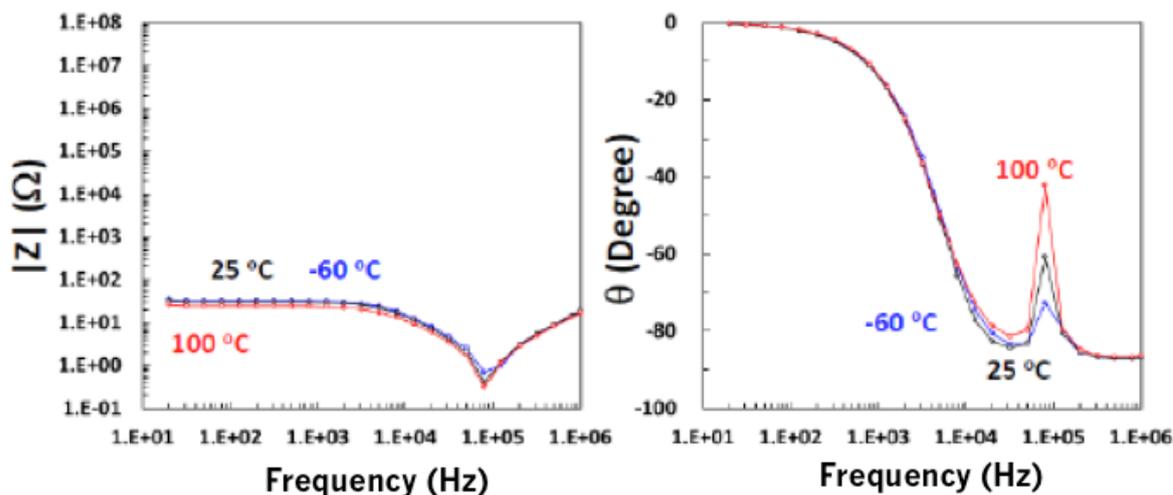


図 3.10. RTC 前の周波数特性測定

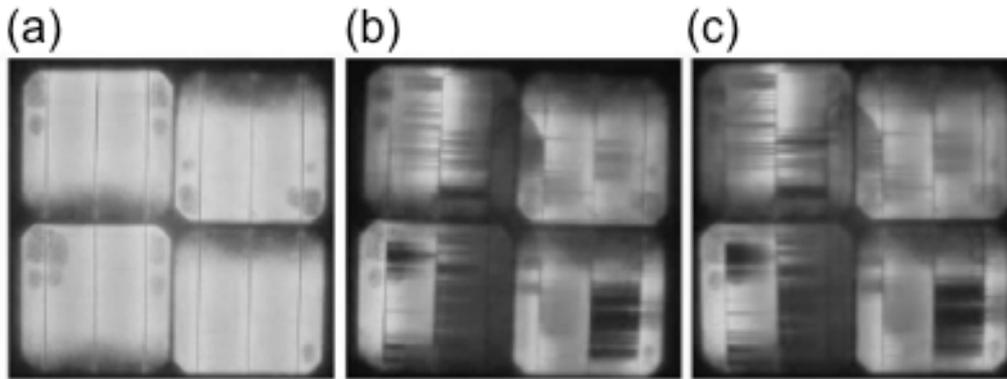


図 3.11 RTC における EL の経時変化
 (a) Initial, (b) 2797 cycles, (c) 2911 cycles

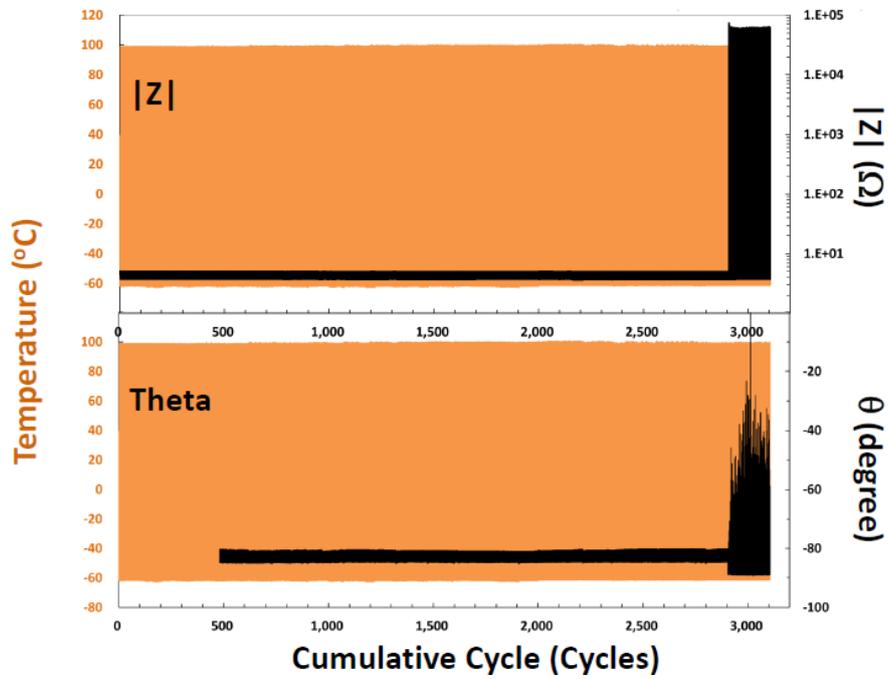


図 3.12. in situ 計測によるインピーダンス $|Z|$, θ の経時変化

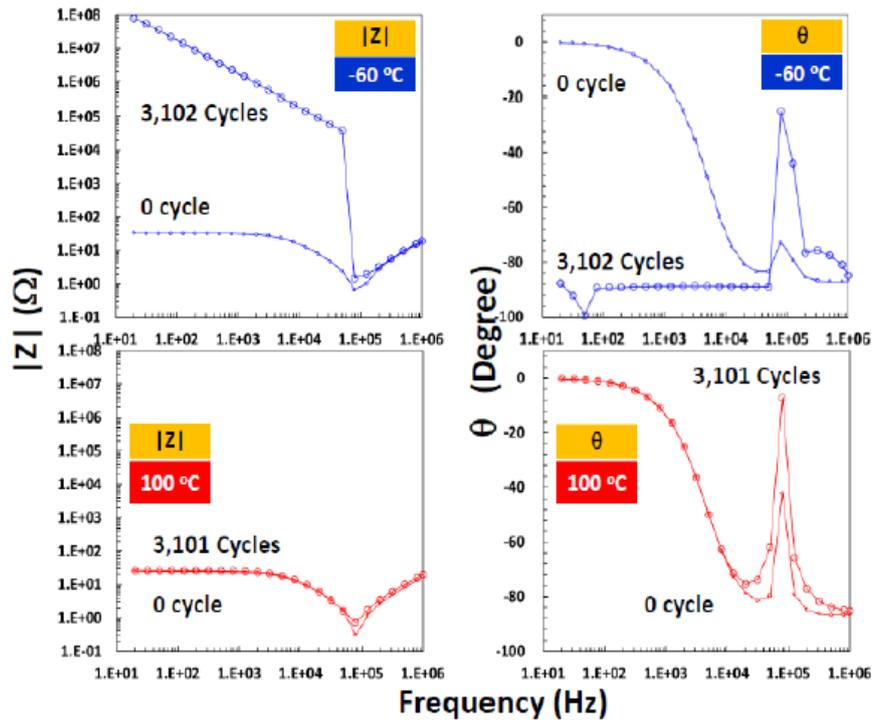


図 3.13. 試験前後の周波数特性測定

30 kHz, interval = 2 min, AC: 100 mA

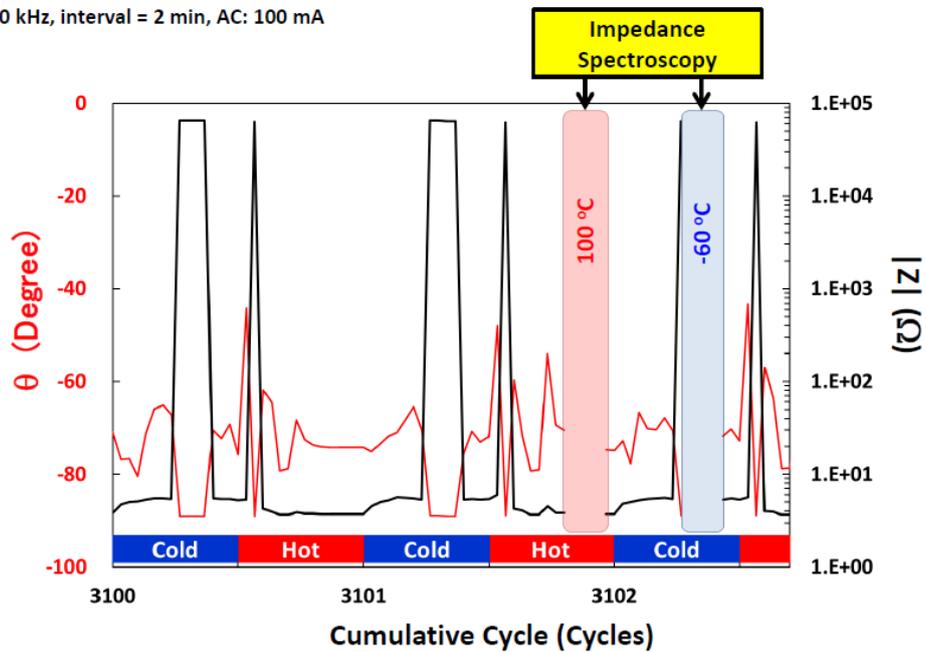


図 3.14. 低温,高温時のインピーダンス $|Z|$ の変化の違い

3.4 結言

TC の加速試験方法の提案を目的として、多結晶 Si 太陽電池 3 セルミニモジュールおよび単結晶 Si 太陽電池 4 セルミニモジュールを用いて、RTC の条件選定と交流インピーダンス法による連続測定を行った結果、以下の知見を得た。

1. TC を 1,800 サイクル(8,100 時間)まで実施し、RTC は、従来検討した試験条件に加え、高温域を上昇させ、温度幅を大きくとり、温度移行時間を短縮した試験を 1,200 サイクル(約 1,200 時間)と 1,000 サイクル(約 1,500 時間)まで実施した。
2. TC, 1,800 サイクルの結果、 ΔP_{\max} は 5%程度低下しており、既報とほとんど同じであった。1 サイクル 2 時間で実施した RTC では、2,000 サイクルで ΔP_{\max} は 10%以上低下していた。一方、1 サイクル 1 時間で実施した RTC では 1,200 サイクルで 3%程度の低下にとどまった。
3. 各試験後の EL 像の変化は劣化初期では、フィンガー電極に沿って、バーコード状の変化がみられた。これはバスバーとフィンガー電極の交点でフィンガー電極が熱膨張係数差により発生した応力を緩和するために破断することで発生したと考えられる。応力緩和後はフィンガー電極破断の進行は緩やかになる。その後、はんだ接合部の劣化が進行する。
4. 薄型セル・ガラスを使用した太陽電池モジュールによる RTC を実施した。RTC の試験条件は $-60\text{ }^{\circ}\text{C} \Leftrightarrow 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ とし、1 サイクルを 1 時間とし 3,000 サイクルまで実施した。EL 測定の結果、薄型太陽電池モジュールでもバーコード状の変化とはんだ接合部の劣化による EL 発光のアンバランスを確認できた。
5. in situ 計測を実施した結果、今回の実験で用いた太陽電池モジュールの周波数特性と温度特性を明らかにした。さらに、RTC 中に共振点付近でインピーダンスの連続測定を行い詳細に解析した結果、インピーダンスの増大の兆候と、それが低温域で発生していることを明らかにした。

これらの結果から、今回試験を実施した、多結晶 Si 太陽電池 3 セルミニモジュールにおいて、RTC は TC と相関性を維持しながら、試験時間を 2~5 倍程度加速できることが示され、劣化メカニズムに立脚した加速試験方法を確立できた。

第4章 Bending Cyclic Load Test による物理的な荷重負荷に関する劣化メカニズムの解明と耐性評価方法の確立

4.1 緒言

本章では太陽電池モジュールへの物理的な荷重負荷に関する劣化メカニズムを検討するために、DML 試験を実施するとともに、Bending Cyclic Load Test (以下、BCL)装置を開発し、劣化メカニズムの基礎検討を行った。太陽電池モジュールは、セルやガラスの薄型化に伴い、物理的強度の低下への懸念が高まっている。IEC 61215 で規定されている機械的荷重負荷試験では、風、雪、氷などの静的荷重に対する耐久性を調べることを目的としている。また、IEC 62782 で提案された DML では、運搬、設置、運用中に太陽電池モジュール中に生じるセル、インターコネクタの破断を検出する方法として検討されており、2016 年 3 月に IEC TS 62782 として発行されている。ここで策定された試験条件は負荷荷重を±1,000 Pa、1 分間に 2~3 サイクルの試験を 1,000 サイクル実施することとなっている^{4.1)}。先行研究では、NREL や Fraunhofer-CSP からインターコネクタの寿命予測についての報告^{4.2,3)}やセルの寿命についての報告^{4.4)}がされている。また、TC の時間短縮のために DML と TC を組合せて短期間で評価する手法が検討されているが、TC と DML で発現する劣化モードに相関性があるかの検討は十分には進んでいない。

4.2 DMLの劣化モードの検討

4.2.1 DML 装置概要

DML の劣化モードを検討するためにエスペック製 AR-U-1100 + DML 装置を用いた(図 4.1, 図 4.2)。通常の DML 試験は室温で実施されるが、温度の影響を確認するために恒温槽と DML を組み合わせた装置構成となっている。恒温槽の温度範囲は-40 °C ⇄ 60 °C で設定が可能である。この装置の中に 4 セルミニモジュールが設置できる DML 装置を格納している。DML はモジュールを設置した後、下から空気を出し入れすることでモジュール面を上下動させる機構である(図 4.3)。

4.2.2 太陽電池モジュール構成部材

DML 試験に用いたモジュールの構成部材を表 4.1 に示す。セルの厚さは 100 μ m と薄型で n 型の単結晶 Si セルを使用した。カバーガラスには厚さは 0.8 mm の化学強化ガラスを使用した。インターコネクタは銅母材で幅が 1.3 mm のリボンを使用し、自動ストリングスマシンでセルヘインターコネクタをはんだづけした。市販の EVA でラミネートした後、端子

箱を固定し、外周にアルミフレームを取り付け、モジュールを完成した。太陽電池モジュールの外観を図 4.4 に示す。

4.2.3 DML 試験条件

DML の試験条件はモジュール面への荷重を±1 kPa とし、1 分間に 3 サイクルとした場合と、荷重を± 2kPa とし、1 分間に 2 サイクルとした試験を行った。

4.2.4 DML 試験結果

DML を実施した結果を図 4.5 に示す。DML を±1 kPa で実施した場合は、300 サイクルで右上のセルで EL 発光の輝度のアンバランスがみられ、3,000 サイクルまでゆっくりと進行していた。DML を±2 kPa で実施した場合は、122 サイクルでセルクラックが発生したが、1,200 サイクルまでクラックの進展は見られなかった。522 サイクルで EL 発光での輝度のアンバランスがみられ、1,200 サイクルまでゆっくりと進行していた。図 4.6 に各試験後の IR 像を示す。順バイアス方向に 8 A の電流を 10 分間流して撮影した。どちらも EL の明るい部分に電流が集中していることがわかった。DML を±2 kPa で実施した 1,200 サイクル後のインターコネクタ部をマイクロスコップで観察した結果を図 4.7 に示す。インターコネクタの破断はみられなかった。このことから、EL 発光での輝度のアンバランスは、セルとインターコネクタ間のはんだ接合部の剥離による劣化であると考えられる。Koch らによる報告では、DML 後に発生する劣化モードはマイクロクラックの進展、セルクラック、インターコネクタ破断、はんだ接合部の剥離の増大と言われている⁴⁵⁾。今回実施した DML では、セルクラックとはんだ接合部の剥離は観察できたが、インターコネクタ破断の発生が確認できないなどの課題があることがわかった。



図 4.1. DML 装置外観



図 4.2.4 セルミニモジュール設置状況

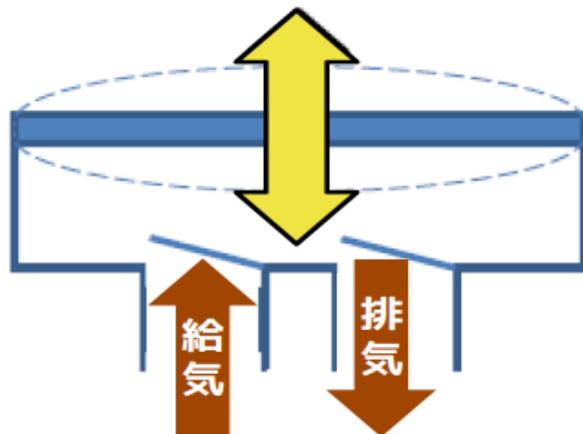


図 4.3 . DML の動作原理

表 4.1. 薄型セルモジュール構成部材

Material	Specification	Size	Supplier
Cell	Mono-crystalline Si cell	156 mm×156 mm t = 100 μ m	FREA Lab.
Glass	Chemical Strengthen glass	400 mm × 400 mm t = 0.8 mm	AGC
Encapsulant	EVA (Fast Cure)	t = 450 μ m	SANVIC
Interconnector	A-SPS (Leaded, Ag)	W = 1.3 mm	Hitachi Cable
Back sheet	TPT	T : t = 38 μ m P : t = 250 μ m TPT : t = 326 μ m	Nondisclosure
Junction box	No bypass diode	-	Onamba
Frame	Aluminium	407 mm × 407 mm	KIS

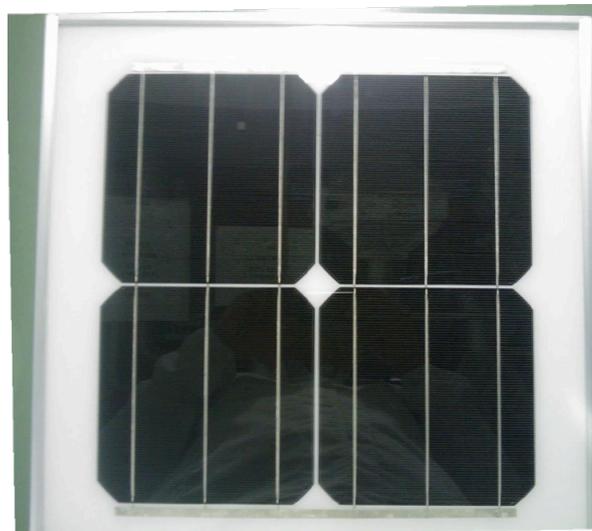


図 4.4. 薄型セル・ガラスを使用したモジュール外観

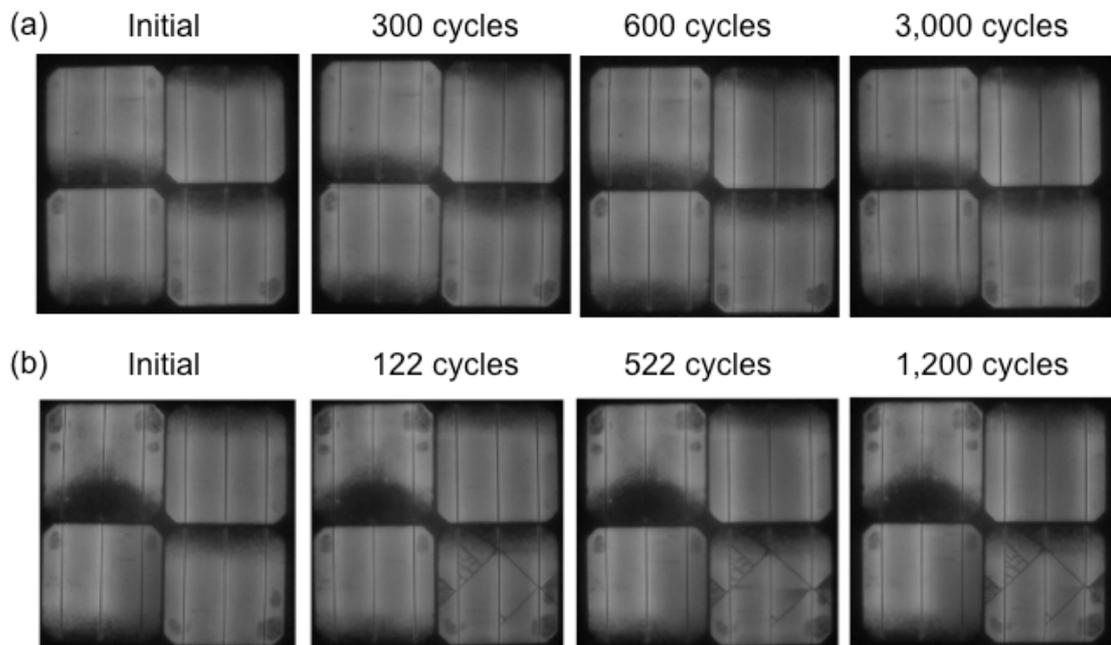


図 4.5. DML 試験後の EL 像 (a) ± 1 kPa, (b) ± 2 kPa

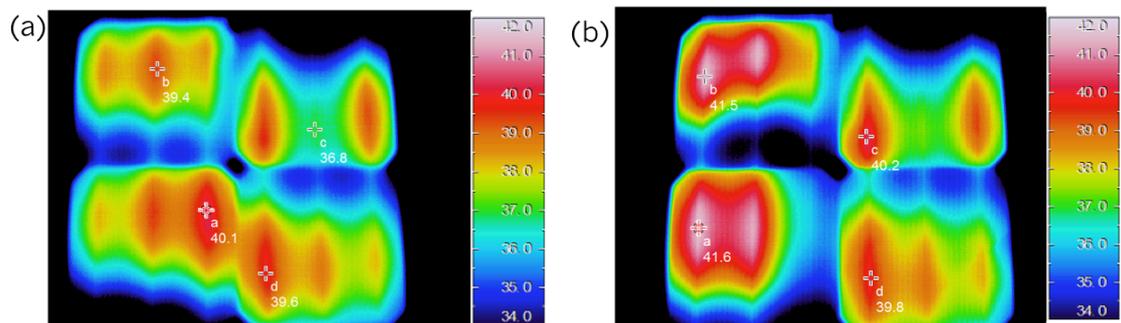


図 4.6. IR 像 (a) ± 1 kPa, 3,000 cycles, (b) ± 2 kPa, 1,200 cycles

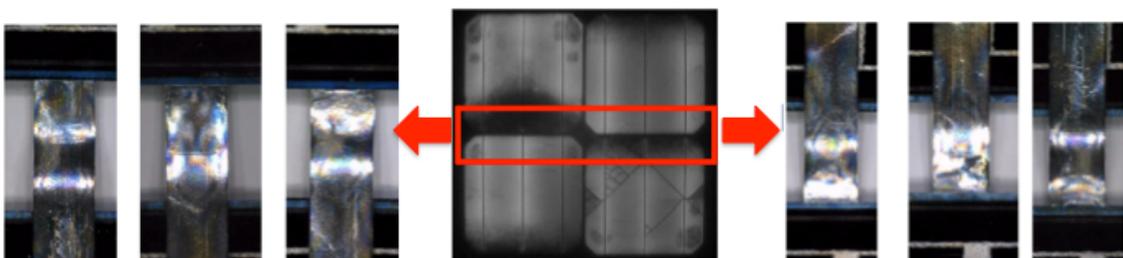


図 4.7. インターコネクタ部のマイクロ스코ープ観察

4.3 Bending Cyclic Load Testの概要

4.3.1 BCL 装置の概要

今回実施した DML の課題として、劣化モードが複合化してしまうことがあげられる。そこで、荷重面を単一にすることで、この課題の解決を試みるために、Bending Cyclic Load(以下、BCL)試験装置の開発を行った。BCL 装置の外観を図 4.8 に、BCL 装置に試験サンプルを設置した状態を図 4.9 に、BCL 装置の仕様を表 4.2 に示す。温度は-20 °C ~ 100 °Cの範囲で調整可能な恒温槽の中に試料を 2 点で支える構造で、上面から 1 点若しくは 2 点の任意の荷重を繰り返し加える装置である。本研究では 2 点での荷重を実施した。荷重は 0.4 kN から 10 kN で調整が可能である。荷重/無荷重のサイクルは 4 秒から 1 秒単位で設定でき、最小値である片面 4 秒、1 サイクル 8 秒とし 10,000 サイクルを基準として実施した。



図 4.8. BCL 装置外観

表 4.2. BCL 装置仕様

Specification	
曲げ荷重強度	<ul style="list-style-type: none">・ 任意の 1 点あるいは 2 点に負荷が可能・ 荷重量は 0.4 kN ~10 kN で調整が可能
サイクル	<ul style="list-style-type: none">・ 無荷重/荷重を 4 s 以上から 1 s 単位で調整可能
温度	<ul style="list-style-type: none">・ -20 °C~100 °Cで調整可能



図 4.9. BCL 装置への PV モジュール設置状況

4.3.2 BCL で使用した太陽電池モジュール構成

BCL で使用した太陽電池モジュールの構成部材を表 4.3 に示す。太陽電池モジュールは RTC で使用したモジュールと同じ仕様で、多結晶シリコンのセルを 3 直列にストリングし、540 mm×200 mm サイズの白板強化ガラスを使用し、封止材には EVA、BS には TPT を用いて作製した 3 セルミニモジュールで試験を実施とした。DML や BCL で想定される劣化モードは、インターコネクタ亀裂破断、セルクラック、タブ配線剥離・電極破断である。一般的な結晶 Si 太陽電池セルの構造上、セル表面と裏面で極性が異なるため、モジュールを作製する際は、セルの表面から裏面にインターコネクタで接続する構造となり、中心のセルに対して前後の接続が非対称となるモジュール構造となる。よって、中心セルのインターコネクタ亀裂破断を再現するためのテストモジュール構成は、3 セルミニモジュールが最小の構成となるため、本研究では試料を 3 セルミニモジュールとした。3 セルミニモジュールの外観を図 4.10 に示す。

表 4.3. 太陽電池モジュール構成部材

Material	Specification	Supplier
Cell	Multicrystalline Si cell (156 mm×156 mm)	Q Cells
Glass	Semi-tempered glass (540 mm×200 mm×4 mm)	AGC
Encapsulant	EVA	Nondisclosure
Interconnector	A-SPS (Leaded, Ag)	Hitachi Cable
Back sheet		Nondisclosure

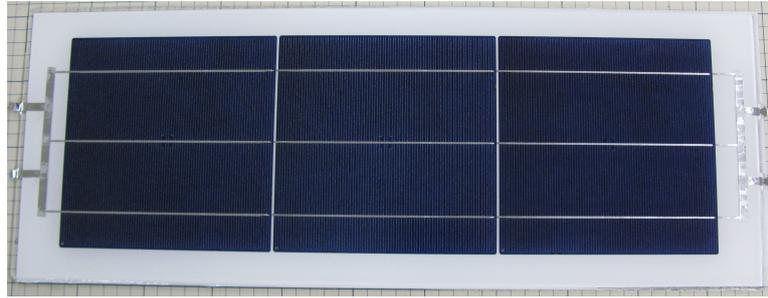


図 4.10.3 セルミニモジュール

4.3.3. BCL 試験条件

BCL 装置の特徴のひとつに荷重面が片面であることがあげられる。図 4.11 に示すように PV モジュールはガラスの厚みに対してセルや BS の厚さが薄いため、中心線に対し荷重面が異なることでセルやインターコネクタに与える力が異なっている。ガラス面から荷重を負荷した場合、セルやインターコネクタには引張り方向に力が働くが、BS 面からの荷重では、セルやインターコネクタには圧縮方向に力が働く。ガラス面荷重と BS 面荷重の違いにより劣化モードに違いがあるかの検討を行うことで、DML の課題の 1 つである劣化メカニズムの解明が可能であると考えた。次に、負荷する荷重と荷重位置を検討した。1 点曲げと 2 点曲げで装置の最大荷重付近で試験したところ、1 点荷重では 9.2 kN で、2 点荷重では 5 kN でそれぞれガラス割れが発生した(図 4.12, 図 4.13, 図 4.14)。これらのことから、最適な支点と力点の位置、荷重量を検討する必要があることが分かった。

