

# ジルコニウム陰極を用いたアーク風洞による原子状酸素気流の生成<sup>\*1</sup> Generation of Atomic Oxygen Flow by a Zirconium Cathode Arc-Heater

松井 信<sup>\*2, \*3</sup>・池本 智之<sup>\*4, \*5</sup>・高柳 大樹<sup>\*3</sup>・小紫 公也<sup>\*4</sup>・荒川 義博<sup>\*3</sup>  
Makoto MATSUI, Tomoyuki IKEMOTO, Hiroki TAKAYANAGI, Kimiya KOMURASAKI and Yoshihiro ARAKAWA

**Key Words:** Atomic Oxygen, Arc-Heater, High Enthalpy Flow, Laser Absorption Spectroscopy

**Abstract:** An arc-heater using a zirconium cathode was developed as an atomic-oxygen generator. With pre-mixed argon-oxygen injection, stable discharge was maintained for more than three hours, and the cathode erosion rate was as low as  $1.7 \times 10^{-5}$  g/s. The plume temperature and velocity distributions were measured and chemical composition and total specific enthalpy was evaluated by laser absorption spectroscopy. As a result, in the center area of the plume, the degree of dissociation in oxygen was found almost 100% with the total specific enthalpy of  $4.5 \pm 0.1$  MJ/kg.

## 1. はじめに

スペースシャトル等の宇宙往還機や再突入カプセルは地球再突入時に過酷な空力環境に曝されるため、熱防護システム(Thermal Protection System)が必要不可欠である。近年、TPSの開発には表面触媒性による酸素原子の再結合輻射や酸化損耗が大きな研究課題となっており、酸素原子数密度が重要なパラメータであることが認識され始めてきた<sup>1,2)</sup>。このような高エンタルピー原子状酸素気流を生成する装置としてアーク風洞がよく使われている<sup>3,4)</sup>。

また、国際宇宙ステーションや衛星等、低軌道で長期滞在する宇宙構造物は主成分である原子状酸素と高速で衝突するため表面劣化が問題となってきた<sup>5,6)</sup>。低軌道での酸素原子数密度は  $10^{13} \text{ m}^{-3}$  (高度 500 km) 程度であるが、1年間のフル・エンスは  $10^{24} \text{ m}^{-2}$  に達する<sup>7)</sup>。それゆえ流速密度の高い原子状酸素流を生成することのできるアーク風洞は短時間で長期滞在環境を模擬可能な装置の一つとして有望な候補であると考えられる<sup>8)</sup>。

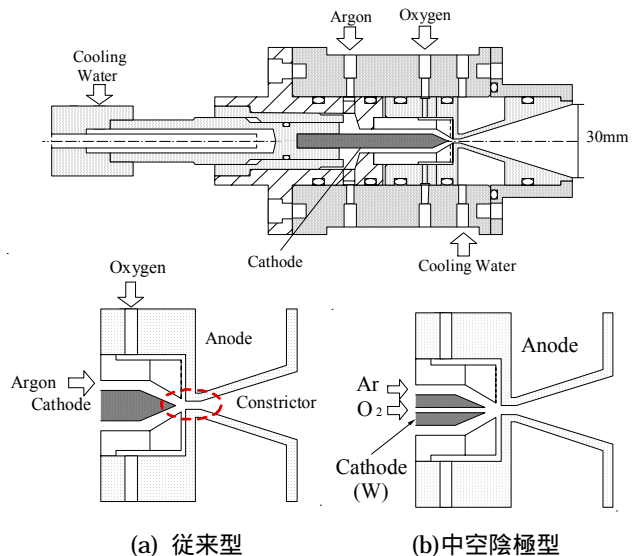
アーク風洞は電極形状によりいくつか種類が存在するが、本研究室ではこれまで作動時間が長く、保守が容易であるコンストリクタ型アーク風洞を開発し、気流の諸特性を診断してきた<sup>9)</sup>。その結果、コンストリクタ型アーク風洞では気流中の酸素解離度が非常に低いことがわかった<sup>10,11)</sup>。

これは第1図(a)に示すようにコンストリクタ型アーク風洞では陰極の酸化を防ぐため放電部後流から酸素を主流の不活性ガスとは別に供給するため、コンストリクタ部で高温の主流と十分混合していないためだと考えられる。

そこで我々は酸素解離度を向上させるため、中空陰極を用いて陰極先端から酸素供給をおこなう中空陰極型アーク風洞を開発してきた(第1図(b))。その結果、酸素解離度は大きく向上したものの放電が不安定であり、陰極損耗が激

