

プラズマトーチによる超音速流中での着火・保炎現象の解析

湊 亮二郎* 新岡 嵩**

*室蘭工業大学機械システム工学科

**東北大学流体科学研究所

Numerical Analysis of Ignition and Flameholding by Plasma Torch in Supersonic Airflow

Ryojiro Minato*, Takashi Niioka**

*Muroran Institute of Technology

**Institute of Fluid Science, Tohoku University

ABSTRACT

The purposes of the present study were to clarify the three-dimensional structure of hydrogen flame reinforced by a plasma torch and to analyze the effect of the position of a hydrogen jet relative to the plasma torch on the combustion characteristics. Results of the present analysis clarify that the combustion efficiency of hydrogen jet injection into the upper stream of the plasma torch becomes larger than that of hydrogen jet injection into the lower stream. When the hydrogen jet is injected into the lower stream of the plasma torch, the combustion efficiency is reduced with the increase of the interval between the plasma torch and the hydrogen jet. In addition, as the interval decreases, an extension of the recirculation zone, which causes a significant increase of combustion efficiency, is observed. On the other hand, when the hydrogen jet is injected into the upper stream of the plasma torch, a larger interval generally results in larger combustion efficiency. When the plasma torch is injected with high injection pressure, penetration of the plasma torch is extended and mixing of hydrogen and air is significantly improved, resulting in higher combustion efficiency.

記号等

D_{H_2}	= H ₂ 噴流口径
D_{PJ}	= プラズマトーチ口径
f_S	= 化学種 S の質量分率
$f_{H_2,R}$	= H ₂ O に生成可能な水素の質量分量。式 (3) で定義
$f_{H_2,T}$	= 反応生成物も考慮した H ₂ の全質量分率式 (4) で定義
$f_{O_2,T}$	= 反応生成物も考慮した O ₂ の全質量分率式 (5) で定義
L	= 水素噴流とプラズマトーチの距離
$M_{w,S}$	= 化学種 S の分子量
P_{PT}, P_{H_2}	= 水素噴流とプラズマトーチの噴射全圧
T_{PT}, T_{H_2}	= 水素噴流とプラズマトーチの噴射全温
u	= x 方向の速度成分
x, y, z	= 物理空間座標
η_{com}	= 燃焼効率
η_{mix}	= 混合効率

1. 序論

ロケットエンジンに代わる、次世代宇宙推進システムとしてスクラムジェットエンジンに注目が集まっているが、同エンジンの実現には超音速流での着火・保炎という難題が存在する。その解決手段の一つとしてプラズマトーチを用いて着火及び燃焼を促進させることが提案されているが、[1-6]プラズマジェットと燃料流が干渉したときの火炎の構造や、プラズマを構成する活性化学種が燃焼反応に及ぼす影響など、プラズマトーチによる燃焼現象には、未知の現象が残されている。そのためプラズマトーチの最適設計に関する明確な指針に欠けており、スクラムジェットの实用化を困難なものにしている。そこで本論文では数値解析によって高温プラズマガスと水素噴流の干渉及び燃焼現象を解析した。

特に、本研究では、プラズマトーチに対する水素噴流位置に着目し、水素噴流位置が混合効率と燃焼効率に与える影響を解析した。

2. 数値解析法

本研究ではプラズマトーチを扱っているため、本来では

イオンの輸送方程式や熱非平衡性も考慮しなければならないが、スクラムジェットエンジンの点火器としてのプラズマトーチの温度は比較的低温であるため、電離度や熱非平衡性は極めて小さい。またイオンが着火に及ぼす影響も小さいので、イオンの輸送方程式は考慮せず熱平衡と仮定した。以上の仮定に基づき、本研究での支配方程式は3次元対流項と粘性項の差分に、それぞれ Steger - Warming の Flux Vector Splitting Scheme と二次精度中心差分を適用して、時間積分に Yoon and Shuen による Lower - Upper Symmetric Gauss Seidel 法を用いた。

