

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 17 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360116

研究課題名(和文) 太陽電池パネルに堆積する粉塵の静電クリーニング

研究課題名(英文) Electrostatic Cleaning System for Removal of Sand from Solar Panels

研究代表者

川本 広行 (Kawamoto, Hiroyuki)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：50318763

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,800,000円、(間接経費) 4,140,000円

研究成果の概要(和文)：大規模な太陽光発電が注目されているが、ソーラパネル上に砂が堆積し、発電効率を低下させることが問題となっている。このため静電クリーニングシステムを考案し、実験とシミュレーションで有効性を実証した。ガラス基板に埋め込んだ細い平行電極線に2相の方形波を印加すると、基板上の砂塵は電極間の電気力線によって往復運動をするが、パネルは太陽の向きに傾けて設置されているため、重力によって下方に排出される。実験の結果、20度以上程度のわずかな傾きがあれば、高い性能が得られることがわかった。

研究成果の概要(英文)：A unique cleaning system has been developed utilizing an electrostatic force to remove sand from solar panels. A single-phase voltage is applied to parallel wire electrodes embedded in a cover glass plate of a solar panel. It was demonstrated that more than 80% of the adhering sand was repelled from the surface of the slightly inclined panel, and the output power generated by the solar panel was recovered up to 80% after the cleaning operation. The power consumption of this system is virtually zero. This technology is expected to increase the efficiency of mega solar power plants constructed in deserts at low latitudes.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学 知能機械学・機械システム

キーワード：メカトロニクス 太陽光発電

1. 研究開始当初の背景

IPCC(気候変動に関する政府間パネル)報告により、地球温暖化の進行とそれに対する人為的活動の直接的な関与が指摘されている。爆発的に増加するエネルギー消費量、深刻化する地球環境問題は、化石燃料をベースとした大量生産・大量消費の社会産業構造の限界を示しており、今後は生活水準や経済活動は維持・向上させつつも、資源消費や環境への悪影響を抑制する「持続可能な社会産業構造」への転換が大きな課題となっている。“クリーンなエネルギー”である太陽光・熱発電は、化石燃料のような偏在性もなく、社会産業構造を地球規模で転換していく有力な手段の一つである。

このような状況の下で、多くの研究開発が行われているのは周知のとおりであるが、セルの発電効率向上といった中心的な研究課題の他に、太陽電池パネルに堆積する粉塵が発電効率の低下を招くという、泥臭くも看過できない問題がある。すなわち、これらの発電システムは日照量の多い低緯度の砂漠地帯に設置するのが効率的であり、実際にアブダビなどで大規模な計画があるが、これらの地帯では砂塵がパネルやミラーに堆積し、しかも降雨がないので堆積した砂塵が除去されないで発電効率の低下を招くという問題がある。現在は低賃金の外国人労働者の手作業で行うことが計画されているが、非人間的であり、本末転倒である。

このため、進行波電界を利用した自動粉塵クリーニングシステムを開発する。このシステムは、パネル上に透明電極を印刷し、これに4相の高電圧を印加することによって進行波を形成し、この進行波の移動にもなって粉塵を静電搬送するシステムである。これまでわれわれは NASA と共同で月探査用の小規模システムを開発してきたが、これを低コストで大規模な民生品に適用する研究を行う。

このシステムは、増田(東京大学)によって最初に発表されたものであり、その後、主として複写機関連の研究者・機関によって研究されてきた。本研究代表者(川本)も、このシステムをレーザープリンタの新しい現像システムに適用することを目的に研究を行ってきた。しかし最近、月や火星探査をするうえで、月面や火星表面のダストがソーラーパネルやレンズに堆積して機能劣化することが問題となっており、その対策として、この静電ダスト搬送システムが注目されている。当研究室では、実際に NASA からアポロ 11号が持ち帰ったルナダストを提供され、その実証試験に成功した。

