プラズマトーチ応用の超音速燃焼初期促進に関する 気体分子運動論的解析^{*1}

第1報：活性基の種類と供給形態による特徴

Molecular Gas Dynamical Analysis of Initial Combustion Enhancement Due to a Plasma Torch in Supersonic Shear Flow The 1st Report: Effect of Plasma Species and Injection Mode

小 幡 茂 男^{*2}・長 島 利 夫^{*3}
Shigeo OBATA and Toshio NAGASHIMA

Key Words: Supersonic Flows, SCRAM Jet, Initial Combustion, Plasma Torch, DSMC

Abstract: The effects of various radical species, supplied from a plasma torch ignitor upon initiating hydrogen-air chemical reaction in a two-dimensional supersonic shear flow have been investigated by a new numerical approach based on the molecular gas dynamics. Direct Simulation Monte Carlo (DSMC) method has been employed to derive the microscopic reaction phenomena from the Boltzmann equation with a reactive inelastic molecular collision model (IE Model). The plasma species and injection mode into air stream have been varied. The result shows that fuel hydrogen initial combustion can be significantly enhanced by plasma injection of atomic oxygen supplying in diffusive mode.

記 号

h : 水素噴射孔上下対称全高さ [m]
 N : モル濃度 [mol/m³]
 A : 反応速度定数の頻度因子 [m³/mol/s]
 n : 反応速度定数の温度べき乗定数
 T : 温度 [K]
 E_a : 活性化エネルギー [J]
 k_B : ボルツマン定数 [J/K]
 ϕ : 当量比
 η_p : H₂O 生成効率

1. 序 論

スクラムジェットエンジンは極超音速輸送機や宇宙往還機のための推進機関として期待されているが、解決すべき課題の一つとして、超音速空気流中への噴射燃料の安定燃焼の達成がある。超音速燃焼実現のためには噴射燃料を速やかに着火・保炎させることが重要であり、さまざまな手法が提唱・試験されているが、中でも有望視されているプラズマトーチ・イグナイタ¹⁾は、電気火花の力で作動ガスを高温高速のプラズマへ変換しジェット噴出させる装置であり、選択された化学活性基を多量の熱と共に燃焼場へ集

中のに供給することが可能な特徴を持つ。O'Brienらは水素に限らず炭化水素系の燃料による超音速燃焼にもプラズマ注入が有効であること²⁾、プラズマへ添加する混入ガスとして水素を用いると着火限界温度を引き下げられることを示した³⁾。また、木村らは混入ガスの種類や流量、トーチへの投入電力などをさまざまに組み合わせ⁴⁾、投入電力量よりも作動ガス流量を増し、混入ガスとして酸素を用いる作動条件の優位性を明らかにした⁵⁾。一方で、升谷らはトーチを取り付けた SCRAM 燃焼器モデル（ステップ付）の着火・保炎試験を行い、着火後の保炎性能が混入ガスの種類に依存しないこと⁶⁾、作動ガス流量ではなく投入電力の増加によって着火限界温度を引き下げられることを報告した⁷⁾。さらに、水素をプラズマ噴流に吹き付ける燃焼実験から、混入ガス種として酸素または窒素が適当であるとも結論付けた⁸⁾。これまでの実験的研究からプラズマトーチの有効性は明らかであるが、その最適な作動条件を探る試みとして数値計算を用いた評価も始められている⁹⁾。加藤らはプラズマの温度よりも流量の増大により、着火点の上流への移動は期待できないものの下流部の燃焼を大きく促進できることを示した¹⁰⁾。一方、滝田は非定常解析の結果、着火の開始地点や過程が混入ガスの種類には依存しないものの、酸素を混入した場合のみ吹き消えが起こらないことを報告している¹¹⁾。

以上の実験と数値計算による研究成果をまとめても、プラズマの熱的・量的ないし化学種的な要因のうち、いずれが

^{*1} © 2003 日本航空宇宙学会

平成 14 年 10 月 23 日原稿受理

^{*2} 防衛大学校システム工学群航空宇宙工学科

^{*3} 東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻

第 1 図 二次元超音速剪断流

最も強く着火と燃焼促進に寄与しているのか明確になっていない。特に、プラズマが空気と燃料の混合気と出会った直後の燃焼については、その流動・反応機構の詳細が依然明らかになっていない。そこで、本研究では、前報¹²⁾に引き続き超音速剪断流を対象とし、燃焼のごく初期過程に注目して、最も効率良く反応を開始させることのできるプラズマトーチ主動作要因（プラズマの化学種、噴射形態、モル流束および熱流束）を考察する。本報では四つある要因の中から化学種と噴射形態を取り上げ、その組合せの変化が着火に与える影響を数値解析し、プラズマトーチの設計や運転に有益な指針を得ることを目的とした。

