高温空気噴霧燃焼の可燃限界の解明

Flammability limits of the spray HiTAC

○学 前川 浩規 (豊橋技科大) 正 名田 譲 (徳島大院)
正 伊藤 高啓 (豊橋技科大) 正 野田 進 (豊橋技科大)

Hiroki MAEGAWA, Toyohashi University of Technology, 1-1 Hibarigaoka, Tempaku, Toyohashi, 441-8580, Japan
Yuzuru NADA, The University of Tokushima, 2-1 Minamijyousanjima, Tokushima, 770-8506, Japan
Takahiro ITO, Toyohashi University of Technology, 1-1 Hibarigaoka, Tempaku, Toyohashi, 441-8580, Japan
Susumu NODA, Toyohashi University of Technology, 1-1 Hibarigaoka, Tempaku, Toyohashi, 441-8580, Japan

Key Words: HiTAC, flammability limit, liquid fuel, recirculation vortex

1. 緒言

バイオ燃料を用いた高温空気燃焼^[1]は、NO_xとCO₂の排出量削減を同時に達成可能な燃焼技術である。バイオ燃料として液体燃料であるバイオディーゼル燃料や植物油を考えると、液体燃料を用いた高温空気燃焼のNO_x排出特性や燃焼を維持できる条件、すなわち可燃限界について把握する必要がある。以前の研究において、高温空気燃焼の可燃限界は、Well-stirred reactorの火炎構造に基づく可燃限界^[2]や、浮き上がり火炎の吹き飛び限界^[3]として予測されている。しかし、これらの研究は気体燃料を用いた高温空気燃焼を対象としており、液体燃料を用いた場合の可燃限界に関する研究はほとんど行われていない。本研究では、液体燃料を用いた高温空気燃焼の可燃限界の予測方法を確立するために、高温空気噴霧燃焼の可燃限界を明らかにし、燃焼形態との関係について検討した。

2. 実験装置および測定方法

図1に実験炉の模式図を示す。実験炉は高さ1000mm、200mm×200mmの矩形断面を有する小型燃焼炉である。炉底中央の二流体噴霧ノズル(BIMJ2004, いけうち)から、液体燃料が圧搾空気とともに炉内に噴霧される。噴霧ノズルの両側には、内径8mmの酸化剤ノズルが設置されている。噴霧ノズルと酸化剤ノズルの間隔は60mmである。炉内には壁面に沿って外径6mmのステンレス製冷却管が設置されており、最大2.3kWの熱損失を与えることができる。

燃料には灯油を用いており、燃料流量は全ての条件で0.57l/h一定とした。レーザー回折法による簡易粒径計測装置^[4]を用いて燃料液滴の粒径を計測した結果、燃料液滴のザウテル平均粒径は41.0μmであった。酸化剤はノズル直下に設置されたヒーターによって最高1023Kまで予熱され、炉内に投入される。酸化剤は空気と窒素の混合気であり、酸化剤の酸素濃度X_{O2}は21%から9%とした。酸化剤と圧搾空気を含めた総括当量比は0.81であり、圧搾空気のみに対する当量比は4.6である。

本研究では、炉出口における一酸化炭素(CO)濃度測定、炉出口からの火炎の直接撮影と液滴の可視化、および炉内の温度および酸素濃度測定を行った。炉出口に挿入されたプローブによ

り燃焼排ガスをサンプリングし、排ガス分析器(CGX-7000, 島津製作所)を用いてCO濃度を測定した。本研究では、測定されたCO濃度が300ppmを超えた条件を可燃限界としている。燃料液滴の可視化にはNd:YAGレーザー(GCR-170, Spectra-physics)を光源とする平面レーザー光を用いた。燃焼炉右側の炉壁、炉底面から高さx=50mmとx=150mmにレーザー入射用の窓が二つ設置されている。可視化された液滴は、炉出口からCCDカメラ(SXC-ST51, SONY)により撮影される。