2. 研究の目的

CO₂ 低減の観点から、大規模な太陽光発電や太陽熱発電が注目されている。これらの発電システムは日照量の多い低緯度の砂漠地帯に設置するのが効率的であるが、これらの

地帯では砂塵がパネルやミラーに堆積し、しかも降雨がないので堆積した砂塵が除去されないで発電効率の低下を招くという問題がある。

このため、電界を利用した自動粉塵クリーニングシステムを開発することを目的とする。これまでわれわれは NASA と共同で月探査用の小規模システムを開発してきたが、これを低コストで大規模な民生品に適用する研究を行う。

なお、月探査や電子写真など紛体が関与する問題への応用にも大きなニーズがあるので、これらに関しても研究を進める。

3. 研究の方法

静電力を利用する点ではこれまでの宇宙用のものと同じ範疇であるが、大規模で低コストなエネルギーシステムに適用するためには、まったく新しい発想に基づくシステムでなければならない。このため、まず対象とする砂の特性を把握し、つぎに、クリーナを構成する電極と透明基板材料、電極構成と電源などに新しい技術を開発した。前者に関しては、広ピッチ線電極の埋め込み基板を、後者に関しては、正負高圧電源のスイッチング方式を開発した。また、進行波によって粉塵を一方に搬送するためには、3相以上の多層交流でなければならないが、太陽電池パネルは傾いており、重力を利用することによって、単相交流でも搬送できる可能性がある。その方式について検討した。これが実現できれば、システム的大幅な簡約化が可能となる。図1にシステム構成の概要を示す。

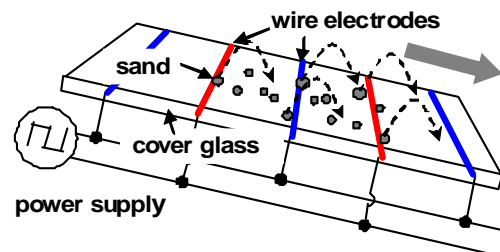


Fig. 1. Schematic diagram of the electrostatic cleaning system for removing sand from the solar panel.

クリーナーパネル：太陽電池パネルの表面カバーガラスに電極を埋め込む方式を検討する。クリーナーパネルは光透過性でなければならないため、銅ワイヤを電極とし、電極間ピッチを宇宙用の 0.6 mm から電極による遮光を最小限にするよう、7 mm に広げた。このような構成で所望の性能が得られるならば、高い光透過性を保ったままで、ほとんどコストアップすることなく、大面積のパネルが実現できる。

電源：進行波電界ではなく、2層交流電界を印加した。この場合粒子は一方には搬送されないが、実際の太陽電池パネルは多少とも傾いているので、重力を利用すること

によって、ダストを排出できる。これまでにない新しい方式であるが、これが可能になれば、電源を大幅に合理化できるだけでなく、クリーナーパネル端部の電極取出部を3次元から2次元構造に簡略化できる。

砂： 実験には、図2に示すような、密度や粒径、比誘電率などが異なる6種類の砂を用いた。なお、標準的にはAのナミブ砂漠の砂を用いた。

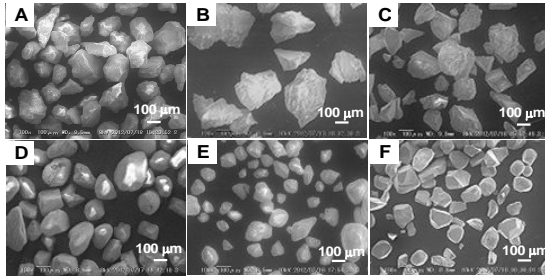


Fig. 2 Six kinds of sand used for experiments.

