

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：13801

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K21863

研究課題名（和文）プラズマと静電気力による微粒子制御の検討

研究課題名（英文）Study of microparticles control by plasma and electrostatics force

研究代表者

清水 一男（Shimizu, Kazuo）

静岡大学・イノベーション社会連携推進機構・准教授

研究者番号：90282681

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では櫛形電極を用いて粒径の異なる3種類の炭化タングステン微粒子を対象とし電極表面上の微粒子の除去を行った。印加電圧の振幅・周波数や微粒子の粒径を変化させ実験を行ったところ振幅の増加とともに除去率の増加が確認された。また各微粒子の除去率に関して周波数依存性を調べたところ、周波数の増加とともに除去率の減少が確認された。これは高周波数において線電極からの反発を繰り返すことにより線電極間で振動運動し、電極間にトラップされたためと考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

微粒子に関する問題は、ウエハ表面のコンタミネーションの除去や電気集じん装置、太陽電池表面上に堆積した砂の除去などといった研究がなされている。これらの微粒子除去手法としてマイクロプラズマ電極を用いることで、微粒子除去とその制御を可能とすることができた。その際、粒径が大きくなるにつれ除去率が減少することが確認された。微粒子粒径が大きくなるにつれ微粒子が帯電することにより発生するクーロン力よりも重力が上回るため、粒径が大きくなることで炭化タングステン微粒子が除去されなくなったと考えられる。

研究成果の概要（英文）：The microplasma electrode used in this study has a simple structure in which a high voltage electrode and a grounded electrode are faced together with a dielectric layer in between. The top electrode to which a high voltage is applied has a comb structure in which 23 line-type electrodes having a length of 30 mm and a width of 200 μm are arranged in parallel at an interval of 1 mm. The lower electrode was grounded and had a plate shape. The process of particle removal at 30 ms after the high voltage was applied. The fine particles are scattered after applying the voltage. As a result of experiments, it was observed that the removal rate of fine particles decreased as the frequency of applied voltage increased. In addition, the removal rate decreased as the particle diameter of the fine particles became larger.

研究分野：マイクロプラズマ応用

キーワード：マイクロプラズマ 微粒子 静電気 プラズマアクチュエータ

1. 研究開始当初の背景

近年、微小粒子状物質 (PM 2.5) が大気汚染や人体、特に呼吸器系に悪影響を及ぼすため、非常に問題視されている。微粒子の問題はこういった室内外の環境分野のみならず、半導体産業分野においては品質低下をもたらす、あるいは太陽電池表面上での微粒子の堆積が発電効率を低下させる等、微粒子の影響はさまざまな方面に見られる。これらの問題を解決するため静電気力を用いたウエハ表面のコンタミネーションの除去や電気集じん装置、太陽電池表面上に堆積した砂の除去⁽¹⁻³⁾、さらには宇宙空間での調査に悪影響を与える微粒子の除去など静電気を応用した微粒子除去について数多くの研究がなされ、さらに多層交流電圧による電界カーテンを用いた微粒子輸送などが実用化されてきている。

室内環境制御の観点では空調機器類内部に設けられた微粒子捕集用フィルタ表面に堆積した微粒子の清浄化が問題となってきている背景がある。

2. 研究の目的

本研究では微粒子捕集用フィルタ面の清浄に適用することを目的として、流体制御に用いられるプラズマアクチュエータと同様の構造を持つ二対の電極と誘電体層からなる保護層付き櫛形マイクロプラズマ電極へ単相の正弦波電圧を印加した電極表面上での微粒子の振る舞い観測を行う。

将来的には微粒子捕集用フィルタに堆積した微粒子清掃除去技術への展開が期待される。

3. 研究の方法

本研究では櫛形電極を用いて粒径の異なる 3 種類の炭化タングステン微粒子を対象とし電極表面上の微粒子の除去を行った。印加電圧の振幅・周波数や微粒子の粒径を変化させ実験を行った。なお本研究で用いた保護層付き櫛形マイクロプラズマ電極ではストリーマの進展距離がサブミリオーダーであり、一般的な誘電体バリア放電のミリスケールの進展距離と比較して小さい。このようにサブミリからマイクロスケールでのプラズマをマイクロプラズマと呼ぶ。マイクロプラズマは空間的に微小、あるいは非平衡という利点をもつため、微細加工への応用や医療応用など幅広い分野に応用されている。