しく ( $1.5 \times 10^{-3} \text{ g/s}$ )、20分程度しか放電を維持できないといった問題があった<sup>12)</sup>。

本研究では陰極材としてジルコニウムを用いることで損耗を抑制し、酸素を上流から主流の不活性ガスと混合して供給する予混合型アーク風洞を開発し作動試験を行った。また、レーザー吸収分光法(LAS)により気流中の並進温度分布、流速分布を測定し、酸素解離度、比エンタルピー分布を求めたのでその結果を報告する。



第1図 コンストリクタ型アーク風洞概略図(上図)、及び従来型、中空陰極型コンストリクタ部拡大図(下図)

## 2. レーザー吸収分光法

**2.1 測定原理** 本研究では、吸収率が大きく広範囲の分布を測定可能な主流ガスであるアルゴン原子の吸収波長  $\lambda_0=842.46\text{nm}$  を用いて並進温度分布を測定した<sup>13)</sup>。

Beer-Lambertの式より吸収係数 $k(\nu)$ はプローブレーザー強度 $I_0$ 及び透過強度 $I$ と次のような式で関係付けられる。

<sup>\*1</sup>©2006 日本航空宇宙学会  
平成 17 年 9 月 15 日, 第 37 回流体力学講演会にて一部発表。  
平成 18 年 4 月 19 日原稿受理

<sup>\*2</sup>日本学術振興会特別研究員PD

<sup>\*3</sup>東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻

<sup>\*4</sup>東京大学大学院新領域創成科学研究科先端エネルギー工学専攻

<sup>\*5</sup>現 特許庁

$$\int k(\nu) dx = -\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad (1)$$

ここで、 $\nu$ はレーザー光の振動数、 $x$ は光路方向の座標を表す。

本実験条件下では $k(\nu)$ の拡がりはドップラー拡がり数がGHz程度と他の自然拡がり、衝突拡がり、シュタルク拡がり等に比べ2桁以上大きい。よって $k(\nu)$ は以下のガウス分布で表せる<sup>14)</sup>。

$$k(\nu) = \frac{2K(r)}{\Delta\nu_D} \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \exp\left[-\ln 2 \left\{ \frac{2(\nu - \nu_0 - \nu_{\text{shift}})}{\Delta\nu_D} \right\}^2\right] \quad (2)$$

ここで $\nu_0$ 、 $K$ は吸収中心振動数、積分吸収係数である。

$\Delta\nu_D$ は吸収係数分布の半値全幅であり以下の式で並進温度 $T$ と関係付けられる<sup>15)</sup>。

$$\Delta\nu_D = 2\nu_0 \sqrt{\frac{2k_B T}{mc^2} \ln 2} \quad (3)$$

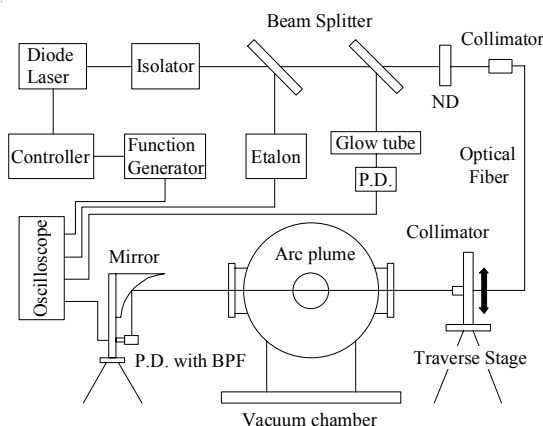
ここで $m$ 、 $c$ 、 $k_B$ はそれぞれ吸収粒子の質量、光速、ボルツマン定数である。

$\Delta\nu_{\text{shift}}$ はドップラーシフトによる吸収中心周波数のシフトを示し、以下の式で流速 $u$ と関係付けられる<sup>15)</sup>。

$$\Delta\nu_{\text{shift}} = \frac{u}{\lambda_0} \sin\theta \quad (4)$$

ここで $\theta$ は半径方向 $r$ に対するプローブ光の角度である。

**2.2 測定装置** 第2図に測定系概略図を示す。本システムでは波長可変レーザー発振器として、線幅500 Hz以下の外部共振器付半導体レーザー(DMD845, EOSI社製)を用いた。レーザー振動数は吸収係数分布を得るため、変調周期1 Hz、変調幅30 GHzで掃引した。レーザー飽和強度で規格化したプローブレーザー強度はNDフィルターにより0.02以下に弱めており、吸収飽和の影響は無視できる<sup>16)</sup>。図中のアイソレータは反射光が外部共振器に戻るのを防ぐために、エタロン(分解能0.75 GHz, ネオアーク社製)は相対波長計として用いた。また、流速0の基準としてグロー放電管(1.5 W, Ar: 79 Pa, シアイテック社製)における吸収ラインを用いて絶対波長較正を行った。



