

## 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 25 年 6 月 14 日現在

機関番号：31302

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560174

研究課題名（和文） 印加磁場による超音速プラズマ噴流の衝撃波の変形

研究課題名（英文） Deformation of Shock Wave in Supersonic Plasma Jet Caused by Applied Magnetic Field

研究代表者

小池 和雄 (KOIKE KAZUO)

東北学院大学・工学部・教授

研究者番号：20108575

研究成果の概要（和文）：超音速不足膨張プラズマ噴流中に発生する衝撃波近傍の流れの印加磁場による変化を衝撃波の変形の測定から明らかにするために、デジタルカメラで撮影した画像の非圧縮 RAW ファイルから光強度を抽出して検討を行った。光強度の勾配から求めた反射衝撃波の開始位置での流れ方向に対する角度は反射衝撃波では印加磁場強さの増加とともに増加し、樽型衝撃波では減少した。マッハディスク下流の光強度の等高線は磁場強さの増加とともに明らかに変化し、無磁場の場合とは逆に中心部が両端に比べて上流側にある分布となった。また、このプラズマ噴流の超音速域に挿入した円錐プローブ先端から発生する斜め衝撃波の印加磁場による変化についても光強度を用いた検討を行った。Taylor-Maccoll の式を用いて斜め衝撃波の角度から求めた局所マッハ数は、磁場強さとともに増加する傾向を示した。

研究成果の概要（英文）：An experimental study of underexpanded plasma jet was carried out to reveal the effects of applied magnetic field on flow behavior around the normal shock wave, that is, Mach disk. Photographic images of the flow were taken with a digital single-lens reflex camera. The light intensity is extracted from uncompressed RAW files of the images. Angles of barrel and reflected shock wave to the flow direction at the reflected shock starting point were determined from the gradient of the light intensity. The angle of reflected shock wave increases with magnetic field intensity. On the other hand, the angle of barrel shock wave tends to decrease with increases in the field strength. Contour plots of the light intensity in downstream region from Mach disk significantly changes with applied magnetic field compared to those without the field. The effects of magnetic field on oblique shock wave around a conical probe in supersonic region of the jet were also studied using the light intensity. The local Mach number in the jet, evaluated from the oblique shock angle using Taylor-Maccoll equation, shows a tendency to increase with the field strength.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2011 年度	700,000	210,000	910,000
2012 年度	600,000	180,000	780,000
総計	2,900,000	870,000	3,770,000

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：流体工学、プラズマ、流体計測、衝撃波

## 1. 研究開始当初の背景

プラズマ噴流は高エンタルピー流としての特質から、材料創製、高速度加工あるいは宇宙推進など幅広い分野で応用されている。また、近年極超音速飛翔体周りに発生するプラズマ流の磁場による流動場制御に関連した基礎研究も行われてきているように、プラズマは磁場に応答してその性質が変化する代表的な磁気機能性流体である。したがって、磁場との相互作用を効果的に利用することにより、さらにその機能を高められることが期待できる。この磁気機能性流体としてのプラズマ流の高機能化という観点から、申請者はこれまで強磁場下での不足膨張プラズマ噴流について実験的な検討を行い、強磁場によるプラズマ噴流の収縮とエネルギー分布の変化を明らかにしてきた。また、磁場下での噴流のエネルギー分布の変化をより精度良く求めるための検討や撮影画像の光強度データによる簡易診断について検討を行ってきた。

これまでの実験的な研究から、プラズマ噴流に強磁場を印加した場合、プラズマトーチ出口の下流に形成される垂直衝撃波、いわゆるマッハディスクの発生位置における磁場も比較的強く、図1に一例を示すように無磁場の場合に比べマッハディスクの明らかな変形が観察された。図中の  $x$  と  $d_n$  はそれぞれトーチ先端から噴流の流れ方向の距離とプラズマトーチの出口直径を示し、 $x/d_n=6$  はほぼマッハディスクの位置に相当する。この超音速不足膨張プラズマ噴流において形成される衝撃波、すなわちバレル（樽型）衝撃波、マッハディスクおよびこれらが交差する領域に生ずる反射衝撃波の磁場による変形を明らかにすることは、磁場の印加による流れの変化を利用してプラズマ流の磁場制御をさらに進展させるために有意義であると考えた。