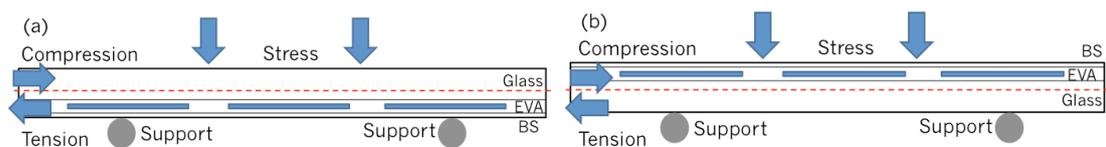


図 4.11. 荷重面の違いによる各部材にかかる圧縮・引張の違い

(a) ガラス面荷重, (b) BS 面荷重



図 4.12.1 点荷重の様子。荷重は 9.2 kN



図 4.13.2 点荷重, 5 kN でガラス割れが発生した状況



図 4.14.2 点荷重, 5 kN でガラス割れが発生したモジュールの外観

4.3.4 簡易シミュレーションによる荷重の検討

1点荷重と2点荷重で簡易的な数値シミュレーションを実施した。シミュレーションの条件を表 4.4 に示す。今回はガラスのみの構造とし、ソーダライムガラスの物性値を用いた。解析ソフトは ANSYS を使用した。本試験は3セルミニモジュールで実施しているが、最終的にはフルサイズモジュールへ適用できるようにするために、フルサイズモジュールの中央付近での撓み量を想定した荷重を負荷することとし、1,160 mm×980 mm×4 mm のフルサイズモジュールが自重によりたわむ撓み量になる荷重の検討を行った。上記サイズのフルサイズモジュール最大撓み量は 6.1 mm であった。次にソーダライムガラスでのシミュレーションの結果を図 4.15 に示す。白い三角が支点であり、1点荷重、2点荷重どちらの場合も支点はモジュールの4分の1の位置とした。赤矢印で示すように1点荷重の力点はガラスの中央に、2点荷重の力点はセルとセルの間に負荷した。負荷した荷重を 500 N にした場合では、1点荷重では撓み量が 6.2 mm であり、2点荷重では撓み量が 8.5 mm であることがわかった。この結果から、PV モジュールの支点位置と、荷重の位置を決め、負荷する荷重を 500 N とした。

表 4.4. 簡易シミュレーションに用いた物性値

材料	ソーダライムガラス size: 540 mm × 200 mm × 4 mm
物性値	
ヤング率	73 GPa (7.3×10^4 N/mm ²)
ポアソン比	0.21
比重	2.50 g/cm ³

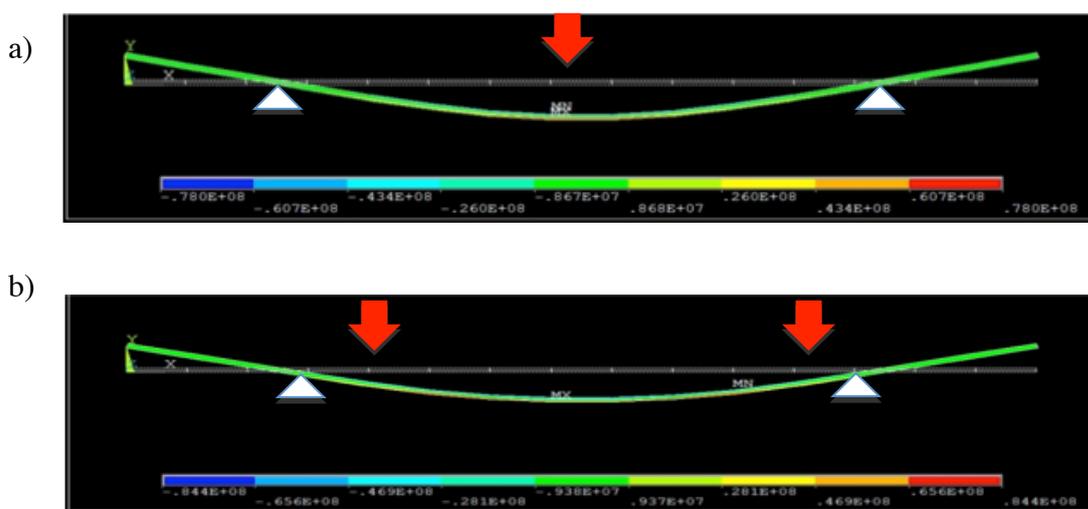


図 4.15. 簡易シミュレーション結果 a) 1点荷重, b) 2点荷重

4.4 BCLによる劣化モードの基礎検討

4.4.1 BCL の基礎検討

BCL で実際にどの程度モジュールが変形しているかを調べるために、変位計とマイクロスコープを用いて変位の測定をした。図 4.16 に BCL 装置内に変位計とマイクロスコープを取り付けた様子を示す。変位計、マイクロスコープ共に、装置中央から左右に 120 mm の範囲の任意の位置で測定が可能である。

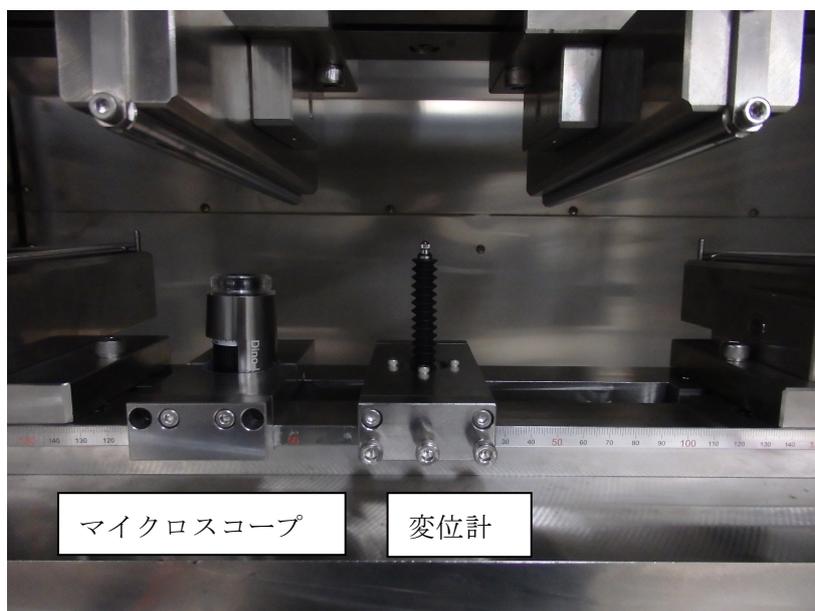


図 4.16. BCL 装置内に変位計とマイクロスコープを設置した状態

図 4.17 に変位測定した結果を示す。測定温度は $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $25.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ とした。各箇所での測定値は5回測定した平均値を用いた。また、ガラス面から荷重を加えた場合とBS面から荷重を加えた場合との比較も行った。荷重と変位量との間に線形関係が見られたが、温度によって、傾きが異なっており、温度が高いほど傾きが大きくなった。荷重が500 Nの場合、 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、BS荷重では5.1 mmであり、 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、BS荷重では6.2 mmと1 mm程度 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ の方が大きくなっていた。 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ と $25.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ の場合のガラス面からの荷重とBS面からの荷重の差引きでは、ガラス面からの荷重の方が、変位量がわずかに0.1 mmと大きかった。簡易シミュレーションとの結果を比較すると $25.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ での実測の変位量が5.5 mmに対し、簡易シミュレーションでは8.5 mmと大きく異なっていた。これは、簡易シミュレーションがガラスのみの変形を見ていたため、モジュール構造となった際に変形し難くなったためと考えられる。

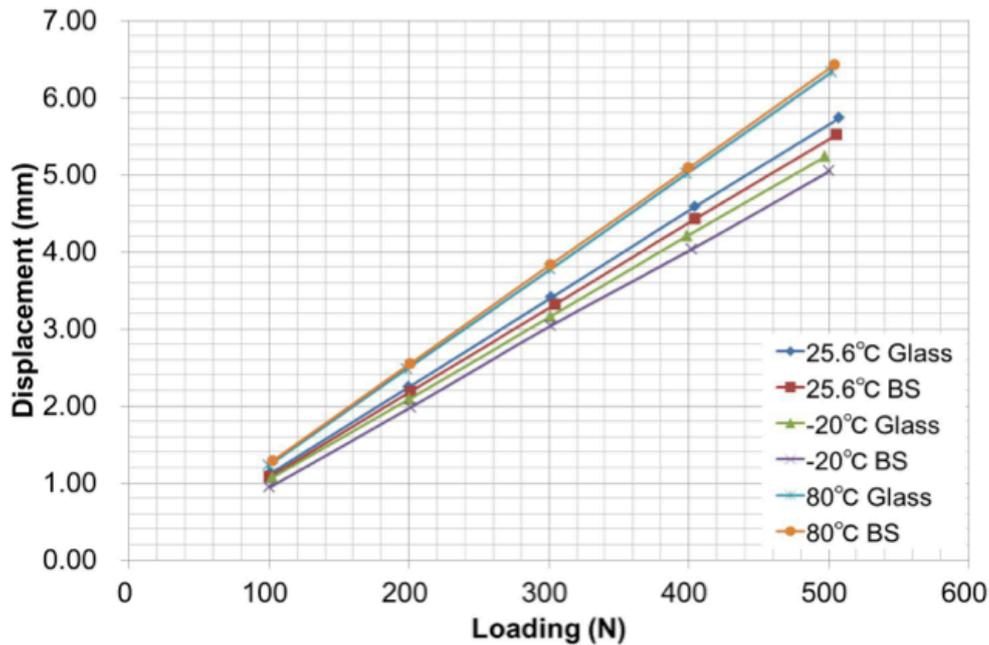


図 4.17. 変位測定結果

4.4.2 BCL の試験結果

図 4.18 に BCL 試験後の EL 像を示す。荷重はガラス側から負荷した場合と、BS 側から負荷した場合で整理し、温度の違いで比較した。-20 °C の場合、荷重面に関係なくセルクラックが発生しており、全てのセルにクラックが発生していた。25 °C の場合、ガラス側から荷重を負荷した場合は、荷重付近にセルクラックが発生していた。BS 側から荷重を負荷した場合はセルクラックの発生はなく、EL 発光での輝度のアンバランスがみられた。80 °C の場合、ガラス側から荷重を負荷した場合は、セルクラックも EL 発光での輝度のアンバランスもみられなかった。BS 側から荷重を負荷した場合はセルクラックの発生はなく、EL 発光での輝度のアンバランスが 2 枚のセルでみられた。EL 発光での輝度のアンバランスの原因を調査するために、BCL を実施した試験後のモジュールのインターコネクタ部に荷重を負荷した状態と負荷していない状態でマイクロスコープ観察を実施した結果を図 4.19 に示す。BS 側から荷重を負荷した場合と無荷重の場合の比較では、荷重時にインターコネクタ部の破断が確認できた。さらに、透明な BS を使用してモジュールを作製し、BCL 試験を BS 側から荷重を負荷し、試験温度 25 °C で 10,000 サイクルの試験条件で実施した。試験後の EL 像とインターコネクタ部のマイクロスコープ観察結果を図 4.20 に示す。EL 発光での輝度のアンバランスが発生していた箇所のインターコネクタ部を観察した結果、ガラス側にみられたインターコネクタの破断痕が BS 側でも観察された。これらのことより、BCL 試験で発生する EL 発光での輝度のアンバランスはインターコネクタ部の破断によって引き起こされていることがわかった。

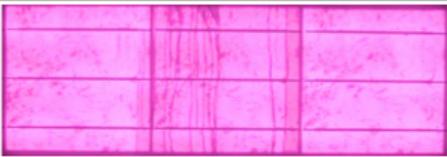
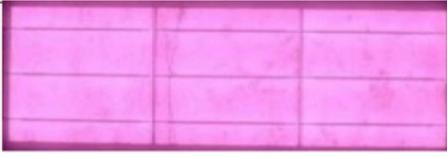
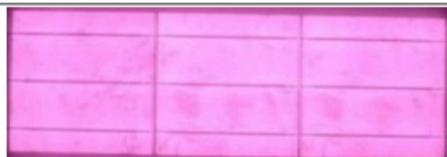
Temp.	Press from Front Glass Side	Press from Backsheet Side
-20 °C	 20,000 cycles Cell Cracks (Hard)	 20,000 cycles Cell Cracks (Hard)
25 °C	 20,000 cycles Cell Cracks	 30,000 cycles Ribbon Fracture
80 °C	 10,000 cycles	 10,000 cycles Ribbon Fracture

図 4.18. BCL 試験後の EL 像比較

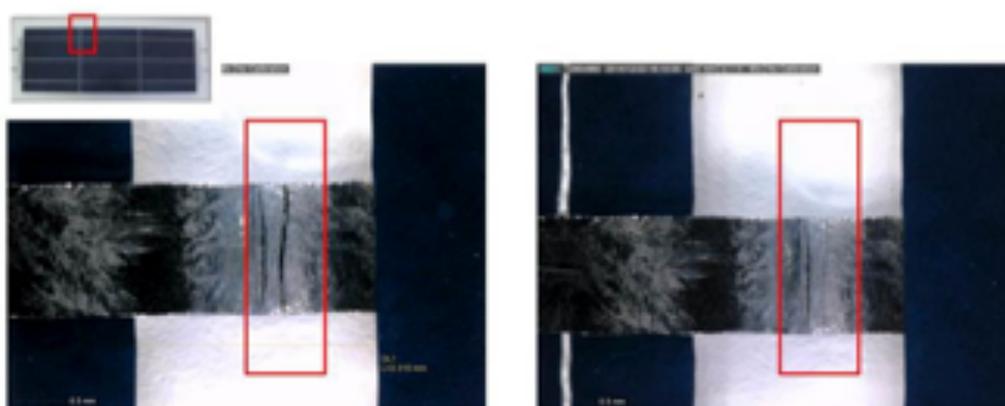


図 4.19. BCL 試験後のインターコネクタ観察 (a)荷重, (b) 無荷重

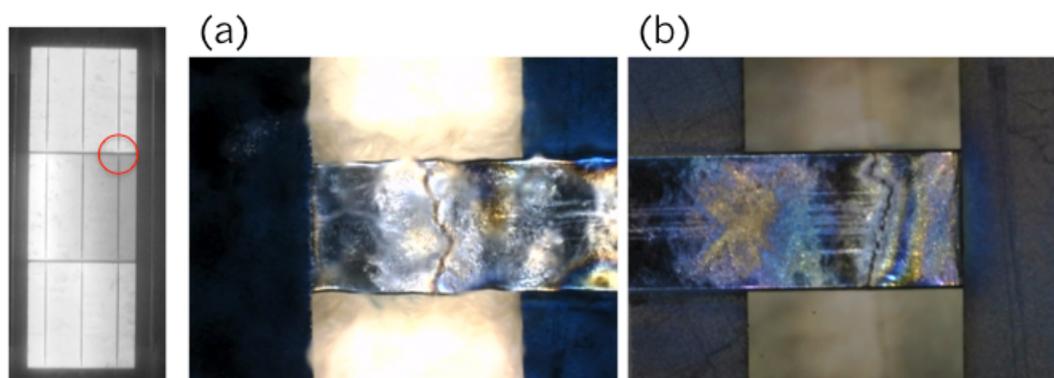


図 4.20. 透明 BS を使用した BCL 試験後のインターコネクタ部マイクロスコープ観察
(a) ガラス側, (b) BS 側

4.4.3 BCL の断面解析

図 4.21 に BS 側から荷重を負荷した BCL 試験後の EL 像とマイクロスコープ像、断面観察結果を示す。マイクロスコープ観察では、モジュールの表面からガラスを通して、インターコネクタの上面の破断痕の観察を行うため、インターコネクタの破断痕は確認できなかった。一方、断面観察では、セル裏面を含む、モジュールの断面方向で観察を行えるため、インターコネクタの破断を確認できた。

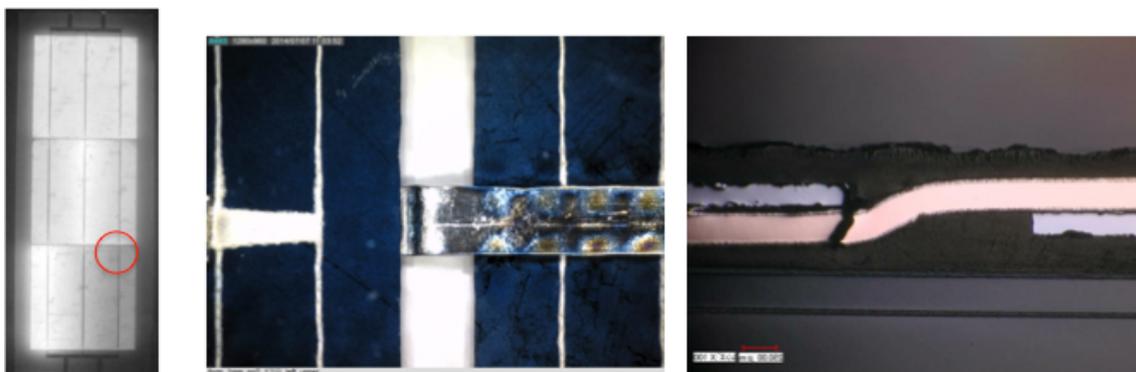


図 4.21. セル間隔 1 mm のモジュールでの BCL 試験後の各観察結果

表 4.4 に BCL 劣化モードをまとめた。セルクラックは低温域と 25 °C のガラス側からの荷重負荷時に発生していた。セルクラック時の ΔP_{\max} は 3% 程度と小さいことがわかった。インターコネクタの破断は 25 °C と 80 °C の BS 側から荷重を負荷した場合に発生していた。インターコネクタの破断時の ΔP_{\max} は 25 °C で 11%、80 °C で 42% 低下しており、高温ほど ΔP_{\max} の低下率が大きいことがわかった。これは、温度と変位量の関係調べた図から、温度が上昇することでモジュールの変位量が大きくなるため、インターコネクタへの負荷量が大きかったと考えられる。この結果より、BCL は荷重面と温度によって再現できる劣化モードが異なることが示された。

表 4.4. BCL 劣化モードのまとめ

Temp.	Press from <u>Front Glass Side</u>	Press from <u>Backsheet Side</u>
-20 °C	Cell Crack: +++ Ribbon Fracture: - Power-Loss: +/-	Cell Crack: +++ Ribbon Fracture: - Power-Loss: +/-
25 °C	Cell Crack: + Ribbon Fracture: - Power-Loss: +/-	Cell Crack: - Ribbon Fracture: ++ Power-Loss: -11%
80 °C	Cell Crack: - Ribbon Fracture: - Power-Loss: +/-	Cell Crack: - Ribbon Fracture: +++ Power-Loss: -42%

4.5 数値シミュレーションによる劣化メカニズムの検討

4.5.1 数値シミュレーションによる劣化メカニズムの検討

BCL試験の劣化メカニズムを、数値シミュレーションを用いて検討した。BCL試験に使用したモジュールの構成部材の物性値をもとに、内部界面部位や内部接合部位などに発生する応力・歪みなどを数値シミュレーションにて解析を行った。具体的には、太陽電池セル（以下、セル）を結線するインターコネクタのセル間部位やセル・インターコネクタ界面、およびセルのインターコネクタ接合部位付近（セル内）における、荷重ストレス負荷時の応力変化・歪み量変化などを、構成部材の物性値およびモジュール構造をもとに数値シミュレーションにて解析を行った。この時、上記の実験結果を織り込み、モジュールの劣化・不具合に到るまでのメカニズム・妥当性を確認する。更に、実験的に確かめにくい条件でのシミュレーションを行い、そのような条件での劣化・不具合の蓋然性を判定する数値シミュレーションを実施する。

4.5.2 数値モデルの構造及び境界条件

図 4.22 に解析対象となる 3 セル太陽電池モジュールの外観図を示す。図中の A,B はそれぞれの側面から太陽電池モジュールの断面構造を見ていることを示す。図 4.23 の a) に A の側面からみた断面構造を b) に a) の赤枠を拡大した断面構造を、c) に B の側面からみた断面構造を、d) に c) の赤枠を拡大した断面構造を、e) に d) の赤枠を拡大した断面構造を示す。表 4.5 に数値モデルの寸法を示す。b) において、数値モデルにおけるインターコネクタとセルの接着に関する境界条件は、セル部分にはんだが載っている部分は固着しているが、セル端から 2 mm までは、インターコネクタとセルは接触しているが、はんだが載っておらず、固着していないとした。図中の a~u は各材料の寸法を示している。寸法の詳細は表 4.5 に示す。図 4.24 の a) にガラス側を上向きにした場合の、b) に BS 側を上向きにした場合のモデルの拘束位置を示す。モデルの下側のモジュール端から 1/4 の位置を支点とした。これは外側セルの中央に位置している。上側の荷重位置はセル間のインターコネクタの位置に相当する。

応力解析は 2 段階で実施した。まず、温度差により各部材の熱収縮を計算した。ラミネート時の熱によるストレスからくるモジュールの変形を熱荷重と定義する。太陽電池モジュール作製の際のラミネート時に加わる温度を 150 °C とした。この 150 °C の際に太陽電池モジュールに加わる応力がフリーの状態とした。そこから、ある温度との温度差による各部材の熱収縮により、太陽電池モジュールにかかる熱負荷を熱荷重として計算し、太陽電池モジュールの応力解析を行った。応力解析温度は -20 °C, 23 °C, 80 °C の 3 条件とした。表 4.6 にモジュールの構成部材の物性値を示す。温度に合わせた物性値を用いて計算をした。解析温度により EVA や銅、はんだの弾性率が異なっている。次にこの熱荷重が負荷された

状態、上側から力荷重を加えた計算を行った。力荷重は、0.5 kNとした。図 4.25 の a) にガラス側を上にした場合を、b) に BS 側を上にした場合の拘束条件を示す。モデルの下側の左側は X 軸、Z 軸ともに拘束し、右側は Z 軸のみ拘束している。その後、セルとセルとの間を力点の位置として、各点に下向きの力荷重 0.125 kN を加えている。荷重方向としては、ガラス面が上に来る場合と、BS 面が上に来る場合との 2 条件で計算した。

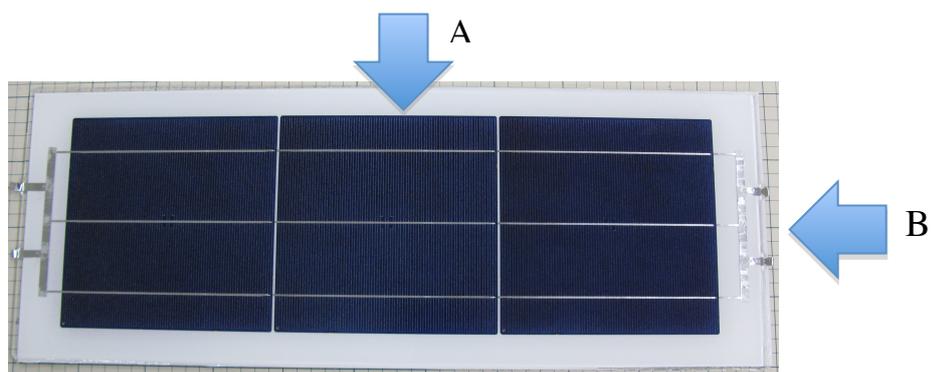
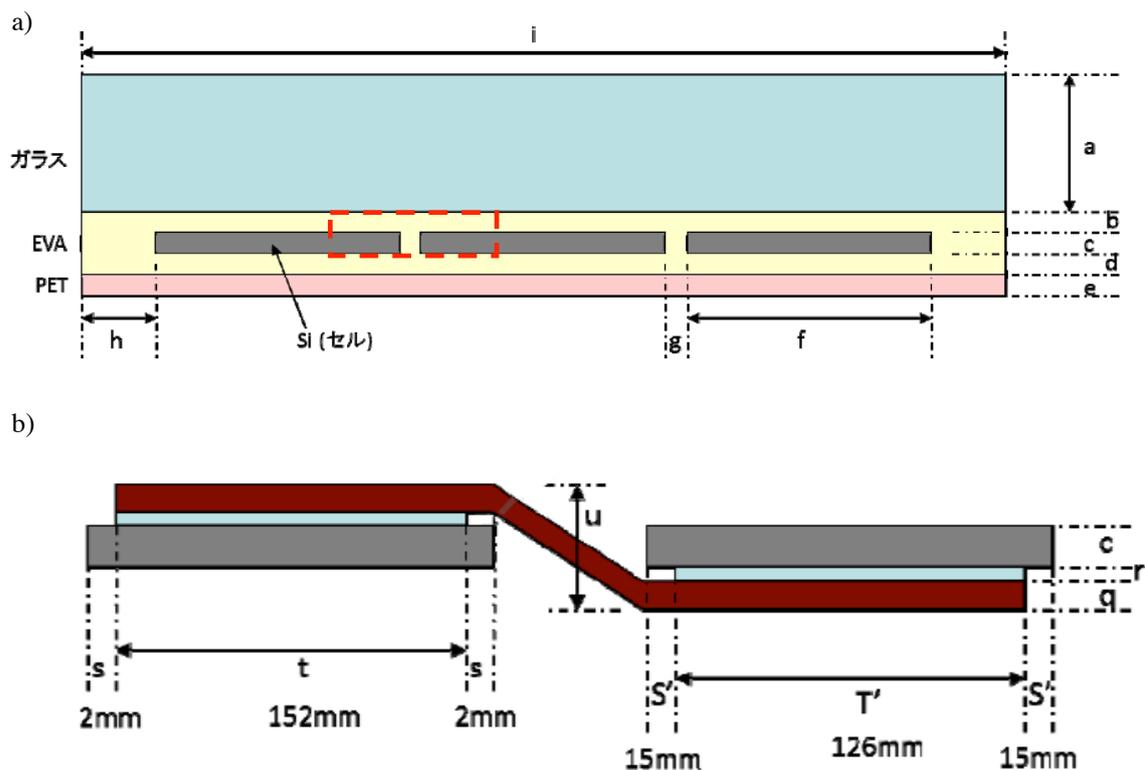


