

PS-16 希薄予混合ガスにおける着火・燃焼支援技術に関する研究

環境・動力系 * 市川 泰久、関口 秀紀

1. はじめに

近年、地球温暖化防止や原油代替燃料の観点から注目される天然ガスを燃料とする希薄燃焼方式（リーンバーン）のガス機関は、より希薄な条件で運転することで、更なる高出力化・高効率化が可能と考えられている。しかし、希薄化を進めると、着火が困難になると共に燃焼が不安定化する。このため、現状技術において希薄化には限界があり、この限界を拡大する研究開発が進められている¹⁾。そこで、本研究では、希薄化による火炎弱体化メカニズムを解明すると共に、希薄予混合ガスを強力に着火・燃焼する燃焼支援制御技術の検討を行っている。

本報では、副室燃焼方式のリーンバーンガス機関のシリンダ内燃焼を模擬したバーナ（主室バーナおよび副室バーナ）を製作し、副室からシリンダ内へ噴出される高温の燃焼ガス噴流（既燃ガス噴流）によって燃焼されるシリンダ内希薄予混合ガスの火炎弱体化メカニズムの解明を行った実験結果を報告する。また、希薄予混合ガスの燃焼支援制御技術の1つとして、反応性の高い電離気体であるプラズマに着目し、マイクロ波を用いたプラズマ生成実験装置を製作し、希薄予混合ガスをプラズマ化することによる着火・支援燃焼技術の可能性を検討した実験結果を報告する。

2. バーナ火炎による火炎弱体化メカニズムの解明

副室燃焼方式のリーンバーンガス機関の希薄燃焼における火炎弱体化メカニズムの解明するため、副室式リーンバーンガス機関の燃焼を模擬するバーナ火炎実験装置を製作した。既燃ガス噴流のノズル出口流速が火炎形成に対して影響を与えることから、本実験では燃料流量を固定して空気供給量を増加させることにより、ノズル出口流速を変化させながら火炎形態の変化と失火過程を調査した。

2.1 実験システム・方法

図-1は、製作した副室式リーンバーンガス機関の燃焼模擬バーナの構造を示す。本バーナは円筒形状であり、副室バーナとして中心軸上に既燃ガス噴流を模擬するバーナを配置し、主室バーナとして周囲にシリンダ内を模擬した希薄予混合ガス流（周囲流）を供給した。主室バーナにはメタン/空気の混合ガスを供給し、その流路は90 mmである。また、副室バーナでは水素と空気を供給・燃焼させ、その既燃ガス噴流を直径0.8 mmの円形ノズルから噴出した。なお、高温の既燃ガス噴流によってノズルチップが溶損しないように、ノズルチップ周囲には冷却用空気を流す冷却管を配置した。実験では、主室バーナの火炎形態・構造を観測するため、直接写真とシュリーレン写真を撮影できる光学系を構築した。

2.2 実験結果

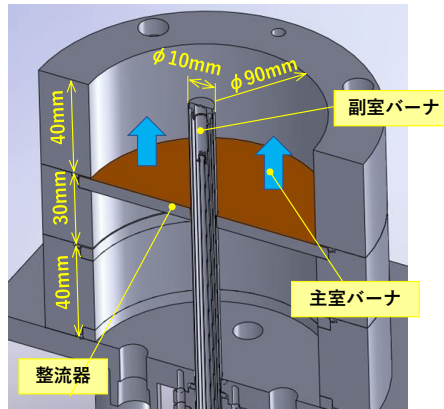


図-1 副室式リーンバーンガス機関の燃焼模擬バーナの構造

図-2(a)～(d)に本バーナにおいて形成された火炎の直接写真とシュリーレン画像を示す。同図において、周囲流条件は、空気流量 100 NL/min、メタン流量 4.5 NL/min（出口平均流速 $u = 28$ cm/sec、当量比 $\phi = 0.48$ ）で一定とした。既燃ガス噴流は水素流量 2.0 NL/min で一定とし、同図(a)～(d)の順に空気流量を増加させた。

同図(a)の既燃ガス噴流の空気流量 0.7 NL/min の場合、ノズル出口流速が低いため、既燃ガス噴流が周囲流の火炎に与える影響は小さく、既燃ガス噴流ノズル出口を基部とする逆コーン型の火炎が形成されることが確認できる。次に、同図(b)の既燃ガス噴流の空気流量 1.1 NL/min の場合、既燃ガス噴流が乱流化し、周囲流の火炎が既燃ガス噴流に吸い込まれて軸上に収束する特徴的な形状となることがわかる。この現象は、既燃ガス噴流が乱流化することにより、噴流への周囲流の導入量が増大したことが原因と考える。さらに、同図(c)の既燃ガス噴流の空気流量 1.6 NL/min の場合、ノズル出口

