

Background-Oriented-Schlieren (BOS) 法を用いた大気圧プラズマ流の定量計測

Quantitative measurement of atmospheric-pressure-plasma-flow using Background-Oriented-Schlieren (BOS) method

伊東桃子^{1,2}, 小倉 苗^{1,3}, 小室淳史⁴

ITO Momoko^{1,2}, OGURA Nae^{1,3}, and KOMURO Atsushi⁴

東北大学 飛翔型「科学者の卵養成講座」¹, 仙台白百合学園高等学校², 青森県立青森高等学校³, 東北大学工学研究科⁴

EGGS, Tohoku University¹, Sendai Shirayuri Gakuen High School², Aomori High School³

Graduate School of Engineering, Tohoku University⁴

Corresponding Author's e-mail: komuro@ecei.tohoku.ac.jp

(Received 18 March 2018; Accepted 11 October 2018; Published online 26 October 2018)

[要約]

近年、大気圧プラズマを用いた気流制御技術が注目されているが、その制御メカニズムについては未だ不明な点が多く、実用化には至っていない。そこで本研究では、大気圧プラズマによる気流制御技術のメカニズムを明らかにするために、Background-Oriented-Schlieren法(BOS法)を用いて、大気圧プラズマ流により生じる空気密度擾乱の定量計測を行った。可視化された密度勾配から、大気圧プラズマによる誘起流がプラズマアクチュエータの電極に沿って反時計回りに渦を巻いており、この誘起流の先端である渦の中心付近の密度が減少したことが分かった。この渦状の低密度領域を囲むように密度が高い領域が出来ていることから、渦の中心部に向かって流れができていと考察する。空気密度の減少は、理想気体の状態方程式より、圧力の減少もしくは温度上昇が原因であると考えられるため、これらの検証が今後の課題である。

[キーワード] プラズマアクチュエータ, 能動気流制御, 流れの可視化, 大気圧プラズマ, 高電圧工学

Plasma actuator, Active flow control, Flow visualization, Atmospheric-pressure-plasma, High-voltage engineering

1. はじめに

近年、大気圧プラズマを用いた気流制御技術が注目されている。気流制御技術は、飛行機や鉄道、風車といった流体機器の安全性や効率を高めるために重要な役割を果たし、高エネルギー効率で応答が素早く、軽量のものが要求される。飛行機によく用いられている気流制御技術としてフラップがある。フラップを飛行機の翼に取り付けることで揚力を増大させることができるが、多くの機械駆動部を要するため、重量があり応答にも時間がかかる。一方、大気圧プラズマを発生させるプラズマアクチュエータは、軽量で、電気信号で制御するため応答性に優れ、また、電極となる銅テープで誘電体のカプトンテープを挟むだけという非常にシンプルな構造をしているため(図1参照)、機器に取り付けても空気抵抗を抑えられるなどの利点を持つ。また流体機器においては、空気抵抗を抑えるために表面からの気流の剥離を抑制することが重要となる。物体の表面で粘性により摩擦が生じ表面付近の流速が低下して上流よりも圧力が高くなるために、流れが圧力差に逆らえず剥離が生じる。プラズマアクチュエータは、大気圧プラズマ流によって表面付近に誘起流を発生させることで、剥離を抑制できる[深淵, 山田, 石川 2010]。

ただし、プラズマアクチュエータが誘起可能な流速は数m/sと小さく、制御可能な流体現象の流速はそれ以下に制限されてしまうという課題があった。これに関して、周期的に電圧印加のON/OFFを交互に切り替えるパースト制御にすること