また、不足膨張プラズマ噴流の超音速域に



(a)  $B = 0 \text{ T}$



(b)  $B = 0.394 \text{ T}$  at  $x/d_n = 6$

図1 磁場印加による噴流の変化

おける局所マッハ数は円錐形状物体周りに発生する斜め衝撃波の角度から求めることができる。この円錐形状物体周りの斜め衝撃波の磁場による変形の測定から流れの変化を明らかにすることは、同様に磁場によるプラズマ流の流動場制御の有用な基礎資料となる。

上述の印加磁場による衝撃波の変形についての研究から得られる成果は、磁気機能性流体としてのプラズマ流の磁場を利用した高機能化のための重要な基礎資料となると考えた。

## 2. 研究の目的

(1) プラズマ流の磁場による制御の観点から、超音速プラズマ噴流中の衝撃波近傍の流れの磁場印加による変化を衝撃波の変形を測定することにより明らかにすることが本研究の目的である。この目的を果たすために、減圧下のプラズマ噴流に磁場を印加し、高解像度デジタルカメラによりその変化の様相を撮影する。その静止画像の RAW データから得られる光強度データを解析して不足膨張プラズマ噴流において形成される衝撃波、すなわちバレル（樽型）衝撃波、マッハディスクおよびこれらが交差する領域に生ずる反射衝撃波の磁場による形状や光強度の変化を明らかにする。

(2) 本研究課題の目的である印加磁場による超音速プラズマ噴流の衝撃波の変形から衝撃波近傍の流れの変化を明らかにするための研究の一環として、プラズマ噴流の超音速域に挿入した円錐プローブ周りの斜め衝撃波の変化について検討する。この検討では高解像度デジタルカメラにより撮影した画像の光強度データの解析から磁場による流れの変化を求める。

## 3. 研究の方法

(1) 本研究では作動流体にアルゴンを用い、プラズマトーチによりマッハ数約2の超音速不足膨張プラズマ噴流を直径 1m、長さ 2.56m の真空室内で発生させる。実験では印加する磁場の強さを変えて、高解像度デジタルカメラによりプラズマ噴流を撮影した。同条件下で撮影された 10 枚の画像から抽出した RAW データを平均化した光強度データに基づきマッハディスク、マッハディスク上流のバレル衝撃波およびこれらがマッハディスクと交差する位置から形成される反射衝撃波の各衝撃波に関連した諸量について印加磁場の強さによる変化を求め、磁場を印加しない場合と比較検討した。得られた画像の

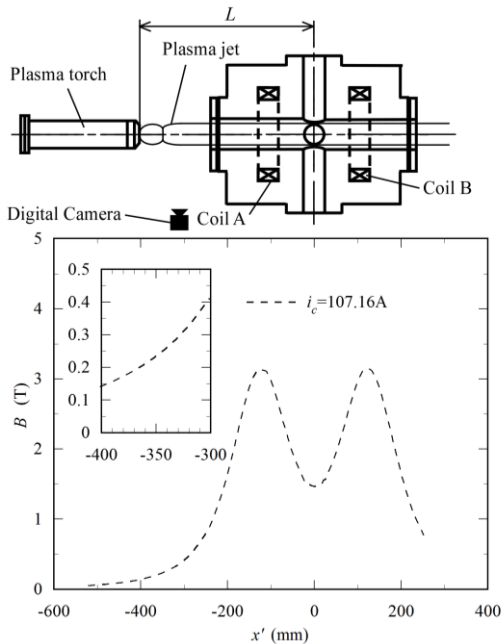
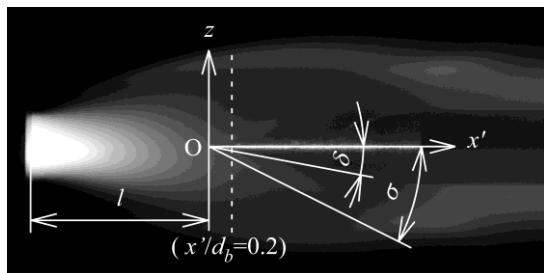


