

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 5 日現在

機関番号：13801

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14502

研究課題名(和文) 深紫外LEDによる光電離を利用したナノ粒子推進剤マイクロスラストの研究

研究課題名(英文) Preliminary study on micro thruster using nano-particle propellant and photo-ionization by deep ultraviolet light

研究代表者

松井 信 (Matsui, Makoto)

静岡大学・工学部・准教授

研究者番号：90547100

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：深紫外光を用いた粉体粒子の帯電実験を行った。まず付着力による粒子の塊化を防ぐために超音波篩を用いた粉体供給システムを開発した。次に自由落下する粒子に深紫外光を照射し電場をかけることで粒子の飛距離から帯電量を見積もった。その結果、粒子の帯電・加速には成功したが帯電量は理論値より二桁程度低い値となった。正極側にも粒子が移動していることからこの結果は粒子供給時に摩擦により発生する静電気の影響だと考えられる。

研究成果の概要(英文)：Charging experiments on powder particles was conducted using deep ultraviolet light. First, a powder supply system using an ultrasonic sieve was developed to prevent agglomeration of particles due to adhesive force. Next, deep ultraviolet light was irradiated on free falling particles and an electric field was applied to estimate the charge amount from the distance of particles. As a result, although the charging and acceleration of the particles were successful, the charge amount was lower than the theoretical value by about two orders of magnitude. Since particles move also to the positive electrode side, this result might be considered to be the effect of static electricity generated by friction at the time of particle supply.

研究分野：航空宇宙

キーワード：宇宙推進機 光電離 粉体推進剤 帯電 深紫外光

1. 研究開始当初の背景

(1)従来の小型イオンエンジン/ホールスラスタは推進剤用タンクの重量が相対的に大きくなり、比推力が高くてシステムとしてのペイロード比削減は困難であった。従って機体を推進剤とする限りペイロード比の向上は困難である。

(2)一方で固体推進剤である PPT は推進剤タンクが不要であるため比較的軽量化が可能であるが、プラズマ化と加速を同時に行うため、イオン化されない昇華した推進剤が損失となるため比推力、推進効率ともに低く、得られる速度増分が低い点が課題であった。

2. 研究の目的

上記課題を克服するため、推進方式としてイオンエンジンと同じ比推力、推進効率の高い静電加速方式、推進剤として軽量化が可能である固体推進剤を用いた新しい推進システムの実現可能性を検証する。そのため推進剤としてナノ粒子に着目した。ナノ粒子は粉体であるため高密度かつ貯蔵性が良いだけでなく、従来の固体推進剤に比べ流動性をもつため供給量の制御が容易である利点を持つ。またイオン化方式として放電ではなく、深紫外 LED による光電離 (光電効果) を利用して直接粒子を帯電させることで高効率化が期待できる。本研究ではその基礎となる深紫外光による粉体の光電離過程を実験的に検証することを目的とする。

3. 研究の方法

(1)浮遊による帯電量推定
 実験装置を図 1 に示す。深紫外光源として中心波長 260 nm, 半値全幅 12 nm の LED を用いた。推進剤模擬として用いた炭素粒子の仕事関数は 4.8 eV (258 nm 相当) であり LED 光での光電離が期待できる。正極板表面に配置した直径 5 μm 炭素粒子に LED 光を照射し帯電させ、印加電圧を増加させることで粒子を浮遊させ 400 nm のレーザー光により可視化することで高速カメラ (Phantom v. 9.0) を用いて粒子の移動状態を観察し、帯電量を推定する。

