

Simulation of sand removing by using electric field curtain for PV modules installed in arid land

Hiroki TAKEGATA^{*1}Ryo NISHIMURA^{*2}

乾燥地に設置する太陽電池を想定した電界カーテンによる砂の除去実験

竹形 祐毅¹西村 亮^{2, ‡}

Abstract

Arid land is desirable place for PV power generation because of fine weather. However, sand accumulation on PV modules decrease the generated power in such area. It is not appropriate using water to remove the sand in arid land. Electric field curtain (EFC) is one of a promising method to remove the sand without using water. In this paper, we report on the sand removal characteristics of three-phase EFC for various voltage, electrode distance, tilt angle and cover glass thickness, which corresponds to cover glass of PV module, of EFC. It is shown that high EFC voltage, large tilt angle, thin cover glass and narrow electrode distance give good sand removal characteristics.

Keywords: PV power generation, arid land, sand, improvement of power generation performance, electric field curtain

キーワード：太陽光発電, 乾燥地, 砂, 発電性能向上, 電界カーテン

1. はじめに

太陽光発電は天候で発電量が左右される。そこで雨の少ない乾燥地に太陽電池モジュールを設置することで安定した発電が期待できる。しかし乾燥地では太陽電池モジュール表面に砂やちりが堆積し、発電電力を低下させる。本報では太陽電池表面を模擬したガラス板上に撒かれた砂を、電界カーテンを用いて除去する実験およびその結果を報告する。

2. 背景および目的

乾燥地で太陽光発電を行う場合、砂やちりが太陽電池モジュール受光面に堆積し、発電量が低下してしまう。たとえば、インドのタール砂漠において 45 度傾斜させた太陽電池モジュールを 7 月から 9 月の約 2 か月間洗浄せず放置した結果、モジュール表面上の汚れによって約 17%の光の透過損失が発生したとの報告がある⁽¹⁾。一般的に太陽電池モジュール受光面の洗浄方法として水を使った洗浄がある。しかしこの方法には大量の水が必要であるため乾燥地では有利とはいえず、人件費等のコストがかかるといった欠点がある。そこで本稿では水を使用せず、電力をほとんど消費しない電界カーテンによる砂の除去方法に注目する。

Fig.1 に本研究で想定する「カバーガラスに電界カーテンを埋め込んだ太陽電池モジュール」受光面上の帯電粒子（砂）の移動の様子を示す。電界カーテンとは、誘電体内部に多相の線状電極を埋設し、これに相順に多相交流高電圧を印加することで進行波不平等電界が発生し、帯電した微粒子などを浮上させ、進行波方向に移動できる装置である。

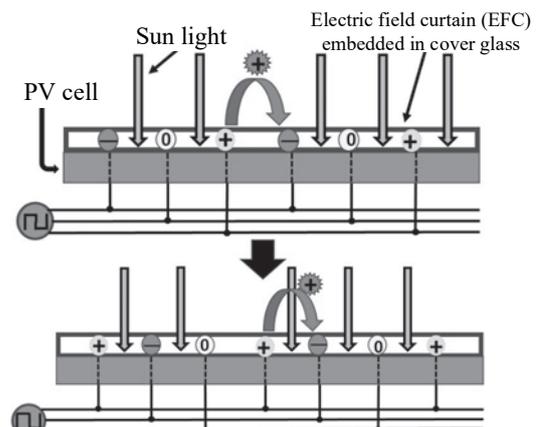


Fig.1 Movement of charged particle on PV module surface with electric field curtain (EFC).