第2図 測定系概略図

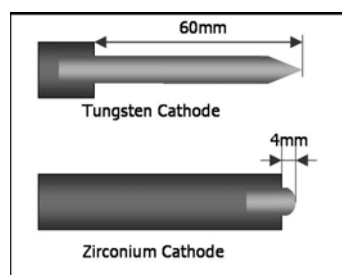
プローブ光は光ファイバにより真空チャンバ窓まで導か

れ、コリメートレンズを経て真空チャンバ内に導入される。このレンズは1次元移動台に固定されており、ノズル出口10 mm ( $r=0$  mm) で入射角 $\theta=15^\circ$ を維持したまま半径方向に走査することができる。プローブ光は測定部で直径1 mm程度の平行光にされており、非軸放物型ミラーにより光検出器表面に集光される。光検出器にはプラズマからの発光を除去するため半値全幅10 nmのバンドパスフィルタが付いており、デジタルオシロスコープ(DL1540, YOKOGAWA社製)により分解能16 bit、サンプリング周波数1 kHzで記録した。

### 3. 予混合型アーク風洞

コンストリクタ型アーク風洞の陰極材には一般に融点が高く(3300 K)、仕事関数が低い3%のトリリウム入りタングステンが用いられる<sup>17)</sup>。しかしながら酸化タングステンの融点は1400 Kと低いため、酸素雰囲気下での放電は損耗が激しく上流から酸素を主流と予混合して作動させることは難しい。そこで本研究では陰極材としてアーク溶接分野で用いられているジルコニウムを使用する<sup>18)</sup>。ジルコニウムの融点は2000 Kとタングステンより低いが、酸化ジルコニウムの融点は3000 Kと酸化タングステンより高く、また高温では導電体となるため酸素雰囲気下でも放電維持が可能である<sup>19)</sup>。ただし、ジルコニウム単体でアーク放電を行うとその融点の低さにより、陰極表面が酸化される前に融解する可能性が高い。それゆえ本研究では予め平均比エンタルピー3.6 MJ/kgのコンストリクタ型アーク風洞を用いてジルコニウムを30分加熱し、酸素雰囲気下で冷却することで表面に酸化被膜を形成し、陰極として用いた。

第3図にこれまで用いてきたタングステン陰極及び本研究で用いたジルコニウム陰極の概略図を示す。ジルコニウムはタングステンに比べ融点、熱伝導率が低いため、陰極長さを60 mmから4 mmへ短縮し、また先端形状を円錐から平坦に変更した。陰極以外の形状は従来のコンストリクタ型アーク風洞(第1図)と同じである。本研究で行ったアーク風洞作動条件を第1表に示す。



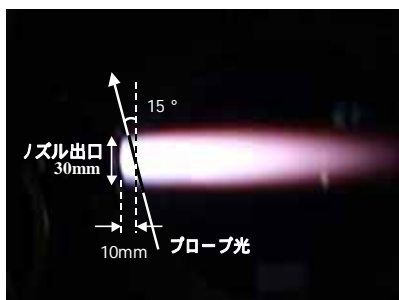
第3図 タングステン陰極とジルコニウム陰極形状の比較

第1表 アーク風洞作動条件

パラメータ	値
作動電流	40 A
作動電圧	27 V
アルゴン流量	119 mg/s
酸素流量	11.9 mg/s
チャンバ背圧	17.2 Pa
プレナム室圧	22.4 kPa

#### 4. 実験結果

**4.1 作動特性及び陰極損耗** 第4図に作動中の気流写真及び測定面を示す．ジルコニウム陰極を用いたアルゴンと酸素の予混合ガスでの作動試験の結果，3時間以上放電させても放電安定性に全く問題はなかった．中空陰極型アーク風洞での作動限界は約20分であるので大幅に作動時間を改善することができたといえる．



第4図 アーク風洞気流写真及び測定領域

第5図に作動前及び3時間連続作動後の陰極写真を示す．陰極の先端損耗は1mm以下と非常に少なく，重量変化から求めた損耗率は  $1.7 \times 10^{-5}$  g/s となり，中空陰極型アーク風洞の損耗率 ( $1.5 \times 10^{-3}$  g/s) に比べ2桁程度減少した<sup>12)</sup>．