図 4.22.3 セル太陽電池モジュールの外観図



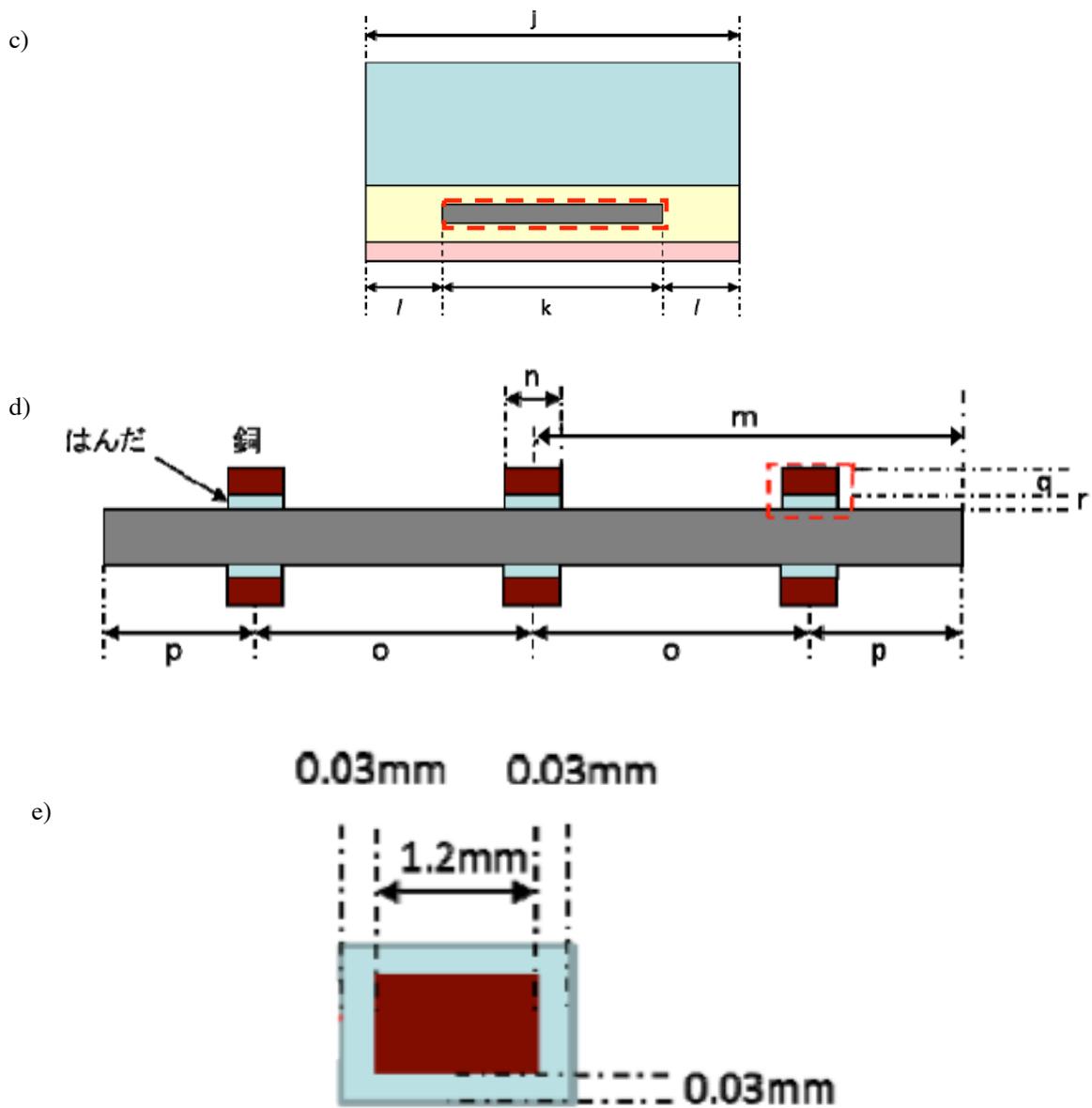


図 4.23. 各側面から見た断面構造と寸法 (a) A 側面から見た断面構造, (b) (a)の赤枠を拡大した断面構造, (c) B 側面からみた断面構造, (d) (c)の赤枠を拡大した断面構造, (e) (d)の赤枠を拡大した断面構造

表 4.5. 数値モデルの各箇所の寸法

	mm				mm		mm								
a	4.0	d	0.4	g	2.0	j	200	m	78.0	p	26.0	s	2.0	S'	15.0
b	0.4	e	0.15	h	34.0	k	156	n	1.26	q	0.2	t	152.0	T'	126
c	0.18	f	156	i	540	l	22.0	o	52.0	r	0.03	u	0.7		

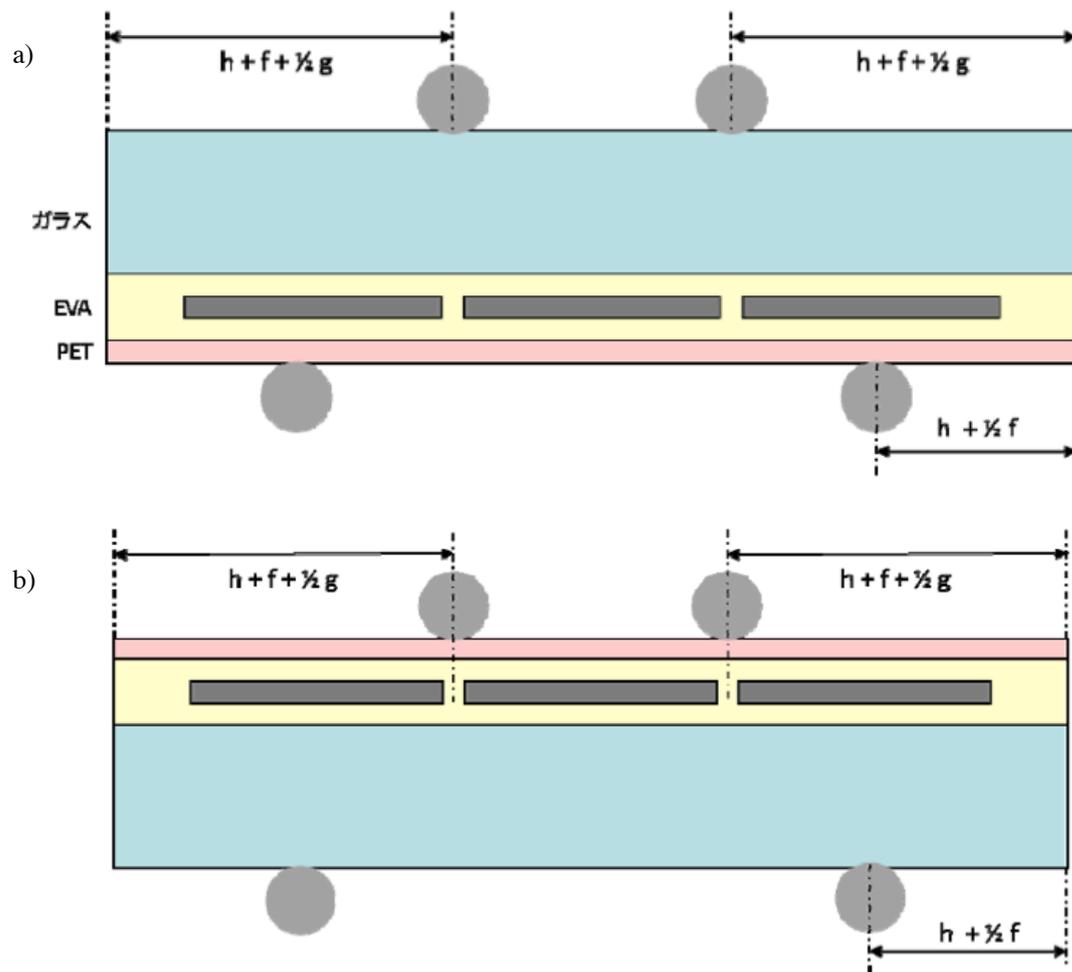


図 4.24. 数値モデルの支点の位置と荷重位置 a) ガラス側, b) BS 側

表 4.6. 各温度における物性値

23°C

物性項目	単位	ガラス	Si	EVA	PET	銅	はんだ
弾性率(ヤング率)	Pa	7.31E+10	1.31E+11	1.68E+07	1.60E+06	1.30E+11	2.20E+10
ポアソン比	-	0.22	0.27	0.45	0.33	0.34	0.37
熱膨張係数	1/°C	9.03E-06	4.15E-06	2.70E-04	2.50E-05	1.70E-05	2.40E-05
密度	g/cm ³	2.5	2.33	0.95	1.4		

-20°C

物性項目	単位	ガラス	Si	EVA	PET	銅	はんだ
弾性率(ヤング率)	Pa	7.31E+10	1.31E+11	1.40E+08	1.60E+06	1.32E+11	2.23E+10
ポアソン比	-	0.22	0.27	0.45	0.33	0.34	0.37
熱膨張係数	1/°C	9.03E-06	4.15E-06	2.70E-04	2.50E-05	1.70E-05	2.40E-05
密度	g/cm ³	2.5	2.33	0.95	1.4		

80°C

物性項目	単位	ガラス	Si	EVA	PET	銅	はんだ
弾性率(ヤング率)	Pa	7.31E+10	1.31E+11	1.03E+06	1.60E+06	1.28E+11	2.17E+10
ポアソン比	-	0.22	0.27	0.45	0.33	0.34	0.37
熱膨張係数	1/°C	9.03E-06	4.15E-06	2.70E-04	2.50E-05	1.70E-05	2.40E-05
密度	g/cm ³	2.5	2.33	0.95	1.4		

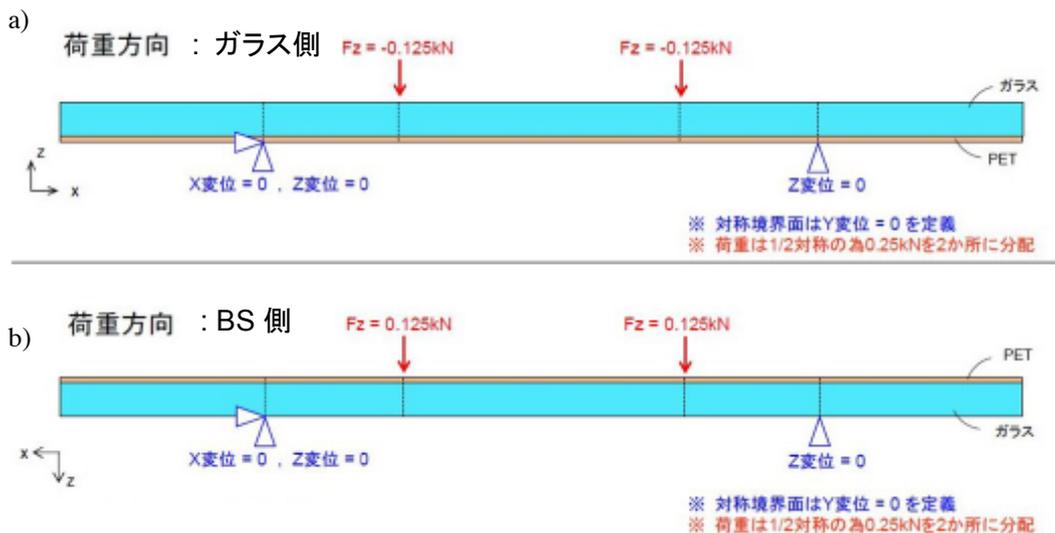


図 4.25. 境界条件 a) ガラス側, b) BS 側

4.5.3. 数値シミュレーションの方法

数値計算の負荷を低減するために解析モデルを 1/2 モデルとした。これは解析対象の 3 セル太陽電池モジュールが X-Z 平面に対して対象となるためである。図 4.26 に 1/2 にモデル化したイメージを示す。

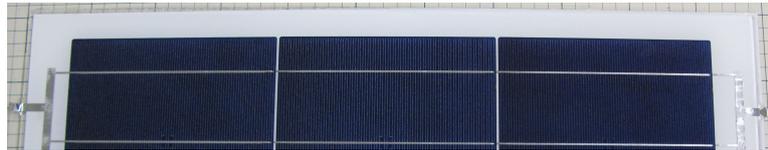


図 4.26. 1/2 モデル

次にソリッドモデルからメッシュを計算した結果を図 4.27～4.28 に示す。メッシュは節点数が 367,348、要素数が 172,645 である。EVA、銅、Si は高次構造ソリッド要素である SOLID 186 を、ガラス、BS(PET)、はんだは低次構造ソリッドシェル要素 SOLSH190(薄板部)とした。数値シミュレーションソフトは ANSYS 14.5 を使用した。また、今回の計算は線形解析で実施した。

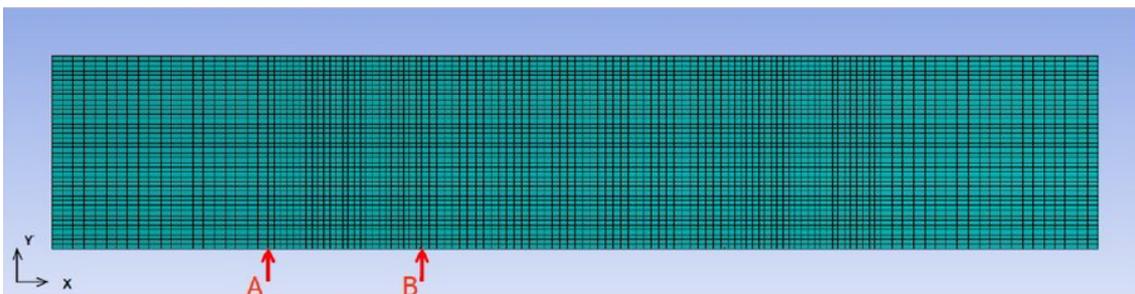


図 4.27. Z 軸からみたメッシュ

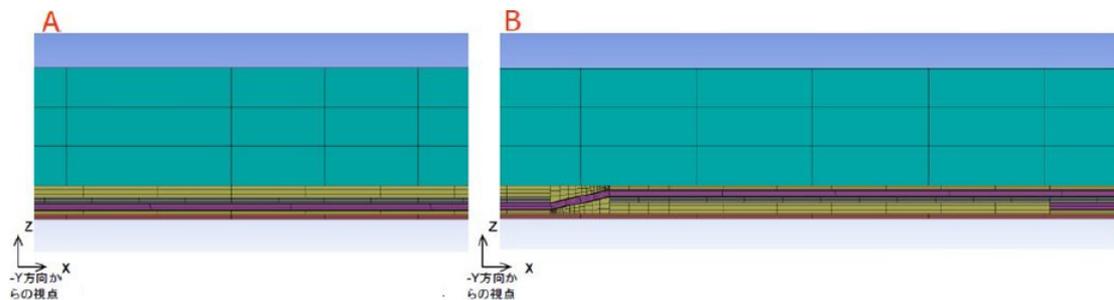


図 4.28. 図 4.27 の a) A から見た断面, b) B から見た断面

4.5.4 数値シミュレーションの結果

4.5.4.1 モジュール全体の変形量と最大値の比較

数値シミュレーションにおける変形量の結果として、温度条件が -20°C で、ガラス側を上向きに設置した場合に荷重を負荷した例を図 4.29 に示す。a-1), a-2)は熱荷重による太陽電池モジュールの全変形量を示している。熱荷重の場合、応力フリーの温度である 150°C から、 -20°C までの温度差 170°C の状態での熱収縮を計算している。その結果、太陽電池モジュールの両端がガラスの上側に 0.8 mm 撓む結果となった。次に b-1), b-2)に示した熱荷重を加えた状態で力荷重を加えた結果では、ガラス面側に 3 mm ほど撓む結果となった。

表 4.7 に各温度でのガラス側荷重、BS 側荷重における熱荷重、熱荷重+力荷重の変形量の最大値を示す。この時、Z 軸の上面への変形を正としている。よって熱荷重による変形がガラス側に反るため、ガラス側が上向きの場合に熱荷重を負荷した場合は正の値に、BS 側が上向きで熱荷重を負荷した場合は、ガラス側が下側となり下方向に変形するため、負の値になる。その後の力荷重では、ガラス側を上向きにして、熱荷重+力荷重を負荷した場合は、ガラス側にさらに変形する。一方で、BS 側を上向きにして熱荷重+力荷重を負荷した場合は、BS 側に収縮する。熱荷重についてみると、ラミネート時の 150°C から温度差が大きいほど、変形量が大きかった。また、BS 側を上向きにした場合の変形が、各温度で大きい値であることが分かった。熱荷重+力荷重の合計で見ると、ガラス側から荷重を負荷した場合のほうの変形量が大きかった。これは熱荷重で撓む向きと力荷重で撓む向きが同じであるためである。熱荷重+力荷重から熱荷重の差を力荷重とした場合の結果を表 4.8 に示す。この結果から、力荷重のみを比較すると各温度において、BS 側から荷重を負荷した場合の方がガラス側から荷重を負荷した場合よりも変形量が大きかった。

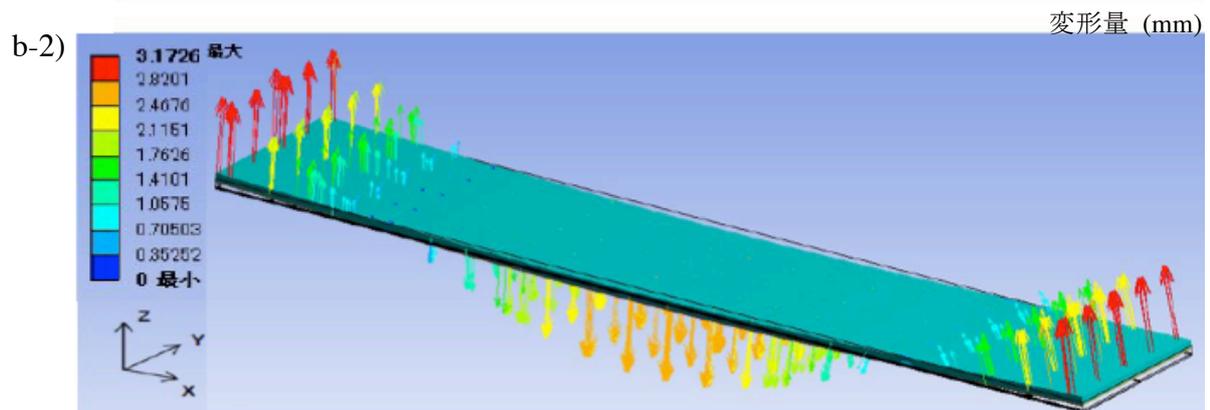
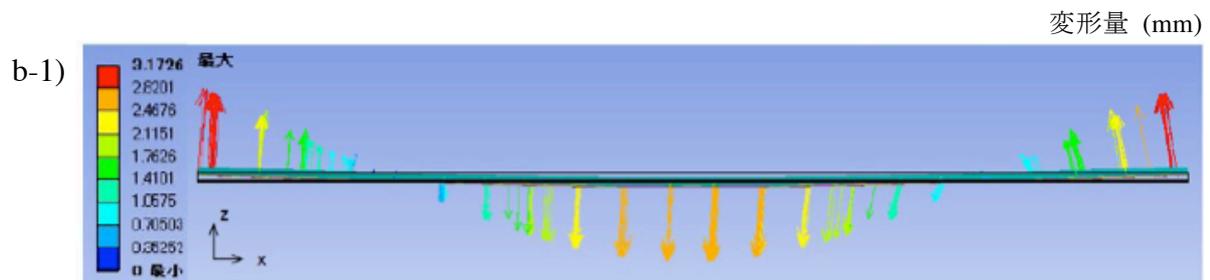
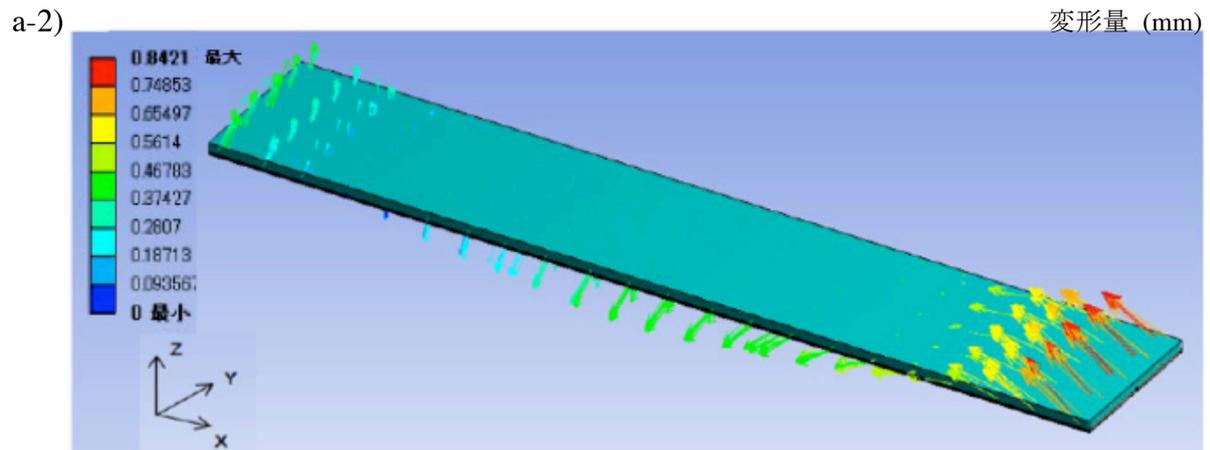
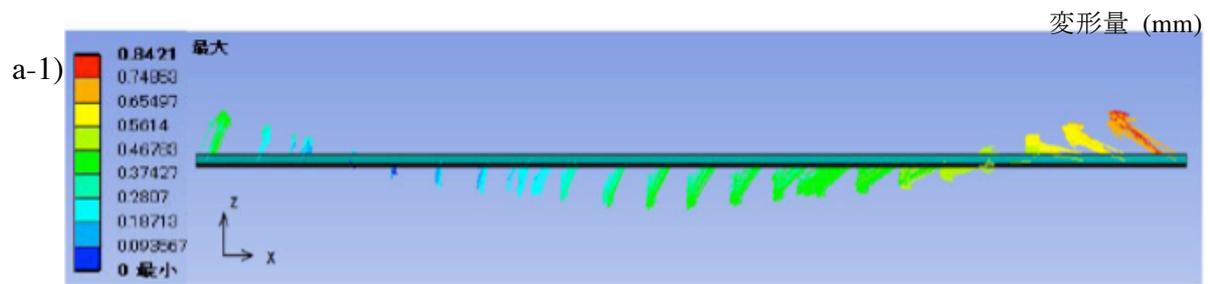


図 4.29. -20°C、ガラス側荷重における太陽電池モジュール全体の変形量
 a-1) 熱荷重時(-20°C) x-z 方向から見た変形, a-2) 熱荷重時(-20°C) x-y-z 方向から見た変形,
 b-1) 熱荷重+力荷重(-20°C) x-z 方向から見た変形, b-2) 熱荷重+力荷重(-20°C) x-y-z 方向
 から見た変形

表 4.7. 各温度における熱荷重、熱荷重+力荷重の変形量の最大値

	Temperature (°C)	Glass side (mm)		Backsheet side (mm)	
		Only thermal stress	Bending load	Only thermal stress	Bending load
Maximum displacement of module	-20	0.84	3.17	-0.92	2.45
	23	0.80	3.49	-0.89	2.44
	80	0.31	3.17	-0.33	3.04

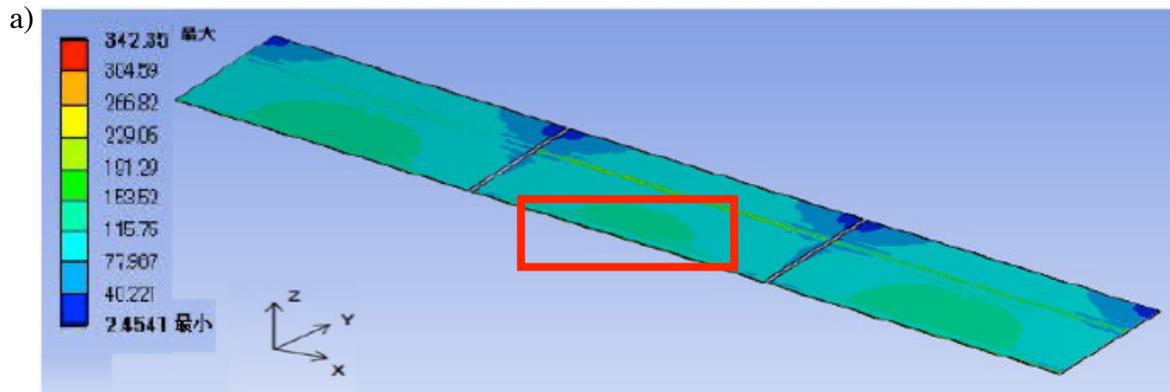
表 4.8. 各温度における力荷重のみの変形量

	Temperature	Glass side (mm)	Backsheet side (mm)
Difference between bending load and only thermal stress	-20	2.23	3.37
	23	2.69	3.33
	80	2.86	3.37

4.5.4.2 セル全体の応力分布と最大応力点

温度条件が-20°Cで、ガラス側を上向きに設置した場合に荷重を負荷した場合のセル全体の応力分布を図 4.30 に示す。a)は熱荷重を負荷した場合であり、b)は熱荷重+力荷重を負荷した場合である。熱荷重を負荷した場合は、セル全体に応力が負荷されていた。特にセル中心とバスバーに沿った箇所で、応力が高く、200 MPa であった。その後力荷重を負荷した場合は、端のセルの応力分布に大きな変化はみられなかった。一方、中央のセルでは、セル中央付近の応力が減少していた。同様の条件において、セルに生じた最大応力点を図 4.31 に示す。赤の印の点がセルの最大応力の位置になる。熱荷重を負荷した場合と、その後力荷重を負荷した場合も殆ど同じ場所で、セル上面の端部のインターコネクタとの交点付近に最大応力点があることがわかった。図 4.32 に各温度で熱荷重+力荷重時のセルに生じた応力分布を示す。赤の印の点がセルの最大応力の位置になる。荷重の面によらず、セルへの応力は-20°Cではセル全体に加わっており、80°Cではバスバーに沿った箇所に応力が集中していた。セルに生じる最大応力点は中央セルのセル端付近で、インターコネクタとの交点付近に位置することがわかった。表 4.9 に各温度でのセルに生じた最大応力値を示す。熱荷重から熱荷重+力荷重に荷重を増やした場合、80°Cの BS 側荷重の場合を除き、ほとんどが数%~2-%倍程度の増加であった。この結果から、セルに生じる応力は熱荷重が支配的であり、力荷重の寄与は大きくないことが分かった。また、熱荷重は温度差に依存し、低温ほど応力が大きく、力荷重は BS 側からの荷重を負荷した時の高温時に寄与していることがわかった。

応力 (MPa)



応力 (MPa)

