



芝浦工業大學

SHIBAURA INSTITUTE OF TECHNOLOGY
Established 1927
Tokyo

2023 度 工学部 電気工学科

卒業研究論文

太陽電池モジュール劣化判定手法の比較と 画像解析

電力システム研究室 2

0 2 4 年 1 月 2 6 日

学籍番号 AE20020

氏名 中川昂太

指導教員 藤田吾郎

太陽電池モジュール劣化判定手法の比較と画像解析

AE20020 中川 昂太

Comparative Analysis of Solar PV Module

Degradation Determination Methods and Image Analysis

Kota Nakagawa

Demand for renewable energy has led to a rapid increase in the production and installation of photovoltaic (PV) systems worldwide. However, during transport, installation and exposure to adverse weather conditions, PV panels are prone to defects that reduce their lifespan and efficiency, and visual inspection and I-V curve inspection are commonly used to maintain the smooth operation of PV systems, but are limited by the need for specialist knowledge and long inspection times. Therefore, there is a need for cost-effective and efficient inspection methods to identify defects in solar panels. The aim of this paper is to analyse and compare the benefits and effectiveness of two solar panel inspection methods: thermal infrared (IR) imaging and electroluminescence (EL) imaging. The IR images were taken with a FLIR Pro thermal imaging camera, while the EL images were taken indoors and outdoors with a low-cost modification of a Panasonic GF3 camera. The study demonstrated that EL imaging is the most effective method for detecting defects in different solar cells, although each method has its advantages. Thermal infrared imaging is effective in detecting defects that are affected by the temperature of the panel, but may not detect microscopic defects. The developed EL setup is simple and low-cost, making it a viable option for small and large PV systems, contributing to the development of the PV inspection sector. Furthermore, image analysis using OpenCV has been demonstrated to significantly improve inspection efficiency in terms of being able to detect defects using only photography.

1. はじめに.....	3	4. 太陽電池モジュール.....	8
2. 研究背景.....	3	4.1 太陽電池モジュールの製造と原理.....	8
2.1 2050年ネットゼロ排出シナリオ ^{[1][2][3][4]}	3	4.1.1 シリコン系太陽電池の製造工程 ^{[15][16]}	8
2.1.1 近年の温室効果ガス排出量.....	3	4.1.2 太陽電池の発電原理 ^[28]	10
2.1.2 現在の太陽光発電の追跡.....	3	4.2 太陽電池モジュールの構造.....	11
2.1.3 太陽光発電技術の拡大.....	4	4.2.1 太陽電池表面の配線構成 ^[29]	11
2.2 再生可能エネルギー拡大と国際協力 ^{[1][5][6]}	4	4.2.2 使用目的に合わせたモジュール構造 ^[31]	12
2.2.1 国際協力の变化.....	4	4.3 太陽電池の欠陥の種類と原因.....	12
2.2.2 再生可能エネルギーの導入率.....	5	4.3.1 ホットスポット現象 ^{[32][33]}	12
2.2.3 世界各国のエネルギー政策.....	5	4.3.2 太陽電池セル表面の欠陥 ^[36]	13
2.3 太陽光発電製造能力の世界的な拡大 ^{[9][10][11]}	6	5. 太陽電池の非破壊的検査手法.....	13
2.4 太陽光発電設備の実態 ^{[12][13]}	6	5.1 太陽電池欠陥検査への利用 ^[37]	13
2.4.1 太陽光発電設備の保安.....	6	5.2 IRイメージング.....	14
2.4.2 太陽光発電設備の点検と課題.....	7	5.2.1 IRイメージングへの利用.....	14
3. 研究目的.....	7	5.2.2 熱赤外線カメラの温度測定原理 ^{[38][39]}	14

5.3 EL イメージング ^{[40][41][42][43]}	14
5.3.1 太陽電池表面からの EL 発光.....	14
5.3.2 欠陥が EL 発光に及ぼす影響.....	15
6. 実験手法の説明.....	16
6.1 使用機器の準備.....	16
6.1.1 スマートフォン型熱赤外線カメラ ^[44]	16
6.1.2 EL 専用赤外線カメラの作成.....	16
6.1.3 IR カットフィルタ.....	17
6.1.4 試験用太陽電池の規格.....	17
6.2 実験方法.....	18
6.2.1 IR イメージング.....	18
6.2.2 EL イメージング.....	19
7. 実験結果.....	20
7.1 屋外 IR イメージング.....	20
7.2 屋内 IR・EL イメージング.....	21
7.2.1 小型太陽電池モジュール.....	21
7.2.2 単結晶シリコン太陽電池モジュール.....	21
8. 実験における考察・検討.....	23
9. OpenCV による画像解析.....	23
9.1 OpenCV とは ^[49]	23
9.2 画像解析に長けている理由.....	23
10. 画像解析.....	23
10.1 開発環境.....	23
10.2 使用手法の説明.....	24
11. イメージングへの応用.....	26
11.1 解析方法.....	26
11.2 スクリプトの概要と出力画像.....	26
11.2.1 セル分割(直線検出).....	26
11.2.2 輪郭検出.....	27
12. 画像解析における考察と課題.....	28
13. 結論.....	29
14. 展望.....	29
参考引用文献.....	29
付録 A.....	33
付録 B.....	34

1. はじめに

再生可能エネルギーの需要増加に伴い、太陽光発電システムの生産と設置が世界的に急増している。しかし、太陽電池モジュールは、輸送や設置、悪天候による欠陥が生じやすく、寿命や効率が低下しやすい。太陽光発電システムの円滑な運用を維持するために、目視や手作業による検査方法が一般的に用いられているが、高い費用、専門知識の必要性、長い検査時間などの制約がある。したがって、太陽電池の欠陥を特定するための費用対効果に優れた効率的な検査方法の開発と実用が急務となっている。本論文の目的は、熱赤外(IR)イメージングとエレクトロルミネッセンス(EL)イメージングという 2 つの検査方法の有効性を比較分析し、より費用対効果に優れた検査手法を提案することである。実験では、サーモグラフィカメラと変換型 EL カメラを使用して、その欠陥を観測する方法を比較する。実験で得られた画像はOpenCVで画像処理解析を行い、より効率的な欠陥識別方法として実用できるかを検討する。

2. 研究背景

2.1 2050 年ネットゼロ排出シナリオ^{[1][2][3][4]}

2.1.1 近年の温室効果ガス排出量

温室効果ガスは、二酸化炭素(CO₂)だけでなくメタンなどの温室効果を持つすべての気体を指し、図 1 は 2020 年度の日本国内の温室効果ガス排出量とその内訳を示す。エネルギー起源の CO₂ 排出量が全体の 84%を占めている。

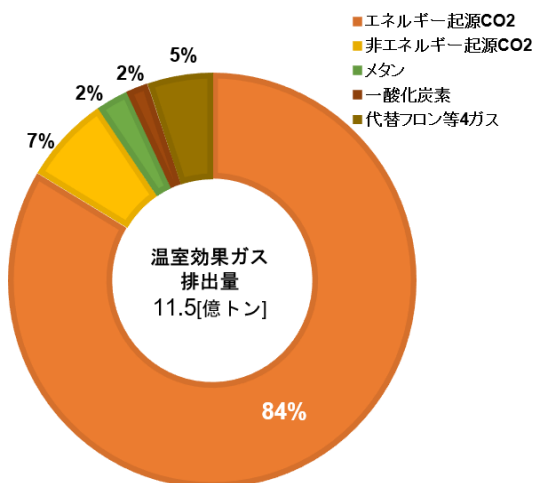


図 1 日本の温室効果ガス排出量^[1](2020 年度)

これは、温室効果ガス排出量の削減は CO₂ 排出量削減に依存していることを示している。実際に、図 2 は世界の CO₂ 排出量の推移を示す。エネルギー燃焼などの産業プロセスによるエネルギー起源の CO₂ 排出量は 2022 年

には0.9%](321[Mt])増加し、過去最高の36.8[Gt]となった。また、新型コロナウイルス感染症のパンデミックにより、エネルギー需要が減少したため、2022 年の排出量は 5[%]以上減少した。翌年 2021 年はエネルギー危機に見舞われた。ロシアのウクライナ侵攻とそれに伴う天然ガスの供給量の激減とガス価格の高騰が起こったため、天然ガス由来の CO₂ 排出量は減少した。しかし、この削減は石炭にとってかわられたため、全体の排出量削減には影響を及ぼさなかった。また、同年はワクチンの普及や各国の経済対策により、排出量は 6[%]以上増加し、パンデミック前の水準を超えて回復した。このような理由から、石炭使用量の増加が懸念された 2021 年は、排出量が急増する可能性があった。しかし、この問題はクリーンエネルギー技術の導入拡大によって回避された。すなわち、エネルギー危機下でも排出量の増加を抑制することができた。

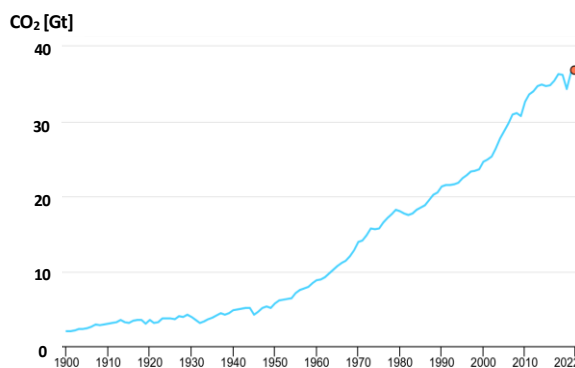


図 2 世界のエネルギー起源の CO₂ 排出量^[2]

(1900-2022)

2.1.2 現在の太陽光発電の追跡

2050 年ネットゼロ排出シナリオとは、大気中に排出される温室効果ガスと大気中から除去される温室効果ガスが同量でバランスが取れており、炭素排出量を 2050 年までに実質ゼロにすることを目標としている。図 3 は国際エネルギー機関(IEA: International Energy Agency)の調査による発電手法別の累計電力容量のシェアを示す。これによると、2015 年のパリ協定から太陽光発電をはじめとした多くの分散型電源の普及が加速していることが分かる。また、この調査結果によると、太陽光発電は再生可能エネルギーの追加容量の大半を占めており、太陽光発電の設置容量は 2027 年までに石炭による火力発電の容量を超え、世界最大になる見込みである。実際、2022 年の太陽光発電量の記録的な増加により、直近の増加率は 2050 年ネットゼロ排出シナリオで期待される増加率のレベルと一致した。このシナリオに沿った世代増加率の維持には、2030 年までに 2022 年の 3 倍近い年間発電量増加が必要である。具体的には、総設備容量を 6000[GW]以上を達成するために年間増設量をおよそ 800[GW]まで増加させ

る必要がある。この目標達成には、全ての太陽光発電分野に対する継続的な支援が求められ、電気系統統合の分野だけでなく、政策、規制、資金調達の問題への対応も重要となる。

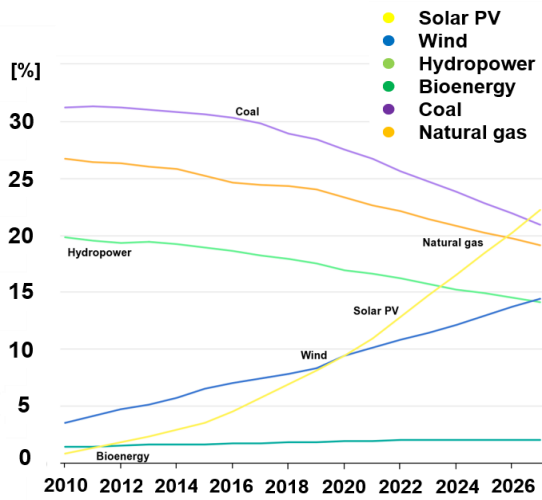


図3 種類別の累積電力量のシェア^[3](2010-2027年)

2.1.3 太陽光発電技術の拡大

世界の太陽光発電導入において分散型電源の役割が重要になっている。分散型電源とは、電力を使用している需要家の近辺に設置されている小規模な発電設備のことをいう。図4は分散型電源の設置容量の割合を示す。実際に、太陽光発電設備容量の増加のおよそ半分は実用規模の発電所が占めており、商業・産業用、住宅用に分散型電源がこれに続いた。現在、商品価格の高騰による投資コストが上昇しているにもかかわらず、世界各国では実用規模の太陽光発電設備が新規発電の選択肢となり、投資が活発化している。この背景には、燃料価格と電力価格高騰により分散型電源は多くの消費者にとって魅力的な発電源となっていることが影響している。

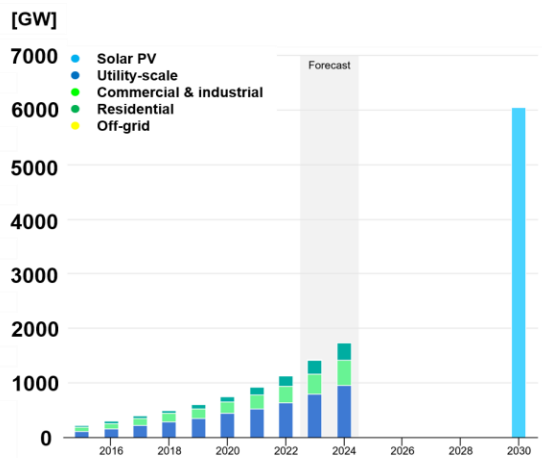


図4 太陽光発電容量の内訳と推移^[4] (2015-2024・2030年)

2.2 再生可能エネルギー拡大と国際協力^{[1][5][6]}

2.2.1 国際協力の変化

地球温暖化問題についての世界各国政府が協力した取り組みは、1994年発効の国連気候変動枠組条約により始まった。この取り組みは、「先進国も途上国も温暖化防止という目標に責任を負うという点では共通だが、過去に環境に負荷をかけて発展を遂げた先進国と、これから発展しようとする途上国の間には責任の大きさに差がある」という共通だが際ある責任という考え方を基本に置いている。その後、1997年に「京都議定書」が採択され、先進国は具体的な数値目標を約束し、対策に取り組むこととされた。「京都議定書」の採択後、途上国での経済発展が進み、中国、インドなど温室効果ガス排出量が急増する国も出てきている。

気候変動問題に関する科学的な情報を整理・分析し政策決定者等に情報提供することを目的とする国連組織であるIPCCによる科学的知見の集積が進み、2014年にその第5次評価報告書が公表された。この報告書では気候システムの温暖化には疑う余地がなく、産業革命以降の気温上昇を2度以内に抑えるためには、2050年までに温室効果ガス排出量を2010年比で40~70%削減しなくてはならないことが示されている。2015年のCOP21において、2020年以降の取組みを定めるパリ協定が合意された。パリ協定では、すべての締結国に削減目標・行動の提出・更新が義務付けられることになった。前述したネットゼロ排出シナリオの実現に向けて各国の国際的な協力が求められている。

図5はカーボンニュートラル(ネットゼロ排出シナリオと同義)に向けて取り組む国と地域を示した。2050年までの表明した国における世界全体のCO₂排出量に占める割合は40[%]であり、2070年までの表明した国を合わせると世界全体の89.4[%]を占める。温室効果ガスの排出量は経済成長に伴うことが多く、先進国だけでなく、発展途上国・新興国の排出削減も求められる。この実現は排出量の削減だけでなく、CO₂吸収量の増加も必要となる。

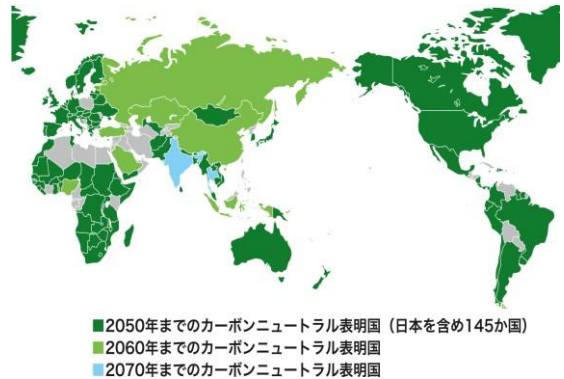
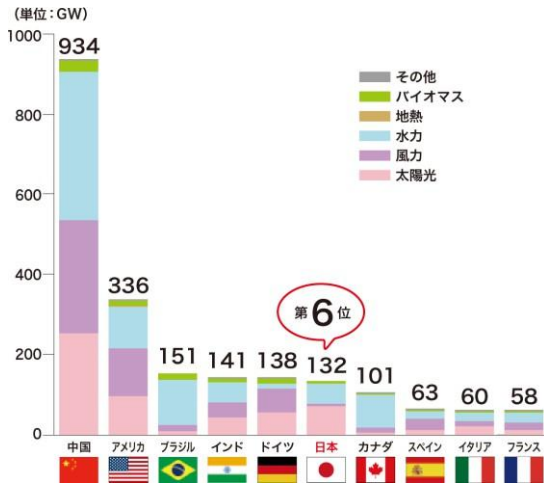


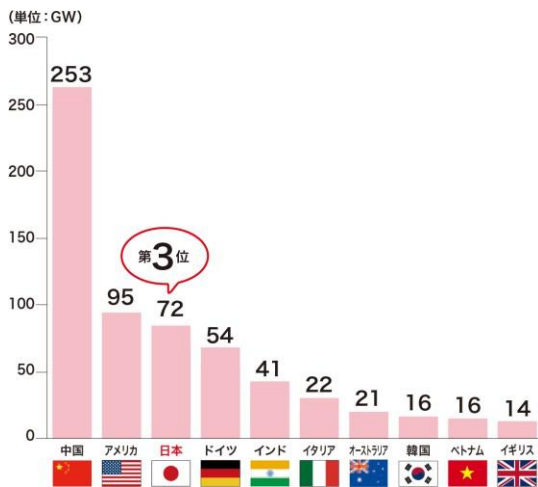
図5 カーボンニュートラルを表明した国と地域^[1]

2.2.2 再生可能エネルギーの導入率

図 6 は 2020 年時点での主要国の発電電力量に占める再生可能エネルギー比率の比較である。これによると、日本は主要国内で再生可能エネルギー発電導入容量では 6 位、太陽光発電導入容量は 3 位に位置する。しかし、再生可能エネルギーは気候や季節によって発電量が変動し、安定供給のためには出力調整が可能な電源や蓄電池との組み合わせが重要である。これは、発電量と消費量、すなわち需要と供給のバランスに注意する必要があるためである。



(a) 再生可能エネルギー発電導入容量



(b) 太陽光発電導入容量

図 6 主要国の発電電力量の比較^[5]

2.2.3 世界各国のエネルギー政策

世界最大の経済大国で 2022 年に導入された新たな政策により、再生可能エネルギーの利用が促進されると予想される。図 7 に示すように世界中で再生可能エネルギーは急拡大している。以下は主要国の中でも顕著な進歩を遂げている国および地域を示す。

中国は、再生可能エネルギーによる電力容量追加の分野で引き続きリードしている^[7]。2022 年には 160[GW]が追加され、全世界の導入量のおよそ半分を占める。2022

年に発表された第 14 次再生可能エネルギー 5 年計画では、再生可能エネルギー利用に関する積極的な目標が示されており、今後数年間の拡大に拍車がかかると考えられる。

欧州連合(EU)はエネルギー危機に対して太陽光発電と風力発電の導入が加速しており、2022 年には前年比 45[%] 近くが増加となる 50[GW]が追加された。REPowerEU 政策とグリーン・ディール産業計画(Green Deal Industrial Plan)で提案された新しい政策と目標は、今後数年間の再生可能エネルギーの重要な推進力になると考えられる。

アメリカは、2022 年に米国インフレ抑制法^[8](IRA: Inflation Reduction Act)の下で税額控除や重要な新規資金調達が発表された。これは、中期的に再生可能エネルギーの導入を加速させ、発電所と設備製造の両方への投資を促進すると考えられる。アメリカのエネルギー省は、このインフレ抑制法とインフ

ラ投資雇用法に盛り込まれた気候変動対策によって、2030 年までに温室効果ガス排出量を 40%削減できると試算している。

インドは、2021 年に開催された COP26 で 2030 年に 500[GW]の脱化石燃料発電容量を達成するという意欲的な目標を発表し、これに引き続き取り組んでいる。2023 年 4 月には、この目標を達成するために、毎年 50[GW]の新規容量を売電する計画を発表した。