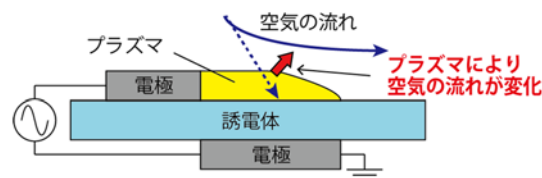


図1: プラズマアクチュエータの構成

で、間欠的に大気圧プラズマを発生させて擾乱を与え、剥離せん断層を翼面側に動かすことができることが知られており、それ以上の流速の流体現象においてもプラズマアクチュエータによって剥離領域を減少させられることが示されている。しかしながらその制御メカニズムについては未だ不明な点が多く、実用化には至っていない。また、これまでの研究は大気圧プラズマによる誘起流の速度に着目していたが、流れの特性には密度や温度などの気体の状態を表すパラメータも大きく影響する。そこで本研究では、大気圧プラズマによる気流制御技術のメカニズムを明らかにするために、大気圧プラズマ流で生じる空気密度擾乱の定量計測を行った。

計測手法としては非接触で密度計測が行える Background-Oriented-Schlieren 法(BOS 法)を用いた。その他の密度の光学的可視化手法としては、シャドウグラフやシュリーレン法、干渉計測などが挙げられる[Venkatakrishnan, Meier 2004]。シャドウグラフやシュリーレン法を用いると簡単に可視化できる

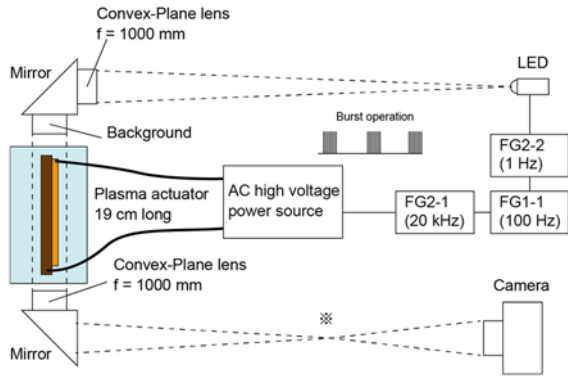


図2：実験セットアップ

が、密度勾配が光の強度として可視化されるため密度の正確な値を求めることが難しく、BOS法と異なり定性的な情報しか得られない。干渉計測では、定量的に密度の値が得られるが、光学装置のセットアップが大変であるという欠点がある。一方BOS法では、カメラと背景画像があれば定量的に密度の値を計測でき、その光学システムの簡易さが大きな特長である。しかし、誤ベクトルの除去が必要であることや相互相関計算の処理負荷により画素の増加に伴い出力が遅くなること、相互相関計算のために適切な検査領域と探査領域を設定する必要があることなどの課題がある[赤塚, 永井, 本阿弥 2011]。また、BOS法を用いた計測は、衝撃波や超音速流れ場といった密度変化の大きい流れに対してはこれまで行われた例がいくつかあるが、微小密度擾乱を可視化するという高精度の計測には未だ成功した例がない。本研究で大気圧プラズマ流が生成する微小密度擾乱の可視化に挑戦する。

2. 実験方法

図2に本実験で用いた実験セットアップを示す。まずはプラズマアクチュエータの構成とその発生方法について説明する。図3(a)に今回の実験用に製作したプラズマアクチュエータの外観を示す。プラズマアクチュエータの構成は図1に示したものと同様に、カプトンテープ(寺岡製作所, No.S6014)1枚を銅テープ2枚(寺岡製作所, No.8316)で挟んだ構造になっている。カプトンテープに覆われた銅テープをグラウンド電極、露出した銅テープの方を高電圧電極とし、両電極間に高電圧を印加すると、カプトンテープ上をはうようにプラズマが発生し紫色に発光する。その時の発光の様子を図3(b)に示す。電源には東北大学で製作された高電圧交流電源を用いた。これは、直流100Vの電圧をIGBTによりスイッチングし、高電圧トランスを用いて昇圧することで交流高電圧を生成する仕組みとなっている。今回の実験では放電電圧を $V_{peak-to-peak} = 12 \text{ kV}$ 、放電周波数を20 kHzに固定し、20発分放電したあとの気流変化を観測した。