*1 Graduate School of Sustainability Science, Tottori University

*2 Associate professor, Faculty of Engineering, Tottori University, 4-101 Koyama-Minami, Tottori, 680-8552, Japan

‡e-mail: ryo@tottori-u.ac.jp

Received: 21st February 2020, Accepted: 26th June 2020

*1 鳥取大学大学院 持続性社会創生科学研究科

*2 鳥取大学工学部 准教授 (〒680-8552 鳥取市湖山町南 4 丁目 101)

‡e-mail: ryo@tottori-u.ac.jp

(原稿受付: 2020 年 2 月 21 日, 受理日: 2020 年 6 月 26 日)

透明電極で作成した電界カーテンを太陽電池モジュールの受光面ガラス内に設置することによって発電性能を低下させる受光面上への砂やちりの堆積を防止できることが期待できる。

電界カーテンを用いた砂じんの除去の研究については、ドーハのちり、ナミブ砂漠の砂等に対し、二相や四相交流電圧を印加し、除去が確認されている^(2,3)。

著者らの研究グループでも先行研究^(4,5)において、鳥取砂丘の砂が帯電していることが報告されており、さらに楕円電極を作製し、三相交流電圧を印加する実験では、砂の移動が確認されている⁽⁶⁾。

本報では太陽電池モジュール表面に砂が載っている場合を想定し、モジュール傾斜角、電界カーテンの電極間隔、電界カーテンへの印加電圧等、種々の条件における砂の除去効率を定量的に比較する。

3. 実験装置および実験条件

本研究では電界カーテンに三相交流電圧を印加する。Fig.2 に三相インバータ回路を示す。図中の直流電源には高圧電源装置(マクセック社製 AMC-50K1.2P)の出力を接続する。スイッチング素子 $S_1 \sim S_6$ は本研究では半導体素子ではなく、高電圧リレー(cynergy3社製 DAT71215F-HR)と高電圧ダイオード(Power Semiconductor Technology 社製 2CL71A)を用いた。スイッチング素子の ON/OFF にはデジタル入出力ユニット(Y2 Corporation 社製 dio-16/16d-ubc)を用いた。

電界カーテンは両面プリント基板(70×120×1.6 mm)上に Fig.3 のように作成した。両面プリント基板をエッチングし、基板表面には等間隔で銅製の幅 0.3

mm の平行線電界カーテン電極を形成し、その上にカバーガラス(70×120 mm)を透明接着剤(モメンティブジャパン社製 TSE389C)を用いて接着し、絶縁破壊や偶発的な感電を防止した。

裏面には三相インバータの各相出力端に接続する端子を設け、スルーホールを通して表面に電圧を供給する。

電界カーテンは太陽電池受光面に設置するものなので太陽光を遮らないよう透明な材質、もしくは電極がきわめて細いものが求められるが、本実験は模擬実験であるため基板は入手が容易な不透明なものを用いている。

ガラス版をのせた基板断面図をFig.4に示す。基板は絶縁体支柱を用いて設定された傾斜角に固定した。傾斜角は想定している太陽電池モジュールの設置場所が乾燥地であり、これは主に低緯度地域に主に存在することから0~20°とした。

実験は気流による影響を避けるため、Fig.5 のようなガラスケース内で行う。ケースの寸法は幅 600 mm, 奥行き 300 mm, 高さ 360 mm である。

砂は鳥取砂丘から採取したものを砂をふるいにかけて、粒径 0.3 mm 以下のものを使用した。

実験は 22~25°C, 相対湿度 50~55% の環境の中で行った。砂の除去は受光面が完全に砂に覆われる前に行うほうが望ましいと思われる。そこでカバーガラス上に均一

