

低圧空気極小プラズマジェットの膨張流領域における放射特性

○後藤 輝一（群馬大工・院）， 船津 賢人（群馬大工）， 白井 紘行（群馬大），
久保田 聖（群馬県立前橋工業高校）， 高草木 文雄（群馬大工）

Radiative Characteristics of Expansion Flow Region in a Low-pressure Air Micro-plasmajet

by

GOTOH Kiichi (Graduate School of Engineering, Gunma University),
FUNATSU Masato (School of Engineering, Gunma University), SHIRAI Hiroyuki (Gunma University),
KUBOTA Kiyoshi (Gunma Prefectural Maebashi Technical High School),
and TAKAKUSAGI Fumio (School of Engineering, Gunma University)

ABSTRACT

At our laboratory, radiation characteristics of air micro-plasmajets have been studied systematically. Up to the present, we measured radiation of the plasmajets mainly on a flow axis at atmospheric and low pressures. Temperatures were estimated with the aid of spectral matching method and Boltzmann-plot method. Rotational temperatures were estimated 5,000 to 8,000 K, and vibrational temperatures 34,000 to 70,000 K, both with some axial variations. Electronic excitation temperatures of oxygen atomic lines were estimated 5,000 to 9,300 K. It was found that the rotational temperatures had large difference from the gas temperature based on an empirical formula for a supersonic free-jet, but decreased downstream in the expansion flow region, and also the vibrational temperatures were much higher than those expected. The present paper showed the preliminary results of radiation characteristics at an off-axis position in the expansion flow region, too.

1. はじめに

高温プラズマは航空宇宙分野の研究や工学的応用に多く用いられ，その性質を知ることは非常に重要である．プラズマは原子，分子，イオンや電子を含み，各粒子は独自のエネルギー分布を構成することが多い．プラズマの測定方法には光学系またはプローブを用いる方法がある．プローブを用いた測定方法は，プラズマ内部の流れに影響を与えてしまうため，光学的手法が有利である．

本研究室では操作性に優れた極小空気プラズマジェットの放射に関する研究を系統的に行っている．測定方法には分光測定や狭帯域フィルターによって特定の分子バンドの光だけを CCD カメラで測定する方法を用い，測定結果から振動温度や回転温度，電子的励起温度などを推定した^{1), 2)}．これまでの研究では大気圧環境下，低圧環境下での分光測定の結果から，振動温度，回転温度ともに高く推定され，特に振動温度が高いこと，振動温度，回転温度とも中心軸上で一様な分布となることがわかった．

この結果に対して物理化学的な理由は不明であり，より詳細に解析，研究する必要がある．また，中心軸上で各温度が一様に分布するという結果に対して，光強度や圧力変化の大きい膨張流領域では，温度低下することが予想され，その膨張流領域でより詳細な測定が必要となった．そこで本研究では，膨張流領域に着目し，プラズマジェットを 1.0 倍に拡大して，今までより空間分解能を高め，0.5 mm 間隔で分光測定を行い，解析した．これまでと同様に得られたスペクトル分布に対して，スペクトルマッチング法により回転温度と振動温度を推定し，またボルツマンプロット法を用いて電子的励起温度を推定し，その結果を久保田らの結果¹⁾と比較検討した．さらに中心軸上ノズル出口 2.0mm 位置を半径方向に

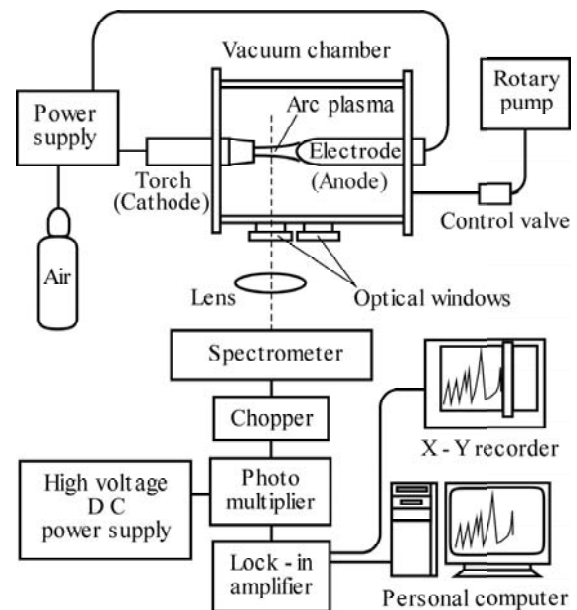


Fig. 1 Schematic view of experimental setup

0.2mm 間隔で同様の測定を行い，スペクトルマッチング法により温度推定した．

2. 実験装置概略

図 1 に実験装置概略を示す．実験装置は大きく分けて，プラズマジェット発生装置部，分光測定部，データ記録部から構成される．プラズマジェット発生装置はトーチ内部に陰極，プラズマジェットの下流域側に陽極を持つアーク放電式である．陰極および陽極は銅製であり，陰極先端にはハフニウムを用いた．両電極は水冷することにより熱からの損傷を抑え，長時間の放電にも耐えられるように設計されている．プラズマジェットの流れ方向はトーチ陰極

