

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2006～2008

課題番号：18560176

研究課題名（和文） 強磁場中プラズマ噴流の励起温度分布測定の高精度化

研究課題名（英文） Study of Accurate Determination of Excitation Temperature Distribution in Plasma Jet under Strong 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：

プラズマ励起温度分布測定の高精度化について検討し、点光源を模擬した LED(発光ダイオード)を用いた測定から、光学測定端子の受光部の光ファイバーにより空間分解能はかなり改善出来ることを明らかにした。また、放射分光法による温度算定の検討から、強磁場下で収縮し、急激に放射強度が低下するプラズマ噴流外縁部の温度算定では、用いるスペクトルの組合せを温度範囲により変える必要があることを示した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,700,000	0	1,700,000
2007年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2008年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	510,000	3,910,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学（5004）

キーワード：流体工学、プラズマ加工、プラズマ噴流、強磁場、光学計測

1. 研究開始当初の背景

幅広い工学分野で利用が進められているプラズマは、磁場に応答するという特質も有しており、強磁場を用いてその機能を引き出すことにより、さらなる応用面の広がり期待できる。強磁場の印加によるプラズマの変化はプラズマの物性に大きく依存し、その特性は温度や圧力によって大きく変化することから、温度測定は極めて重要である。特に、強磁場下で収縮したプラズマ噴流では、温度分布が大きく変化することから、その精度良い計測は重要な課題である。このような観点

から、比較的簡便に精度良くプラズマ温度分布を求めるための検討を行うことはプラズマの工学的応用をはかるためにも重要であると考えられた。一方、プラズマの温度測定には、光学的診断法が用いられてきており、放射分光法はその代表例でもある。放射分光法は他の光学診断法に比べて、比較的簡単な設備で計測が可能であるなどの利点を有するが、空間分解能に制約があるなどの問題点もある。したがって、放射分光法におけるこの制約を改善すれば、プラズマ温度分布測定のさらに強力なツールと成る。このような研

究開始時の背景から、放射分光法の測定精度改善をはかり、強磁場下でのプラズマ励起温度分布測定の高精度化のための検討を行うことは有意義であると考えた。

2. 研究の目的

プラズマ流の磁気機能性流体としての特質を利用した高効率高温熱源や特殊光源へのプラズマの応用をはかるためには、強磁場下でのプラズマ噴流のエネルギー分布や光学的放射強度の変化の様相についての実験的な検討が必要となる。特に、プラズマ流の磁場中での挙動に極めて大きな影響を及ぼす温度分布を比較的簡便に精度良く測定することは、強磁場を用いてプラズマの優れた機能をさらに引き出し、工学的応用をさらに進展させるための重要な課題である。本研究の主目的はプラズマ流の温度分布を精度良く求める方法を確立することにある。このような観点から、その有力な候補で、光学的プラズマ診断法の中で他の方法に比べて比較的簡単な設備で計測が可能な放射分光法について、測定精度を改善するための検討を行った。プラズマ噴流の温度測定では、可視光域に比較的多くの線スペクトルが観測できるアルゴンを作動流体として用い、強磁場下での放射測定から励起温度分布を求めて精度改善のための実験的な検討を行った。

また、プラズマは幅広い工学分野で応用のための研究が進められているが、超伝導磁石によって実現できる強磁場下でのデータは限られており、プラズマ応用のさらなる進展をはかるためには、強磁場下でのプラズマ諸量についての基礎資料は不可欠である。本研究によって得られた成果はこれらの研究における基礎資料となると考える。