対象とした超音速剪断流は音速噴射される低温の気体水素とその上下を流れる高温の超音速空気流（第 1 図）であり、リップ（厚み無しで滑り条件を持った仕切り板）により物質的熱的に完全に分離されて流入する。リップ背後において二流は混合を開始し、超音速剪断層を上下対称二次元的に形成する。前報¹²⁾の結果によれば、混合は主として低温水素の高温空気側への浸透により支配され、第一段階として運動量交換に伴う剪断渦発生、第二段階としてエネルギー交換に伴う化学的な活性の向上という二つから成り、一方、燃焼は浸透水素の温度上昇に支配され、水素ガスの燃焼初期過程は非常に微弱で遅く、何らかの燃焼促進手段の必要性が示唆された。従って、ここでは、先ず、超音速空気流へさまざまな条件で噴射されるプラズマ流が、剪断流内部において微弱な初期燃焼を促進する過程を気体分子運動論に立脚するダイレクトシミュレーションモンテカルロ (DSMC) 法¹³⁾を用いて比較検討する。

2. 計算モデル

DSMC 法の適用にあたっては、前報¹²⁾同様に、定常解を得るための時間平均操作、衝突判定のために Modified Null-Collision 法¹⁴⁾、衝突断面積一定の剛体球分子モデル、回転自由度のみを考慮した Borgnakke-Larsen の並進-内部エネルギー平衡モデル¹⁵⁾、内部エネルギー参加型の反応分子非弾性衝突モデル¹⁶⁾、Serikov の重み付き衝突分子モデル¹⁷⁾を改良した多成分構成の分子モデルを組み合わせた計算コー

第 1 表 化学種物性値

化学種	質量 [g/mol]	衝突直径 [Å]	内部自由度 χ_i
H ₂	2.00	2.827	2
O ₂	32.0	3.467	2
N ₂	28.0	3.798	2
H ₂ O	18.0	2.800	3
H	1.00	2.070	0
O	16.0	3.050	0
OH	17.0	3.147	2
HO ₂	33.0	3.068	3

ドを組み、燃焼反応の解析には、第 1 表に示すとおり窒素を不活性種とする水素-酸素系反応の主要 8 化学種と、第 2 表の 16 素反応による Evans らの 16 Reaction System¹⁸⁾を採用した。以下、文中の丸囲み数字は全て第 2 表の素反応番号であり、マイナスは逆反応を示す。プラズマ活性基の参加する反応定数も第 2 表と同じ値を用いた。

プラズマ噴射による燃焼促進効果は反応生成物質の空間分布と共に、次式により流れと垂直な断面内で定義される H₂O 生成効率 (η_p)¹²⁾を用いて評価した。

$$\eta_p = \frac{\int_0^{y_{\max}} \left(\frac{\dot{N}(y)}{\dot{N}(y)_{\text{pfct}}} \times \Omega \right) dy}{\int_0^{y_{\max}} \Omega dy}$$

$$: \begin{cases} \Phi(y) > 1 \Rightarrow \Omega = \frac{1}{\Phi(y)} \\ \Phi(y) < 1 \Rightarrow \Omega = \Phi(y) \end{cases}$$

η_p は、流れ方向 (x) と垂直な方向 (y) の全点において水素-酸素完全反応から生成され得る最大 H₂O 流量 ($\dot{N}_{\text{pfct}}$) に対して、実際生成された H₂O 流量 ($\dot{N}$) の比を、局所当量比 (Φ) による重み因子 (Ω) を用いて、積分平均した値であり、H₂ 流量の消費量から評価する通常の燃焼効率¹⁹⁾とは異なる。この η_p を用いたのは、プラズマ活性基により H₂ が逆生成された場合に効率が負値になる不都合回避のためと、燃焼発熱の指標としての H₂O を用いればスクラムジェットの性能を直接評価できるためである。

計算対象とする二次元超音速剪断流において、前報¹²⁾同様、典型的なスクラムジェット作動状態に対応する第 3 表の各パラメータを仮定し、計算領域としては第 1 図に示すとおり上下対称の上半分をとり、これを x 方向 640 セル $\times$ y 方向 160 セル、リップ高さ 30 セル $\times$ 長さ 10 セルで構成した。

プラズマトーチは多くの場合、アルゴンを溶媒として水素や酸素、窒素等を混入した作動ガスを供給し、初期化学活性基を直接発生させることで、起鎖反応（第 2 表の -⑤, -⑥, -⑫, -⑬）を経由せずに燃焼を開始させる。実際には噴出プラズマに、これら活性基の他にも荷電粒子（電子、イオン化した分子・原子）が多量に含まれているため、プラズマが燃焼場に及ぼす影響を正確に評価するためには、電子-イオン衝突や振動励起分子が参加する特異な反応プロ