炉内火炎の燃焼形態を明らかにするために、金属線を用いた炉内温度測定^[5]を行った。噴霧ノズル中心から10mmの位置に直径0.1mmの白金ロジウム線を鉛直方向に張り、その発光を炉側壁の観察窓からCCDカメラで撮影する。なお撮影は10秒間、30fpsで行った。白金ロジウム線の温度と発光強度の検定結果から、炉内の白金ロジウム線の温度分布を得ることができる。

過去に高温空気燃焼の研究から、炉内循環渦により上流側に輸送される既燃ガスの温度と酸素濃度が燃焼特性に強い影響を与えることが明らかにされている^[6]。循環渦により運ばれる既燃ガスの温度と酸素濃度の測定は、噴霧ノズルの両側60mmの位置に熱電対(R型)とサンプリングプローブを50mm炉内に挿入することにより行われた。

3. 実験結果および考察

図2に実験から得られた可燃限界を示す。T_aとX_{O2}は、それぞれ酸化剤ノズル出口における酸化剤温度と酸素濃度を示している。図中の線は可燃限界を示しており、線より下の条件では火炎は維持されず、不完全燃焼を起こす。Q_{out}は炉内に設置された冷却管による熱損失量を示している。本研究では、T_a=1023Kから100Kずつ予熱温度を下げていき、可燃限界を調査した。このため、図2に示す可燃限界はCO濃度が300ppm以上となる条件よりも100K予熱温度の高い条件である。予熱温度を下げるに従い、ノズルに付着した火炎、浮き上がり火炎、明確な輪郭を持つ火炎が数秒毎に発生する状態(間欠火炎)の三つが確認された。実験条件が可燃限界に近づくに伴い、炉内の火炎形態は付着火炎から間欠火炎へ遷移する。

冷却管による熱損失が無い場合(Q_{out}=0kW)、X_{O2}>12%では酸化剤が常温においても、パイロット燃料無しで燃焼を維持できている。この場合、炉内の循環渦により上流に輸送された高

Fig. 1 Schematics of the combustion furnace.

Fig. 2 Flammability limits of the spray HiTAC with respect to preheat temperature and O₂ concentration in oxidizer flows.

Fig. 3 Axial distributions of the mean temperature (X_{O_2} :15%).

Fig. 4 Probability density functions of the flame location.

温既燃ガスが着火源になると考えられる。熱損失量の増加に伴い、可燃限界が高温かつ高酸素濃度側へ移動し、可燃範囲は狭くなる。冷却管を挿入した場合、循環渦により運ばれる高温既燃ガスを直接冷却することとなる。このため、着火源となる既燃ガスの温度が低下し可燃範囲が狭くなったと考えられる。また、液滴の可視化結果から、熱損失量の増加に伴い液滴の到達距離が長くなることがわかった（図示せず）。これは、液滴周囲の既燃ガスの温度の低下により、燃料の蒸発速度が低下したためと考えられる。ただし、全ての条件において $x=150$ mm では液滴が観察されなかったことから、液滴の存在する範囲は $x<150$ mm である。

本研究で対象とした火炎は、浮き上がり火炎を経て消炎に至る。このことから、浮き上がり高さは可燃限界を表わす重要な指標となる。浮き上がり火炎に関する多くの研究^[3]では、浮き上がり高さは目視による観察から得られる。しかし、高温空気燃焼の場合、火炎を目視で確認できない。このため、白金ロジウム線を用いた温度測定から火炎の位置を特定する。図 3 に $X_{O_2}=15\%$ の条件における時間平均された炉内温度分布を示す。 $X_{O_2}=15\%$, $T_a=1023$ K および $T_a=723$ K においては、温度はノズル近傍から直線的に上昇しており、付着火炎が生じていると考えられる。一方、可燃限界条件である $X_{O_2}=15\%$, $T_a=423$ K においては、 $x=250$ mm 付近より急激な温度上昇がみられる。これは浮き上がり火炎に対応すると考えられる。このことから、浮き上がり火炎は液滴の存在する範囲 ($x<150$ mm) より下流に位置することがわかる。これは、可燃限界付近の火炎では、気体燃焼が支配的であることを示している。