乱流モデルには、Baldwin Lomax 代数モデルを用いた。酸素プラズマの解析では、窒素の反応は無視して良いので化学反応モデルは Stahl and Warnatz による9化学種33素反応水素-酸素反応モデルを使用した。数値計算法と燃焼の熱化学定数は文献[7-13]を参考にした。

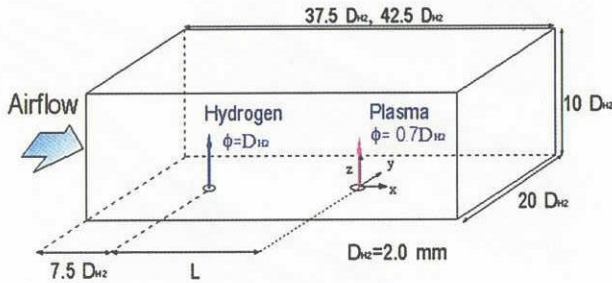


図1 解析モデル

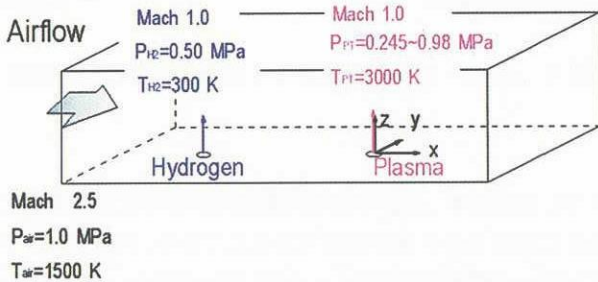


図2 境界条件

本研究の解析対象である、プラズマトーチと水素噴流の噴射機構モデルを図1に示した。同図は、水素噴流がプラズマトーチ上流に位置する場合を図示してある。

解析領域の座標原点をプラズマトーチ噴射口に設定し、水素噴流の噴射口径 D_{H2} を 2mm として、モデルの大きさは D_H で無次元化することにした。一方、プラズマトーチの噴射口径は、 $0.7D_{H2}$ で、プラズマトーチからの水素噴射口の無次元位置 L/D_{H2} は 15、10、5、-0.85、-2.5、-5、-10、-15、-20 の9ケースを想定し、それぞれ解析した。ただし L が負の値を取るのは水素噴射口がプラズマトーチよりも上流

側に位置することを意味する。なお $L/D_{H2} = -0.85$ の時は二つの噴射口が接している場合である。解析領域はスパン方向に $20D_H$ 、垂直方向に $10D_H$ 、主流方向に $37.5D_H$ とつて $L/D_{H2} = -20$ の時だけ、 $42.5D_H$ とした。

図2に、主流空気とプラズマトーチ及び水素噴流の計算条件を示した。主流空気流のマッハ数、全温 T_{H2} 、全圧 P_{H2} はそれぞれ 2.5、1500K、10MPa である。水素噴流のマッハ数、全温 T_{air} 、全圧 P_{air} はそれぞれ 1.0、300K、0.5MPa と設定し、酸素プラズマトーチのマッハ数、全温 T_{PT} はそれぞれ 1.0、3000K で、全圧 P_{PT} については、0.245、0.49、0.735、0.98MPa と変化させてみた。これらの噴射条件は、文献[14, 15]を参考に行っている。

なお、本研究で開発したコードは、McDaniel らの実験データと比較して検証を行った。[16]

3. 結果と考察

3.1 水素噴流がプラズマトーチ下流側に位置する場合 ($L/D_{H2} > 0$)