図2 軸方向磁束密度分布

RAW データからは R (赤)、G (緑) および B (青) の各々について光強度データが得られたが、本研究では主に G (緑) を用いて検討を行った。磁場の印加には 1 対の超電導コイルからなる超電導磁石を用いた。印加磁場分布の一例として、図 2 には超電導コイル間中心の磁束密度  $B_c = 1.5\text{T}$  の最大の磁場を印加した場合について、画像撮影領域における軸方向磁束密度分布をプラズマトーチや超電導コイルの位置と対比して示した。

(2) 最終年度は衝撃波の変形が観測されたマッハディスク近傍でより高い分解能の光強度分布を得るために、カメラの露出を低く設定して前述の(1)と同様な方法でマッハディスク近傍の撮影を行った。撮影画像から求めた光強度データについて、主に G (緑) を用いて強度分布の磁場強さによる変化を求めた。

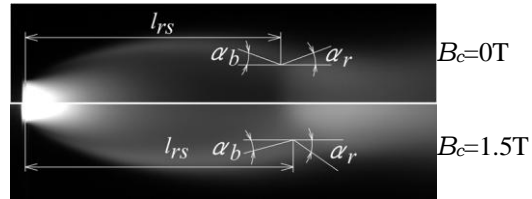
(3) 上述のプラズマ噴流の超音速域に図 3 に噴流画像の一例を示すようにタングステン



$\delta = 15^\circ$ ,  $l/d_b = 2.5$ ,  $B_c = 0\text{T}$ ,

$p_b = 385\text{ Pa}$ ,  $\dot{m} = 1.20\text{ g/s}$

図3 噴流画像の一例と測定諸量



$i_s = 150\text{ A}$ ,  $L = 350\text{ mm}$ ,

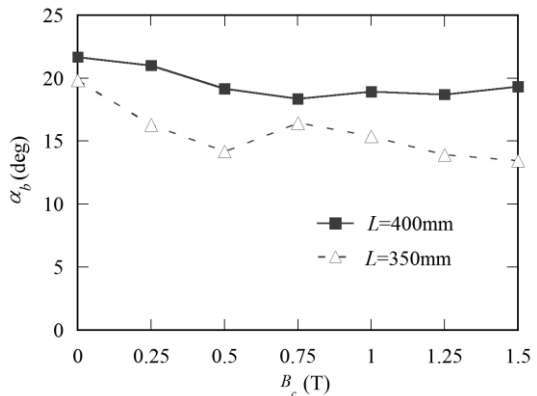
$p_b = 369 \pm 1\text{ Pa}$ ,  $\dot{m} = 1.19 \pm 0.01\text{ g/s}$

図4 反射衝撃波の開始点でのパレル衝撃波の角度  $\alpha_b$  と反射衝撃波の角度  $\alpha_r$

製の半角  $\delta$  が  $15$  度あるいは  $10$  度の円錐プローブを挿入し、プラズマトーチからプローブ先端までの距離や印加する磁場の強さを変えてプローブ先端から発生する斜め衝撃波を高解像度デジタルカメラで撮影し、斜め衝撃波の角度  $\sigma$  を光強度の勾配および等高線から求めた。斜め衝撃波の測定では、トーチ先端からの円錐プローブ先端までの距離を  $l$ 、プローブの軸方向および高さ方向座標をそれぞれ  $x'$  と  $z$  とし、原点はプローブ先端とした。なお、図中には参考までに、 $x'/d_b = 0.2$  の位置を破線で示した。噴流のマッハディスク付近の測定と同様に、撮影画像の光強度データを RAW データから抽出したが、この場合には噴流がほぼ安定した発生後  $90\text{s}$  から  $120\text{s}$  までの 4 枚の画像を平均化したデータを用いた。また、解析には主に G (緑) の光強度を用いた。得られた斜め衝撃波の角度  $\sigma$  から、Taylor-Maccoll の式を用いて局所マッハ数  $M_l$  を求めた。測定データの整理では、代表長さとしてタングステンプローブ基部の円筒部の直径  $d_b = 8\text{ mm}$  を用いて基準化した。