本研究で使用したマイクロプラズマ電極を図1に示す。厚さ 25 μm の誘電体層の両面に銅電極が設置されている。上部電極は高電圧を印加する櫛形状の電極となっている。線電極の太さを 200 μm 、長さを 30 mm、厚さを 18 μm とし、また各線電極の間隔は 1 mm とした。一方で、下部電極は平板上の電極となっており、接地されている。本電極は誘電体層が 25 μm と非常に薄いため、低電圧 (約 1 kV) でプラズマを発生することが可能となり、また高強度の電界を得ることができる。また、電極の構造上、容量性負荷であり、静電容量は約 200 pF である。

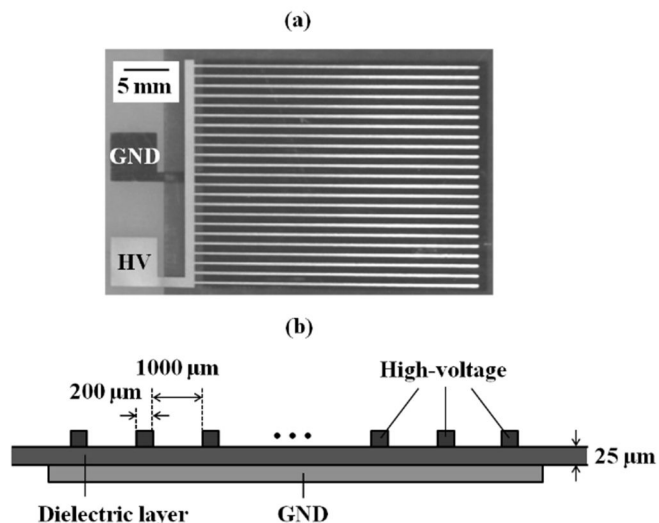


図 1 . マイクロプラズマ電極の構成図：(a) 上面図、(b) 断面図

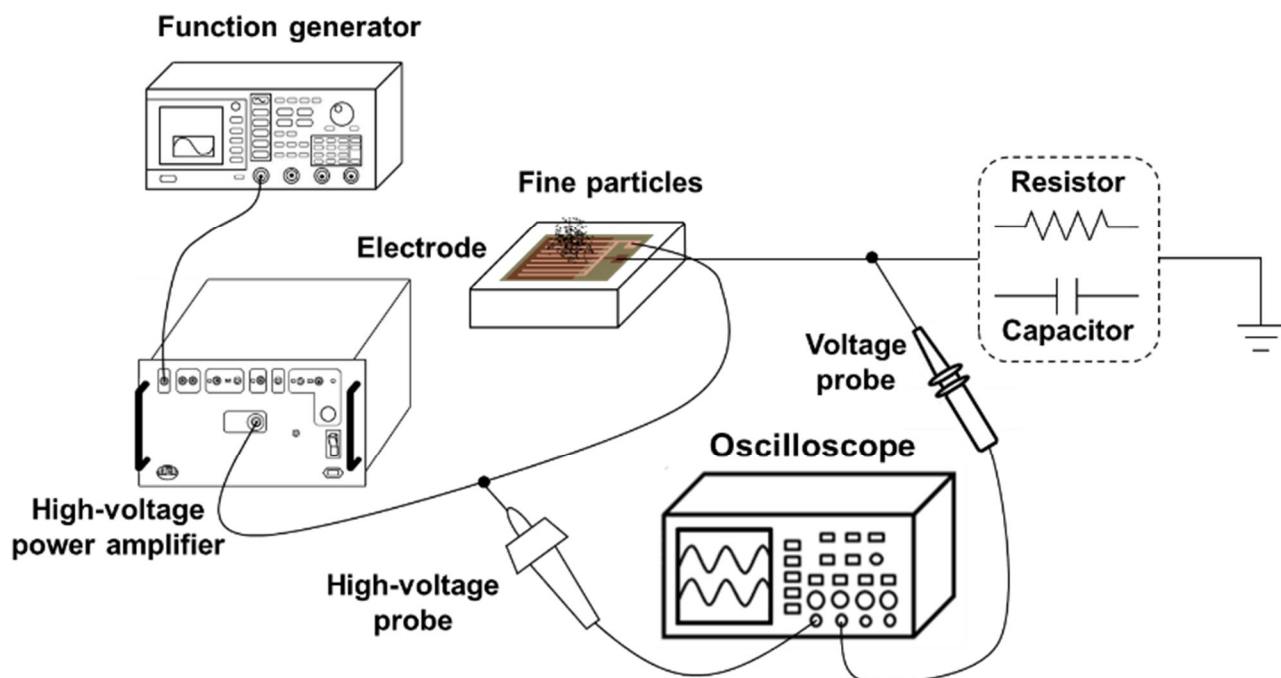


図 2 実験装置図

電極表面上での微粒子の振る舞いを観測するためレーザーを用いて微粒子の振る舞いの可視化を行った(図2)。波長 532 nm の Nd: YVO₄ レーザーを微粒子に照射し、散乱光をハイスピードカメラ (Red Lake, MotionScope M3) で撮影し、微粒子の振る舞いの可視化を行った。