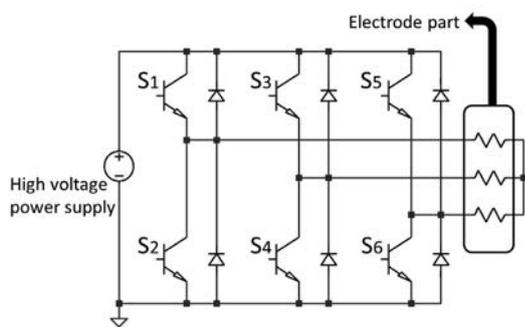


Fig.2 Three-phase DC/AC inverter circuit

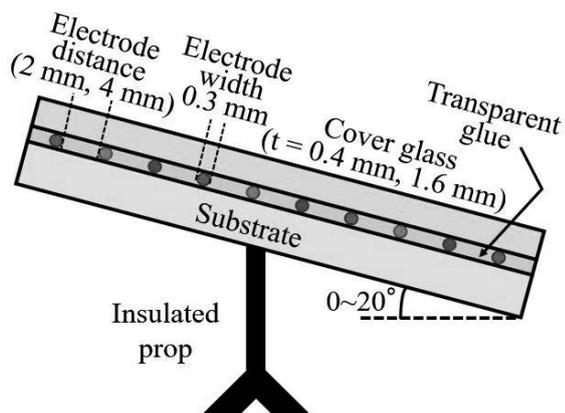


Fig.3 Cross section of electric field curtain for experiments. EFC is fixed at a given tilt angle.

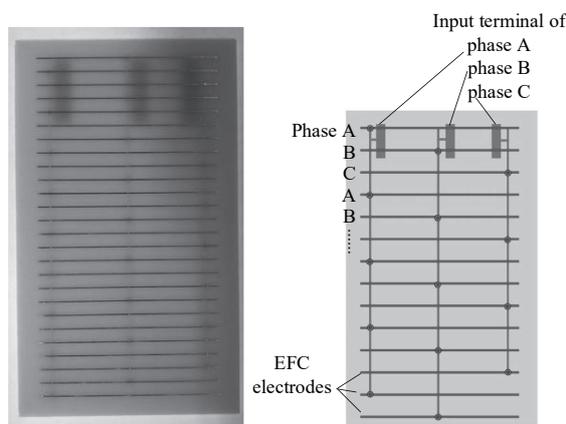


Fig.4 Electrode for three-phase EFC on PCB

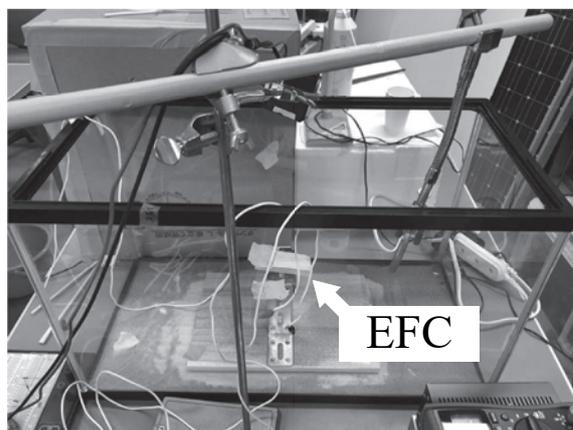


Fig.5 Experiments are carried out in a glass box to prevent air flow.

に砂 (0.2 g) を散在させた。この量はカバーガラス上にまばらに存在する程度である。また電界カーテンに印加する電圧の周波数は予備実験で砂の移動が観察しやすかった 0.17 Hz とした。砂の粒子にも慣性力やガラス面への粘着力があるため、周波数が高すぎると砂は移動できないと思われる。

また試行ごとに除電装置 (KEYENCE 社製 SJ-L005F) を用いてカバーガラス表面の残留電荷を除電した。

4. 実験結果

実験における性能評価として、電界カーテンを作動させる前にカバーガラス上に存在する砂の重量と作動後の砂の重量の比率を算出し砂じん除去率とした。前述のようにカバーガラスに 0.2 g の砂を散在させるが、カバーガラスを傾斜させると砂の一部が滑落す可能性がある。これを考慮して砂じん除去率は電圧印加によって除去できた量を α [g], 印加前に傾斜によって滑り落ちた量を β [g] とし、式 (1) で計算する。

$$\text{砂じん除去率}[\%] = \alpha / (0.2 - \beta) \times 100 \quad (1)$$

β は傾斜角 0° で 0 g, 10° で最大 0.01 g, 20° で約 0.03 g であった。また実験は 1 つの項目につき 10 回行い、そこで得られた除去率の最大値と最小値を除いた計 8 回で平均をとり、これを平均除去率とした。