これらの主要国における前向きな政策展開によって、今後数年間で再生可能エネルギーは急成長し、特に太陽光発電が急拡大する。また、主要国以外の世界各国でも同様に再生可能エネルギーは、政策支援と国家目標の対象となっており、技術面に特化した施策も含めて、様々な支援を実施している。近年の化石燃料価格の高騰による世界的なエネルギー危機と政策の勢いの高まり、エネルギー安全保障への懸念により、太陽光発電と風力発電などの再生可能エネルギー発電の強力な導入が世界的に促進されている。

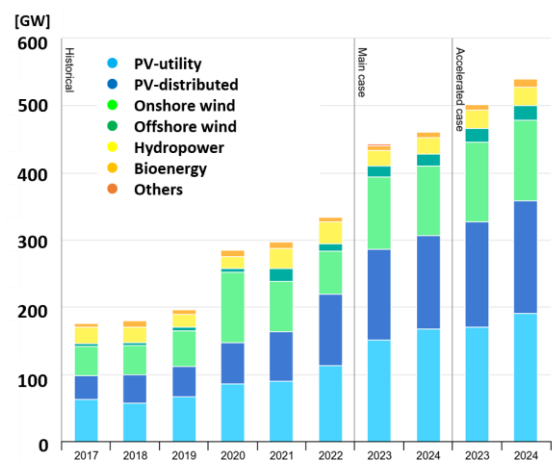


図 7 技術別世界の追加容量の推移^[6](2017-2024 年)

2.3 太陽光発電製造能力の世界的な拡大^{[9][10][11]}

図 8 は公表されたネットゼロ排出シナリオによる太陽光発電の製造能力を示す。2022 年は、世界の太陽光発電生産能力は 70[%] 以上増加し、多結晶シリコンは 450[GW]、モジュールは最大 640[GW]に達しており、中国はサプライチェーン全体の施設設備の 95[%]以上を占める。前述した、アメリカのIRA, EU のグリーン・ディール産業計画などの世界各国の産業政策によって、世界の太陽光発電製造能力は今後 5 年間で 2 倍以上に増加すると予想されている。2030 年の製造能力は、ネットゼロ排出シナリオにおける 2030 年の需要を十分に上回ると予想されるが、世界は 2025 年にかけて太陽光パネルの製造の主要な部品供給をほぼ完全に中国に依存することになる。図 10 は、2021 年の各国の太陽光発電製造能力を示したグラフであり、全製造段階における 80[%]以上を中国が占めている。このような過度な集中はグローバル・サプライチェーンにおいてはかなりの脆弱性を意味する。そのため、サプライチェーンの安定性と供給地域の多様性を高めるためにはさらなる努力が必要である。

現在の太陽光発電設備の製造市場においてシリコン結晶技術が主流でありこの製造工程は主に以下の 4 段階に分けることができ、図 9 に示す。

- ① 高純度多結晶シリコンの製造
- ② インゴット生成と薄膜ウエハーへの加工
- ③ 太陽電池セルの製造
- ④ 太陽電池モジュールの組み立て

図 10 より、製造工程のいかなる箇所においても中国のサプライチェーンによる影響が顕著であることが分かる。

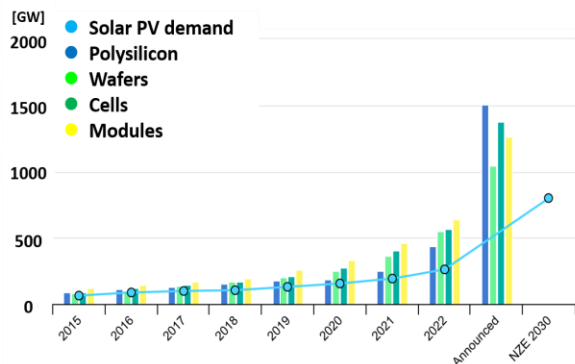


図 8 太陽光発電の製造能力^[9]

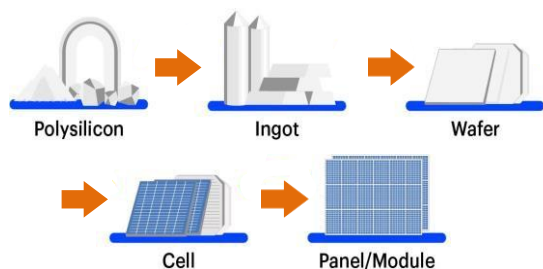


図 9 太陽電池モジュールの製造過程^[11]

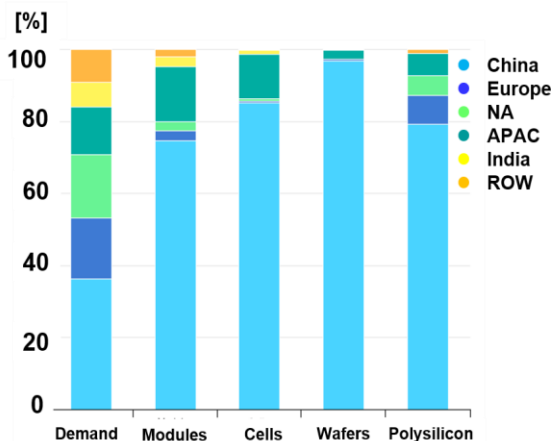


図 10 地域別の太陽光発電製造能力^{[10](2021 年)}

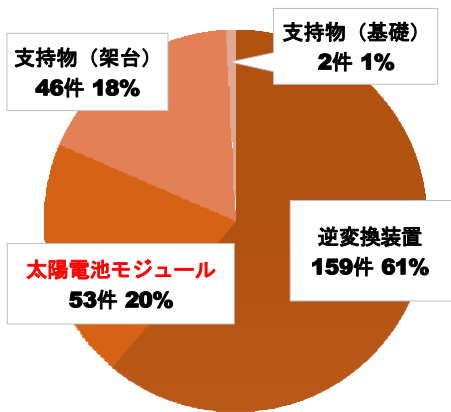
2.4 太陽光発電設備の実態^{[12][13]}

2.4.1 太陽光発電設備の保安

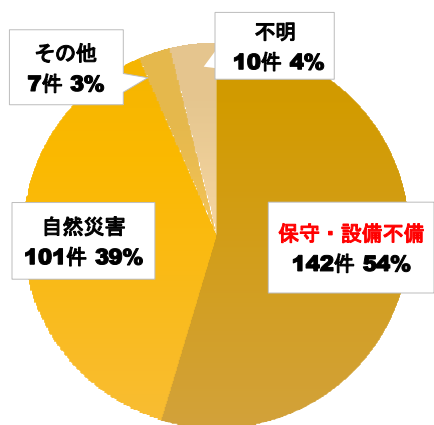
太陽光発電は、再生可能エネルギーとして環境問題克服のキーとして注目されている。この発電補設備は、寿命が 20 年以上でメンテナンスが簡単と言われがちである。しかし、住宅用太陽光発電システムが多く普及している国内においてその多くは屋外かつ屋根の上に設置されており、われわれが太陽電池モジュールを実際に間近に見ることは難しい。つまり、太陽光発電設備は、モジュールの故障や不具合の発生を所有者自身が確認することができず、点検の必要性を見極めることが難しいという問題を抱えている。(独)製品評価技術基盤機構(NITE)による事故情報を見ると、令和 3 年度に発生した小出力の太陽光発電設備(50[kW]未満)と風力発電設備に係る事故は 220 件起きており、内訳は 213 件が太陽光発電設備である。図 11 は太陽光発電設備の事故被害件数の内訳を示している。ただし、1 回の事故で複数の電気工作物が破損することもあるため、260 件と事故数と差異が生じている。これによると、事故発生電気工作物は逆変換装置が大半を占め、次に太陽電池モジュールが続く。逆変換装置は、パワーコンディショナ(PCS: Power Conditioning Subsystem)を指す。事故原因は、保守・設備不備が半分強を占めており、自然劣化による保守不備は保守・設備不備のおよそ 95[%]を占める。また、事故件数は、合計で 260 件と全国の設置数に対しては微小ではあるが、一般家庭に設置されるような太陽光発電設備は 10[kW]未満である。このため、事故報告に該当しない設備が大半である。

同機構の住宅用太陽光発電設備の事故に関する調査による事故発生件数の推移を図 12 に示す。しかし、これは具体的な規格と件数の明記はないため、具体的な議論はできない。これによると、施工不良による事故の件数と割合が増加している。他にも、部品の絶縁不良やはんだ

付け不良などの製品起因の事故も件数は増加している。しかし、全国の太陽光発電設備数に比べるとこれらの事故件数はかなり少ない。また、一般的な住宅用太陽光発電設備は一般電気工作物に分類されるため、所有者自身が自ら点検する必要があるが、所有者が認識していない問題が潜在していると考えられる。太陽光発電設備に関する専門知識を有さない所有者が大半の中で、このような事故と原因を顕在化することは難しい。



(a) 事故発生電気工作物



(b) 事故原因

図 11 小出力太陽光発電設備の事故被害件数^[13](2021)

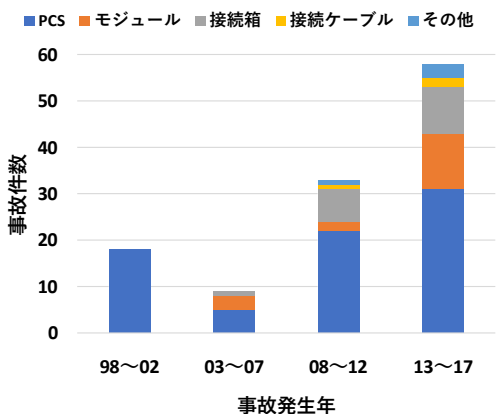


図 12 品目別の事故件数の推移^[14](2018 年時点)

2.4.2 太陽光発電設備の点検と課題

太陽光発電に使用する太陽電池モジュールは、精密機器ではないため他の機器や製品に比べて寿命が長いといわれている。しかし、その分、故障や問題が起きたことに気づきにくいという問題がある。実際、太陽光発電設備の事故の原因の大半はPCSによるものである。PCSは太陽電池で発電した電力の交流電力への変換や系統連系などの機能を持つ。そのため、コンデンサやトランスなどの部品数が多くなり、必然的に回路基板が複雑化する。これによるはんだ付けの接続不良が起こることがある。また、雨水などの水の侵入によるトラッキング現象も事故原因となり得る。

一方、太陽電池モジュールは欠陥の診断が難しい。太陽電池は耐久性が比較的高いとされているものの、常に外部環境に触れており、屋外での天候の影響を受けている。また、故障や不具合による発電量の減少が起きた場合にその原因が故障なのか天候によるものなのかを見極めにくい。PCSの不具合はほとんどの場合で、回路が故障するため、発電量が激減あるいはゼロになるが、太陽電池モジュールの不具合は発電量が徐々に減少することも診断を難化させている。加えて、設置場所が屋外の屋根の上が多いため不具合を簡単に確認できない。

このような問題を抱えながらも、太陽電池モジュールの点検や欠陥検出は行われている。実際に行われている欠陥検出手法は、目視検査やI-V検査、熱赤外線検査、EL検査など様々な種類が挙げられる。これらの手法は、それぞれ特定の欠陥を検出することができる。目視による検査は、パネル表面の汚れはもちろん太陽電池モジュールの接続不良を確認できる。I-V検査は、ストリング系統の不具合の原因を特定することができる。熱赤外線検査では、パネル表面の異常発熱を検出することで、パネルの内部欠陥やその外的要因を特定することができる。EL検査は、目視では確認できない細かいクラックを検出ことができ、欠陥位置の特定まで行うことができる。

このように欠陥の特定は専門的な知識を有し、検査手法によって使用機器も異なるため、検査時間も多くなる。今後、急拡大する太陽光発電事業において、欠陥の検出は容易かつ効率的であるべきであるが、現在の監査手法は効率的であるとは言えない。

3. 研究目的

本研究では、効率的かつ費用対効果に優れた検査方法を提案することを目的とする。太陽電池モジュールの欠陥検出には様々な手法が用いられているが、サーモグラフィカメラを用いるIRイメージングと専用カメラを用いるELイメージングに注目する。これらの手法は、パネル表面の写真を撮影、観察することで欠陥を検出するこ

とができる。この 2 手法を比較する実験を行い、どちらの検出方法がより効果的で安価かつ実用的かを検証する。また、得られた画像の解析で Open CV を用いることで、検査後の診断の効率の向上も行う。

4. 太陽電池モジュール

4.1 太陽電池モジュールの製造と原理

4.1.1 シリコン系太陽電池の製造工程^{[15][16]}

結晶シリコンは太陽光発電製造の主要な技術であり、2020 年の太陽電池市場は単結晶が市場を独占した。シリコン系太陽電池の製造工程の詳細を示す。

(1) 高純度多結晶シリコンの製造

多結晶シリコンは、その名の通り単結晶の集合体である多結晶で構成されるシリコンであり、単結晶シリコン製造の際の原材料として使用される材料である。

まず、シリコン原料の珪石を還元して、純度 98[%]の金属シリコン(MG-Si: metallurgical grade silicon)を生産とする。しかし、実際に製品として利用できるシリコンの条件は厳しい。例えば、半導体に使用されるイレブンナイン(11N)と呼ばれるシリコンは、純度 99.99999999[%]以上の超高純度シリコンであり、太陽電池用シリコンでは、シックスナイン(6N)と呼ばれる純度 99.9999[%]以上の高純度のシリコン(ソーラーグレードシリコン)が原料として必要となる。そのため、還元によって得られた MG-Si を原料として純度をさらに向上させた多結晶シリコンへと精製する必要がある。この多結晶シリコンの製法には化学的なシーメンス法と冶金学的な熔融シリコン精製法が挙げられ、図 13 はこれら 2 種法を簡単に示す。

シーメンス法とは、金属シリコンから製造されたトリクロロシラン(SiHCl_3)を原料とし、高温で水素ガスと反応・熱分解させることで超高純度の多結晶シリコンを得る方法である。この製法は、主に転化・蒸留・還元の 3 つのプロセスによって精製する。

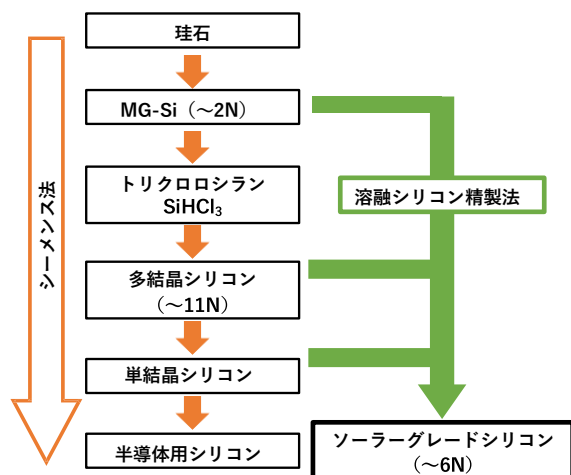
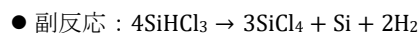
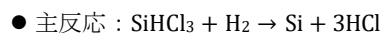


図 13 ソーラーグレードシリコン製造工程^[17]

転化では、MG-Si と塩化水素(HCl)を約 300 度で塩化反応させ、原料となるトリクロロシランを合成する。この反応と同時に MG-Si 中に含まれる金属不純物は塩化物となる。金属塩化物は金属単体と比較して融点が低いため、トリクロロシランの合成時に金属イオンが蒸発し、高純度のトリクロロシランが得られる。

蒸留では、トリクロロシランと副生成物・不純物との蒸気圧や沸点の差を利用してトリクロロシランを高純度化するプロセスである。このときの副生成物は四塩化ケイ素、ジクロロシランなどがある。このとき既にイレブンナインの超高純度トリクロロシランが合成されている。

還元では、超高純度化したトリクロロシランを高純度水素ガスで還元する。これは、転化の逆反応であり、トリクロロシランを分解することによって超高純度シリコンを得ている。これらの反応は主反応であるが、副反応も同時に起きている。以下の反応式はシーメンス法による主反応と副反応を示す。



主反応ではトリクロロシランから高純度のシリコンが 1 対 1 で析出されるが、実際の反応では副反応の熱分解が優先的に進行するため、4[mol]のトリクロロシランから 3[mol]のトリクロロシランと 1[mol]のシリコンが得られる。これは、反応率が最大で 25[%]であることを示し、多量の電力とエネルギーを消費するこの製法においては効果が低い。この製法による結晶シリコンは主に半導体に利用されており、規格外品が太陽電池用に活用されていた。しかし、近年はこの製法による超高純度シリコンがそのままソーラーグレードシリコンとして利用されることが多くなっている。

熔融シリコン精製法^[18]とは、冶金学を応用してシリコンの不純物濃度を低くする金属精錬技術を用いる手法である。この製法によって得られるシリコンの純度はシーメンス法のように超高純度ではないため、高純度のソーラーグレードシリコンに利用できる製法である。この製法の原料は MG-Si であり、凝固精製を 2 回行う。

第一工程では蒸気圧の差を利用して、蒸気圧の高いリン(P)の蒸発除去や金属不純物の粗除去を行う。これは、高真空かつ局所高温下で行われ、一方向凝固があまり期待できないリンの他に平衡分配係数の小さいアルミニウム(Al)やチタン(Ti)などの不純物元素の除去を行う。

第二工程では、ボロン(B)や炭素(C)の酸化除去及び金属不純物の仕上げ除去を行う。酸化除去では、第一工程で除去できない不純物を酸化除去で取り除く。これは、酸化ガス種の蒸気圧の高いボロン、炭素とシリコンの平

平衡反応を利用しており、ガス組成の制御を適正に行い、炉温を高温にすることで脱ボロンと脱炭を行う。

この2つの工程により、ソーラーグレードシリコンに利用できる高純度のシリコンを製造することができる。近年は、リンの除去は電子ビーム溶解で行うなど、新技術を合わせた製造方法の開発と改良が進んでいる。

(2) インゴットへの結晶化とウエハー加工^[19]

シリコン系太陽電池は主に単結晶シリコンと多結晶シリコンの2種類が流通している。しかし、単結晶・多結晶シリコンの原料はいずれも多結晶シリコンである。2種類への分岐はインゴットへの生成の段階で行われる。

単結晶インゴットの場合、種結晶からゆっくり結晶を引き上げてインゴットを成長させる CZ(Czochralski)法で製造する。CZ法^[20]とは、るつぼ内で溶解させた高純度多結晶シリコンの中に種結晶を浸し、回転させながら引き上げることで種結晶と同じ結晶方位を持つ単結晶を育成する方法である。単結晶インゴットの生成において、結晶はいかなる位置においても結晶方位が変わらず、原子配列がすべて同じである必要がある。この製法は、大口径(大重量)の高速と大量生産を可能にする技術であり、単結晶インゴットの生成にはよく用いられるが、引き上げ速度や直径制御を精密に制御する必要がある。ほかにも、CZ法に磁場を加えるMCZ法や、るつぼを使用しないFZ法などがある。

一方、多結晶インゴットはキャスト法(鑄造法)が用いられる。この製法は、CZ法と同じるつぼを使用するが、CZ法とは全く異なる。CZ法が対象とするインゴットを引き上げているのに対し、キャスト法ではるつぼの中にシリコン融液を入れ、冷却することで育成できる。そのため、角形のるつぼの形を使用することでロスなく作製でき、生産性が非常に高い。

このように2種類それぞれ結晶インゴットを育成した後、シリコンウエハーを加工する。シリコンウエハーの加工は切断やスライシング、研磨という工程がある。太陽電池用のシリコンウエハーは、半導体用のシリコンウエハーほど高精度ではないが、コストダウンのために厚みを140[μm]~200[μm]と薄くする必要がある。そのため、インゴットをウエハー状に切断する工程はウエハー加工の工程の中でも非常に重要な工程であり、機械的品質す

なわち、太陽電池における発電効率に大きく影響を及ぼす。スライシングでは、ワイヤーソーによる切断が主流となっており、1度に200枚以上のウエハーを生産することができる。この他にも、化学的な加工、研磨によってウエハーの品質の向上及び不純物の除去を行っている。