側から陽極側であり、作動ガスには体積比率が窒素79%，酸素21%の乾燥空気を使用した。トーチのノズル直径は0.7mmである。電極間の電圧は135V、電流は10Aであり、真空容器は内径196mm、長さ200mmの円筒型アクリル製である。陰極と陽極の極間距離は陽極を移動することにより調節可能で、本研究では10mmに設定した。また、真空容器にはプラズマジェットを観測するためにノズルから70mmの位置に直径16mmの観測窓を設置し、紫外領域も観測できるように石英製光学窓を用いた。本研究では真空容器内の圧力は11.3kPaに設定した。

分光測定には1,200grooves/mmの回折格子、焦点距離500mmの分光器（浜松ホトニクス製C5095）を使用した。光学系は石英レンズを用いて、プラズマジェットを10倍に拡大した。測定点の光は分光器スリットを通り、光電子増倍管で検出し、チョッパー信号と同期する成分をロックインアンプにより増幅した。データ記録はパーソナルコンピュータとX-Yレコーダーで同時に行った。

図2に11.3kPaにおける自発光写真を示す。プラズマジェットは左側のノズル出口から右側の陽極にむかって噴出している。プラズマジェットの発光強度はノズル出口直後から1.5mmまでの位置と3.0mmから下流側にかけて強くなっている。また、ノズル出口から3.0mm付近まで急激に発光強度が変化しているこの部分が膨張流領域であり、再び発光強度が強くなっている3.0mm位置に衝撃波が発生している。実験ではノズル出口から衝撃波位置までの膨張流領域について分光測定を行った。膨張流領域は圧力や発光強度の変化が大きく熱的性質の推測が困難である。

3. 実験結果

3-1 分光測定結果 分光測定はプラズマジェットのノズル出口0.5mm位置から5.0mm位置まで、0.5mm間隔の10点で行った。その一例として、波長領域250nmから900nmの分光測定結果を図3(a), (b)に示す。図3(a)は膨張流領域の2.0mm位置、(b)は衝撃波下流における5.0mm位置である。250nmから500nmの波長領域では、 N_2 分子の $N_2^+ 2+$ バンド、 N_2^+ イオン分子の $N_2^+ 1-$ バンドが支配的である。700nmから900nmの近赤外領域では酸素、窒素原子線が観測された。図3(a), (b)の酸素、窒素原子線は、ほぼ同様の強度を示している。図示していないが酸素、窒素原子線は、発光が強い0.5mm位置と衝撃波の3.0mm位置で強く現れており、膨張流領域と衝撃波下流域では徐々に弱くなる傾向がある。分子バンドの強度は近赤外領域のスペクトルと同様に0.5mm位置と衝撃波の位置で強い値を示している。分子バンドも膨張流領域では徐々に強度が弱くなるが、衝撃波下流域では強度が強くなる傾向がある。

3-2 紫外領域のスペクトル 図4に250nmから480nmの紫外領域のスペクトル分布を示す。図4(a)はノズル出口から2.0mm位置、図4(b)は5.0mm位置である。スペクトルは主に $N_2^+ 2+$ と $N_2^+ 1-$ バンドからなる。これらの分子バンドの $N_2^+ 2+ (1,0)$ 、 $N_2^+ 2+ (0,0)$ 、