最初に、水素噴流がプラズマトーチ下流に位置する場合について、水素燃料の混合効率と燃焼効率に着目して解析を行なった。混合効率 η_{mix} と燃焼効率 η_{com} は任意の $y-z$ 断面を通過する水素とその反応生成物質の質量流量を元に以下の式(1)、(2)のように定義した。

$$\eta_{mix} = \frac{\iint \rho u f_{H_2,R} dydz}{\iint \rho u f_{H_2,T} dydz}, \quad (1)$$

$$\eta_{com} = \frac{\iint \rho u f_{H_2,O} (M_{w,H_2} / M_{w,H_2O}) dydz}{\iint \rho u f_{H_2,T} dydz}, \quad (2)$$

$f_{H_2,R}$ は H_2O に変換できる H_2 の最大質量流量で、次の式(3)で定義できる。

$$f_{H_2,R} = \min \left[f_{H_2,T}, 2f_{O_2,T} \left(\frac{M_{w,H_2}}{M_{w,O_2}} \right) \right], \quad (3)$$

ただし $f_{H_2,T}$ と $f_{O_2,T}$ は H_2 と O_2 の全質量流量であって、反応生成物の H_2 と O_2 の質量流量も考慮する。 $f_{H_2,T}$ と $f_{O_2,T}$ の定義式は、それぞれ以下の式(4)、(5)に示した。

