

レーザー駆動プラズマ風洞による高密度酸素原子流の生成

東京大学大学院工学系研究科

東京大学大学院工学系研究科

東京大学大学院新領域新領域創成科学研究科

東京大学大学院工学系研究科

新見耕二

松井 信

小紫公也

荒川義博

Generation of High Density Atomic Oxygen Flows by Laser Driven Plasma Wind Tunnel

Koji SHINMI, Makoto MATSUI, Kimiya KOMURASAKI* and Yoshihiro ARAKAWA

Department of Aeronautics and Astronautics, The University of Tokyo

*Department of Advanced Energy, The University of Tokyo

Abstract

High density atomic oxygen flows were generated by a laser driven plasma wind tunnel using a 2 kW class continuous wave laser. Using argon and oxygen as working gases, laser sustained plasma (LSP) was successfully produced in the plenum pressure range from 0.20 MPa to 0.95 MPa, and then the LSP was expanded to the vacuum chamber through the convergent-divergent nozzle. Plume characteristics were evaluated by laser absorption spectroscopy using an absorption line of ArI 772.38 nm. As a result, the specific enthalpy has almost flat distributions around 3.7 MJ/kg – 4.8 MJ/kg in the radial region less than 3 mm, where oxygen was found fully dissociated. The maximum flux density of atomic oxygen was estimated to be $2.2 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$.

Keywords: Laser sustained plasma, Atomic oxygen, High enthalpy flow, Laser diagnostics.

1. はじめに

宇宙往還機や惑星探査機の熱防護システム (Thermal Protection System) の開発には、地上設備により再突入環境を模擬する必要がある。このような高エンタルピー気流を生成するため構造が簡易で作動時間が長いアーク風洞が広く使われている¹⁾。しかしながら近年、TPS材の表面触媒性効果や酸化損耗反応など酸素原子が重要な役割を果たしているとして認識されつつあるが、電極溶融による気流の汚染が正確な化学反応定数評価を妨げるものとして深刻な問題となってきた。

それゆえヨーロッパを中心として誘導加熱風洞が注目を浴びてきている²⁾。誘導加熱風洞はコイルにより間接的にガスを加熱するため、

不純物が非常に少なく TPS 試験には理想的な酸素原子気流を生成することができる。我が国でも ISTA/JAXA が 110kW 級プラズマトロンを開発・試験中である³⁾。

一方で誘導加熱風洞は全圧の高圧化が難しく、プラズマ不安定性により大気圧以上での安定作動が困難であることが報告されている⁴⁾。

そこで本研究室ではレーザーにより間接的にプラズマを生成しガスを加熱するレーザー駆動プラズマ風洞の開発を進めている。本方式によるプラズマ生成は非接触加熱であるのみならず高圧化での安定作動という特長を兼ね備える。

本研究では作動ガスとしてアルゴン・酸素を用いて原子状酸素気流を生成し、作動特性、気

流特性を評価したのでその結果を報告する。

2. レーザー駆動風洞

2.1 作動原理

本風洞の概略図を Fig. 1 に示す。外部から供給されるレーザー光は集光レンズによりスロート部に集光されており、着火には金属棒などのアブレーションを利用する。一旦プラズマが生成されると、プラズマは主にそこに含まれる電子の逆制動放射過程によりレーザー光を吸収し始める。この結果、電離反応が進み雪崩的に電子密度を増し、プラズマは Laser Supported Combustion 波と呼ばれる熱伝導によりレーザー光上流方向に伝播していく。やがてプラズマ自身の吸収するレーザーエネルギーとそこから周囲の低温ガスへと散逸するエネルギーとの収支の釣り合う流速の位置で維持される。このプラズマを Laser Sustained Plasma と呼ぶ。

LSP を介したエネルギーの変換過程は、レーザー光の吸収過程とガス加熱過程に大別される。前者はレーザー光を LSP が吸収する過程であり、レーザーの透過が損失となる。ガス加熱過程は伝熱や拡散、対流などにより LSP からガスへエネルギーが伝達される過程であり、LSP からの輻射及びスロート、ノズル部での熱伝導が損失となる。この LSP を熱源として加熱されたガスをノズルにより膨張・加速することで高エンタルピー気流を生成することができる。