4.1 印加電圧の違いによる除去率の変化

固定条件として傾斜角 10° , カバーガラスの厚さ 0.4 mm, 電極間隔 4 mm とし、楕形電極への印加電圧を 2 kV ~ 6 kV とした。

除去率を Fig.6 に、電圧印加前及び印加後 (3 kV, 6 kV) の基板の画像を Fig.7 にそれぞれ示す。2 kV, 3 kV に関しては、ほとんど砂が落ちなかったのに対し、4 kV 以降では除去率の大幅な向上が見られ、特に Fig.6 でもわかるように 6 kV では約 8 割の砂を除去することができた。

4.2 傾斜角の違いによる除去率の変化

固定条件として印加電圧 5 kV, カバーガラスの厚さ 0.4 mm, 電極間隔 4 mm とし、傾斜角を 0° , 10° , 20° とした。傾斜角に対する砂の除去率を Fig.8 に示す。傾斜角が大きくなるに従って、除去率が高くなった。

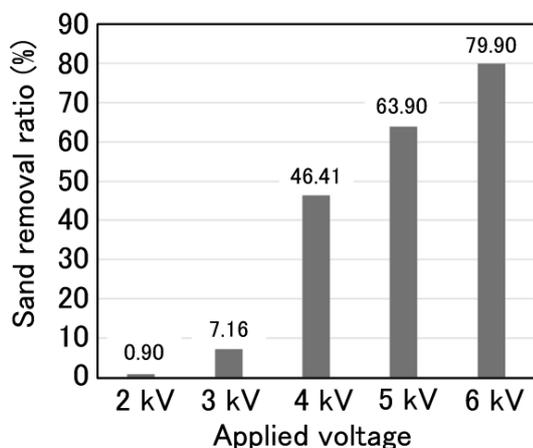


Fig.6 Sand removal ratio for each applied voltage (Tilt angle 10° , Cover glass thickness 0.4 mm, Electrode distance 4 mm)

4.3 ガラスの厚さの違いによる除去率の変化

固定条件として印加電圧 5 kV, 傾斜角 10° , 電極間隔 4 mm とし、カバーガラスの厚さを 0.4 mm, 1.6 mm とした。ガラスの厚さに対する除去率を Fig.9 に示す。0.4 mm では 63.90% 除去できたのに対し、1.6 mm では 3.94% となり、ほとんど砂が除去できなかった。

4.4 電極間隔の違いによる除去率の変化

固定条件として印加電圧 5 kV, 傾斜角 10° , カバーガラスの厚さ 0.4 mm とし、楕形電極の間隔を 2 mm, 4 mm とした。電極間隔に対する除去率を Fig.10 に示す。4 mm では 63.90%, 2 mm では 77.94% となり、電極間隔が小さいほど除去率が向上した。

本章で述べたすべての試行において、砂の移動は 1 分以内に終了し、電界カーテンを流れる電流は高圧電源装置のモニター端子より測定したところ最大でも $2 \mu\text{A}$ 程度であり、消費電力はせいぜい十数ミリワット程度であった。

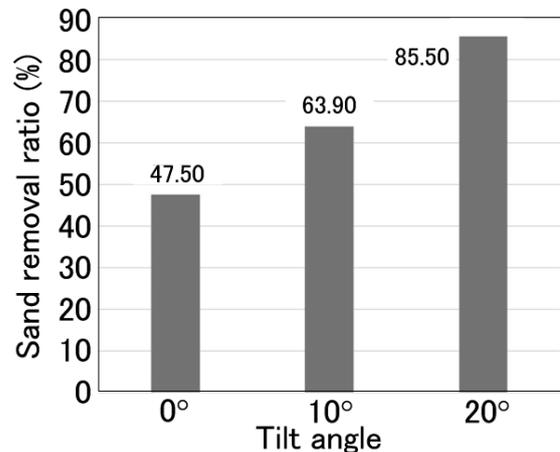


Fig.8 Sand removal ratio for each tilt angle (Applied voltage 5 kV, Cover glass thickness 0.4 mm, Electrode distance 4 mm)

