

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月22日現在

機関番号：11301
 研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2010～2011
 課題番号：22760120
 研究課題名（和文）静電攪拌による微粒子流動制御法の確立と環境・エネルギーへの応用展開
 研究課題名（英文）Development of micro-particulate flow control by electrostatic mixing and its application to environment and energy technology
 研究代表者
 高奈 秀匡（TAKANA HIDEMASA）
 東北大学・流体科学研究所・講師
 研究者番号：40375118

研究成果の概要（和文）：

先進マイクロ・ナノ粒子超音速ジェット加工および環境汚染微粒子浄化において基盤技術となる「微粒子攪拌・搬送」に着目し、静電攪拌および反応性プラズマを活用した革新的粒子搬送技術を創出した。本研究により提案された微粒子搬送管（プラズマチューブ）は、円管内壁上に一对の螺旋電極からなるプラズマ発生機構を有し、管壁近傍に発生するDBDプラズマによる誘起流および放電によって帯電した微粒子に作用する静電気力により、微粒子が攪拌・搬送される。微粒子流動解析および実験解析から、搬送ガス流が存在しない場合においてもプラズマアクチュエータ効果による管内誘起流により、微粒子が搬送されるとともに、粒子に直接作用する静電気力により、微粒子攪拌が促進されることが明らかとなった。さらに、粒子搬送のための最適条件を明らかにするなど、本装置を実用化する上で重要となる知見が得られた。

研究成果の概要（英文）：

The innovative powder transportation technology in a plasma tube has been proposed from this study for the advanced micro-nano supersonic powder jet process or purification of particulate matter. The proposed powder transportation tube, hereafter referred to as “plasma tube”, is composed of a pair of spiral electrodes both inside and outside of the tube for the generation of dielectric barrier discharge (DBD) on the inner tube wall. Particles are mixed and transported by electrostatic force acting on the charged particles and induced internal flow by DBD. It was clarified from both numerical and experimental studies that particles are efficiently transported by plasma induced flow with enhanced mixing by electrostatic force directly acting on particles. The fundamental characteristics and the optimum condition for powder transportation have been obtained for the practical application of the proposed plasma tube.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2011年度	1,300,000	390,000	1,690,000
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：固気二相流，静電気力，プラズマアクチュエータ，粒子搬送

1. 研究開始当初の背景

大気圧下においてマイクロオーダーの粒子もしくは表面活性化されたナノ粒子を溶解させることなく高速で噴射することにより、材料微粒子を被加工物表面に付着・堆積させ、皮膜を形成することが明らかとなった。この皮膜形成法は、マイクロ・ナノ粒子超音速ジェット加工と呼ばれ、従来のプラズマ溶射のように粒子溶解加熱のための高温熱源を必要としないことから、省エネルギー型の革新的皮膜形成法として国際的に注目されている。

マイクロ・ナノ粒子超音速ジェット加工では、微粒子を内径数 mm の搬送管に送り、搬送方向にガスを流して微粒子を注入口まで気体輸送する方法がとられるが、セラミック系の微粒子を用いた場合、微粒子がチューブ内で摩擦帯電し、クーロン力により微粒子が搬送管壁面に付着・堆積してしまう。その結果、微粒子供給量が時間的に変動し、均一な膜厚や膜質を有する皮膜を得るのが困難となることが懸念されている。また、壁面への粒子付着量が増加した場合、搬送管が閉塞されてしまうことから、長時間の連続成膜プロセスが制限されることが問題となっている。

さらに、近年、自動車の排気ガスや工場から発する煤煙などによる大気汚染は深刻化しており、人間環境への配慮が責務である産業界にとっては環境汚染対策が急務の課題になっている。

このような背景を踏まえ、本研究では、本研究では、マイクロ・ナノ超音速ジェット加工における高効率微粒子搬送技術の確立および室内汚染微粒子の高効率除去を目指し、空気を誘電体バリア放電 (Dielectric Barrier Discharge) を用いて活性化させた管内において、粒子の攪拌・搬送および粒子表面浄化を可能とする「プラズマチューブ」を提案した。本研究で提案するプラズマチューブは管内壁上に DBD 発生機構を有し、DBD による誘起流 (プラズマアクチュエータ効果) および放電によって帯電した微粒子に作用する静電気力により、微粒子が攪拌・搬送される。本方式では、電圧印加時に管内に誘起流が生じるため、管内に沈着し、静止している微粒子を搬送することができる。また、静電気力により微粒子が管内で効率的に攪拌されるため、微粒子の壁面付着が抑制され、従来懸念されている微粒子堆積付着による管の閉塞を回避することができる。さらに、放電時には管内にオゾン等の高活性ガスが