2.2 LSP 生成装置

LSP 生成装置を Fig. 2 に示す。LSP 生成装置

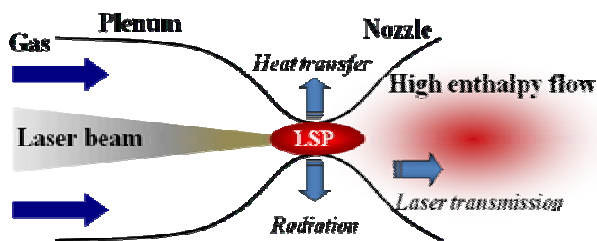


Fig. 1 Conceptual figure of LSP generator.

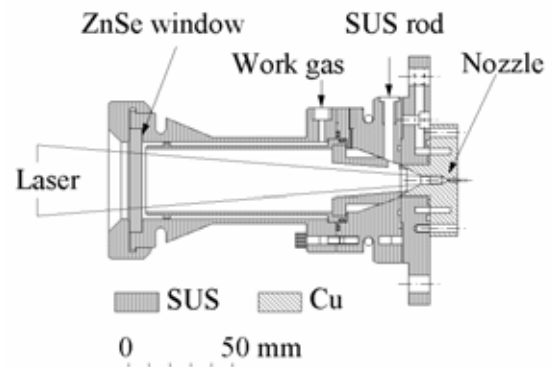


Fig. 2 Schematic of LSP generator.

はレーザー光導入窓、プラズマ維持部、スロート、ノズルから成る。スロート径は 1 mm でノズル出口径は 20 mm である。レーザー光は Zn-Se 製のレンズによりレーザー導入窓を通じて SUS 製ロッド表面に集光され LSP を生成させる。LSP 生成後、集光レンズを軸方向に移動させることで気流を引き出す。レーザー発振には最大出力 2 kW の炭酸ガスレーザー（ビームモード：TEM₁₀、発振波長：10.6 μm）を用いた。集光レンズの焦点距離は 250 mm、ビーム径は 34 mm であり、本光学系における F 値（焦点距離をビーム径で除した値）は 7.4 である。

LSP 生成装置は直径 0.5 m 長さ 1 m の真空チャンバに接続されており、油回転ポンプ（排気速度：40 m³/h）とメカニカルブースターポンプ（排気速度：500 m³/h）を並列で 2 系統同時に使用することにより排気されノズル出口背圧はアルゴン流量 65 slm (1.93 g/s)において 122 Pa 程度に保つことができる。

3. レーザー吸収分光法

3.1 測定原理

本研究では半導体レーザー吸収分光法を用いて並進温度、流速の空間分布を測定した²⁾。吸収ラインはアルゴン原子の準安定準位からの吸収ライン ArI 772.38 nm を用いた。

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。

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

ここで、 ν はレーザー光の振動数、 x は光路方向の座標を表す。実験で得られる吸収係数は線積分値であるためアーベル変換を用いて局所吸収係数を求めた。また本実験条件下では吸収プロファイルの広がりにはドップラー広がり、衝突広がり、シュタルク広がり等に比べ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。

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

ここで ν_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。

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

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。

ν_{shift} はドップラーシフトによる吸収中心振動数のシフトを示し以下の式で流速 u と関係付けられる。

$$\nu_{\text{shift}} = \frac{u}{c} \nu_0 \cdot \sin\theta \quad (4)$$

ここで θ は半径方向 r に対するプローブ光の入射角度である。

3.2 測定装置

測定系概略図を Fig. 3 に示す。本システムでは波長可変レーザー発振器として外部共振器付半導体レーザーを用いた。レーザー振動数は吸収プロファイルを得るため、変調周期 1 Hz、変調幅 30 GHz で掃引した。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

