

研究成果報告書

研 究 題 目	外的汚損が太陽光発電設備の発電運用に与える影響に関する研究		実 施 年 度
			27, 28年度
代 表 研 究 者	所 属	宇部工業高等専門学校 電気工学科	
	氏 名	濱 田 俊 之	印

1. 研究の目的・背景

太陽光発電設備は、再生可能エネルギーの固定価格買取制度を背景に事業用及び一般住宅用ともに急速に普及している。太陽光発電設備の普及の加速にともない、設備を構成する太陽電池セルやパワーコンディショナーなどの効率改善も目覚ましく、最も普及しているシリコン

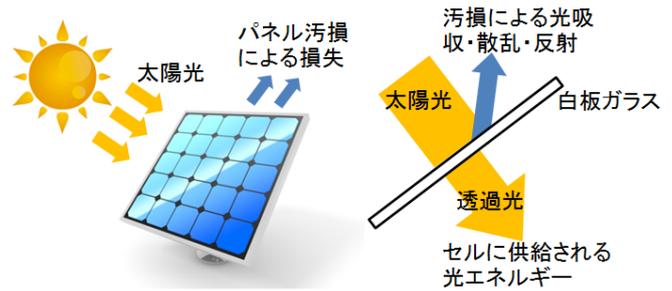


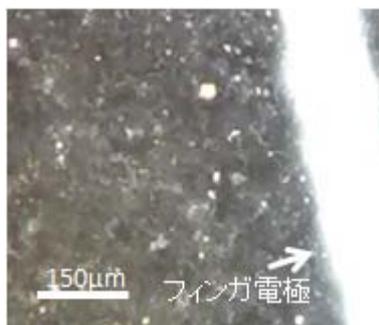
図1 太陽光発電システムの損失の概念

系太陽電池セルの変換効率は研究ベースでは理論限界に近い値まで向上している。したがって、更なる太陽光発電の普及には**発電における運用技術の最適化**が特に重要な課題となる。

図1に太陽電池モジュールのカバーガラス材の損失概念図を示す。太陽光発電モジュールのカバーガラス（白板ガラス）材の汚損は発電出力の低下要因の代表的なものであり、屋外に設置する太陽光発電設備は粉塵などの微粒子や鳥類の糞など様々な汚損を受ける。（図2）メンテナンスフリーの発電システムとされている太陽光発電ではあるが、**定期的な外的な汚損に対する対策は必要不可欠**である。加えて、**部分的な重汚損領域（部分影）が発生した場合、汚損部の太陽電池セルが異常高温化するホットスポット現象が生じる**恐れもある。粉塵や鳥類の糞害などの外的汚損による発電出力の減少は太陽光発電の運用において避けられない問題であり、**定期的な外的な汚損に対する対策が必要**となる。本研究では、**カバーガラス材と汚損度合の定量的な評価手法**を検討し、カバーガラス材が各種外的汚損を受けた場合に太陽光発電設備の発電出力にどの程度影響を与えるのか明らかにした。



(a)宇部高専設置太陽光発電設備



(b) カバーガラス汚損状況



(c) 鳥類の糞による汚損状況

図2 太陽光発電設備の汚損状況

2. 研究成果及び考察（申請時の計画に対する達成度合を織込む）

2.1 太陽光パネル用白板ガラスの光透過測定

図1に太陽光パネル用白板ガラスの透過光強度測定システムを示す。模擬太陽光にはハロゲンランプ(SCHOTTMORITEX 製, MegaLight100)を用い、太陽光パネル用白板ガラス透過光は白板ガラスに接触配置したシリコンフォトダイオード型日射計(デルタオーム社製, LPSilicon-PYRA 04)にて測定した。なお、ハロゲンランプより日射計へ照射される日射強度は $1000[\text{W}/\text{m}^2]$ 一定として測定を行った^[1]。測定箇所は図2に示すように白板ガラス面を16分割して各地点合計16箇所を測定した。ちなみに、受光素子は直径12mmである。