今回の実験では、Background-Oriented-Schlieren (BOS)法という光学系計測手法を用いてプラズマアクチュエータにより発

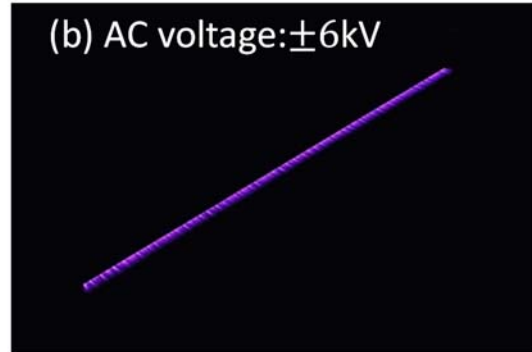
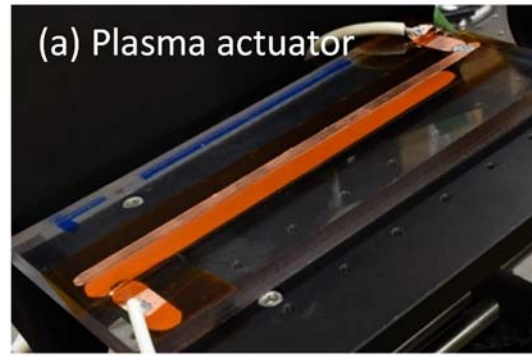


図3：(a) 製作したプラズマアクチュエータの外観。(b) プラズマアクチュエータに交流高電圧(12 kVpp)を印加し、プラズマの発光を撮影した様子

生した誘起流の可視化を行った。BOS法とは、計測対象物の背景にランダムドット画像を設置し、流れのない状態で撮影した画像と、流体により密度擾乱の生じた状態で撮影した画像の背景画像の位相差から、屈折率の変化を検知し、密度勾配を定量的に可視化する手法である。屈折率と密度の関係は以下の Gladstone-dale の法則により関係づけられる。

$$\frac{n - 1}{\rho} = G(\lambda) \tag{1}$$

ここで、 n は屈折率、 ρ は密度、 $G(\lambda)$ は Gladstone-dale 定数であり、 λ は波長である。本研究では Gladstone-dale 定数として $0.23 \times 10^{-3} \text{ m}^{-3}/\text{kg}$ [Venkatakrishnan:2004]を用いた。BOS法では屈折率の変化を、以下の屈折角 ϵ と背景画像の移動量 Δy の関係を用いて算出する。

$$\epsilon = \frac{1}{n_0} \int_{Z_D - \Delta Z_D}^{Z_D + \Delta Z_D} \frac{\delta n}{\delta y} dz \tag{2}$$

ここで、 n_0 は密度変化が生じていない時の基準屈折率、 y, Z_D の関係を図4に示す。これは、 z 方向に均一な $2\Delta Z$ の幅を持つ密度勾配が存在した時に、屈折が生じ、結像部に Δy の移動が生じることを示している。

式(1)、(2)により算出された密度勾配 $\partial\rho/\partial y$ の勾配をとり、以下のポアソン方程式に代入することによって計測対象の密度 ρ を計算する。