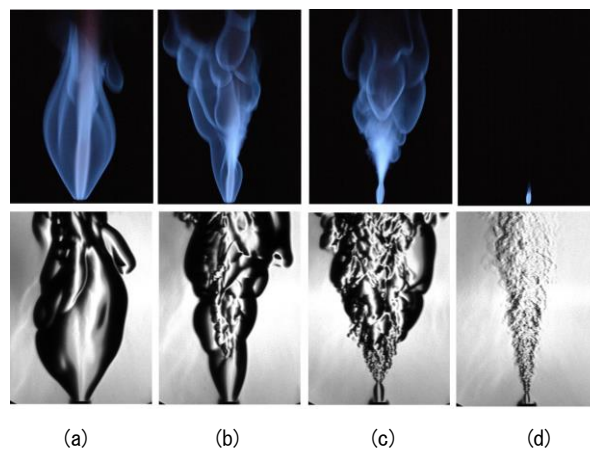


図-2 既燃ガス噴流の水素流量 2.0 NL/min で、空気流量を変化させた場合の水素直接写真（上）とシュリーレン写真（下）

流速が高まることにより、既燃ガス噴流が乱流化する位置がノズル出口に接近し、これに伴い周囲流の火炎はよりノズル出口に近い位置で収束している。また、既燃ガス噴流が乱流化し周囲流の火炎と干渉した部分は火炎の発光強度の強く、対応するシュリーレン画像では火炎の凹凸構造が小さくなる領域が見られる。さらに下流部には、凹凸構造の大きな房状の火炎が見られ、この房状火炎は周囲流が整流されていることから、既燃ガス噴流の影響によって形成された乱流火炎であると考えられる。最後に、同図(d)の既燃ガス噴流の空気流量 1.9 NL/min の場合、周囲流の火炎が既燃ガス噴流に収束した後の部分に発光が見られなくなる。これは既燃ガス噴流への周囲流の導入速度が増大することにより、低温の周囲流が既燃ガス噴流を過剰に希釈・冷却するため、燃焼反応が失活し火炎が維持できなくなったためであると考えられる。

3. プラズマ着火・支援燃焼技術に関する検討

希薄予混合ガスを着火・燃焼する燃焼支援制御技術として、マイクロ波プラズマ生成実験装置を製作し、希薄予混合ガスのプラズマ化による着火・支援燃焼の有効性を検証する実験を行った。

3.1 実験システム・方法

図-3は、製作したマイクロ波プラズマ生成実験装置の構成を示す。本装置は、マグネトロン（600 W）一同軸変換器一同軸レセプタクルー金属棒（直径 2 mm、長さ約 30 mm）を接続した簡易構造であり、金属棒には、周囲金属への直接放電を防止するため、石英ガラス管を設置している。また、金属棒周囲に各種ガスを流通させるチーズユニオンおよび石英ガラス管（内径約 15 mm）を配置した構成となっている。

希薄予混合ガスのプラズマ化による着火・支援燃焼実験では、メタン/空気の予混合ガスをチーズユニオンから流入し、本実験装置のマグネトロンに電力を供給することにより、アンテナ周囲の気体（ガス）をプラズマ化し、予混合ガスの着火および支援燃焼状況を直接写真により観察した。

3.2 実験結果

図-4(a)は予混合ガスの空気流量を 18.0 NL/min、メタン流量を 0.5 NL/min とした（当量比約 0.26）際、図-4(b)は空気流量を 18.0 NL/min、メタン流量を 0.8 NL/min とした（当量比約 0.42）際のマイクロ波プラズマによる着火・支援燃焼写真を示す。同図から、両当量比において、マイクロ波プラズマにより予混合ガスの着火・支援燃焼が可能であり、当量比が大きい方が高輝度のプラズマが観測できることがわかる。また、同図はマイクロ波プラズマを生成中の写真であるが、マグネトロンへの電力供給を止めるとプラズマ自体が消滅する。このことから、マイクロ波プラズマによる予混合ガスの着火・支援燃焼が可能であることが確認された。

なお、本装置を用いて空気をプラズマ化することも可能であり、その際、燃焼促進物質であるオゾンや空気中の水分 (H₂O) に起因する OH ラジカル等の生成を確認した。

4. まとめと考察

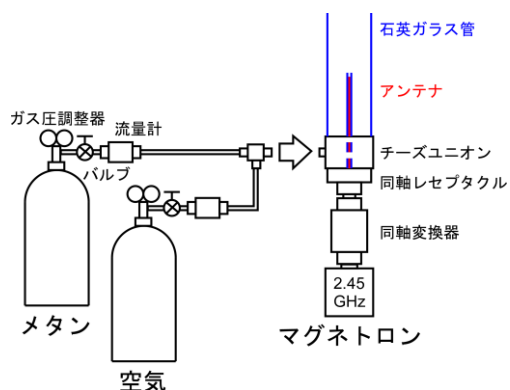


図-3 熱平衡プラズマジェット生成実験装置



図-4 熱平衡プラズマジェットを用いた希薄予混合ガスの着火・支援燃焼写真

副室式リーンバーンガス機関の燃焼を模擬したバーナによる火炎弱体化メカニズムの解明、および希薄予混合ガスに対するマイクロ波プラズマ着火・支援燃焼技術に関する検討を行った結果、以下の知見を得た。

- (1) 火炎は既燃ガス噴流の流速に大きな影響を受け、噴流による乱流化が火炎構造に重大な影響を及ぼすとともに、噴流への周囲流の導入速度が過大になると、その希釈、冷却効果によって消炎するメカニズムが明らかになった。
- (2) マイクロ波プラズマによる予混合ガスの着火・支援燃焼が可能であることを確認した。また、空気のプラズマ化によりオゾンや OH ラジカルを生成可能であることを確認した。これらのことから、プラズマを利用した予混合ガスの着火・支援燃焼技術を開発するための知見が得られた。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 17K06976 の助成を受けて行われた。

参考文献

- 1) Toulson E., *et al.*, “A Review of Pre-Chamber Initiated Jet Ignition Combustion Systems”, SAE Technical Paper 2010-01-2263 (2010)
- 2) 上杉、他, “定常予混合バーナーの燃焼におよぼすプラズマ支援効果”, J. Plasma Fusion Res. Vol. 89, No. 4, pp. 225-228 (2013)