第 2 表 16 Reaction System

① $\text{H}+\text{OH}=\text{H}_2+\text{O}$	② $\text{O}+\text{OH}=\text{O}_2+\text{H}$	③ $\text{H}_2+\text{OH}=\text{H}_2\text{O}+\text{H}$	④ $\text{OH}+\text{OH}=\text{H}_2\text{O}+\text{O}$
⑤ $\text{OH}+\text{OH}=\text{H}_2+\text{O}_2$	⑥ $\text{H}+\text{HO}_2=\text{H}_2+\text{O}_2$	⑦ $\text{H}+\text{HO}_2=\text{OH}+\text{OH}$	⑧ $\text{H}+\text{HO}_2=\text{H}_2\text{O}+\text{O}$
⑨ $\text{O}+\text{HO}_2=\text{O}_2+\text{OH}$	⑩ $\text{OH}+\text{HO}_2=\text{H}_2\text{O}+\text{O}_2$	⑪ $\text{H}_2+\text{HO}_2=\text{H}_2\text{O}+\text{OH}$	⑫ $\text{H}+\text{H}+\text{M}=\text{H}_2+\text{M}$
⑬ $\text{O}+\text{O}+\text{M}=\text{O}_2+\text{M}$	⑭ $\text{H}+\text{O}+\text{M}=\text{OH}+\text{M}$	⑮ $\text{H}+\text{O}_2+\text{M}=\text{HO}_2+\text{M}$	⑯ $\text{H}+\text{OH}+\text{M}=\text{H}_2\text{O}+\text{M}$

反応速度定数： $k = A \times T^n \times \exp(-\hat{E}_a/T)$ ； $\hat{E}_a = E_a/k_B$ ：二体反応 [$\text{m}^3/\text{mol}/\text{s}$]：三体反応 [$\text{m}^6/\text{mol}^2/\text{s}$]

	A	n	$\hat{E}_a$	Q [J/mol]		A	n	$\hat{E}_a$	Q [J/mol]
①	3.00×10^7	0.00	4429.0	7813	−①	7.50×10^7	0.00	5586.0	−7813
②	1.50×10^7	0.00	0.0	70161	−②	2.20×10^8	0.00	8455.0	−70161
③	2.00×10^7	0.00	2600.0	62814	−③	8.40×10^7	0.00	10116.0	−62814
④	5.30×10^6	0.00	503.0	70627	−④	5.80×10^7	0.00	9059.0	−70627
⑤	5.70×10^5	0.00	14922.0	77974	−⑤	1.70×10^7	0.00	24232.0	−77974
⑥	1.30×10^7	0.00	0.0	220091	−⑥	1.90×10^7	0.00	24110.0	−220091
⑦	6.00×10^7	0.00	0.0	142117	−⑦	1.70×10^5	0.50	21137.0	−142117
⑧	3.00×10^7	0.00	0.0	212744	−⑧	5.80×10^5	0.50	28686.0	−212744
⑨	1.00×10^7	0.00	0.0	212278	−⑨	3.70×10^5	0.64	27840.0	−212278
⑩	1.20×10^7	0.00	0.0	282905	−⑩	2.00×10^5	0.50	36296.0	−282905
⑪	1.70×10^7	0.00	12582.0	204931	−⑪	1.20×10^6	0.21	39815.0	−204931
⑫	1.80×10^6	−1.00	0.0	435998	−⑫	5.50×10^{12}	−1.00	51987.0	−435998
⑬	4.00×10^5	−1.00	0.0	498346	−⑬	7.20×10^{12}	−1.00	59340.0	−498346
⑭	7.10×10^6	−1.00	0.0	428185	−⑭	8.50×10^{12}	−1.00	50830.0	−428185
⑮	1.71×10^4	0.00	0.0	215907	−⑮	1.70×10^{10}	0.00	23100.0	−215907
⑯	4.11×10^6	−1.49	0.0	498812	−⑯	5.20×10^{15}	−1.50	59386.0	−498812

