

高圧雰囲気下において有効なプラズマ点火器の開発

研究代表者 東北大学大学院工学研究科 助教授 滝田謙一

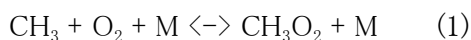
共同研究者 プリンストン大学機械航空工学科 助教授 Yiguang Ju

1. 緒言

著者らは、長年にわたりスクラムジェットエンジンの強制点火器としてプラズマジェット(PJ)トーチを研究^[1,2]してきた。PJ の利点は大量の活性ラジカルの燃焼場への直接注入による着火・燃焼の促進であると考えられている。しかし、これまでの実験結果^[1,2]において、そのラジカルの効果のみを陽に抽出するのは困難であった。例えば、PJ の下流から燃料を噴射した場合、作動ガス種つまりはラジカル種によらず、ほとんどの条件で強い燃焼を起こすことは不可能であった。一方、PJ 上流から燃料を噴射し、燃料をPJに直接衝突させた場合、プラズマへの投入電力が高ければ、作動ガス、燃料の種類によらず、強い燃焼を起こすことができた。PJ に含まれるラジカルの失活は速く、ラジカルの存在領域は PJ の極めて限られた高温領域のみであると考えられる。作動ガスに酸素/窒素混合気を用いた場合やプラズマと主流空気の混合・反応によりNOやNO₂も生成され、それらはOラジカル等の活性ラジカルに比べてかなり安定である。超音速流における着火実験^[1]においても、PJ プルームに黄緑色の帯が観測されており、それらはNO_xからの発光であると考えられている。近年、NO、NO₂についても、それらの微量添加が水素^[3]やメタン^[4]の着火を著しく促進することが報告されている。また、NO_xによる着火促進効果は高圧雰囲気下で特に強く現れること^[3]が示されている。高圧雰囲気では再結合反応によるラジカルの失活が極めて早く、ラジカル効果は期待できないが、高圧雰囲気でも比較的安定なNO_xをPJにより燃焼場に供給できれば有効な着火促進技術となりうる。本研究では酸素/窒素混合作動ガスを用いたPJを用いて高圧燃焼場に適量のNO_xを供給することにより着火を促進する技術の開発を試みた。まず、着火遅れの計算により微量のNO_x添加効果を調べ、続いて、高圧雰囲気での酸素/窒素混合PJの噴射実験、作動特性の調査、分光分析等を行った。

2. 数値計算法

水素及び炭化水素系燃料へのNO、NO₂の添加効果の圧力依存性を数値計算により調べた。計算にはCHEMKIN ライブラリ^[5]に含まれるSENKINコードを用いた。反応モデルにはGRI Mech. Ver 3.0^[6]を用い、NO、NO₂の低温反応を考慮するため以下の反応式^[4,7,8]を加えた。



着火時間の定義は、初期温度から200 K 上昇した時点とした。

3. 実験装置

3-1 PJトーチ

Figure 1 にプラズマトーチの断面概略図を示す。棒形状の陰極とノズル形状の陽極との間にアーク柱を形成し、陰極の周りから作動ガスを流すことでこれを加熱・プラズマ化し、高温の PJ が噴射される。陰極にはハフニウム(Hf)を用いている。これは作動ガスとして酸素を用いる場合、作動時に表面に高融点酸化皮膜を形成し陰極の酸化消耗を抑えるためである。陽極はタフピッチ銅(TCu)製のものを用いた。冷却方式は大電力での作動を可能にするため水冷とし、冷却水は PJ トーチを覆う外形 23mm のアウターノズル内を流れる。冷却水の流量は約 12g/s である。最も損傷が激しくなるノズルスロート部は、外付け部品として PJ トーチ本体を分解せずとも容易に交換できる構造になっている。ノズルスロート部の直径は 1.5mm である。本研究では PJ 作動ガスとして酸素、窒素及び酸素／窒素混合気を用いた。