3. 研究の方法

(1) LED (発光ダイオード) 装置を用いた放射強度分布の測定

実験測定時に常に同一プラズマ噴流状態を再現することは難しいことから、プラズマ噴流の代わりに同一の発光状態が得られるLED(発光ダイオード)装置を用いて空間分解

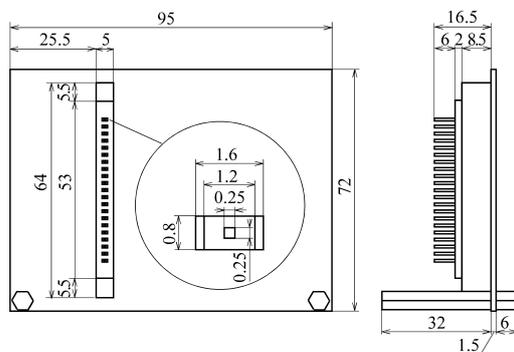


図1. LED(発光ダイオード)装置の概略



(a) BF15 (b) BF4 (c) SF

図2. 光ファイバー受光部

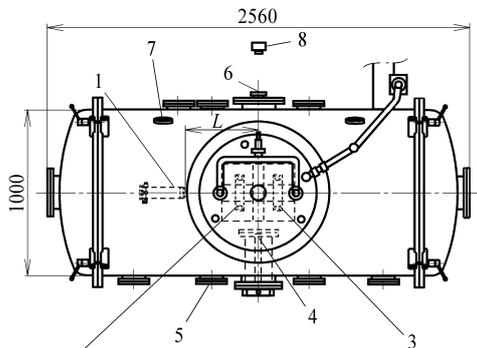
能について検討した。LED 装置は図1に概略を示すような21個の青色チップLEDからなり、パソコンによりLEDの点灯、発光強度の調整を遠隔操作出来る。このLED装置を超伝導磁石のボア内に発光位置がプラズマの通過する位置の中心になるように挿入し、点灯した。点灯したLEDからの放射は光学測定端子のレンズシステムにより集光され、受光部光ファイバーに入射する。空間分解能の検討は、強磁場下でのプラズマ噴流の放射計測に用いたファイバー径0.3mmの芯線数1本の単芯光ファイバーSFとファイバー径0.2mmの芯線が4本のバンドルファイバーBF4、およびこれまで測定に用いてきたファイバー径0.2mmの芯線が15本のバンドルファイバーBF15の3種類の受光部光ファイバーについて行った。図2には光学測定端子の集光レンズによって絞られた放射が入射する光ファイバーの受光部を示した。測定位置では、SFは直径約2mmの円形領域、BF4は1辺が約2.5mmの角に丸みを帯びた正方形領域、BF15では直径6mm強の円形領域からの放射が入射することになる。

測定に先立ち、点光源を模擬した1個の青色チップLEDを回路への印加電圧 V_c を設定して点灯させ、強度が最も高くなる位置を求めた。次に、この強度が最も高い位置から ± 6 mmの範囲で、高さ方向(上から下)に0.1mm間隔で光学測定端子を移動させて放射測定を行った。また、回路への印加電圧 V_c を4.05V、4.95Vおよび6.00Vに設定して、LEDの発光強度による変化を調べた。実際のLEDへの供給電流は各LEDで異なり、設定した電圧 V_c が4.05V、4.95Vおよび6.00Vの場合の供給電流 i_a の平均値はそれぞれ5.4mA、12.2mAおよび20.7mAであった。光学測定端子で集光した放射は光ファイバーにより分光器に伝送し、分光器で波長ごとに分解してスペクトル解析を行った。これらの結果から前述の3種類の光ファイバーについて、空間分解能に及ぼす受光部の影響を比較検討した。分光器の中心波長 λ_c は用いたLEDの発光特性に基づき470nmとした。各光ファイバーの材質は同じ人工石英であることから波長に対する分布は相似であった。LED装置を用いた空間分解能の検討では、こ