第 3 表 二次元超音速剪断流条件

	流入静圧 [Pa]	流入静温 [K]	流入 マッハ数
超音速空気	1.01×10^5	1500	2.44
音速水素	1.01×10^5	250	1.00

セスをも考慮する必要がある。しかし、1,000～2,000 [K] 程度の温度環境のスクラムジェットエンジン燃焼器内部では、噴射されたプラズマが熱損失により失活・安定分子へと再結合する度合いは非常に大きいと考えられる。そこで本研究では、燃焼促進領域において最も有効に働くプラズマ成分（1,500 [K] 程度の温度でも比較的長い寿命を持ち安定に存在する）が単原子ラジカルであると予測し、プラズマトーチの効果を純粋な化学活性基の投入で模擬した。以降、プラズマの投入状態をシンボル（O-W-r）などにより表現する。括弧内の最初の項は O または H であり、噴射単原子酸素または単原子水素を示し、第 2 項は噴射形態が拡散（W）か高密度（N）かを表し、最後の項は投入プラズマのエネルギー状態に呼応する。プラズマ活性基が参加する初期反応には、第 2 表の 16 Reaction System と同じものを適用して解析を行った。中でも、水素分子との起鎖反応となる −①を活性化する単原子酸素（シンボル：O-**-*）と、酸素分子との起鎖反応である −②を活性化する単原子水素（H-**-*）とに特に注目し、これら単原子の化学活性基群をプラズマトーチの形態に合わせ、計算領域に流入させた。

プラズマトーチは超音速剪断流の上流部に設置され、超音速空気側へプラズマ活性基を噴射する。噴射された活性基は計算領域流入境界に達するまでに空気流との間で十分混合し、一様な分布を持ちながら空気流と同じ平均流速

第 2 図 プラズマ活性基流入条件

（1,900 [m/s]）で流れ込むと仮定する。この場合、活性基の浸透具合を、空気流中における活性基の存在範囲の大小により第 2 図のような二通りの状態で模擬する。すなわち活性基が広く超音速空気中に拡散して計算領域に流れ込む拡散条件（*-W-*）および、ごく狭い領域に高い密度を保って流入する高密度条件（*-N-*）である。数値シミュレーションを行う際に、拡散条件では超音速空気の流入境界を構成するセル 130 個のうち、リップに近い 120 個から活性基を一樣流入させ、一方、高密度条件ではリップに最も近いセル 2 個から集中流入させる。

以上の二条件に対し、第 4 表に示すとおり、プラズマ流には全ての組合せで等しいモル流束と熱流束の総量を与え、これを基準小流束条件（*-*-r）とした。拡散条件（*-W-r）では、モル流束 2.64×10 [mol/m²s]、熱流束 1.59×10^6 [J/m²s] となり、高密度条件（*-N-r）の場合は拡散条件の 60 倍値を取る。このとき、単原子酸素プラズマの温度は超音速空気流と同じ 1,500 [K] で与えられる。プラズマ活性基の流量は高温の超音速空気流と比べて非常に小さく（総空気モル流量の 0.158%，総空気熱流量の 0.113%），

第 4 表 プラズマ流入条件

	拡散基準小流束	高密基準小流束	高密特大流束
	*-W-r	*-N-r	*-N-NQ
モル流束 [mol/m ² s]	2.64×10	1.58×10 ²	2.22×10 ³
熱流束 [J/m ² s]	1.59×10 ⁶	9.54×10 ⁷	3.11×10 ⁹
流入温度 [K]	1,500	1,500	50,000

第 3 図 高密条件プラズマによる H₂O 生成効率 (熱的效果と化学的效果の比較)

作動流体を純粋酸素分子としてプラズマトーチの仕様を推定すれば、計算領域の二次元単位奥行長さなりに換算して、酸素ガス供給量 1.2×10^{-2} [l/s]、有効電力消費量 264 [W] であり、実験に使用されている実際のトーチと比べて、非常に小型なものに相当する。

3. 計算結果

本研究で基準とした流束条件は微小な計算領域内部に大規模な燃焼を起こすまでに至らず、従って、流れ場に関しては燃焼による顕著な変化を生じない。以下、各種の微量な反応生成物質の空間分布を示すことにより、初期燃焼促進の進行過程を明らかにする。

3.1 熱的および化学的影響 最初に、プラズマトーチ本来の高エネルギー源としての特性が燃焼促進に及ぼす効果を調べた。純粋な熱的寄与の評価には不活性種とした窒素分子をプラズマ粒子として使用する。流入温度 50,000 [K]、モル流束 2.22×10^3 [mol/m²s]、熱流束 3.106×10^9 [J/m²s] という非常に大きな流束を与えた熱的プラズマ (N₂-N-NQ) と基準小流束 (O-N-r) の化学的プラズマとの比較を、H₂O 生成効率 η_p をもって評価し、第 3 図に示した。上側が η_p 、下側がその x 方向勾配 $d\eta_p/dx$ である。図中、比較のために化学活性基の導入無し (Plasma Off, 自発着火) の結果も示したが、プラズマ噴射の燃焼促進効果は明らかで、さ

(a) 水酸基: OH (等高線間隔 2×10^{-4} [mol/m³]) (b) 水蒸気: H₂O (等高線間隔 5×10^{-5} [mol/m³])