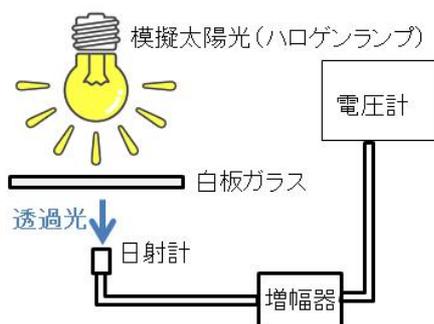


図1 透過光強度測定システムの概要

Area1	Area8	Area9	Area16
Area2	Area7	Area10	Area15
Area3	Area6	Area11	Area14
Area4	Area5	Area12	Area13

図2 白板ガラスの測定箇所

表1に表面が清浄な状態の白板ガラス透過光強度を示す。汚損物が堆積していない場合、測定されたガラス透過光強度の平均値は約 $1022[\text{W}/\text{m}^2]$ であり、領域及びガラス毎の測定値のばらつきは1%未満であった。なお、測定値が、ガラスを配置しない状態で日射計に模擬太陽光を照射した値 $1000[\text{W}/\text{m}^2]$ より高くなっているのは、白板ガラス裏面に光閉じ込め効果向上のためエンボス加工されている効果によるものである。

表1 透過光強度測定値 $[\text{W}/\text{m}^2]$

	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5	Sample 6
Area 1	1025.2	1023.8	1024.2	1026.0	1027.2	1022.8
Area 2	1023.6	1024.0	1024.2	1025.4	1026.8	1021.4
Area 3	1023.0	1024.4	1024.6	1025.6	1025.4	1021.4
Area 4	1023.8	1024.4	1025.2	1025.8	1025.8	1022.0
Area 5	1024.4	1023.8	1024.0	1024.2	1024.6	1020.0
Area 6	1023.6	1024.2	1023.4	1023.6	1024.4	1021.6
Area 7	1023.6	1023.8	1023.4	1023.8	1024.6	1020.6
Area 8	1024.8	1023.4	1023.8	1023.8	1025.6	1021.0
Area 9	1024.6	1024.4	1023.8	1023.2	1025.2	1018.4
Area 10	1023.6	1024.2	1022.6	1023.6	1024.0	1022.2
Area 11	1023.0	1023.8	1022.4	1023.6	1023.2	1021.6
Area 12	1023.0	1023.8	1023.2	1023.8	1022.8	1021.4
Area 13	1024.4	1024.4	1025.6	1024.8	1024.6	1024.0
Area 14	1024.0	1024.6	1025.4	1025.4	1023.6	1024.2
Area 15	1024.0	1024.4	1025.4	1026.8	1024.0	1022.4
Area 16	1025.2	1025.0	1025.6	1025.4	1025.4	1023.2

次に、人工汚損試験により太陽光パネル用白板ガラス表面に汚損物が堆積した場合の汚損度とガラス透過光強度の関係を確認した。汚損物には、代表的な関東地方の自然汚損堆積物である関東ローム(JIS 試験用粉体1の7種)をイオン交換水で攪拌・塗布することで均等に

ガラス表面を汚損させた。なお、ガラス表面の汚損度はそれぞれ 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 5.0[g/m²]とした。図3に人工汚損時のガラス透過光強度を示す。同図より、汚損度が大きいほど透過日射量は低下することが分かる。これは表面に堆積した汚損物による光吸収、散乱、反射によるものである。ちなみに、汚損度が 0[g/m²]のときのガラス透過光強度を 100[%]としたときに汚損によって低下する日射強度の割合は、汚損度 0.5[g/m²]で 2.27[%], 1.0[g/m²]で 4.87[%], 2.0[g/m²]で 9.27[%], 3.0[g/m²]で 16.31[%], 5.0[g/m²]で 25.56[%]であった。

2.2 太陽光パネル表面汚損物の回収方法の検討

太陽光パネルの汚損と発電出力の関係を明らかにするには、太陽光パネルに堆積する汚損物の量を測定する必要がある。しかし、実使用環境下の太陽光パネルは 1 枚当たり 1[m²]を超えるものを数十枚～数千枚も使用している。また、表面に堆積した汚損物は、人為的要因により回収しきれない汚損物及び、ろ紙では収集不可能な微小粒子や可溶性物質などがあり、そのすべての回収は不可能である。したがって、パネル表面に堆積した汚損物重量を知るためには、人為的に既知の数量だけガラス表面に汚損物を堆積させ、汚損物の回収率を明らかにし、自然汚損時のパネル汚損度を推定することが有効であると考えられる。太陽光パネルに堆積した汚損物を回収する手法には、送電用がいしなどの汚損評価手法として用いられる筆洗い法を提案する^[2]。なお、太陽光パネルの汚損度評価では、筆洗い法によって回収した汚損物を高密度ガラスろ紙 (ADVANTEC 社製 GA-55, 保留粒子径 0.6μs) によってろ過することで汚損物回収を行い、その回収率を評価した。