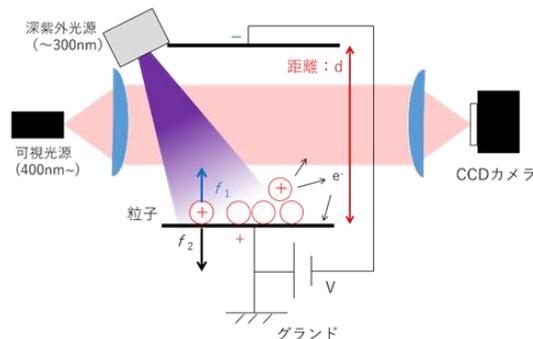


図 1. 浮遊による帯電量測定系

(2) 飛翔距離による帯電量推定

図 2 に飛翔距離による帯電量測定概略図を示す。粉体を電極間に自由落下させ、電極間内で重水素ランプ (225 nm) を照射し帯電させ印加電圧により水平方向に静電力を加える。電極板下方に 3 mm ごとに仕切りを区切ったセパレータを設置し、各部屋での粒子量を電子天秤により測定する。垂直方向は自由落下と仮定することで水平方向移動距離から帯電量分布を推定することができる。粉体は粒子径が小さいほど付着力により塊になりやすい。従って本実験では直径 50 μm の炭素粒子を用い、超音波篩により粒子を分離し、かつ一定の流量で供給できる粉体供給システムを開発した (図 3)。

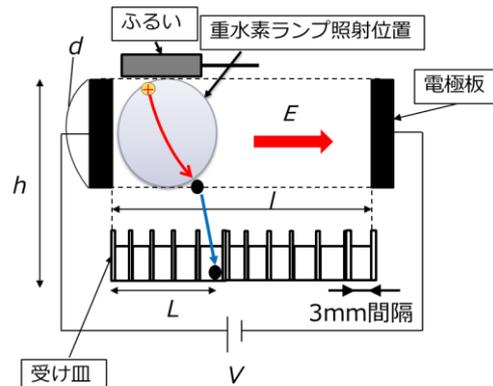


図 2. 飛翔距離による帯電量測定概略図

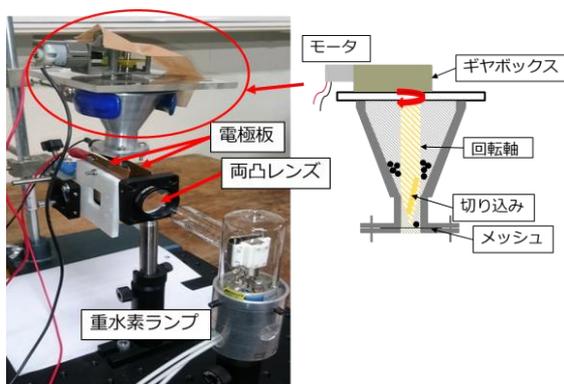


図 3. 粉体供給・帯電装置

4. 研究成果

(1) 浮遊による帯電量推定
 高速カメラの撮影条件はフレームレート 4.7k fps, 露光時間 100 μs, 解像度 576×576 pixel であり、可視化用レーザー光とレンズにより 480×480 μm 領域を撮影することで空間分解能は 0.83 μm となる。これにより 5 μm の粒子が 6 pixel 分に相当し撮影が可能となる。仕事関数を平板と同等と仮定すると理論的な帯電量から算出される浮遊する電圧は 23 V となる。従って本実験では印加電圧を 23 V から最大 33 V まで変化させて撮影を行った。その結果、どの電圧条件でも粒子の浮遊は確認できなかった。図 4 に 23 V と 28 V 時の画像を示す。図が示すように 28 V 時には 23 V 時に比べ突起部が発生しており、こ

これは粒子が電場方向に力を受けている、すなわち帯電していることを示している。しかしながら浮遊しなかったのは粒子同士の付着力が静電力を勝ったためだと考えられる。付着力は粒子の形状等様々な条件によって決まるが一般に 30 μm 程度で自重と同程度と言われている。従って今回の条件で付着力を上回る静電力を得るには 5 kV 以上の印加電圧が必要だと考えられる。



図 4. 印加電圧時の粒子の可視化 (左図: 23 V, 右図: 28 V)

(2) 飛翔距離による帯電量推定

①粉体供給システムの開発

まず、粒子を一定の流量かつ超音波篩により付着による塊化を防ぐ供給系を開発した。篩として粒子径 50 μm に対し、200 μm のメッシュを用いた。図 5 に供給時間と流量の関係を示す。図が示す通り供給開始直後は流量が単調に減少していくが、150 s 以降はほぼ一定になることがわかった。従って本研究ではまず予備作動を行い、供給量が一定の状況で実験を行った。