の分光特性の結果から波長 λ が467nmの放射強度について光学測定端子の測定位置による変化を求めた。

(2) 強磁場下のプラズマ噴流の励起温度分布測定

プラズマ噴流の温度分布測定は図3に平面図を示す真空室を用いて行った。その内部にはプラズマ噴流を噴射するプラズマトーチ、超伝導磁石を極低温の超伝導状態に保つためのクライオスタットなどが図のように配置されている。真空室には測定中の圧力を一定に保持するための真空排気装置が設備されており、作動気体のアルゴンの質量流量 \dot{m} が約1.20g/sの場合には380Pa程度の背圧 p_b が得られる。プラズマ噴流に軸方向の強磁場を印加する超伝導磁石は同じ性能仕様の超伝導コイルから成る(上流側をコイルA、下流側をコイルBとする)。図4にはプラズマ噴流の流れ方向の軸方向磁場分布をトーチおよび超伝導コイルの位置と対比して示した。本研究では両コイルを作動させた場合について測定を行い、図では $z = 0$ mmの位置に対応するコイル間中心の軸方向磁束密度 B_c により印加磁場の強さを設定した。その場合の軸方向磁束密度分布は図のようになる。 B_c は1.5Tから0Tまで0.25T間隔で変化させた。光学測定端子は、真空室側壁に取り付けられており、ステップモータにより超伝導磁石ボアの中心線から高さ方向に上方25mm、下方25mmの範囲を1mm間隔で移動させて、2つの超伝導コイル間のプラズマ噴流の放射強度を測定した。また、光学測定端子の反対側の位置に設けられた中央観測窓からは、超伝導コイル間の噴流の様相が観測できる。本研究では、測定開始から終了までのプラズマ噴流の変動を考慮し、放射計測のデータを補完するために、放射計測と同時にこの中央観測窓から噴流をデジタルカメラにより撮影した。



1. Plasma torch, 2. Superconducting coil A,
3. Superconducting coil B, 4. Optical probe,
5. Upstream window, 6. Center window,
7. Upper upstream window, 8. Digital camera

図3. 真空室平面図および装置配置の概略

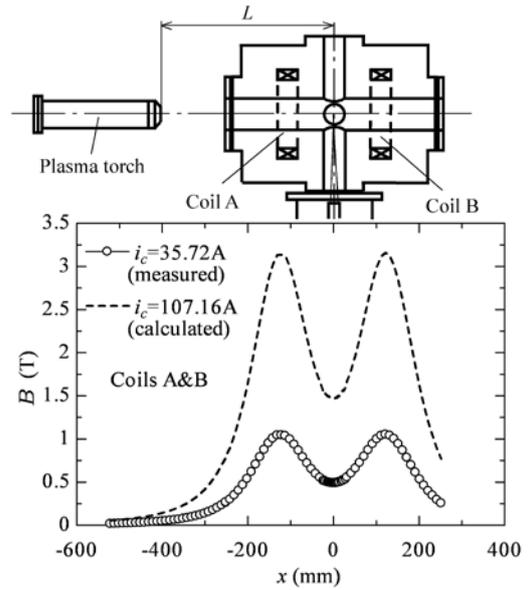


図4. プラズマ噴流流れ方向の軸方向磁場分布

放射強度測定では、受光部に単芯光ファイバーSFおよびバンドルファイバーBF4を用いた。光学測定端子の集光レンズシステムの焦点位置は、両コイル間の中心で、噴流が通過する超伝導磁石ボアの中心軸に直交する線上にあるようにあらかじめ設定した。分光器の中心波長 λ_c は、これまでと同様の590nmに設定し、約60nmの波長範囲の放射を測定した。これに加えて、これまでBF15を用いた場合に温度算定ができないことが多かった λ_c を610nmに設定した測定も行った。この測定結果から線スペクトルの相対強度分布を求め、ボルツマンプロット法により励起温度を算出した。また、プラズマ噴流のより外縁まで励起温度分布の算定を行えるように、励起温度算出に用いる線スペクトルについても再度検討を行った。また、作動気体のアルゴンの質量流量は一定の値になるように調節し、プラズマトーチへの供給電流 i_s は100A、125Aおよび150Aとした。また、プラズマトーチ先端からコイル間中心までの距離 L は400mmおよびより超伝導磁石に近づけた350mmに設定して測定を行った。

4. 研究成果

(1) LED (発光ダイオード) 装置を用いた空間分解能の検討

検討結果の一例として、図5には受光部に単芯ファイバーSFの場合の放射強度の高さ方向変化を示す。電圧 V_c を4.05Vに設定し、LED装置の21個の青色チップLEDのうちNo.2、No.5、No.8、No.9、No.10、No.11、No.12、No.13、No.16、No.19およびNo.21のLEDを1個ずつ点灯させて測定を行った。電圧 V_c を同じ値に設定しても各LEDへの供