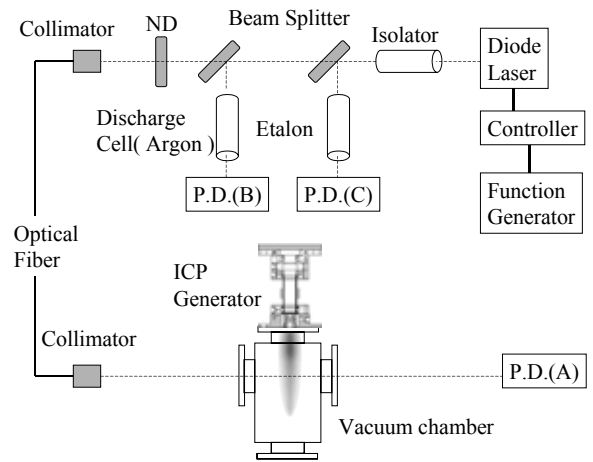


Fig. 3 LAS measurement system.

に、エタロン（分解能 0.75 GHz）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）における吸収ラインを用いて絶対波長較正を行った。

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。導入後、プローブ光はノズル出口中心から軸上 10 mm を通過し、真空チャンバ反対側窓を透過した後、光検出器によって検知する。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により分解能 16 bit、サンプリング周波数 10 kHz で記録した。空間分解能は 1 mm であり半径方向 1 mm 間隔で測定した。

4. 実験結果及び考察

4.1 作動条件

作動条件を Table 1 に示す。作動試験はまずロッド位置で LSP を生成後、レンズの焦点を下流に移動させることで LSP をスロート付近で維持し、気流が最大かつ安定となるように焦点位置を最適化した。ただし、過去の研究から高圧下になるほど LSP 生成位置は焦点上流に移動することがわかっているが、アルゴン流量 40 slm 以上では焦点距離および生成装置窓とスロートの距離の関係により焦点位置を最適化

Table 1 The operation conditions.

Properties	Value
Laser power, W	800
Argon, slm	5 – 65
Oxygen, slm	0.1
Plenum pressure, MPa	0.20 – 0.95
Ambient pressure, Pa	25 – 122

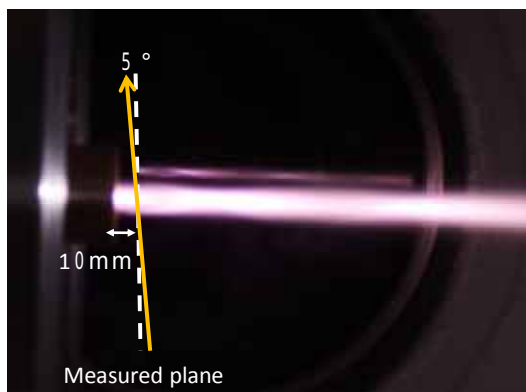


Fig. 4 Plume photo and measured plane.

できず、レンズを生成装置窓直前に設置して実験をおこなった。

作動試験の結果、最大で 0.95 MPa での総圧下での作動が確認された。Fig. 4 に典型的な作動試験の様子および測定位置を示す。

4.2 気流診断

Fig. 5 に典型的なレーザー透過信号、エタロン信号を示す。図が示すようにレーザー透過信号は約 270Hz で 20% 程度振動していることがわかる。本実験で用いた炭酸ガスレーザーは強度が 50Hz で 2% 程度変動しており、その結果 LSP 生成位置・発光強度が振動することが過去の研究で明らかになっている⁵⁾。吸収信号の振動はこのレーザー強度変動に起因していると考えられる。

本研究では各振動における最大吸収率を抽出・包絡することで最大吸収プロファイルを求めた。Fig. 6 に最大吸収プロファイル及びそれに対するガウスフィットを示す。これより並進

温度、流速を求めた。

Fig. 7 にアルゴン流量が 10、30、50 slm の各条件に対する並進温度の空間分布を示す。図が示すように流量が上がるにつれやや温度が上昇する傾向があるが、半径方向の空間分布特性は概ね一致することがわかった。空間分布特性としては、気流中心部では 280 K – 350 K 程度で一定であり、5 mm 付近から次第に温度が減少していくことがわかる。