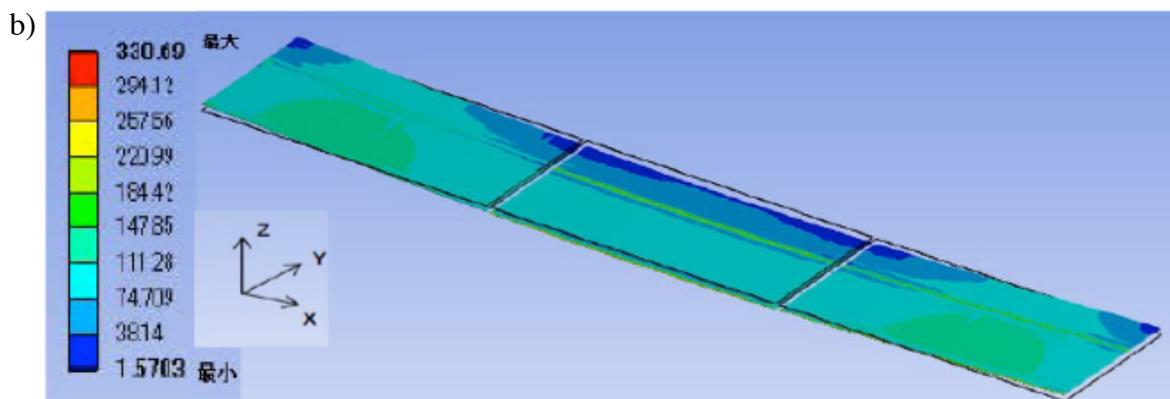


図 4.30. -20℃、ガラス側荷重時のセル全体の応力分布
a) 熱荷重を荷重した場合、b) 熱荷重+力荷重を荷重した場合

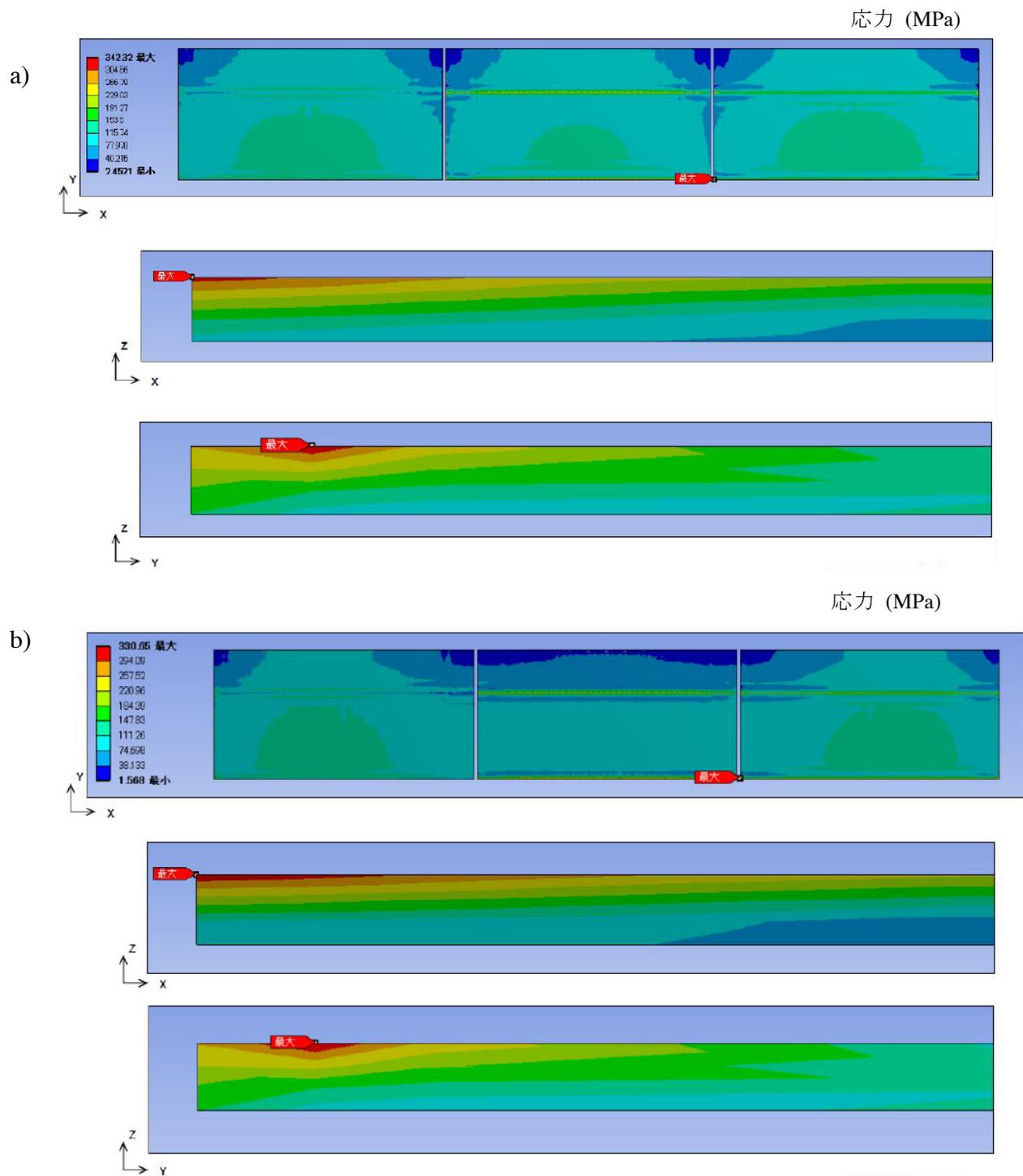


図 4.31. -20°C、ガラス側荷重時のセルの応力分布の最大応力点
 a) 熱荷重を負荷した場合、b) 熱荷重+力荷重を負荷した場合

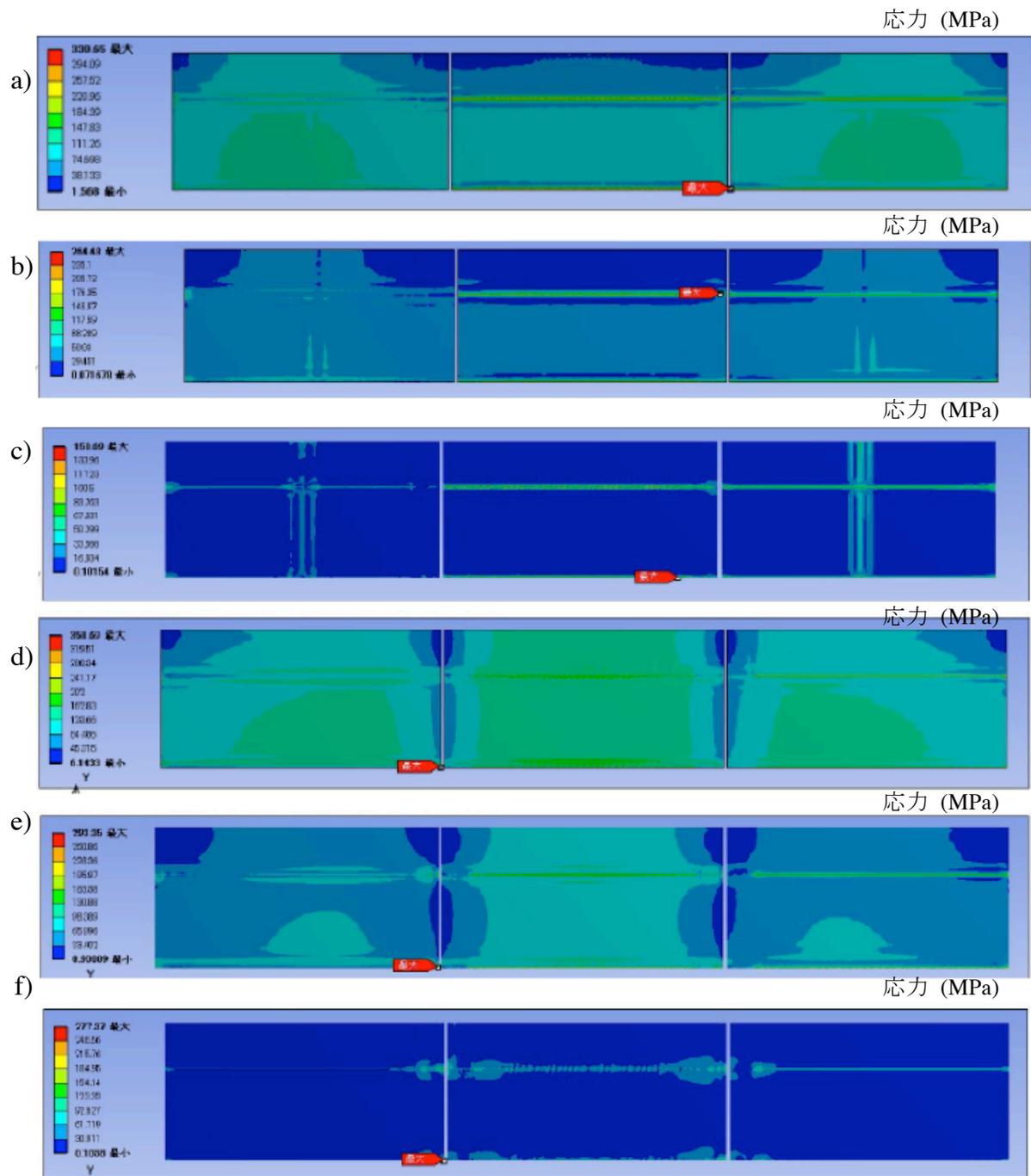


図 4.32. 各温度における熱荷重+力荷重時のセルの応力分布と最大応力点
 ガラス側荷重 a) -20°C, b) 23°C, c) 80°C
 BS側荷重 d) -20°C, e) 23°C, f) 80°C

表 4.9. 各温度におけるセル応力の最大値

Cell	Glass side		Backsheet side	
	Thermal Stress (MPa)	Thermal Stress + Bending Load (MPa)	Thermal Stress (MPa)	Thermal Stress+ Bending Load (MPa)
-20	324.4	330.7	345.6	358.7
23	235.6	265.4	237.5	293.5
80	136.2	150.5	136.8	277.8

4.5.4.3 インターコネクタの応力分布と最大応力点

温度条件が-20℃で、ガラス側を上向きに設置した場合に荷重を負荷した場合のインターコネクタの応力分布を図 4.33 に示す。a)は熱荷重を負荷した場合であり、b)は熱荷重+力荷重を負荷した場合である。赤の印の点がインターコネクタの最大応力点になる。a)に示した熱荷重の場合では、セル端部で、はんだ接合をしていない箇所のインターコネクタ上部にインターコネクタの最大応力点が位置していた。b)で示した熱荷重+力荷重の場合では、力荷重が負荷されている付近のセル端部とインターコネクタの交点部を中心に応力が高くなっている。最大応力点は力荷重を負荷している付近のインターコネクタの BS 側に位置していた。図 4.34 に熱荷重+力荷重時のインターコネクタの最大応力点を示す。23℃、ガラス側荷重時の応力点以外はすべて、力荷重が負荷されている付近のセル端部とインターコネクタの交点部付近で、インターコネクタの BS 側に位置していた。表 4.10 に各温度におけるインターコネクタに生じる最大応力値を示す。インターコネクタの最大応力値は熱荷重を負荷した場合は、荷重面によらず、-20℃の方が 80℃よりも大きい。力荷重が負荷されると荷重面による違いが出ていた。特に BS 側から荷重を負荷した場合、80℃のときは 1,176 MPa とかなり大きな応力値になっていた。

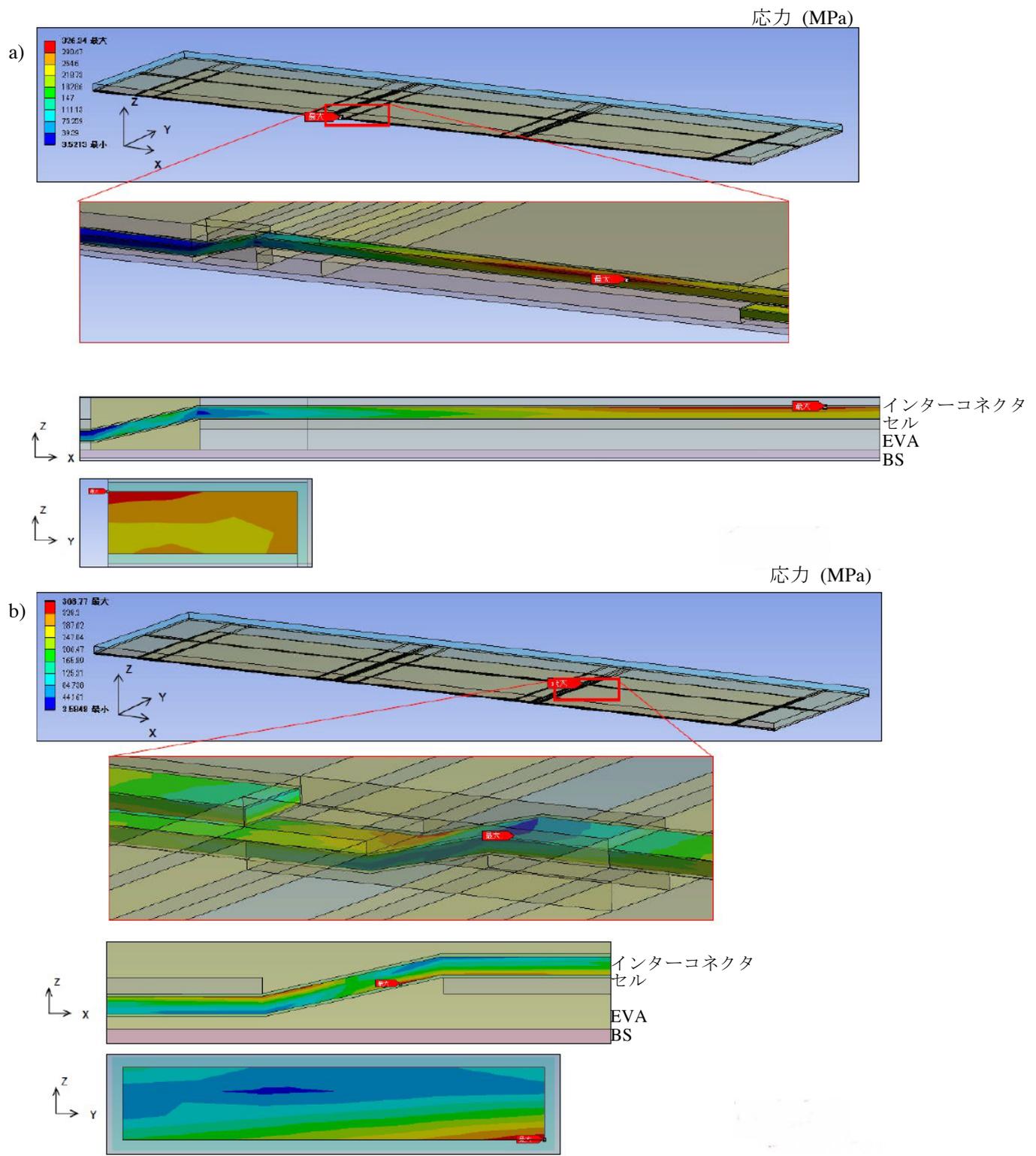
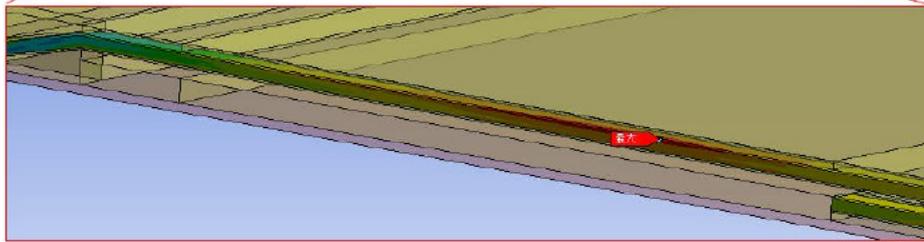
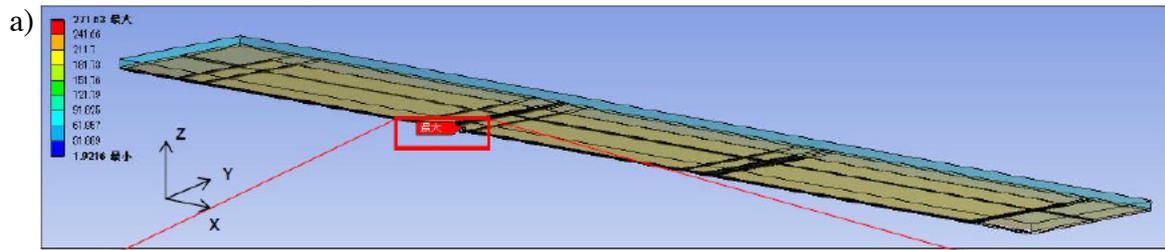
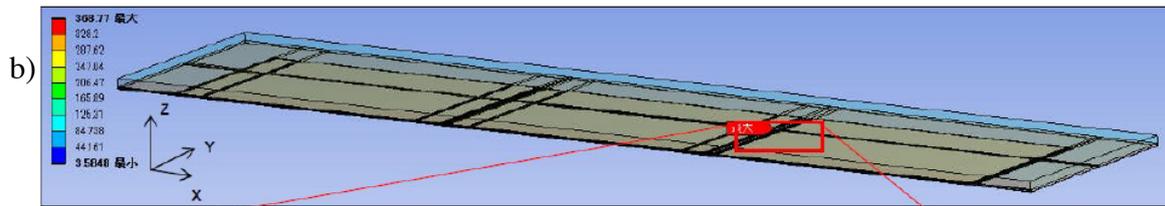


図 4.33. -20 °C、ガラスが荷重面の場合インターコネクタに生じた最大応力点
a) 熱荷重の場合、b) 熱荷重+力荷重の場合

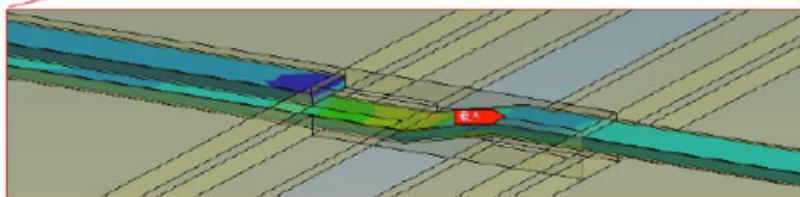
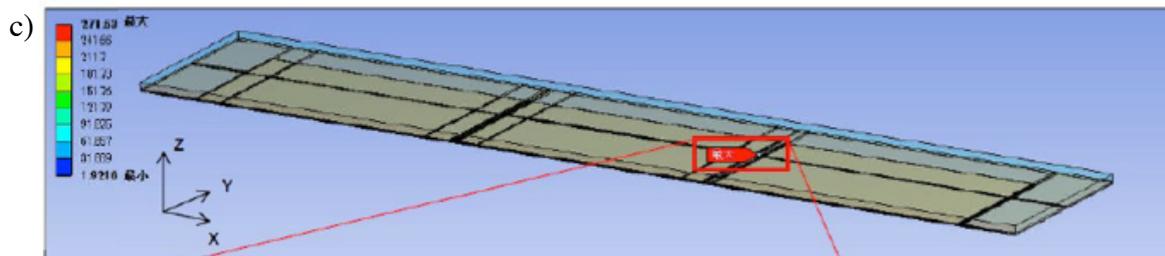
応力 (MPa)



応力 (MPa)



応力 (MPa)



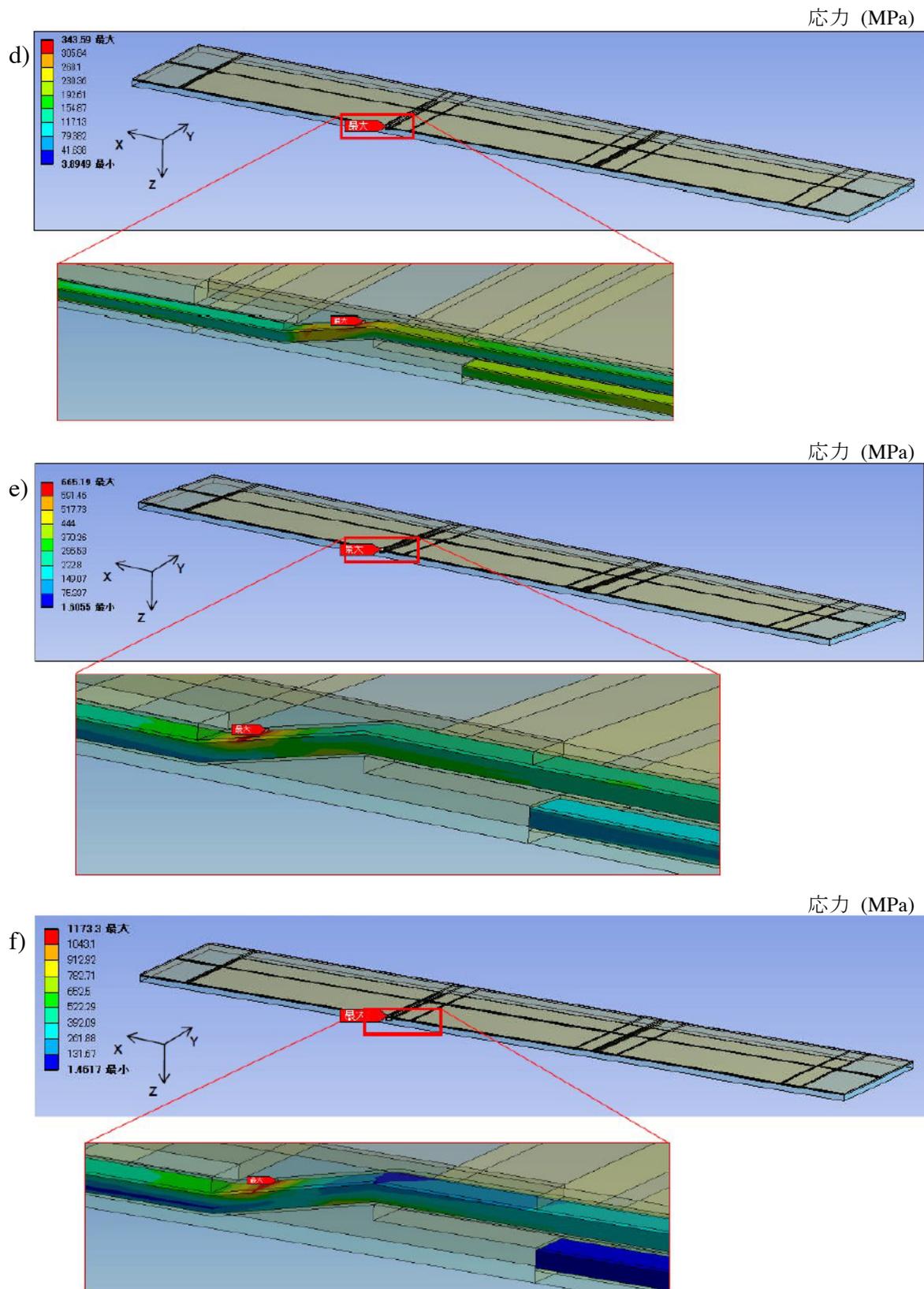


図 4.34. 各温度における熱荷重+力荷重時のインターコネクタの応力分布および最大応力点, ガラス側荷重 a) -20°C, b) 23°C, c) 80°C, BS 側荷重 d) -20°C, e) 23°C, f) 80°C

表 4.10. 各温度におけるインターコネクタに生じる応力の最大値

Inter connector	Glass side (MPa)		Backsheet side (MPa)	
	Thermal Stress	Thermal Stress + Bending Load	Thermal Stress	Thermal Stress+ Bending Load
Temperature (°C)				
-20	436.7	363.8	439.7	343.5
23	249.4	272.6	249.6	665.3
80	391.8	428.4	395.3	1176.1

4.5.4.4 数値シミュレーションによる BCL の劣化メカニズムの考察

数値シミュレーションによりセルおよびインターコネクタに負荷される応力の分布と最大応力点を確認した。インターコネクタの最大応力点は、力荷重が負荷されている付近のインターコネクタに集中していることがわかった。また、BCL 試験の劣化箇所と比較すると応力集中箇所が類似していることがわかった。ここで、BCL 試験の劣化メカニズムの考察をする。BCL 試験では-20°Cでは荷重面によらず、セルクラックが発生していた。80 °CではBS側から荷重を負荷した場合に、インターコネクタの破断が見られた。数値シミュレーションの結果では、セルに生じる応力分布は、熱荷重が支配的であり、-20°Cで荷重面によらず、セル全体に応力が負荷されていた。一方、インターコネクタに生じる応力分布は力荷重が負荷されるインターコネクタとセル端部の交点付近に存在することがわかった。表 4.11 に EVA のヤング率を示す。EVA のヤング率は-20 °Cの時と 80 °Cの時では値が 100 倍違っており、低温側で値が大きく、高温側で値が小さくなる。すなわち、低温側では EVA は堅くなり、高温側では柔らかくなることを示している。このため、低温側では、BCL の荷重面によらず、EVA が固くなることでセル全体に応力がかかり、セルクラックが発生し易くなったと考えられる。高温側では EVA が柔らかくなるため、セルへの応力が緩和され、セルクラックが発生し難いが、変形量が大きくなり、インターコネクタへの負荷が大きくなり、破断に繋がったと考えられる。これは、異なる温度で変形量を計測した結果とも一致する。

表 4.11 EVA のヤング率

Temperature (°C)	-20	23	80
Young's modulus (Pa)	1.40E+08	1.68E+07	1.03E+06

4.6 TCとの相関性の考察

第3章に結果を述べたでTC試験での劣化モードはバスバーとの交点でのフィンガー電極の破断がセルの一部にみられたことと、はんだ接合部の劣化であった。また、発電性能特性の低下も緩やかに進行していた。一方、BCLで発生した劣化モードは、セル全面へのクラックの発生とインターコネクタの破断であり、発電性能特性は短時間で大幅に低下していた。これらの結果より、TCとBCLでは劣化モード、劣化メカニズムが異なっており、TCの加速試験として、BCLなどの動的荷重試験を組み合わせる場合は注意が必要であることがわかった。

4.7 BCL試験による太陽電池モジュールの耐性評価

BCL試験はBS側からの荷重によりインターコネクタの破断を短時間で再現性よく評価できることがわかった。この特徴を生かし、太陽電池モジュールの配線材料変更やセル間隔の変更を行った際の物理的な耐性評価試験としての活用が期待できる。一定の面積で発電効率を高めるためには、多くのセルを配置できることが望ましい。また、配線材の幅を小さくすることで、コスト低減の検討が行われている。このように発電効率やコストを求めた際に、変更した箇所の信頼性の評価は重要である。そこで、セル間隔を変更した太陽電池モジュールを作製し、BCL試験によるインターコネクタの耐性評価を行い、セル間隔の最適値の検討を行った。セル間隔は1 mm, 2 mm, 5 mm, 10 mmの4条件で実施した。BCLの試験条件は試験温度 25 °C, 荷重 500 N, 8s / cycle で 20,000 サイクルまで実施した。セルの配置間隔とインターコネクタ破断の関係性について調べた結果を図 4.35, 図 4.36 に示す。この結果から、セル間隔が 1 mm の場合は、10,000 サイクルで P_{max} が 25%程度低下した。一方で、2 mm 以上の間隔では、20,000 サイクルで P_{max} が 10%程度の低下であった。セル間隔が 2 mm 以上あれば劣化率の大きな違いは見られなかった。よって、今回の条件ではセル間隔は 2 mm が妥当であることがわかった。

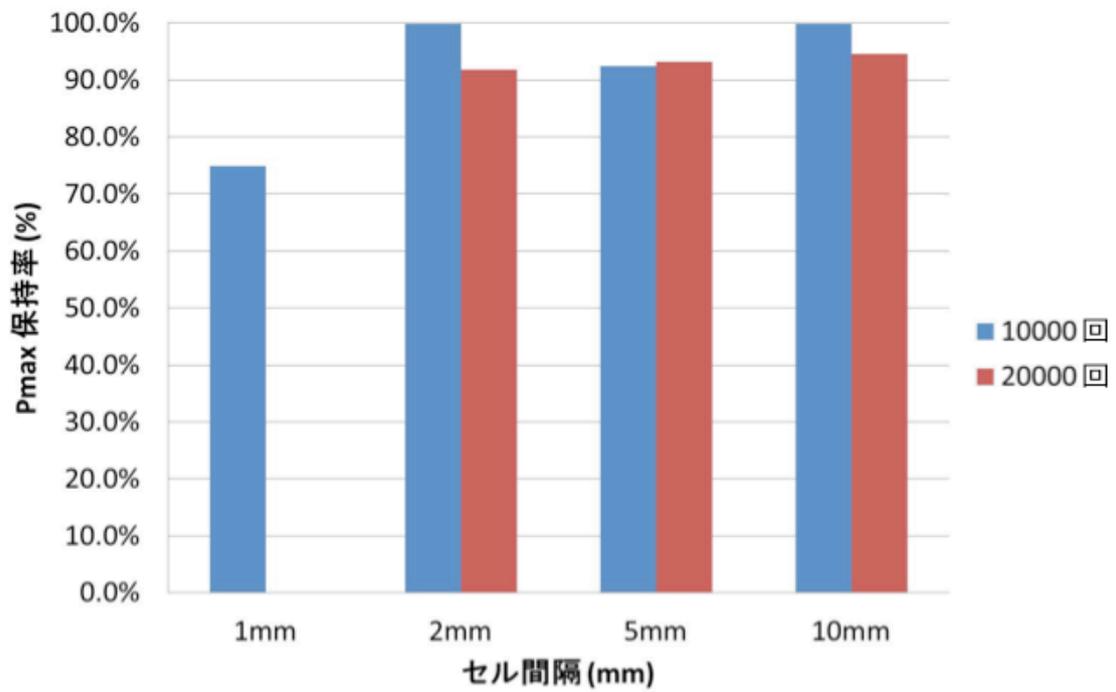


図 4.35. セル間隔と BCL 試験後の P_{\max} の関係

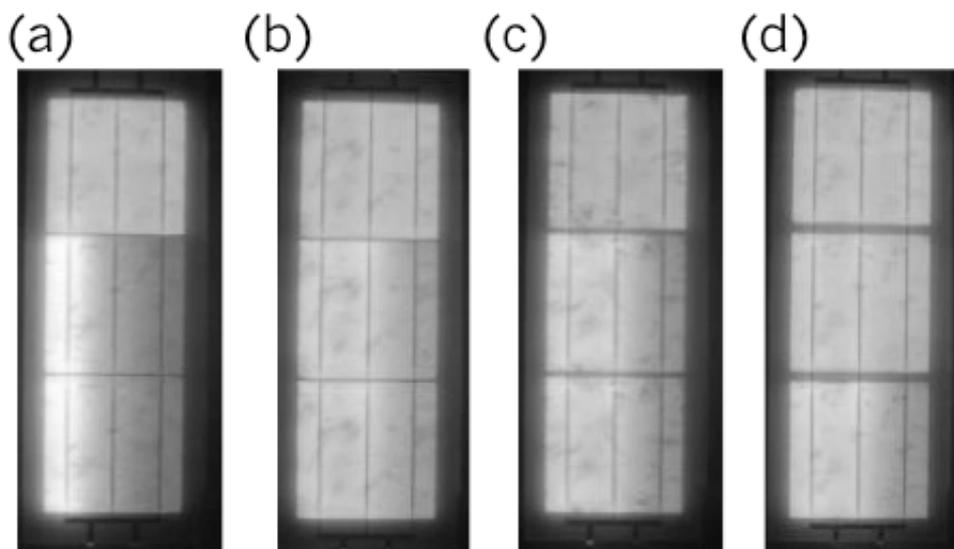


図 4.36. BCL 試験後の EL 像 セル間隔 (a) 1 mm, 10,000 回, (b) 2 mm, 20,000 回
(c) 5 mm, 20,000 回, (d) 10 mm, 20,000 回