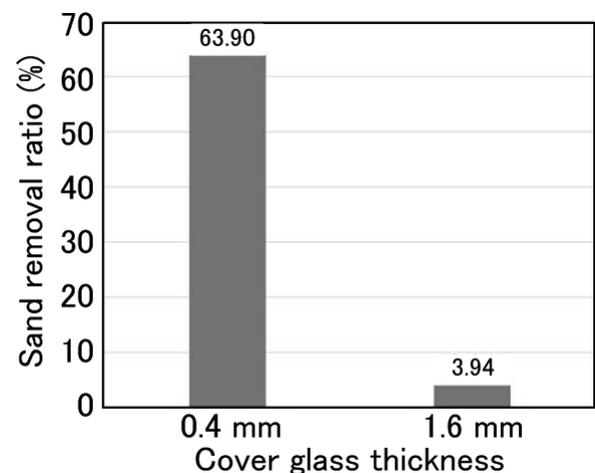
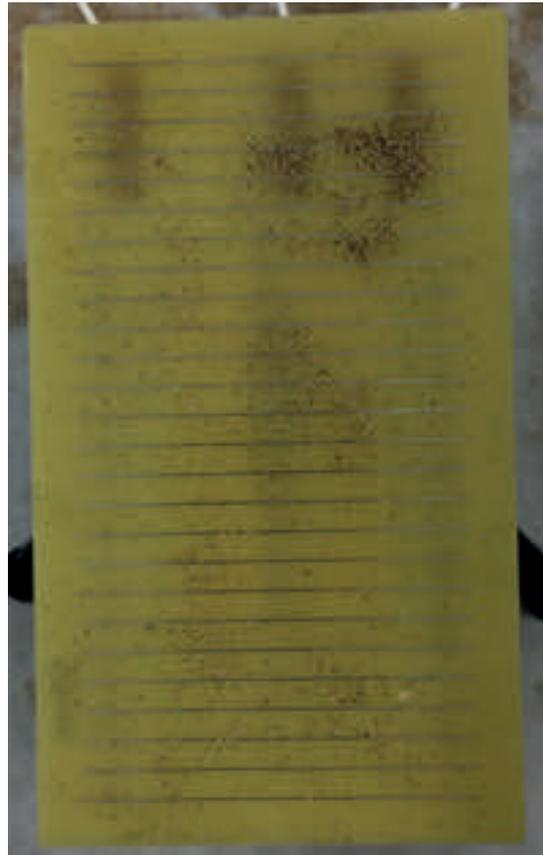


Fig.9 Sand removal ratio for each cover glass thickness (Applied voltage 5 kV, Tilt angle 10° , Electrode distance 4 mm)



(a) Before voltage application (3 kV)



(b) After voltage application (3 kV)



(c) Before voltage application (6 kV)



(d) After voltage application (6 kV)

Fig.7 Sand distribution on the electric field curtain (Tile angle 10°, Cover glass thickness 0.4 mm, Electrode distance 4 mm)

5. 考察

4.1, 4.3および4.4の各節では、楕形電極への印加電圧が高く、ガラス厚さは薄く、電極間隔がせまい方が砂の除去率が高くなる、これはガラス表面における電界強度が強い方が砂に作用するクーロン力が大きくなり除去率が高くなることを表している。4.2節では基板の傾斜が大きくなると、重力の影響が加わり除去率が高くなったと考えられる。しかし実際の運用を考えるとより使用頻度の高い傾斜角 10° 前後の場合でも高い除去率が必要となるため、更なる改善が求められる。