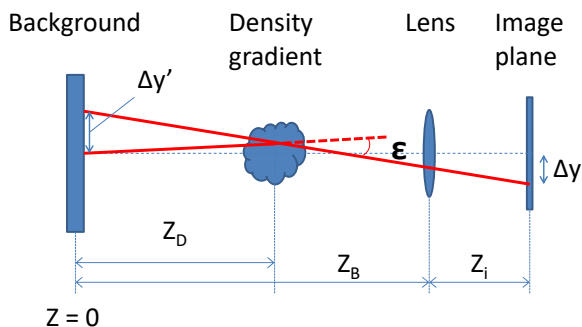


図4 : BOS 法の原理図

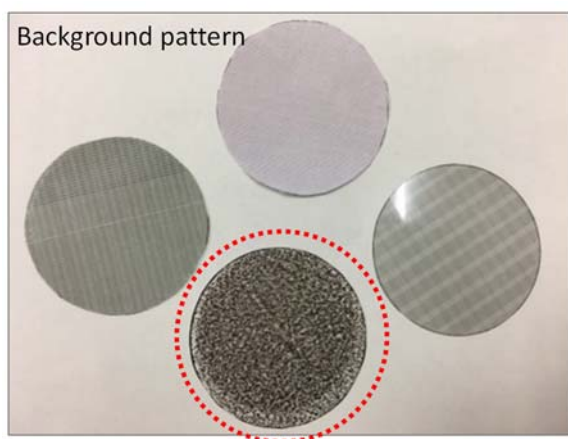


図5 : 実験で使用した様々な種類の背景ドットパターン

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \rho}{\partial y^2} = S \tag{3}$$

実験により算出された値を式(3)の右辺に代入し、左辺の ρ を計算する。ポアソン方程式の計算にはガウス・ザイデル法を用いた。

図5には本実験で用いた種々の背景画像を示す。背景画像はPC上で描写したドットパターンをOHP用紙にプリントすることにより作成した。図5に示した背景画像のうち、赤点線で囲んだ背景が最もよくベクトルを算出出来たため、本実験ではこの背景画像を用いた。

図6には BOS 法を用いてろうそくの炎を可視化した様子を示す。これは予備実験として行ったもので、ろうそくを背景画像であるドットパターンの前に置き、炎がついている状態とついていない状態で背景画像がどのように見えるかを観察した。図(a)と(b)を一見して比較すると(b)において炎の周辺にドットの移動が揺らぎのように見てとることができる。この移動量を Dantec 社の Dynamic Studio というソフトを用いて算出することが出来る。さらに、得られた移動量を matlab というソフトウェアに読み込み、式(3)を解くことによって密度を算出することが出来る。

本研究では、プラズマアクチュエータから発生する大気圧プラズマ流中の密度勾配を、BOS 法を用いてベクトル量として定量的に計測した。さらに、得られた密度勾配ベクトルの

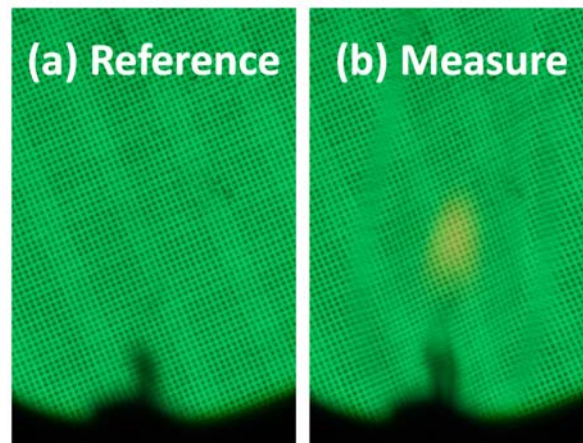


図6 : BOS 法によりろうそくの炎を可視化した様子。(a) レファレンス画像、(b) 計測画像

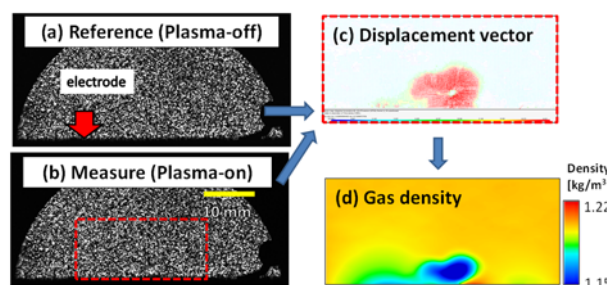


図7 : BOS 法の処理手順。(a) プラズマ OFF 時のレファレンス画像、(b) プラズマ ON 時の計測画像、(c) 画像(a) (b)から算出した背景ドットパターンの移動量をベクトル化した結果、(d) ベクトルからポアソン方程式を解き、密度を算出した結果。