4.8 結言

太陽電池モジュールへの物理的な荷重負荷による劣化メカニズムを解明することを目的に BLC 装置を開発し、試験を実施した結果、以下の知見を得た。

1. 今回実施した 4 セルミニモジュールの DML 試験では、劣化モードの複合化やインターコネクタ破断を再現させることが難しいことがわかった。
2. BCL 試験を実施した結果、モジュールへ負荷する荷重面と温度によって再現できる劣化モードに違いがあることを明らかにした。セルクラックは温度に依存する部分が大きく、インターコネクタの破断は荷重を負荷する面に依存することがわかった。
3. 数値シミュレーションによる解析結果より、低温域でセルクラックが発生する理由や BS 側から荷重を負荷した場合にインターコネクタが破断する理由は封止材の粘弾性に依存していることを明らかにした。
4. TC 試験と BCL 試験では劣化モードや劣化メカニズムに違いがあることがわかった。
5. セルの配置間隔を変更した太陽電池モジュールにおけるインターコネクタ破断の影響を BCL 試験により調査したところ、今回のモジュールでは 2 mm 以上が望ましいことがわかった。

これらの結果から、今回試験を実施した多結晶 Si 太陽電池 3 セルミニモジュールにおいて、太陽電池モジュールへの物理的な負荷荷重による劣化モードには、セル全面に影響が及ぶセルクラックと、インターコネクタ破断に大別でき、それらの劣化は温度と変位方向に依存していることを明らかにした。また、BCL 装置は 10,000 サイクルの試験が、1 日程度で評価可能なため、構成部材を変更した場合や、モジュール設計や作製工程を変更した場合などに物理荷重の耐性評価試験としての活用も期待できる。

第5章 塩水噴霧試験とPotential-Induced Degradationの組合せによる 発電特性劣化に関する加速試験方法の確立

5.1 緒言

電力の固定買取り価格制度(Feed in Tariff,以下FIT)の導入によりメガソーラ・ギガソーラの大規模な太陽光発電システムの普及が進んでいる。一方で、大規模な太陽光発電システムにより、システム電圧が高電圧化した影響で発電特性が急に低下する現象(Potential-Induced Degradation,以下PID)の発生が懸念されている。このPID現象とは、大規模な太陽光発電システムにおいて、太陽電池モジュールのセルとフレーム間に漏れ電流が発生することで、出力が低下する現象であり、直列につながれた太陽電池モジュールにおいて、フレームとの電位差が大きくなる陰極に近い太陽電池モジュールで出力低下がおりやすくなると考えられている。PID現象への対策として、原ら¹⁻¹⁵⁾は封止材にポリマ薄膜を加える方法を報告している。太陽電池モジュールの長期信頼性に向けた加速試験方法の開発を目的として、大規模太陽光発電システムなどでの発生が懸念されるPIDについて、塩水噴霧試験との組合せによる加速化検討を実施した。

太陽電池モジュールが沿岸域に設置される場合、塩分を含む空気の飛散によりフレームや架台の腐食やセルやインターコネクタなどの腐食が懸念される⁵⁻¹⁾。これらの塩水雰囲気ストレスによる影響に対する耐腐食性を評価する試験として、IEC 61701 (Ed. 2), 2011「太陽電池モジュールの塩水による耐腐食性試験」が制定されている⁵⁻²⁾。この塩水試験を実施した報告では、太陽電池モジュールの絶縁レベルの低下や金属製ジャンクションボックスの表面腐食、インターコネクタの腐食などが観察されるが、発電性能の低下などはほとんど起きていない⁵⁻³⁾。これらの点から、IEC規格の塩水噴霧試験は、太陽電池モジュールに対して絶縁低下などの評価にとどまり、短時間で発電性能特性劣化を評価できるまでのストレスを負荷できているとは考え難い。一方で、塩水噴霧ストレスが長期の太陽電池モジュールの発電性能特性劣化へ及ぼす影響については、未知数であることも示唆している。

PIDによる太陽電池モジュール発電性能の劣化については、各研究機関から試験結果の報告や劣化メカニズムが提唱されており^{5-4,5)}、PIDの劣化状態や劣化メカニズムが明らかにされてきた。提唱されているPIDの劣化状態や劣化メカニズムは、以下になる。

p型セルを用いた太陽電池モジュールの場合、接地されたフレームに対してセルにマイナスの高電圧を負荷することで、並列抵抗 R_{sh} の低下による出力低下が生じる。出力低下が進行した場合は、 R_{sh} 低下にともなう開放電圧 V_{oc} の低下も見られる場合がある^{5,6-9)}。PIDによる出力低下は、高温保持や逆電圧を負荷することにより回復する場合がある。^{5-6-8,10)} PIDは、太陽電池モジュールを構成する部材を変更、改変することで防止することが可能である¹⁻¹⁵⁾。

PID発生メカニズムについては、フレームとセル間に高電圧が負荷されることにより表面のガラスから遊離したナトリウムイオンがセル表面の反射防止膜に集積され⁵⁻¹¹⁻¹⁴⁾、正電荷により集積された電子と二重層を形成することで、セル表面に部分的ではあるが強力な電場が発生し、この電場の影響によりセル上層部のn層の一部がp⁺性状へ反転する。その結果、新たに形成されたn⁺-p⁺接合部でトンネル電流が流れることにより並列抵抗の低下が生じるとする仮説が提案されている⁵⁻¹⁵⁾。また、何らかの原因で移動が制限された場合は、シリコン結晶に存在する積層欠陥に沿いセル内に侵入して直接的にpn接合を破壊する仮説も提案されている⁵⁻¹⁷⁾。高電圧を負荷した状態での屋外曝露試験では、ある型式の太陽電池モジュールについては1年以内にPIDによる出力低下が確認されている。また、同型式の太陽電池モジュールを用いた屋内試験では、同程度の出力低下および類似劣化性状が再現でき、この試験条件では屋外曝露に比べて400倍以上の加速が可能とされている⁵⁻⁸⁾。

5.2 塩水噴霧試験条件・PID試験条件

本章では、沿岸域で太陽光発電システムが長期間運用される場合を想定し、空気中に塩分が含まれる影響を立証することを目的として加速試験法の開発に取り組んだ結果について述べる。具体的には、塩水噴霧試験を前処理として実施し、その後PID試験を連続的に実施した。

5.2.1. 太陽電池モジュール構成部材

本章で用いた太陽電池モジュールの構成部材を表5.1に示す。また太陽電池モジュールの外観を図5.1に示す。太陽電池モジュールは400 mm×400 mmの4セルミニモジュールとした。太陽電池セルは、サイズが156 mm×156 mm、セル厚さが $t = 180 \mu\text{m}$ 、3本バスバーのp型の多結晶シリコンセルでPID対策をしていないセルと対策してあるセルを使用した。配線材には、主材が銅で、Sn-Pbでめっきされている、幅1.3 mmの日立電線製の配線材を使用した。この配線材とセルをエヌ・ピー・シー製セル自動配線装置(NTS-150-S-H-3K)にセットして自動配線を行った。カバーガラスには、サイズが400 mm×400 mmで、厚さは $t = 3.2 \text{ mm}$ の旭硝子製の白板半強化ガラスを使用した。封止材はEVAのFAST Cureタイプで、厚みは $t = 450 \mu\text{m}$ のものを使用した。BSは、TPTで構成されたBSを使用しモジュール作製を行った。TPTの厚さは、Tedlarが $t = 38 \mu\text{m}$ で、PETが $t = 250 \mu\text{m}$ でトータル326 μm である。その後、エヌ・ピー・シー製の真空ラミネータ LM50×50Sにより150 °Cでラミネートを行った。その後、端子箱を取り付け、モジュールの周囲にアルミフレームを取り付けた。塩水噴霧試験では太陽電池モジュールの端子箱の先端からの塩水浸入を防ぐために、端子を接続し、閉回路状態で試験を実施した。

表5.1. 太陽電池モジュールの構成部材

Material	Specification	Size	Supplier
Cell	Multi-crystalline Si cell p-type (PID-prone, PID-resist)	156 mm × 156 mm t = 180 μm	Q Cells
Glass	Semi-tempered glass	180 mm × 180 mm t = 3.2 mm	AGC
Encapsulant	EVA (Fast Cure)	t = 450 μm	SANVIC
Interconnector	A-SPS (Leaded, Ag)	W = 1.5 mm	Hitachi Cable
Back sheet	TPT	T : t = 38 μm P : t = 250 μm TPT : t = 326 μm	Nondisclosure
Junction box	No bypass diode	—	Onamba
Frame	Aluminium	407 mm × 407 mm	KIS

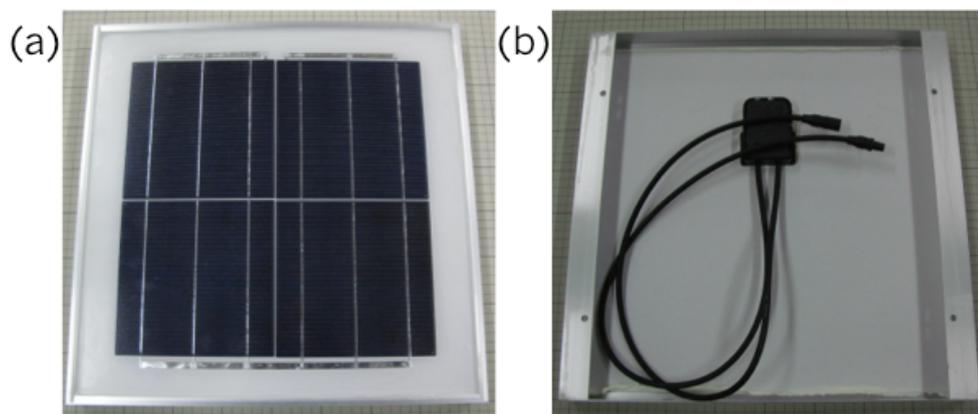


図 5.1. 太陽電池モジュールの外観 (a) 表面, (b) 裏面

5.2.2. 塩水噴霧試験条件

塩水噴霧試験はスガ試験器のCCT-1LとCasser-20L-CYHを使用した。塩水噴霧試験は、めっきの耐食性試験であるJIS H 8501: 1999 [8.1項] 内にある中性塩水噴霧試験および、太陽電池モジュールの耐塩水性をみる試験であるIEC 61701: 2011の2種の試験を実施した^{5-1,17)}。

JIS H 8502:1999 (以下、JIS法) はめっきの耐食性試験方法を規定したJIS規格であり、屋外曝露試験をはじめとした様々な腐食試験が規定されている。その中に規定されている中性塩水噴霧サイクル試験の条件を用いて試験を実施した。中性塩水噴霧サイクル試験の試験

条件を図5.2に示す。濃度が5%に調整された塩化ナトリウム水溶液を35℃の環境下で、噴霧量が1~2 ml/h/80 cm²として、2時間の塩水噴霧を行った。次に、乾燥工程として槽内温湿度を60℃、20~30%で4時間実施し、湿潤保持工程として槽内温湿度を50℃、95%以上に保ち2時間実施した。これを1サイクルとする塩水噴霧サイクルを120サイクル行った。この中性塩水噴霧サイクル試験の特徴は、塩水噴霧後に乾燥工程を実施し、サンプルを乾燥させた後に湿潤工程でサンプルを湿潤化し、再度塩水噴霧を繰り返すことで、噴霧された塩水をサンプル上で濃縮することで、塩水による腐食促進効果を加速することである。

IEC 61701: 2011 (以下、IEC法) は太陽電池モジュールの耐食性を試験する規格である。IEC60068-2-52:1996をもとに太陽電池モジュール向けの塩水噴霧試験として規格化されている⁵⁻¹⁸⁾。塩水噴霧試験の試験条件を図5.2に示す。濃度5%の塩化ナトリウム水溶液を、槽内温度35℃で、噴霧量が1~2 ml/h/80 cm²として2時間の塩水噴霧を行った。塩水噴霧試験環境はJIS法と同様である。次に湿潤保持工程として、槽内温湿度を40℃、90%以上に保ち22時間実施した。これを4回繰り返した。その後、乾燥工程として槽内温湿度を23℃、40~55%に保ち、72時間実施した。これを1サイクルとした塩水噴霧サイクルを、IEC規格で定められる「厳しさ：6」にあたる8回繰り返した。塩水噴霧試験と湿潤保持工程で考えると、合計32サイクル実施したことになる。この塩水噴霧工程の特徴は、塩水噴霧と高湿保持を繰り返すことにある。今回の2種類の塩水噴霧試験では、噴霧された面による違いがどのように劣化に影響があるかを確認するために、太陽電池モジュールに塩水を噴霧する面を受光面であるガラス側(F)とBS側(B)の2方向で実施した。

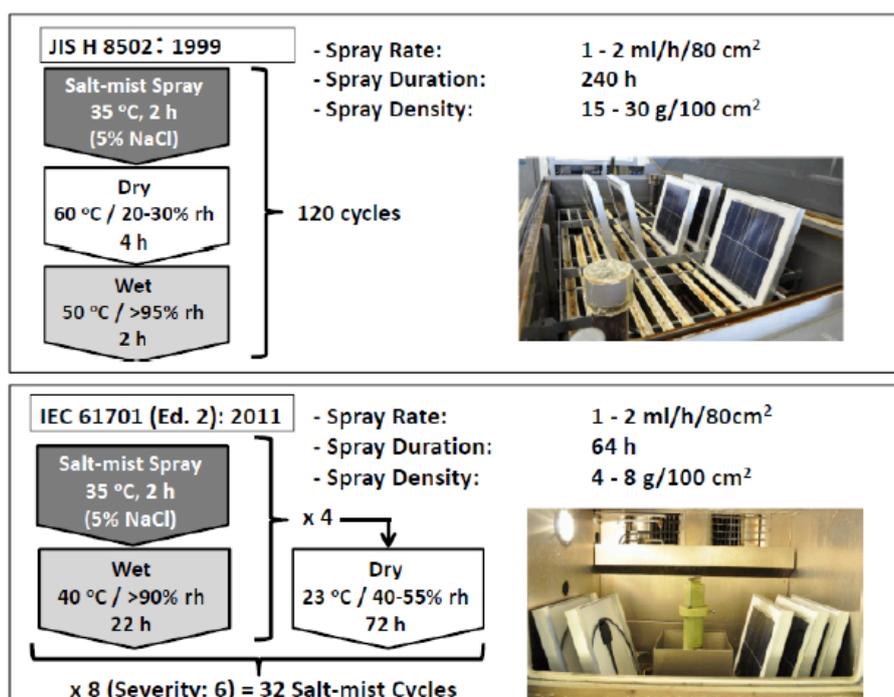


図 5.2. JIS法とIEC法の試験工程と太陽電池モジュール設置状況

5.2.3 PID試験およびリーク電流測定

塩水噴霧試験を実施した太陽電池モジュールに対しPID試験を行った。PID試験はエスピーック製の高温高湿試験器PR-4J内に絶縁ラックを設置し、PID評価システムAMI-020-PIDを用いた。PID試験条件はIEC規格で提案されているチャンバー法を採用した。なお、ここで提案されていた条件は、2015年にIEC TS 628041として規格に採用された。チャンバー法の試験条件を示す。温湿度条件は60 °C, 85% とした。太陽電池モジュールのフレームを接地し、端子箱からセルに-1,000 Vの電圧を印加した。電圧の印加は、槽内温湿度が設定値に到達した後に負荷した。フレームとセル間のリーク電流を6分毎に測定し、電荷移動量の定量化を行った。

5.2.4 太陽電池モジュール特性評価

湿潤漏れ電流試験は、IEC 61215, 2005の10.15の試験条件で実施した¹⁻⁷⁾。湿潤漏れ電流試験は湿潤運転条件下でのモジュールの絶縁性能を評価することと、腐食、地絡または災害の原因となる湿気がモジュールの充電部に入らないことの検証を目的としている。湿潤漏れ電流試験の試験条件を示す。太陽電池モジュールを用意した試験溶液に浸漬し、500 V/s以下の上昇速度で600 Vまで印加電圧を上げ、この電圧を2 分間維持し、絶縁抵抗値を測定する。試験後はモジュールの残存電荷を放電させるために、印加電圧を0 Vに下げる。今回用いた絶縁抵抗測定システムでの検出限界は10 k Ω である。また今回用いた太陽電池モジュールの面積は0.16 m²であることから、1.6 k Ω m²に相当する。湿潤漏れ電流試験における絶縁抵抗測定は、試験溶液の温度に大きく影響される。そのため、太陽電池モジュールの絶縁抵抗値測定時に試験溶液の温度も測定し、そこから検量線を作成し、22 °Cにおける校正値を絶縁抵抗値として用いた。また、IEC 61215: 2005 (10.3項)にしたがって絶縁試験も実施した。絶縁試験は太陽電池モジュールの通電部分とフレームまたは外界との間が十分にかつ、適切に絶縁されているかを決定することを目的とした試験である。絶縁試験の試験条件を示す。太陽電池モジュールの出力端子を短絡し、電流制限付き直流絶縁試験器の正極端子に接続する。太陽電池モジュールの露出金属部分を試験器の負極端子に接続し、600 Vの電圧を1分間印加する。絶縁抵抗試験では絶縁破壊がないこと、面積が0.1 m²より大きいモジュールの場合の絶縁抵抗は、(絶縁抵抗の測定値)×(モジュール面積)は40 M Ω m²以上となっている。

発電特性は、ソーラシミュレータ (SPI-SUN Simulator 1116N) およびELイメージング装置 (ITES、PVX100) を用いて評価した。太陽電池モジュールを構成するセル中のR_{sh}低下部位を検出するために、NPC製のレーザスキャンニング装置 String Laser Machineを用いた。本装置は、太陽電池モジュールに定電圧バイアスを負荷しながらLaser-Beam Induced Current (以下, LBIC)マッピングを行う機能を持っている。この定電圧バイアスにより、レーザスキ

ランを行っているセルで生じる抵抗が補正できる。レーザスキャン中のセルは影が掛かっている状態にあたるために、定電圧バイアスにより、この影の影響を補正しているものと考えてよい。この定電圧バイアスの最適化と数段階の画像処理を行うことで、 R_{sh} 低下部位が明瞭にイメージングできる。さらに、ロックインサーモグラフィ（Lock-in-Thermography、以下、LIT）を用いて R_{sh} 低下部位をマッピングする方法も実施した。太陽電池モジュールに負荷する電圧をコントロールする関数発生器と赤外線カメラ（CEDIP Silver-480M）および定電圧電源を接続して、光照射下の電圧負荷によって生じる太陽電池モジュールの温度変化部位を画像化した。なお、この定電圧負荷は、順方向（0～+3 V）および逆方向（0～-3 V）を0.5 Hzで印加した。

太陽電池モジュールの発電特性パラメータである、光起電流（ I_{ph} ）・逆飽和電流（ I_0 ）・ダイオード理想係数（ n ）・ R_s ・ R_{sh} は、ソーラシミュレータで測定した電流－電圧データ（I-Vデータ）から、Zhangらの方法を改変して抽出した⁵⁻¹⁹。取得したI-Vデータは、二分法により発電特性パラメータ R_s 、 R_{sh} 、 n の粗抽出を行った。これらを初期値として、Zhangらの方法にしたがい、Lambert W関数計算プログラムとMicrosoft Excelに搭載されているソルバー機能を利用して発電特性パラメータの精密推定を行った。

5.3 試験結果

5.3.1 湿潤状態の絶縁抵抗変化と発電性能変化

2種類の塩水噴霧試験を実施した後とその後PID試験を実施した後の湿潤抵抗値の変化を図5.3に示す。横軸は試験時間で縦軸は湿潤漏れ電流試験における絶縁抵抗値である。図5.3の(a)と(b)はそれぞれJIS法とIEC法で塩水噴霧試験後の測定結果である。塩水噴霧試験が一定のサイクルを終了する毎に絶縁抵抗試験、湿潤漏れ電流試験を実施した。湿潤状態における絶縁抵抗値は、塩水噴霧を実施していない太陽電池モジュールに対して、JIS法では約2/3、IEC法では約3/4まで低下したが、IEC 61215: 2005に規定されている合否判定基準は上回っていた。また、ドライ状態での絶縁抵抗値は、今回の2種類の塩水噴霧試験どちらにおいても低下を確認できなかった。実施した2種の塩水噴霧試験ともに、噴霧された面の違いによる湿潤絶縁抵抗の違いは観察されなかった。これらの結果から、塩水噴霧ストレス負荷中のフレーム－セル間の絶縁抵抗は、塩水噴霧試験の違いや塩水噴霧される面には影響されないことがわかった。塩水噴霧試験実施後の太陽電池モジュールでPIDを実施し、ある一定の時間で湿潤漏れ電流測定した結果が(c)と(d)である。(c)と(d)のA,Bは、Aが塩水噴霧試験前を示し、Bが塩水噴霧試験後を示す。(d)の結果をみると、PID対策を施したセルでは高電圧印加による湿潤環境での絶縁抵抗の低下はみられなかった。一方、(c)の結果では、IEC法でBS側に塩水噴霧を施した太陽電池モジュールの1つが、PID試験直後に絶縁抵抗値が合否判定基準を下回った。その他の太陽電池モジュールでは高電圧印加による湿潤環境での

絶縁抵抗の低下はみられなかった。次に太陽電池モジュールの発電性能特性の変化を図5.4に示す。横軸は試験時間で縦軸は各試験後に測定した値を初期値で無次元化した P_{max} を示す。(a)はPID非対策セルの結果で(b)はPID対策セルの結果である。太陽電池モジュールの P_{max} は、塩水噴霧試験の違いや塩水噴霧の面による違いに依存せず、大きな低下はみられなかった。これらの結果から、一定レベルの絶縁性低下を除いて、太陽電池モジュールの発電性能特性に対する塩水噴霧の影響は小さいことがわかった。続いて、PID試験を実施した結果についてみる。ここで、塩水噴霧試験をせずにPID試験だけを実施した太陽電池モジュールをコントロールモジュールとした。(a)の結果より、PID非対策セルではPID試験だけを実施したコントロールモジュールでは、 P_{max} の低下はみられなかったが、塩水噴霧試験後にPID試験を実施した太陽電池モジュールの中で、BS面に塩水噴霧を実施したJIS法(JIS / B)とフロントガラス面に塩水噴霧を施したIEC法(IEC / F)で P_{max} の低下がみられた。フロントガラス面に塩水噴霧を施したJIS法(JIS / F)とBS面に塩水噴霧を施したIEC法(IEC / B)では、 P_{max} の低下がみられなかった。 P_{max} の低下がなかった太陽電池モジュールのうち、IEC/Bの一枚(24F248)は、湿潤環境における絶縁抵抗値が合否基準以下になったモジュールであり、このため、印加された電圧がセルにかからずにフレームに漏れていたと考えられる。また(b)の結果より、PID対策セルで実施したモジュールにおいては、塩水噴霧試験+PID試験では P_{max} はほとんど低下していなかった。この結果から、塩水噴霧試験の違いと塩水噴霧の噴霧面の違いでの P_{max} の低下をまとめるとJIS / B = IEC / F \gg JIS / F = IEC / B = Controlの順になった。この結果より、PID試験だけではPID劣化を発生しない太陽電池モジュールにおいても塩水噴霧試験を事前に実施することでPID劣化が発生することが示された。

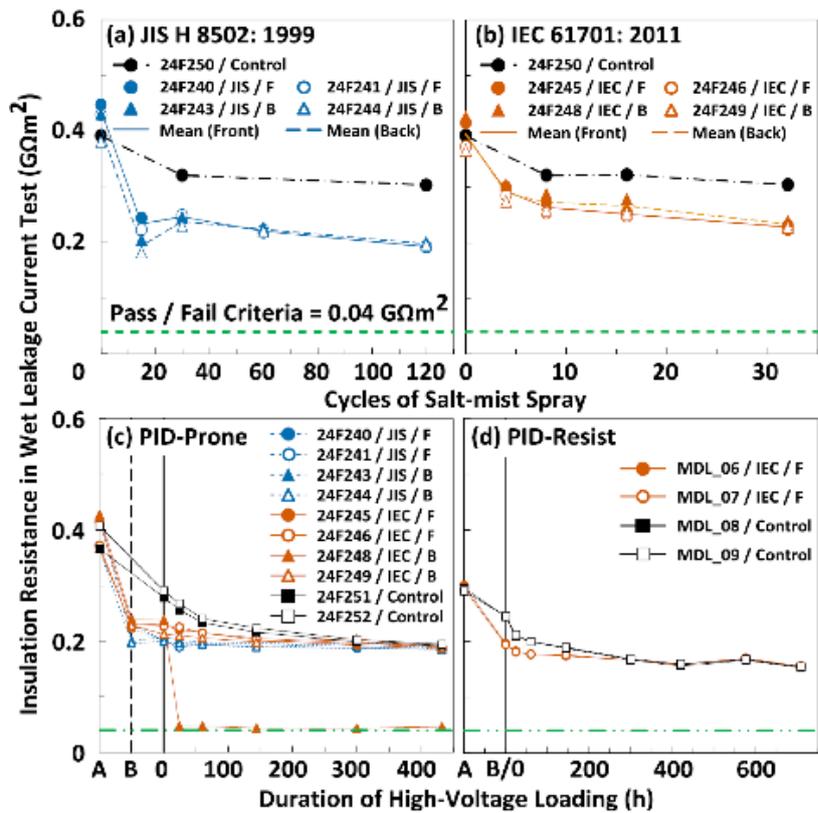


図 5.3. 絶縁抵抗試験結果 (a) JIS法, (b) IEC法, ((a), (b)の赤字はすべてPID非対策セル)
 (c) PID非対策セル (d) PID対策セル