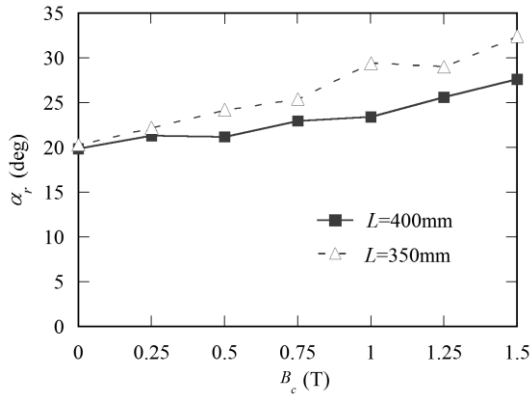
#### 4. 研究成果

(1) マッハディスク近傍の流れの画像から求めた衝撃波に関連する諸量の中で反射衝撃波の開始位置は磁場の印加によりわずかに下流側に移動する傾向を示した。しかしな



$i_s = 150\text{ A}$ ,  $p_b = 371 \pm 3\text{ Pa}$ ,  $\dot{m} = 1.19 \pm 0.01\text{ g/s}$

図5 パレル衝撃波の角度  $\alpha_b$  の変化

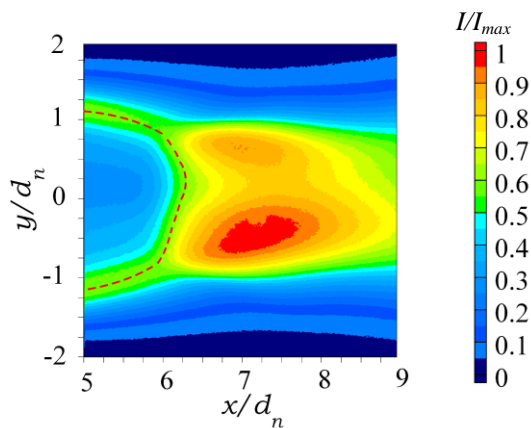


$i_s = 150\text{A}$ ,  $p_b = 371 \pm 3\text{Pa}$ ,  $\dot{m} = 1.19 \pm 0.01 \text{ g/s}$

図6 反射衝撃波の角度 $\alpha_r$ の変化

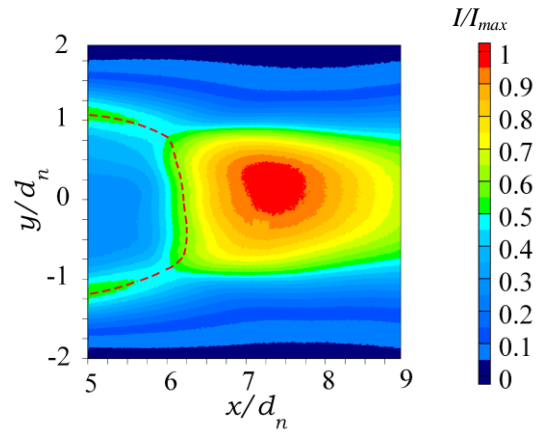
がら、画像から求めたマッハディスク下流の比較的明るい領域の幅はわずかに減少したが、磁場印加により大きな変化は観測されなかった。また、反射衝撃波の開始点における流れ方向に対するバレル衝撃波と反射衝撃波について、それぞれ図4に示すようにそれぞれの角度 $\alpha_b$ と $\alpha_r$ の印加磁場強さによる変化を求めた。印加磁場強さの指標としては超電導コイル間中心の磁束密度 $B_0$ を用いた。バレル衝撃波の角度 $\alpha_b$ は図5のように磁場強さの増加とともに減少する傾向を示した。これに対し反射衝撃波の角度 $\alpha_r$ は図6に示すように明らかに増加した。 $\alpha_r$ が磁場強さの増加とともに増加したのはマッハディスク近傍の流れの変化によるマッハディスクの変形に起因するものと考えられる。

(2) 最終年度に行ったより高い分解能の光強度の等高線分布の磁場による変化の例を図7~9に示した。これらの図の等高線はマッハディスク直後の後流の亜音速域における最大光強度 $I_{max}$ により基準化し、 $I/I_{max}$ の変化幅を0.05として表示した。なお、磁場強さの指標にはほぼマッハディスクの位置に対応