給電流 i_A は 5.1mA から 5.9mA まで異なることから放射強度の最大値も変化した。しかしながら、両端の No.2 および No.21 の結果を除き、測定位置による放射強度分布は相似であった。No.2 および No.21 では他の LED とは異なった放射強度分布が測定されたが、これは壁面等による反射の影響によるものと考えられる。

バンドルファイバー-BF4 の結果は、SF の放射強度がそのピークに対しほぼ対称であったのに対し、変形した分布となった。この場合も両端の No.2 および No.21 を除き、放射強度は相似な分布を示した。さらに、SF の場合にもその傾向はみられたが、No.19 では反射による影響と考えられる高い放射強度が計測された。BF15 の場合には高い放射強度が測定されたが、SF や BF4 とは異なる 2 つのピークを持つ分布を示した。この 2 つのピークは、発光強度を変化させても同様に計測された。また、両端の No.2 および No.21 では放射強度分布が変化し、No.19 では BF4 と同様に高い放射強度は測定された。したがって、光学測定用ボア壁に近い領域の放射計測では、反射の影響について慎重に考察する必要がある。図 6 には各受光部光ファイバーの放射強度分布の一例として V_c を 4.05V に設定した場合の No.11 の結果を示す。この場合の i_A の実測値は 5.3mA であった。いずれの光ファイバーの場合も光学測定端子の高さ方向位置が -1mm から 2mm 付近で放射強度はピークを示し、ピークを示した位置から離れると急激に放射強度は減少した。また、この位置での測定では、BF15 が最もピークが高く、LED からの放射が最も多く入射したことを示した。

高さ方向放射強度分布は、バンドルファイバー-BF4 および BF15 では最大値に対して非対称であることに加え、BF15 の場合には放射が広い範囲から入射していることも明らかである。このように変形した分布のデータから空間分解能を評価するために、放射が入

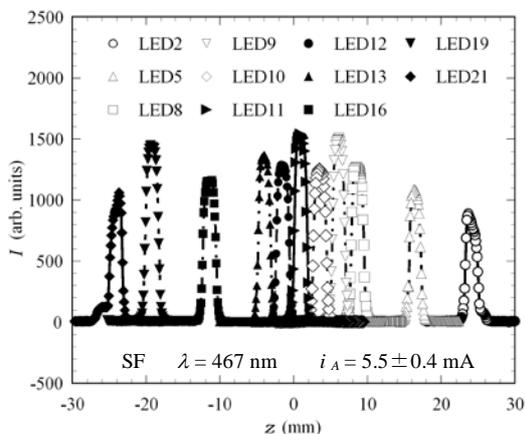


図 5. LED からの放射強度の測定結果(SF)