Fig. 8 に流速の空間分布を示す。流速についてもアルゴン流量によらず半径方向の空間分布特性は概ね一致するが一様領域は温度分布に比べ狭く、気流中心部から 3 mm 程度でありその値は 2650 m/s – 2890 m/s 程度である。

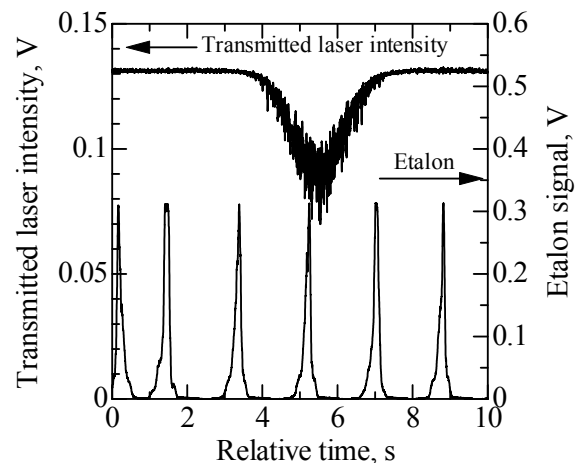


Fig. 5 Typical transmitted laser intensity and etalon signals.

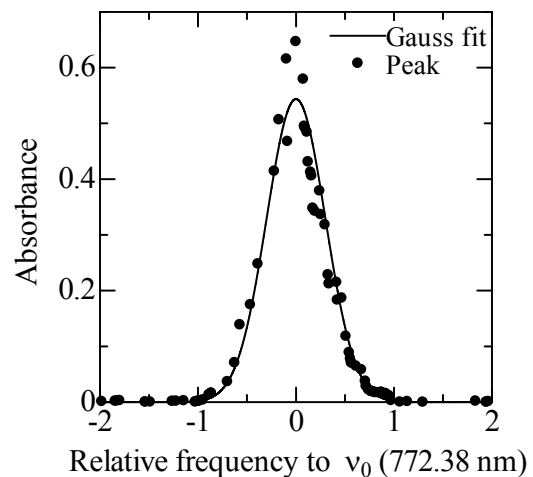


Fig. 6 Absorbance and Gauss fit.

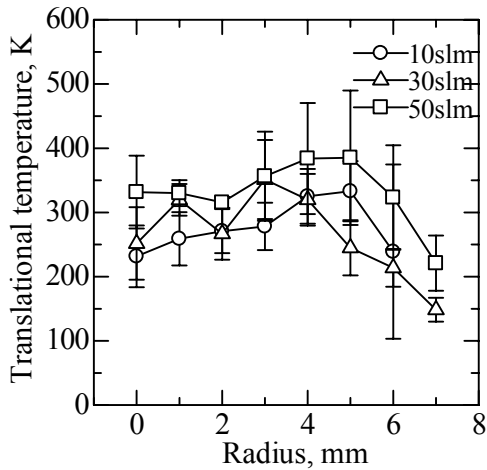


Fig. 7 Temperature distributions.

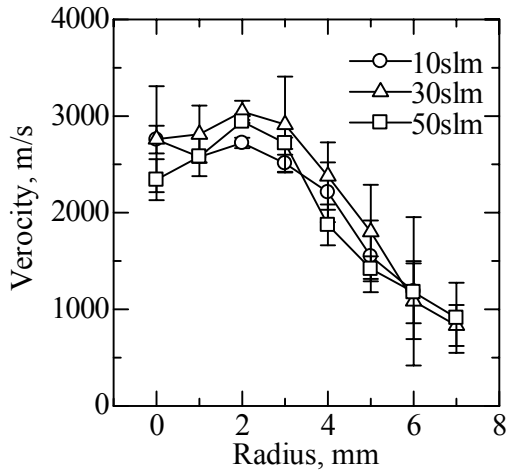


Fig. 8 Velocity distributions.