空間差分を取ることで密度の空間2次微分を算出し、ポアソン方程式を解くことにより密度の絶対値を算出した。図7にその手順を示す。まず図7(a)(b)で示したように、プラズマをONにした状態とOFFにした状態で画像を取得する。これらの画像を Dynamic studio に取り込み、移動量をベクトルとして算出する(図7(c))。得られたベクトルを matlab で読み込み、空間差分を施した上で式(3)を解くことで絶対密度を算出する。実験ではプラズマをONにするタイミングとLEDの発光時間を変えながら画像を取得し、プラズマ流中の密度の時系列変化を取得した。

3. 結果と考察

同じ条件で実験を行って得られたシュリーレン法と BOS 法の結果を図8に示す。電極位置($x=0$ mm)から x の正方向に向かってプラズマ流が生成され、どちらの画像にも、渦状の密度変化を観察できる。プラズマアクチュエータは、電界により荷電粒子が加速し空気分子と衝突することで誘起流を生成するため、このような密度変化が生じている。放電から時間がたつにつれ、渦状の密度変化は電極に沿って x の正方向

に向かっていく。これは、大気圧プラズマによる誘起流が表面からの気流の剥離を抑制できることを示している。

シュリーレン法の画像(図 8(a))では、密度差が光の強度とし

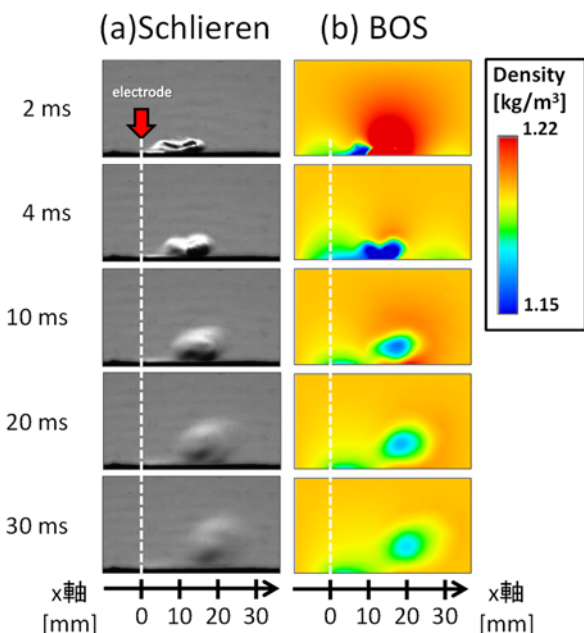


図 8 : プラズマ流を (a) シュリーレン法により可視化した結果と、(b) BOS 法により可視化した結果。縦方向に、プラズマ発生時から 2, 4, 10, 20, 30 ミリ秒後の経時変化を示している。

て定性的に可視化されている。生成されたプラズマ流が、電極位置($x = 0$ mm)よりも x の正の方向に渦状の密度変化として現れていることが分かる。2ms 後の画像では電極に接するように平らな密度変化が観察できるが、時間が経過すると x の正方向だけでなく縦方向にも大きく成長している。10ms 以降の画像では、大きさの異なる楕円が重なったような曲線状の筋が観察できる。渦は電極位置から離れていくが、渦の後端と電極位置の間には密度変化が生じ白くなっている。よって、生成されたプラズマ流は電極に沿って反時計回りに渦を巻きながら x の正方向に向かっていることが分かる。また、時間が経つとともに渦内部の明暗のコントラストが小さくなっていることから、密度差が小さくなっていることが分かる。これは、大気圧プラズマによって生じた密度差が渦の生成過程で小さくなったことを示している。

BOS 法の画像(図 8(b))では、密度の値が定量的に可視化されている。プラズマ流の生成方向に密度が低い領域が広がっており、最大で 5% 程度の密度の減少が観測された。電極から x の正方向に向かつて生成されたプラズマ流は、大きさの異なる楕円が重なったような渦状の密度変化として現れており、シュリーレン法の画像で見られた密度変化とそれぞれの経過時間において対応している。BOS 法の画像から、渦の中心部に近いほど密度は低くなっていることが分かる。10ms 後の画像では、渦状の低密度領域を囲むように密度が高い領域が出現している。また、電極位置($x = 0$ mm)よりも x の負の方向にも