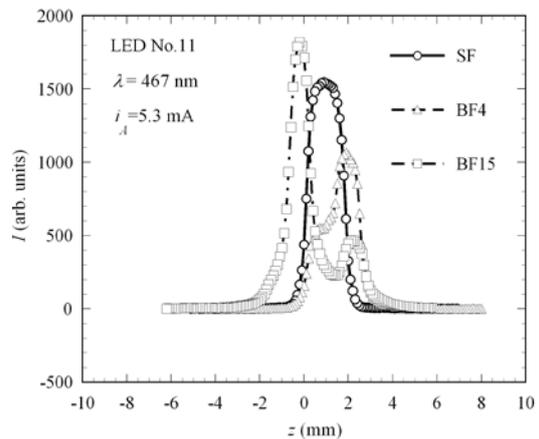


図 6. 各受光部光ファイバーの放射強度分布の一例

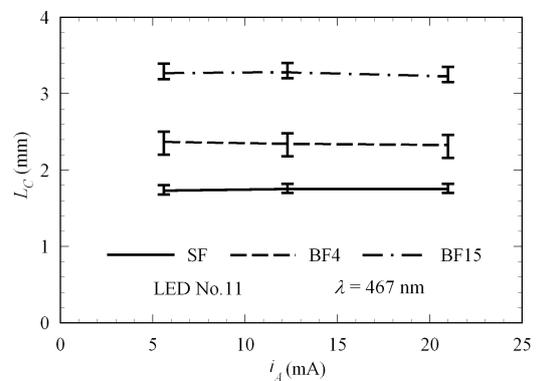
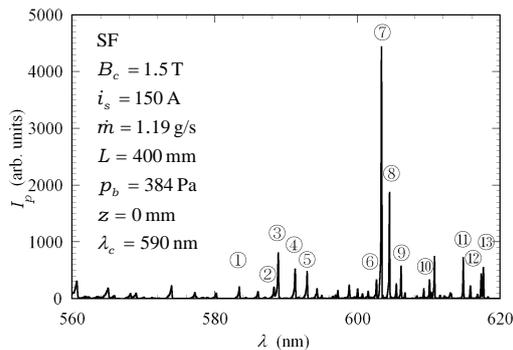


図 7. 集光長さ L_c

射することにより放射強度が急激に増加する位置ならびに放射の入射がなくなることにより放射強度が急激に減少する位置を求め、便宜的に集光長さ L_c として入射領域の範囲を評価した。3 種類の光ファイバーの中で BF15 は最も高い放射強度が得られるが、図 7 に示されるように最も広い範囲からの放射が入射することを示した。一方、SF の場合は放射強度の高さ方向変化と同様に、 L_c は放射強度がピークから離れるにつれて急激に減少し、この指標によれば最も高い空間分解能を示した。

(2) 温度分布測定の精度改善についての検討

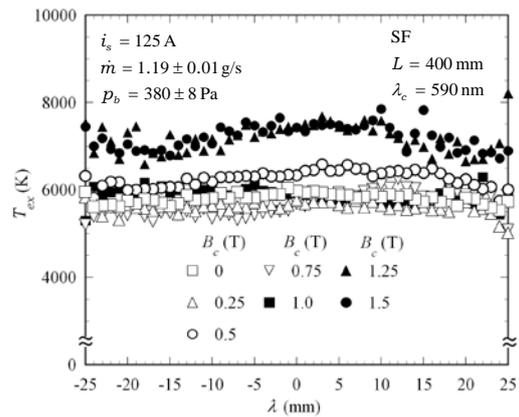
本研究で用いた受光部光ファイバー-SF と BF4 の場合には、従来のバンドルファイバー-BF15 とは各線スペクトル間の放射強度が相対的に異なる場合もあったことから、励起温度の算出に用いる線スペクトルについて再度検討を行った。分光器の中心波長 λ_c を 590nm に設定した場合は、これまで 12 の波長の線スペクトルを用いて温度算定を行ってきた。今回の SF と BF4 を用いた測定でも、比較的高い強度を示したことからこの 12 の線スペクトルを温度算定に用いる線スペクトルに選定した。また、空間分解能が改善さ



- ①:583.426nm, ②:588.262nm, ③:588.858nm
 ④:591.209nm, ⑤:592.881nm, ⑥:602.515nm
 ⑦:603.213nm, ⑧:604.322nm, ⑨:605.937nm
 ⑩:609.881nm, ⑪:614.544nm, ⑫:617.017nm
 ⑬:617.310nm

図 8. 放射測定例 (噴流中心、
中心波長 $\lambda_c = 590$ nm)