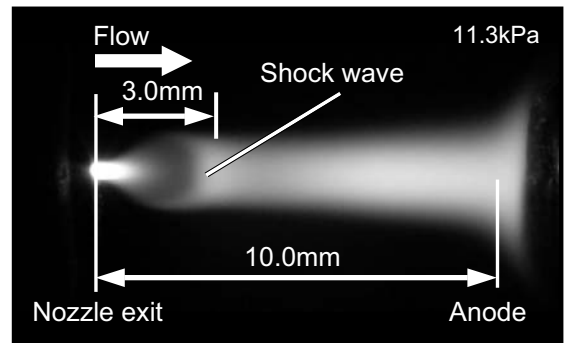


Fig. 2 Photograph of air micro-plasmajet at 11.3kPa

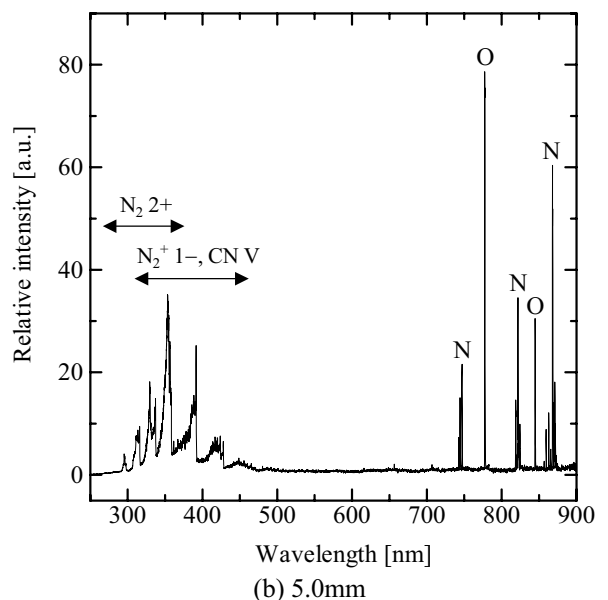
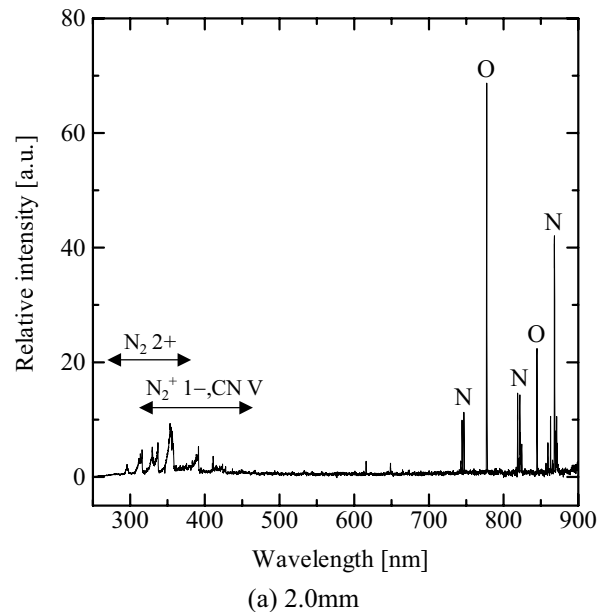
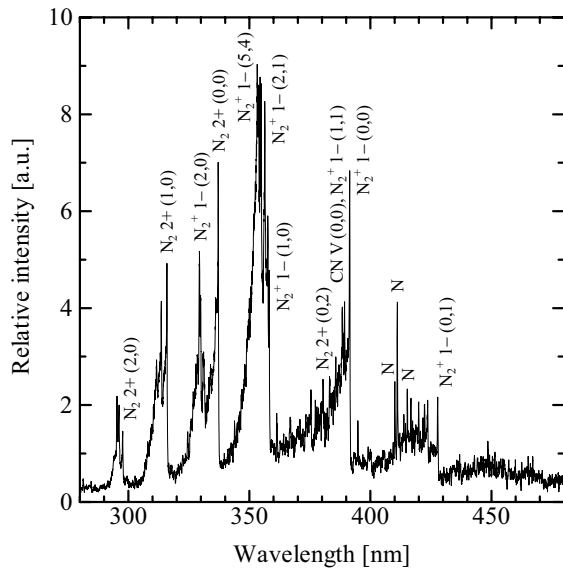
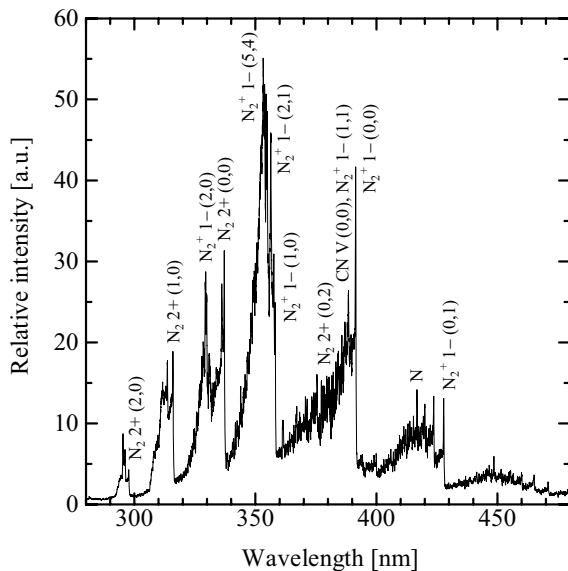


Fig. 3 Experimental spectra at 11.3kPa

$N_2^+ 1- (5,4)$, $N_2^+ 1- (0,0)$, $N_2^+ 1- (0,1)$ などがバンドヘッドを構成している。390nm付近ではCN Vが観測された。これは空気中の CO_2 が原因と考えられる。400nmから450nmの波長領域では窒素原子線が確認された。両図の分布形状は比較的類似しているが、