4. 研究成果

まず、図3に基板の傾きに対するクリーニング率の測定結果を示す。印加電圧の相数をパラメータとしている。図から、20度程度以上の傾きがあれば、進行波ができない2相でも、4相とほとんど同じ高い性能が得られることがわかる。したがって、以降の実験では、20度の傾きを標準とした。

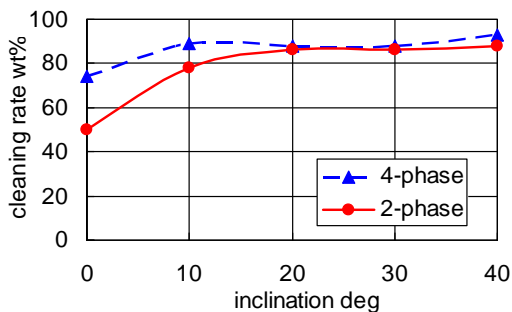


Fig. 3 Relationship between inclination of panel and cleaning rate (100-g/m² surface loading, 0.86 kVp-p/mm, 1 Hz).

つぎに、図4に印加電界(印加電圧を電極間ギャップで除したものと)と周波数の影響を示す。印加電圧が高いほど高いクリーニング効率が得られるが、実際の運転では、1.1 kVp-p/mm程度で絶縁破壊が生じるため、これによって印加電圧の上限が抑えられる。したがって、実際の印加電界は1 kVp-p/mm以下となるが、この場合でも、80%以上のクリーニング効率が実現できた。なお、周波数は20 Hz以下であればほとんどクリーニング効率は変わらなかった。なお、図中の実線は剛体モデルの個別要素法による計算結果であり、シミュレーション結果でも上述の特性をよく再現していることがわかる。

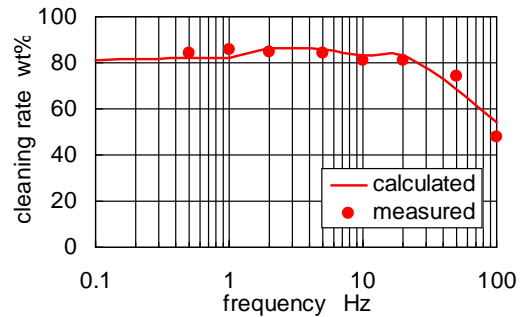
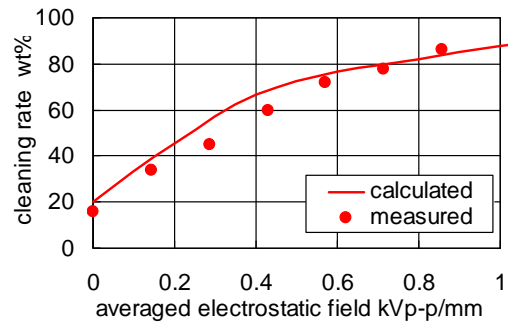


Fig. 4 Upper: Relationships between applied voltage (electrostatic field) and cleaning rate (20° inclination, 100-g/m² surface loading, 1 Hz); Lower: Relationships between frequency of applied voltage and cleaning rate (20° inclination, 100-g/m² surface loading, 0.86 kVp-p/mm).

以上の実験はパネルの表面に100 g/m²程度の密度で砂が堆積した場合の性能であるが、さらに大量に堆積した場合にどうなるかについても調べた。実験結果を図5に示す。図から、初期堆積量が300 g/m²程度までは、80%程度の高い性能が得られるが、それ以上になると性能劣化することがわかる。性能劣化の原因は、図5に付記したように、堆積した砂が電極間でブリッジ状に凝縮することによると推察された。そこで、パネルの上方にプラズマアクチュエーターを設置してパネルの傾き方向に強制対流を加えたところ、風速数 m/s 程度の微風でも、性能が大幅に向上した。実際のフィールドではもっと大きな自然風が期待できるので、砂の堆積時や風速の高い時にあわせて運転するなどの運転条件を適正化することによって、より高い性能が期待できる。