(3) 太陽電池セルの製造^{[21][22]}

太陽電池セルは、太陽光などの光の照射によって得られたエネルギーを直接電気エネルギーに変える電力機器のこと。前項まででのシリコンウエハーだけでは発電能力はないが、電極の構成や様々な工程を経た太陽電池セルになると発電能力を伴う。この太陽電池セルは、太陽電池としての機能を持つ最小単位であり、セルを複数組み合わせることで屋外利用を可能にしたものがモジュールである。一般的に太陽光発電と言われて想像されるものはモジュールを直列接続したストリング、ストリングを並列接続したアレイと呼ばれるものである。実際の太陽電池セル製造工程を簡単に図14に示す。

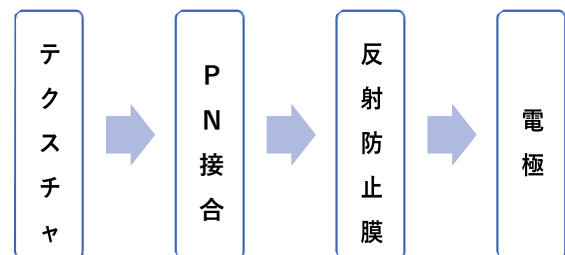


図14 太陽電池セル製造工程

まず、セルの最表面に位置しておりテクスチャは、太陽電池が光を集める役割があり、電流を生成する能力に直接関係している。表面の反射が大きいとその分太陽電池セルに入射する光も少なくなる。しかし、このテクスチャの大きさは非常に小さく1[μm]~3[μm]程度であり、大量生産の過程でテクスチャの未形成の領域や不十分な領域が生じることがある。これに伴ってセル表面の反射率が悪化し、エネルギー変換効率を低下させる。このテクスチャの形成には様々な方法がある。機械的な加工のほかにウェットテクスチャ^[23]と呼ばれる方法もあり、使用する手法によって形成されるテクスチャの構造も異なるという特徴がある。

次に、拡散と呼ばれる処理によって、基本構造であるpn接合を形成する。太陽電池セル作成においては、気相

拡散法(熱拡散法)が多く用いられており、リン(P)やヒ素(As)、ホウ素(B)などの不純物を含んだ気体を供給し、不純物をドーピングする。通常は P 型のシリコンウエハーが用いられるため、V族の不純物をドーピングして、n 型の層を形成する。

次に、太陽電池セルの表面加工^[24]を行う。表面加工は、太陽電池におけるエネルギー変換効率において大きな役割を担い、この加工によって変換効率の減少を抑制することが可能になる。抑制の目的となるエネルギーの損失は主に 2 つあり、太陽電池表面における反射などで失われる光学的損失、生成されたキャリアが再結合などによって失われる電氣的損失がある。光学的損失の抑制には、表面反射防止膜の形成によって光を閉じ込める技術が利用されている。これは、メガネの反射防止コーティングと同じ原理である。原理は、太陽電池セルの前面と背面の間を多重反射させることで、反射光の波の位相を相殺することである。これによって、反射率を数%まで減少させることができる。電氣的損失の抑制は、表面パッシベーションによる再結合損失の低減によって行われる。表面パッシベーションとは、酸化膜を金属表面に形成し、表面を不動体化させる処理のことをいう。これにより、未結合電子を減少させ、表面付近での電子と正孔の再結合を大幅に減少させる。この他にも低温形成によるセルへのダメージ低減などがある。

最後に、電気の取り出し口となる電極の形成を行う。電極の形成は印刷法で行われる。太陽電池表面にある格子状の線は銀(Ag)ペーストを用いて印刷形成されている。この Ag ペーストは、ファイアスルー^{[25][26]}によってシリコン層と接合する手法を用いている。ファイアスルーとは、ファイアスルーに高温焼成を行うことで絶縁層である反射防止膜を貫通し、電極を結んでいる。

(4) 太陽電池モジュールの組み立て^[27]

太陽電池モジュールの組み立てでは、主にラミネート加工などの組み立てがある。この工程は今までの工程と比較して複雑な箇所は少なく、実際に太陽電池セルからモジュールを手作業で自作することも可能である。はんだ付けでセルを直列に連結し、直列に連結したセル群をさらに連結する。はんだ付けができない場合はインタコネクタを用いる。図 15 は簡単なモジュールの断面図であ

る。配線するうえで、太陽電池セルの正負の電極を誤って配線しないように注意する。通常は、表面がマイナス極で、背面がプラス極になるように作製する。これにより、通電が可能になる。この後は、端子箱の作製、積層やラミネート加工、フレーム加工による保護や設置のための加工を行う。積層の際にEVAシート(樹脂シート)を封止材として使用する。封止材には表面と背面の保護材と太陽電池を接着して不純物の侵入などの外部環境から内部を保護する役割がある。

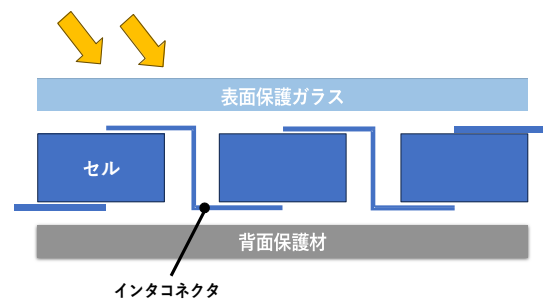


図 15 太陽電池モジュール断面の概略図

4.1.2 太陽電池の発電原理^[28]

前項に示す工程を経て製造された太陽電池は、光起電力効果と呼ばれる現象を利用して、光エネルギーを直接電気エネルギーに変換することで発電する。光起電力効果とは、物質に光が当たることによって起電力が生じる現象である。太陽電池はシリコン由来の異なる半導体を組み合わせた構造をしており、p 型半導体と n 型半導体に分類される。n 型半導体は伝導電子が多く、接触した他の材料に電子が逃げ出しやすくなっている。一方、p 型半導体は伝導電子が少なく、正孔と呼ばれる電子が欠けた領域を持っている。太陽電池はこれらの異なる電荷キャリアをもつ半導体が積み重なった構造を持つ。接合領域では、p 型半導体から n 型半導体への電子拡散と同時に、n 型半導体から p 型半導体への正孔拡散が起こる。電子が移動したことによって、n 型半導体内の電子が不足するため、プラスに帯電する。同様に、p 型半導体内の正孔が不足するため、マイナスに帯電する。これによって、接合領域に内部電界が生じる。内部電界は n 型半導体の電子が抜け出そうとする流れを妨げる方向に生じる。これは、電子が抜け出そうとする力と釣り合ったところで安定する。すなわち、接合領域では電子と正孔が結びついて移動できない状態となっており、この領域には常に内部電界が生

じている。このような状態となっている接合領域に光が入射すると、光エネルギーが半導体内で励起し、電子が導電帯に移動する。これによって、接合領域で移動していなかったキャリアが押し出され、電子と正孔はそれぞれ n 型半導体と p 型半導体に移動する。その結果、電子が外部回路を回って結合しようとすることで起電力が生じる。これは、光が照射している間持続する。

図 16 のエネルギーバンド図を用いると説明が容易である。電子には、外部から電磁波を受けるとエネルギー準位が上がるという性質があり、太陽電池では太陽光によって価電子帯中の電子が光励起され、伝導帯へと押し出される。その後は、ポテンシャルに沿って電子は n 型半導体の方に移動する。同様に正孔も p 型半導体へと移動する。電子は正孔と結びつこうとするため、回路を経由して p 型半導体へと移動する。継続的に光が入射すると、それぞれのキャリアのポテンシャルに沿った移動によってフェルミ準位が移動する。このフェルミ準位の変位分が起電力として生じる。

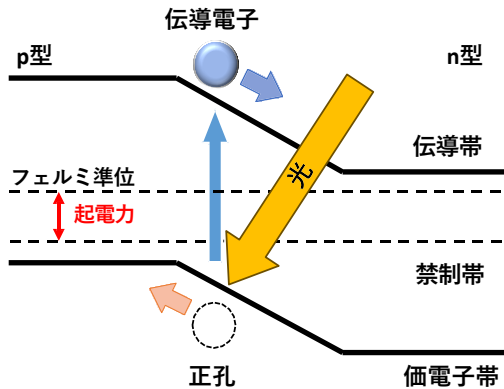


図 16 光起電力効果

4.2 太陽電池モジュールの構造

4.2.1 太陽電池表面の配線構成^[29]

太陽電池には薄い長方形のストリップが印刷されている。図 17 は太陽電池セルの配線を示す。図中の縦 2 本の線はバスバーと言い、太陽電池の発電によって生成された直流電流を伝導するという重要な役割を持つ。この本数が多いとバスバー間の距離が短くなり、電気抵抗が少なくなり、エネルギー変換効率が高まる。一般的な太陽電池には 3 つのバスバー(3BB)を持つ太陽電池が主流であるが、効率向上を目的とした 5 つのバスバー(5BB)を持つ太陽電池は主要なトレンドとなっている。しかし、バ

スバーは受光部を削って印刷しているため、過度な配置は発電量の低下に繋がる。

このバスバーと垂直に交わる細い線はグリッドフィンガー(太陽電池フィンガー)とも呼ばれ、生成された電流をバスバーに供給する。すなわち、セルで発電した電気を集電する役割を担う。

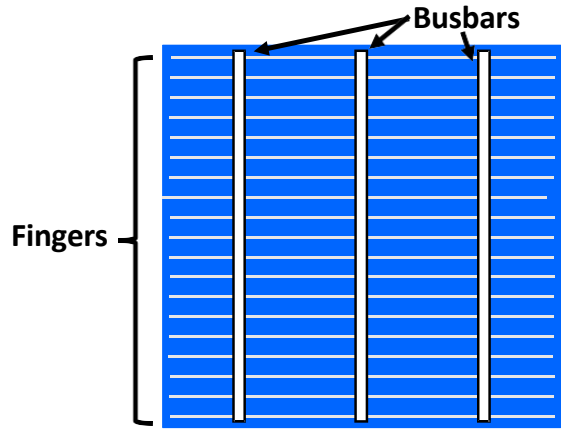


図 17 太陽電池セルの配線

これらのセルを組み合わせた太陽電池モジュールの配線を図 18 に示す。セルを直列配列して接合する際に、太陽電池のバスバーと接続される箇所をタブワイヤといい、タブワイヤで配線された直列のセルはバスワイヤによって並列接続される。並列接続は、全てのセルから得られた電流を累積するために行う。このバスワイヤはタブワイヤよりも多くの電流を流す必要がある。そのため、バスワイヤの太さや幅などの断面積を大きくすることで、単位長あたりの抵抗を小さくする。図 19 は実際に住宅用で用いられている Panasonic 製の太陽電池モジュールを示し、実際にこれらの配線構成を基に作製されていることが分かる。

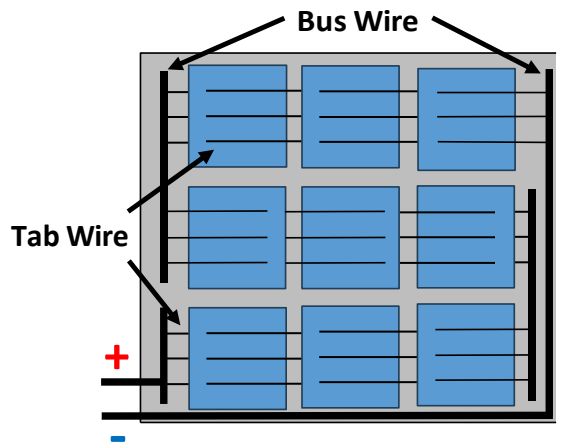
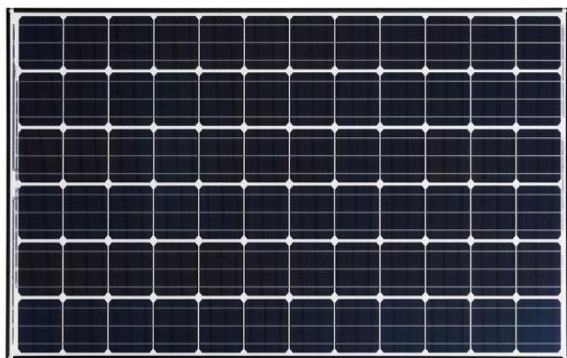


図 18 太陽電池モジュールの配線

図 19 実際に利用される太陽電池モジュール^[30]

4.2.2 使用目的に合わせたモジュール構造^[31]

モジュールの構造は大きく 3 種類に分けられ、スーパーストレート構造、サブストレート構造、ガラスパッケージ構造がある。これら 3 種類の構造におけるモジュール内部の接続は全て同じであるが、使用用途、目的に合わせて適切に活用される。

スーパーストレート構造は、電力用の結晶シリコン太陽電池モジュールに利用される。主に住宅の屋根などに設置されるアルミニウムの枠組みを持つモジュールに多く、屋外で長時間使用する際の機械的強度に長けているという特徴を持つ。4.1 章(1)項で示した太陽電池モジュールの構造はこれと同じである。

サブストレート構造は、アルミニウムの枠などを持たない簡易的な構造であり、軽量化が可能であるという特徴を持つ。しかし、封止材が紫外線の影響を直接受けるため、封止材の劣化の進行が早い欠点を持つ。

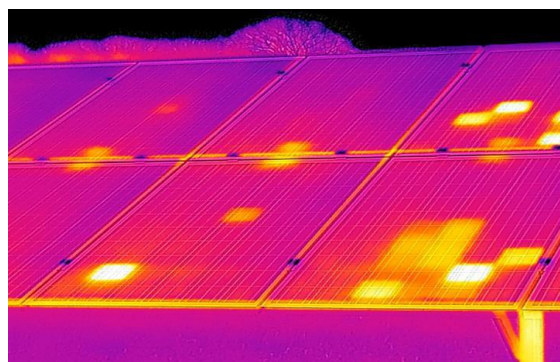
ガラスパッケージ構造は、両面をガラスで覆った構造をしており、建材用の太陽電池モジュールなどに利用されている。

4.3 太陽電池の欠陥の種類と原因

4.3.1 ホットスポット現象^{[32][33]}

太陽電池は太陽光が当たることで電流を生成するが、時折建物や周囲の障害物などによって一部が日陰になることがある。このとき、日陰となった領域は遮光領域となり異常発熱を起こす。これは、一般にホットスポット現象と呼ばれる。太陽電池モジュールが部分遮光状態で (PSCs: Partial Shading Conditions) で動作する場合、遮光領域と照光領域の両方が同時に逆バイアスで動作する。PSCs 下では、遮光領域が光発電可能な状態にならないため、モジュール全体が均等に発電しない。これにより、遮光領域と照光領域で異なる電圧や電流が生じ、逆バイアスが生じる。すなわち、遮光領域は太陽電池モジュール内で負荷として存在し、発電時にここが発熱する。これ

によって、遮光箇所が周囲の正常なセルと比べて高温となる。実際のホットスポットを図 20 に示す。

図 20 ホットスポット現象の例^[34]

ホットスポット現象による異常発熱は、モジュールの不可逆的な破損に繋がることがある。この影響は、太陽電池やバックシートの損傷だけでなく、発火や火災につながる危険がある。ホットスポット現象の原因は、遮光領域の形成によるものだけでなく、鳥のフンや大気中のチリやホコリの汚れもある。太陽光パネルは、最大へ積電量を確保するために一般的に傾けて設置される。この場合、パネルのフレームに雨水が溜まって停滞する可能性がある。その後、雨水が蒸発するとチリやホコリの残留物が残り、遮光領域を作ることがある。これらの汚れによるホットスポットの場合、これらの原因は短期的なものであるため、対象原因を取り除けば解消できる。しかし、セルの故障や接続箇所の不備が原因によるホットスポットが生じることもある。これも影や汚れと同様に負荷となったセルが異常発熱を起こす。

逆バイアスによる発電効率の低下は、ステファン・ボルツマンの法則^[35]によって明快になる。熱伝達の観点から、この法則に基づいて追加の消費電力その結果として生じる欠陥セルの温度上昇との関係は以下の式(1)で与えられる。

$$\Delta P = \epsilon \sigma A (T_2^4 - T_1^4) \quad (1)$$

ただし、 ΔP は放射熱による追加消費電力[W]、 ϵ は放射率、 σ はステファン・ボルツマン定数、 A は高温セルの表面積[m²]、 T_1 は逆放射面の温度[K]、 T_2 は物体表面の温度[K]である。逆放射面は空間や建物を指し、物体表面は主に異常発熱セルを指す。これは、高温セルとその周囲の環境との温度差が大きいほど、追加の消費電力が増加することを示す。このように故障による分類と出力損失には相関関係がある。実際に、セルの表面温度が 10℃上昇する軽度のホットスポットでは出力低下は 4[%]程度であり、18℃上昇する重度のホットスポットは最大 10[%]の出力低下が起こる。

4.3.2 太陽電池セル表面の欠陥^[36]

半導体製造の進歩によって、非常に薄く面積の大きい太陽電池が実現された。そのため、太陽電池は非常に大きく、衝撃を受けると欠陥が生じやすい。太陽電池モジュールの欠陥には様々な種類がある。これらは特殊な撮影法によって図 21 のように観察される。以下は太陽電池モジュール表面の代表的な欠陥である。しかし、これらの欠陥による電力損失はセルの亀裂の方向に依存する。そのため、ホットスポット現象のように電力損失と相関関係を持つことは稀である。

(1) マイクロクラック

マイクロクラックは、太陽電池セルの基板上に存在し、肉眼では確認できないほどの非常に小さい亀裂である。これは電極と繋がっていない欠陥であるため、太陽電池の発電効率に大きく影響しないと考えられている。しかし、マイクロクラックが入るとこれを起点として徐々に亀裂が拡大する可能性があり、モジュール強度の低下に繋がる。マイクロクラックは、主に製造、輸送、設置などにおいて生じる。

(2) フィンガー断線

フィンガー断線は太陽電池表面に存在する金属電極であるグリッドフィンガーと呼ばれる細い導線が断線することを指す。グリッドフィンガーはセルの表面に薄く張り巡らせた金属導線である。この欠陥は、太陽電池モジュールに物理的なストレスが加わることで生じる。他にも大気中の湿度などによる環境的な要因によって生じることもある。フィンガー断線は、マイクロクラックと類似しているが、亀裂の及ぶ範囲が太陽電池セル内のグリッドフィンガーまで到達しているという違いがある。フィンガー断線によって、フィンガー数が減少し、フィンガー間の距離が増加する。これによって、電流の集電能力が低下し、モジュール全体の発電能力が低下する。また、この欠陥の修復は難しく、一度フィンガーが断線するとモジュール規模での交換が必要となることが多い。

(3) 材質的欠陥

太陽電池の主成分であるシリコンの欠陥も存在する。このシリコンは多くの工程を経て製造されており、化学的・冶金学的手法を用いて生成されている。これらの製造プロセスは 4.1 項でも述べたように複雑であり、高純度のシリコン結晶が求められる太陽電池において、不純物などによる影響は大きい。材質的な問題は、結晶インゴット育成時に発生する結晶由来の微小な欠陥や酸化反応によって引き起こされる欠陥、製造工程中に材質中に侵入した転位などが挙げられる。

(4) 電氣的絶縁欠陥

太陽電池セル内の特定の領域で発生する深い亀裂を指し、セルの構造やデバイスにおける損傷や破壊を示す。この主な原因は、太陽電池モジュール製造時や運用中に機械的な応力や急激な温度変化による熱応力によるもの他、雨や雹などの気象による外部からの物理的な損傷が挙げられる。この場合、電氣的な断線・絶縁が生じるため、セル内の電流が遮断され、発電能力が大幅に減少する。

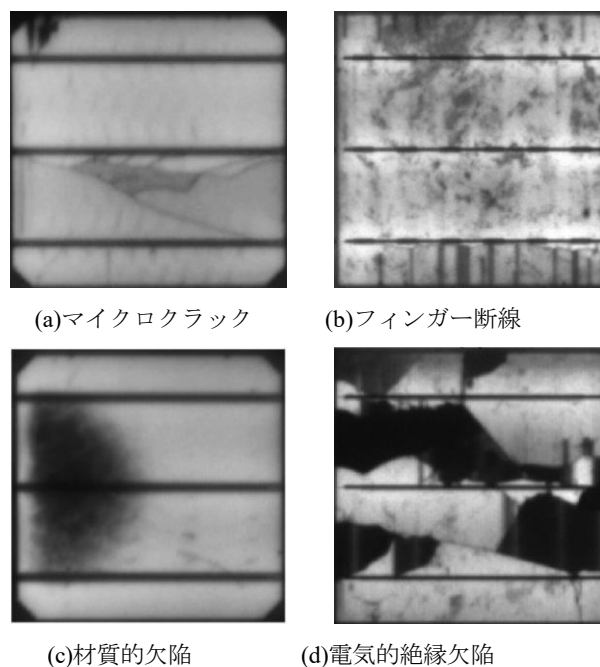


図 21 太陽電池セル表面の欠陥例^[36]