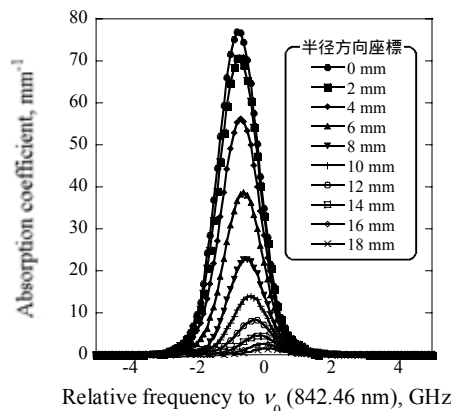


第5図 使用前及び3時間作動後の陰極写真

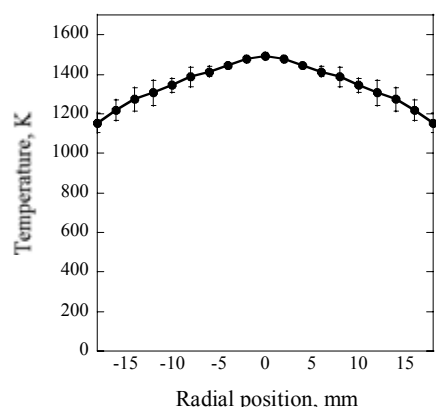
**4.2 LAS測定結果** アーク風洞気流は軸対称であるため，アーベル変換により各測定位置での吸収プロファイル分布を求めた．ただし，本研究ではレーザーが入射角 $\theta$ を持つので短軸  $R$ ，長軸  $R/\cos\theta$ の楕円を仮定した．ここで  $R$  は気流の外線半径である．

第6図にアーベル変換後の各測定位置での吸収プロファイルを示す．図が示すように中心軸側ほど吸収プロファイル，吸収中心のシフト共に大きいことがわかる．得られた吸収プロファイルに対しガウス分布をフィッティングさせることで並進温度及び流速を求めた．

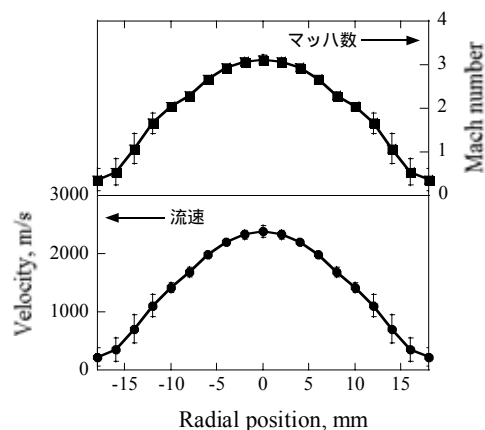
第7図に並進温度分布，第8図に流速分布及びマッハ数分布を示す．ここでマッハ数は音速  $a$  を  $a = \sqrt{\gamma RT}$  として，並進温度は測定から，比熱比及び気体定数は次節で述べる計算値を用いた．図が示すように並進温度分布は中心軸上に1500 Kのピークを持ち気流端で1150 K程度である．流速分布は中心軸上で2300 m/sのピークを持ち，マッハ数3に相当する．気流端では流速は遅く亜音速であるが，中心に比べ半径方向の速度成分が無視できず，ややマッハ数が過小評価されていると考えられる．



第6図 アーベル変換後の吸収プロファイル



第7図 気流中の並進温度の半径方向分布



第8図 気流中の流速及びマッハ数の半径方向分布

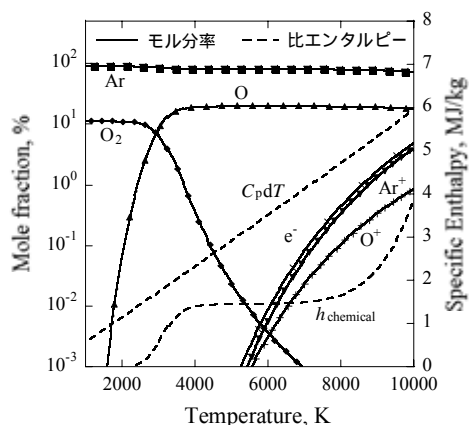
#### 5. 考 察

以下の手法により計測で得られた並進温度から酸素解離度及び比エンタルピーを推定する．ノズルによる膨張は等エントロピー変化，及び化学組成は変化しない凍結流れと仮定すると全比エンタルピー  $h_0$  は以下の式で表される．

$$h_0 = \int_0^{T_0} C_p dT + h_{\text{chemical}} = \int_0^{T_{\text{exit}}} C_p dT + h_{\text{chemical}} + \frac{1}{2} u^2 \quad (5)$$