(a) 2.0mm

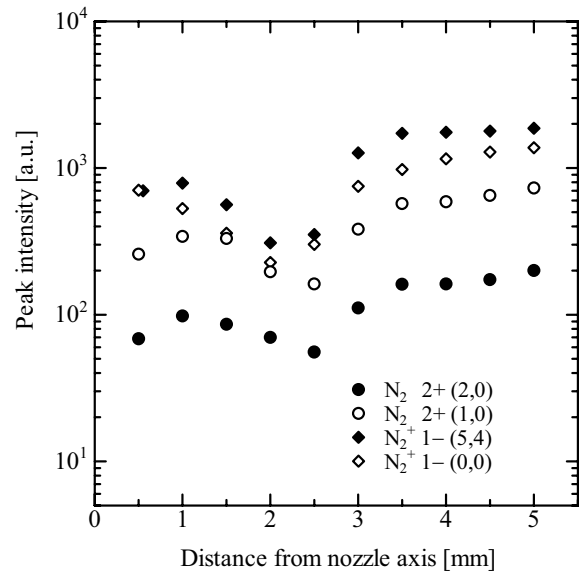


(b) 5.0mm

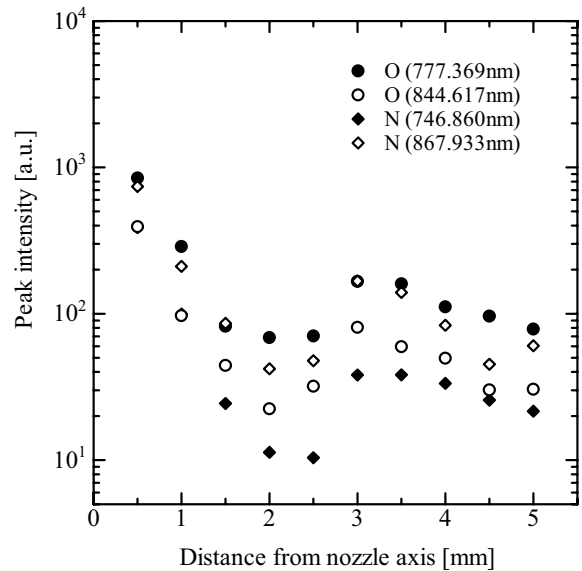
Fig. 4 Detailed spectra of molecular bands at 11.3kPa

全体的な強度は図 4 (b)の方が(a)に比べ約 6 倍強くなっている。発光強度が低い部分では熱的非平衡性が強まることが予想され、膨張流領域では強い熱的非平衡性があると考えられる。

図 5 に分子バンドのピーク強度をプロットした分布を示す。図 5 (a)は分子バンドのピーク強度を示し、図 5 (b)は原子線のピーク強度を示している。横軸はノズル出口からの距離、縦軸は相対強度を示し、図 5 (a)の黒菱形は $N_2^+ 2+(2,0)$ 、白菱形は $N_2^+ 2+(1,0)$ 、黒丸は $N_2^+ 1-(5,4)$ 、白丸は $N_2^+ 1-(0,0)$ を示している。上述したように膨張流領域において各バンドの放射強度は徐々に低下している。振動温度は $N_2^+ 1-(5,4)$ バンドと $N_2^+ 1-(0,0)$ バンドの強度比から推定することができ、 $N_2^+ 1-(5,4)$ バンドと $N_2^+ 1-(0,0)$ バンドの強度が近いほど低温度になる。図 5 (a)よりノズル出口から 0.5mm 位置と 2.5mm 位置では、他の測定点より明らかに低く推定されると考えられ、これらのこ



(a) Peak intensity of molecular bands



(b) Peak intensity of atomic lines

Fig. 5 Peak intensities on flow axis at 11.3kPa

とから振動温度は膨張流領域の中心軸上で変動すると予想できる。

図 5 (b)の黒丸は波長 777.369nm の酸素原子線であり、白丸は波長 844.617nm の酸素原子線、黒菱形は波長 746.860nm の窒素原子線であり、白菱形は波長 867.933nm の窒素原子線を示している。分子バンドと同様にノズル出口から膨張流領域で放射強度が低下している。また、衝撃波下流域でも徐々に強度が低下している。

図 6 は、波長領域 340nm から 500nm における 2.0mm と 5.0mm 位置のスペクトル分布を重ね合わせたものである。縦軸は相対強度であるが、 $N_2^+ 1-(5,4)$ のピーク強度で規格化してある。両者はスペクトル全体で定性的に一致しているが、波長領域 340nm から 350nm において $N_2^+ 1-(5,4)$ のピークから短波長側への強度減衰にかなり違いが見られる。2.0mm の位置における強度減衰の方がきつく、勾配

が急になっている．回転温度の推定はこの強度減衰に敏感である．急減衰ほど低い温度に対応し，また逆に緩やかなほど高い温度が推定される．よって図6より膨張流領域の回転温度は，衝撃波背後の温度より，かなり低温度であることが予想される．

4. 温度推定

分光測定によって低圧空気極小プラズマジェットの膨張流領域におけるスペクトル分布を取得した．スペクトル分布は化学種や内部エネルギー状態を示している．本研究では，理論スペクトルを数値計算によって構築し，実験スペクトルと比較することで温度推定するスペクトルマッチング法を用いて解析を行った．スペクトルマッチングは， $N_2^+ 2+$ バンドと $N_2^+ 1-$ バンドで可能であるが，本研究では，久保田らが行ったスペクトルマッチング¹⁾と比較検討するためにも，強度が十分に強い $N_2^+ 1-$ バンドを用いた．