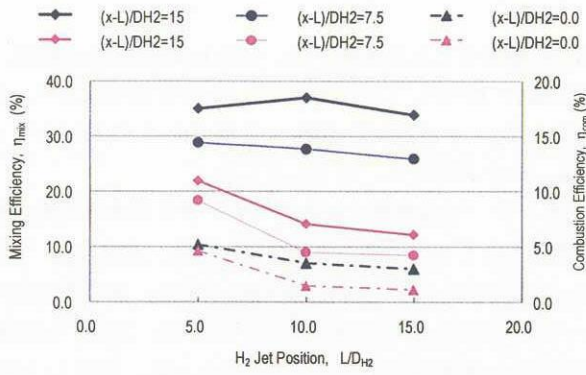


図3 $L/D_{H_2} > 0$ の時の混合・燃焼効率

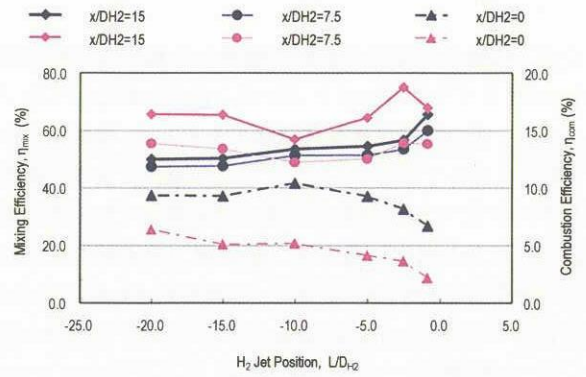


図5 $L/D_{H_2} < 0$ の時の混合・燃焼効率

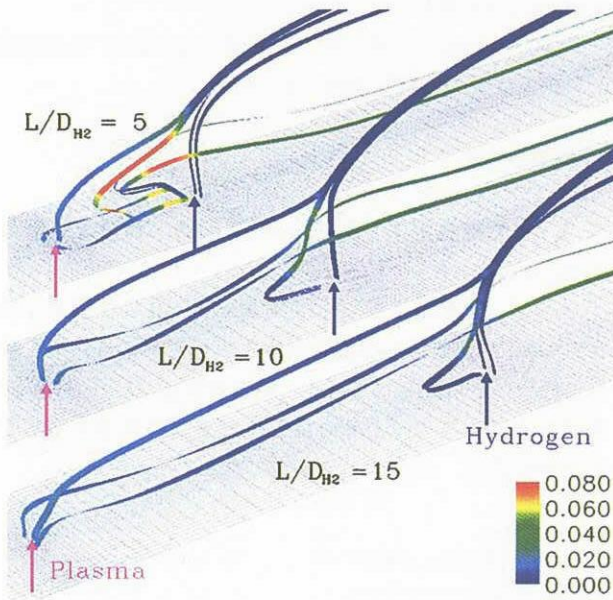


図4 $L/D_{H_2} > 0$ 時のO原子モル分率で色分けした流線

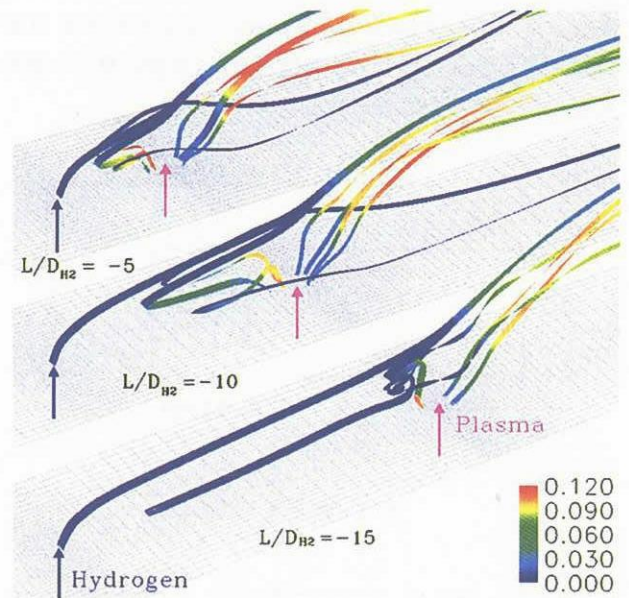


図6 $L/D_{H_2} < 0$ 時のO原子モル分率で色分けした流線

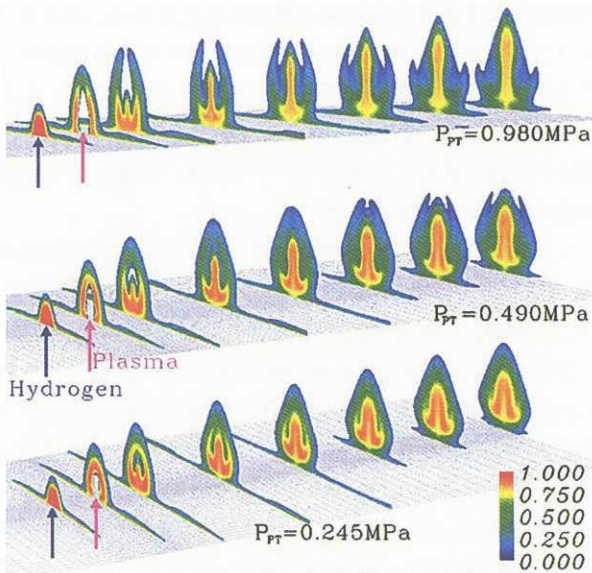
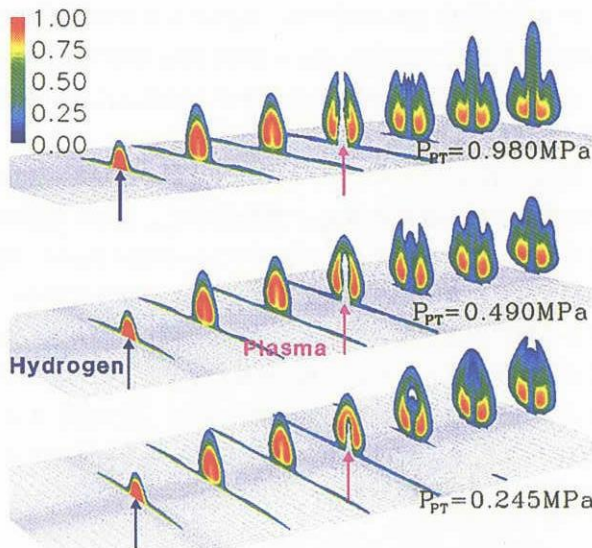
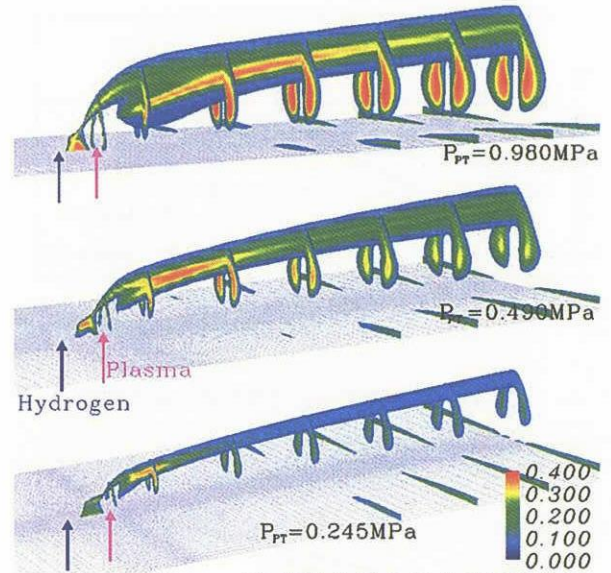
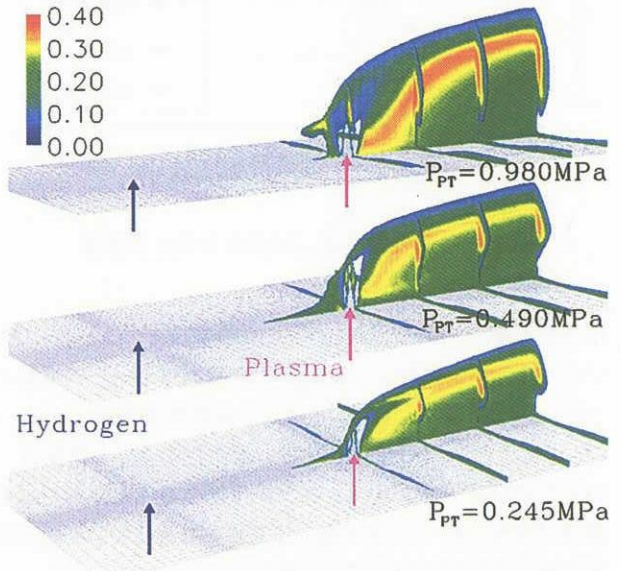
$$\begin{aligned}
 f_{H_2,T} = & \left(\frac{M_{W,H_2}}{M_{W,H_2O}} \right) f_{H_2O} + \left(\frac{M_{W,H}}{M_{W,H_2O}} \right) f_{HO_2} \\
 & + \left(\frac{M_{W,H}}{M_{W,OH}} \right) f_{OH} + \left(\frac{M_{W,H_2}}{M_{W,H_2O_2}} \right) f_{H_2O_2} \\
 & + f_{H_2} + f_H,
 \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned}
 f_{O_2,T} = & \left(\frac{M_{W,O}}{M_{W,H_2O}} \right) f_{H_2O} + \left(\frac{M_{W,O_2}}{M_{W,HO_2}} \right) f_{HO_2} \\
 & + \left(\frac{M_{W,O}}{M_{W,OH}} \right) f_{OH} + \left(\frac{M_{W,O_2}}{M_{W,H_2O_2}} \right) f_{H_2O_2} \\
 & + f_{O_2} + f_O,
 \end{aligned} \tag{5}$$