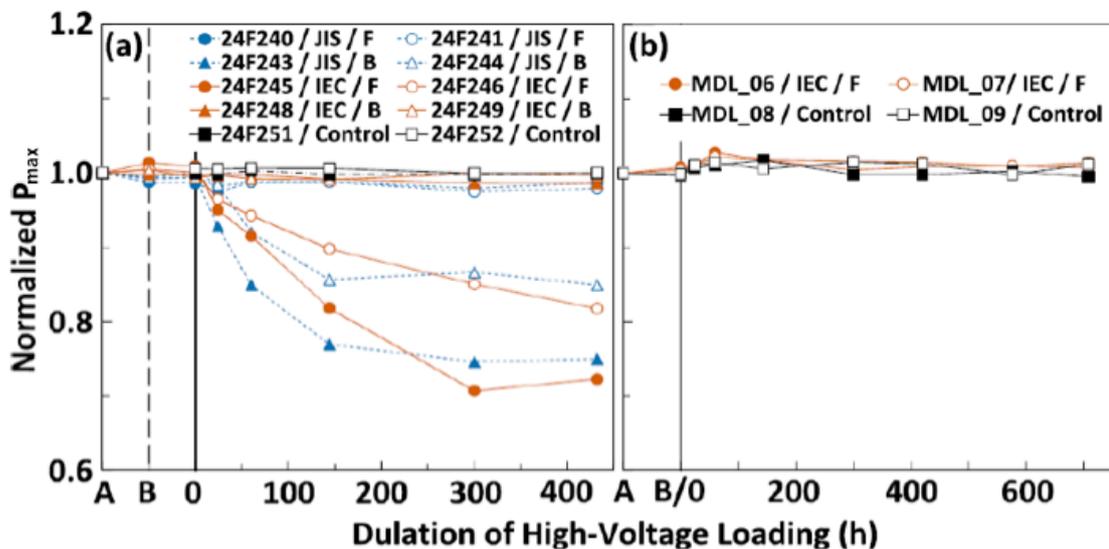


図 5.4. 塩水噴霧試験とPID試験によるP_{max}の経時変化
 (a) PID非対策セル, (b) PID対策セル

5.3.2. PID試験による電荷移動量と出力低下の関連性

PID試験では、フレームからセルに微小なリーク電流が流れる。この微小電流を精度よく測定し、微小電流による電荷移動量と出力低下の関係を明らかにすることを試みた。測定した電流値から、太陽電池モジュールの単位周辺長 (cm) あたり移動した電荷量 (C) を計算した。図5.5にPID試験における(a)電荷移動量のPID試験時間依存性と(b)電荷移動量と発電性能特性の関係を示した。(a)の横軸は試験時間であり縦軸は上記で計算した電荷移動量である。絶縁が破壊されたモジュール(IEC / B)で最大の電荷移動が確認できた。また他の太陽電池モジュールでは、高電圧の負荷時間が増えるにつれ、電荷移動量が直線的に増加していることがわかった。また、電荷移動量は塩水噴霧試験の試験方法により異なっており、IEC / F > JIS / B > JIS / F > コントロールの順に電荷移動量が多くなっていることがわかった。高電圧を負荷した後は全てのモジュールで直線的に増加していることを考えると、この電荷移動量の差は、塩水噴霧方法の違い(試験法・噴霧面)による差に起因していると考えられる。(b)に電荷移動量と P_{max} の変化の関係を示す。コントロールモジュールでは、432 時間の高電圧負荷でも、0.1 mC/cm以下の電荷移動量であり、 P_{max} もほとんど低下していなかった。IEC / Bモジュールは432 時間の高電圧負荷において、0.5 mC/cm以上の電荷移動がみられたが、 P_{max} はほとんど低下していなかった。JIS / Fモジュールでは、試験時間内に0.2 ~ 0.3 mC/cmの電荷移動がみられたが、 P_{max} の低下は2%にとどまっていた。JIS / BとIEC / Fモジュールでは電荷移動量の増加に伴い P_{max} が低下していた。これらの結果から、電荷移動量はPIDの P_{max} 低下を引き起こす必要条件ではあるが、 P_{max} の低下とは相関性が低いことがわかった。

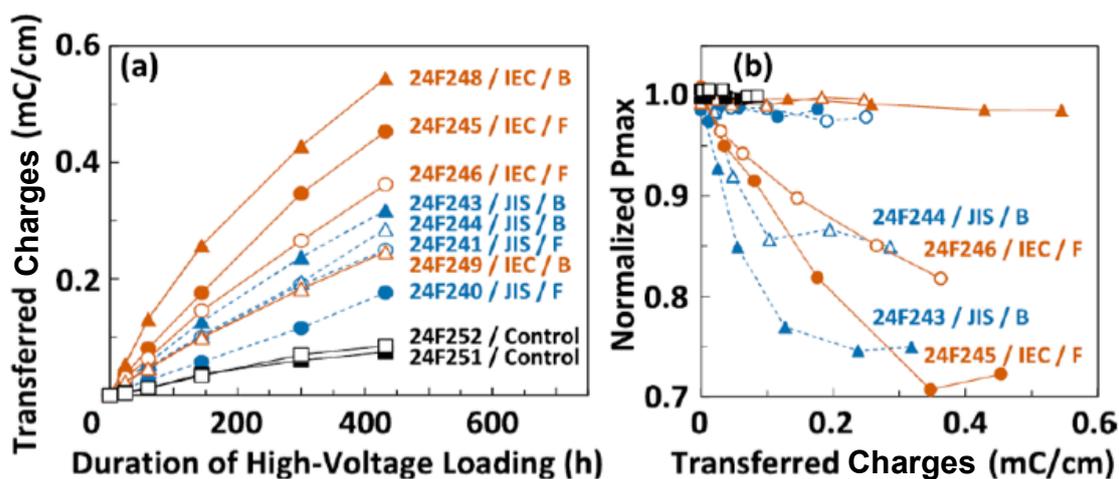


図 5.5. PID試験における(a) 電荷移動量と試験時間の関係, (b) 電荷移動量と P_{max} の関係

5.3.3 塩水噴霧・PID連続試験後の太陽電池モジュールの発電性能特性

PID試験をある一定の期間実施した太陽電池モジュールの発電性能特性を測定した。PID試験による P_{max} の低下が大きかったJIS / BとIEC / Fとコントロールモジュールを測定したI-Vカーブを図5.6に示す。どの太陽電池モジュールでも I_{sc} と V_{oc} はほとんど変化していないことがわかった。JIS / BとIEC / Fモジュールでは、高電圧負荷の時間が増大するとともに、Fill Factor(以下, FF)が69%から52~54%まで低下していた。この結果から、高電圧負荷による出力低下は、FFの低下に起因していることがわかった。Dark I-Vによる測定結果をみると、コントロールモジュールでは第3象限での電流は0Aに近い値を示しているが、JIS / BおよびIEC / Fモジュールでは、第3象限でのI-Vカーブの傾きはPID試験時間経過に伴い増大することがわかった。これらの結果から、JIS / BモジュールおよびIEC / Fモジュールでみられた高電圧負荷による発電性能特性の低下は、セル内の並列抵抗の低下すなわち、セル中のpn接合の破壊に起因するohmic状態出現が影響していることが考えられる。

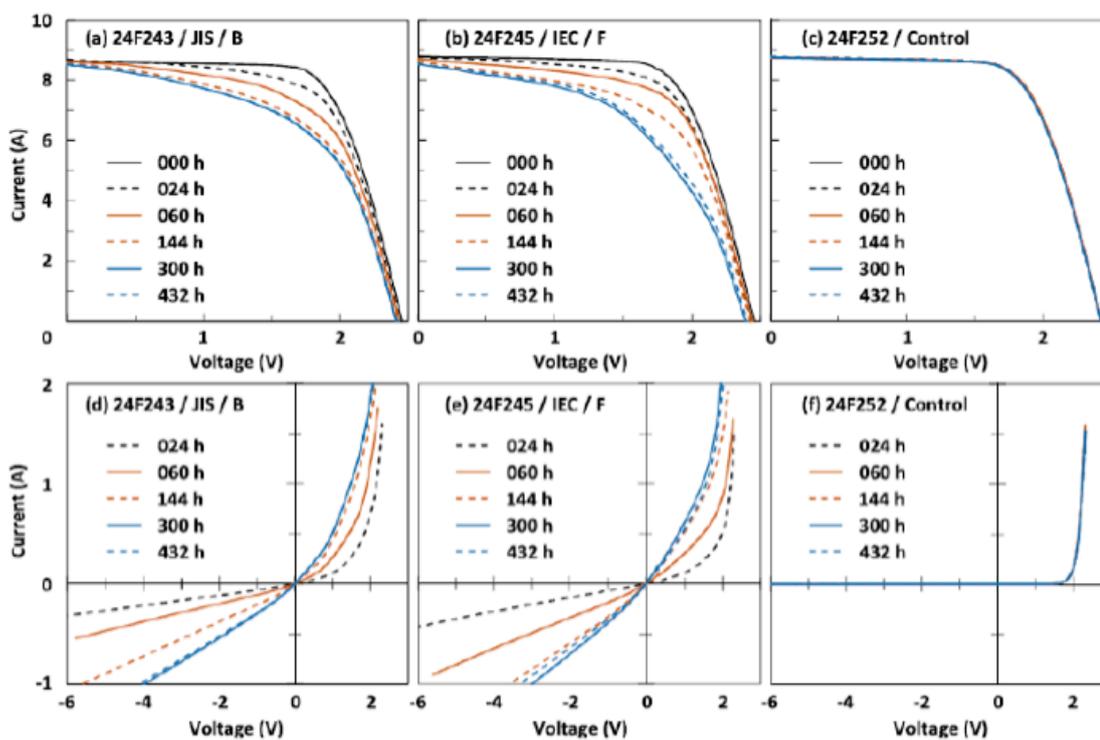


図 5.6. PID試験前後のI-V特性およびDark I-V特性

5.3.4 PID試験中のELイメージ変化

ある一定の期間PID試験後にEL像を測定した結果を図5.7に示す。JIS / F, IEC / B, コントロールモジュールでは、発電特性の変化がほとんど生じなかったが、EL像においても初期状態とほとんど変化のない結果となった。一方、PID試験により出力低下が発生したJIS / B, IEC / Fモジュールでは、高電圧負荷により、セルの端部やセル全体に暗輝度部が発生し、時間の進行とともに暗輝度部が拡大した。高電圧負荷を実施した24時間後から、バスバーに平行なセルの端部やモジュールの角部の一部に暗輝度部がみられ、これらが試験の進行とともに増大するとともに、セル全体に拡大した。

Salt-mist	Module ID	Duration of High-Voltage Loading (h)				
		0	24	60	144	300
JIS	F 24F240					
	B 24F243					
IEC	F 24F245					
	B 24F248					
Control	24F252					

図 5.7. PID試験前後のEL像

5.3.5. レーザスキャンニング法およびLIT法によるモジュール劣化観察

レーザスキャンニング法とLIT法による劣化太陽電池モジュールの観察を行った結果を図5.8に示す。レーザを照射しているセルに0.2 Vの定電圧を負荷し、セル内の R_{sh} が低下していると思われる箇所がどこに存在するかの解析を行った。印加している電圧が0.2 Vと低いいため、I-Vカーブにおけるゼロ電圧付近での電流値を画像化していることとなる。この方法において、暗輝度部として検出される箇所は R_{sh} が低下していると考えられる。コントロールモジュールでは暗輝度部は検出されなかった。一方、JIS / B, IEC / Fモジュールでは、バスバーに平行なセル端やモジュール角部に斑点状の暗輝度部が確認できた。これらの暗輝度部は、バスバーに垂直なセル端では検出されていないこともわかった。LIT法による解析は、セル特性の水平分布を検出する方法として広く用いられている⁵⁻²⁰。しかし、LIT法の太陽電池モジュールへの適用には、セルにおける熱変動がガラスや封止材で拡散され、解像度の良いLIT像を得ることが困難なことから、太陽電池モジュール中に劣化したセルが含まれる場合は、劣化セルが影響して、他のセルに等しくバイアス電圧が負荷されない場合があるなどの課題がある。この2つめの課題を回避し、多くの劣化部位を検出することを目的として、光照射条件下で太陽電池モジュールのLIT解析を行った。これは、光照射により、劣化セルの劣化していない部分からの発電電流や、他の劣化していないセルからの発電電流が、全セルにバイアス電圧を負荷することになり、可能な限り多くの劣化部位を検出できるようになることを期待したためである。また、順方向と逆方向の各バイアス電圧でLIT解析を行うことで、より多くの劣化部位の検出が可能と判断した。このLIT解析で温度上昇部位として検出される部位は、バイアス電圧により電流集中が生じて発熱した部位と考えられる。また、バスバーやフィンガーグリッド部における R_s 増大により補完的に他の R_s 健全部位や R_s 低下部位で温度上昇が観察される場合を除いて、この温度上昇はセルの R_{sh} の低下した部位を示していると考えられる。EL像で見られたセルエッジ部での暗部に対し、LIT解析においても同様の箇所で、温度上昇が見られた。また、上記レーザスキャンニング解析によって検出された R_{sh} が低下した部位の一部でも、LIT解析による温度上昇が見られた。図5.8の拡大図に示すように、セルの劣化部位を検出する際は、EL像ではセルの全体が暗くなり、劣化箇所の特定が難しい場合がある。そこで、レーザスキャンニング法やLIT法を併用することで、劣化部位の位置特定が検出し易くなることがわかった。これらの結果から、塩水噴霧試験後のPID試験による劣化は、バスバーに平行なセル端やモジュール角部での R_{sh} の低下に起因している可能性が示された。

Salt-mist		Module ID	Duration of High-Voltage Loading (432 h)			
			EL	LBIC + Bias	LIT (F-Bias)	LIT (R-Bias)
JIS	B	24F243				
IEC	F	24F245				
Control		24F252			<p>Elec. Circuit</p>	<p>LIT: Temp. Scale</p> <p>Range = 0.02 °C</p>

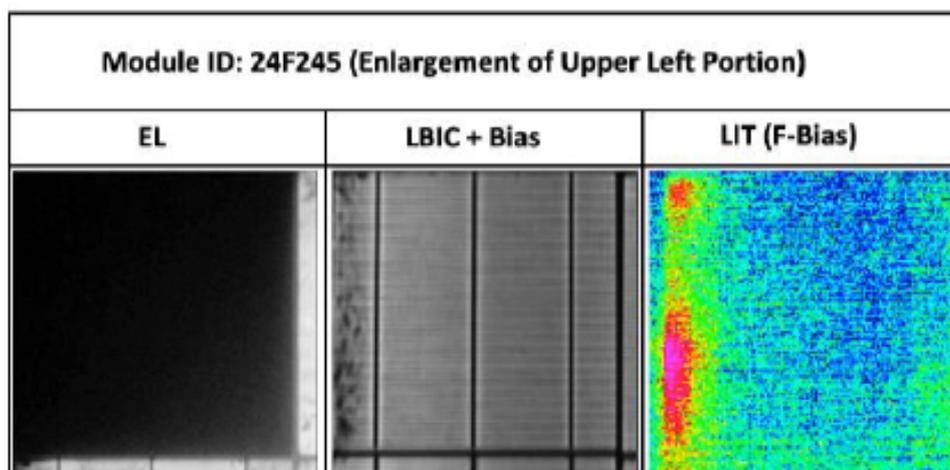


図 5.8. レーザースキャンニング法およびLITによるセル劣化部位解析

5.3.6. 発電特性パラメータ推定による出力劣化モジュールの発電性能特性

低下についての考察

塩水噴霧試験後にPID試験を実施した太陽電池モジュールの発電性能特性低下の原因を明確にするために、ソーラシミュレータで測定したI-Vデータから各太陽電池モジュールの発電特性パラメータ V_{oc} , I_{sc} , I_{ph} , I_0 , n , R_s , R_{sh} を抽出した。ソーラシミュレータによるI-Vデータ測定は各太陽電池モジュールについて5回実施し、 V_{oc} および I_{sc} については平均値を代表値とした。他の発電特性パラメータである I_{ph} , I_0 , n , R_s , R_{sh} は、各太陽電池モジュールの全測定データからZhangらの方法を改変して推定を行った。ソーラシミュレータにより算出した V_{oc} , I_{sc} からLambert W関数を用いて発電特性式の n , R_s , R_{sh} の推定を行った、その後、抽出したパラメータから I_{ph} と I_0 を算出した。その結果、出力が最も低下した太陽電池モジュールにおいても、測定したI-Vデータと推定発電特性パラメータから計算したI-Vデータの平均二乗誤差(RMSE)は0.07以内に収まっていた。これら発電特性パラメータのPID試験中の変化を図5.9および図5.10に示す。出力の変化がほとんどなかったコントロールモジュールなどでは、すべての発電特性パラメータは変化していないことがわかった。出力の低下がみられたJIS/B, IEC/Fモジュールでは、 I_0 , n , R_s , R_{sh} が変化しており、 V_{oc} , I_{sc} , I_{ph} に変化はみられなかった。この出力の低下がみられた太陽電池モジュールでは、高電圧負荷後、24時間以内に R_{sh} が1/5程度に低下していた。 R_{sh} の低下はその後も保持されたままであった。一方、 I_0 , n , R_s の大きな変動は、高電圧負荷後60~100時間後から生じており、それぞれ300時間で初期値の I_0 は 10^6 倍、 n は2.5~4倍、 R_s は10~30%になった。これらの結果から、塩水噴霧試験後にPID試験を実施した太陽電池モジュールの出力低下は、 R_{sh} の大きな低下を生じる初期フェーズと、 I_0 , n , R_s が変動する後期フェーズの2つに分割が可能であると考えられる。また、図および図示した出力低下にともなうI-Vカーブの変化は、これら発電特性パラメータの変化に依存しているものと考えられる。なお、後期フェーズで生じる R_s の低下は、上記劣化にともない特定セルの全体的抵抗が低下した結果により生じた見掛けの低下と考えられる。塩水噴霧試験後にPID試験を行った全モジュールにおける P_{max} の変化と各発電特性パラメータ I_{sc} , V_{oc} , n , R_{sh} , R_s の寄与率を図5.10に示す。茶色で示した帯は、 P_{max} 値の低下量への寄与を示し、青色で示した帯は P_{max} 値の増加量への寄与を示している。図中左下の上下2つの値は、下が P_{max} の低下率、上が P_{max} の低下率と各パラメータの合計との差を示しており、パラメータ推定におけるエラー率を示している。その差は各図中の横文字でも示されている。塩水噴霧試験後にPID試験を実施した太陽電池モジュールの出力低下に対し、 R_{sh} 低下と同様に n 増加が最も寄与していた。

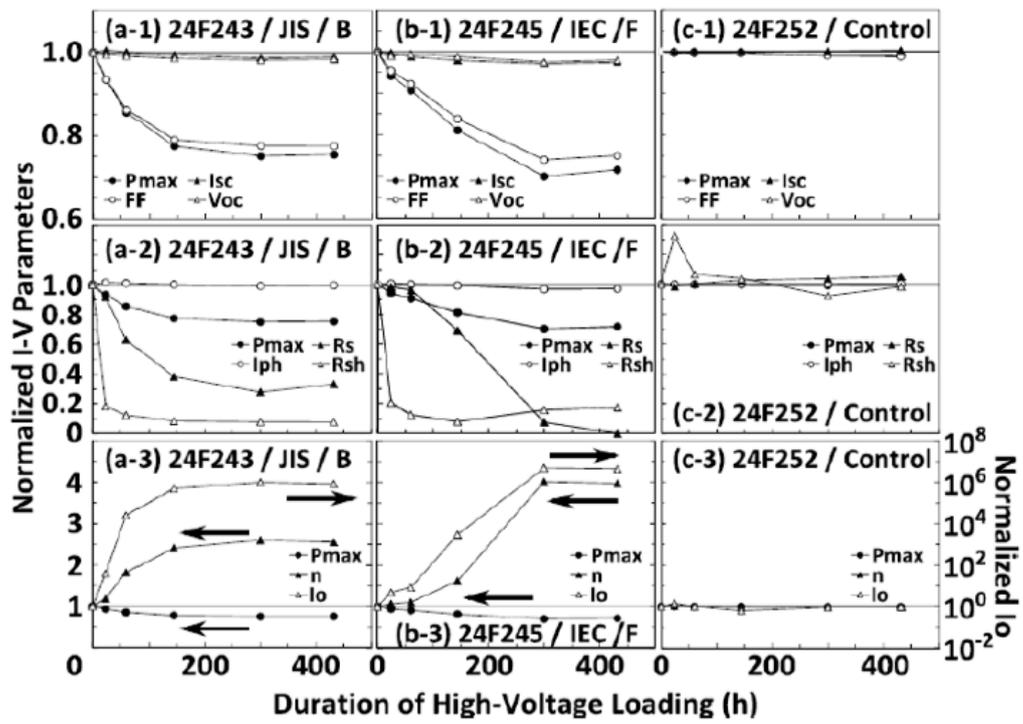


図 5.9. PID試験における各発電性能パラメータの経時変化

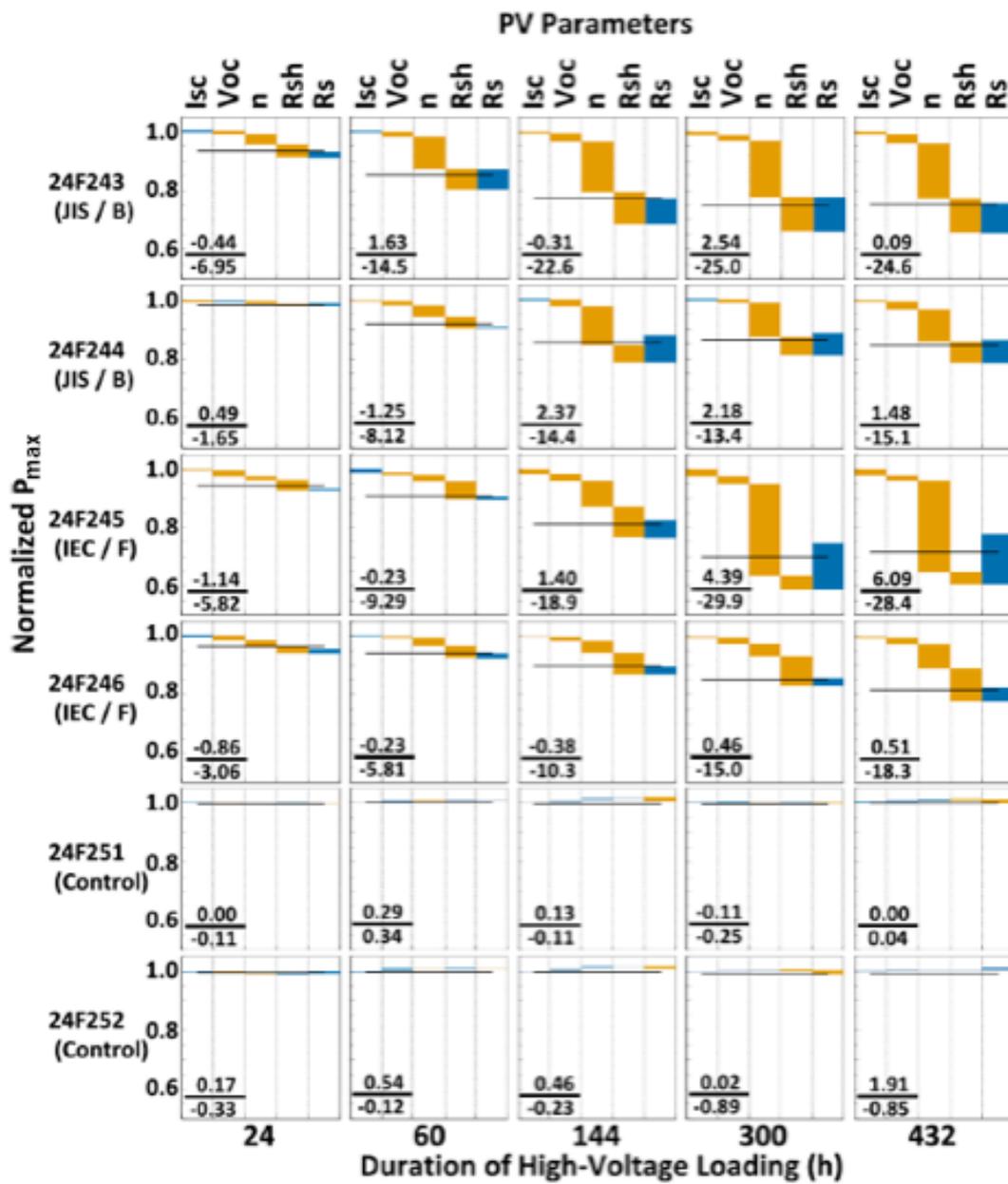


図 5.10. PIDによる P_{max} 変化に対する各パラメータの寄与率

5.3.7 PID試験後の出力低下モジュールの出力回復および再低下

PID現象を発現した太陽電池モジュールでは、出力低下後に高温処理や逆電圧処理を行うことで出力が回復することが知られている。今回実施した塩水噴霧試験後にPID試験を実施した太陽電池モジュールにおいても、図5.11および図5.12に示すように、4か月間の室温放置で出力回復が確認できた。また、この一部出力が回復した太陽電池モジュールに再度PID試験を100 時間実施したところ、出力低下が再度発現した。さらに、出力が低下した太陽電池モジュールにPID試験とは逆方向の高電圧である+1,000 Vを6時間負荷することで、出力が一部回復することが確認できた。これらの結果から、従来知られているPID現象の特徴的出力変動パターンが、塩水噴霧試験後にPID試験を実施して出力低下した太陽電池モジュールにおいても確認できたものと考えられる。

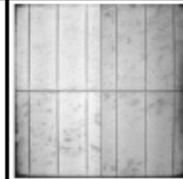
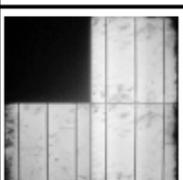
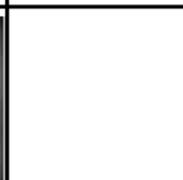
Salt-mist		Module ID	Evolution of PID			
			-1,000 V, 432 h	RT, 121 days	-1,000 V, 100 h	+1,000 V, 6 h
JIS	B	24F243				
		24F245				
IEC	F	24F246				

図5.11. PID試験後の回復,再劣化,再回復時のEL像

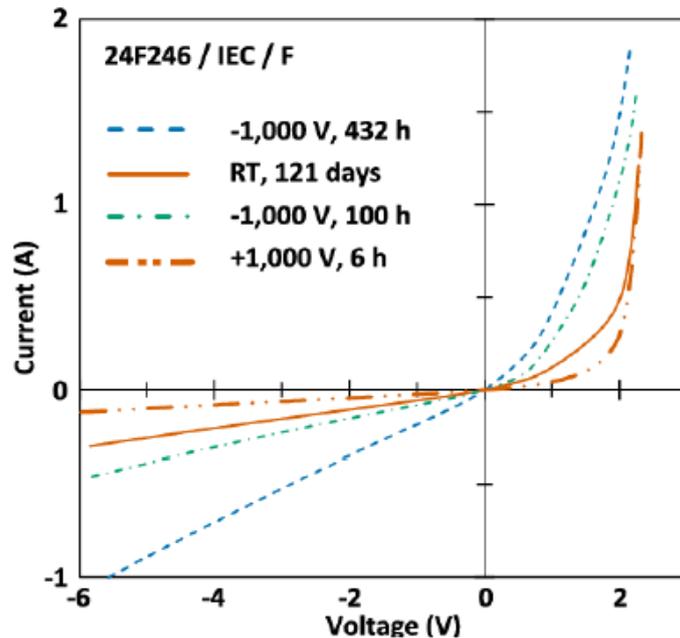


図5.12. PID試験後のDark I-V特性

5.2.8. 原子吸光法によるNa+分布解析

BS側からNaが侵入したかどうかを検討するために封止材であるEVAにNaがどの程度含まれているかを原子吸光法により調べた結果を図5.13に示す。分析箇所は図の茶色の部分で、ガラス側とBS側のEVA中に含まれるNaの量を調べた結果を図5.13に示す。この結果より、初期のモジュール24F250ではガラス側、BS側のどちらもほぼ同じ量のNaが存在していることがわかった。塩水噴霧試験だけを実施したモジュール24F242では、ガラス側のセル端部でNaが増加していた。塩水噴霧試験を実施せず、PID試験のみを実施したモジュール24F251ではガラス側でNaがわずかに多い結果であった。塩水噴霧試験後、PID試験を実施したモジュール24F243及び24F245では、BS側は他の試験同様、初期と比較してわずかに増加していたが、ガラス側では測定した箇所全てでNaが大幅に増加していた。塩水噴霧試験だけを実施したモジュール24F242と塩水噴霧試験後、PID試験を実施したモジュール24F245を比較すると、塩水噴霧試験だけよりもPID試験を実施したモジュールのガラス側でNaが増加していることがわかる。この結果から、塩水噴霧試験により噴霧されたNaがBS側からモジュール内部に侵入している可能性および塩水噴霧試験だけでなくPID試験中にさらにNa量が増加する可能性が示唆された。