本研究では $N_2^+ 1-$ ， $N_2^+ 2+$ ，CN Vの各バンドを考慮した理論スペクトルを計算するプログラム³⁾を使用した．このプログラムは，バンド毎に重粒子並進温度，分子振動温度，分子回転温度，および電子的励起温度を個別に設定することができ，広い波長範囲において，任意の装置関数や使用した分光系の感度を考慮した様々な空気成分が混在するスペクトルを理論的に構築することができる．

図7に分子バンドを対象とした波長範囲 280～420nm の実験スペクトルと理論スペクトルの比較を示す．実線は実験スペクトル，破線は理論スペクトルである．この波長領域は主に $N_2^+ 1-$ バンド， $N_2^+ 2+$ バンドなどが支配的である．また，波長範囲 380～390nm の間でCN Vが観測された．ここでは，放射強度の強い $N_2^+ 1-(5,4)$ バンドと $N_2^+ 1-(0,0)$ バンドを用いてスペクトルマッチング法による温度推定を行った．温度推定には $N_2^+ 2+$ ，CN Vバンドも考慮した．スペクトルマッチングの結果から，回転温度は $5,000 \pm 1,000\text{K}$ ，振動温度は $34,000 \pm 5,000\text{K}$ と推定された．久保田らの解析結果と同様に振動温度，回転温度はともに高温度となった．

図8にノズル出口から5.0mm位置におけるスペクトルマッチング結果を示す．図7と同様に実験と理論スペクトルはほぼ良好に一致している．温度推定の結果は回転温度が $8,000 \pm 1,000\text{K}$ ，振動温度が $34,000 \pm 5,000\text{K}$ と推定された．5.0mm位置と2.0mm位置では振動温度に大きな差異はみられなかった．しかし，回転温度は5.0mm位置よりも2.0mm位置で約3,000K低く，図6から推定した結果を支持している．

さらに，ボルツマンプロット法を用いて電子的励起温度の推定を行い，振動温度と比較した．ボルツマンプロット法には次式を用いた．

$$\ln \frac{I\lambda}{Ag} = -\frac{E}{kT_{ex}} + \text{Const.} \quad (1)$$

ここで， I は発光強度， λ は波長， A は放射遷移確率， g は統計的重率， E は上部準位エネルギー， k はボルツマン定数， T_{ex} は電子的励起温度である．式(1)か