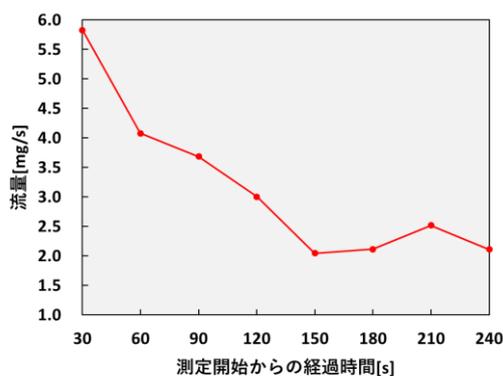


図 5. 供給時間と流量の関係

②飛翔距離による帯電量推定

図 6 に 1.5 kV 印加時に重水素ランプをオン・オフ時の粒子分布を示す。図が示すように深紫外光を照射することで粒子分布が電場方向に移動していることがわかり、粒子の帯電・加速に成功した。移動量から推定される粒子の平均帯電量は 7.0×10^{-19} C, 最大帯電量は 1.6×10^{-18} C であった。印加電圧を変えた実験でも帯電量は同等の値であった。一方、理論的な帯電量は 4.0×10^{-16} C であるので二桁程度実験値が低くなった。この原因として静電気と再結合の効果が考えられる。光電離により粒子は正に帯電するはずである

が、実験では正電極板に一部の粒子が付着した (図 7)。これは供給時の摩擦により静電気が発生し、負に帯電した粒子が電場により移動した。実際、深紫外光を照射せず電場を印加した場合、粒子は全体的に正電極側に移動している。従って、静電気による帯電の分、光電離の効果が低下していると考えられる。次に再結合に関して、粒子が深紫外光を通過する際、初期配置や電場による移動のため他の粒子に光が遮られ再結合する時間帯が存在すると考えられる。その結果、実効的な加速時間が減少し帯電量が過小見積もりされると考えられる。以上の結果から摩擦による帯電を防ぎかつ高効率に光を照射するためには粒子をテープなどによりシート状に供給する装置が有効であると考えられる。

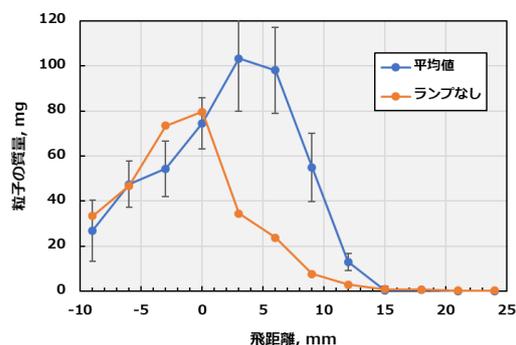


図 6. 深紫外光オン・オフ時の粒子分布 (印加電圧: 1.5 kV)

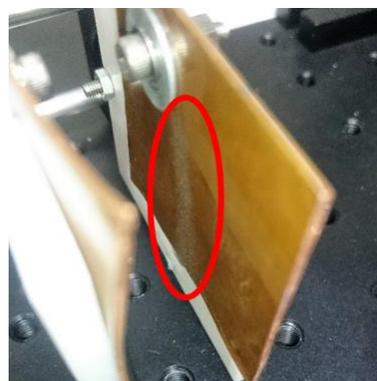


図 7. 実験後の電極板写真

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 0 件)

〔学会発表〕 (計 4 件)

- ① 丹羽亮貴, 松井信, “光電離による微粒子の帯電量測定,” 2017 年度ラボワーク発表会, 2018.
- ② 松井信, “レーザー維持プラズマの宇宙工学への応用,” 第 9 回静岡大・核融合科学研究所連携研究フォーラム, 2018 年.
- ③ Matsui, M., and Kishida, A., “Preliminary experiment of electric field measurement in applied

magnetic field plasma by laser induced fluorescence dip spectroscopy, ” 30th International Symposium on Space Technology and Science, 2017.

- ④ 波田衛, 松井信, “深紫外 LED を用いた炭素粒子帯電実験,” 2016 年度プラズマ夏の学校, 2016 年.

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

なし

〔その他〕

ホームページ等

<http://ars.eng.shizuoka.ac.jp/~matsui/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松井 信 (MATSUI, Makoto)

静岡大学・工学部・准教授

研究者番号 : 90547100