図4に筆洗い法により各汚損度で回収できる汚損物の割合を示す。同図より、汚損度が高くなるにつれて回収率は高くなるが、回収率は 90[%]程度で飽和した。これは、試験用粉体中に含まれる保留粒子径よりも小さな粒子及び水溶性物質による回収不能分が全体の約 10[%]存在すると考えられる。また、0.5[g/m²]のような汚損度が低い場合は人為的要因により回収不可能な汚損物量の割合が重汚損度の場合に比べて高くなる。なお、汚損度 0.5[g/m²]における回収率は約 81[%]であり、前述条件においては汚損物の約 9[%]が人為的要因により回収できない量となる。したがって、前述の要因を考慮することによって太陽光パネルが自然汚損した際の汚損物の堆積重量を推定できる。

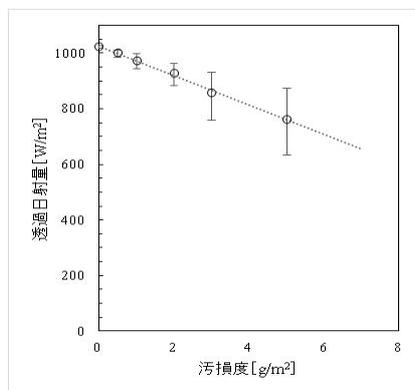


図3 人工汚損におけるガラス透過光強度

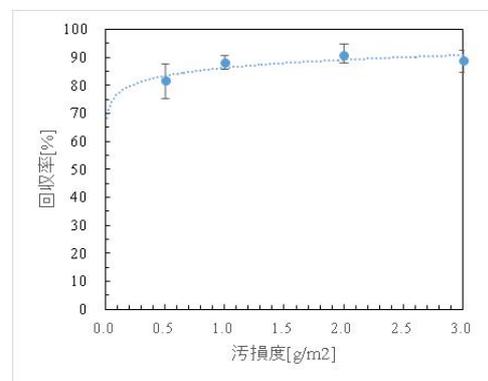


図4 人工汚損時の汚損物回収率

2.3 人工ならびに自然汚損による太陽光パネル用ガラス材の光学特性

2.2 節にて検討した評価手法を用い、人工ならびに自然汚損による太陽光パネル用ガラス材の光学的特性を確認した。図 5 に人工汚損試験および自然汚損試験により汚損した太陽光パネル用カバーガラス材の光透過率特性を示す。人工汚損試験では 180mm 角の太陽光パネル用白板ガラス（標準ガラス）上に粒子組成や粒径分布が既知かつ、代表的な関東地方の自然汚損堆積物である関東ローム(JIS 試験用粉体 1 の 7 種)をイオン交換水で攪拌・塗布することで均等にガラス表面を汚損させ乾燥させた。なお、ガラス表面の汚損度は $0.5\text{--}5.0[\text{g}/\text{m}^2]$ とした。自然汚損試験では、370mm 角の白板ガラス 4 枚を宇部高専管理棟屋上（山口県宇部市）にて 30 日間屋外暴露し、光透過率を測定するとともに、イオン交換水と高密度ガラスろ紙（ADVANTEC GA-55、保留粒子径 $0.6\mu\text{m}$ ）によってろ過することで汚損物を回収し、汚損度を評価した。なお、ろ紙により汚損物を回収する場合、人為的要因による回収不能分に加えてガラスろ紙の保留粒子径よりも小さな粒子の回収は不可能である。そのため、既知の数量の汚損物が堆積した人工汚損試験での回収率から自然汚損時の汚損度を推定している。図 5 より、汚損度が高くなるに従い光透過率は徐々に低下する。また、自然汚損試験と人工汚損試験を比較すると、自然汚損試験における汚損度と光透過率の関係は近似しており、自然汚損試験での汚損状況は人工汚損試験で模擬可能であることが明らかとなった。なお、汚損による透過光強度の測定はシリコンフォトダイオード製の日射計にて評価を行っているが、スペクトル毎の波長依存性もマルチチャンネル分光器にて確認した。その結果、汚損による波長依存性は小さいことが明らかとなった。