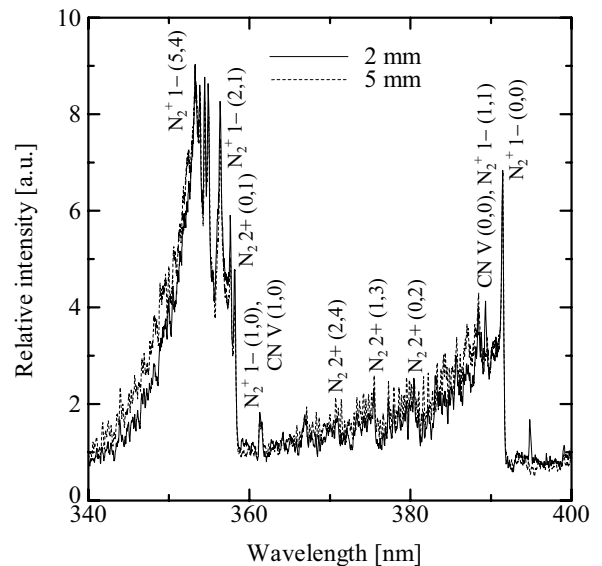


Fig. 6 Experimental spectra at 2.0 and 5.0mm from nozzle exit

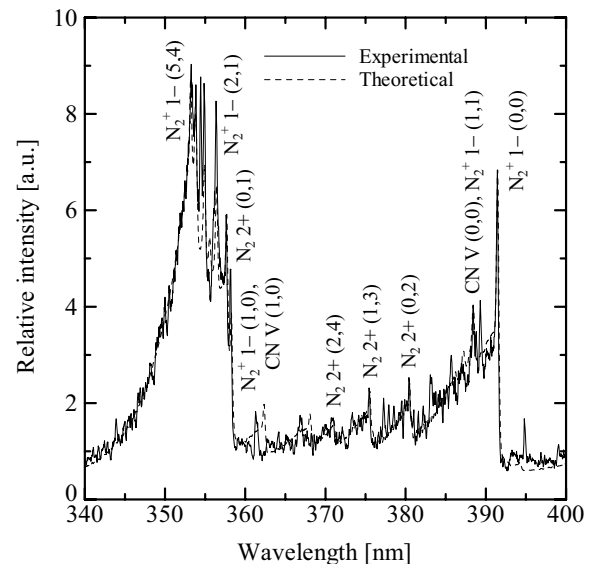


Fig. 7 Spectral matching for $N_2^+ 1-$ bands at 2.0mm from nozzle exit

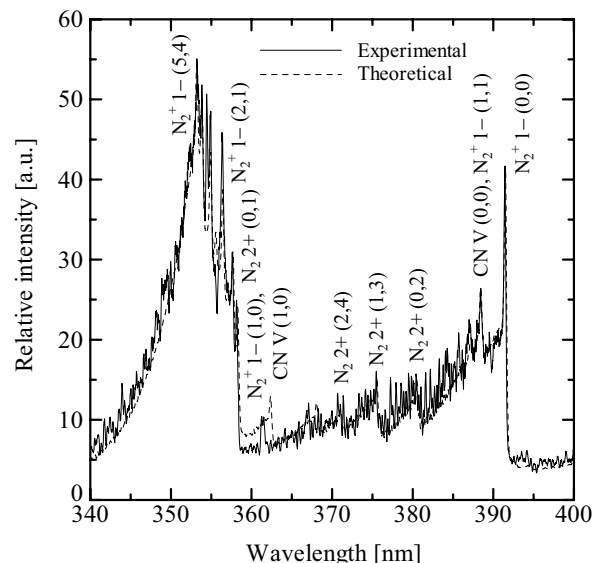


Fig. 8 Spectral matching for $N_2^+ 1-$ bands at 5.0mm from nozzle exit

ら、左辺対数項を上部準位エネルギー E に対してプロットすると、その傾きから T_{ex} を算出できる。図9に一例として圧力11.3kPa、ノズル出口から2.0mm位置で測定した酸素原子線と窒素原子線に対するボルツマンプロットの結果を示す。本研究では酸素、窒素原子線を用いて電子的励起温度を推定した。図9では酸素原子線から求めた T_{ex} は約9,300Kと推定された。山田らの研究⁴⁾によれば電子的励起温度は、酸素原子線から約10,000K、窒素原子線から12,000Kと推定されており、図8はこの結果に比較的一致している。また、窒素原子線を用いて推定された電子的励起温度は6,900Kと酸素原子線から推定された電子的励起温度よりも低い値に推定された。

図10にプラズマジェット中心軸上の温度推定結果を示す。横軸にはノズル出口からの距離、縦軸は温度を示す。黒菱形のプロット点は振動温度(T_v)、白菱形プロット点は回転温度(T_r)、円形は電子的励起温度(T_{ex})であり、黒は窒素原子線、白は酸素原子線を示している。振動温度と回転温度には代表的な4点にエラーバーを示した。破線は11.3 kPaにおけるAshkenas-Shermanの経験式⁵⁾と一次元断熱膨張流による計算から得られた気体温度分布である。Ashkenas-Shermanの経験式は、既に本研究室で使用しているアークプラズマジェットにも適用できることが確認されている¹⁾。温度推定の結果から回転温度と振動温度を比較すると振動温度の方が高い値を示しており、以前の研究と同様の結果となった。また、振動温度、回転温度はほぼ一定の値を示すことも報告されているが、本研究では振動温度、回転温度とも空間的に変動する傾向が得られた。振動温度は推定誤差が大きい、衝撃波位置とその下流側で特に高い温度を示している。回転温度は、ノズル出口直後から緩やかに低下するが、電子的励起温度はほとんど一定であり、膨張流領域の下流で非平衡性が強まる。しかし衝撃波位置でプラズマ流が圧縮されることにより、回転温度が約3,000K回復する。衝撃波背後では電子的励起温度と回転温度がほぼ平衡のように見える。振動温度の誤差は2.0mm、4.5mm位置で5,000Kから10,000K、また0.5mm、3.0mm位置では10,000Kから20,000Kであり、比較的溫度推定が困難である。一方、回転温度の誤差は500Kから1,000Kを示し、誤差による影響は少ないと考えられる。

5. プラズマジェット半径位置の放射測定

発光強度が小さくなり、非平衡性が強まると考えられる中心軸上から離れた半径位置において、中心軸上と同様の分光測定を行い、スペクトルマッチング法により温度推定した。測定点は中心軸上でノズル出口から2.0mm位置を半径方向に0.2mm間隔で計7点である。

図11にノズル出口から流れ方向に $z = 2.0$ mm、半径方向に $r = 0.4$ mm位置で測定した実験分光スペクトルの一例を示す。280~480nmの紫外領域では $N_2^+ 2+$ 、 $N_2^+ 1-$ バンドが支配的であり、700~900nmの近赤外領域では窒素と酸素の原子線が観測された。分子バ