発生するため、高活性化学種による汚染微粒子の浄化が期待される。

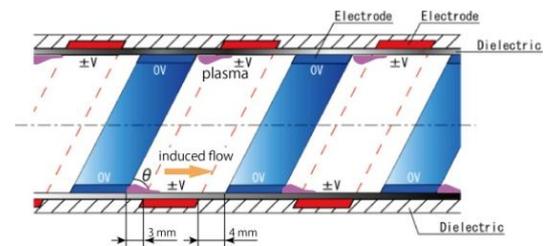


図1 プラズマチューブの断面図

2. 研究の目的

本研究では、先進マイクロ・ナノ粒子超音速ジェット加工および環境汚染微粒子浄化において基盤技術となる「微粒子搬送」に着目し、静電攪拌および反応性プラズマを活用した革新的粒子搬送技術を創出するとともに、プロセスの高性能化を目的として、下記の事項に関して数値計算と実験との統合解析を行う。

- (1) 管内部に DBD 発生機構を有する微粒子搬送用のプラズマチューブを試作し、その放電特性を明らかにするとともに、PIV 計測により誘起流速度場を明らかにする。
- (2) プラズマチューブに対する数値モデルを構築し、3次元数値解析により、管内の電位分布および粒子軌道を明らかにする。

3. 研究の方法

本目的を達成するに当たり、まず、本研究により提案されたプラズマチューブを製作し、その特性を明らかとした。本研究において制作したプラズマチューブの内径は 12 mm もしくは 20 mm であり、チューブ材料は誘電体としてテフロンを用いている。テフロンの厚みは 0.3 mm であり、チューブ長は 100 mm である。プラズマチューブの外壁および内壁には図1に示すように幅 5 mm の銅電極が 3 mm および 4 mm の間隔で交互に螺旋状に巻きつけられている。管外壁上の電極は絶縁テープで被覆されており、誘電体バリア放電は、3 mm の電極間において管の内壁面上に発生する。なお、電極角度 θ は 45° である。大気圧・室温の下で実験を行い、作動気体は空気である。入力電圧波形は正弦波、周波数 1.0 kHz とし、印加電圧 V を変化させて流れのない状態で放

電を行った。また、PIVにより、誘電体バリア放電による誘起流の速度計測を行った。トレーサ粒子には平均粒径が $10 \mu\text{m}$ のオイルミストを用いた。光源には、Nd: YAG レーザ ($\lambda=532 \text{ nm}$) を用い、シリンドリカルレンズでプラズマチューブ出口近傍においてチューブと平行面 (チューブ中心軸上) およびチューブと垂直面にシート光を形成した。

次に、プラズマチューブに対して数値モデルを構築し、プラズマチューブ内の電位分布および粒子軌道を明らかにした。本研究では以下の電位 ϕ に関するラプラス方程式を解くことにより、プラズマチューブ内の3次元電位分布を求めた。ただし、本研究では、簡単のため、空間電荷の影響を無視している。

$$\nabla \cdot (\epsilon_r \nabla \phi) = 0 \quad (1)$$

粒子の運動方程式には、以下に示すように外力項として粘性抗力 F_d 、静電気力 F_e および重力 F_g を考慮している。

$$m_p \frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = \mathbf{F}_d + \mathbf{F}_e + \mathbf{F}_g \quad (2)$$

なお、粘性抗力における抵抗係数は、粒子レイノルズ数の関数として与えられ、カニングハム補正係数を導入することにより粒子の希薄気体効果を考慮した。また、静電気力 F_e は粒子の帯電量と電界の積で与えられ、粒子の帯電過程には、粒径に応じて衝突帯電もしくは拡散帯電を考慮した。

プラズマアクチュエータ効果により流体に作用する体積力は Shyy らにより提案されたモデルおよび実験により得られた PIV 測定結果に基づき算出し、十分に発達した管内層流を仮定して軸方向流速分布を求めた。また、簡単のため、誘起流速は軸方向成分のみを持つものとし、速度分布は周方向および軸方向に一様であるとした。