次に、汚損物の粒子径がガラス透過光強度に与える影響を調査した。なお、汚損物には、代表的な関東地方の自然汚損堆積物である関東ローム(JIS 試験用粉体)を用い、それぞれ粒径分布の異なる 2 種（1 の 7 種と 1 の 11 種）にて試験を行った。図 6 に人工汚損時のガラス透過率を示す。汚損度が大きいほど光透過率は低下する。これは表面に堆積した汚損物による光吸収、散乱、反射によるものである。なお、粒子径は、顕微鏡法を用いて粒度分布を測定すると、関東ローム 1 の 7 種では、数 μm ～ $75\mu\text{m}$ 程度であり、 $10\mu\text{m}$ 程度の粒子の存在確率が最も高い。対して、関東ローム 1 の 11 種では、 $1\sim 8\mu\text{m}$ 程度の粒子の分布になっている。したがって、粒子径の細かな粒子が存在するとガラス表面を覆う表面積が増大するため、光の透過率が大きく減少したと考えられる。しかしながら、自然汚損による汚損物の粒度分布を測定すると、数 μm ～約 $100\mu\text{m}$ 程度であり、 $30\mu\text{m}$ 程度の粒子が最も存在確率が高い。したがって、汚損物の組成も光透過に大きく影響を与えているものと考えられる。

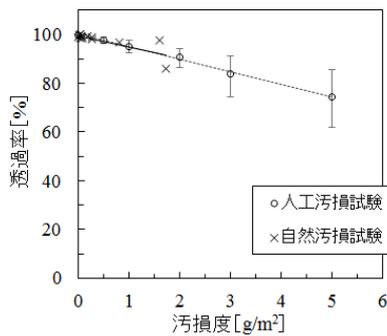


図6 人工及び自然汚損試験による太陽光パネル汚損特性

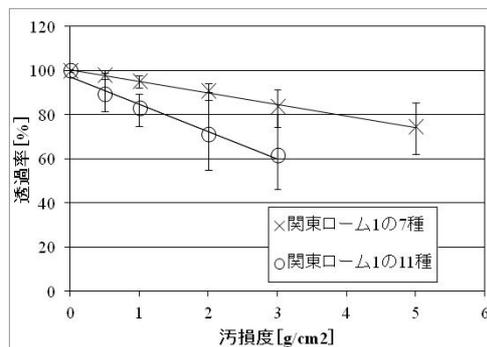


図7 粒度分布の異なる汚損物による太陽光パネル汚損特性

2.4 本研究の達成度合い

表1に申請時に計画した研究期間中における研究課題のロードマップ（実線矢印）及び実実施工程（点線矢印）を示す。概ね予定とおり研究を実施できている。なお、実施項目(2)について本研究テーマでは、最も重要なデータとなるため、粒子径の違いなど、当初予定していなかった追加実験を実施した都合上、項目(3)及び(5)の試験実施は遅れている。本研究項目については次年度以降に実施を行っていく予定である。

表2 本申請研究期間における研究ロードマップ

研究課題、目的	1年目	2年目
(1)汚損度評価条件の選定(設置角度、試料サイズなど)	実実施工程 (点線矢印)	
(2)外的汚損に対するカバーガラスの光学的特性の把握	当初計画 (実線矢印)	実実施工程 (点線矢印)
(3)可溶性物質及び不溶性物質複合汚損時のカバーガラスの光学特性の把握		当初計画 (実線矢印)
(4)実使用環境下におけるカバーガラス材の汚損特性の把握	当初計画 (実線矢印)	実実施工程 (点線矢印)
(5)太陽光発電設備を汚損させた場合の発電出力への影響の把握		当初計画 (実線矢印)

