ノート 細径金属パイプ電極から噴出する 大気圧Heマイクロプラズマの流れの可視化 吉木 宏之^{*,1}, 乙坂 謙次^{*}, 佐藤 岳彦^{**}, 中嶋 智樹^{**}, 上原 聡司^{**} (2021年1月27日受付: 2021年2月23日受理) Flow Visualization of Atmospheric-Pressure He Microplasma Jet

Flow Visualization of Atmospheric-Pressure He Microplasma Jet Ejected from a Narrow Metal Pipe Electrode Hiroyuki YOSHIKI^{*,1}, Kenji OTOSAKA^{*}, Takehiko SATO^{**}, Tomoki NAKAJIMA^{**} and Satoshi UEHARA^{**}

(Received January 27, 2021; Accepted February 23, 2021)

Flow analysis of an atmospheric-pressure non-equilibrium He microplasma jet generated by a narrow SUS pipe electrode of $\phi 0.9$ mm was carried out using Schlieren method. In the case of a free jet, the laminar flow length decreased with increasing a flow rate, and also the length was getting shorter after plasma ignition. On the other hand, the flow turbulence after impinging onto a SUS plate disappeared with increasing plasma input power. These results imply that the momentum transfer from ions accelerated or decelerated by an electric field to neutral gas modulated a gas flow velocity in an afterglow region.

1. はじめに

J. Inst. Electrostat. Jpn.

大気圧非平衡プラズマジェットの開発は、被処理物を プラズマ発生電極間に設置する従来の概念を大きく変え てユビキタスプラズマを実現した. その応用はオンサイ ト成膜、局所エッチング、溶液照射によるナノ物質合成、 バイオ・医療・農業分野へと裾野を広げている¹⁾. 大気 圧マイクロプラズマジェット発生にはガラス管の外周ま たは内部に電極を設置したもの、金属パイプを電極にし たもの等で,励起電源も直流,低周波(LF),高周波(RF), マイクロ波と多岐に及ぶ²⁾. また, ハイスピードカメラ による LF プラズマジェットの生成・進展機構の解明な ど大気圧マイクロプラズマジェットの理解も進みつつあ る³⁾. 一方, 大気圧プラズマジェットをプロセスへ応用 する際、プラズマ流による周辺気体の巻込みや、被処理 物近傍の気相の乱れはプロセスに影響を与える。本研究 では、筆者がこれまで局所エッチング等へ応用した細径 金属パイプ電極による大気圧マイクロプラズマジェット4)

キーワード:大気圧 He マイクロプラズマジェット,細径 SUS パイプ電極,自由噴流,衝突噴流,シュリーレン法 *鶴岡工業高等専門学校 (〒997-8511 山形県鶴岡市井岡字沢田 104) Tsuruoka National College of Technology, 104 Inooka aza Sawada, Tsuruoka, Yamagata 997-8511, Japan

- ** 東北大学
 - (〒980-8577 仙台市青葉区片平 2-1-1)

Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai 980-8577, Japan

yoshiki@tsuruoka-nct.ac.jp

DOI: https://doi.org/10.34342/iesj.2021.45.3.120

の自由噴流および SUS 平板への衝突噴流をシュリーレン法で観察した際に見出された現象を報告する.

2. 実験装置および実験方法

実験装置の概略を図1に示す.外径/内径が0.9 mm/0.6 mmのSUSパイプ電極にHeガスを導入してRF電力(13.56 MHz)を整合回路を介して印加する.He流量は0.6-1.8 L/min,RF電力は1.8-9Wとして実験を行なった.シュリーレンレンズの中央にSUSパイプ電極を設置して大気圧Heマイクロプラズマジェットの流れを観測した.自由噴流および衝突噴流の観測では細径パイプ電極先端とSUS平板との間隔をそれぞれ120 mm,3.5 mmとした.シュリーレン法は、観測空間の気体の密度分布により屈折率のムラが生じて光の進行方向が歪み焦点がずれ光がナイフエッジで遮られる結果,気体の密度分布を明暗のコントラストとして観測する方法である.本研究ではハイスピードカメラ(Photron FASTCAM SA5)を用いて画像を 5000 fps で記録した.



図1 実験装置の概略

Fig.1 Schematic diagram of the experimental setup.



図 2 He マイクロプラズマ自由噴流のシュリーレン画像 Fig.2 Schlieren images of He microplasma free jets.