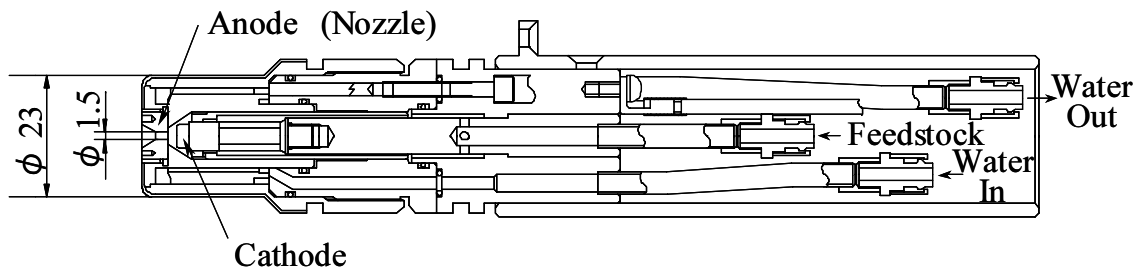


Figure 1 Cross section of plasma torch

3-2 高圧容器

本研究では PJ の高圧容器内への噴射実験及びその分光分析を行った。Figure 2 に実験装置の概略図を示す。PJ の噴射は、耐圧 4.0 MPa、内径 170 mm のステンレス製円筒型高圧容器内で行った。PJ トーチは容器上蓋に取り付け、鉛直下向きに PJ を噴射する。また、容器には内部観測用の石英ガラス窓が対向して2枚設置されており、PJ の直接写真を測定した。容器内を窒素または酸素で充填した後、PJ トーチを作動させ、PJ を噴射した。

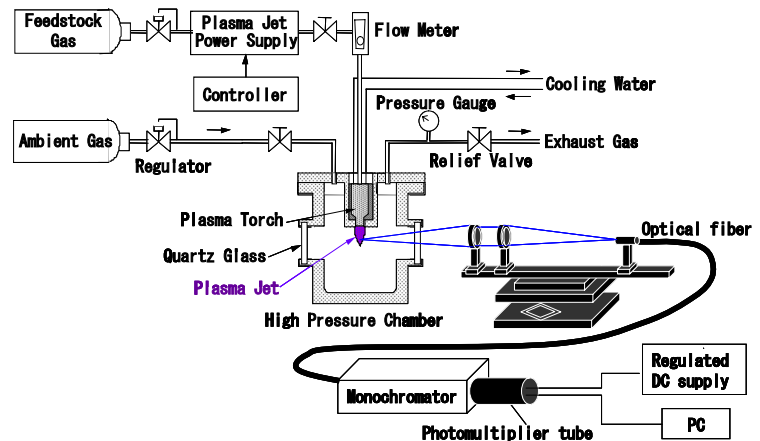


Figure 2 Experimental apparatus

3-3 分光計測

分光にはファインポリクロメータ(分光計器製 MK-300, 回折格子(1200 grooves/mm), 焦点距離 300 nm)を用いた。PJ からの輻射光は集光レンズを介して、光ファイバーに入射し、分光器により分

光される。測定は CCD カメラの最も測定時間の感覚が短い 65.3 Hz で 50 回計測を行い、平均値を算出した。

4. 計算結果

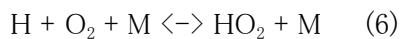
4-1 水素に対する結果

Figure 3 に水素／空気予混合気の着火遅れ時間に対する O, NO, NO₂ 添加効果の圧力依存性を示す。混合気初期温度は 1200K、添加ラジカル量は全体に対して 0.1 %である。低圧においては NO の添加効果は現れないが、0.3 MPa を越えると O ほどではないものの、NO の添加による顕著な着火遅れの短縮が見られる。水素に対しては、NO₂ の添加の効果は全般に小さい。

水素に対する NO の添加による着火促進は以下の反応によるものであることが知られている。



NO の触媒反応は、以下の H と O₂ の競合反応において、HO₂ の生成が支配的となる第 2 爆発限界よりも高圧側 (低温側) で顕著となる。特に初期温度が低い時には、NO 添加効果は顕著であり、1000 K の時には NO と O の添加効果はほぼ同等となる。



4-2 メタンに対する結果

Figure 4, Figure 5 に雰囲気圧力が 0.1 MPa および 1.0MPa におけるメタン／空気予混合気の着火遅れ時間に対する O, NO, NO₂ の添加効果を示す。2つの図から、NO₂ に関しては雰囲気圧力、初期温度によらず、着火遅れ短縮効果があることがわかる。特に、混合気初期温度が 1400 K 以下であれば、O ラジカルの添加よりも効果的である。NO₂ の添加は前述の反応 (3) によるものであり、2体反応であるため圧力依存性がないと考えられる。一方、NO の添加効果は圧力が増加するにつれて、着火促進効果が現れる初期温度範囲が拡大しているのがわかる。NO の着火促進効果は反応 (1)、(2) を介してであり、(1) が 3体反応であるため圧力依存性が現れたと考えられる。混合気初期温度が 1100 K 以下では、NO の添加が最も効果的となる。