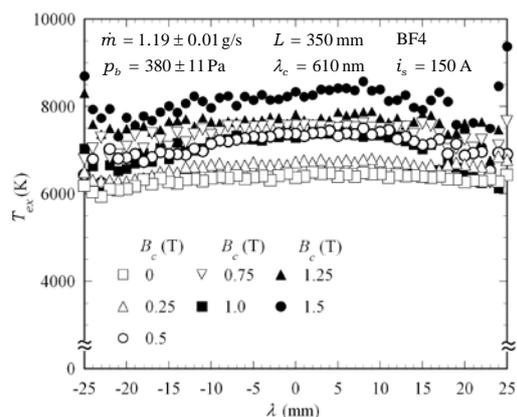
れたことに起因すると考えられるが、最大の放射強度を示した 603.213nm の場合も従来とは異なり近似曲線に近い結果を示したことから、これを加えることとした。図 8 には一例として B_c が 1.5T で、中心波長 λ_c が 590nm の場合の噴流中心 ($z = 0$ mm) の結果を示す。強磁場の印加により噴流が収縮した中心部に近い領域では比較的高い放射強度が得られた。しかしながら、SF に比べて受光面積の大きな BF₄ を用いた場合でも噴流外縁では、最大の放射強度を示す $\lambda = 603.213$ nm の線スペクトルの値が約 1/50 程度にまで減少しており、温度算定に十分な強度の放射が得られなかった。中心部では温度算定に用いた 13 の線スペクトルで比較的高い放射強度が得られ、測定位置 -15mm から +15mm の間の温度はほぼ妥当な分布が得られたが、外縁部についてはさらなる検討が必要である。また、BF₄ を用いた場合にも、SF の場合と同様に中心部では温度算定に用いた 13 の線スペクトルで比較的高い放射強度が測定され、測定位置 -15mm から +15mm の間ではほぼ妥当な分布が得られた。なお、LED 装置を用いた空間分解能の検討において光学測定用ボア壁に近い領域で観測された反射の影響については、温度算定の際に注意する必要があるが、今回妥当な温度が得られた -15mm から +15mm の範囲では反射の影響は小さいと考えられる。また、上準位のエネルギー E_u が比較的高い線スペクトルと比較的低い線スペクトルの中からスペクトルを選択することにより、温度算定に用いる線スペクトル数を減らした組合せを用いた検討では、13 の線スペクトルを用いた場合に近い結果が得られたが、噴流外縁では同様に妥当な温度を得ることは難しかった。



- 583.426nm, 588.262nm, 588.858nm,
 591.209nm, 592.881nm, 602.515nm,
 603.213nm, 604.322nm, 605.937nm,
 609.881nm, 614.544nm, 617.017nm,
 617.310nm

図 9. 高さ方向励起温度分布
(中心波長 $\lambda_c = 590$ nm)

放射測定部に流入するプラズマ噴流の状態は常に一定ではなく、比較的高温で測定域に流入した場合には放射強度が全体的に高く、高いピークの線スペクトル近傍のスペクトルが大きく影響される。逆に、噴流の外縁や低めの温度で流入した場合には放射強度が全体的に低くなり、選定した線スペクトルのピークが検出できない場合もあった。したがって、実験時の条件によっては励起温度がかなり異なっており、放射強度の条件により温度算定に用いる線スペクトルの組合せを変えることが必要である。



- 591.209nm, 592.881nm, 603.213nm,
 604.322nm, 605.273nm, 605.937nm,
 610.564nm, 614.544nm, 617.017nm,
 617.310nm, 621.250nm, 621.594nm,
 629.687nm, 630.766nm, 636.958nm,
 638.472nm

図 10. 高さ方向励起温度分布
(中心波長 $\lambda_c = 610$ nm)