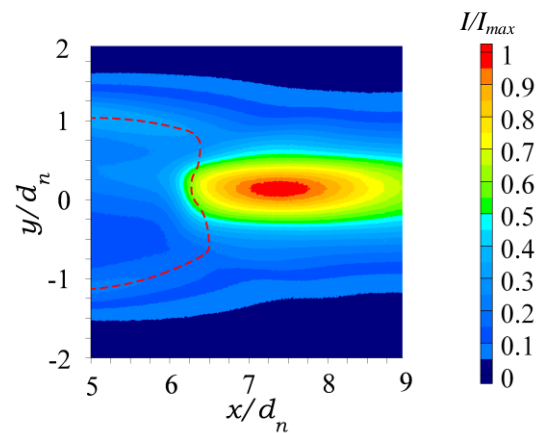
$i_s = 150\text{A}$ ,  $p_b = 410\text{Pa}$ ,  $\dot{m} = 1.19 \text{ g/s}$

図7 光強度の等高線分布 ( $B_0=0\text{T}$ )



$i_s = 150\text{A}$ ,  $p_b = 410\text{Pa}$ ,  $\dot{m} = 1.19 \pm 0.01 \text{ g/s}$

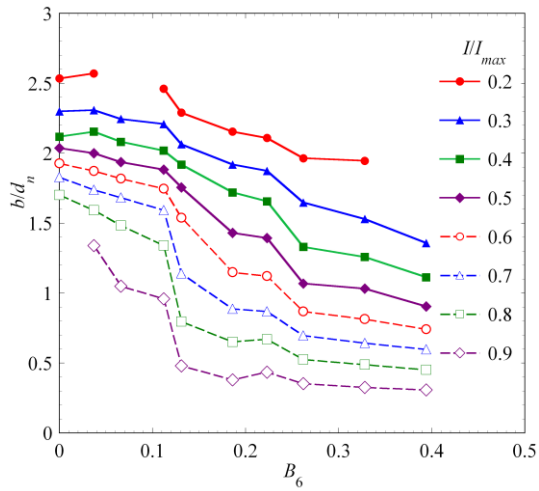
図8 光強度の等高線分布 ( $B_0=0.112\text{T}$ )



$i_s = 150\text{A}$ ,  $p_b = 371 \pm 3\text{Pa}$ ,  $\dot{m} = 1.19 \pm 0.01 \text{ g/s}$

図9 光強度の等高線分 ( $B_0=0.394\text{T}$ )

する  $x/d_n=6$  の位置での磁束密度  $B_0$  を用いた。図7の無磁場の場合の結果は、噴流中心が両端に比べてやや下流にある通常のマッハディスクと同様の典型的な凹型の形状を示した。しかしながら、印加磁場を強くすると端部が下流に移動し、図8に示される  $B_0=0.112\text{T}$  の場合のように平坦な形状の分布へと変化した。さらに磁場を強くすると端部が中心部よりも下流にある凸型の分布となり、今回の測定で最大の磁場を印加した  $B_0=0.394\text{T}$  の場合にも示されるように磁場が強くなるとともにその傾向はより顕著になった。図中には  $I/I_{max}=0.6$  の場合の等高線から想定される流れの変化を破線で示したが、マッハディスク直後の光強度の等高線の分布形状は、マッハディスクの変形、すなわちマッハディスク直前の速度分布の変化に対応していると考えられる。また、 $B_0$  が  $0.112\text{T}$  と  $0.394\text{T}$  の場合の等高線分布を示した図8と9の対比からも明らかのようにマッハディスク後流の等高線の高さ方向の幅  $b$  は磁場強さの増加とともに減少する。図10にはマッハディスクの後流の等高線の幅  $b$  の磁束密度  $B_0$  による変化について、マッハディ



$i_s = 150\text{A}$ ,  $p_b = 410 \pm 2\text{Pa}$ ,  $\dot{m} = 1.19 \pm 0.01\text{ g/s}$   
 図 10 マッハディスク後流の等高線の幅  $b$  の磁場強さによる変化