4.3 比エンタルピー、酸素原子流束密度推定

以下の手法により計測で得られた並進温度及び流速から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比エンタルピー h_0 は以下の式で表される。

$$\begin{aligned}
 h &= \int_0^{T_0} C_p dT' + h_{\text{chem}} && \text{(Plenum)} \\
 &= \int_0^T C_p dT' + h_{\text{chem}} + \frac{1}{2}u^2 && \text{(Plume)}
 \end{aligned} \tag{5}$$

ここで T_0 は全温(プレナム室での温度)、 C_p は定圧比熱である。 h_{chem} 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0.2 MPa以上と高いため、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。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^{6,7)}。Fig. 9にプレナム圧下におけるモル分率、比エンタルピー及び化学ポテンシャルの全温依存性を示す。これより、計測による気流温度、流速より式(5)を満たす全温を求め、モル分率及び各比エンタルピーを算出する。

Fig.10に比エンタルピー分布を示す。比エンタルピー分布はアルゴン流量によらず概ね一致し、気流中心部から3 mmまでは3.7 MJ/kg - 4.8 MJ/kg程度で一定であり、3 mmから半径方向に向かって比エンタルピーが減少していくことがわかる。この中心付近の一様領域では全温は約8600 Kに達しFig. 9より酸素は完全解離していることがわかる。また気流の比エンタルピーは5 MJ/kg以下と低いこれは化学ポテンシャルがほとんどないアルゴンが支配的であるためであり、酸素の比エンタルピーは27 MJ/kgに達する。この値は突入速度7.3 km/sに相当し低軌道からの再突入(7.8 km/s)における酸素分子との衝突を模擬するものである。

Fig.11に各条件での気流中心での酸素原子流束密度を示す。ここで流束密度は以下の式により求めた。

$$\begin{aligned}
 f &= n_O u \\
 &= \frac{M_O p_{\text{amb}}}{k_B T} u
 \end{aligned} \tag{6}$$

ここで n_O 、 M_O はそれぞれ酸素原子数密度、酸素原子モル分率であり第1式から第2式への変形には状態方程式を適用した。図が示すように流束密度は0.30 MPaの時に最大値 $2.2 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ を持つ。これは従来のアーク風洞に比べ二桁大きい。高圧になるほど流束密度が下がるのは流量の酸素分率の低下に比べ背圧の上昇率が低いこと、流量の増加に対し温度はやや上昇し、流速はやや低下することなどが原因だと

考えられる。

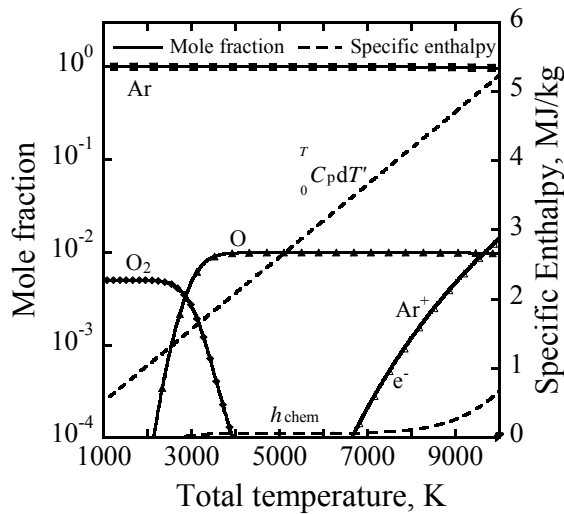


Fig. 9 Calculated specific enthalpy and mole fractions using the thermo-chemical equilibrium assumption, $p_0=0.30$ MPa, volumetric mixture ratio Ar: O₂=10:0.1.