5. 太陽電池の非破壊的検査手法

5.1 太陽電池欠陥検査への利用^[37]

非破壊的検査手法(NDT: Non-Destructive Testing)とは、試験対象となる物体や材料を破壊することなく、内部または表面の欠陥や異常を検出する方法である。非破壊的検査方法にはさまざまな手法がある。例として、目視検査、超音波検査、X線検査、磁気粉末検査、などが挙げられ、主に生産ラインなどで利用されることが多い。これは、検査対象物を損傷させずに情報を得ることができるという特徴を利用しており、試料や製品の再利用などによる製造効率の向上を目的としている。また、効率の向上だけでなく、異常や欠陥の位置、形状、大きさなどを詳細に特定することができる。これにより、欠陥発生箇所の詳細な把握や欠陥の定量的な評価に役立ち、検査データの詳細な分析が可能になる。これらの特徴により、非破壊的検査手法は製造業、建設、航空宇宙、医療、エネルギー分野などで広く利用されている。

これらの特徴を持つ非破壊的検査は太陽電池モジュールの欠陥診断に非常に適している。太陽電池モジュール

は一度設置すると取り外しが難しく、その大半は屋外の屋根に設置されている。そのため、ケーブルの接続などが必要な I-V 検査では欠陥検査において検査作業の効率 that 下がる。しかし、太陽電池の劣化や欠陥は時間の経過とともに進行するため、欠陥の発見はできるだけ早く行われるべきである。そのため、非破壊的検査手法としてパネル表面の観察によるシンプルな欠陥診断が有用である。この手法は得られた画像から欠陥を識別することができ、検査方法の容易さと効率の良さにおいて非常に優れている。このとき、太陽電池内の欠陥位置だけでなくその範囲も同時に特定することができる。このように、非破壊的検査手法による欠陥検出は、非常に有用であり、システムの効率を向上させるものである。

5.2 IR イメージング

5.2.1 IR イメージングへの利用

IR (Thermal Infrared) イメージングは、直接太陽電池モジュールに触れずに欠陥を検出・診断する非破壊的手法である。この手法には、熱赤外線カメラ(サーモグラフィカメラ)を用いて、その放射体の温度分布を観測する。これによって、太陽電池モジュール表面の温度変化をリアルタイムでキャプチャでき、潜在的な問題を発見することができる。このように IR イメージングは、太陽電池モジュールに物理的な影響を与えることなく欠陥を検出できるという特徴を持つ。この検査では、目視では確認できないような小さな欠陥や内部不良を早期に検出し、メンテナンスを行うことで、システムの稼働時間を最大限に保ち、修理コストを低減することができる。また、表面温度の均等な分布を確認することで、太陽電池モジュールの配置や冷却システムの改善により効率を向上させる。実際の欠陥検出の応用として、ホットスポットの検出が挙げられる。太陽電池モジュール内のホットスポットを検出し、異常な温度上昇が起きているセルを周囲の温度と比較することで特定する。大規模な太陽光発電所では、IR イメージングデータを自動的に解析し、異常を検出するためのアルゴリズムやソフトウェアが利用されている。このような太陽電池の欠陥診断のほかに性能や効率を評価するためにも使用される。太陽電池は光を利用して電力を生成するため、IR イメージングは太陽電池の表面温度分布や発電効率の評価に役立つ。このように、太陽電池における IR イメージングは非常に重要で、効果的なメンテナンスやトラブルシューティングに貢献している。

5.2.2 熱赤外線カメラの温度測定原理^{[38][39]}

赤外線はその名の通り、可視光領域(400~700[nm])外に存在する波長の光であり、われわれの目で確認するこ

とはできない。そのような赤外線を、熱画像として可視化する装置をサーモグラフィカメラという。サーモグラフィカメラが利用する赤外線は電磁スペクトルのおよそ 900~14000[nm](0.9~14[μm])に分布する。これは、対象物に触れることなく、物体表面の温度を広範囲に及んで測定することができる。赤外線は絶対ゼロ度以上のすべての物体から放射されており、放射エネルギーの強度は温度と放射波長に依存する。カメラには赤外線を検出するセンサが搭載されており、これは主に光電変換素子を使用されている。これによって検知された赤外線エネルギーは、温度へと変換される。この温度変換^[39]は式(2)によって行われる。

$$W_0(T, \lambda) = \varepsilon_\lambda W_1(T, \lambda) + (1 - \varepsilon_\lambda) W_a(T_a) - W_b(T_a) \quad (2)$$

赤外線サーモグラフィカメラには、対象物からの放射エネルギー W_1 だけでなく、対象物表面での環境反射エネルギー W_a 、サーモグラフィカメラ自身の放射エネルギー W_b も入射する。よって、環境温度 T_a も同時に測定することで、補正処理を行い、温度推定の精度を向上させる。これによって、目的とする温度 T を求めることができる。ただし、 ε_λ は波長 λ における分光放射率である。このようにして温度変換を行った後に温度分布を色分けして表面温度の違いを分かるように表示する。以上から分かるようにサーモグラフィカメラは温度を直接測定しておらず、赤外線を検知することで温度を求めている。しかし、サーモグラフィカメラによって得られる画像は解像度が低く、限界があるという課題を持つ。この原因は、高温の状況下ではノイズが増加することのほかに、センサ性能やレンズ品質が不十分であることなどが考えられている。サーモグラフィカメラは、可視光が限定される状況や特定の波長範囲での観測が必要な場面で広く利用されており、技術の進歩によりますます高度化している。

5.3 EL イメージング^{[40][41][42][43]}

5.3.1 太陽電池表面からの EL 発光

エレクトロルミネッセンス(EL: Electroluminescence)は、日本語では電界発光と言い、名前の通り電子(electron)による発光である。EL イメージングは、この電界発光を利用することで欠陥を特定する手法である。これは、欠陥検査用に確立された非破壊的検査手法の一種である。一般に発光というとき発光ダイオード(LED: Light Emitting Diodes)や有機 EL などがある。実際、発光ダイオードは、半導体の一種であり、太陽電池と同様に pn 接合を持つ。この素子に順方向の電圧を印加すると正孔と電子が pn 接合の接合領域に集まり、正孔と電子が相殺し、再結合を起こす。このとき、電子がもともと持っていたエネルギーよりも低い状態へと移動するため、余分なエネルギーが光エネルギーとして発行する。すなわち、電子を

電氣的に励起したのち、励起された電子が基底状態に戻る時に光エネルギーが発生する。

多くの太陽電池はpn 接合により、正孔と電子を分離して光エネルギーを電気エネルギーに変換することで発電するが、LED と太陽電池は同じ素子構造を持つ。よって、電源を太陽電池につなぎ、通常電流を供給する太陽電池に、順方向の電流を注入する。LED の発光原理と同様に、太陽電池内の電荷キャリアの励起によるバンド間の再結合プロセスによって太陽電池が発光する。すなわち、電流が注入された太陽電池モジュールは発光ダイオードとして機能し、再結合によってモジュール表面から発光を得る。このとき注入する電流は直流である。これは、太陽電池によって生成される電流は直列であり、太陽電池内部が交流規格になっているためである。直流電流注入によって光子が外部へ放出される。放出時、光子はEL として放出され、EL 発光(結晶シリコンの発光)が得られる。図 22(a)は、太陽電池から放出する EL 発光である。これは、太陽電池の主成分であるシリコンからの発光と扱うことができる。しかし、太陽電池セル内に欠陥がある場合、欠陥箇所からの EL 発光は検出できない。つまり、EL 画像内で黒く映っている箇所は欠陥と認識できる。

EL 発光シグナルは約 950[nm]~1350 [nm]の範囲であり、バンドギャップに相当するピークは 1150[nm]である。この近傍になる要因は、結晶シリコンを光吸収相に利用していることである。EL 発光によって放出された光子は高感度カメラを通すことで検出できる。高感度カメラは、インジウムガリウムヒ素(InGaAs)フォトダイオードとシリコン電荷結合素子(Si CCD: silicon charge-coupled-device)をもつシリコンデバイスのことを指す。図 22(b)はこれらの検出光量子効率を示す。Si CCD は、可視光領域(380~780[nm])において優れているのに対し、InGaAs は赤外線検出に適している。図 22 中の 2 つの図を比較する。InGaAs の方がシリコン発光の検出に優れていることが分かる。これは、結晶シリコンの発光曲線がInGaAs 検出器の吸収度曲線とほとんど一致しているためである。また、発光ピークに対する量子効率はおおよそ 80[%]である。一方、Si CCD の吸収度曲線は発光曲線と一致せず、発光ピークの量子効率はおおよそ 10[%]と低い。したがって、InGaAs を用いるとシリコン発光をほぼすべて検出でき、EL 検査に最適である。

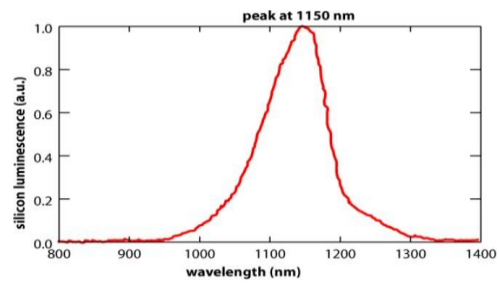


図 22-(a) 結晶シリコンによるEL 発光曲線

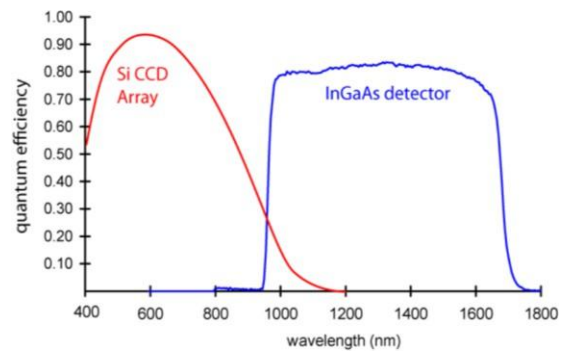


図 22-(b)検出器別の吸収度曲線

図 22 発光スペクトルと検出感度^[43]

5.3.2 欠陥が EL 発光に及ぼす影響

エレクトロルミネッセンスでは、太陽電池表面から近赤外線が放出される。これは、順バイアス状態での正孔と電子の再結合が要因となっている。このときの再結合の速度^[36]は式(3)で与えられる。

$$g_r(x, \hbar\omega) = \alpha(\hbar\omega) \frac{(\hbar\omega)^2}{4\pi^2 \hbar^3 c^2} \exp\left(\frac{-\hbar\omega}{K_B T}\right) \exp\left(\frac{eV}{K_B T}\right) \quad (3)$$

$g_r(x, \hbar\omega)$ は自然再結合率、 $\alpha(\hbar\omega)$ は吸収係数、 \hbar は換算プランク定数(ディラック定数)、 K_B はボルツマン係数、 e は電子の電荷、 V は電圧である。太陽電池の欠陥はその重大度に応じて、電流通過の減少や遮断が起こる。ただし、電流量の変化は順バイアス状態中に生じる。このような欠陥領域では正孔と電子の再結合が減少するか、全く起こらないため、近赤外線の放出量も減少するか、ゼロになる。欠陥セルは放射が少ないため、EL 画像では相対的に暗く表示される。一方、正常なセルは順バイアス下で正常な再結合を繰り返す。欠陥セルと比べて、より多い放射を放出するため、相対的に明るく表示される。すなわち、EL 画像の発光強度が太陽電池の健全性の指標になる。しかし、EL 発光を得るための環境条件は厳しい。放出された放射を撮影するためには、対象の近赤外線以外を遮る必要がある。そのため、EL 検査は夜間や暗所で行う必要がある。また、運転停止時に直流電源装置を接続して電流を注入するため、大規模な発電設備の場合はより大きい電流を注入できる装置が必要となる。

6. 実験手法の説明

6.1 使用機器の準備

6.1.1 スマートフォン型熱赤外線カメラ^[44]

IR イメージングで実際に使用する機器を図 23 に示す。これは、FLIR 製 FLIR ONE® Pro のスマートフォン用熱赤外線カメラである。機械システムの問題解決、水による不具合などの目に見えない問題を発見することができる。スマートフォンの充電差し込み口に接続することでサーモグラフィカメラとしての機能を果たす。対応する差し込み口の形状は、USB-C と Lightning の 2 種類ある。

使用方法は非常に容易である。対応アプリを使用するスマートフォンにインストールする。アプリ起動後にデバイスを接続する。これにより、スマートフォン画面にサーモグラフィが表示される。このとき使用しているカメラはスマートフォン本体のカメラではなく、デバイスについているカメラを利用する。このカメラによる熱画像解像度は 19200 ピクセルである。これにより、欠陥の詳細を確認できるようになる。



図 23 IR イメージング使用デバイス

6.1.2 EL 専用赤外線カメラの作成

(1) カメラの構造^{[45][46]}

EL イメージングでは、EL 発光を吸収できる専用カメラが必要である。しかし、市販の InGaAs の高感度カメラのような EL 専用カメラは高価である。そのため、本研究では、安価なデジタルカメラを EL 対応に改造する。

一般に我々が良く利用するカメラには、Si CCD または CMOS と呼ばれるセンサが搭載されている。これらはいずれもシリコンベースであり、この基盤には紫外線(UV: ultraviolet light)や近赤外線(NIR: near - infrared)を若干含む 350[nm]~1100[nm]の吸収度を持つ(図 22(b)参照)。しかし、本来のカラー画像を得るためには可視光領域外の波長を取り除く必要がある。このために余分な波長(UV や NIR)を取り除く除去フィルタが取り付けられている。このフィルタはホットミラーフィルタと呼ばれる。すなわち、ホットミラーフィルタは近赤外線を除去する役割があり、このフィルタを取り除くことで標準的な Si CCD センサでも近赤外線を撮影することができる。よって、Si CCD で受光でき、全波長をイメージングできるようになる。

図 24 は一般的なデジタルカメラのフィルタ部分の構造である。

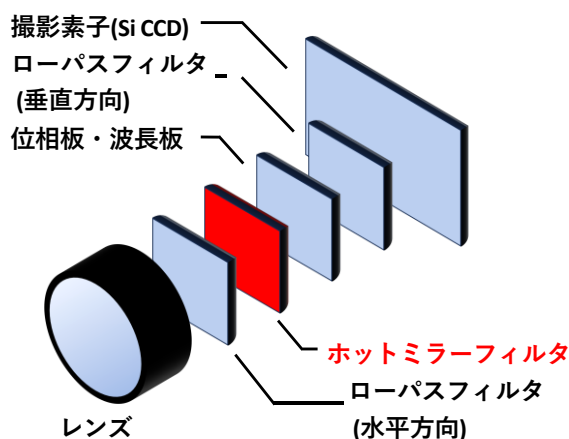


図 24 デジタルカメラの構造

(2) 改造工程^[47]

用意したカメラは、Panasonic 製 Lumix GF3 である。これは、流通量が多く安価であるため改造に最適である。以下に実際に行う改造工程を示し、ホットミラーフィルタの取り外しによるフルスペクトルカメラを作成する。図 25 は実際の改造工程の写真である。

- ① カメラの側面および下面のネジを取り外し、背面側のケースを外す。
- ② 裏パネルにある液晶モニターやダイヤルのフィルムケーブルに慎重に取り組む。
- ③ 基板上的ネジや Si CCD ユニットのフィルムケーブルを取り外す。(図 25(a))
- ④ 表面パネルと Si CCD ユニットを繋ぐネジを外し、Si CCD ユニットを取り外す。
- ⑤ 各フィルタを順番に取り出す。
- ⑥ Si CCD センサの表面に貼られたホットミラーフィルタを取り外す。(図 25(b))
- ⑦ ①~⑤の手順の逆を辿り、通電と動作確認を行う。

改造によって元の性能が失われる危険性があること、破損の際にメーカー保証の対象外となる。そのため、これらの工程は慎重に行われるべきである。実際に本研究でもカメラの改造に一度失敗しており、2 台目で EL 専用カメラを作成した。



(a)分解の様子 (b)ホットミラーフィルタの除去

図 25 カメラ改造の工程

6.1.3 IR カットフィルタ

フルスペクトルカメラから近赤外線のみを撮影するため、レンズにIR カットフィルタを組み合わせる。これによって、近赤外線以上の波長のみを撮影するカメラになる。すなわち、フルスペクトルカメラに IR カットフィルタを付けることで、EL 専用カメラが完成する。使用する IR カットフィルタは 2 種類用意する。表 1 はフィルタの規格を示す。ただし、IR の値はその数値以上の電磁波のみを通すことをいうため、数値が大きいほど通す電磁波の領域が少ないことを示す。また、図 26 は実際に使用したフィルタである。

表 1 IR カットフィルタの比較

メーカー	IR[nm]	厚さ[mm]
FOURTH EYE	950	52
ZOMEi	760	52



図 26 IR カットフィルタ^[48]

6.1.4 試験用太陽電池の規格

(1) 屋外IR イメージング

屋外 IR イメージングは本学豊洲キャンパス交流棟屋上にある太陽光発電設備を利用する。図 27 は実際のソーラーパネルである。これは、カネカ製の薄膜シリコン太陽電池モジュールを繋いでパネルを形成している。本学屋上には GNB221 と LSA091 の 2 種類を用いている。表 2 はモジュールあたりのこれらの規格を示す。

表 2 薄膜シリコンモジュールの規格の比較

電気的使用	GNB221	LSA091
公称最大電力[W]	60	37.5
公称最大出力動作電圧[V]	67	48.6
公称最大出力動作電流[A]	0.9	0.772A
公称開放電圧[V]	91.8 V	65 V
公称短絡電流[A]	1.19 A	0.866 A



図 27 薄膜シリコン太陽電池モジュール

(2) 屋内IR・EL イメージング

① 予備実験用

図 28 に使用した小型の多結晶シリコン太陽電池を示す。これは、市販の小型多結晶モジュールである。内部セルの配線は、20 個の太陽電池セルを 10 個ずつ 2 列に並列接続している。規格は、ピーク電力 3[W]、動作電圧 5[V]、出力電流:0-600[mA]である。製品の寸法は 18×15×1[cm] の 68[g]と小型である。

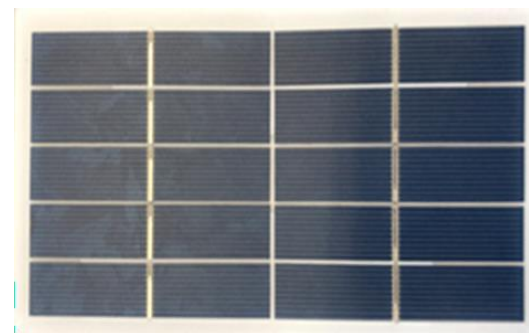


図 28 多結晶シリコン小型太陽電池

② 本実験用(単結晶シリコン太陽電池)

図 29 は RENOGY 製 RNG-10D-SS の単結晶シリコン太陽電池モジュールである。これは 10[W]の太陽電池であり、寸法は 27×34×2.5[cm]である。表 3 はこの規格をまとめたものである。ただし、温度 25℃を標準試験条件としている。また、セルは 16×2=32 個が用意されており、これを並列に 10 個接続していることが確認できる。

表 3 単結晶シリコンモジュールの規格

電気的使用	大きさ
公称最大電力[W]	10
公称最大出力動作電圧[V]	17.5
公称最大出力動作電流[A]	0.57
公称開放電圧[V]	21.6
公称短絡電流[A]	0.62