第 4 図 単原子酸素、拡散条件、基準小流束プラズマ (O-W-r) による生成物質の等モル濃度線図

らに化学的プラズマの方が優れている。すなわち、熱的プラズマは流入境界付近で即時の燃焼開始に成功するが、そのすぐ下流の燃焼促進効果は小さく、勾配図を読み取る限り燃焼は完全に滞っている。化学的プラズマは、下流域において継続的に燃焼を促進し、計算領域の外へ継続的な効果を期待させる勾配を示す。熱的にのみ反応機構を加速した場合、発生頻度の小さな -⑤ および -⑥ (自発着火性起鎖反応) を経由した H₂O 生成には限界がある。これに対し、単原子酸素プラズマは発生頻度の大きな -① を経由して効率良い H₂O 生成を実現する。この結果から、プラズマトーチのイグナイタとしての役割が、熱的な側面よりむしろ化学活性基の供給にあることが明らかとなった。また、僅かのプラズマ活性基の存在によって、自発着火と比べ 5 桁以上も大きな燃焼効率と即発的燃焼の可能性も確認した。

3.2 単原子酸素と単原子水素 第 4~7 図は、拡散条件、基準小流束の場合について単原子酸素 (O-W-r) と単原子水素 (H-W-r) による燃焼促進効果を比較したものである。

各活性種ごとの特徴は第 4, 5 図の水酸基 (OH) および水蒸気 (H₂O) の等モル濃度線図から明らかである。OH 生成の場合、-① を活性化させる単原子酸素は空気流中へ浸透してきた水素との反応を主として、剪断層のすぐ外 (空気) 側に反応領域を幅狭く楔型に形成する (第 4 図)。一方、単原子水素は -② により空気中の酸素と直接反応するため、流入境界直後から空気流のほぼ全域で OH 生成を始めるが、その領域は水素噴流に対し空気流側へやや離れて位置する (第 5 図)。次に、一次生成物質の OH が分枝反応 ③ により H₂O へ還元される場合、多量の水素が存在する

(a) 水酸基：OH（等高線間隔 $2 \times 10^{-4} \text{ [mol/m}^3\text{]}$ ）

(b) 水蒸気：H₂O（等高線間隔 $5 \times 10^{-5} \text{ [mol/m}^3\text{]}$ ）

第5図 単原子水素，拡散条件，基準小流束プラズマ（H-W-r）による生成物質の等モル濃度線図

(a) OH モル濃度比較図

(b) H₂O モル濃度比較図

第6図 拡散条件，基準小流束プラズマによる生成物質の断面分布（実線：O-W-r，破線：H-W-r）

水素噴流近傍が最適と考えられる．第4図と第5図とでは，単原子酸素プラズマの方が，水素噴流近傍でOHを集中的に生成するため，効率の良いH₂O変換が継続する．一方，単原子水素によるOHは，即発的かつ広範に生成されながら還元されるのは一部に留まる．実際，H₂O生成領域は似通った位置にありながら，両者の生成量の差は大きい．

第6図は x 方向の6断面（ $x/h=0.17, 2.27, 4.37, 6.47, 8.57, 10.7$ ）でのOHとH₂Oのモル濃度分布を示す．それぞれの断面図は縦軸に y 方向，横軸にモル濃度の無次元値（ $x/h=10.7$ 断面における実線グラフの最大値により無次元化）を示している．単原子水素による即発的なOH生成や

第7図 拡散条件，基準小流束プラズマによるH₂O生成効率（単原子酸素と単原子水素の比較）

第8図 主要反応経路図

単原子酸素による下流部の優勢なH₂O生成など前述のとおりである．第7図はH₂O生成効率図であり，第4～6図と同様に，単原子酸素プラズマが燃焼促進に非常に有効であることを示す．単原子水素は $x/h < 2$ で高い効率値を示しているが，単原子酸素は $x/h > 6$ で急激に効率を上昇させて関係を逆転させており，効率勾配の傾向から判断して計算領域を外れた下流域にまで継続した燃焼促進を期待できる．

以上のとおり，水素濃度の高い領域における分枝反応の継続的な進行の重要性は明らかであり，プラズマトーチを使用する際には，いかにプラズマ活性基を混合領域まで失活させずに効率良く導入するかについて十分留意しなくてはならない．

単原子酸素と単原子水素の燃焼促進効果の差は，第8図に示すとおり，各々の活性基が関係する反応経路の化学ポテンシャルの大小から説明できる．単原子水素からH₂Oに至る主要経路は，OHを中間生成物とする－②と③によるものと，HO₂を経由する と によるものの二つがある．

第 9 図 単原子酸素，基準小流束プラズマによる生成物質の断面分布
(実線：O-W-r，破線：O-N-r)