即ち、混合効率 η_{mix} の物理的な意味は、反応生成物も考慮した水素の全質量流量と反応可能な水素の質量流量の

比で、燃焼効率 η_{com} の物理的意味は水素の全質量流量と H_2O に反応した水素の質量流量の比である。図3に、プラズマトーチ噴射全圧が $P_{PT} = 0.980$ MPa の時の $(x-L)/D_{H_2} = 0.0, 7.5$ 及び 15 の位置での η_{mix} と η_{com} を図示した。水素噴流がプラズマトーチの下流側に配置されたときでは、両者の距離が小さくなるほど燃焼効率 η_{com} が大きくなる。特に水素噴流の無次元位置 L/D_{H_2} が 5 の時には、 $(x-L)/D_{H_2} = 15$ の位置で、燃焼効率 η_{com} は 11% にも達しているが、 $(x-L)/D_{H_2}$ が 10 以下だと $6\sim 7\%$ 程度に留まっている。 $L/D_{H_2} = 5$ で、燃焼効率 η_{com} が上昇するメカニズムを解明するため、図4にプラズマトーチ噴射口付近の流線図をO原子のモル分率で色付けして図示した。

図4から、全てのケースで水素噴流上流側に再循環領域が形成され、そこでO原子のモル分率が高くなっていた。水素噴流上流側の再循環領域は、本ケースのような燃

図7 $L/D_{H_2} = -2.5$ の時の H_2 モル分率分布図8 $L/D_{H_2} = -15.0$ の時の H_2 モル分率分布図9 $L/D_{H_2} = -2.5$ の時の H_2O モル分率分布図10 $L/D_{H_2} = -2.5$ の時の H_2O モル分率分布

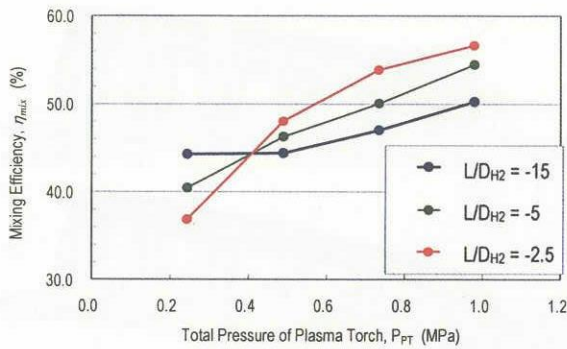
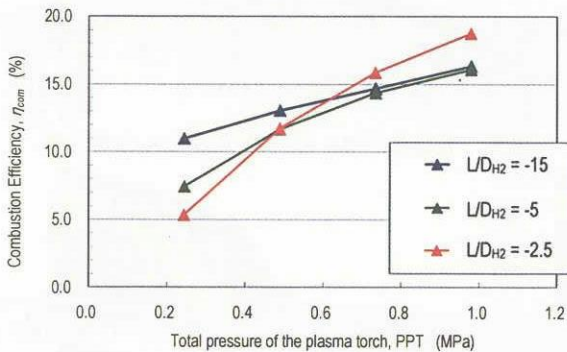
料垂直噴射モデルにおいて、着火源になる領域であり、[17] 加えて、 $L/D_{H_2} = 5$ の場合には、他の2ケースよりも再循環領域が拡大しているの、ここでは燃料の滞留時間の増加が見込まれる。加えてO原子のモル分率も高くなっているの、反応速度も増大する。これらの効果が相乗して燃焼効率を上昇させるものと考えられる。

3.2 水素噴流がプラズマトーチ上流側に位置する場合 ($L/D_{H_2} < 0$)

一方水素噴流をプラズマトーチの後流側で噴射させた時 ($L/D_{H_2} < 0$) の混合・燃焼効率を図5に示した。混合効率 η_{mix} 、燃焼効率 η_{com} の定義は、前節で述べたとおりである。図3と図5の比較から、燃焼効率 η_{com} は $L/D_{H_2} > 0$ の

時よりも $L/D_{H_2} < 0$ の時の方が、上昇していることが分かる。このことは、過去の実験結果の傾向と一致する。[1] また図5から、プラズマトーチ噴射口の位置 ($x/D_{H_2} = 0.0$) における η_{mix} と η_{com} は、水素噴流がプラズマトーチから離れるにつれて上昇している。これは両者の間隔が大きい方が、水素ガスが噴射された後、水素ガスがプラズマトーチの噴射位置に到達するまでに空気との混合が進行するためと考えられており、同時に図5に示した $x/D_{H_2} = 0.0$ の位置における混合効率の挙動からも裏付けされている。