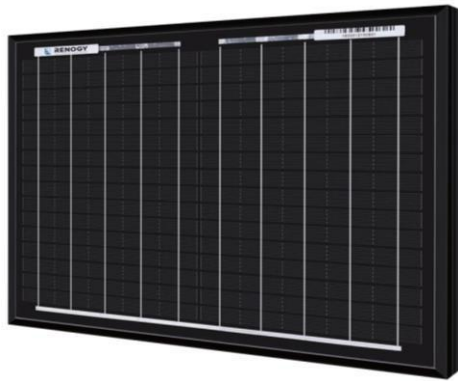


図 29 単結晶シリコン太陽電池モジュール

③本実験用(多結晶シリコン太陽電池)

図 30 は京セラ製の LA261K54S の多結晶シリコン太陽電池モジュールである。これは 54[W]の太陽電池であり、表 4 にこの規格をまとめる。セル数は 36 枚で構成されている。

表 4 多結晶シリコンモジュールの規格

電気的使用	大きさ
公称最大電力[W]	54.1
公称最大出力動作電圧[V]	16.9
公称最大出力動作電流[A]	3.20
公称開放電圧[V]	21.5
公称短絡電流[A]	3.35



図 30 単結晶シリコン太陽電池モジュール

④ その他の仕様機器

- ・ 直流安定化電源

高砂製作所 GP0110-10R の直流電源装置を用い、図 31 に示す。この装置のスペックは、電圧 0~100[V]、電流 0~10[A]、最大入力電圧 3[kV]である。



図 31 直流安定化電源

- ・ デジタルマルチメータ

直流安定化電源から注入した電流はデジタルマルチメータを用いて値を確認する。電源装置は値がアナログ表記の為、これを用いる。SANWA 製デジタルマルチメータ CDS-820 形の仕様を表 5 にまとめる。

表 5 デジタルマルチメータの仕様

DC 電圧[V]	200m/2/20/200/1000
AC 電圧[V]	2/20/200/750
DC 電流[A]	2m/20m/200m/12
AC 電流[A]	2m/20m/200m/12
抵抗[Ω]	200/2k/20k/200k/2000k/20M

6.2 実験方法

6.2.1 IR イメージング

IR イメージングは、スマートフォン型熱赤外線カメラを用いて行うだけであり、検査方法は非常に容易である。このとき、カメラアライメントを調整する。カメラアライメントとは、表示されたサーモグラフィ画像と可視光画像のずれを補正する。表示画像のカラーパネルを選択し、実験者の求める画像を得られるようにする。図 32 は実際の IR イメージング時の様子を示す。



図 32 IR イメージングの様子

6.2.2 EL イメージング

(1) カメラ設定

EL イメージングは、従来の写真撮影と同様に優れた画像を得るためにカメラの設定を行う。以下は主なパラメータを示す。

- F 値
F 値は別名絞り値とも呼ばれる。この値が低いと絞りが開かれて光が多く取り込めるようになる。すなわち、カメラが取り込む光量を調整する役割を持つ。また、ピントを合わせる機能もあり、明るさとボケ具合を調整できる。
- シャッタースピード(SS)
シャッタースピードはその名の通り、シャッターが開いている時間を示す値である。これが遅いほど多くの光を取り込み、画像は明るくなる。
- ISO 感度
ISO 感度とは、カメラが光をとらえる感度を表した値である。これが高いほど、シャッターで処理できる光量が増幅し、少しの光でも明るく撮影することが可能である。

これらのパラメータの設定には細心の注意が払われるべきである。まず、対象の太陽電池がカメラフレーム内に収まるようにズーム値を設定する。太陽電池のグリッドフィンガーをターゲットとしてピントを合わせる。ISO 感度を 200 などの低い値から始め、F 値をできるだけ大きく設定する。露出度がゼロになるまでシャッタースピードを設定する。このとき、シャッタースピードの設定で露出度がゼロにならないバイ委は ISO 感度を上げる。本実験では、ISO 感度を 800、シャッタースピードは 60 に設定することで適切な写真を得た。

(2) 撮影手順

図 33 のように各実験機器を準備する。このとき、EL 発光以外の電磁波が干渉しないように照明を消した暗所で行う。このときの気温は 25°C 近くに設定し、太陽電池の標準試験条件で行う。その後、接続した太陽電池モジュールに順方向バイアスに太陽電池仕様の短絡電流 I_{sc} と同じ大きさの電流を注入する。

電流注入後にマルチメータで電流と電圧の値を確認し、適切であれば撮影を行う。撮影中は常に電流を注入し、撮影後に必ず電源装置を切る。撮影した写真を確認し、EL 発光が少ない場合は、電流量を増やして EL 発光を多くする。しかし、太陽電池への過度な電流注入や電圧の印加は太陽電池の破損につながるため注意が必要である。



図 33 EL イメージングの様子

(3) 故意的な欠陥の作成

EL イメージングにおいて欠陥が正しく欠陥として確認することができるかを確認するために、故意的に欠陥を作成する。欠陥作成において、太陽電池モジュールの構造を理解することが重要である。4 章で述べたように、太陽電池モジュールの表面は外部環境の影響を防ぐために様々な工夫がされている。そのため、欠陥の作成は表面から行わず、背面から衝撃を加えることで行う。実際、運用中の太陽電池モジュールが背面からの衝撃を受けることは少ない。欠陥作成は図 34 のようにして行う。バックシートからの圧力をかけるときは慎重にゆっくり局所的に行う。これは、圧力を急激に加えると目的のセル以外に広がる危険があるためである。



図 34 欠陥の作成方法

7. 実験結果

本章では、太陽電池モジュールの健全性を検査するために、IR 画像と EL 画像を比較した結果について述べる。IR 画像は実験室と屋外の両方で撮影した。屋外 IR イメージングは運用時におこなうが、屋内 IR イメージングは電流注入時(EL イメージングと同時に)行ったものであることに注意する必要がある。以上、両手法の利点と課題について簡単に説明し、太陽電池検査における各手法の実用性を確認する。

7.1 屋外 IR イメージング

図 35 は屋外 IR イメージングの実験結果である。私たちは、本学の屋上に設置された太陽電池モジュールの屋外熱赤外(IR)イメージングを実施した。この調査の目的は、実際の環境下で太陽電池モジュールの性能を評価し、発電効率に影響を及ぼす可能性のある潜在的な問題を特定することである。

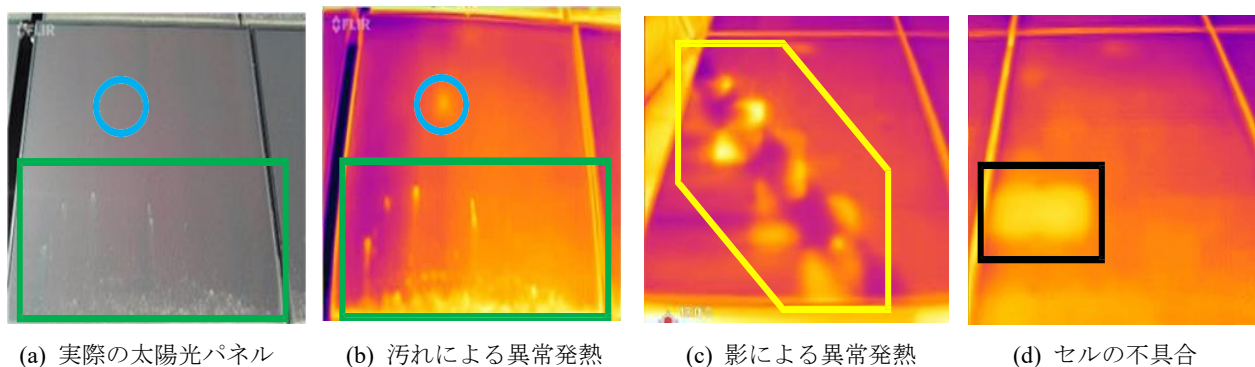
図 35(b)は太陽電池モジュールの IR 画像で、表面にホコリが蓄積してホットスポットが形成されている。このホットスポットは緑色枠内に示す。モジュールの下部側に汚れがたまっていることが確認することができ、この位置の欠陥は他のモジュールでも多く見ることができた。

これらのホットスポットは局所的な過熱を示しており、モジュール全体の発電効率を低下させる可能性がある。同じ太陽電池モジュールの通常画像である図 34(a)では、ホコリの堆積が観察できる。

図 35(c)は、IR 画像による太陽電池モジュールへの遮光の影響を示している。本学周辺には高層ビルが多くたっている。それらの建物による遮光によってモジュール表面の太陽光偏在が生じ、一部のセルの発電出力が低下する。この太陽光の不均衡な入射はホットスポットの形成につながり、影になったセルにさらなる負荷を与える。ホットスポットは黄色枠線内で示す。これにより、長期的な劣化を引き起こし、モジュールの全体の発電効率を低下させる可能性がある。

図 35(d)の IR 画像では、2つの太陽電池セルが周囲のセルに比べて高い温度を示している。これらは黒枠線内で示す。さらに調査を進めると、これらのセルが損傷していることが確認された。これは、クラック、製造上の欠陥、または経年劣化によるものである可能性がある。損傷したセルは電流の流れを妨げ、太陽電池モジュール全体の性能低下につながる可能性がある。このような欠陥は図 35(a), (b)にも存在する。水色枠線内にこのホットスポットを示す。このホットスポットも同図(a)と比較すると、汚れや影は確認されない。そのため、内部不良などのモジュール自身の問題で生じたホットスポットであると考えられる。

IR 画像を使用した屋外太陽光発電検査には、性能上の問題をリアルタイムで実際の動作条件下で検出できるなど、いくつかの利点がある。この方法により、問題を迅速に特定して修正することができるため、最適な効率を維持し、モジュールの寿命を延ばすことができる。しかし、気温の変動や太陽光の角度の変化など、さまざまな環境条件がIR 画像の精度と解釈に影響を与えるため、課題も生じます。さらに、太陽光発電設備へのアクセスや、屋上での検査中の安全上のリスクの可能性も、さらなる課題となる。



(a) 実際の太陽光パネル

(b) 汚れによる異常発熱

(c) 影による異常発熱

(d) セルの不具合

図 35 IR イメージング実験結果

7.2 屋内 IR・EL イメージング

7.2.1 小型太陽電池モジュール

屋内実験では、市販の小型多結晶モジュールを使用した。画像は、モジュールに 0.70[A]の順バイアス電流を供給した後に撮影した。図 36(a)は、モジュールの可視画像で、2本のバスバーが赤で示されている。図 36(b)では、順方向バイアス電流接続で暗い場所で撮影した IR 画像から、バスバー周辺の領域がより多くの熱エネルギーを放出しており、最高温度は 52.3°Cに達していることがわかる。温度差は画像で明らかだが、セルの本質的な損傷を明らかにすることはできない。図 36(c)は同じモジュールの EL 画像で、マイクロクラック(X)、破損したセル(Y)、材料的欠陥(Z)などの欠陥がはっきりと見える。これらの欠陥部分は発光しないため、完全に暗く見える。ここで、(Z)の大きく発効がない箇所を材質的欠陥としたが、これは入力電流を大きくしてもこれ以上の EL 発光が得られなかったためである。具体的には、入力電圧を動作電力の 3 倍値(15[V])近くまで印加させたが発光が得られなかった。

以上より、バスバー付近では電流量が多いため EL 発光と発熱が大きく、バスバーから離れた箇所では電流の流入が少なかったと考えられる。すなわちグリッドフィンガーによるバスバーからセルへの流入が適切に機能していないといえる。このため、このパネルの発電は、バスバー付近のセルのみで行われ、発電効率は非常に低いと考えられる。

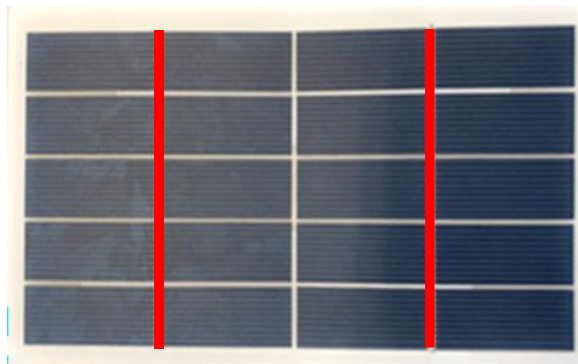


図 36-(a) 使用する小型太陽電池

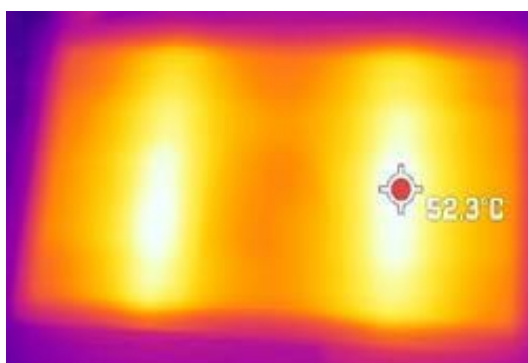


図 36-(b) IR 画像(小型太陽電池)

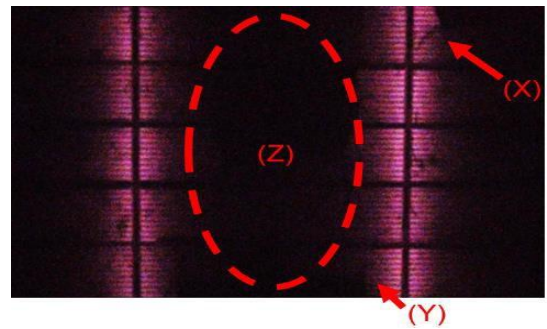


図 36-(c) EL 画像(小型太陽電池)

図 36 屋内 IR・EL イメージング結果(小型太陽電池)

7.2.2 単結晶シリコン太陽電池モジュール

欠陥生成の前に、EL イメージングにより十分な EL 発光が観察されていることを確認する(図 37(a))。このとき、EL 発光の量についても確認する必要がある。EL 発光において(1)IR カットフィルタの大きさ、(2)印加電圧量・注入電流量の大きさ、の 2 つは発光量に大きく影響する。図 38 はこの比較による発光量の差を示す。この時点で検出できた欠陥はマイクロクラック(赤円内)のみでその他の欠陥は確認できなかった。このとき、図中の黄色い線は同じバスバーを示す。欠陥生成後の PV パネルを図 37(b)に示すが、作成した欠陥は赤丸で囲んである。

図 37(c)は欠陥生成後の IR 画像、図 37(d)は EL 画像である。どちらの画像からも、モジュールに欠陥が形成されていることがわかる。図 37(b)から、周囲に比べて発熱が減少していることがわかる。これは、欠陥が PV モジュール内の回路を破壊し、欠陥のあるセルに流れる電流量を減少しているためである。

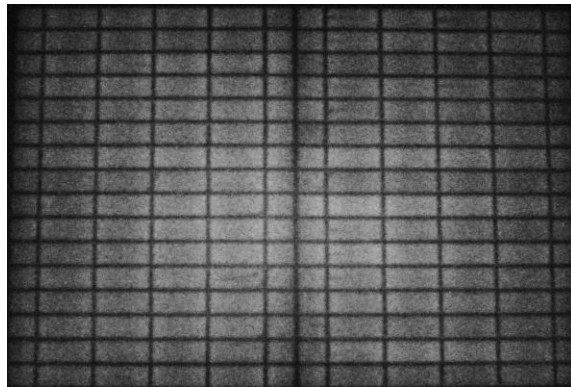
図 37(c)から、欠陥からの EL 発光は全く見られず、欠陥が正しく識別されていることがわかる。これは、発光の特徴からセルが電気的に絶縁されていることを示しており、どのセルが損傷しているかを特異的に認識することが可能である。これは IR 画像との大きな違いである。

7.2.3 多結晶シリコン太陽電池モジュール

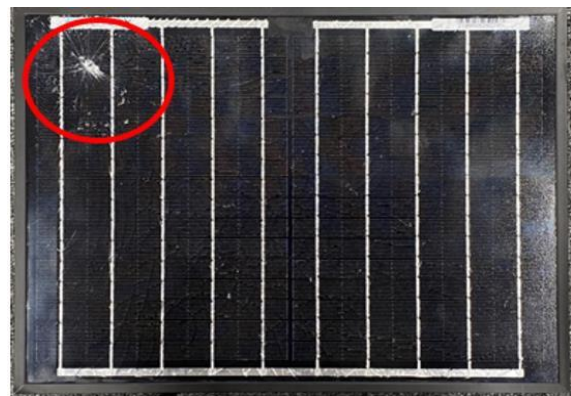
多結晶シリコン電池の実験は適切に実行されたが EL 画像を得ることができなかった。規格に示された値の連流を注入しても表面温度の上昇は確認できず、EL 発光を確認することもできなかった。考えられる原因として以下 3 点が主に挙げられる

- ① 多結晶シリコンのためシリコンの含有量が少なく、EL 発光が少ない
- ② 製造年が 1995 年のため機器内部の配線の経年劣化
- ③ 半導体の性質上、定電圧(CV: constant voltage)状態になり電流量の増加とともに電圧を増加できなかったことによる電圧不足

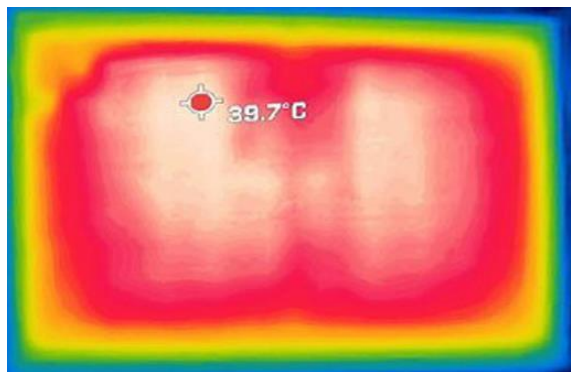
よって、多結晶シリコン太陽電池モジュールでの検査結果を得ることができなかった。



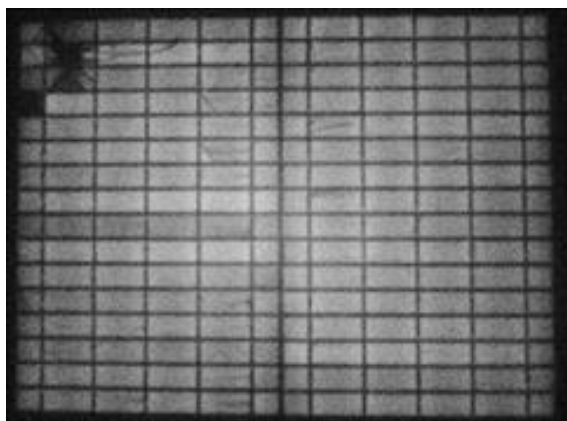
(a) EL 画像(欠陥生成前)



(b) 欠陥を作成した太陽電池モジュール



(c) IR 画像(欠陥作成後)



(d) EL 画像(欠陥作成後)

図 37 屋内IR・EL イメージング結果(単結晶シリコン)