実験全体を通して、電圧印加後に基板上にのこった砂の状態をみると、砂が粉粒体として堆積しているものがあった。ここで砂が粉粒体となって堆積するメカニズムについてのイメージ図を Fig.11 に示す。ナミブ砂漠の砂には正および負に帯電する粒子が混在していることが報告されており⁽³⁾、今回実験で用いた鳥取砂丘の砂も同様に正と負に帯電している粒が混在していることを確認している^(4,5)。このことから基板上に残った砂は正負に帯電した砂が互いに引き寄せられて粉粒体となったものではないかと考えられる(枠内)。固まったことにより、重量が増し摩擦力のようなカバーガラスへの粘着力の影響が大きくなり、除去されずに残ったと考えられる。

電界カーテンの消費電力については、今回用いた面積 84 cm^2 のカバーガラスに対して十数ミリワット必要であるとすると、 $10,000\text{ cm}^2$ (出力約 100 W)の太陽電池を想定した場合、面積が約 120 倍であるため電界カーテン用

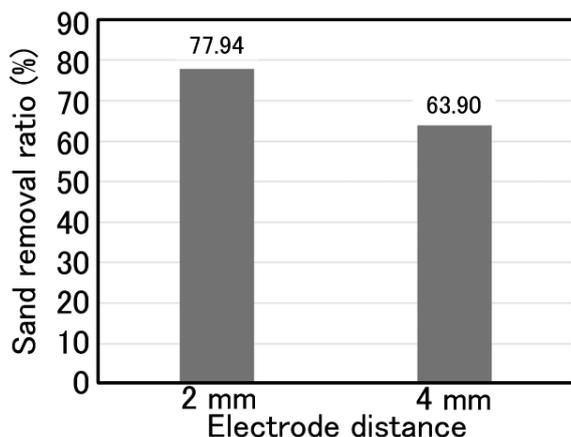


Fig.10 Sand removal ratio for each electrode distance (Applied voltage 5 kV, Tilt angle 10° , Cover glass thickness 0.4 mm)

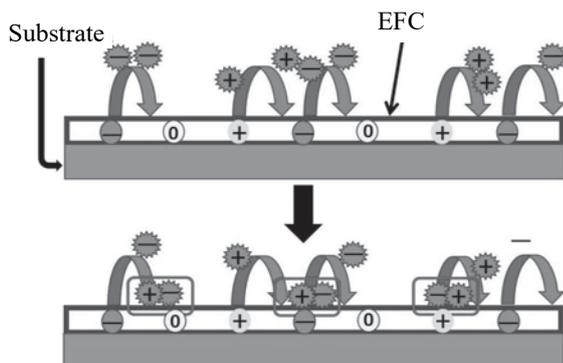


Fig.11 Mechanism of sand lamp formation

の電源が理想的であるとすれば必要な電力は約 $1.2\sim 2\text{ W}$ 程度と見積もられる。

6. 今後の展望とまとめ

太陽光発電は様々な環境要因によって発電量が左右され、その一例として天候による影響がある。そこで雨の少ない乾燥地で太陽電池モジュールを設置することで安定して発電ができると考えられる。しかしながら乾燥地では砂やちりが多いため、太陽電池モジュール上にこれらが堆積し、発電量の低下を招く問題点がある。その解決策として電界の力を用いた電界カーテンによる除去方法を提案した。本実験では種々の条件に対し、太陽電池モジュール受光面を想定したガラス板上に存在した砂の除去率の定量評価を行った。

電界カーテン用の高電圧発生に関しては、現在は商用電源や $12\sim 24\text{ V}$ の蓄電池の電力を発振・昇圧整流してキロボルトオーダーの電圧を発生する高電圧モジュールが多数市販されている。電界カーテンは消費電力が小さいため、太陽電池で発電した電力の一部を鉛蓄電池等に充電し、そのようなモジュールを用いることで容易に実現が可能である。