本研究では、最高温度を示す位置を火炎位置と定義し、各時刻における火炎位置を求めた。図 4 は、火炎位置 h の確率密度関数 (PDF) を示している。図示した条件は全て可燃限界の条件である。最も存在確率の高い火炎位置は $h=280$ mm から $h=340$ mm である。これは、可燃限界の条件では、予熱温度および酸素濃度が異なるにも関わらずほぼ同じ火炎位置となることを示している。さらに、PDF の分布から、火炎は 100 mm 程度の幅で振動していることがわかる。

これらの測定結果より、火炎形態と可燃限界の関係について次のように考える。図 5 に火炎形態の変化を示す。図 5(a) から (c) への変化は、酸化剤温度を低下させた場合の火炎形態の変化に対応する。図中の矢印は、噴霧流と炉壁との間に形成された循環渦を示す。噴霧ノズルの噴霧角度から、循環渦は $x<580$ mm

Fig. 5 Schematics of spray flames in the HiTAC furnace ((a) attached flame, (b) lifted flame, (c) pulsed flame).

Fig. 6 Flammability limits of the spray HiTAC with respect to temperature and O_2 concentration in the recirculation vortex.

に位置すると考えられる。循環渦中心から下流側では、既燃ガスは上流側に循環され、上流側では既燃ガスは噴霧流に巻き込まれる。酸化剤予熱温度が十分に高い場合、既燃ガスも高温となる。循環された高温既燃ガスにより蒸発した燃料はノズル近傍で着火し、付着火炎が形成される。酸化剤予熱温度の低下は、既燃ガス温度の低下を招く。この結果、着火遅れ時間は長くなり、浮き上がり火炎が形成される。さらに酸化剤温度が低下すると、浮き上がり高さは高くなる。浮き上がり高さが渦中心より高くなった場合、燃料と酸化剤の未燃混合気が上流側に循環される。未燃混合気は高酸素濃度である一方、その温度は非常に低い。よって着火遅れは増大し、燃焼形態は間欠火炎に遷移し、消炎に至る。

上記の議論から、燃焼炉内の火炎の維持には、循環渦の温度が重要になると考えられる。そこで図 2 に示される可燃限界を、循環渦により循環される既燃ガスの温度 T_i と酸素濃度 X_{O_2} により整理する。図 2 と異なり、可燃限界は熱損失量の変化によらず 1 本の線で表現される。このことから、循環渦の温度と酸素濃度により可燃限界は表現できることがわかる。また、循環渦の酸素濃度は最高 10% に達している。これに対して、既燃ガスの酸素濃度は完全燃焼を仮定した場合、最高 3.2% である。循環渦の酸素濃度は既燃ガスの酸素濃度より高い。これは、循環渦が既燃ガスだけでなく、未燃の酸化剤も上流側に輸送していることを示している。これらの結果は、図 5 により示された火炎形態と可燃限界の関係を裏付けるものである。

4. 結論

本研究では、液体燃料を用いた高温空気燃焼における可燃限界の予測方法を確立するために、小型燃焼炉を用いた実験を行った。この結果、火炎は炉内循環渦により輸送される熱量の不足により消炎に至る。この熱量の不足は、火炎浮き上がり高さと炉内循環渦の位置関係により発生する。

参考文献

1. Katsuki, M., et al., Proc. Combust. Inst., 27 (1998), pp. 3135-3146.
2. Plessing, T., et al., Proc. Combust. Inst., 27 (1998), pp. 3197-3204.
3. Choi, B.C., Combust. Flame, 156 (2009), pp. 396-404.
4. 鈴木ら, 微粒化, 16 (2007), pp. 34-46.
5. 永野ら, 第 48 回燃焼シンポジウム講演論文集 (2010), pp. 476-477.
6. 名田ら, 日本機械学会論文集 B 編, 75 (2009), pp. 1870-1878.