前者は起鎖・分枝反応ともに比較的小さな活性化エネルギー E_a の二体反応であるため，こちらが反応促進の優先経路である．後者は発生頻度の小さな三体の起鎖反応と巨大な E_a を要求する分枝反応で構成され，高密・高温条件下で主力となる大発熱反応である．しかし，第 3 表の温度環境では HO_2 は事実上の反応停止物質となるため，単原子水素の反応経路には化学的な損失が生じる．これに対して，単原子酸素は，主要経路が一つなうえ，起鎖反応①の E_a も②のそれより小さく，剪断層を通過直後の未だ低温の水素との間でも OH 生成を容易に行い得る．また，①は吸熱量も小さく，同温なら②からよりも化学的に高活性な OH を生成するため，一次生成された OH が分枝反応③へ継続する確率も高まり，全体として反応領域を水素噴流近傍へ移動させ， H_2O 生成速度を向上させる．

以上の点から，プラズマトーチの作動ガスとして酸素を用いることが有効との指針を得る．この単原子酸素の燃焼促進に対する優位性は堀沢らの実験的研究⁵⁾の結果と一致している．同様の結論は，三谷による簡略化した水素-酸素反応系に対する解析的研究²⁰⁾からも導かれている．

3.3 拡散噴射と高密噴射 次にプラズマ噴射形態の違いが燃焼促進に及ぼす影響について述べる．

3.3.1 単原子酸素プラズマ 第 9, 10 図に単原子酸素，基準小流束のプラズマを，拡散条件 (O-W-r) または高密条件 (O-N-r) で使用した場合の比較結果を示す．

第 9 図の x 方向 6 断面の分布を見ると，高密条件の反応領域は剪断層内部の水素噴流寄りに非常に狭い幅で位置する．モル濃度の大きなプラズマ活性基は空気側へと浸透

第 10 図 単原子酸素，基準小流束プラズマによる H_2O 生成効率 (拡散条件と高密条件の比較)

を始めたばかりのまだ冷たい水素とさえ即発的反応を生じるが，冷却や再結合反応によりプラズマの化学的活性が低下する下流部では反応発生頻度を落とし，総量的に中規模の H_2O 生成に留まってしまう．一方，拡散条件の場合は，高温の空気流内部に反応領域を位置させ，空気からの熱吸収で活性が向上した水素との間で高速の反応を行うため，下流にわたり継続的で活発な OH/ H_2O 生成が可能である．従って，高密条件が効率良い超音速燃焼を実現するためには，プラズマ化学種の活性が低下し切ってしまう前に，自発的な大規模燃焼が始まるような混合促進の工夫を必要とする．

第 10 図に H_2O 生成効率図を示す．第 9 図を反映して， $x/h = 7$ 付近で二本の効率グラフは交叉し，拡散条件が継続性を，高密条件が即発性の利点を示している．この図で興味深いのは，むしろ効率勾配図の方である．高密条件は流入境界近く ($x/h < 2$) で漸次 H_2O 生成速度を上昇させ，それ以降はほぼ一定の生成速度を維持する．これに対し，拡散条件は $1 < x/h < 3$ の範囲でゆっくりではあるが H_2O 生成速度を高め，高密条件と並んだ後， $x/h = 6$ 付近からさらに生成速度を上昇させる．この二段階の反応は，前報¹²⁾に記述した混合の二段階過程と密接に結び付いている．すなわち，噴射水素は混合の第一段階で空気との運動量交換に伴う渦を放出するが，まだ低温のままで化学的活性は非常に低いため，高密条件のプラズマ活性基では継続的な反応を得られない．拡散条件のプラズマ活性基も $1 < x/h < 3$ では同様に低温状態の水素との反応であり，両条件の効率勾配は低いまま等しい．しかし，拡散条件の活性基は，その下流部において混合第二段階 (空気との十分なエネルギー交換) を経て化学的活性の向上した高温水素と反応を始めるため， H_2O 生成を急激に加速させる．

(a) OH モル濃度比較図

(b) H₂O モル濃度比較図

第 11 図 単原子水素，基準小流束プラズマによる生成物質の断面分布（実線：H-W-r，破線：H-N-r）

3.3.2 単原子水素プラズマ 第 11, 12 図は，同様に単原子水素，基準小流束のプラズマに対して，拡散条件（H-W-r）または高密度条件（H-N-r）を適用した場合の比較結果である．