4-3 エチレンに対する結果

Figure 6, Figure 7 に雰囲気圧力が 0.1 MPa および 1.0MPa におけるエチレン／空気予混合気の着火遅れ時間に対する O, NO, NO₂ の添加効果を示す。エチレンに対しても、メタン、水素同様、NO, NO₂ の添加による着火遅れの短縮効果が現れる初期温度範囲が圧力とともに増大する結果が

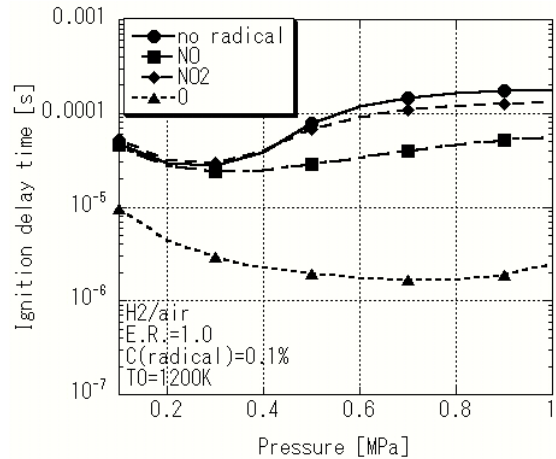


Figure 3 Ignition delay time of H₂/air mixture

得られた。しかし、それらの効果は低温反応(1)から(3)を導入しなくても現れたため、エチレンの酸化反応の途中経路において生成される水素に対する触媒反応(4)、(5)が重要になると考えられる。低温反応(1)から(3)は CH_3 の酸化過程であり、エチレンの場合は C_2H_3 の酸化過程が律速段階となるためと考えられる。

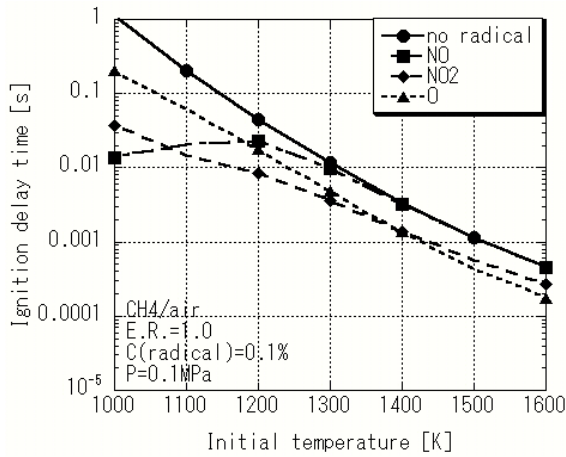


Figure 4 Ignition delay time of CH_4/air mixture
($P = 0.1 \text{ MPa}$)

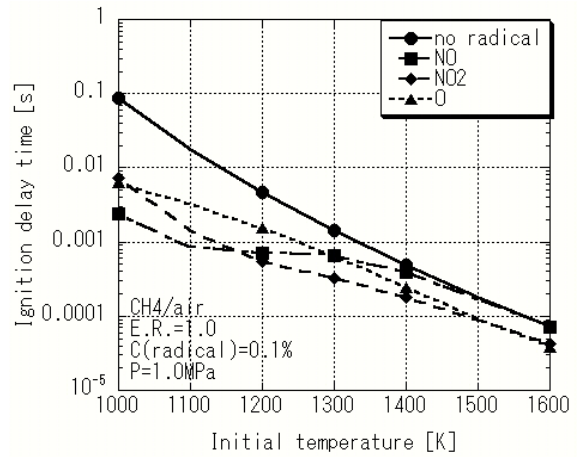


Figure 5 Ignition delay time of CH_4/air mixture
($P = 1.0 \text{ MPa}$)

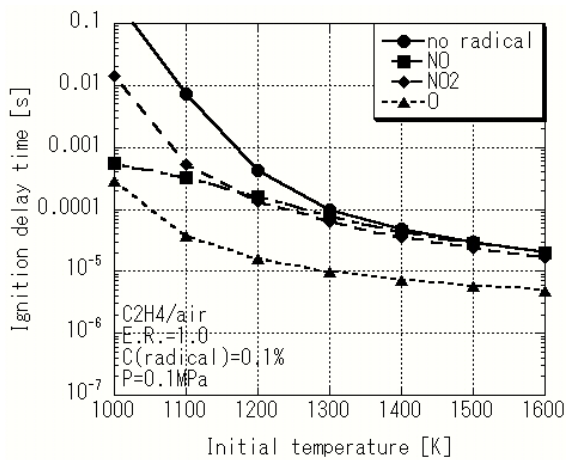


Figure 6 Ignition delay time of $\text{C}_2\text{H}_4/\text{air}$ mixture
($P = 0.1 \text{ MPa}$)