ハイスピードカメラの解像度は 512 × 384 、露光時間は 60 μs、フレームレートは 1000 fps として撮影を行った。

4 . 研究成果

以下 1)-4)に本研究での成果を示す。

- 1) 印加した正弦波電圧の振幅による影響を調べたところ振幅の増加とともに除去率の増加が確認された(図3)。この結果は以下の2つの原因によるものと考えられる。1つ目は振幅を増加さ

せることで発生するイオンの数が増加し、微粒子の帯電量が増加するため、2つ目は振幅を大きくすることで印加電界が大きくなり、微粒子にはたらくクーロン力が大きくなることで微粒子の飛散が促進されたためと考えられる。

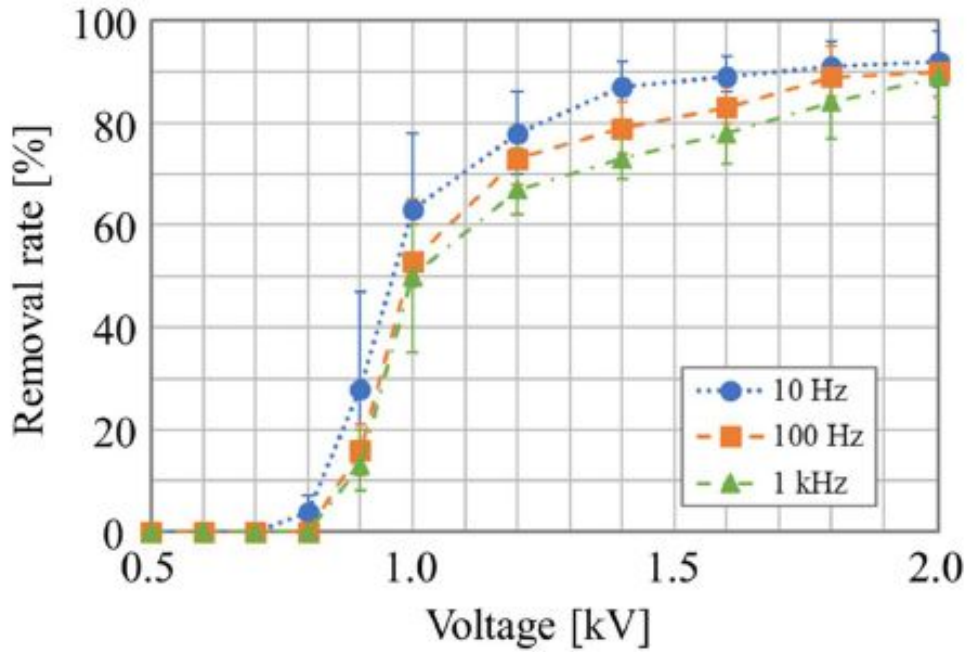


図3 微粒子除去率の電圧特性

2) 各微粒子の除去率に関して周波数依存性を調べたところ、周波数の増加とともに除去率の減少が確認された(図4)。これは高周波数において線電極からの反発を繰り返すことにより線電極間で振動運動し、電極間にトラップされたためと考えられる。