第 11 図の 6 断面における OH 分布から，－②により空气中の酸素から直接 OH を生成できる単原子水素は，単原子酸素（第 9 図）と異なり，拡散条件，高密度条件の区別無く，非常に即発性に優れている．特に左端面の高密度条件の OH ピークは特徴的であるが，この集中生成は下流部の OH 増加には繋がっていない．対照的に拡散条件の OH は下流域に向かって継続的に増え続けている．H₂O 量に関しても，生成開始直後では高密度条件が上回るものの下流部では拡散条件が優勢である．高密度条件の活性基は低温水素濃度の高い領域で反応を進めるため，自身の化学的活性の低下が非常に速く，下流部で継続的な反応を維持できない．加えて，主要起鎖反応－②の吸熱量が比較的大きいことも不利に働く．こうして，活性の落ちた状態で生成される OH と低温の水素が緩慢に分枝反応③を進行させる高密度条件よりも，高温の空気流中で H₂O 生成を行う拡散条件の方が有利となる．H₂O 生成効率を示す第 12 図にも，上記の高密度条件の即発性と拡散条件の継続性が観察され，高密度条件だと $x/h \geq 2$ で効率勾配がほぼ一定となり，継続的な促進に劣る．これは分枝反応③による OH 消費量と起鎖反応－②の OH 生成量とが釣り合っていることを意味する．化学的活性を落とした単原子水素には新たに起鎖反応を起こすだけの余裕がないから，③により H₂O と共に二次生成される高エネルギーの単原子水素が－②の発生に寄与すると考えられる．つ

第 12 図 単原子水素，基準小流束プラズマによる H₂O 生成効率（拡散条件と高密度条件の比較）

第 5 表 強制着火剪断流条件

	超音速空気 静温 [K]	音速水素 静温 [K]	速度比 $v_{\text{air}}/v_{\text{H}_2}$
Case A	1500	250	1.58
Case B	1000	250	1.29
Case C	750	250	1.11

超音速空気静圧： 1.01×10^5 [Pa] マッハ数：2.44
音速水素静圧： 1.01×10^5 [Pa] マッハ数：1.00

まり，低温環境で単原子水素は，かろうじて触媒的な働きを行い，一定の H₂O 生成速度を保つのに役立っている．

3.4 強制着火効果 以上の結果から，最も燃焼促進効果の高いプラズマ噴射形態の組合せとして，単原子酸素，拡散条件，基準小流束（O-W-r）が挙げられる．そこで，この条件を用いて，第 5 表に示すとおり超音速気流静温をパラメータとした三つの剪断流条件に対するプラズマ活性基の強制着火効果を解析した．その結果を第 13 図に示す．それぞれケース A は前報¹²⁾と同じ自発着火条件，ケース B は弱着火条件，ケース C は水素-酸素系の着火限界²¹⁾を下回る非着火条件に相当する．

三ケースのうち弱着火条件の B と非着火条件の C では，プラズマ噴射無しの自発着火解析を行った場合，計算領域内部に初期燃焼の発生は全く認められなかったが，プラズマ活性基の導入に伴い強制着火に成功した．ただし，ケース B の初期燃焼がケース A 同様に混合開始からほとんど時間遅れなく始まっているのに対して，ケース C の燃焼開始には大きな時間遅れが認められ，非常に不安定な燃焼状態を示す．しかし，ケース A かつプラズマ活性基導入無しの自発着火に比べ 3 桁以上大きな燃焼効率を達成し，プラズマ導入は着火源として極めて有効に機能することが明らかである．

第 13 図 単原子酸素，拡散条件，基準小流束プラズマ (O-W-r) による H_2O 生成効率 (強制着火解析)

4. 結 論

超音速空気と音速噴射気体水素により形成される二次元超音速剪断流における初期燃焼を促進させる目的でプラズマトーチを導入する際の主動作要因 (プラズマの化学種，噴射形態，モル流束および熱流束) のうち，化学活性基の種類と噴射形態をパラメトリックに変化させ，DSMC 数値解析により， H_2O 生成効率を用いて比較評価し，以下の知見を得た。

- ・プラズマトーチの着火性能はその大部分を熱的な寄与よりも，化学活性基供給源としての機能に依存する。
- ・熱的および物質的な損失の少ない単純な反応経路を持つ単原子酸素の方が，複雑な反応経路を有する単原子水素よりも強い燃焼促進効果を持つ。
- ・プラズマ噴射形態としては，高密度条件が反応の即発性に優れる一方，拡散条件は継続性に優れている。実用に際しては，最終的に大きな燃焼促進効果の得られる拡散条件に即した化学活性基導入が望ましい。
- ・拡散単原子プラズマ状態を実現するトーチシステムの作動により，着火限界を下回る超音速空気温度条件においても，燃料水素の着火が可能となる。

参 考 文 献

- 1) Nagashima, T., Kitamura, T. and Obata, S.: Supersonic Combustion of Hydrogen in Tandem Transverse Injection with Oxygen Radicals, ISABE Paper 97-7055, 1997.
- 2) Northam, G. B., McClinton, C. R., Wagner, T. C. and O'Brien, W. F.: Development and Evaluation of a Plasma Jet Flameholder for Scramjets, AIAA Paper 84-1408, 1984.