ここで  $T_0, T_{\text{exit}}$  はそれぞれ全温（プレナム室での温度）及びノ

ズル出口での静温,  $C_p$ は定圧比熱である.  $h_{\text{chemical}}$ は化学ポテンシャルであり, 凍結仮定下では不変である. プレナム室における化学組成は圧力が 22.4 kPaと高いため, 熱化学平衡が成立しているものと仮定し計算した. ここで6種の化学種Ar,  $O_2$ ,  $O$ ,  $Ar^+$ ,  $O^+$ ,  $e^-$ 及び3つの化学反応 $Ar \leftrightarrow Ar^+ + e^-$ ,  $O_2 \leftrightarrow 2O$ ,  $O \leftrightarrow O^+ + e^-$ を考慮した. 平衡定数は文献(20, 21)の値を用いた. 定圧比熱は各化学種の定圧比熱にモル分率を考慮して求めた. 第9図にプレナム圧下で計算したモル分率, 比エンタルピー及び化学ポテンシャルの $T_0$ 依存性を示す.



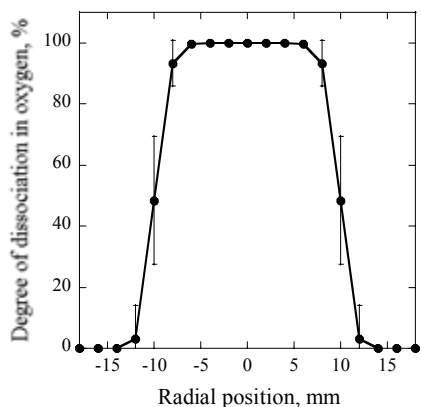
第9図 熱化学平衡下における比エンタルピー及び化学組成の計算結果,  $p=22.4\text{kPa}$ , 体積混合比  $Ar:O_2=8:1$

計測により得られた  $T_{\text{exit}}$ ,  $u$ より式(5)を満たす  $T_0$ が得られ, モル分率及び各比エンタルピーが求まる.

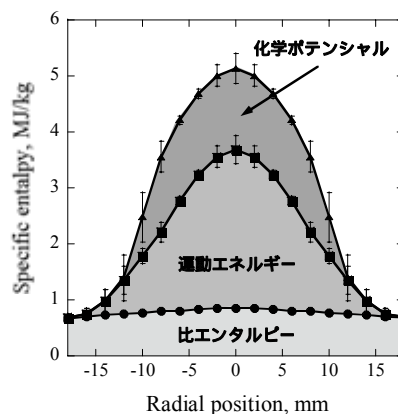
第10図にモル分率から求めた酸素解離度分布を示す. 中心軸付近での酸素解離度は非常に高く, 中心から半径  $r < 6\text{mm}$ の領域ではほぼ完全に解離していることがわかる.

第11図に全比エンタルピー分布及びその内訳を示す. 全比エンタルピーは中心軸上が最大であり 5.1 MJ/kgに達している. 酸素が完全に解離している領域( $r < 6\text{mm}$ )を TPS試験領域とすると, 平均全比エンタルピーは  $4.5 \pm 0.1\text{MJ/kg}$ であり, そのうち 32%を化学ポテンシャルが占めることがわかった.

これよりジルコニウム陰極を用いた予混合型アーク風洞は従来に比べ酸素解離度が大幅に向上しており, 原子状酸素源として有用な候補であると考えられる.



第10図 酸素解離度の半径方向分布



第11図 全比エンタルピーの半径方向分布

## 6. ま と め

ジルコニウムを陰極材として用い, 酸素をアルゴンと予混合して供給するアーク風洞を開発し, その作動特性, 性能評価を行った. その結果, 3時間以上の安定な作動が達成され, 陰極の損耗を  $1.7 \times 10^{-5}\text{g/s}$ と低く抑えることができた. レーザー吸収分光法及び数値計算により気流診断を行った結果, 中心から半径 6 mmの領域で酸素はほぼ完全解離しており平均全比エンタルピーは  $4.5 \pm 0.1\text{MJ/kg}$ となることがわかった.

本研究の一部は科学研究費補助金(基盤研究(B)(2)14350507)及び日本学術振興会特別研究員奨励費(16・10857)の補助を受けて行われており, ここに謝意を表す.