当初計画
 実実施工程

2.5 まとめ

太陽光パネルの汚れが発電出力へ与える影響を明らかにするため、汚損による影響の評価方法の確立を行い、各種汚損によるパネル用ガラスの光学的特性を確認した。人工及び自然汚損試験では、いずれの試験においても汚損度が高くなるにつれて光透過率は低下することが確認された。また、関東ローム1の7種を用いた人工試験と自然汚損試験の結果は近似していたことから、汚損パネルの洗浄時期の検討を行うにあたり自然汚損試験では長期の試験期間を要するが、これを人工汚損試験にて模擬可能であることが示された。太陽光パネル用ガラスの汚損は、本試験地域のような地方都市部においては数%程度であり、パネル洗浄等の必要性が高くなるような過酷環境下での研究の実施が必要である。今後はより過酷な汚損が生じる地域における太陽光発電設備の汚損の影響を明らかにしていく予定である。

3. 経費の使用状況（申請時の計画に対する実績を記述）

本研究の実施にあたり、汚損試験用設備及び評価用測定器（H27：ソーラーパワーメータ、超音波噴霧機（1ℓ/h）、H28：試験用太陽光パネル、I-V カーブトレーサー）を設備備品費として計上していた。しかし、当初使用予定であった光源が故障したため、汚損によるガラス透過光強度測定用光源が必要となり、影響評価用の光源（ハロゲンランプ、太陽光模擬光源）を購入した。光源は当初は安価なハロゲンランプを用いたが、より正確な評価を行うため、太陽光模擬光源（キセノンランプ）を購入して測定を行っている。また、光波長ごとの光透過の影響を解析するため、マルチチャンネル分光器を購入させて頂いた。さらに、汚損物の粒度分布の解析のため、観察用顕微鏡が必要となったため購入させて頂いた。なお、当初計上していた旅費や消耗品費については学校校費より支出できたため、当初計上額より減少した。太陽電池の構造や情報を得る必要が生じたため、当初計画になかった研究関連書籍を購入させて頂いた。

以上、当初予定からは若干の変更がありましたが、助成頂いた研究費は研究遂行のために適正に利用させて頂きました。深く感謝申し上げます。

4. 将来展望（今後の発展性、実用化の見込み等について記述）

本研究を遂行することで太陽光発電パネルの汚れと発電出力低下の影響を明らかにすることができ、清掃などの最適な保守時期を明らかにすることができる。これにより、再生可能エネルギーの固定価格買取制度を背景に家庭用・事業用ともに急速に普及している太陽光発電設備が高出力で発電を行うことに寄与できる。特に2人世帯以上の家庭における太陽光発電設備の普及率は約6.6%（総務省平成26年全国消費実態調査）であり、平成21年から約5%増加している。日本の2人世帯以上の総世帯数は約3677万世帯（厚生労働省平成26年度国民生活基礎調査）あり、250万世帯近い家庭が太陽光発電設備を設置していることになる。本成果は250万世帯近い家庭ならびに出力ベースでは家庭用の4～5倍ある太陽光発電事業を行う企業らの利益と国産エネルギーの安定供給に貢献できる重要データとして提供できる。

研究の今後の発展としては、汚損による影響が特に高い地域における太陽光発電パネルの汚れによる影響を明らかにしていく研究を行う。既に各地の大規模太陽光発電所の調査を行っており、パネル表面洗浄では洗浄しきれない汚損が生じるような過酷汚損地域の存在を確認した。前述のような地域を模擬した人工汚損及び自然汚損試験を行う余定である。

本研究の発展は研究助成金の獲得以上に地域住民や企業など多方面へ貢献可能な研究テーマであり、今後も研究を継続する予定である。

5. 成果の発表（学会での発表、学術誌への投稿等を記載。予定を含む）

- 1) 藤田成輝，和田圭司，濱田俊之，栢健一，太陽光発電パネル用ガラスの表面汚損に関する評価手法の検討，平成 28 年度第 67 回電気・情報関連学会中国支部連合大会，No. R16-02-02，広島大学，広島県（2016 年 10 月）講演論文集 CD-ROM
- 2) 中本健太、濱田俊之、栢健一，人工および自然汚損試験による太陽光パネル用カバーガラス材の光学的特性、平成 29 年電気学会全国大会、No. 7-018、富山大学、富山県、(2017 年 3 月)

[発表予定]

- 1) 濱田俊之、汚損物粒度分布の違いが太陽光パネル用ガラス透過光に与える影響（仮題）、平成 29 年電気・情報関連学会中国支部大会
- 2) 濱田俊之、太陽光パネルの汚損がパネル透過光強度に与える影響（仮題）、平成 30 年電気学会全国大会