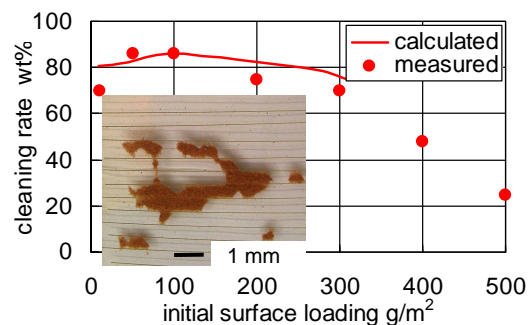


Fig. 5 Relationships between initial surface loading of sand and cleaning rate (20° inclination,

0.86 kVp-p/mm, 1 Hz). Attached photograph shows aggregated sand on the panel after operation. Sand bridges adjacent electrodes, and locks on the plate.

なお、粒径がクリーニング性能に及ぼす影響を調べた結果は、図6に示すとおりである。ここで、粒径別の粒子はふるいを用いて分別したものである。25 μm 以下の小粒径粒子と300 μm 以上の大粒径粒子のクリーニングがむづかしいとの結果となったが、前者は粒子とパネル間の付着力が静電力よりも相対的に大きいためであり、後者は、重力が静電力よりも相対的に大きいためであると考えられる。このシステムに適した粒径は、50-300 μm 程度であり、ほとんどの一般的な砂を網羅している。このため、図7に示すように、砂の種類によって差異はあるが、概ねどのような砂でもクリーニングすることができた。

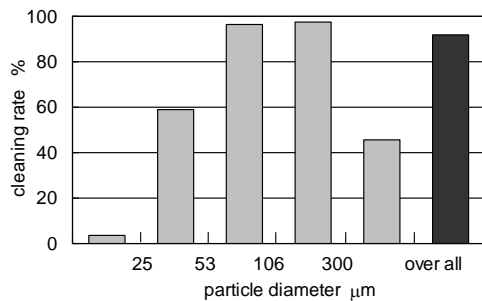


Fig. 6 Cleaning rate for the classified particle sizes (100-g/m² surface loading, 20° inclination, 0.7 kVp-p/mm, 0.2 Hz).

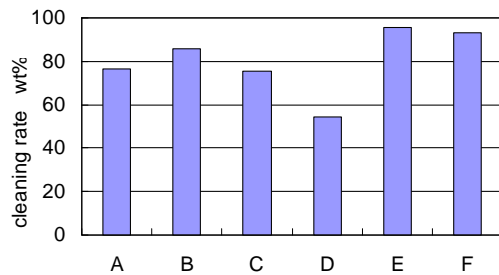


Fig. 7 Cleaning rate for six kinds of sand (300-g/m² surface loading, 20° inclination, 0.86 kVp-p/mm, 0.2 Hz).

最後に、図8にこのシステムに要する電力を示す。前述のように、7 kVp-p (1 kV/mm), 1 Hz 程度が運転条件として適正であるので、必要電力は0.2 W/m²程度となり、太陽電池の標準的な出力 150 W/m² に比べて十分小さいことがわかる。

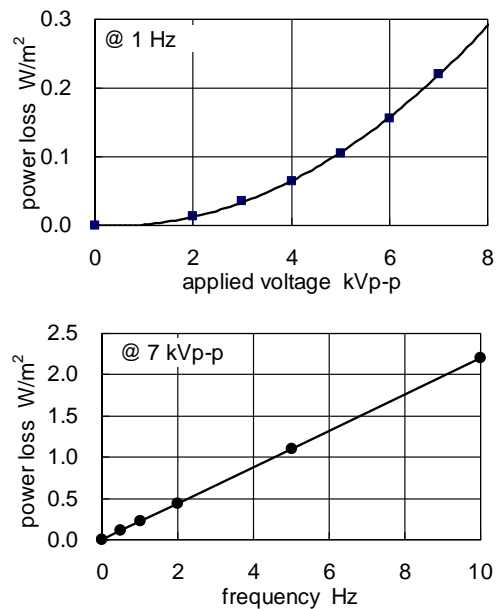


Fig. 8 Power consumption of electrostatic cleaning system.