3. 実験結果および考察

図2に細径パイプからのHe ガスの自由噴流のプラズ マ点灯前、点灯後のシュリーレン画像のガス流量依存性 を示す.ガス流量/パイプ断面積で見積った He 流速 Vinside を図中に示す. これよりパイプ内部のレイノルズ数 は He 流量 1.2 L/min で約 390 となり層流領域にある.プ ラズマ点灯時の RF 電力は 1.8 W で、点灯後の経過時間 を図中に示す.参考のためプラズマジェットの明視野画 像も示す. プラズマ点灯前は, 流量の増加で層流噴流か ら乱流噴流への遷移点(図中の矢印)がパイプ開口部に 近づき層流長が減少した.これは、レイノルズ数がある 程度大きくなると周囲の気体を巻込み渦発生が起り乱流 噴流となるためである⁵.次に、プラズマジェット点灯 後は時間経過と共に層流長が減少して, He 流量 0.6 L/ min, 1.2 L/min 共に層流長は約 10 mm で定常状態となっ た、明視野画像からプラズマジェット発光部の長さは He 流量にほとんど依存せず 3-4 mm 程度であった. こ の事から、(1) プラズマによるガス温度の上昇や、(2) プラズマの電位が周囲より高いため RF 振動する空間電 位の平均的電位降下でドリフト運動するイオンから He 原子への運動量移行等でガス流速が増加した結果、層流 から乱流への遷移点が上昇したと推察する. 今後, 自由 噴流の流速測定により検証を行なう.

図3にSUS 平板への衝突噴流のプラズマ点灯前,点 灯直後1msおよび100msのシュリーレン画像のHeガ ス流量およびRF電力依存性を示す.プラズマ点灯前は, ガス流量が0.6 L/minから1.4 L/minへ増加すると衝突噴 流に乱れが発生した.次に,プラズマ点灯後はRF電力 が5.0 W 以下では衝突噴流に変化は見られなかったが, 9.0 W では乱れが消失した.しかし,9.0 W 時でもガス 流量や電極間隔の増加で再び乱れが生じることを確認し



図 3 He マイクロプラズマ衝突噴流のシュリーレン画像 Fig.3 Schlieren images of He microplasma impinging jets.

ている. なお, パイプ先端から SUS 平板まで一様なプ ラズマ発光を呈しており, 流量増加によるプラズマ発光 の揺らぎ等は見られない. 乱れ消失の理由は明らかでな いが, 細径パイプ先端と SUS 平板間の電界強度の増加 が衝突噴流内の荷電粒子をパイプ-平板間へ拘束する結 果, ガス流の乱れが抑制されたと考えている. 今後, 衝 突噴流の流速測定等で電界効果の検証を行なう.

4. まとめ

細径金属パイプ電極から噴出する大気圧 He マイクロ プラズマジェットの自由噴流,衝突噴流をシュリーレン 法で観察した.自由噴流では層流領域がプラズマ点灯と 共に短くなった.これはイオンドリフトと関係すると思 われる.他方,衝突噴流では RF 電力の増加で乱れが消 失した.これはパイプ電極 – SUS 平板間の電界強度の 増加による荷電粒子の拘束がガス流の乱れを抑制するた めと考えているが今後の詳細な解析を必要とする.本研 究は東北大学流体科学研究所の公募共同研究(J19L095) の助成を受けて行なわれた.

参考文献

- 1) K. H. Schoenbach and K. Becker: 20 years of microplasma research: a status report. Eur. Phys. J. D, **70** (2016) 29
- 2) 橘 邦英,石井彰三,寺嶋和夫,白藤 立:マイクロプ ラズマ-基礎と応用, p. 29,(㈱オーム社 (2009)
- 3) 北野勝久,浜口智志:低周波大気圧マイクロプラズマジェット.応用物理,77 (2008)383
- H. Yoshiki, K. Ikeda, A. Wakaki, S. Togashi, K. Taniguchi and Y. Horiike: Localized Plasma Processing of Materials Using Atmospheric-Pressure Microplasma Jets. Jpn. J. Appl. Phys., 42 (2003) 4000
- 5) 土屋良明,山口 功,鍋島秀喜:遷移域を持つ軸対称自 由噴流I.信州大学工学部紀要,35 (1973)37