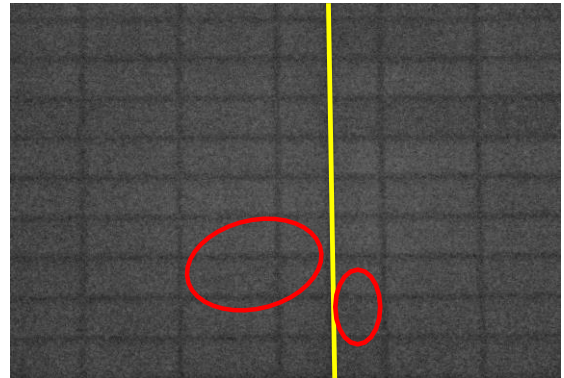


図 38-(1-a) 950[nm]使用時

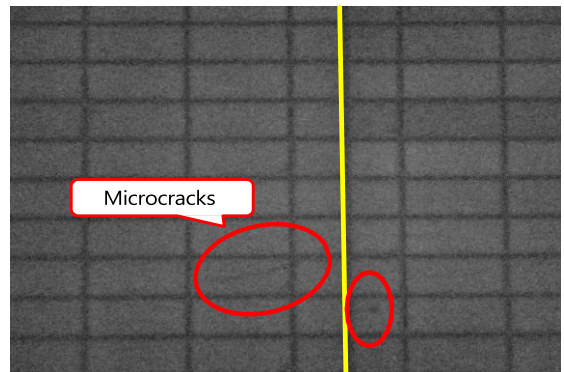


図 38-(1-b) 760[nm]使用時

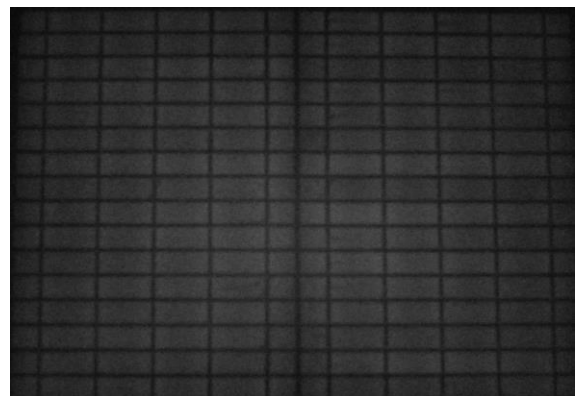


図 38-(2-a) 24.0[V]印加時

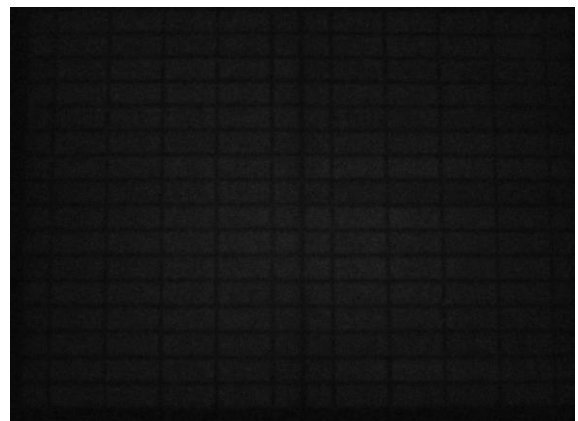


図 38-(2-b) 22.0[V]印加時

図 38 環境による発光量の変化

8. 実験における考察・検討

太陽光発電検査用の屋内 IR および EL 検査には、複数の利点がある。例えば、制御された環境条件により、より正確で一貫性のある結果が得られる。さらに、屋内試験では欠陥や性能上の問題を詳細に分析できるほか、生産から使用済みまで、ライフサイクルのさまざまな段階でモジュールを試験できる。

しかし、屋内 IR および EL 試験には課題もある。これには、この研究でPanasonic GF3 で実証されたように、専用機器の必要性やカメラの改造が挙げられる。さらに、EL 撮影には外部順方向バイアス電流の印加が必要なため、大規模な設備では試験の拡張性が制限される可能性がある。加えて、屋内試験は管理された条件下で実施されるため、環境条件が変化した場合に発生する問題や現実の動作条件を完全に再現できない可能性がある。

結論として、本実験の結果は、EL イメージングを採用することで、IR イメージングの能力を凌駕し、より包括的な範囲の異常を検出できることを示している。とはいえ、各手法の準備工程に違いがあることから、検出プロセスの特定の条件に基づいて最適な手法を選択することが極めて重要である。さらに、市販のデジタルカメラを EL 機能に変換する簡単で費用対効果の高い方法についても詳しく説明した。

しかし、屋外と屋内のイメージング手法には、それぞれ独自の利点と課題がある。屋外でのテストは、さまざまな環境条件の影響を受ける可能性があり、屋内でのテストは特殊な装置を必要とし、実際のシナリオを完全に再現できない可能性がある。それぞれの手法に関連する課題に対処し、それぞれの長所を活用することで、太陽光発電検査へのこの包括的なアプローチは、太陽光発電設備の最適化と長寿命化に貢献することができる。

9. OpenCV による画像解析

9.1 OpenCV とは^[49]

OpenCV(Open Source Computer Vision Library)は Intel 社によって開発されたオープンソースのコンピュータビジョンおよび機械学習ソフトウェアライブラリである。すなわち、OpenCV が視覚情報の処理や動画の解析、機械学習に利用されるためのオープンソースのライブラリである。このライブラリは、画像処理やコンピュータビジョン、機械学習の様々なタスクをサポートするために開発され、誰でも利用できるように提供されている。

OpenCV には、2500 以上の最適化されたアルゴリズムが含まれており、古典的なものから最先端のコンピュータビジョンおよび機械学習アルゴリズムまで包括的なセットが備わっている。これらのアルゴリズムは顔の検出と認識、オブジェクトの識別、ビデオ内の人間の行動

の分類、カメラの動きの追跡、オブジェクトの 3D モデルの抽出など様々なタスクに利用できる。OpenCV は、複数のプログラミング言語(C++, Python, Java, MATLAB)に対応しており、異なるオペレーティングシステム(Windows, Linux, Android, Mac OS)で使用できる。これにより、開発者は好みやプロジェクトの要件に合わせて最適なプログラミング言語やプラットフォームを選択できるようになる。

9.2 画像解析に長けている理由

画像処理や解析のライブラリは OpenCV 以外にも存在する。例として PyTorch や MATLAB Image Processing Toolbox などがある。しかし、これらは一部の特定の用途に特化したライブラリやフレームワークであり、専門分野において最適化されているものが多い。例えば、PyTorch はディープラーニングに焦点を当てたライブラリであり、MATLAB Image Processing Toolbox は MATLAB 環境で使用できる画像処理に特化したツールボックスであり、これらはそれぞれ専門分野の要件に特化している。そのため、広範な画像処理タスクを利用する本研究では利用しない。

OpenCV が優れている点として、様々な画像処理アルゴリズムや機能を提供している点が挙げられる。これにはエッジ検出、特異点検出、物体検出、顔検出、画像変換、フィルタリング、ヒストグラム処理などが含まれる。これらのアルゴリズムは、基本的なものから高度なものまで、幅広い画像処理タスクに対応している。また、OpenCV は画像処理の前処理ができる。画像解析において前処理は非常に重要であり、データを整えてアルゴリズムがより効果的に学習できるようにする作業である。これには、ノイズの削減、欠損データの処理、画像の正規化などが含まれる。これらの前処理手法を使用することで、クリーンで適切なデータを機械学習モデルに供給し、機械学習の精度を向上させることができる。これらの理由より、本研究では OpenCV を選択する。

10. 画像解析

10.1 開発環境

開発環境は、ソフトウェアやアプリケーションを開発するための作業環境やツールの組み合わせを指す。開発環境の重要な要素として、プログラミング言語の他に、重要な要素となるものが統合開発環境 (IDE: Integrated Development Environment) である。

10.1.1 使用言語

使用するプログラミング言語は Python である。Python の構文はシンプルで読みやすく、初学者にも理解しやす

い特徴がある。これにより、迅速な開発とコードの保守性を向上させることができる。また、広大な開発者コミュニティが存在し、多くのオープンソースプロジェクトや資源が利用可能である。豊富なドキュメンテーションも提供されており、学習とトラブルシューティングが容易である。

10.1.2 統合開発環境

IDE は開発者がプログラミングやバックなどの作業を効率的に行うためのツールである。本解析では、Python 専用 IDE の Spyder(Scientific Python Development Environment)を用いる。これは、データサイエンスや計算に特化したオープンソースである。この Spyder を選択した理由は主に 3 つある。

1 つ目は、データサイエンスライブラリの統合である。Spyder は NumPy, SciPy, Pandas, Matplotlib, Scikit-learn など、データサイエンスに関連する豊富なライブラリと統合されている。これにより、画像データの効果的な処理、解析、可視化を容易に行うことができる。

2 つ目は、高速性である。Spyder はプロジェクトのサイズや複雑さに関係なく、PyCharm などの他の IDE に比べて高速である。他の IDE ではデフォルトで多くのプラグインがインストールされているため、多くのシステムリソースを消費する。そのため、パフォーマンス向上において、Spyder は特に大規模なデータセットや複雑なデータ分析プロジェクトにおいて優れているとされている。

3 つ目は自動コード補完とコード分析である。コード補完において、Spyder はコードを入力する際に、変数、関数、メソッド、モジュールなどのコード要素に対する自動コード補完を提供する。入力を開始すると候補を表示し、補完を自動で確定させることができる。コード分析において、静的解析を行い、潜在的なエラーや警告、最適化の提案などを行う。これらの機能により、効果的に Python コードを書くことができるようになる。

10.2 使用手法の説明

10.2.1 画像の前処理

① Gaussian フィルタ^[50]

Gaussian フィルタは画像の平滑化、ノイズの軽減に使用されるフィルタの一種である。これはガウス分布を利用している。この手法は、画像内の各ピクセルの値を、その周辺ピクセルの値の重みつき平均で置き換えることで、画像全体を滑らかにする効果がある。ほかす際は、式(4)のガウス関数を用いて周辺ピクセルの重みづけを行う。

$$G_{\sigma}(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4)$$

x, y はピクセルの中心からの距離、 σ は標準偏差、 σ^2 は分散を示す。Gaussian ぼかしでは、各ピクセルにおいて周

辺領域の値に Gaussian 関数の重みをかけ、それを合計して正規化する。この際、標準偏差 σ が Gaussian 関数の「幅」を制御する。これが大きい場合は周辺領域を広く捉え、小さい場合は周辺領域を狭く捉える。これにより注目画素の周囲情報を用いて平滑化を行う。この平滑化によって、画像中のノイズを軽減し、画像の鮮明化を図る。

② CLAHE^[51]

Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization の略称で CLAHE と呼ばれる手法がある。これは、コントラスト制限付きヒストグラム平坦化と呼ばれる。この手法の特徴として、他のヒストグラム平均化 (HE: Histogram Equalization)の手法よりも優れている。この理由として、局所的な適応性が挙げられる。通常のヒストグラム平均化は画像全体に一律に適用されるため、局所的な特性に対する適応性が制限されることがある。一方、CLAHE は画像を小さな領域(タイル)に分割し、領域ごとにヒストグラム平均化を行う。これにより、画像内で異なる部分での光の変動やコントラストの差異に対して適応することができる。例えば、明るい領域と暗い領域を持つ画像において、CLAHE はそれぞれの領域に適したコントラスト調整を行うことができる。これと同時に領域ごとに細部の強調を実現できる。これによって、画像内の微細な特徴を視覚的に際立てることができる。また、ノイズの調整も領域ごとに行われるため、ノイズの発生が抑制され、局所的な領域でのノイズの影響を軽減することができる。すなわち、画像内の異なる領域や構造に対して効果的なコントラスト調整を行うことができ、視覚的な品質向上に寄与できる。

③ グレースケール変換

グレースケール変換の主な目的は、カラー画像から色情報を取り除き、各画素を単一の輝度値で表現することである。これにより、画像が持つ情報を簡略化し、画像処理やコンピュータビジョンのタスクを効果的に行うことができる。カラー画像は通常、各画素が複数の色成分(赤、緑、青)で構成されている。しかし、特定のタスクやアルゴリズムにおいては、色情報よりも単純な輝度情報が重要なことがある。例えば、エッジ検出や物体検出の場合、輝度の変化が注目されることが多く、カラー情報が加わるとエッジ検出がより複雑になる。また、グレースケール画像は、カラー画像よりもメモリ使用量が少なく、計算が効率的に行えるため、画像処理アルゴリズムの実行が高速化されるようになる。

以上の前処理によって、ノイズが軽減された画像の特定の構造やパターンが目立つようになり、効果的な画像解析に貢献する。

10.2.2 使用手法

①Canny エッジ検出^[52]

Canny エッジ検出法は、エッジの位置を高い精度で検出することができる。非常に細かいエッジや曲線も正確に検出できるため、高い品質のエッジ画像を生成する。この検出法は主に以下のステップで行われる。

①-1. Gaussian フィルタによる平滑化

①-2. Sobel フィルタによるエッジ強度・勾配方向の計算
平滑化された画像から Sobel フィルタを使って縦方向 G_x と横方向 G_y に 1 次微分を得る。これは、式(5)と式(6)のようにエッジ強度 I の勾配方向 θ を求める。

$$I(x, y) = \sqrt{G_x(x, y)^2 + G_y(x, y)^2} \quad (5)$$

$$\theta(x, y) = \tan^{-1} \left(\frac{G_y(x, y)}{G_x(x, y)} \right) \quad (6)$$

$G(x, y)$ は Gaussian カーネルであり、前出の $G_\sigma(x, y)$ と同じである。

①-3. 非極大値抑制によるエッジの細線化

これは、非極大値抑制 (NMS: Non-Maximum Suppression) を用いてエッジの勾配方向において極大値を抽出する方法である。すなわち、エッジが検出された領域をより細かくするプロセスであり、これによりエッジを強調することができる。勾配方向 θ に垂直な方向のピクセルを取り出し、近くのピクセルの値を内挿して滑らかな方向の値を取得する。エッジ強度 I の局所的な極大値を検出し、極大値でないピクセルを抑制し、エッジを強調する。残ったエッジに再度ヒステリシス閾値処理を適用して最終的に強いエッジを残す。

①-4. ヒステリシス閾値処理

ヒステリシス閾値処理は、弱いエッジを取り除き、また、分割されたエッジを結合するために使用される。エッジを結合するためには、高い閾値よりも大きいピクセルで始めて、すべての 8 方向の隣接ピクセルを検索する。もし隣接ピクセルの値が低い閾値よりも大きい場合、それもエッジとなる。式(7)はこれを分かりやすくまとめたものである。

$$E(x, y) = \begin{cases} 1 & (I(x, y) \geq t_{High}) \\ 0 & (I(x, y) < t_{Low}) \end{cases} \quad (7)$$

$$E_{connect}(x, y) \quad (t_{Low} \leq I(x, y) < t_{High})$$

$E(x, y)$ は最終的なエッジのマップ、 t_{Low} は低い閾値、 t_{High} は高い閾値、 $E_{connect}(x, y)$ は弱いエッジに接続される場合の処理を表す。ただし、このときの閾値の範囲は $0 < t_{Low} < t_{High} < 1$ である。

② Hough 変換による直線検出^{[53][54]}

Hough 変換は、画像中の直線や円などの形状を検出する手法である。Hough 変換では画像空間から ρ - θ パラメータ空間への変換を行うことで、図形要素を抽出する。画像空間中の直線を垂角 θ 、原点からの直線までの距離 ρ を用いて、式(8)のようにパラメータ化する。

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (8)$$

(x, y) は画像上の点の座標を示す。ただし、 $0 \leq \theta < \pi$ である。この θ と ρ に具体的な制約を加えることで、特定の直線を一意に識別できる。このとき、識別にはエッジの投票を用いる。画像上のエッジが、そのエッジが通る可能性がある直線のパラメータに投票する。つまり、エッジが直線上にあると思われる方向や位置に票が集まる。Hough 変換は、強い投票を受けたパラメータに強く対応する直線が存在すると考える。そのため、エッジが強く投票された方向や位置に対応する直線が特定されやすくなる。これによって、パラメータ空間での Hough 変換結果を元の画像空間に明確に対応づけることが可能になる。すなわち、エッジがどの直線に対応しているかを決定するためにエッジが投票し、より強い投票を受けた直線が検出される。

③透視変換^[55]

透視変換(Perspective Transformation)の原理は、物体が視点から遠くにある場合に発生する透視投影を数学的に補正することにある。この変換は、3D 空間内の物体を 2D 画像上に射影するために使用され、通常は透視投影の歪みの修正を実現することに用いられる。これは、ユーザーが選択した変換前と変換後の座標に基づいて導出される。

変換前の座標を (x, y) 、変換後の座標を (u, v) とするとき、変換行列は式(9)のように表すことができる。

$$M = \begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \end{bmatrix} \quad (9)$$

変換前後の座標の関係を行列式で表すと式(10)ようになる。

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = M \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

ここで、変換前後の対応する 4 つの点を考える。対応は、 $(x_n, y_n) \rightarrow (u_n, v_n)$ であり、 n は 1,2,3,4 の 4 点である。これらの対応点を用いて u, v は式(11)で表せる。

$$u_n = \frac{ax_n + by_n + c}{gx_n + hy_n + i} \quad (11-1)$$

$$v_n = \frac{dx_n + ey_n + f}{gx_n + hy_n + i} \quad (11-2)$$

ただし、 $n = 1,2,3,4$ である。これらの方程式を解くことで、変数 $a, b, c, d, e, f, g, h, i$ を求めることができる。これによって、

等価変換行列を得ることができる。このとき、 i は 1 になる。これによって、3D 空間内の物体を 2D 画像上に射影変換された画像を生成することが可能になる。

④ 輪郭検出^{[56][57]}

輪郭検出は、画像中の物体や形状の境界を抽出する。これはエッジ検出と類似するが、これらは異なる概念である。エッジ検出は画像中のエッジを抽出する手法であり、その結果としてエッジ情報が強調された画像が得られる。一方、輪郭検出は物体の形状を抽出し、その境界を表現する。特に違う点が輪郭検出では二値化を用いることである。

二値化は画像処理の一般的な手法であり、画像中の情報を白と黒の 2 値で表現することを指す。二値化は別名、閾値処理とも呼ばれ、グレースケール画像の各ピクセルに対して閾値を設定し、その値に基づいてピクセルを白(225)か黒(0)に変換するプロセスである。これは式(12)で容易に示す。

$$g(x, y) = \begin{cases} 255 & (f(x, y) > T) \\ 0 & (f(x, y) \leq T) \end{cases} \quad (12)$$

$f(x, y)$ は入力、 $g(x, y)$ は出力、 T は閾値である。この閾値の設定は、手動で行われ、画像の明るさに基づいて適切に調整する必要がある。例えば、グレースケール画像のピクセル値が $f(x, y) = 90$ 、閾値 $T = 100$ の場合、ピクセル値が閾値を超えていないため出力 $g(x, y)$ は 0 になり、黒として出力される。このように、式(12)に基づいて各ピクセルに対して二値化が行われ、画像を白と黒に分ける。これにより、輪郭が強調され、輪郭の検出を効果的に実行することができる。これにより、式(12)の場合は閾値より大きい範囲の輪郭を描写することができる。しかし、この二値化は逆に行うこともでき、閾値以下の箇所を範囲として描画対象にすることも可能である。

11. イメージングへの応用

11.1 解析方法

本稿で用いた Python スクリプトは、OpenCV を使用して撮影した画像の処理を行い、透視変換と輪郭検出および直線検出を実行する。直線検出は、セルの特定を補助するものである。太陽電池モジュールのバスバーを直線として検出し、セルに分割する。これにより、モジュール内のセルを個別で確認することができ、欠陥セルの特定に大きく役立つ。輪郭検出は、IR イメージングによって発見されたホットスポットや、EL イメージングによって

発見された欠陥の検出に役立つ。これらの欠陥の特徴は周辺情報と比較することで検出と識別できる点である。そのため、これらの欠陥は画像解析により効率的に発見できる。ただし、入力画像には欠陥を含む画像を用いる。

11.2 スクリプトの概要と出力画像

直線検出と輪郭検出いずれの場合においても、画像の鮮明化は画像の前処理として実行される。画像処理におけるノイズ除去では、Gaussian フィルタを採用し、画像の鮮明化を行う。これと同時に CLAHE を用いてコントラストを拡張する。これらは、画像解析の精度向上、視覚的な品質向上に大きく貢献する。また、解析時にトラックバーを場面上に表示する。このトラックバーの操作では、即座に閾値を変更し、出力に反映させることができる。これにより、出力を確認するたびにコード内の数値を書き換える作業を減らし、効率化を図った。

11.2.1 セル分割(直線検出)

画像から直線を検出し、描画するプログラムを利用する。これは、画像の読み込み、エッジ検出、Hough 変換を使用して直線を検出し、特定の条件で直線を描画する。Canny エッジ検出と Hough 変換を適用して、画像内の直線を検出する。検出した直線は特定の条件に基づいて描画される。これは直線の種類で条件を絞る。

直線の分類では、直線の長さや方向による分類を行う。直線の描画において、明らかに短い直線は描画する必要がない。これは、短い直線の描画を可能にすると、出力画像に多くの線分が描画され、乱雑な画像になってしまう。これを防ぐために短い直線を除外する。実際は 1000 ピクセル以下の直線を除外した。これは、使用画像によって適宜調整される必要がある。

方向による分類は、角度に基づいて垂直または水平に分類される。分離の後、角度の差が一定以下でかつ直線同士の距離が一定以下のものが近いとみなす。これにより、画像内の似たような方向や位置にある直線がフィルタリングされる。このフィルタリングのために角度の差と直線同士の距離を利用する。具体的には、直線同士の角度が 45° 、距離が 15 ピクセル未満の場合は直線同士が近いと判断し、フィルタリングの対象とする。