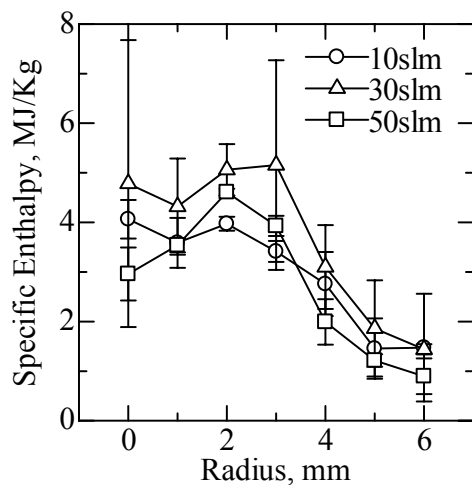


Fig. 10 Specific enthalpy distributions.

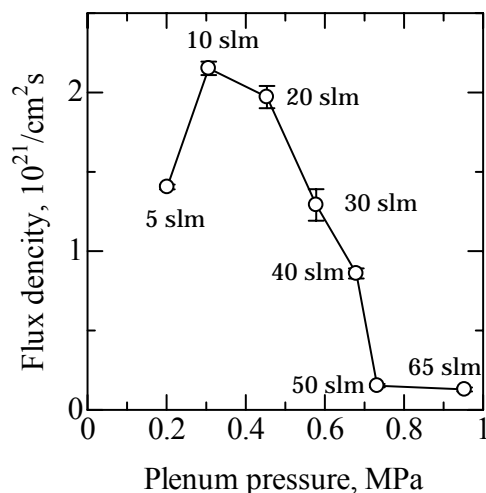


Fig. 11 Flux density of atomic oxygen on the axis as a function of plenum pressure.

5. まとめ

本研究では原子状酸素源としてレーザー駆動プラズマ風洞を開発し、作動試験、気流診断を行った結果以下の知見が得られた。

- (1) アルゴン・酸素を作動ガスとしてレーザーパワー800Wにおいて最大総圧0.95 MPa下でのLSP生成に成功した。
- (2) レーザー吸収分光法による気流診断の結果、比エンタルピーは半径3mm以下において3.7 MJ/kg - 4.8 MJ/kg程度でほぼ一様な分布を持つことがわかった。
- (3) 酸素原子の流束密度は総圧0.30 MPaのとき最大の値をとり、その値は $2.2 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ であった。

謝辞

本研究は独立行政法人日本学術振興会科学研究費補助金萌芽研究 No. 16656263 の補助を受けた。ここに謝意を表す。

References

- 1) Matsui, M., Ikemoto, T., Takayanagi, H., Komurasaki, K., Arakawa, Y., "Generation of Highly Dissociated Oxygen Flows Using a Constrictor-Type Arc Heater, *J. Thermophys. Heat. Tr.*, **21** (2007), pp.247-249.
- 2) Matsui, M., Komurasaki, K., Arakawa, Y., Knapp, A., Herdrich, G., and Auweter-Kurtz, M.: Enthalpy Measurement of Inductively Heated Air Flow, *J. Spacecraft Rockets*, **45** (2008), pp.155-157
- 3) Ito, I., Ishida, K., Mizuno, M., Sumi, T., Fujita, K., Nagai, J., Murata, H. and Matsuzaki, T.: Heating Tests of TPS samples in 110kW ICP-heating wind tunnel, *ISTS 2004-e-20*.
- 4) Yamada, T., Fujita, K., Nonaka, S., Ishii, N.: Performance Characteristics of the Inductively-Coupled High Enthalpy Flow Generator with CO₂ Gas, *ISTS 2006-e-19*.
- 5) Inoue, T., Ijiri, T., Hosoda, S., Kojima, K., Uehara, S., Komurasaki, K., Arakawa, Y.: Oscillation phenomenon of laser-sustained plasma in a CW laser propulsion, *Vacuum*, **73** (2004) pp.433-438.
- 6) Matsuzaki, R.: Quasi-One-Dimensional Aerodynamics with Chemical Vibrational and Translational Nonequilibrium, *Trans. Jpn. Soc. Aeronaut. Space Sci.*, **30** (1987), pp. 243-258.
- 7) Gupta, 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 Reference Publication 1232* (1990).