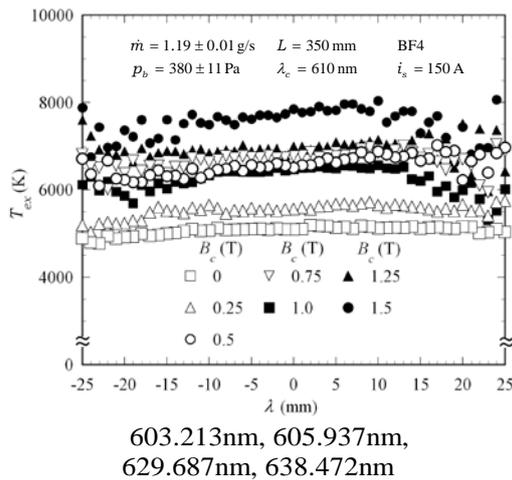


図 11. 高さ方向励起温度分布

中心波長 λ_c を610nmに設定した場合のBF15を用いた測定では、妥当な励起温度分布が得られないことが多かったが、空間分解能の比較的良好なSFとBF4を用いることにより、噴流中心部では妥当な励起温度が算定できた。また、さらなる精度改善を目指し、温度算定に用いる線スペクトルを再検討し、16の線スペクトルを選定した。図10には $L=400\text{mm}$ 、 $i_s=150\text{A}$ の条件で、BF4用いた測定結果から16の線スペクトル用いて算定した高さ方向励起温度分布の一例を示す。測定位置 -15mm から $+15\text{mm}$ の間では比較的高い放射強度が得られたこともあり、中心波長 λ_c を590nmに設定した場合の結果と同程度の励起温度が得られた。また、この測定範囲では、前述したように放射測定への反射の影響は小さいと考えられる。

さらに、この16の線スペクトルの中から上準位のエネルギー E_u が比較的高いものと比較的低いもののいくつかの組み合わせを選定し、放射強度が低下する噴流のより外縁部までの温度算定の可能性についても検討した。図11には温度算定に用いる線スペクトル数を減らした線スペクトル数4(603.213nm, 605.937 nm, 629.687nm, 638.472nm)の場合の結果を示す。得られた結果は線スペクトル数16の場合に比べ、わずかながら全体的に低い温度を示したが、定性的な傾向は一致した。したがって、これらの結果は上準位のエネルギー E_u が比較的高い線スペクトルと比較的低い線スペクトルの中から線スペクトルを選択することにより、温度算定に用いる線スペクトル数を減らした適切な組合せにより、妥当な温度分布が得られる可能性が高いことを示している。

強磁場中プラズマ噴流の励起温度算定の高精度化についての検討から、受光部に受光面積の小さな光ファイバーを用いることにより空間分解能は改善され、従来温度算定が

できない場合が多かったスペクトル領域でも温度算定が可能になった。しかしながら、強磁場により収縮したプラズマ噴流外縁部の励起温度分布算定にはさらなる検討が必要である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3件)

- ① Kazuo Koike and Norifumi Ono, Light intensity analysis of plasma jet constriction with applied magnetic field, Vacuum, Vol.83, 2008, 25-28, 査読有
- ② Kazuo Koike and Norifumi Ono, Study of Spatial Resolution of Optical Probe for Plasma Spectroscopic Measurement, Frontier of Applied Plasma Technology, Vol.1, 2008, 13-16, 査読有
- ③ Kazuo Koike and Norifumi Ono, Light Intensity Analysis of Plasma Jet Behavior under Strong Magnetic Field, ADVANCES IN APPLIED PLASMA SCIENCE, Vol.6, 2007, 33-36, 査読有

[学会発表] (計 4件)

- ① 田宮一、小野憲文、小池和雄、光学測定端子の空間分解能に関する検討、プラズマ応用科学会第16回年会2008年度研究講演会、2009年3月6日、神戸市六甲山ホテル(プロシーディング「プラズマ応用と複合機能材料」、Vol.18、77頁に掲載)。
- ② 小池和雄、小野憲文、プラズマ分光計測用光学測定端子の空間分解能に関する検討、プラズマ応用科学会第15回年会2007年度研究講演会、2008年3月15日、中国大連Sea Horizon Hotel Dalian(プロシーディング「プラズマ応用と複合機能材料」、Vol.17、19-20頁に掲載)。
- ③ 小池和雄、小野憲文、大友康史、励起アルゴンの放射計測における空間分解能の改善、プラズマ応用科学会第14回年会2006年度研究講演会、2007年3月17日、仙台市仙台ガーデンパレス(プロシーディング「プラズマ応用と複合機能材料」、Vol.16、19-22頁に掲載)。
- ④ 小野憲文、大友康史、小池和雄、ボルツマンプロットによるプラズマ噴流の温度分布算定(測定波長域選択に関する検討)、プラズマ応用科学会第14回年会2006年度研究講演会、2007年3月16日、仙台市仙台ガーデンパレス(プロシーディング「プラズマ応用と複合機能材料」、Vol.16、15-18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