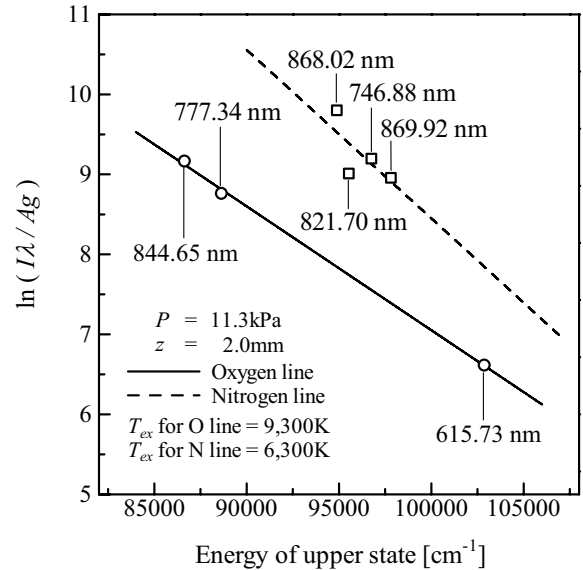


Fig. 9 Example of Boltzmann plot for O lines and N lines at 2.0mm from nozzle exit

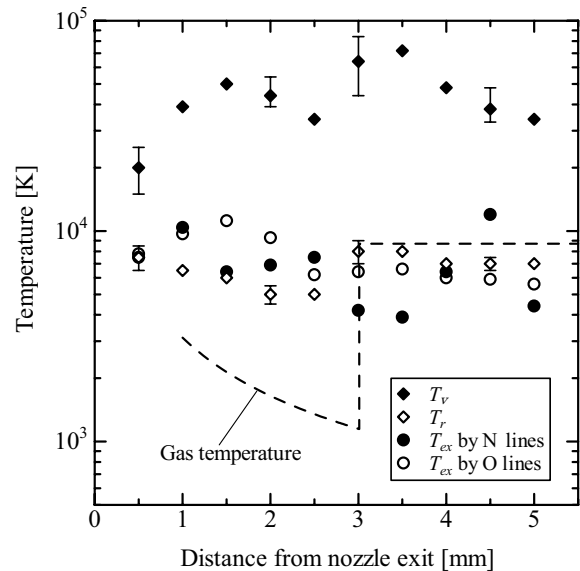


Fig. 10 Temperature distributions on flow axis at 11.3 kPa

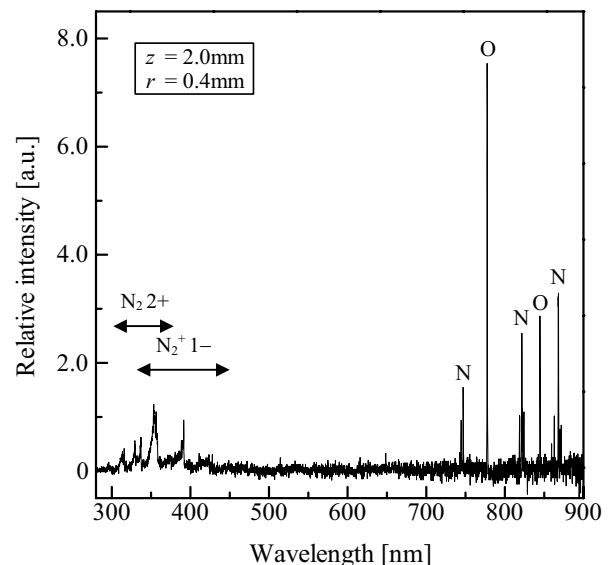


Fig. 11 Example of experimental spectra at 11.3 kPa

ンドは原子線に比べ、非常に弱くなっている。

図12は中心軸上ノズル出口から2.0mm、半径位置0.4mmにおけるスペクトルマッチングの一例である。横軸は波長、縦軸は相対強度を、実線は実験スペクトル、破線は理論スペクトルを示している。実験スペクトルと理論スペクトルはよく一致している。温度推定の結果、振動温度 T_v は 42,000K、回転温度 T_r は 6,000K と推定され、半径位置で振動温度は中心軸上と同様に高温となった。回転温度は中心軸上の温度とほぼ同じ値に推定された。

図13にノズル出口から2.0mm位置、半径位置に0.2mm間隔で測定したスペクトル分布から温度推定した結果を示す。黒菱形は振動温度、白菱形は回転温度を示している。振動温度は中心軸上と同様に高い温度に推定され、半径方向に0.4mmから0.6mm位置にかけて急激に温度が低下し、その後はほぼ一定の値であった。回転温度は約6,000Kに推定されほぼ一定の値となった。半径位置において、強度の低い中心軸から離れた位置よりも、中心軸に近い0.2mmから0.4mm位置において熱的非平衡状態が強いことがわかった。

6. 結論

低圧空気極小プラズマジェットの膨張流領域で中心軸上流れ方向に0.5mm間隔、中心軸上のノズル出口から2.0mm位置において半径方向に0.2mm間隔に分光測定を行い、放射特性を検討した。主な結果を以下に示す。