Salt-mist Test		HV	ID	Area	Na ($\mu\text{g/g EVA}$)			
Test	Side				Front		Back	
-	-	-	24F250		6	7	5	6
IEC	F	-	24F242		50	12	7	7
-	-	+	24F251		12	11	6	6
JIS	B	+	24F243		37	35	7	12
IEC	F	+	24F245		96	83	11	9
					89		11	

図5.13. 原子吸光法により求めたEVA内のNa分布

5.4 考察

今回実施した検討により、2種類の塩水噴霧試験をした後にPID試験を行うことにより、太陽電池モジュールに大きな出力低下が生じることを示した。また、この出力低下の特徴は、これまで報告されているPIDによる出力低下の特性と類似していた。これらの結果から、塩水噴霧試験による前処理はPIDの発生を加速しているものと考えられる。塩水噴霧試験については、噴霧された塩水の量の効果と塩水噴霧直後の保持環境の効果を確認するために、2種類の塩水噴霧試験を実施した。加えて、霧状の塩水が噴霧される太陽電池モジュール面をフロントガラス側とBS側に変えて実験を行った。上記したように、IEC / Bモジュールでは、高電圧ストレス負荷後に極めて短時間で絶縁不良が発生した。これは、塩水噴霧ストレス期間中にフレームセル間に導通ルートが形成されたのち、PID試験中の高温高湿環境と高電圧負荷が影響して、この導通ルートが固定化されたためと考えられる。なお、この導通ルート固定化により、PID試験中のリーク電流が他の太陽電池モジュールに比して大きくなるとともに、この導通ルートをリーク電流が主に流れるために出力低下が生じなかったものと推定される。絶縁不良を起こしていない他の太陽電池モジュールの出力低下の傾

向は、出力低下が大きい順に「JIS / B = IEC / F >> JIS / F」となった。上記のIEC / Bモジュールにおける高電圧ストレス負荷後すぐの絶縁不良も塩水噴霧前処理と高電圧ストレス負荷の影響と考えられるため、この塩水噴霧・PID連続試験における劣化の大きさは、大きい順に以下のようにまとめられる。

$$\text{IEC / B} > \text{JIS / B} \geq \text{IEC / F} > \text{JIS / F}$$

JIS法では、塩水噴霧の密度が最大30 g/100 cm²であり、総噴霧時間を240 時間とすると総塩水噴霧量は7200g/cm²となる。IEC法では、塩水噴霧の密度が最大8 g/100 cm²であり、総噴霧時間を64時間とした場合、総塩水噴霧量は512 g/100 cm²となる。このためJIS法はIEC法に比べて、総塩水噴霧量が約14倍となる。JIS法では、塩水噴霧工程後は乾燥保持工程に移るが、IEC法では湿潤保持工程に移る。この塩水噴霧量・塩水噴霧後工程の異なる2種類の塩水噴霧ストレス負荷の違いから、総塩水噴霧量は劣化の程度とは直接関係なく、塩水噴霧工程後に湿潤保持工程を行う方法で、より劣化が大きいことが示唆される。また、霧状の塩水を噴霧する太陽電池モジュール面については、BS側に塩水が噴霧された方が、フロントガラス側に噴霧された場合より、大きな劣化を引き起こしたものと考えられる。フロントガラス側に噴霧した場合でも、霧状の塩水の廻り込みにより、BS側にも一定量の塩水が噴霧されることが十分に想定できるため、フロントガラス側噴霧においても太陽電池モジュールの劣化が誘発されたものと考えられる。これらの結果から、塩水噴霧ストレスによるPID加速は、塩水噴霧後の湿潤保持およびBS側に噴霧された塩分量に依存していることが示唆される。

これまでに、PIDを引き起こす重要な因子としてナトリウムイオンが指摘されている。p型セルを用いた太陽電池モジュールにおいて、高温高湿環境中でセルがフレームに対して高電圧となる場合、フロントガラスから遊離したナトリウムイオンがセル表面に移行し、セル表面の反射防止膜に集積することが報告されている⁵⁻¹⁰。この集積ナトリウムイオンが、セルのバンド構造に影響する結果としてPIDが発生するという仮説と、シリコン結晶に存在する積層欠陥を通してセル内にナトリウムイオンが侵入しpn接合を破壊することでPIDが発生するという仮説が、現在提案されている。本検討の場合は、コントロールモジュールにおいて高電圧ストレス負荷のみでは出力低下を誘発しなかった点から、フロントガラスから遊離したナトリウムイオンはPIDを引き起こすには十分でないことが推定される。本検討の結果を説明する考え方として、外来ナトリウムイオンが、フレームとガラス・封止材・セル・封止材・BSの積層体の間隙を通るか、あるいはエッジシール部のシール材中を拡散してセル表面に到達した可能性が考えられる。このような経路でナトリウムイオンが侵入した場合には、総塩水噴霧量および塩水噴霧時間はIEC法よりもJIS法で大きいため、劣化レベルは「JIS > IEC」の順と予想されるが、今回の結果では、「IEC > JIS」であるため、エッジシール部を通過して外部のナトリウムイオンが侵入するルートは考えにくくなる。よって、外部のナトリウムイオンがBSを通り、封止材中に拡散する経路が考えられる。原子吸光法によるNaの定量化により、塩水噴霧試験を実施したモジュールの封止材中のNaの量

が、塩水噴霧を実施していないモジュールよりも多いことが示され、外部のナトリウムイオンがBSを通過したことを明らかにした。ナトリウムイオンがBSを通過するメカニズムを考察する。IEC法における、BS上の大量のナトリウムイオンは、湿潤保持工程で長期間に渡り高湿状態に曝されている。高湿状態におけるポリマ材料の非晶部分に存在する分子間隙は、水蒸気やガス・小型イオンが透過するのに十分なサイズである⁵⁻²¹⁾。分子間隙のようなナノレベルの細孔においては、飽和水蒸気圧が外部より低下しており、浸透した水蒸気は凝縮して水となり、細孔内を満たすことができる⁵⁻²²⁾。BS表面に噴霧された塩水は、水に溶解イオン化しており、塩水噴霧工程中および湿潤保持工程中にBS中の分子間隙に形成された水の中に移動することが出来る。BSを透過するナトリウムイオン移動に関する推定は、本検討結果である劣化順序 (IEC > JIS) とよく適合しており、セル上の封止材中にも外来ナトリウムイオンが浸透した結果として、従来から報告されているPID現象が、本検討でも観察されたものと考えられる。

塩水噴霧ストレス負荷後に高電圧ストレスを負荷したモジュール (JIS/B・IEC/F) では、 R_{sh} 低下部位がモジュール端部で確認できた。同様な現象は、Hackeらにより高電圧ストレス負荷状態で屋外曝露した太陽電池モジュールにおいても報告されている⁵⁻⁷⁾。この報告では、屋外曝露した太陽電池モジュールのサーモグラフィー解析を行い、モジュール端部で R_{sh} 低下が進行している可能性を示した。この R_{sh} 低下が推定される位置は、本検討で示したレーザスキャン解析やLIT解析の結果と類似しているため、このようなモジュール端部での R_{sh} 低下は、塩水噴霧ストレスによるPID加速に限られた特徴ではないものと考えられる。この原因は次のように考えられる。横タブ線は高電圧ストレス負荷の際のマイナス電極端となり、フレームとの間でリーク電流が発生していると考えられるが、バスバーに水平なセル端ではセルが直接マイナス電極端となり、このセル端付近にリーク電流が集中するためと推定される。この推定は、モジュール角部では、横タブ線がフレームとの間に挿入されていないために、 R_{sh} 低下部位となっている実験結果と一致する。

JIS/B・IEC/Fモジュールでは0.063 mC/cmで5%以上の出力低下を示しているが、コントロールモジュールを含む他の太陽電池モジュールではほとんど出力低下を示していない。このことから、塩水噴霧ストレス後のPID試験で生じる出力低下は、PID試験中の電荷移動量と相関していないことがわかった。一定の電荷移動量がPIDを引き起こすためには必要ではあるが、PIDによる劣化レベルと電荷移動量には相関が低いと考えられる。本検討では、発電特性パラメータを光照射下で得たI-Vデータから推定した。明条件下と暗条件下で取得したI-Vカーブから、PID現象が進行するのにもない、太陽電池モジュールの電気特性はohmic化することを示した。また、このohmic化は、発電特性パラメータのうち、 $R_{sh} \cdot I_o \cdot n$ の変化と符合することが確認できた。PID現象の進行にともなう R_s の減少も観察されたが、これは特定セル中のpn接合がほとんど破壊されたことにより、この特定セルに流れる電流が増加したため、見掛けの R_s 低下が生じたものと考えている。なお、PID試験の後期フェーズでは、極端なpn接合破壊部位が生じるとともに、 R_s 低下と $I_o \cdot n$ の極めて大きな増大が同時に生じ

ていた。上記したRs低下が見掛けの低下であるか否かは、出力劣化モジュールの各々のセルの発電特性から、今後確認しないとイケない。

近年、沿岸域にも大規模太陽光発電システムの建設が進んでいる。これらの施設で使用される太陽電池モジュールには、塩害を防止するための措置が執られている。本検討で示したように、もし太陽電池モジュール外のナトリウムイオンがBSを透過してPIDを誘導するならば、これら太陽電池モジュールには、その長期信頼性を確実にするために、新しい対策を施す必要がある。たとえば、海岸から20 mあるいは900 mでの飛来塩分量は、それぞれ数十～数mdd (mg salt/dm²/day) と報告されている^{5-23, 24)}。また、この飛来塩分量は海岸からの距離にしたがい減少し、海岸直ぐ近くでは40 mdd以上、海岸から1 kmで約10 mdd、2 kmで約5 mdd、4 kmで約2.5 mddの飛来塩分量が提示されている⁵⁻²⁵⁾。本検討において大きな出力劣化を引き起こしたIEC法で噴霧された総噴霧塩分量は4,000～8,000 md (mg salt/dm²) であり、単純にこの噴霧塩分量をもとに計算すると、海岸から1 km地点で1～2年、2 km地点で2～4年、4 km地点で4～9年で、この総噴霧塩分量に達する。もちろん、この推定は単純計算の結果であり、実際の耐久性を示している訳では無い。しかし、この概算から、海岸付近に設置された太陽電池モジュール内への塩分浸透が大きな脅威になる可能性も示される。

5.5 結言

沿岸域に設置される大規模太陽光発電システムにおける、太陽電池モジュールの長期信頼性試験方法として、塩水噴霧雰囲気による長期間で生じる影響と、高電圧による比較的短期間で劣化を引き起こす影響を組み合わせることで、長期要因による劣化が短期要因による劣化を加速する可能性を検討した。これは、太陽電池モジュールの導入初期においては、太陽電池モジュールを構成する部材などが設計性能を保持しているために短期要因による劣化を防止できた場合でも、長期間の稼働により部材性能などが低下することで、短期要因による劣化を防ぐことが困難になる現象を想定している。今回実施した塩水噴霧の影響と高電圧の影響を考慮すると、初期設置状態では、高電圧によるPIDは発生しないが、長期間の塩水噴霧雰囲気に曝され外来ナトリウムイオンが太陽電池モジュール内に十分蓄積した場合には、高電圧ストレスに対する耐性が低下して、PID現象が発生する可能性を示したと考えられる。この検討で以下の知見を得た。

1. PID試験で出力低下を示さない太陽電池モジュールにおいても、塩水噴霧・PID連続試験により大幅な出力低下が生じることを示した。
2. 出力低下が生じた太陽電池モジュールの特性解析から、この出力低下はPIDと極めて類似した特性を持つため、塩水噴霧処理によりPIDが加速されるものと結論した。
3. 塩水噴霧で加速されるPID現象は、塩水噴霧時の湿潤状態での保存とモジュール裏面に噴霧された塩水量に依存すると考えられる。

4. BSを透過して封止材中に拡散したナトリウムイオンも、ガラスから遊離したナトリウムイオンと同様に、PIDを誘発する重要な因子であることが示された。セル・ガラス間の封止材中に拡散したナトリウムイオンがセル表面に移行しPIDを引き起こす過程が想定される。
5. 誘起されたPID現象において、セルのバスバー平行側のモジュール側面で R_{sh} 低下傾向が大きいことから、セルのバスバー垂直側のモジュール側面は、横タブ線により高印加電圧から隔離されている可能性が示された。
6. PID現象において、高電圧によるリーク電流は「必要条件」ではあるが「十分条件」ではないことが示唆された。
7. PID現象の進行にともなうモジュール電気特性のオーミック化が観察され、これは、モジュールの $R_{sh} \cdot I_o \cdot n$ の変化に依存していた。
8. PID現象の進行にともないモジュールの R_s の低下が確認されたが、これは特定のセルにおいて導電性が上昇した結果として、見掛けの R_s 低下が生じた結果と考えられる。
9. PID現象の進行は、1)初期の R_{sh} 低下、2)引き続きおこる I_o 変化・ n 変化の2フェーズに分割される可能性が示された。
10. PID現象における出力低下は n 変化および R_s 変化、 R_{sh} 低下と相関を示していた。
11. 沿岸域に設置された太陽電池モジュールでのBSを介した塩分浸透は、PIDによる出力低下を引き起こす可能性がある。

今回実施した多結晶Si太陽電池4セルミニモジュールにおいて塩水噴霧試験を前処理とすることでPID現象が発生する可能性と、外来由来のナトリウムイオンがBSから侵入することでPID現象を引き起こす可能性を示した。ここで得られた知見により、沿岸域に設置される大規模太陽光発電システムの長期信頼性を考慮した、塩水噴霧試験とPID試験の組合せ試験は近い将来に起こりえる市場不具合を想定した加速試験方法の一つの事例として示すことが出来た。

第6章 結論

太陽光発電を取り巻く環境はめまぐるしく変化しており、発電効率の高効率化に加えて、発電コストをトータルで下げる方法として、また発電事業として安定した稼働を続けるためにも太陽電池モジュールの長期信頼性は重要である。一方で、長期信頼性を評価する技術は確立されておらず、屋外に長期間曝露されている太陽電池モジュールの観察や解析、TTFPによる延長試験や組合せ試験により劣化の促進や劣化メカニズムの解明が進められているなど様々な取り組みが行われている。太陽電池モジュールの規格試験はモジュールの初期故障を検出するスクリーニング試験の意味合いが強い。また各試験におけるモジュールの劣化メカニズムが明らかになっていない場合もあり、モジュールで劣化を再現するために、試験時間が長期化するという課題がある。そこで、本研究では、各試験での劣化メカニズムを明確にするとともに、劣化メカニズムに立脚した加速試験方法を確立することで試験時間の短縮を目的とした。さらに、太陽電池モジュールの信頼性評価試験では、試験の途中で試験を中断し、室温の状態ですべての太陽電池モジュールの特性評価を実施している。このため、試験のどの時点で劣化が進行しているか、温度依存性があるかなどは、正確にはわかっていない。この課題を解決するために、試験中の劣化の進行の兆候や温度依存性を明らかにすることを目的とし、交流インピーダンス法による *in situ* 計測の検討を行った。これまで述べた成果を表 6.1 と図 6.1 にまとめ、今後の課題と展望について述べる。

第 2 章では、DH 試験の劣化メカニズムを解明するとともに、Air-HAST 試験を用いた劣化メカニズムに立脚した加速試験方法の確立について検討を行った結果について述べた。また、イオンクロマトグラフィーや SEM, EPMA による詳細な分析を実施した。その結果、今回用いた多結晶 Si 太陽電池の 1 セルミニモジュールにおいて、DH 試験と Air-HAST 試験後の残留酢酸イオン量の経時変化の相関性が高いことが示され、Air-HAST 試験が DH 試験の劣化要因である酢酸イオンの発生を加速することで、DH 試験の発電性能劣化や EL 像、外観との相関性が高いことが示された。また試験後の断面観察の結果から、DH 試験の劣化メカニズムとして、発生した酢酸イオンが Ag フィンガー電極内の Pb を腐食し、Ag フィンガー電極と Si 界面の接合強度が低下することで、Ag フィンガー電極と Si 界面の剥離による集電効率の低下が発電性能劣化を引き起こすことを明らかにした。これらのことより、今回用いた多結晶 Si 太陽電池 1 セルミニモジュールにおいて、Air-HAST 試験は、DH 試験の劣化モードとの相関性を維持しながら、試験時間を 5 倍短縮できた。一方で DH 試験試験や Air-HAST 試験による劣化と市場で発生している不具合との相関性の検討や、部材や構成を変えた太陽電池モジュールでの検討が未実施であることが課題である。さらにフルサイズモジュールでの Air-HAST 試験の効果の検証を行うには大型の HAST 装置が必要であるなどの、Air-HAST 装置の普及も課題である。DH 試験の加速試験法としての Air-HAST 試験の認知度の向上と、様々な試験事例の積み上げが必要である。

第 3 章では、TC の加速試験方法の確立を目的として、RTC の条件選定と交流インピーダ

ンス法による連続測定を行った結果について述べた。今回実施した多結晶 Si 太陽電池 3 セルミニモジュールでは、フィンガー電極の破断とはんだ接合部の劣化が見られたが、発生する時間が異なることがわかった。フィンガー電極の破断は、バスバーとフィンガー電極との交点で発生しており、TC では 300 cycles、RTC では 500 cycles までに発生していた。それ以降のサイクルでは、フィンガー電極の破断は進行し難かった。これはバスバーとフィンガー電極との交点に発生した応力によりフィンガー電極の破断が発生したが、応力緩和後はフィンガー電極の破断はほとんど進まなかった。また、 ΔP_{\max} は 300 cycles までは 5% ほど低下するが、応力が緩和されて以降は、 ΔP_{\max} の低下は緩やかに進行したことと一致する結果であった。TC では、はんだ接合部の劣化は 1,800 cycles でも見られなかった。一方 RTC では、はんだ接合部の劣化には 1,000 cycles 程度が必要であることがわかった。また、今回 4 セルモジュールで実施した RTC では、劣化の兆候が現れるまで概ね 3,000 cycles が必要であることがわかった。また、交流インピーダンス法による *in situ* 計測により、試験中の劣化の兆候を捉えることや劣化の温度依存性を明らかにできた。これらの結果から、RTC は TC と相関性を維持しながら、試験時間を 2~5 倍程度加速できることを示した。池田らによる調査では、10 年運用したメガソーラの一部で、インターコネクタの接続不良と考えられる不具合が報告されている⁶⁻¹⁾。これらの市場で見られる不具合と、今回の TC や RTC で発生した劣化モードの相関性は明らかになっていないため、TC や RTC と市場不具合との相関性の検討が課題である。さらに RTC でのフルサイズモジュールを検討する場合には大型の装置開発が必要であるなどの課題がある。

第 4 章では、太陽電池モジュールへの物理的な荷重負荷による劣化メカニズムを解明することを目的に、**Bending Cyclic Load** 試験機を新たに開発し、モジュール面にかかる荷重負荷の基礎的なデータ取得と数値シミュレーションを用いて劣化メカニズムを検討した結果について述べた。その結果、今回実施した多結晶 Si 太陽電池 3 セルミニモジュールで、**BCL** 試験で再現できる物理的な荷重負荷による劣化モードは、セル全面に影響が及ぶセルクラックと、インターコネクタの破断に大別でき、それらの劣化は温度と荷重面に依存していることを明らかにした。また、数値シミュレーションによる劣化メカニズムの検討により、EVA の粘弾性と劣化の関係性を明らかにした。これらの結果から、**BCL** は TC とは劣化モードや劣化メカニズムが異なることが示された。**BCL** 試験をインターコネクタの耐性評価試験として活用することを試みた。セルの配置間隔を変更した太陽電池モジュールにおけるインターコネクタ破断の影響を調査したところ、今回のモジュールでは 2 mm 以上のセル間隔が望ましいことがわかった。構成部材を変更した場合や、モジュール設計や作製工程を変更した場合などに物理荷重の耐性評価試験としての活用が期待できることがわかった。一方で、物理的な荷重負荷は、モジュールの大きさやモジュールのどの場所に荷重が負荷されているかにより、発生する応力に差があるため、フルサイズモジュールでの検討が必要である。フルサイズモジュールでの温度依存性を考慮した荷重負荷試験法の開発が望まれる。

第5章では、沿岸域に設置される大規模太陽光発電システムの長期信頼性で懸念される塩害の影響とPIDの関係性の検討を行った結果について述べた。塩水噴霧試験による前処理を実施した後にPID試験を連続で実施することで、PID現象を再現することができた。また、原子吸光法によりNa⁺がBSを透過する可能性を示し、外的要因によるPID現象の可能性を示唆した。沿岸域では、塩水噴霧環境によるセル腐食による太陽電池モジュールの出力低下の報告⁵⁻¹⁾がある。PID現象についても様々な知見が報告されている一方で、大規模太陽光発電システムの長期運用に対するPID評価は始まったばかりである。特に、実際の沿岸域での設置環境で起こりえる塩水噴霧の影響を加味したPID耐性評価は今後重要になってくると考えられる。日本より先にFITを始め、大規模太陽光発電システムの導入が進んでいるスペインの沿岸地域やドイツ、イタリアの多雨地域などでPID現象が確認されている。日本は高温高湿の環境に加え、大規模太陽光発電システムを沿岸域でも建設しているため、PID対策が施されたシステムを導入したとしても、長期運用におけるPID現象の発生リスクを考えておく必要がある。本研究では規格試験の加速試験法としては一定の成果を果たすことができたが、市場で起こる劣化や不具合は、様々な要因が重なり発生しているため、市場不具合の調査と照らし合わせながら、最適な試験の組合せ方法を検討していく必要があると考える。

本研究の成果が太陽電池モジュールの信頼性評価試験として活用され、長期信頼性の確保による太陽光発電の発展に向けた一助となることを期待したい。

表 6.1. 各試験における劣化メカニズムと加速試験方法

信頼性試験	発電性能劣化メカニズム		加速試験法
	従来	新しい知見	
DH	水分浸入によりEVAから酢酸が発生 酢酸によりAg電極が腐食	酢酸イオンによりPbが腐食 Agフィンガー電極接合界面強度の低下 剥離による集電効果の低下	Air-HAST 5倍 (酢酸イオン発生を加速)
TC	熱疲労によるはんだ接合部のクラック 500 cyclesの提案	薄型太陽電池モジュールでRTC 3,000 cycles程度ではんだ疲労の兆候	RTC 2~5倍 (はんだの熱疲労を加速)
DML	インターコネクタ破断 耐久試験	モジュール面の圧縮・引張り応力によるセルクラック・インターコネクタ破断 温度 + 荷重負荷面の依存性あり	Bending Cyclic Load (耐性評価試験)
PID	白板ガラス内のNa ⁺ が原因	外的要因であるNa ⁺ がBS側から侵入しPID発生に影響 沿岸域での大規模太陽光発電における長期運用でのPID耐性	塩水噴霧試験+PID
計測	ソーラーシミュレータ EL IR	周波数特性を考慮した試験中の連続測定 温度依存性による劣化を検出	交流インピーダンス法 +マルチチャンネル In situ計測

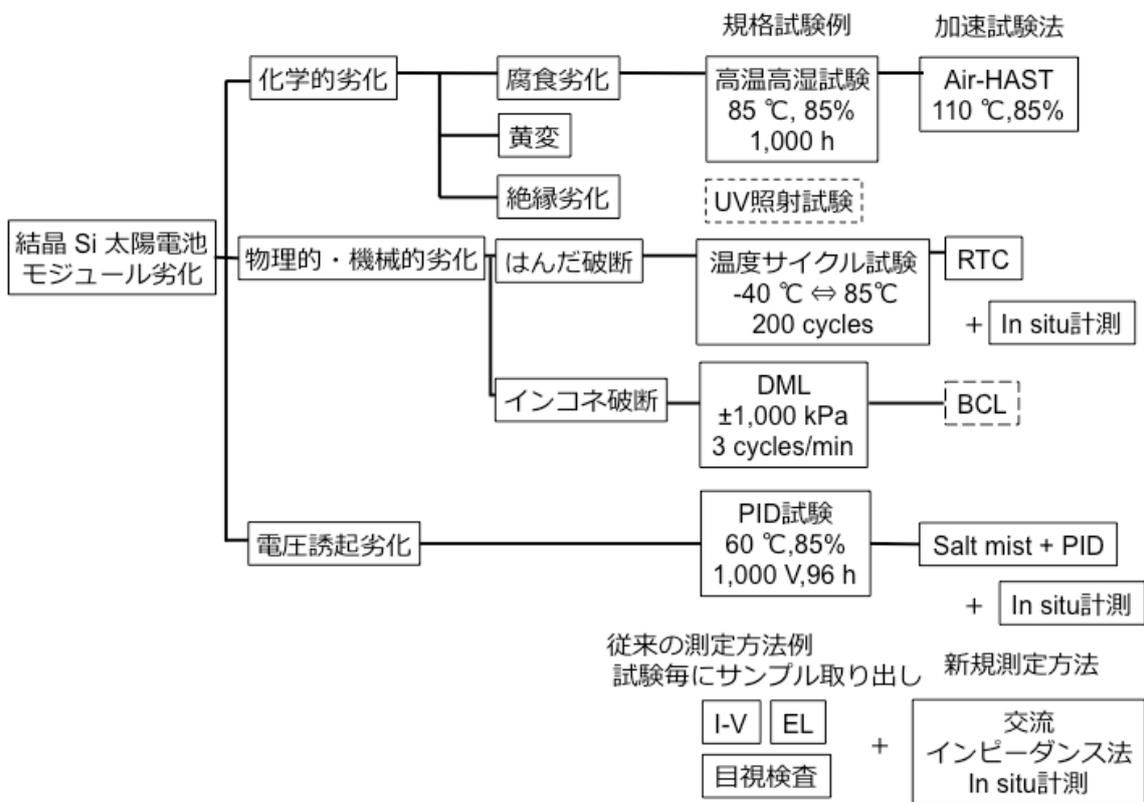


図 6.1 規格試験、従来の測定方法と加速試験、新規測定方法の対応

謝辞

本論文は筆者がエスペック株式会社テストコンサルティング本部において、独立行政法人(現、国立研究開発法人) 産業技術総合研究所 太陽光発電研究センターとの共同研究によって行った、「第Ⅱ期高信頼性太陽電池モジュール開発・評価コンソーシアム」(平成 23 年度～平成 25 年度)および、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 「太陽エネルギー技術開発/ 太陽光発電システム次世代高性能技術の開発」(平成 22 年度～平成 26 年度)での成果の一部をまとめたものです。本研究を遂行し本論文を執筆するにあたり、関係各位のご助力・ご指導をいただきました。ここに感謝の意を表します。

筑波大学大学院システム情報工学研究科構造エネルギー工学専攻石田政義教授には、論文執筆において、本論文の論点や全体構成に関して有益かつ的確なご指導とご助言を賜りました。ここに深謝申し上げます。筑波大学システム情報系リスク工学専攻岡島敬一准教授、構造エネルギー工学域 藤野貴康准教授、花田信子助教からも本論文に関しての様々な有益なご助言を賜りました。エネルギー変換研究室の皆様には様々な形でご協力いただきました。ここに感謝の意を表します。

国立研究開発法人 産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター 副研究センター長 増田淳氏には、共同研究を通して、研究当初から、最終の論文執筆に至るまで、様々なご指導、ご鞭撻を賜りました。産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター モジュール信頼性チーム 棚橋 紀悟氏には、研究計画段階からご助言ご指導頂き、成果をまとめる際に多大なるご協力を賜りました。ここに深謝申し上げます。産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター 評価・標準チーム 土井 卓也氏、池田 一昭氏をはじめとする産総研の方々には、出向中には大変お世話になりました。皆様との一緒に研究、ご議論をさせて頂く中で研究を前進させることが出来ました。ありがとうございました。

第 5 章の研究を進めるにあたり、JFE テクノリサーチ株式会社 西山 直樹氏・宇城 工氏、株式会社エヌ・ピー・シー 吉野 征治氏・渡部 信氏、産業技術総合研究所 再生可能エネルギー研究センター 白澤 勝彦氏に多大なるご協力を賜りました。各位のご協力に深謝申し上げます。