以上の工程を経て解析した結果を図 39 に示す。これは EL イメージングで撮影された画像を入力画像としている。IR イメージングはその解像度の低さからモジュール内のバスバー(セルの仕切り)を確認することができないため使用しない。このとき、閾値は 100 にすると直線が適切に描かれ、セルを適切に分割することができている。描画条件を設定したことにより、重複する直線を大幅に減少させることができている。しかし、完全にフィルタリングはできておらず、いくつか重複している直線も存在している。

この直線検出による描写によって、出力画像でセルの位置を特定することができる。また、採番することで欠陥セルを確実に識別することができる。図 40 は採番した例である。赤色は電氣的絶縁欠陥、黄色はマイクロクラック、青色はその他の破損セルを表している。このように、欠陥セルの特定に加えて、情報管理にも貢献できる。

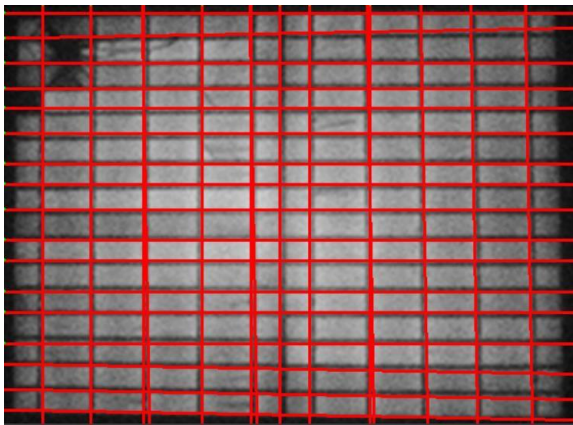


図 39 セル分割の解析結果

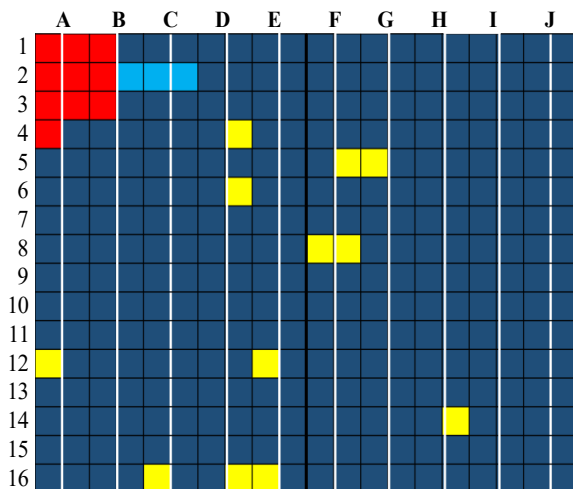


図 40 採番の例

11.2.2 輪郭検出

透視変換は、マウスで選択した 4 点を使用して透視変換行列を計算する。この 4 点選択は、マウスイベントのコールバック関数を利用したマウス操作によって行う。このとき、解析対象のモジュールの角を 4 点選択する。太陽電池モジュールの欠陥診断において、セルの特定は非常に重要である。しかし、完全な垂直で撮影することは難しく、写真は歪んでしまうことが多い。この問題の解消のために透視変換を用いる。これにより、撮影画像の歪みを補正し、セルの位置や寸法を正確に計測することが可能になる。

透視変換された画像に対してさらに欠陥検出のための処理が行われる。欠陥検出には輪郭検出を用いる。IR イメージングと EL イメージングはいずれも欠陥箇所が視覚的な特徴を持ち、周囲と比べることで検出できる。ただし、この検出も直線検出と同様に特定の条件に基づいて描写を行う。これは、最小の輪郭面積以上の面積をもつ輪郭のみを描写するという条件である。これを設定しない場合、出力画像には微小な点のような輪郭やセルの切れ目の輪郭などを描写し、欠陥以外の正常な部分を描写してしまう。これも直線検出と同様に乱雑な画像になってしまう。そのため、この処理を行うことで、出力画像を整頓した。しかし、これによって微小な欠陥を描写できなくなる。

輪郭描写は屋外IR イメージングと屋内EL イメージングの画像を入力画像とする。出力画像には、輪郭描写の他に、欠陥がパネル全体に占める割合を出力画像内に描写する。これにより、感覚的だけでなく定量的に欠陥を確認することができる。この結果を図 41 に示す。ただし、IR イメージングと EL イメージングでは、対象の色の範囲が逆である。このため、閾値値を超えるピクセルをIR イメージングの場合は白、EL イメージングの場合は黒に設定する。これにより、IR イメージングでは明るい箇所が欠陥として描写され、EL イメージングでは暗い箇所が欠陥として描写されるようになる。

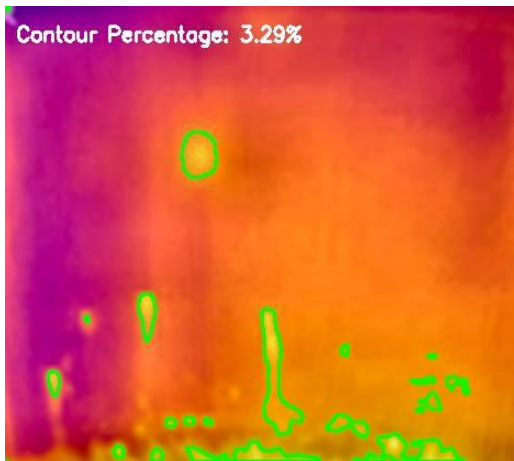


図 41-(a) IR 画像(T=160)

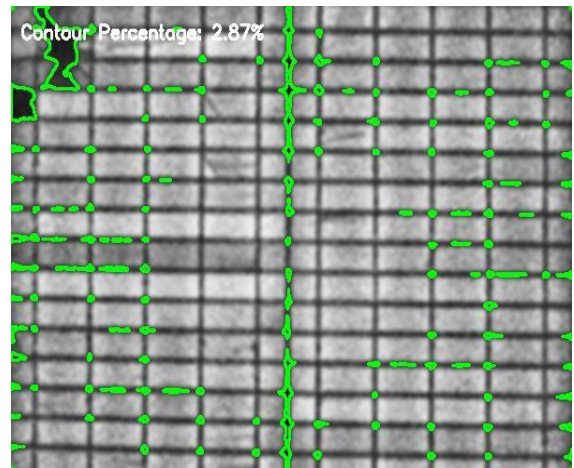


図 41-(d) EL 画像(T=55)

図 41 欠陥検出の解析結果

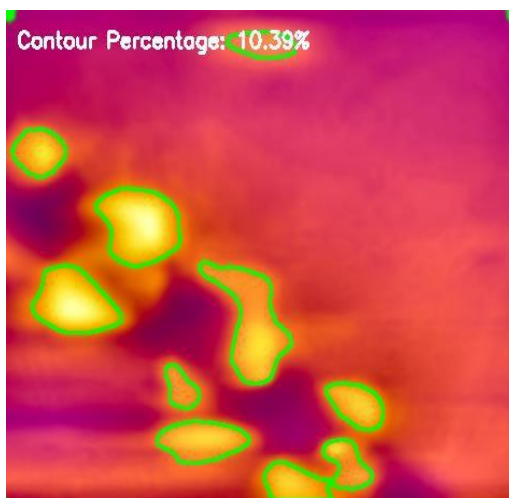


図 41-(b) IR 画像 (T=150)

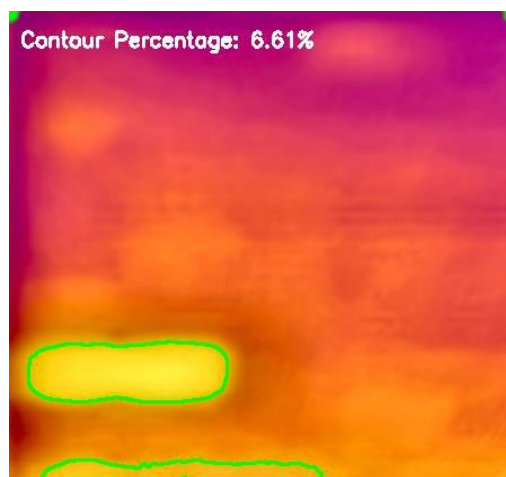


図 41-(c) IR 画像(T=175)

12. 画像解析における考察と課題

これらの直線検出や輪郭検出の応用によって、欠陥を概ね確認することができ、その位置も確認できる。しかし、これらには多くの課題が残る。

1つは、検出の精度に関する課題である。輪郭検出による検出の精度は高いとは言えない。図 39(a)中のホットスポットはホコリなどによる小さい汚れが原因で生じている。このような微小な欠陥は適切に検出できない。また、図 39(d)でも電氣的絶縁欠陥のように大きい欠陥は検出できるが、マイクロクラックなどの細かい欠陥を検出することはできない。これは、条件を付けたことによる弊害の他に、二値化の画像処理による影響であると考えられる。特に屋外IR イメージングでは、この影響が顕著であると考えられる。太陽光の下で行う IR イメージングでは、画像内で光源の方向や強さが異なる。このような場合、同じ物体や領域でも輝度が異なるため、二値化の結果に差異が生じる。光の均一性が確保できない状況下では、二値化の結果が変動することがある。

2つ目は、閾値を自身で設定する必要がある点である。これは解析の効率を低下させる要因である。多くの画像への拡張が難しく、作業が煩雑になるため一貫性が保ちにくい。これに加えて、手動での設定は人為的なエラーが発生する可能性がある。また、将来的にリアルタイム性を持つ動画処理における欠陥検出を行う場合において、手動による設定は非現実的である。このように、大量の画像やリアルタイムでの処理では、手動ではなく自動的な閾値の設定が求められる。

13. 結論

本研究では、太陽電池の画像を用いた劣化判定手法の有用性を比較した。これにより、以下のことが明らかになった。

第一に、IR イメージングと EL イメージングは試験者のニーズや検査時の環境に応じた手法が選ばれるべきである。しかし、本研究の結果は、EL 画像を用いることで IR 画像を凌駕する、より包括的な異常の検出が可能であることを示している。さらに、EL イメージングで開発された EL セットアップはシンプルかつ 1 万円以下と低コストであるため、主に小規模の太陽光発電設備で実行可能な選択肢となる。そのため、コスト面と得られる欠陥の観点から、EL イメージングの方が太陽光発電検査分野の発展に貢献する。

第二に、OpenCV を用いた画像解析により検査効率を向上することができる。これは IR イメージングと EL イメージングの両手法に用いることができる。しかし、IR イメージングは解像度の低い画像を用いる点で、セルの特定までを行うことはできない。そのため、EL イメージングに用いる画像解析の方がより効果的である。

以上より、画像解析と併用する EL イメージングが効率的で費用対効果に優れた検査方法であると考えられる。

14. 展望

今後の展望は、本研究の限界の克服のための拡張実験と多様なデータセットの収集を行うことである。これは、特定の太陽電池や環境に依存しないことを確認し、これから得られる多様なデータセットを用いて検査手法の汎用性を示すために行う。

実際、本実験では結晶シリコン太陽電池モジュールに焦点を当てているが、他の太陽電池の特性や劣化メカニズムに対する有効性が不透明である。検査手法の一般的な有効性を確認するためには、異なる種類や製造プロセス、材料を持つ太陽電池に対しても実証的な評価が必要である。また、実験条件を特定の条件下だけでなく、環境の影響による検査効率や精度の変化を確認する必要がある。屋外での検査が主となるため、この評価は非常に重要になる。特に EL イメージングを屋外で行うことは、今後の太陽光発電設備の劣化診断において重要になると考えられる。

謝辞

本研究の遂行にあたり、丁寧に指導して下さった藤田吾郎先生に感謝します。また、同研究室の博士 3 年生の Abraham 氏には、実験や研究方針に関する適切なお助言をいただき心より御礼申し上げます。御二方の温かいご指導のおかげで、有意義な研究室生活を過ごすことができました。また、御二方は勿論、野末先生をはじめとします多くの同研究室の先生方と同研究室のメンバーには、プライベートでも親身になって寄り添っていただきました。皆様のお心遣いに感謝を申し上げますと共に、引き続きのご愛顧とご指導ご鞭撻のほどよろしくお願い申し上げます。

発表論文

K. Nakagawa, A. Kaligambe and G. Fujita, "Comparative Analysis of Defective Solar PV Module Inspection Using Thermal Infrared and Electroluminescence Imaging Techniques," 2023 4th International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS), Denpasar Bali, Indonesia, 2023, pp. 98-102

参考引用文献

- [1] 経済産業省資源エネルギー庁「日本のエネルギー 2022 年度版『エネルギーの今を知る 10 の質問』」, <https://www.enecho.meti.go.jp/about/pamphlet/energy2022/003/> 最終閲覧: 2024/01/23
- [2] IEA, Global CO2 emissions from energy combustion and industrial processes, 1900-2022, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-co2-emissions-from-energy-combustion-and-industrial-processes-1900-2022> IEA. Licence: CC BY 4.0, 最終閲覧: 2024/01/23
- [3] IEA, Share of cumulative power capacity by technology, 2010-2027, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/share-of-cumulative-power-capacity-by-technology-2010-2027> IEA. Licence: CC BY 4.0, 最終閲覧: 2024/01/23
- [4] IEA, Solar PV power capacity in the Net Zero Scenario, 2015-2030, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/solar-pv-power-capacity-in-the-net-zero-scenario-2015-2030> IEA. Licence: CC BY 4.0, 最終閲覧: 2024/01/23

- [5] 経済産業省資源エネルギー庁「日本のエネルギー 2021 年度版『エネルギーの今を知る 10 の質問』」, <https://www.enecho.meti.go.jp/about/pamphlet/energy2021/007/> 最終閲覧: 2024/01/23
- [6] IEA, Net renewable electricity capacity additions by technology, 2017-2024, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/net-renewable-electricity-capacity-additions-by-technology-2017-2024> IEA. Licence: CC BY 4.0, 最終閲覧: 2024/01/23
- [7] 山家公雄, 京都大学大学院経済学研究科再生可能エネルギー「中国主導で驚異的に増える太陽光発電 -高まる期待と独占への警戒-」, https://www.econ.kyoto-u.ac.jp/renewable_energy/stage2/contents/column0396.html 最終閲覧: 2024/01/23
- [8] U.S.GRAINS COUNCIL 「米国インフレ抑制法 (Inflation Reduction Act, IRA)」, <https://grainsjp.org/report/eth-ira/> 最終閲覧: 2024/01/23
- [9] IEA, Solar PV manufacturing capacity according to announced projects and in the Net Zero Scenario, 2015-2030, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/solar-pv-manufacturing-capacity-according-to-announced-projects-and-in-the-net-zero-scenario-2015-2030> IEA. Licence: CC BY 4.0 最終閲覧: 2024/01/23
- [10] IEA, Solar PV manufacturing capacity by country and region, 2021, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/solar-pv-manufacturing-capacity-by-country-and-region-2021> IEA. Licence: CC BY 4.0 最終閲覧: 2024/01/23
- [11] IEA (2022), Solar PV Global Supply Chains, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/solar-pv-global-supply-chains> License: CC BY 4.0 最終閲覧: 2024/01/23
- [12] 加藤和彦「太陽光発電システムの運用・保守の実態と課題」安全工学, 2013, 52 巻, 1 号, p.19-25
- [13] 独立行政法人製品評価技術基盤機構(NITE)「電気保安の現状について(令和 3 年度小出力発電設備の事故概要)」, <https://www.nite.go.jp/data/000144092.pdf> 最終閲覧: 2024/01/23
- [14] 松岡泰介(NITE)「住宅用太陽光発電設備の事故について」, <https://www.nite.go.jp/data/000095183.pdf> 最終閲覧: 2024/01/23
- [15] 森田一樹, 吉川健. 「太陽電池用シリコン精製における問題点とその新展開」 までりあ 46.3 2007: p133-136
- [16] 荒谷復夫「太陽電池用シリコン原料の現状と課題 (<特集> 太陽電池材料の結晶工学: 結晶成長を中心に)」 日本結晶成長学会誌 36.4 (2010): 246-252.
- [17] 森田一樹, 吉川健「冶金学的 SOG-Si 精製と低温凝固プロセス」応用物理学会学術講演会講演予稿集 第 58 回応用物理学関係連合講演会. 公益社団法人 応用物理学会, 2011.p.146
- [18] 加藤嘉英, 花澤和浩, 馬場裕幸, 中村尚道, 湯下憲吉, 阪口泰彦, 荒谷復夫「工業用金属シリコンを用いる太陽電池基板用高純度シリコン製造プロセスの開発」 鐵と鋼: 日本鐵鋼協会々誌 86.11 (2000): p717-724.
- [19] 高橋正行, 渡邊衛「太陽電池用シリコンウェハ加工システムの開発」 パナソニック技報=Panasonic technical journal 62.2 (2016): p103-105.
- [20] 原田博文「バルク結晶成長」 電子情報通信学会「知識ベース」 10 群-2 編-2 章 (2010).p5-11
- [21] 稲葉敦, 島谷哲, 田畑総一, 河村真一, 渋谷尚, 岩瀬嘉男, ... & 小宮山宏「太陽光発電システムのエネルギー評価」 化学工学論文集 19.5 (1993): p809-817.
- [22] 富田孝司「太陽電池の製造技術と課題」 シャープ技報第 70 号(1998)p12-14
- [23] 西本陽一郎「ウエットエッチングによるテクスチャー形成技術」 表面技術 56.1 (2005): p13-13.
- [24] 中野昭一, 酒井総一「エネルギー分野を支える表面技術 太陽電池を支える表面技術」 表面技術 48.12 (1997): p1158-1162
- [25] 中山真志. 「Si 結晶太陽電池における高精細スクリーン印刷の最新動向」 日本印刷学会誌 50.6 (2013): p471-478.
- [26] 肥山卓矢, 小島拓人, 木下晃輔, 西原達平, 大西康平, 村松和郎, ... 小椋厚志「"太陽電池用ファイアスルー制御電極ペーストを用いた電極/シリコン界面の化学結合評価」 応用物理学会学術講演会講演予稿集 第 78 回応用物理学会秋季学術講演会. 公益社団法人 応用物理学会, 2017.
- [27] 山本智弘, 清田英夫, 赤石崇. 「太陽電池モジュールの自作」 太陽エネルギー 49.5 (2023): p61-67