スク直後の後流の超音速域における最大光強度  $I_{max}$  により基準化した  $I/I_{max}$  が 0.1 間隔で 0.2~0.9 の範囲の場合の結果を示した。求めた強度比  $I/I_{max}$  の範囲内では後流の幅  $b$  は磁場の増加とともにほぼ同様に減少する傾向が見られた。

(3) 撮影画像から抽出した光強度から斜め衝撃波の角度  $\sigma$  を求める場合の測定位置の影響について、マッハディスクの上流および下流に比べてマッハ数は比較的低いが斜め衝撃波の発生が確認された下流の超音速域でも検討を行った。一般に角度  $\sigma$  は距離  $x$  の増加とともに減少したが、先端近くの  $x/d_b = 0.05$ , 0.1 および 0.2 で求めた測定値に基づく  $M_l$  の算定結果を参考にして、その後の検討では図 3 中にその位置を破線で示した  $x/d_b = 0.2$  の位置での測定結果を用いた。

プラズマ噴流中の円錐プローブに生ずる斜め衝撃波の角度  $\sigma$  は磁場強さの増加とともに減少し、したがって  $M_l$  は増加した。一例

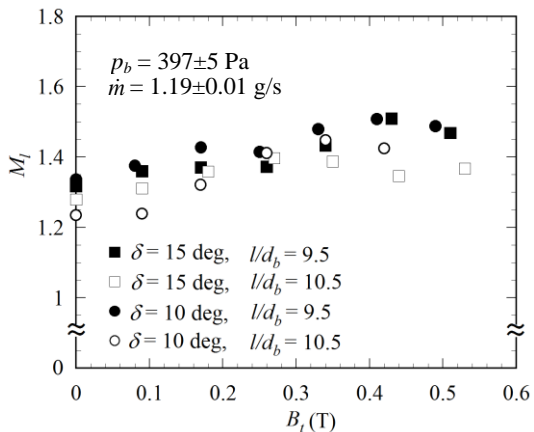


図 11 光強度の勾配から求めた局所マッハ数  $M_l$  の磁場強さによる変化

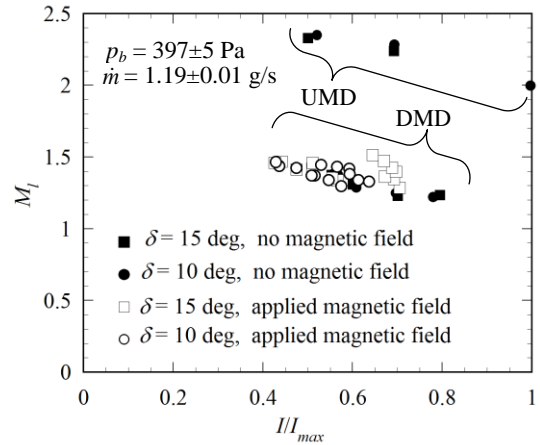


図 12 光強度の等高線分布から求めた噴流中心の強度比  $I/I_{max}$  による局所マッハ数  $M_l$  の変化

として、図 11 には光強度の勾配から求めたマッハディスク下流の超音速域における噴流の中心線に沿った局所マッハ数  $M_l$  の円錐プローブ先端位置での軸方向磁束密度  $B_l$  による変化を示す。 $M_l$  は  $B_l$  の増加とともに増加し、流れが磁場強さの増加とともに加速されることを示した。この超音速域での流れの加速は上流側の流れの収縮の方が下流側よりも大きく流れが磁場強さの増加とともに広がることによって発生すると考えられる。図に示したように円錐プローブの半角  $\delta$  が  $15^\circ$  と  $10^\circ$  の場合の測定を行ったが、算定された  $M_l$  は測定に用いた円錐プローブの半角  $\delta$  によらず良く一致した。これは本研究で用いた Taylor-Maccoll の式による  $M_l$  の算定法の妥当性を示していると考えられる。