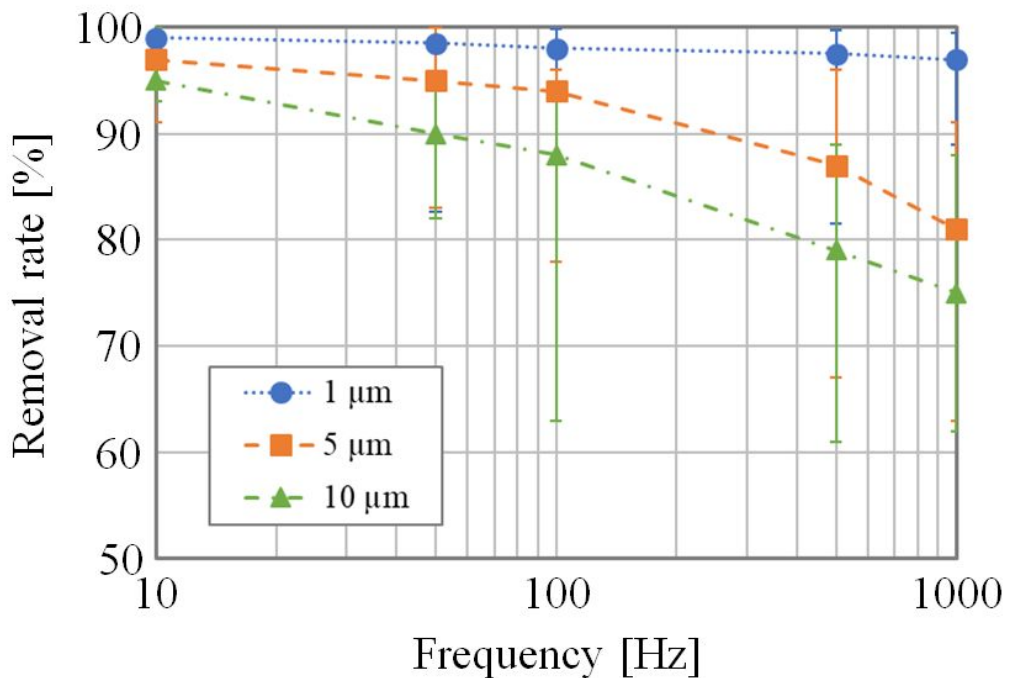


図4 櫛形電極における除去率の周波数依存性

3) 各電極を用いて、電極表面上に粒径 $1\ \mu\text{m}$ 、 $5\ \mu\text{m}$ 、 $10\ \mu\text{m}$ の炭化タングステン微粒子をそれぞれ載せ、微粒子除去の実験を行ったところ、粒径が大きくなるにつれ除去率が減少することが確認された。微粒子の帯電量はその微粒子の表面積で決まる。微粒子が球状であると仮定すると、微粒子の表面積は粒径の2乗に比例して大きくなる。一方で微粒子1粒あたりの重力は微粒子の半径の3乗に比例して大きくなる。そのため粒径が大きくなるにつれて微粒子が帯電することにより発生するクーロン力よりも重力が上回るため、粒径が大きくなることで炭化タングステン微粒子が除去されなくなると考えられる。

4) レーザーを用いた微粒子の振る舞いの可視化を行ったところ、微粒子は電圧印加直後から飛散し、電極の外側に移動するまで何度も飛散を繰り返すことが確認されたが、一部の微粒子はイオン風の影響を受け、空气中を浮遊することが確認された(図5)。