一方、プラズマトーチからある程度下流に下った、 $x/D_{H_2} = 15.0$ の位置における燃焼効率 η_{com} は、 $L/D_{H_2} = -2.5$ の時に、最大値を取ったあと減少し、 $L/D_{H_2} = -10.0$ で最小値なると後、プラズマトーチと水素噴流が離れるにつれて、 η_{com} が

図 11 混合効率 η_{mix} に与える P_{PT} の影響図 12 燃焼効率 η_{com} に与える P_{PT} の影響

増加する傾向にある。 $L/D_{H_2} < -10.0$ の領域での $x/D_{H_2} = 15.0$ における η_{com} の挙動は、 $x/D_{H_2} = 0.0$ における η_{com} の挙動と平行であるが、 $L/D_{H_2} = -2.5$ の高燃焼効率は、 $x/D_{H_2} = 0.0$ の位置では現れない。一方、混合効率 η_{mix} の挙動は、いずれの場合でも、 η_{com} と平行であることから、水素噴流がプラズマトーチ上流側に位置する場合 ($L/D_{H_2} < 0$) の燃焼効率は、水素燃料の混合に依存すると言える。

$L/D_{H_2} < 0$ における燃焼流の構造を明らかにするため、プラズマトーチ噴射口付近の流線図を図 6 に示した。同時に O 原子のモル分率で色付けを行った。 $L/D_{H_2} = -5.0$ と -10.0 の時には、プラズマトーチ上流側に再循環領域が拡大していることがわかるが、O 原子のモル分率は再循環領域よりも、プラズマトーチ直後の領域で上昇している。そして、プラズマトーチ直背の領域の O 原子モル分率は、水素噴流がプラズマトーチに近いほど高くなっており、プラズマトーチ直背で混合が進行し、その混合が燃焼の支配因子と言える。

図 7 と 8 にそれぞれ $L/D_{H_2} = -2.5$ と -15.0 における H_2 のモル分率分布を示した。更にプラズマトーチの噴射が水素燃料の拡散に与える影響を解析するため、プラズマトーチ噴射全圧 P_{PT} を 0.98, 0.49, 0.245 MPa と変化させてみた。 $L/D_{H_2} = -2.5$, $P_{PT} = 0.98$ MPa の時、水素ガスは中心部に集中しており、垂直方向に高く貫通している。垂直噴射の場

合噴射ガスは垂直方向に高く貫通することから、水素ガスはプラズマガスと共に、垂直方向に貫通するように分布しており、混合・拡散が進行している。一方、 $L/D_{H_2} = -2.5$, $P_{PT} = 0.245$ MPa の時では、プラズマガスの垂直方向への貫通はそれほど進行しておらず、そのため、水素ガスも壁面付近に停留する傾向にある。

しかし、 $L/D_{H_2} = -15.0$ の時には、 P_{PT} がいずれの値の時も、 H_2 の高モル分率領域は、プラズマトーチ後流では左右に二分割し、壁面付近に停留している。

図 9, 10 に H_2O モル分率分布を示した。図 9, 10 をみると、水素噴流無次元位置が $L/D_{H_2} = -2.5$ の時は、とプラズマトーチ噴射全圧 P_{PT} の影響がより際立って見える。 $P_{PT} = 0.980$ MPa の時には H_2O のモル分率は最大 40% 以上に達しているが、 $P_{PT} = 0.245$ MPa の時には、プラズマトーチ直後の領域を除けば、10% 程度に留まっている。一方、水素噴流無次元位置が $L/D_{H_2} = -15.0$ の時では、プラズマ噴射全圧が $P_{PT} = 0.245$ MPa の時でも、 H_2O のモル分率は最大で 30% 以上に達しているが、 $P_{PT} = 0.980$ MPa の時では $L/D_{H_2} = -2.5$ の時のように、 H_2O モル分率が 40% 以上に達する領域は存在していない。