以上をまとめて、実際の太陽電池パネルに適用した実証実験の一例を図9に示す。写真の左半分はこのシステムを適用した場合、右半分はない場合であり、堆積した砂塵が本システムによって除去されていることがわかる。

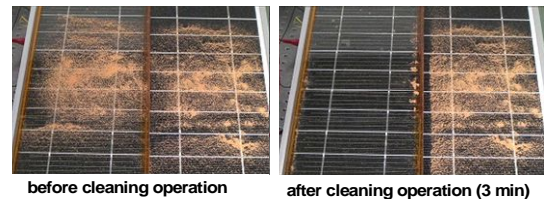


Fig. 9 Demonstration of electrostatic cleaning system (150-g/m² surface loading, 20° inclination, 0.7 kVp-p/mm, 0.2 Hz).

5. 主な発表論文等 〔雑誌論文〕(計13件)

1. H. Kawamoto, Sampling of Small Regolith Particles from Asteroids Utilizing Alternative Electrostatic Field and Electrostatic Traveling Wave, *J. Aerospace Engineering*, Vol. 27, No. 3 (2014) pp.631-635. (査読あり)
2. H. Kawamoto, Electrostatic Shield for Lunar Dust Entering into Mechanical Seals of Equipment Used for Lunar Exploration, *J. Aerospace Engineering*, Vol. 27, No. 2 (2014) pp.354-358. (査読あり)
3. H. Kawamoto and M. Adachi, Numerical Simulation and Direct Observation of Dynamics of Toner and Carrier Particles in Electrographic Two-Component Magnetic Brush Development System, *Journal of the Imaging Society of Japan*, Vol. 52, No. 6 (2013) pp.547-554. (査読あり)
4. H. Kawamoto, S. Iesaka and S. Watanabe, Pale Defect of Halftone Following Solid Im-