密度の減少が観測できる。この密度変化は渦の後端に生じており、渦の移動とともに電極に接したまま x の正方向に向かう。BOS 法の画像においてもシュリーレン法の画像と同様

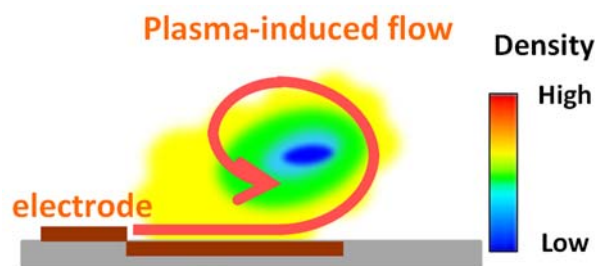


図 9 : プラズマ流による密度変化の概念図

に、生成されたプラズマ流が電極に沿って反時計回りに渦を巻きながら x の正方向に向かっていることが分かる。つまり誘起流は図 9 に示すように低密度領域の境界に沿うように反時計回りに渦を巻いており、この誘起流の先端は渦の中心付近にあり、その周辺の密度が減少していることが分かる。この渦状の低密度領域を囲むように密度が高い領域が出現していることから、低密度領域の中心部に向かつて流れができていくことが予想される。

以上のことから、大気圧プラズマ流の生成過程には、電界による荷電粒子の加速だけでなく、空気密度の変化も大きく関係していると考えられる。

空気密度の減少についてさらに詳しく考察するため、以下の理想気体の状態方程式を用いる。

$$p = NRT \quad (4)$$

ここで、 p は圧力、 N は密度、 T は温度、 R は定数である。

この式から、密度の減少について 2 つの仮説を立てた。

1. 温度が一定と仮定する。密度が減少したため、圧力が低下する。加えて低密度領域を囲むように密度が高い領域が出現していることから、圧力勾配が生じ、渦の中心に向かつて流れが発生していると考えられる。
2. 圧力が一定と仮定する。密度が減少したため、温度が上昇する。すると気体の粘性が上昇し剥離しやすくなるが、同時に流線がゆがみ翼の形が変わったような効果を示す。

この 2 つの仮説については、流れの変化に影響を及ぼしていると考えられるが、さらに実験を行い検証することが必要である。空間中の温度を計測する手法としては、サーモグラフィなどが挙げられるが、プラズマ誘起流のような密度変化が微小で時間的に変化していくものを正確に計測できるかは分からない。また圧力勾配を計測する手法に関しても今後検討していく必要があると考えられる。

4. 結論

本研究では、大気圧プラズマ流中の空気密度を BOS 法によ

り定量的に計測、および可視化した。

プラズマ流の生成方向とその周辺の密度勾配の様子から、大気圧プラズマ流の生成過程においては空気密度の変化が大きく関与していると考察した。理想気体の状態方程式より、空気密度は、圧力の減少もしくは温度上昇が原因であると考えられるため、その二通りを検証してゆくことが今後の課題である。

謝辞

本研究は東北大学 飛翔型「科学者の卵養成講座（JST グローバルサイエンスキャンパス）」の支援のもとで実施されました。

引用及び参考文献

L. Venkatakrishnan and G. E. A. Meier, "Density measurements using the Background Oriented Schlieren technique," *Experiments in Fluids*, vol. 37, pp. 237-247, 2004.

赤塚 純一, 永井 伸治, 本阿弥 眞治, Background Oriented Schlieren 法に基づく密度勾配の可視化法の改良, 日本機械学会論文集B編, 公開日 2011/12/25, Online ISSN 1884-8346, Print ISSN , <https://doi.org/10.1299/kikaib.77.2391>

深淵康二、山田俊輔、石川仁、プラズマアクチュエータの基礎と研究動向、ながれ、29, 243-250(2010).