4. 研究成果

製作したプラズマチューブを用い、放電試験を行った結果、管内壁面上において DBD 空気プラズマが形成され、印加電圧の増加に伴い、放電部の発光が強くなるとともに管内壁での発光領域が拡大した。また、印加電圧の増加に伴い、消費電力はほぼ直線的に増加し、 15.0 kV_{pp} を印加した際の消費電力は 1.9 W 程度であった。また、同条件の下では、反応性ガスであるオゾンが 230 ppm の濃度で発生し、生成オゾン濃度は印加電圧に対してほぼ直線状に増加する。

平均粒径が 30 nm のアルミナ微粒子を放電前に管中央底部に静置した場合においては、電圧を印加した瞬間に管軸方向手前に搬送され、本方法による微粒子攪拌・搬送が有効であることが示された。なお、管内に静置した微粒子が搬送されるのは、管壁近傍において DBD による誘起流および静電気力により帯

電した微粒子が攪拌しつつ搬送されるためである。また、微粒子が搬送される向きは、誘起流が発生する内壁電極 (露出電極) から外壁電極の方向となることが明らかとなった。

PIV による平均速度場の計測から、プラズマチューブ出口において、斜め上向きに、最大で 56 cm/s の流れが誘起されることが分かった。また、プラズマチューブにおいて誘起された流れは、管出口断面から見て左方向に旋回することが明らかとなった。このようにプラズマチューブにより誘起された流れが旋回成分を有するのは、プラズマアクチュエータ効果による誘起流が内壁電極から外壁電極に向かって電極に対して垂直方向に発生するためである。これより、軸方向誘起流に対する周方向誘起流の比 (スワール比) は電極角度に依存し、スワール比は電極角度 θ が小さいほど大きくなると考えられる。

三次元数値計算により、高電圧印加電極近傍に強い電界が形成され、粒子は電極近傍において静電気力により半径方向に振動し、壁面上の粒子は電極間を軸方向に振動する複雑な粒子挙動が明らかとなった。また、小さな粒子は慣性が小さいために応答性が高く、静電気力による粒子の振動振幅が小さいが、大きな粒子は慣性が大きく、帯電量も大きいこと、振幅が大きいことが明らかとなり、本装置を実用化する上で重要となる知見が得られた。

本研究により得られた成果は、日本機械学会第 88 期流体工学部門講演会や、日本混相流学会年会講演会 2011 において発表されるとともに、日本混相流学会論文誌、「混相流研究の進展」に掲載された。さらに、提案されたプラズマチューブによる微粒子攪拌・搬送方式の特許出願した。

本研究で提案した、反応性ガスを管内で放電により生成し、静電気力で粒子を攪拌しつつ気体で搬送するという方式は、他に類を見ない極めて独創的なものである。本研究により、管内での微粒子流動制御法が確立され、本研究成果は、材料プロセスのみならず、微粒子浄化や燃料改質などの環境・エネルギー分野における展開など、本研究成果の他分野への波及が強く期待できる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者および連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① 篠原圭介, 高奈秀匡, 西山秀哉, プラズマチューブ内における微粒子の攪拌および搬送特性, 混相流, 査読有り, 第 25 巻, 2011 年, pp. 495-500.

〔学会発表〕(計2件)

- ① 篠原圭介, 高奈秀匡, 西山秀哉, プラズマチューブ内における微粒子の攪拌および搬送, 2011年8月8日, 京都工芸繊維大学(京都)
- ② 篠原圭介, 高奈秀匡, 西山秀哉, 静電効果による管内反応性気体中の微粒子攪拌・搬送特性, 日本機械学会第88期流体力学部門講演会, 2010年10月30日, 山形大学(米沢)

〔産業財産権〕

○出願状況(計1件)

名称: 微粒子搬送装置及びこの装置を用いた微粒子の浄化方法
発明者: 高奈秀匡, 篠原圭介, 西山秀哉
権利者: 東北大学
種類: 特許
番号: 特願 2010-242718
出願年月日: 2010年10月28日
国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.ifs.tohoku.ac.jp/nishiyama-lab/japanese.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高奈 秀匡 (TAKANA HIDEMASA)
東北大学・流体科学研究所・講師
研究者番号: 40375118