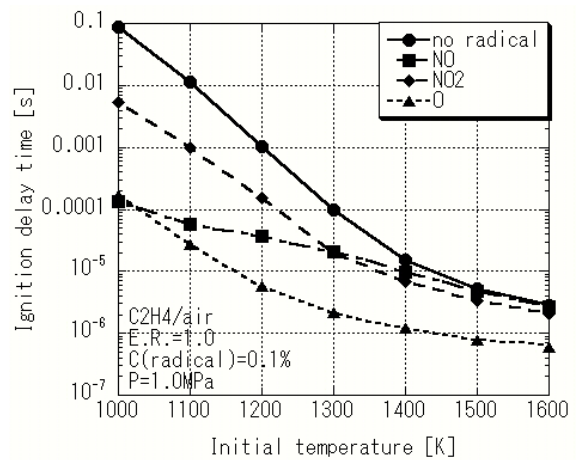


Figure 7 Ignition delay time of $\text{C}_2\text{H}_4/\text{air}$ mixture
($P = 1.0 \text{ MPa}$)

5. 実験結果

前章において、高圧下ほど NO 、 NO_2 の微量添加が水素及び炭化水素系燃料の着火遅れを短縮する効果が強く現れることがわかった。本章では、酸素/窒素混合作動ガスPJを用いて、それら NO 、 NO_2 を高圧燃焼場に供給できるかを実験的に調べる。高圧雰囲気ではプラズマアークが不安定になること^[9]も予想されたため、燃焼実験に先立ち、高圧雰囲気におけるPJの作動特性を調べた。

5-1 高圧雰囲気へ噴射されたPJの安定性

雰囲気圧力 0.5MPa までにおいては、作動ガスによらず、安定に PJ を作動、噴射させることができた。安定な PJ を噴射できる最低投入電力は圧力とともに上昇するが、その勾配は緩やかであり、投入電力が3 kW 以上であれば、雰囲気圧力 0.5 MPa でも安定した PJ が観測された。また、酸素を作動ガスとした場合の陽極の損傷は高圧ほど激しかった。

5-2 PJ の発光色の変化

PJ の直接写真を分析すると、雰囲気圧力の変化に伴い、PJ の色が変わることが確認された。例えば、窒素雰囲気中に噴射された窒素 PJ の色は、圧力によらず黄色であったが、酸素 PJ の場合は、0.3 MPa 程度までは白色であるが、徐々に赤みがかかり、0.5 MPa においては完全な赤色を呈した。酸素／窒素混合 PJ はこの中間的な性質を示した。これらの結果は、圧力の変化に伴い PJ の組成が変化していることを示唆する。また、酸素 PJ の場合、周囲を酸素雰囲気とすると色の変化は見られなかった。窒素雰囲気では周囲窒素と酸素プラズマの反応により NO_x が発生していると考えられる。Figure 8, Figure 9 に窒素雰囲気、酸素雰囲気中に噴射された酸素 PJ の直接写真を示す。



Fig.8 Direct photograph of O₂ PJ in N₂ atmosphere (P = 0.5 MPa)



Fig.9 Direct photograph of O₂ PJ in O₂ atmosphere (P = 0.5 MPa)

5-3 PJ の分光分析

Figure 10, Figure 11 に酸素／窒素混合作動ガスの PJ の分光結果を示す。周囲ガスの影響を排除するためアルゴン雰囲気で噴射実験を行っている。測定波長範囲は 400～900nm であり、Figure 10 は混合割合が酸素 21%、窒素 79%、Figure 11 は混合割合が酸素 50%、窒素 50%の結果である。両図において NO(560nm-820nm)及び NO₂(390nm-640nm)からと思われる帯スペクトルが観測されており、それらが生成されていることが確認できる。また、圧力の増加とともに輻射強度が大きくなっていることもわかる。混合割合と NO_x の輻射強度の関係については必ずしも、定量的な関係を得ることができなかったが、全般に混合気中の窒素割合が大きいほど NO_x からの発光が強い傾向となった。窒素割合が大きいほど、窒素イオン(580nm,647nm 等)や窒素原子(747nm, 822nm 等)からの発光強度が強く、逆に酸素割合が大きくなると酸素原子(777nm, 845nm 等)からの発光強度が強くなることもわかった。