- (1) 中心軸上において、回転温度は気体温度分布より高い値を示したが、膨張流領域では緩やかに低下することがわかった。その温度は、衝撃波位置で回復、衝撃波下流側においてはほぼ一定で、電子的励起温度と平衡になった。
- (2) 中心軸上において、振動温度は回転温度よりずっと高い値を示し、測定位置によってかなり大きく変動した。
- (3) 中心軸上で酸素原子線から推定した電子的励起温度は振動温度に比べ低い値を示しているが、軸方向に少し変動した。
- (4) 半径位置の放射強度分布は波長範囲280～900nmで中心軸上と同様に酸素と窒素の原子線が強く測定された。
- (5) スペクトルマッチング法による温度推定から中心軸上のノズル出口から2.0mm位置の半径方向位置で振動温度、回転温度はともに高温に推定された。
- (6) 中心軸上2.0mm位置の半径方向に0.4mmから0.6mm位置で振動温度は急激に低下した。回転温度は半径位置で一定の値を示した。

参考文献

- 1) 久保田聖, 船津賢人, 白井紘行, 高草木文雄, 「 N_2^+ 1-バンドを用いた空気マイクロプラズマジェットの温度計測」, 日本機械学会論文集, 72巻, 715号, B編, (2005), pp. 628-633.

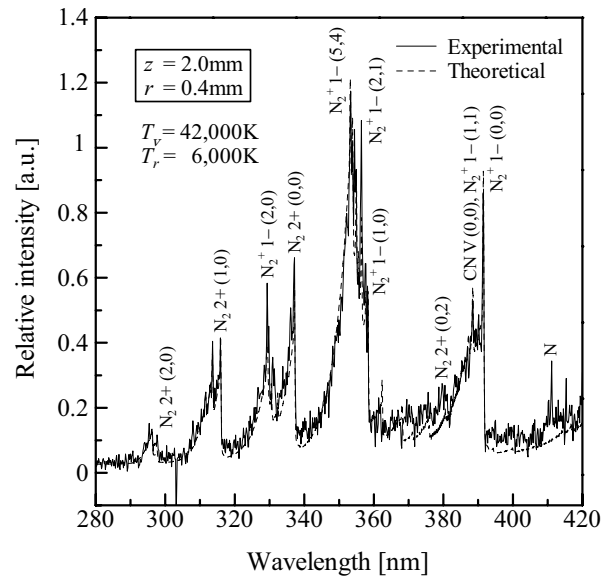


Fig. 12 Comparison of experimental and theoretical spectra

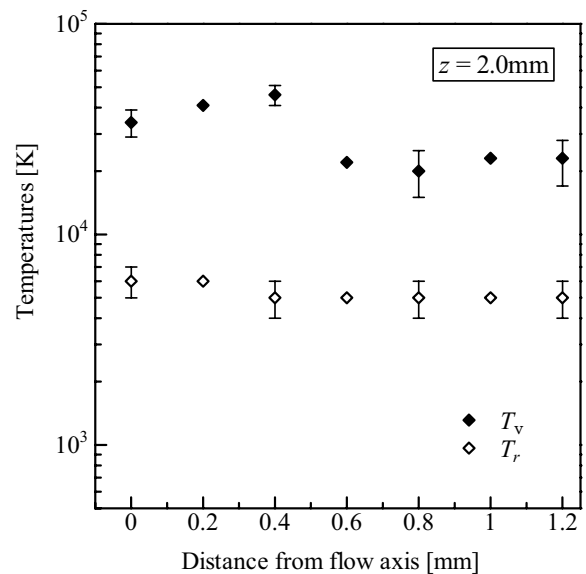


Fig. 13 Radial temperature distributions at 11.3kPa

2) 久保田聖, 後藤輝一, 船津賢人, 白井紘行, 高草木文雄, 「CCD カメラを用いた低圧極小空気プラズマジェットの放射測定— N_2^+ および N_2 バンドのスペクトル強度分布—」, 平成17年度衝撃波シンポジウム講演論文集, (2006), pp. 255-256.

3) 澁澤健二, 船津賢人, 白井紘行, 久保田聖, 「高温プラズマにおける N_2 2+バンドの放射特性 (前期解離と非ボルツマン回転粒子数分布を用いた解析)」, 日本機械学会論文集, 71巻, 704号, B編, (2005), pp. 1107-1112.

4) 山田尚寛, 久保田聖, 船津賢人, 白井紘行, 「CCD を用いた空気マイクロプラズマジェットの放射測定」, 第36回流体力学講演会講演集, (2004), pp. 1-4.

5) Ashkenas, H. and Sherman, F. S., "The Structure and Utilization of Supersonic Free Jets in Low Density Wind Tunnels," Proc. 4th Int'l Sympo. Rarefied Gas Dynamics, Vol. 2, (1965), Academic Press, pp. 84-105.