- age in Two-Component Magnetic Brush Electrophotographic Development System, *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, Vol. 6, No. 7 (2012) pp.1298-1306. (査読あり)
5. H. Kawamoto, Electrostatic Cleaning Device for Removing Lunar Dust Adhered to Space-suits, *J. Aerospace Engineering*, Vol. 25, Issue 3 (2012) pp.470-473. (査読あり)
 6. H. Kawamoto and H. Inoue, Magnetic Cleaning Device for Lunar Dust Adhering to Spacesuits, *J. Aerospace Engineering*, Vol. 25, No. 1 (2012) pp.139-142. (査読あり)
 7. H. Kawamoto and K. Shirai, Electrostatic Transport of Lunar Soil for In-Situ Resource Utilization, *J. Aerospace Engineering*, Vol. 25, No. 1 (2012) pp.132-138. (査読あり)
 8. H. Kawamoto, M. Uchiyama, B. L. Cooper, and D. S. McKay, Mitigation of Lunar Dust on Solar Panels and Optical Elements Utilizing Electrostatic Traveling-Wave, *J. Electrostatics*, Vol. 69 (2011) pp.370-379. (査読あり)
 9. H. Kawamoto and T. Miwa, Mitigation of Lunar Dust Adhered to Mechanical Parts of Equipment Used for Lunar Exploration, *J. Electrostatics*, Vol. 69 (2011) pp.365-369. (査読あり)
 10. H. Kawamoto and S. Iesaka, Characteristics of Development and Bead-Carry-Out Phenomena in Two-Component Electrophotographic Development System *J. Imaging Science and Technology*, Vol. 55, No. 3 (2011) pp. 030507-1-030507-6. (査読あり)
 11. H. Kawamoto and K. Tsuji, Manipulation of Small Particles Utilizing Electrostatic Force, *Advanced Powder Technology*, Vol. 22 (2011) pp.602-607. (査読あり)
 12. H. Kawamoto and N. Hara, Electrostatic Cleaning System for Removing Lunar Dust Adhering to Space-suits, *J. Aerospace Engineering*, Vol. 24, Issue 4 (2011) pp.442-444. (査読あり)
 13. 川本, 微粒子の精密制御が拓く新しい技術", *2011 Technical Review*, Asahi Sunac Corp. (2011) pp.14-28. (査読なし)
- [学会発表] (計 29 件)
1. H. Kawamoto and M. Adachi, Electrostatic Particle-Size Classification of Lunar Regolith for In-Situ Resource Utilization," *AIAA SciTech 2014*, National Harbor, Maryland, USA (2014-1-13).
 2. 星野、田島、稲荷、川本、月面探査機器の隙間へのルナダスト侵入を防止する静電シールド機構"、機械学会 第 22 回スペース・エンジニアリング・コンファレンス [SEC'13] 日大 (2013-12-20) B07.
 3. H. Maezono, K. Ashiba, Y. Hashi and H. Kawamoto, Sampling of Small Regolith Particles from Asteroids Utilizing Alternative Electrostatic Field, *The 20th Session of the Asia-Pacific Regional Space Agency Forum (APRSF-20)*, Hanoi, Vietnam (2013-12-3).
 4. 前園、芦葉、橋、川本、静電力を利用した小惑星からの粒子採取システムの開発、日本マイクログラフィティ応用学会第 27 回学術講演会 (JASMAC-27) 予稿集、芝浦工大豊洲キャンパス (2013-11-28) pp.56.
 5. 川本、戸出、須田、ISRU のための静電力を利用した月レゴリス分級機構の開発、日本機械学会 2013 年度年次大会、岡山 (2013-9-11).
 6. 川本、柴田、高橋、太陽電池発電パネルに堆積する砂の静電クリーニング、Dynamics and Design Conference 2013, D&D2013、九州産業大学 (2013-8-28) pp.93.
 7. H. Kawamoto, Sampling of Regolith Particles from Asteroids Utilizing Alternative Electrostatic Field, *Low-Cost Planetary Missions Conference (LCPM-10)*, Caltech, Pasadena, California (2013-6-19).
 8. H. Kawamoto and T. Shibata, Electrostatic Cleaning System for Removing Sand on Solar Panels, *The 39th IEEE Photovoltaic Specialist Conference (39th PVSC)*, Tampa, Florida (2013-6-17).
 9. H. Kawamoto, Electrostatic and Magnetic Cleaning of Lunar Dust Adhered to Space-suits, *The 29th International Symposium on Space Technology and Science (29th ISTS)*, Nagoya (2013-6-4) 2013-k-22.
 10. H. Kawamoto, Mitigation of Lunar Dust Adhered to Mechanical Parts of Equipment Used for Lunar Exploration, *The 29th International Symposium on Space Technology and Science (29th ISTS)*, Nagoya (2013-6-4) 2013-k-23.
 11. H. Kawamoto, Electrostatic Transport and Particle-Size Classification of Lunar Regolith for In-Situ Resource Utilization, *The 29th International Symposium on Space Technology and Science (29th ISTS)*, Nagoya (2013-6-4) 2013-k-24.
 12. 川本、小林、貝沼、柴田、高橋、木谷、強制対流を併用した太陽電池パネルの静電クリーニング、電磁力関連のダイナミクス SEAD25、箱根 (2013-5-15) pp.12-15.
 13. 安達、川本、電子写真の 2 成分磁気ブラシ現像系における磁気ブラシと感光体の接触状態が画質に及ぼす影響、Imaging Conference JAPAN 2012 Fall Meeting、京都 (2012-11-30) pp.5-8.
 14. 川本、ISRU のための月土壌の静電搬送、第 56 回宇宙科学技術連合講演会、別府 (2012-11-20).
 15. 對馬、宮本、川本、月面探査機器の隙間に侵入するルナダストの静電シールド機構、機械学会 機械力学・計測制御部門講演会 DD2012、慶応大 (2012-9-20) pp.60.