エスペック株式会社 テストコンサルティング本部 浜野 寿之氏、高橋 邦明氏、青木 雄一氏、戸井 恵子氏には、外部での研究の機会を与えて頂き、様々な面でサポートをして頂きました。また、テストコンサルティング本部の皆様には、研究・開発の面で様々なご協力を賜りました。心より感謝申し上げます。

社会人でありながら、大学院へ行くことへの理解と惜しみない協力を頂いた鈴木、伊藤の両親に深謝申し上げます。

最後に、わがままにも関わらず、全力で応援してくれた妻のあずみと、遊びたいのを我慢して執筆に集中させてくれた息子の尋、皓に感謝するとともに、昨年急逝してしまい、孝行が十分に果たせなかった、祖母の故川見 清子氏に本論文を捧げます。

参考文献

- 1-1) 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 新エネルギー技術開発部, 「2030年に向けた太陽光発電ロードマップ (PV2030)」, 2004.
- 1-2) 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 新エネルギー技術開発部, 「太陽光発電ロードマップ (PV2030+)」 概要版, 2009.
- 1-3) 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 「太陽光発電開発戦略 (NEDO PV Challenges)」, 2014.
- 1-4) 経済産業省 資源エネルギー庁 H.P., 「なっとく!再生可能エネルギー, 太陽光発電」 (http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/renewable/solar/) 2017,2,14
- 1-5) 経済産業省 資源エネルギー庁, 「FIT 制度見直しの検討状況の報告」, 2015.
- 1-6) 鈴木 聡, 棚橋 紀悟, 土井 卓也, 増田 淳, 「結晶 Si 太陽電池モジュールにおける高温高湿試験の加速方法の検討」, エレクトロニクス実装学会誌, 第 18 巻, 第 4 号, 2015 年 7 月, pp. 226-234.
- 1-7) IEC 61215:2005, "Crystalline silicon terrestrial photovoltaic (PV) modules – Design qualification and type approval", International Electro Technical Commission, Geneva, Switzerland, 2005 / JIS C8990 (2009), "地上設置の結晶シリコン太陽電池(PV)モジュール設計適格性確認及び形式認証のための要求事項", 2009.
- 1-8) C. R. Osterwald, "Terrestrial Photovoltaic Module Accelerated Test-to-Failure Protocol", Tech. Rep., NREL/TP-520-42893, 2008.
- 1-9) J. Wohlgemuth, "Task Group3 : PVQA Testing for Humidity, Temperature, and Voltage", Presented at NREL Photovoltaic Module Reliability Workshop 2013, 2013.
- 1-10) S. Kawai, Y. Fukumoto, F. Tamai, K. Masuda, Y. Uchida, H. Kato, T. Obayashi, E. Yamada, T. Doi, A. Masuda and M. Kondo, "Accelerated Degradation in Commercial PV Modules by Using Extension and Repetition of Damp Heat and Thermal Cycling", Technical Digest of 6th World Conference Photovoltaic Energy Conversion, 2014, pp. 1029-1030.
- 1-11) 独立行政法人 産業技術総合研究所, 「第 I 期高信頼性太陽電池モジュール開発・評価コンソーシアム」 成果報告書, 2011, p.187.
- 1-12) S. Suzuki, E. Obana, T. Doi, A. Masuda and T. Tanahashi, "Sensitivities of I-V Parameters in c-Si PV Modules to Hygrothermal Stress", Presented at NREL Photovoltaic Module Reliability Workshop 2013, 2013.
- 1-13) Y. Aoki, M. Okamoto, A. Masuda, T. Doi and T. Tanahashi, "Early Failure Detection of Interconnection with Rapid Thermal Cycling in Photovoltaic Modules", Japanese Journal of Applied Physics, **51**, 10NF13 (2012)
- 1-14) T. Doi, K. Masuda, H. Kato, Y. Uchida, K. Shibata, S. Kawai, Y. Fukumoto, F. Tamai, A. Masuda and M. Kondo, "Potential Induced Degradation (PID) test for Commercially

- Available PV Modules”, Presented at NREL Photovoltaic Module Reliability Workshop 2013, 2013.
- 1-15) K. Hara, S. Jonai and A. Masuda, “ Crystalline Si photovoltaic modules functionalized by a thin polyethylene film against potential and damp-heat-induced degradation”, RSC Advances, **5**, 15017-15023 (2005).
- 1-16) J. Berghold, O. Frank, H. Hoehne, S. Pingel, B. Richardon and M. Winkler, “Potential Induced Degradation of solar cells and panels”, Proceedings of 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 2010, pp. 3753-3759.
- 1-17) P. Hacke, M. Kempe, K. Terwilliger, S. Glick, N. Call, S. Johnston, S. Kurtz, I. Bennett and M. Kloos, “ Characterization of Multicrystalline Silicon Modules with System Bias Voltage Applied in Damp Heat”, Proceedings of the 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 2010, pp. 3760-3765.
- 1-18) K. Hara, S. Jonai and A. Masuda, “Potential-Induced Degradation in Photovoltaic Modules Based on n-Type Single Crystalline Si Solar Cells”, Solar Energy Materials and Solar Cells, **140**, 361-365 (2015).
- 1-19) T. Tanahashi, “ Thermal Cycling Combined with Dynamic Mechanical Load, Preliminary Report”, Presented at NREL Photovoltaic Module Reliability Workshop 2013, 2013.
- 2-1) J. H. Wohlgemuth, D. W. Cunningham, A. M. Nguyen and J. Miller, “Long Term Reliability of PV modules”, Proceedings of 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 2005, pp. 1942-1946.
- 2-2) M. G. TamizhMani, “Experience with Qualification and Safety Testing of Photovoltaic Modules”, NREL Photovoltaic Module Reliability Workshop 2010, 2010.
- 2-3) S. Pingel, H. Korth, M. Winkler, P. Weiss, and T. Geipel, ” Investigation of Damp Heat Degradation Mechanisms and Correlation to an Accelerated Test Procedure (HAST)”, Proceedings of 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 2012, pp. 3137-3141.
- 2-4) M. Miyashita and A. Masuda, “ Correlation between Moisture Ingress and Performance in Photovoltaic Modules”, Proceedings of 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 2013, pp. 2828-2831.
- 3-1) J. H. Wohlgemuth, D. W. Cunningham, D. Amin, J. Shaner, Z. Xia and J. Miller, “ Using Accelerated Tests and Field Data to Predict Module Reliability and Lifetime”, Proceedings of 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 2008, pp. 2663-2669.
- 3-2) C. R. Osterwald, J. Pruett, S. Rummel, A. Anderberg and L. Ottoson, "Forward-Biased Thermal Cycling: A New Module Qualification Test", Proceedings of the 2000 NCPV Program Review Meeting, 2000, pp. 65-66.
- 4-1) IEC TS 62782:2016, “ Photovoltaic (PV) Modules Cyclic (Dynamic) Mechanical Load

- Testing”, 2016.
- 4-2) N. Bosco, T. Silverman, J. Wohlgemuth, S. Kurtz, M. Inoue, K. Sakurai, T. Shioda, H. Zenkoh, M. Miyashita, T. Tanahashi and S. Suzuki, “Accelerating Fatigue Testing for Cu Ribbon Interconnects”, Presented at NERL Photovoltaic Module Reliability Workshop 2013, 2013.
- 4-3) N. Bosco, T. Silverman, J. Wohlgemuth, S. Kurtz, M. Inoue, K. Sakurai, T. Shioda, H. Zenkoh, K. Hirota, M. Miyashita, T. Tanahashi and S. Suzuki, “Evaluation of Dynamic Mechanical Loading as an Accelerated Test Method for Ribbon Fatigue”, Proceedings of 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 2014, pp. 2484-2489.
- 4-4) M. Pander, R. Meier, M. Sander, S. Dietrich and M. Ebert, “Lifetime Estimation for Solar Cell Interconnectors”, Proceedings of 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 2013, pp. 2851-2857.
- 4-5) S. Koch, J. Kupke, D. Tornow, M. Schoppa, S. Krauter and P. Grunow, “ Dynamic Mechanical Load Tests on Crystalline Silicon Modules”, Proceedings of 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 2010, pp. 3998-4001.
- 5-1) G. Mathiak, J. Althaus, S. Menzler, L. Lichtschäger, W. Herrmann, “PV Module Corrosion from Ammonia and Salt Mist – Experimental Study with Full-Size Modules”, Proceedings of 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 2012, pp. 3536-3540.
- 5-2) IEC 61701:2011, “Salt Mist Corrosion Testing of Photovoltaic (PV) Modules”, International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, 2011.
- 5-3) P. Schinköthe, S. Nieland, J. Michael and M. Kugler, “PV Modules and Components under Extraordinary Environmental Conditions Using the Example of Sodium Chloride Atmospheres”, Proceedings of 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 2011, pp. 3504-3508.
- 5-4) J. A. del Cueto and T. McMahon, “Analysis of Leakage Currents in Photovoltaic Modules Under High-Voltage Bias in the Field”, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, **10**, 15-28 (2002).
- 5-5) N. G. Dhere, S. A. Pethe and A. Kaul, “Outdoor Monitoring and High Voltage Bias Testing of PV Modules as Necessary Test for Assuring Long Term Reliability”, Proceedings of SPIE, vol. 7412, 2009, 74120~74125.
- 5-6) S. Pingel, O. Frank, M. Winkler, S. Daryan, T. Geipel, H. Hoehne and J. Berghold, “ Potential Induced Degradation of Solar Cells and Panels”, Proceedings of 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2010, pp. 2817-2822.
- 5-7) P. Hacke, K. Terwilliger, S. Glick, D. Trudell, N. Bosco, S. Johnston and S. Kurtz, “ Test-to-Failure of Crystalline Silicon Modules”, Proceedings of 35th IEEE Photovoltaic

- Specialists Conference, 2010, pp. 244-250.
- 5-8) J. Berghold, O. Frank, H. Hoehne, S. Pingel, B. Richardson and M. Winkler, “Potential Induced Degradation of Solar Cells and Panels”, Proceedings of 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition / 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 2010, pp. 3753-3759.
- 5-9) P. Hacke, R. Smith, K. Terwilliger, S. Glick, D. Jordan, S. Johnston, M. Kempe and S. Kurtz, “Testing and Analysis for Lifetime Prediction of Crystalline Silicon PV Modules Undergoing Degradation by System Voltage Stress”, Proceedings of 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2012, pp. 1-8.
- 5-10) M. Schütze, M. Junghänel, M B. Koentopp, S. Cwikla, S. Friedrich, J. W. Müller and P. Wawer, “Laboratory Study of Potential Induced Degradation of Silicon Photovoltaic Modules”, Proceedings of 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2011, pp. 821-826.
- 5-11) S. Koch, C. Seidel, P. Grunow, S. Krauter and M. Schoppa, “Polarization Effects and Tests for Crystalline Silicon Cells”, Proceedings of 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, 2011, pp.1726-1731.
- 5-12) S. Hoffmann and M. Koehl, “Effect of Humidity and Temperature on the Potential-Induced Degradation” *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, **22**, 177-179 (2014).
- 5-13) S. Koch, J. Berghold, D. Nieschalk, C. Seidel, O. Okoroafor, S. Lehmann and S. Wendlandt. “Potential Induced Degradation Effects and Tests for Crystalline Silicon Cells”, Presented at NREL Photovoltaic Module Reliability Workshop 2012, 2012.
- 5-14) V. Naumann, C. Hagendorf, S. Grosser, M. Werner and J. Bagdahn, “Micro Structural Root Cause Analysis of Potential Induced Degradation in c-Si Solar Cells”, *Energy Procedia*, **27**, 1-6 (2012).
- 5-15) J. Bauer, V. Naumann, S. Großer, C. Hagendorf, M. Schütze and O. Breitenstein, “On the Mechanism of Potential-Induced Degradation in Crystalline Silicon Solar Cells”, *Physica Status Solidi Rapid Research Letters*, **6**, 331–333 (2012).
- 5-16) V. Naumann, D. Lausch, S. Großer, M. Werner, S. Swatek, C. Hagendorf and J. Bagdahn, “Microstructural Analysis of Crystal Defects Leading to Potential-Induced Degradation (PID) of Si Solar Cells”, *Energy Procedia*, **33**, 76-83 (2013).
- 5-17) JIS H 8502, “Methods of Corrosion Resistance Test for Metallic Coatings”, Japanese Standards Association, Tokyo, Japan, 1999.
- 5-18) IEC 60068-2-52:1996, “Environmental Testing - Part 2: Tests - Test Kb: Salt Mist, Cyclic (Sodium, Chloride Solution)”, International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, 1996.
- 5-19) C. Zhang , J. Zhang, Y. Hao, Z. Lin and C. Zhu, “A Simple and Efficient Solar Cell

- Parameter Extraction Method from a Single Current-Voltage Curve”, *Journal of Applied Physics*, **110**, 064504 (2011).
- 5-20) O. Breitenstein, “Illuminated versus Dark Lock-in Thermography Investigations of Solar Cells”, *International Journal of Nanoparticles*, **6**, 81-92 (2013).
- 5-21) 「高分子と水」, 高分子学会, 共立出版, 東京, 1995.
- 5-22) E. Charlaix and M. Ciccotti, “Capillary Condensation in Confined Media”, In *Handbook of Nanophysics, Principles and Methods*, Ed. K. D. Sattler, CRC Press, Boca Raton, USA, 2010, pp. 12-1~12-17.
- 5-23) 山田義智, 大城武, 榊田佳寛, 伊部博, 「海岸から飛来する塩分量の数値解析」, *コンクリート工学年次論文集*, **18**, pp. 945-950 (1996).
- 5-24) 佐藤國雄, 笠原隆祐, 塩野計司. 「移流沈降領域における飛来塩分量と風速の関係」, *コンクリート工学年次論文集*, **25**, pp. 851-856 (2003).
- 5-25) 片脇清士, 守屋進, 箕作光一, 「飛来塩分量の特性と測定方法」, *プレストレスコンクリート*, **27**, pp. 68-73 (1985).
- 6-1) 池田一昭, 「産総研メガ・ソーラタウン全数調査の結果速報」, AIST 太陽光発電研究成果報告会 2015, 口頭発表, 2015.

公表論文リスト

1. 査読付き学術雑誌論文

- 1.1 S. Suzuki, T. Tanahashi, T. Doi, and A. Masuda, "Acceleration of Degradation by Highly Accelerated Stress Test and Air-Included Highly Accelerated Stress Test in Crystalline Silicon Photovoltaic Modules", Japanese Journal of Applied Physics **55**, 022302 (2016)
- 1.2 S. Suzuki, N. Nishiyama, S. Yoshino, T. Ujiro, S. Watanabe, T. Doi, A. Masuda and T. Tanahashi, "Acceleration of Potential-Induced Degradation by Salt-Mist Preconditioning in Crystalline Silicon Photovoltaic Modules", Japanese Journal of Applied Physics **54**, 08KG08 (2015)

2. 査読のない発表論文

- 2.1 S. Suzuki, T. Tanahashi, T. Doi and A. Masuda, "Sorting Test of Bending Load on the Interconnector in Crystalline Silicon Photovoltaic Modules", Proceedings of National Renewable Energy Laboratory Photovoltaic Module Reliability Workshop 2015, 2015.
- 2.2 T. Tanahashi, S. Suzuki, N. Sakamoto, A. Mito, K. Shirasawa and H. Takato, "In situ AC Impedance Measurement in c-Si PV Modules during Rapid Thermal Cycling Test", Proceedings of National Renewable Energy Laboratory Photovoltaic Module Reliability Workshop 2015, 2015.
- 2.3 T. Doi, H. Morita, T. Amioka, T. Shioda, S. Suzuki and A. Masuda, "UV Exposure Test and UV-DH-TC Sequential Test for 4 Cells Mini Modules", Technical Digest of 6th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, pp 1015-1016 (2014).
- 2.4 S. Suzuki, T. Tanahashi, T. Doi and A. Masuda, "The Acceleration of Degradation by HAST and Air-HAST in c-Si PV Modules", Technical Digest of The 6th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, pp 1133-1134 (2014).
- 2.5 S. Suzuki, N. Nishiyama, S. Yoshino, T. Ujiro, S. Watanabe, T. Doi, A. Masuda and T. Tanahashi, "Acceleration of Potential-Induced Degradation (PID) by Salt-Mist Preconditioning in c-Si Photovoltaic Modules, Technical Digest of 6th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, pp 1397-1398 (2014).
- 2.6 S. Suzuki, T. Tanahashi, T. Doi and A. Masuda, "An examination of the Acceleration Method of Thermal Cycling Test for Crystalline Silicon PV Modules", Technical Digest of 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, pp 3177-3181 (2014)
- 2.7 N. Bosco, T. J. Silverman, J. Wohlgemuth, M. Inoue, S. Kurtz, K. Sakurai, T. Shioda, H. Zenkoh, K. Hirota, M. Miyashita, T. Tanahash, S. Suzuki, Y. Chen and P. J. Verlinden, "Evaluation of Dynamic Mechanical Loading as an Accelerated Test Method for Ribbon Fatigue", Proceedings of 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, pp 2484-2489

(2014)

- 2.8 A. Masuda, S. Suzuki, Y. Hara, S. Sakamoto and T. Doi, “Possible Measure of Reliability for Crystalline-Si Photovoltaic Modules”, Proceedings of 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, pp 2566 – 2569 (2014).
- 2.9 S. Suzuki, T. Tanahashi, T. Doi and A. Masuda, “An Examination of the Acceleration Method of Thermal Cycling Test for Crystalline Silicon PV Modules”, Proceedings of National Renewable Energy Laboratory Photovoltaic Module Reliability Workshop 2014, 2014.
- 2.10 S. Suzuki, N. Nishiyama, S. Yoshino, T. Ujiro, S. Watanabe, T. Doi, A. Masuda and T. Tanahashi, “Acceleration of Potential-Induced Degradation (PID) by Salt-Mist Preconditioning in Crystalline Silicon Photovoltaic Modules, Proceedings of National Renewable Energy Laboratory Photovoltaic Module Reliability Workshop 2014, 2014.
- 2.11 N. Bosco, T. J. Silverman, J. Wohlgemuth, M. Inoue, S. Kurtz, K. Sakurai, T. Shioda, H. Zenkoh, K. Hirota, M. Miyashita, T. Tanahashi, S. Suzuki, Y. Chen and P. J. Verlinden, “Evaluation of Dynamic Mechanical Loading as an Accelerated Test Method for Ribbon Fatigue”, Proceedings of 39th IEEE Photovoltaic Specialists Conference 2013, pp 3173-3178 (2013).
- 2.12 S. Suzuki, E. Obana, A. Masuda, T. Doi and T. Tanahashi, “The Acceleration of Degradation by HAST and air-HAST in c-Si PV Modules”, SOPHIA Workshop PV Module Reliability 2013, 2013.
- 2.13 S. Suzuki, T. Tanahashi, T. Doi and A. Masuda, “The Acceleration of Degradation by HAST and Air- HAST in c-Si PV Modules”, Proceedings of National Renewable Energy Laboratory Photovoltaic Module Reliability Workshop 2013, 2013.
- 2.14 S. Suzuki, E. Obana, A. Masuda, T. Doi and T. Tanahashi, “Sensitivities of I-V Parameters in c-Si PV Modules to Hygrothermal Stress”, Proceedings of National Renewable Energy Laboratory Photovoltaic Module Reliability Workshop 2013, 2013.
- 2.15 N. Bosco, T. Silverman, J. Wohlgemuth, S. Kurtz, M. Inoue, K. Sakurai, T. Shioda, H. Zenkoh, M. Miyashita, T. Tanahashi and S. Suzuki, “Accelerating Fatigue Testing for Cu Ribbon Interconnects, Proceedings of National Renewable Energy Laboratory Photovoltaic Module Reliability Workshop 2013, 2013.
- 2.16 S. Suzuki, K. Ikeda, E. Kin, T. Doi and T. Horiuchi, “A proposal: Mechanical Pressure Duty Cycle Test which can Accelerate Degradations around Interfaces of PV Module Laminate Materials”, 21st International Photovoltaic Science and Engineering Conference, 2011.

3. 口頭発表

- 3.1 鈴木 聡, 梶原 隆志, 奥山 新, 青木 雄一: 自動車用二次電池の電池筐体モデルによる圧壊試験方法の検討, 第 46 回信頼性・保全性シンポジウム, 2016 年 7 月
- 3.2 鈴木 聡, 戸井 恵子, 白澤 勝彦, 高遠 秀尚, 太陽電池モジュールにおける高温高湿試

- 験の加速方法及び故障モードのin situ計測方法の検討, 平成27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, 2015年11月
- 3.3 鈴木 聡, 奥山 新, 戸井 恵子, 青木 雄一, 温度環境を考慮したリチウムイオン二次電池の安全性試験の検討, 第25回電子デバイス・電子部品の信頼性シンポジウム, 2015年11月
- 3.4 鈴木 聡, 棚橋 紀悟, 土井 卓也, 増田 淳, 結晶Si 太陽電池モジュールにおけるインターコネクターのふるい分け試験の検討, 第62回応用物理学会春季学術講演会, 2015年3月
- 3.5 Soh Suzuki, Tadanori Tanahashi, Takuya Doi, Atsushi Masuda : Bending load testing to evaluate the interconnector breakdown in c-Si PV modules, 6th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, November (2014)
- 3.6 鈴木 聡, 棚橋 紀悟, 土井 卓也, 増田 淳, 結晶Si 太陽電池モジュールにおける機械式荷重試験の劣化メカニズムの検討, 平成26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, 2014年11月
- 3.7 鈴木 聡, 棚橋 紀悟, 土井 卓也, 増田 淳, 結晶Si 太陽電池モジュールにおける機械式荷重試験の劣化メカニズムの検討, 第75回応用物理学会秋季学術講演会, 2014年9月
- 3.8 鈴木 聡, 棚橋 紀悟, 土井 卓也, 増田 淳, 結晶Si 太陽電池モジュールにおける温度サイクル試験の加速方法の検討, 第61回応用物理学会春季学術講演会, 2014年3月
- 3.9 鈴木 聡, 棚橋 紀悟, 土井 卓也, 増田 淳, 高加速高温高湿試験, 四事業合同研究会, 2014年2月
- 3.10 鈴木 聡, 棚橋 紀悟, 土井 卓也, 増田 淳, 機械式高負荷サイクル試験, 四事業合同研究会, 2014年2月
- 3.11 鈴木 聡, 土井 卓也, 増田 淳, 結晶 Si PV モジュールにおける温度サイクル試験の加速方法の検討, 平成 25 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, 2013 年 11 月
- 3.12 鈴木 聡, 土井 卓也, 増田 淳, 高温高湿加速条件下における 結晶Si PVモジュール劣化の検討, エレクトロニクス実装学会, エレクトロケミカルマイグレーション研究, 2013年11月
- 3.13 鈴木 聡, 棚橋 紀悟, 土井 卓也, 増田 淳, 高温高湿加速条件下における結晶 Si PVモジュール劣化, 第74回応用物理学会秋季学術講演会, 2013年9月
- 3.14 鈴木 聡, 棚橋 紀悟, 土井 卓也, 増田 淳, 太陽電池モジュールにおける高温高湿試験の加速方法の検討, 第60回応用物理学会春季学術講演会, 2013年3月
- 3.15 鈴木 聡, 池田 一昭, 土井 卓也, 新規信頼性試験法の開発 - 高加速高温高湿試験 -, 太陽電池モジュール信頼性に関する合同研究会, 2013年2月
- 3.16 鈴木 聡, 土井 卓也, 増田 淳, 急速温度サイクル試験・機械式高負荷サイクル試験, 太陽電池モジュール信頼性に関する合同研究会, 2013年2月

- 3.17 鈴木 聡, 土井 卓也, 増田 淳, 太陽電池モジュールにおける高温高湿試験の加速方法の検討, 平成 24 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, 2012 年 11 月
- 3.18 鈴木 聡, 池田 一昭, 土井 卓也, 太陽電池モジュールの劣化加速試験の検討, 第 22 回電子デバイスの信頼性シンポジウム, 2012 年 11 月
- 3.19 鈴木 聡, 池田 一昭, 土井 卓也, 加重・抜重試験, 太陽電池モジュール信頼性に関する合同研究会, 2012 年 2 月
- 3.20 鈴木 聡, 池田 一昭, 土井 卓也, モジュール面への周期的機械圧力印加による新規加速試験法の検討, 太陽光発電工学研究センター成果報告会 2011, 2011 年 5 月
- 3.21 鈴木 聡, 池田 一昭, 佐川 友彦, 土井 卓也, サーモカメラを用いた産総研MSTのPVモジュール観察, 平成23年度日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー協会合同研究発表会, 2011年11月
- 3.22 鈴木 聡, 小林 晶子, 戸井 恵子, 竹内 誠, 高橋 邦明, 実装はんだウイスカの評価試験, Mate2010「エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術」シンポジウム, 2010 年3月
- 3.23 鈴木 聡, 小林 晶子, 戸井 恵子, 竹内 誠, 高橋 邦明, 実装下におけるウイスカ評価試験, 第19回RCJシンポジウム, 2009年11月
- 3.24 鈴木 聡, 小林 晶子, 戸井 恵子, 竹内 誠, 高橋 邦, 種々のめっきを施した鉛フリー半導体パッケージのはんだ付け実装のウイスカ評価, 第 19 回マイクロエレクトロニクスシンポジウム, 2009 年 9 月
5. 依頼原稿
- 5.1 鈴木 聡, 棚橋 紀悟, 土井 卓也, 増田 淳, 結晶 Si 太陽電池モジュールにおける高温高湿試験の加速方法検討, エレクトロニクス実装学会誌, 第 18 巻, 第 4 号, 2015 年 7 月
- 5.2 鈴木 聡, 棚橋 紀悟, 高橋 邦明, 太陽電池モジュールの信頼性評価試験, 接着の技術, Vol.32, No. 1, 2012 年 6 月
6. 講演・各種講師など
- 6.1 鈴木 聡, 棚橋 紀悟, 土井 卓也, 増田 淳, 結晶 Si 太陽電池モジュールにおける高温高湿試験の加速方法の検討, 平成 27 年度第 1 回太陽電池モジュール劣化メカニズム研究会, 2015 年 10 月
- 6.2 鈴木 聡, 小林 晶子, 戸井 恵子, 竹内 誠, 高橋 邦明, 実装状態のウイスカ成長加速法の検討, エスペック信頼性セミナー2011
- 6.3 鈴木 聡, 小林 晶子, 戸井 恵子, 竹内 誠, 高橋 邦明, 実装状態のめっきウイスカ成長加速法の検討, エスペック信頼性セミナー2010
- 6.4 鈴木 聡, 小林 晶子, 戸井 恵子, 竹内 誠, 高橋 邦明, 実装状態のめっきウイスカ成長加速法の検討, エスペック信頼性セミナー2009
7. マスメディアへの記事掲載・出演など

7.1 鈴木 聡, 尾花 英一郎, 棚橋紀悟 : 応用物理学会取材記事, 半導体新聞 (2013)

9. その他特記事項

受賞歴

1. 2015 NREL Photovoltaic Reliability Workshop Poster Award (2015)
2. 日本太陽エネルギー学会 奨励賞 (2011)

総説

1. 平成 22 年度～26 年度成果報告書 信頼性評価技術と長寿命化技術の開発 モジュール・機器耐久性評価技術 新規信頼性試験方法の開発 新規加速試験技術の研究 機械的ストレスを用いた加速試験方法, NEDO(2015)
2. 第Ⅱ期 高信頼性太陽電池モジュール開発・評価コンソーシアム 成果報告書,産総研(2014)
3. 鈴木 聡, 尾花 英一郎, 棚橋 紀悟, 太陽電池劣化における温湿度影響の検討, 第Ⅱ期 高信頼性太陽電池モジュール開発・評価コンソーシアム 中間成果報告書(2012)