プラズマ噴流の光強度は流れ方向に大きく変化することから、 $M_l$  と噴流中心軸に沿った光強度の変化との関連性についても検討を行った。磁場を印加しない場合の検討結果は、マッハディスク上流および下流の超音速域の  $M_l$  がマッハディスク下流の最大光強度で基準化した光強度  $I/I_{max}$  の増加とともに減少することを示した。検討には光強度の勾配と光強度の等高線の 2 つの方法用いたが、円錐プローブの半角  $\delta$  が  $15^\circ$  と  $10^\circ$  と異なっても結果は良く一致した。図 12 には磁場を印加しない場合の結果に加え、磁場を印加した場合の結果も示す。図中の UMD および DMD はそれぞれマッハディスクの上流と下流を表す。磁場を印加しない場合の結果は良く一致したことから、図には光強度の等高線分布を用いて求めた結果を示した。磁場を印加した場合も  $I/I_{max}$  の増加とともに  $M_l$  は減少し、噴流の超音速域における  $M_l$  の増加と減少を噴流中心軸に沿った  $I/I_{max}$  の減少と増加のそれぞれから判定できることが示された。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

- ① Noriaki ITAMIYA, Hiroshi SHINDO, Norifumi ONO and Kazuo KOIKE, Image Analysis of an Oblique Shock Wave around a Conical Probe in Plasma Jet under Applied Magnetic Field, Frontier of Applied Plasma Technology, 査読有, Vol. 5, NO.2, 2012, pp. 55-60.
- ② Noriaki Itamiya, Hiroshi Shindo, Norifumi Ono and Kazuo Koike, Image Analysis of Shock Wave around a Circular Cone in Plasma Jet under Applied Magnetic Field, ADVANCES IN APPLIED PLASMA SCIENCE, 査読有, Vol.8, 2011, pp.35-38.

[学会発表] (計6件)

- ① Kazuo KOIKE and Norifumi ONO, Effects of Applied Magnetic Field on Light Intensity Distribution around Mach Disk in Plasma Jet, 20th Annual Meeting of IAPS/International Workshop 2013 in Kuala Lumpur, Malaysia, March 8, 2013 PARKROYAL KUALA LUMPUR. (Proc. 20th Annual Meeting of IAPS International Workshop 2013 in Malaysia, Plasma Application & Hybrid Functionally Materials, Vol.22, pp.3-4. に掲載)
- ② Noriaki ITAMIYA, Hiroshi SHINDO, Norifumi ONO and Kazuo KOIKE, Measurement on Local Mach Number in Plasma Jet under Magnetic Field Using a Conical Probe, 19th Annual Meeting of IAPS/International Workshop 2012 in Taipei, March 10, 2012. (Proc. 19th Annual Meeting of IAPS International Workshop 2012 in Taipei, Plasma Application & Hybrid Functionally Materials, Vol.21, pp.58-59.に掲載)
- ③ 天田裕久、小野憲文、小池和雄、磁場下におけるプラズマ噴流内斜め衝撃波の画像診断、可視化情報学会全国講演会(富山)、2011年9月26日。  
(可視化情報 Vol.31 Suppl. No.2, 63-64 頁に掲載)
- ④ Hiroshi SHINDO, Noriaki ITAMIYA, Norifumi ONO and Kazuo KOIKE, Emission Spectroscopic Measurement

near Plasma Jet Fringe, 18th Annual Meeting of IAPS/International Workshop 2011 in Melbourne, March 12, 2011.

(Proc. 18th Annual Meeting of IAPS International Workshop 2011 in Melbourne, Plasma Application & Hybrid Functionally Materials, Vol.20, pp.70. に掲載)

- ⑤ Noriaki ITAMIYA, Hiroshi SHINDO, Norifumi ONO and Kazuo KOIKE, Flow around Mach Disk in Under-Expanded Plasma Jet under Applied Magnetic Field, 18th Annual Meeting of IAPS/International Workshop 2011 in Melbourne, March 12, 2011. (Proc. 18th Annual Meeting of IAPS International Workshop 2011 in Melbourne, Plasma Application & Hybrid Functionally Materials, Vol.20, p.69. に掲載)
- ⑥ 石川俊、加藤美奈、川名秀哉、板宮 紀暁、小池和雄、磁場下の超音速プラズマ流中の円錐周りの衝撃波計測、日本機械学会東北学生会第41回卒業研究発表講演会、2011年3月3日。  
(講演論文集、92-93 頁に掲載)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小池 和雄 (KOIKE KAZUO)  
東北学院大学・工学部・教授  
研究者番号：20108575