実際の太陽電池モジュール受光面に電界カーテンを設置した場合、カーテンの電極が太陽光を遮ると発電出力が減少する。対策としては非常に細い線電極や透明電極の採用が考えられるが、透明電極であっても透過率は 100% ではないため電極間隔を広くすることが望ましい。また、太陽電池モジュールのカバーガラスは強度を確保できるような厚み($3.2\sim 4.0\text{ mm}$)であり、これは今回実験で用いたカバーガラスよりもかなり厚く、そのようなガラス板の下に電界カーテンを配置すると砂の除去に必要な電圧が非常に高くなってしまう。電圧をあまりにも高くすることなく、適切な強度を維持するためには Fig.12 のようにモジュールのカバーガラスを2層にし、その間に電界カーテンの電極をはさむ構造を採用することが考えられる。上部のカバーガラス A を薄くすることができれば必要な電圧は低くなる。例えば、カバーガラス A の厚みを 0.4 mm 、B の厚みを 3.2 mm とすると高い除去性能が期待できる。今後はこのような太陽電池モジュールを試作し、モジュールの発電性能および砂の除去の状態を調査する予定である。

また、電界カーテンの採用により、太陽電池セル近傍に高電圧導体が存在する状態となり、これが太陽電池セルの劣化およびモジュールの出力に接続された回路の動作に影響をおよぼすおそれがある。この対策としては (1)電界カーテン作動時にはモジュールを外部回路から切り離す、(2)Fig.12 での下部カバーガラス B とセルの間に透明電極を配置してこれを接地する、等が考えられる。(1)については別報で述べ、(2)は現在調査中である。

さらに、本実験では行わなかった乾燥地の砂を用いて実験を行い、電界カーテンを採用することによるその地

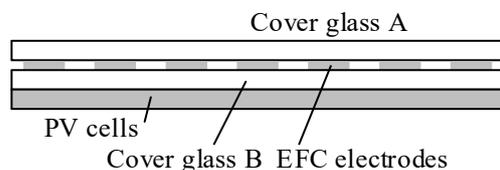


Fig.12 PV module with double-layer cover glass and EFC electrodes

域での発電電力量の増加率を調査する予定である。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP19K12428 および鳥取大学乾燥地研究教育機構「砂丘地保全・活用プロジェクト」からの助成を受けて行われた。本報は 2019（令和元）年度の日本太陽エネルギー学会研究発表会で発表したものに加筆したものである。

参考文献

1) K. Mazumder, Arash Sayyah, Mark N. Horenstein, Malay, Energy yield loss caused by dust deposition on photovoltaic panels, *Solar Energy* **107**, 576-604 (2014)

- 2) Hiroyuki Kawamoto, Electrostatic cleaning equipment for dust removal from soiled solar panels, *Journal of Electrostatics* **98**, 11-16 (2019)
- 3) Hiroyuki Kawamoto, Bing Guo, Improvement of an electrostatic cleaning system for removal of dust from solar panels, *Journal of Electrostatics* **91**, 28-33 (2018)
- 4) 小田原直樹, 電界カーテンによる乾燥地に設置する PV モジュール上の砂じん堆積防止のための基礎研究, 平成 29 年度鳥取大学修士論文 (2018)
- 5) N. Odawara, R. Nishimura, Prevention of sand accumulation on the Surface of PV modules installed in arid-land by using Electric field, *Proceedings of JSES/JWEA Joint Conference (2017) (Oct. 2017)*, 229-232, Niigata, Japan.
- 6) 竹形祐毅, 小田原直樹, 西村 亮, 太陽光パネル上の砂じん堆積防止のための電界カーテンの基礎研究, 電気・情報関連学会中国支部連合大会(2018 年 10 月), R18-07-08, 広島県 広島市.