図 11, 12 にプラズマトーチ全圧 P_{PT} が、 $x/D_{H_2} = 15.0$ の位置における混合効率 η_{mix} 、燃焼効率 η_{com} に与える影響を示した。これらの図よりプラズマトーチ全圧 P_{PT} が、低い時では、水素噴流の無次元位置 L/D_{H_2} がプラズマトーチから離れた方が混合効率 η_{mix} 、燃焼効率 η_{com} が大きくなるが、プラズマトーチ全圧 P_{PT} が高くなると、 L/D_{H_2} がプラズマトーチに近づいた方が大きくなる。これは図 9 の $L/D_{H_2} = -2.5$, $P_{PT} = 0.980$ MPa の時の H_2O モル分率分布の結果を裏付けるものである。

4. 結論

- 1) 水素噴流をプラズマトーチの後流で噴射させるより、上流側で噴射させた方が、燃焼効率が大きくなる。
- 2) 一般的に水素噴流がプラズマトーチの上流側の時、水素噴流をプラズマトーチから離れた方が燃焼効率は大きくなる。
- 3) しかしながら、水素噴流とプラズマトーチの間隔が小さいときでも、プラズマトーチ全圧 P_{PT} が大きくなると燃焼効率も混合効率も却って大きくなる。

文献

- [1] Kimura, I., Aoki, H., and Kato, M., *Combustion and Flame*, Vol.42, (1981), pp.297-305.
- [2] Northam, G. B., McClinton, C. R., Wagner, T. C., and O'Brien, W. F., *AIAA Paper 84-1408*, (1984).
- [3] Barbi, E., Mahan, J.R. O'Brien, W. F., and Wagner, T. C.,

- Journal of Propulsion and Power*, Vol.5, No.2, (1989), pp.129-133.
- [4] Wagner, T. C., and O'Brien, W. F., Northam, G. B. and Eggers, J.M., *Journal of Propulsion and Power*, Vol.5, No.5, (1989), pp.548-554.
- [5] Takita, K., Umemoto, T., Sato, T., Ju, Y., Masuya, G., and Ohwaki, K., *Journal of Propulsion and Power*, Vol.16, No.2, (2000), pp.227-233.
- [6] Kato, R., and Kimura, I., *Proceedings of the 26th Symposium (International) on Combustion Institute*, (1996), pp.2941-2947.
- [7] Minato, R., and Niioka, T., *Proceedings of the 3rd Asia-Pacific Conference on Combustion* Seoul, 2001, pp.726-729.
- [8] Stahl, G. and Warnatz, J. *Combustion and Flame*, Vol.85, (1991), pp.285 - 299.
- [9] Shuen, J. S. and Yoon, S. *AIAA Journal*, Vol. 27, No. 12, (1987), pp.1752-1760.
- [10] Ju, Y., *AIAA Journal*, Vol. 34, (1995), pp.1418 - 1425.
- [11] Svehla, R. A., NASA TR-132, (1962).
- [12] Hirshfelder, J. O., Curtiss, C. F. and Bird, R. B. "Molecular Theory of Gases and Liquid,"Wiley. New York. (1954).
- [13] Baldwin, B. and Lomax, H., *AIAA Paper 78 -257*, (1978).
- [14] Sato, Y. et.al., *Journal of Propulsion and Power*, Vol.8 No.4, (1992), pp.883-889.
- [15] Kobayashi, K. Tomioka, S and Mitani, T., AIAA 2001-1763.
- [16] McDaniel, J. C. and Graves, Jr., J., AIAA Paper 86-0507, (1986).
- [17] Huber, P. W., Schexanayder, Jr., C. J. and McClinton, C. R., *NASA TP 1457*, (1979).