- [28] 工藤嗣友, 他共著「基本からわかる電子回路講義ノート」株式会社オーム社, 第1版第2刷(2017), p46-58
- [29] DS New Energy 「太陽電池バスバー, フィンガー, タブワイヤおよびバスワイヤ」
<https://ja.ds solar.com/info/solar-cell-busbars-fingers-tab-wires-and-bus-39881295.html>
最終閲覧: 2024/01/23
- [30] Panasonic Group 「『住宅用』太陽電池モジュール HIT®『P247a Plus/P252a Plus』を発売」
<https://news.panasonic.com/jp/press/jn170221-1>
最終閲覧: 2024/01/23
- [31] 屋勝巳. "薄膜太陽電池技術の現状と今後の展望." 応用物理 84.11 (2015): p992
- [32] Michael Simon, Edson L. Meyer, "Detection and analysis of hot-spot formation in solar cells" Solar Energy Materials and Solar Cells, Volume 94, Issue 2,(2010),P 106-113, ISSN 0927-0248,
- [33] R. Pierdicca, M. Paolanti, A. Felicetti, F. Piccinini, and P. Zingaretti, "Automatic faults detection of photovoltaic farms: Solair, a deep learning-based system for thermal images," Energies, vol. 13, no. 24, (2020),pp. 1-17,
- [34] Corna Impianti, "Termografia Ispezioni e analisi termografiche degli edifici"
<https://www.corna.it/om/termografia/>
最終閲覧: 2024/01/23
- [35] John A. Tsanakas, Long Ha, Claudia Buerhop, "Faults and infrared thermographic diagnosis in operating c-Si photovoltaic modules: A review of research and future challenges", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 62, (2016), P 695-709, ISSN 1364-0321,
- [36] M. Waqar Akram, Guiqiang Li, Yi Jin, Xiao Chen, Changan Zhu, Xudong Zhao, Abdul Khaliq, M. Faheem, Ashfaq Ahmad, "CNN based automatic detection of photovoltaic cell defects in electroluminescence images", Energy, Volume 189, (2019), 116319, ISSN 0360-5442,
- [37] 横野泰和「非破壊検査の種類と特徴」 溶接学会誌 59.6 (1990): 410-413.
- [38] FLIR, 「研究開発者向け赤外線サーモグラフィガイドブック-研究開発用赤外線リソースガイド-」, 第1章および第2章, p1-13
- [39] 一般社団法人日本サーモグラフィ協会「赤外線サーモグラフィとは」,
<https://www.thermography.or.jp/about/about02.html>
最終閲覧: 2024/01/23
- [40] 石河泰明. "エレクトロルミネセンス法による太陽電池モジュールの屋外評価." 応用物理 91.9 (2022): 558-561.
- [41] S. Guo, E. Schneller, K. O. Davis and W. V. Schoenfeld, "Quantitative analysis of crystalline silicon wafer PV modules by electroluminescence imaging," 2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), Portland, OR, USA, 2016, pp. 3688-3692, doi: 10.1109/PVSC.2016.7750365.
- [42] Vishal E. Puranik, Ravi Kumar, Rajesh Gupta, "Progress in module level quantitative electroluminescence imaging of crystalline silicon PV module: A review", Solar Energy, Volume 264, 2023, 111994, ISSN 0038-092X
- [43] A. Ciocia, A. Carullo, P. Di Leo, G. Malgaroli and F. Spertino, "Realization and Use of an IR Camera for Laboratory and On-field Electroluminescence Inspections of Silicon Photovoltaic Modules," 2019 IEEE 46th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), Chicago, IL, USA, 2019, pp. 2734-2739, doi: 10.1109/PVSC40753.2019.8980711.
- [44] TELEDYNE FLIR, 「FLIR ONE® Pro」,
<https://www.flir.jp/products/flir-one-pro/?vertical=condition%20monitoring&segment=solutions>
最終閲覧: 2024/01/23
- [45] 蚊野浩. 「デジタルカメラのしくみと画像処理」 画像電子学会誌 41.3 (2012): 288-295.
- [46] 岡本充義. 「2.小型・高画質・高機能を実現するミラーレス一眼カメラ」 映像情報メディア学会誌 65.3 (2011): 269-273.
- [47] Life Oixel, "Panasonic Lumix GF3 DIY Digital Infrared Conversion Tutorial",
<https://www.lifepixel.com/tutorials/infrared-diy-tutorials/life-pixel-panasonic-lumix-gf3-diy-digital-infrared-conversion-tutorial>
最終閲覧: 2024/01/23
- [48] Zomei, "Camera Filter -IR-",
<https://www.zomei.com/collections/ir-557>
最終閲覧: 2024/01/23
- [49] OpenCV, "About", <https://opencv.org/about/>
最終閲覧: 2024/01/23

- [50] Ian T. Young, Lucas J. van Vliet, Recursive implementation of the Gaussian filter, *Signal Processing*, Volume 44, Issue 2, (1995), Pages 139-151,ISSN 0165-1684,
- [51] Neethu M. Sasi, V. K. Jayasree, "Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization for Qualitative Enhancement of Myocardial Perfusion Images" *SciRes* (2013)
- [52] Canny, John. "A computational approach to edge detection." *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence* 6 (1986): 679-698.
- [53] 和田俊和, 松山隆司, 「Hough 変換に基づく図形検出の新展開」, *情報処理*, vol.36, No.3, (1995)
- [54] J. Illingworth, J. Kittler, A survey of the hough transform, *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, Volume 44, Issue 1,(1988),Pages 87-116,ISSN 0734-189X
- [55] 西田友是. 「座標変換 (コンピュータグラフィックスの数理 (2))」 *応用数理* 13.4 (2003): 334-342.
- [56] 古性裕之, and 毛利宏. "Helmholtz の原理に基づく曲線輪郭線検出と道路白線検出への適用." *日本機械学会論文集* 83.856 (2017): 17-00203.
- [57] 岩片智, 味岡義明, and 萩原将文. "局所並列処理のための二値化アルゴリズム." *電気学会論文誌 C (電子・情報・システム部門誌)* 125.1 (2005): 7-13.

中川 昂太



2002年3月6日生。2024年3月芝浦工業大学工学部電気工学科卒業。同年4月より同学大学院電気電子情報工学専攻に進学。

付録 A

セル分断のソースコードを以下に示す。

```
import cv2
import numpy as np

# 画像ファイルのパスを指定
image_path = r'C:/Users/B-09/Tokushima/el.png'

# トラックバーのコールバック関数
def on_trackbar(val):
    global threshold
    threshold = val
    detect_and_draw_lines(image_path)

# 角度の差を計算する関数
def angle_difference(theta1, theta2):
    return np.abs(theta1 - theta2)

# 直線同士の距離を計算する関数
def distance_between_lines(line1, line2):
    rho1, theta1 = line1
    rho2, theta2 = line2
    a1, b1 = np.cos(theta1), np.sin(theta1)
    a2, b2 = np.cos(theta2), np.sin(theta2)
    x1, y1 = a1 * rho1, b1 * rho1
    x2, y2 = a2 * rho2, b2 * rho2
    return np.sqrt((x2 - x1)**2 + (y2 - y1)**2)

def detect_and_draw_lines(image_path):
    global threshold
    global min_line_length
    image = cv2.imread(image_path)

    if image is None:
        print("エラー: 画像の読み込みに失敗しました。")
        return

    gray = cv2.cvtColor(image, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
    blurred = cv2.GaussianBlur(gray, (5, 5), 0)
    edges = cv2.Canny(blurred, 50, 150)
    lines = cv2.HoughLines(edges, 1, np.pi / 180, threshold)

    if lines is not None:
        # 垂直方向および水平方向の直線を格納するリスト
        vertical_lines = []
        horizontal_lines = []

        for i in range(len(lines)):
            line1 = lines[i][0]
            rho, theta = line1
            a, b = np.cos(theta), np.sin(theta)

            # 垂直方向の場合
            if np.abs(theta - np.pi / 2) < np.pi / 4:
                vertical_lines.append(line1)
            # 水平方向の場合
            elif theta < np.pi / 4 or theta > 3 * np.pi / 4:
                horizontal_lines.append(line1)

        # 垂直方向および水平方向に近い方の直線を残す
        filtered_lines = []
        for line in vertical_lines + horizontal_lines:
            add_line = True
            for other_line in filtered_lines:
                # 直線同士の角度の差が一定以下かつ、直線同士の距離が一
                # 定以下の場合、近いとみなして片方を削除
                if angle_difference(line[1], other_line[1]) < np.pi / 4 and
                distance_between_lines(line, other_line) < 20:
                    add_line = False
                    break
            if add_line:
                filtered_lines.append(line)

        for line in filtered_lines:
            rho, theta = line
            a, b = np.cos(theta), np.sin(theta)
            x0, y0 = a * rho, b * rho
            x1 = int(x0 + 1000 * (-b))
            y1 = int(y0 + 1000 * (a))
            x2 = int(x0 - 1000 * (-b))
            y2 = int(y0 - 1000 * (a))

            # 直線の長さを計算
            line_length = np.sqrt((x2 - x1)**2 + (y2 - y1)**2)

            if line_length >= min_line_length:
                # 一定の長さ以上の直線を描写
                cv2.line(image, (x1, y1), (x2, y2), (0, 0, 255), 2)

                # 直線を延長して描写
                extended_length = 1000 # 延長する長さ (適宜調整)
                x1_ext = int(x1 - extended_length * (-b))
                y1_ext = int(y1 - extended_length * (a))
                x2_ext = int(x2 + extended_length * (-b))
                y2_ext = int(y2 + extended_length * (a))
                cv2.line(image, (x1_ext, y1_ext), (x2_ext, y2_ext), (0, 255, 0), 2)

    cv2.imshow('Detected Lines', image)
```

```
cv2.imwrite("DetectedLines.jpg", image)

# トラックバーの初期値と最大値を設定
threshold = 100
min_line_length = 1000 # 一定の長さ以上の直線を描写する閾値
cv2.namedWindow('Detected Lines')
cv2.createTrackbar('Threshold', 'Detected Lines', threshold, 300, on_trackbar)

# 初回の検出と描画
detect_and_draw_lines(image_path)

# 終了処理
cv2.waitKey(0)
cv2.destroyAllWindows()
```

閾値は画像上部のトラックバーで変更できる。図 A は、閾値別の出力例を以下にウィンドウ表示で示す。閾値の設定によって出力が大きく変化することが分かる。

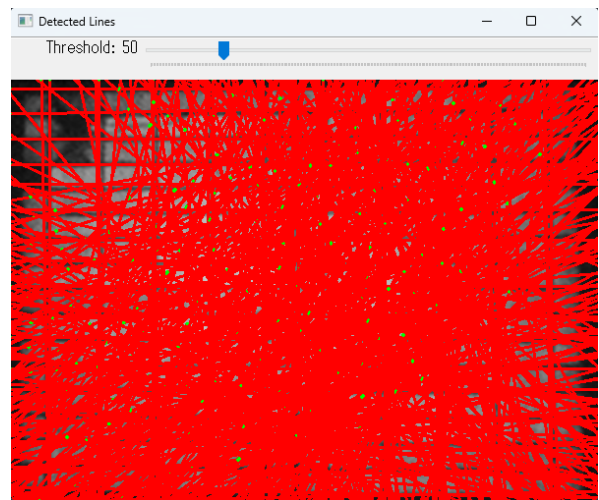


図 A-(a) $T = 50$

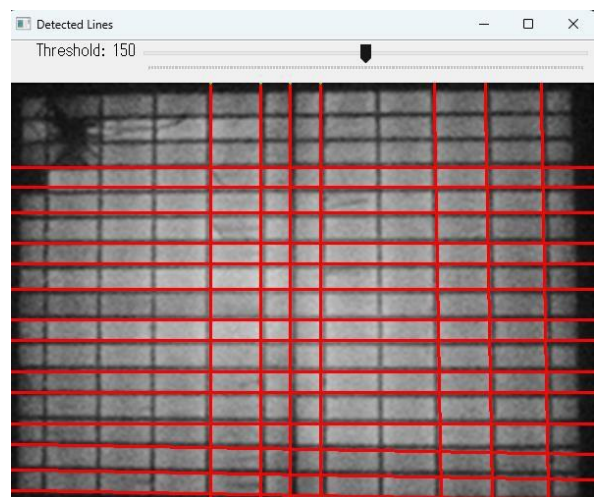


図 A-(b) $T = 150$

図 A 閾値による直線検出の変化

付録 B

欠陥検出のソースコードを以下に示す。

コード内の赤字の箇所は IR イメージング時と EL イメージングに時で変更する必要がある。以下のコードは、IR イメージング解析時である。

```
import cv2
import numpy as np

image_path = r'C:/Users/B-09/Tokushima/el.png'

# マウスイベントのコールバック関数
def select_points(event, x, y, flags, param):
    global selected_points, img, points_selected

    if event == cv2.EVENT_LBUTTONDOWN:
        selected_points.append((x, y))
        cv2.circle(img, (x, y), 4, (0, 255, 0), -1)
        cv2.imshow("Select Points", img)

        # 4 点が選択されたか確認
        if len(selected_points) == 4:
            points_selected = True

# 画像読み込み
img = cv2.imread(image_path)

# もし画像の読み込みに失敗した場合は、エラーメッセージを表示
if img is None:
    print("エラー: 画像の読み込みに失敗しました。")
else:
    # ガウシアンぼかしを適用して画像を鮮明化
    img = cv2.GaussianBlur(img, (5, 5), 0)

    # コントラスト拡張のための CLAHE 適用
    lab_img = cv2.cvtColor(img, cv2.COLOR_BGR2Lab)
    l_channel, a_channel, b_channel = cv2.split(lab_img)

    clahe = cv2.createCLAHE(clipLimit=2.0, tileGridSize=(8, 8))
    clahed_l_channel = clahe.apply(l_channel)

    lab_img = cv2.merge((clahed_l_channel, a_channel, b_channel))
    img = cv2.cvtColor(lab_img, cv2.COLOR_Lab2BGR)

    selected_points = []
    points_selected = False

    # マウスイベントの初期化
    cv2.namedWindow("Select Points")
    cv2.setMouseCallback("Select Points", select_points)

    # キーイベント待機
    while not points_selected:
        cv2.imshow("Select Points", img)
        key = cv2.waitKey(1) & 0xFF

        # 'ESC' キーが押されたら終了
        if key == 27:
            exit()

    # 選択した 4 つの点の座標
    src_points = np.float32(selected_points)

    # 変換後の座標 (例: 左上、右上、右下、左下)
    dst_points = np.float32([[0, 0], [img.shape[1], 0], [img.shape[1], img.shape[0]], [0, img.shape[0]])])

    # 射影変換行列を計算
    perspective_matrix = cv2.getPerspectiveTransform(src_points, dst_points)

    # 画像を射影変換
    warped_img = cv2.warpPerspective(img, perspective_matrix, (img.shape[1], img.shape[0]))

    # 結果を表示
    cv2.imwrite("Warped_Image.png", warped_img)

    # 画像読み込み
    img = cv2.imread("Warped_Image.png")

    # もし画像の読み込みに失敗した場合は、エラーメッセージを表示
    if img is None:
        print("エラー: 画像の読み込みに失敗しました。")
    else:
        # ガウシアンぼかしを適用して画像の鮮明化
        img = cv2.GaussianBlur(img, (5, 5), 0)

        # 変数の初期化
        threshold = 100 # しきい値の初期値
        min_contour_area = 10 # 最小の輪郭面積
        max_contour_area = 30000 # 最大の輪郭面積

        # トラックバーのコールバック関数
        def on_trackbar(val):
```

```
global threshold
threshold = val
# グレースケールに変換
gray_img = cv2.cvtColor(img, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
# しきい値を設定(IR)
cv2.threshold(gray_img, threshold, 255,
cv2.THRESH_BINARY)
# しきい値を設定(EL)
cv2.threshold(gray_img, threshold, 255,
cv2.THRESH_BINARY_INV)

# 輪郭を検出
contours, _ = cv2.findContours(thresh, cv2.RETR_EXTERNAL,
cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)
# 輪郭を描写
global img_contours
img_contours = img.copy()

# 輪郭の面積が一定範囲内の場合のみ描写
for contour in contours:
    area = cv2.contourArea(contour)
    if min_contour_area < area < max_contour_area:
        cv2.drawContours(img_contours, [contour], -1, (0, 255, 0), 2)

# 画像全体の面積
img_area = img.shape[0] * img.shape[1]

# 輪郭の占有率を計算
contour_percentage = (np.sum([cv2.contourArea(c) for c in contours]) /
img_area) * 100

# 画面に表示
cv2.putText(img_contours, f"Contour Percentage:
{contour_percentage:.2f}%", (10, 30), cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX, 0.6, (255,
255, 255), 2)

cv2.imshow("Image with Contours", img_contours)

# トラックバーの初期化と表示
cv2.namedWindow("Image with Contours")
cv2.createTrackbar("Threshold", "Image with Contours", threshold, 255,
on_trackbar)

# トラックバーの初期描写
on_trackbar(threshold)

# トラックバーのウィンドウを重ならないように右に移動
cv2.moveWindow("Image with Contours", img.shape[1] + 10, 0)

while True:
    cv2.imshow("Image with Contours", img)
    key = cv2.waitKey(1)

    # キーが押されていない場合はスキップ
    if key == -1:
        continue

    # 押されたキーを表示
    print(f"押されたキー: {key}")

    # 'q' キーで終了
    if key == ord("q"):
        print("終了キーが押されました。終了します...")
        break

    # 's' キーで輪郭を描写したコピー画像を表示
    elif key == ord("s"):
        print("S キーが押されました。輪郭のコピー画像を表示しま
す。")
        cv2.imshow("Contours Copy", img_contours)

    # 'a' キーで輪郭を描写した画像を保存
    elif key == ord("a"):
        print("A キーが押されました。輪郭の画像を保存します。")
        cv2.imwrite("Contours_Image.png", img_contours)

cv2.destroyAllWindows()
```

トラックバー表示は付録 A と同様である。図 B は、実際のウィンドウ表示を示す。トラックバー選択後、“s” キーを入力で出力画像を表示し、“a”キー入力で出力画像を保存できる。また、“q”キー入力で終了処理を実行するようにしている。これにより、求める画像が出力されるまでウィンドウが閉じることなく、継続して実行できる。これも付録 A と同様に、閾値の設定が重要であることが分かる。

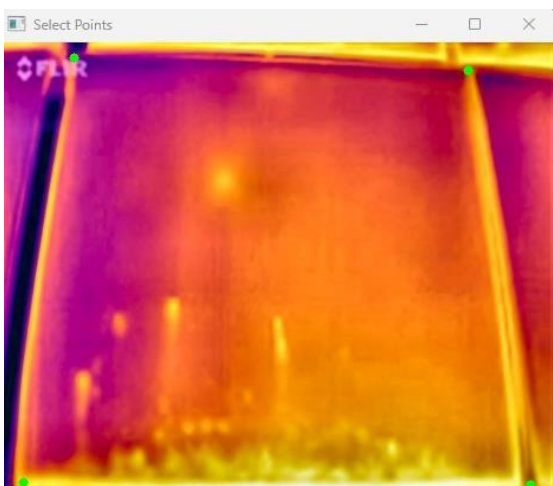


図 B.1-(a) 4 点選択時のウィンドウ表示
(緑色の点が選択された 4 点)



図 B.1-(b) $T = 155$

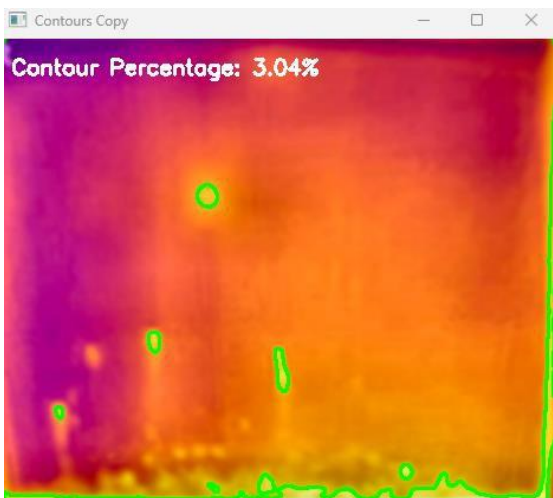


図 B.1-(b) $T = 180$

図 B.1 IR イメージング解析結果

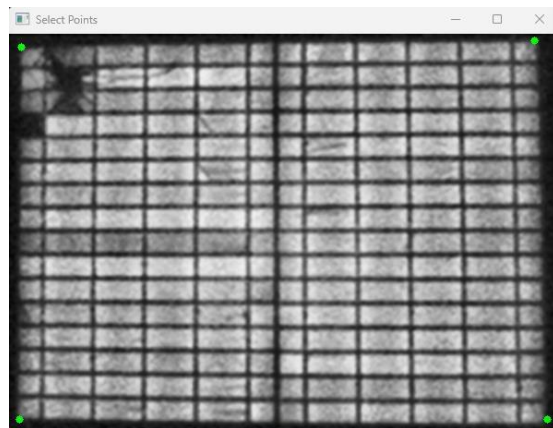


図 B.2-(a) 4 点選択時のウィンドウ表示
(緑色の点が選択された 4 点)

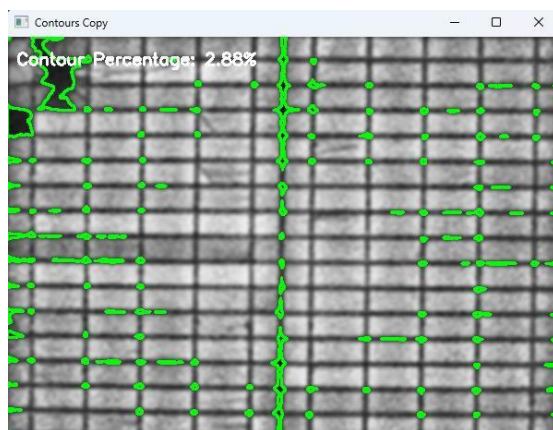


図 B.2-(b) $T = 55$



図 B.2-(c) $T = 60$

図 B.2 EL イメージング解析結果