16. 芦場, 渡部, 川本, "静電力を利用した小惑星からのサンプリング技術", 機械学会機械力学・計測制御部門講演会 DD2012, 慶応大 (2012-9-20) pp.86.
 17. H. Kawamoto, Parametric Investigation on Dynamics of Toner and Carrier Particles in Electrophotographic Two-Component Magnetic Brush Development System Using Direct Observation Technique and Numerical Simulation, *NIP28: International Conference on Digital Printing Technologies*, Quebec, Canada (2012-9-13) pp.498-501.
 18. H. Kawamoto, Numerical Simulation of Two-Component Magnetic Brush Development System in Electro-photography, *2012 ASME-ISPS/JSME-IIP Joint International Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment, MIPE 2012*, Santa Clara, California (2012-6-18) pp.114-116.
 19. H. Kawamoto and K. Ashiba, Autonomous Electrostatic Sampling of Regolith from Asteroids, *Asteroids, Comets, Meteors 2012, ACM2012*, Niigata (2012-5-20) 6014.
 20. H. Kawamoto and P. Ye, Electrostatic Shield of Lunar Dust Breaking into Mechanical Seals of Equipment Used for Lunar Exploration, *Earth & Space 2012*, Pasadena, California (2012-4-18) pp.104-110.
 21. H. Kawamoto, Electrostatic and Magnetic Cleaning Systems for Removing Lunar Dust Adhered to Space-suits, *Earth & Space 2012*, Pasadena, California (2012-4-18) pp.94-103.
 22. H. Kawamoto, Electrostatic Regolith Sampling from Asteroids, *Earth & Space 2012*, Pasadena, California (2012-4-17) pp.385-392.
 23. 渡辺, 川本, 電子写真の二成分磁気ブラシ現像システムのシミュレーション, *Imaging Conference JAPAN 2011 Fall Meeting*, 京都 (2011-12-2) pp.25-28.
 24. H. Kawamoto, Cleaning Device for Lunar Dust Adhering to Spacesuits Utilizing Magnetic and Electrostatic Forces, *MAGDA2011: The 20th MAGDA Conference in Pacific Asia*, Kaohsiung, Taiwan (2011-11-16) pp.458-461.
 25. H. Kawamoto, S. Iesaka, T. Muroga and S. Watanabe, Pale Defect of Halftone Following Solid Image in Two-Component Magnetic Brush Development System in Electrophotography, *NIP27: International Conference on Digital Printing Technologies*, Minneapolis, USA (2011-10-4) pp.113-116.
 26. H. Kawamoto and S. Iesaka, Numerical Simulation on Dynamics of Toner and Carrier Particles in Two-Component Magnetic Brush Development System in Electrophotography, *NIP27: International Conference on Digital Printing Technologies*, Minneapolis, USA (2011-10-4) pp.117-119.
 27. 叶, 吉江, 川本, 機器の隙間に入り込むルナダストの静電シールド機構, 日本機械学会年次大会, 東工大, J192033 (2011-9-13).
 28. 川本, 家坂, 電子写真の二成分磁気ブラシ現像システムにおける現像剤粒子の動特性シミュレーション, *Imaging Conference JAPAN 2011*, 東京 (2011-6-7) pp.225-228.
 29. 戸出, 村上, 川本, 宇宙服に付着したルナダストの静電クリーナーの開発, 第23回電磁力関連のダイナミクスシンポジウム SEAD23, 名古屋 (2011-5-18) pp.303-306.
- 〔図書〕(計0件)
- 〔産業財産権〕
出願状況(計0件)
取得状況(計0件)
- 〔その他〕
ホームページ
<http://www.kawamoto.mech.waseda.ac.jp/kawa/>
6. 研究組織
(1) 研究代表者
川本 広行 (KAWAMOTO, Hiroyuki)
早稲田大学・理工学術院・教授
研究者番号: 50318763