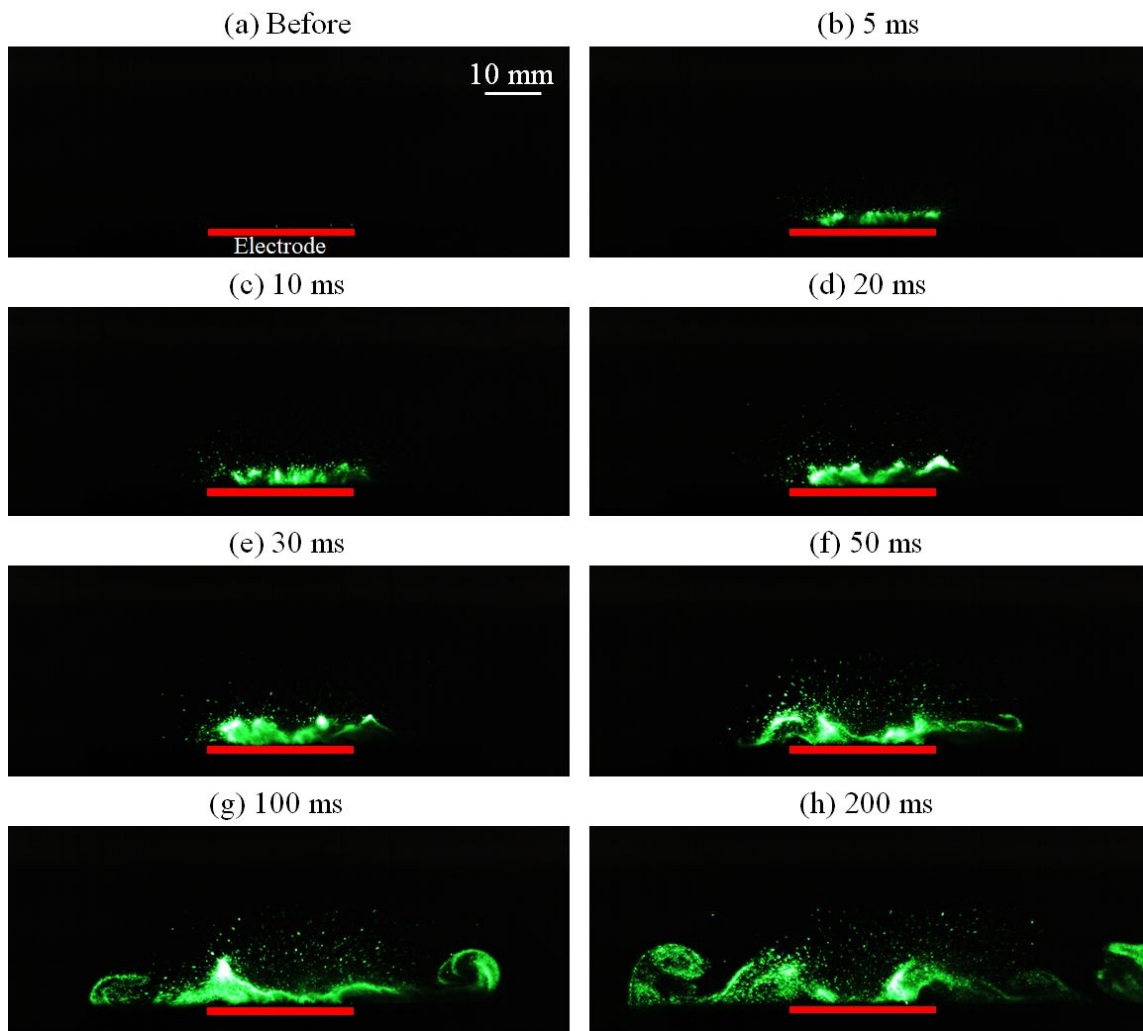


図5 櫛形電極表面上での炭化タングステン微粒子 $1\ \mu\text{m}$ の可視化された振る舞い

5. 参考文献

- 1) C. I. Calle, M. K. Mazumder, C. D. Immer, C. R. Buhler, J. S. Clements, P. Lundeen, A. Chen, and J. G. Mantovani: Controlled particle removal from surfaces by electrodynamic methods for terrestrial, lunar, and Martian environmental conditions. *J. Phys.: Conf. Ser.*, **142**, (2008) 012073
- 2) C. I. Calle, J. L. McFall, C. R. Buhler, S. J. Snyder, E. E. Arens, A. Chen, M. L. Ritz, J. S. Clements, C. R. Fortier, and S. Trigwell: Dust particle removal by electrostatic and dielectrophoretic forces with applications to NASA exploration missions. *Proceedings of ESA Annual Meeting on Electrostatics 2008*, Paper O1, Minneapolis (2008).
- 3) H. Kawamoto and T. Miwa: Mitigation of lunar dust adhered to mechanical parts of equipment used for lunar exploration. *J. Electrostat.*, **69** (2011) 365-369

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 1. 清水一男、野中大輔、クリストフ・ヤロスラヴ、マリウス・ブラジャン	4. 巻 23
2. 論文標題 静電気力によるマイクロプラズマ電極上に堆積した微粒子除去の研究	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 室内環境学会誌	6. 最初と最後の頁 141-150
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7879/siej.23.141	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 M. Blajan, D. Nonaka, J. Kristof and K. Shimizu	4. 巻 47
2. 論文標題 Study of Induced EHD Flow by Microplasma Vortex Generator	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Trans. on PS	6. 最初と最後の頁 5345-5354
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TPS.2019.2952166	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 清水一男、野中大輔、Jaroslav Kristof, Marius Blajan	4. 巻 42
2. 論文標題 電気設備のスマート保安に役立つ堆積微粒子除去技術	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 電気設備学会誌	6. 最初と最後の頁 214-218
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.14936/ieiej.42.214	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 1件／うち国際学会 0件）

1. 発表者名 清水一男
2. 発表標題 静電気力によるマイクロプラズマ電極上に堆積した微粒子除去の研究
3. 学会等名 令和2年室内環境学会学術大会（招待講演）
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

清水研究室ホームページ
<http://shimizu-lab.cjr.shizuoka.ac.jp/index/index.html>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------