## 参 考 文 献

- Goulard, R.: On Catalytic Recombination Rates in Hypersonic Stagnation Heat Transfer, *Jet Propulsion*, **28** (1958), pp.737-745.
- Balat, M., Flamant, G., Male, G. and Pichelin, G.: Active to Passive Transition in the Oxidation of Silicon Carbide at High Temperature and Low Pressure in Molecular and Atomic Oxygen, *J. Mater. Sci.*, **27** (1996), pp.697-703.
- Birkan, M. A.: Arcjets and Arc Heaters - An Overview of Research Status and Needs, *J. Propulsion Power*, **12** (1996), pp. 1011-1017.
- Auweter-Kurtz, M., Kurtz, H. L. and Laure, S.: Plasma Generators for Reentry Simulation, *J. Propulsion Power*, **12** (1996), pp.1053-1061.
- Zimcik, D. G. and Maag, C. R.: Results of Apparent Atomic Oxygen Reactions with Spacecraft Materials During Shuttle Flight STS-41G, *J. Spacecraft*, **25** (1988), pp.162-168.
- Reddy, M. R.: Effect of Low Earth Orbit Atomic Oxygen on Spacecraft Materials, *J. Mater. Sci.*, **30** (1995), pp.281-307.
- Nishida, M. and Watanabe, Y.: Preliminary Experiments of Atomic Oxygen Generator for Space Environmental Testing, *Trans. Jpn. Soc. Aeronaut. Space Sci.*, **41** (1998), pp.123-133.
- 西田迪雄, 渡辺泰夫: 宇宙環境試験用酸素原子の生成に関する基礎実験, *日本航空宇宙学会誌*, **36** (1988), pp.480-486.
- Matsui, M., Komurasaki, K. and Arakawa, Y.: Laser Absorption Spectroscopy in High Enthalpy Flows, 37th AIAA Thermophysics Conference, AIAA Paper 05-5325, 2005.
- 松井 信, 是洞博紀, 小紫公也, 水野雅仁, 葛山 浩, 荒川義博: アーク風洞ブルーム中の原子状酸素密度分布, *日本航空宇宙学会論文集*, **50** (2002), pp.67-74.
- Matsui, M., Takayanagi, H., Oda, Y., Komurasaki, K. and Arakawa, Y.: Performance of Arcjet-Type Atomic-oxygen Generator by Laser Absorption Spectroscopy and CFD Analysis, *Vacuum*, **73** (2004), pp.341-346.

- 12) Matsui, M., Ikemoto, T., Takayanagi, H., Komurasaki, K. and Arakawa, Y.: Generation of Atomic Oxygen Flows by an Arcjet Using a Zirconium Hollow Cathode, *Adv. Appl. Plasma Sci.*, **5** (2005), pp.55-60.
- 13) NIST Atomic Spectra Database:  
[http://physics.nist.gov/cgi-bin/AtData/main\\_asd](http://physics.nist.gov/cgi-bin/AtData/main_asd)
- 14) Yariv, A.: *Quantum Electronics*, 2nd ed. Wiley, New York, 1989.
- 15) Demtroder, W.: *Laser Spectroscopy*, 2nd ed., Springer Verlag, Berlin, 1996.
- 16) Matsui, M., Komurasaki, K. and Arakawa, Y.: Saturation Absorption in Laser Absorption Spectroscopy, AIAA Paper 04-2597, 2004.
- 17) Separd, C. E., Watson, V. R. and Stine, H. A.: Evaluation of a Constricted-Arc Supersonic Jet, NASA TN D-2066, 1963.
- 18) Marotta, A.: Zirconium Cathode Erosion Rate in a Vortex-Stabilized Air Plasma Torch, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **27** (1994), pp.49-53.
- 19) Nemchinsky, V. A. and Showalter, M. S.: Cathode Erosion in High-Current High-Pressure Arc, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **36** (2003), pp.704-712.
- 20) Matsuzaki, R.: Quasi- One-Dimensional Aerodynamics with Chemical, Vibrational and Thermal Nonequilibrium, *Trans. Jpn. Soc. Aeronaut. Space Sci.*, **30** (1988), pp.243-258.
- 21) Guputa, R. N., Yos, J. M., Thompson, R. A. and Lee, K. P. : A Review of Reaction Rates and Thermodynamic and Transport Properties for an 11-Species Air Model for Chemical and Thermal Nonequilibrium Calculations to 30000K, NASA R.P 1232, 1990.