- 3) Wagner, T. C., O'Brien, W. F., Northam, G. B. and Eggers, J. M.: Plasma Torch Igniter for Scramjets, J. Propul. Power, **5** (1989), pp. 548-554.
- 4) Kimura, I., Aoki, H. and Kato, M.: The Use of a Plasma Jet for Flame Stabilization and Promotion of Combustion in Supersonic Air Flows, Combust. Flame, **42** (1981), pp. 297-305.
- 5) 堀沢秀之，木村逸郎，佐山正己：プラズマジェットの着火・保炎機構に関する研究，日本航空宇宙学会誌，**40** (1992)，pp. 285-294.
- 6) Sato, Y., Sayama, M., Ohwaki, K., Masuya, G., Komuro, T., Kudou, K., Murakami, A., Tani, K., Wakamatsu, Y., Kanda, T., Chinzei, N. and Kimura, I.: Effectiveness of Plasma Torches for Ignition and Flame-Holding in Scramjet, J. Propul. Power, **8** (1992), pp. 883-889.
- 7) Masuya, G., Kudou, K., Murakami, A., Komuro, T., Tani, K., Kando, T., Wakamatsu, Y., Chinzei, N., Sayama, M., Ohwaki, K. and Kimura, I.: Some Governing Parameters of Plasma Torch Igniter/Flameholder in a Scramjet Combustor, J. Propul. Power, **9** (1993), pp. 176-181.
- 8) Takita, K., Uemoto, T., Sato, T., Ju, Y., Masuya, G. and Ohwaki, K.: Ignition Characteristics of Plasma Torch for Hydrogen Jet in an Airstream, J. Propul. Power, **16** (2000), pp. 227-233.
- 9) Obata, S. and Nagashima, T.: Plasma Torch Operation Effect upon Initial Enhancement of Hydrogen Combustion in a 2-D Supersonic Mixing Layer, ISABE Paper 95-7107, 1995.
- 10) Kato, R. and Kimura, I.: Numerical Simulation of Flame-Stabilization and Combustion Promotion by Plasma Jets in Supersonic Air Streams, Proceedings of Twenty-Sixth Symposium (International) on Combustion, 1996, pp. 2941-2947.
- 11) Takita, K.: Ignition and Flame-Holding by Oxygen, Nitrogen and Argon Plasma Torches in Supersonic Airflow, Combust. Flame, **128** (2002), pp. 301-313.
- 12) 小幡茂男，長島利夫：超音速剪断流中の水素ガス初期燃焼への気体分子運動論的アプローチ．第 2 報：化学反応過程，日本航空宇宙学会論文集，**51** (2003)，pp. 484-491.
- 13) Bird, G. A.: Molecular Gas Dynamics, Oxford University Press, London, 1976.
- 14) Koura, K.: Null-Collision Technique in Direct-Simulation Monte Carlo Method, Phys. Fluids, **29** (1986), pp. 3509-3511.
- 15) Borgnakke, C. and Larsen, P. S.: Statistical Collision Model for Monte Carlo Simulation of Polyatomic Gas Mixture, J. Comput. Phys., **18** (1975), pp. 405-420.
- 16) Obata, S. and Nagashima, T.: Reacting Molecule Model for Inelastic Collisions in DSMC Analysis, Thermal Sci. Eng., **3** (1995), pp. 13-19.
- 17) Serikov, V. V.: Weighting Schemes for Monte Carlo Simulation and Their Applications to the Calculation of Shock Waves in Multicomponent and Reactive Gases, Proceedings of the Seventeenth International Symposium on Rarefied Gas Dynamics, 1990, pp. 808-815.
- 18) Evans, J. S. and Schexnayder, Jr., C. J.: Influence of Chemical Kinetics and Unmixedness on Burning in Supersonic Hydrogen Flames, AIAA J., **18** (1980), pp. 188-193.
- 19) 小室智幸，村上淳郎，工藤賢司，升谷五郎，鎮西信夫：円形断面スクラムジェットの燃焼器の実験 (I) 模擬飛行マッハ数 4.4，航空宇宙技術研究所報告，TR-918, 1986.
- 20) 三谷 徹：スクラムジェットにおける化学反応簡略化による考察，航空宇宙技術研究所報告，TR-1184, 1992.
- 21) Voevodsky, V. V. and Soloukhin, R. I.: On the Mechanism and Explosion Limits of Hydrogen-Oxygen Chain Self-Ignition in Shock Waves, Proceedings of Tenth Symposium (International) on Combustion, 1965, pp. 279-283.