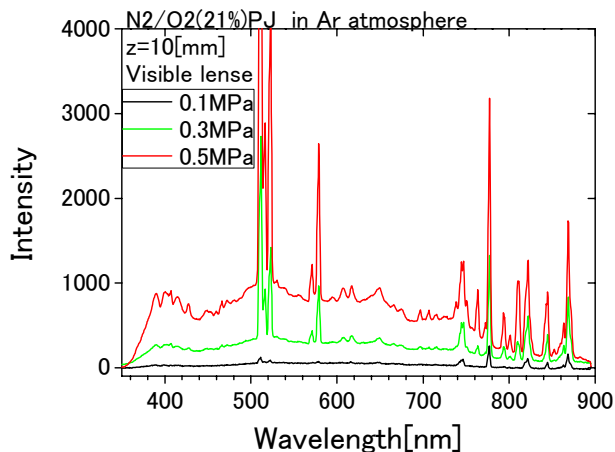


Fig.10 Spectral radiation from O₂(21%)/N₂ PJ

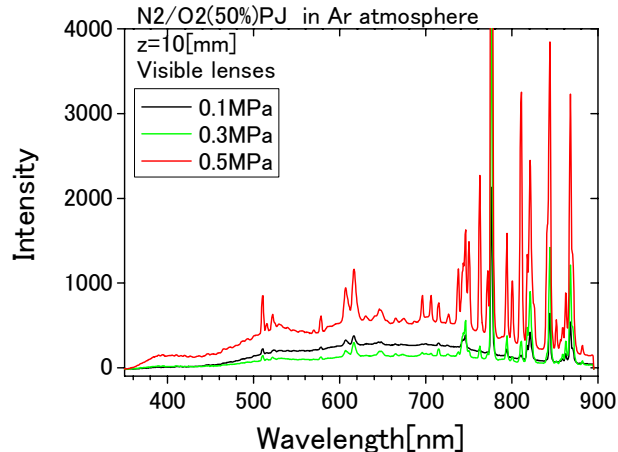


Fig.11 Spectral radiation from O₂(50%)/N₂ PJ

6. まとめと今後の課題

本研究の着火遅れの解析により、NO 及び NO₂ の微量添加が水素及び炭化水素系燃料の着火を促進することが示された。そのNO_x 効果は圧力が高いほど顕著になることも示された。さらに、酸素／窒素混合作動ガスを用いた PJ の高圧雰囲気中への噴射実験を行い、高圧雰囲気でも安定な PJ を噴射できることを明らかにした。また、噴射 PJ 中にNO_x が存在し、それらは圧力や作動ガスの組成により変化することを示した。今後、着火実験を行い、NO_x 効果を検証し、さらに供給NO_x 量等の最適化を行う必要がある。

参考文献

- [1] T.Kitagawa, A.Moriwaki, K.Murakami, K.Takita, G.Masuya, *J.Propulsion and Power*, **19** (2003), No.5, 853.
- [2] K.Takita, K.Murakami, H.Nakane, G.Masuya, *Proc.Combustion Institute*, **30** (2005), 2843.
- [3] B.Han, C.J.Sung, M.Nishioka, *Combustion Science and Technology*, **176** (2004), 305.
- [4] Y.Tan, C.G.Fotache, C.K.Law, *Combustion and Flame*, **119** (1999), 346.
- [5] A.E.Lutz, R.J.Kee, J.A.Miller, SAND87-8248, Sandia National Laboratories, 1987.
- [6] G.P.Smith, D.M.Golden, M.Franklach, N.W.Moriarty, B.Eiteeneer, M.Goldenberg, C.T.Bowman, R.K.Hanson, S.Song, W.C.Gardiner Jr., V.V.Lissianski, Z.Qin, GRI-Mech 3.0 (1999), URL:http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/.
- [7] T.Amano, F.L.Dryer, *Proc. Combustion Institute*, **27** (1998) 397.
- [8] J.H.Bromly, F.J.Barnes, S.Muris, X.You, B.S.Haynes, *Combustion Science and Technology*, **115** (1996) 259.
- [9] 堤井 信力、小野 茂、プラズマ気相反応工学、(株)内田老鶴圃 (2000).