

管内進行火炎の予混合気噴射による燃焼改善に関する研究

JIN, Yoshiyuki / 神, 義幸

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学・工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編 / 法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編

(巻 / Volume)

57

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

8

(発行年 / Year)

2016-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00012975>

管内進行火炎の予混合気噴射による燃焼改善に関する研究

A STUDY OF COMBUSTION IMPROVEMENT FOR FLAME PROPAGATION IN A TUBE BY USING PREMIXED MIXTURES INJECTION

神義幸

Yoshiyuki JIN

指導教員 川上忠重

法政大学大学院理工学研究科機械工学専攻博士前期課程

Recent years, the global warming and the global energy problems become more serious. In practical internal combustion engine, it is necessary to achieve low emissions and low fuel consumption with high load operation. It is well known that reducing the emissions and fuel consumption are very useful technique such as Ultra-lean combustion near the lean flammability limit. Nevertheless, there are only few data for combustion improvement for Ultra-lean combustion.

As the first step in this study, experiments have been carried out to determine the influence of the premixed mixture injection and injection timing on combustion behavior near lean limit for flame propagation in a tube. The main conclusions are as follow; 1) The flame speed by using injection of premixed mixture to flame front is higher than laminar flame propagation. 2) The most suitable conditions exist for combustion improvement near the flammability limit by using premixed mixture injection.

Key Words : *Turbulent Flow, Premixed Flame, Lean Burn*

1. はじめに

DI (Direct Injection) 及び成層燃焼を利用した超希薄燃焼に関する研究は数多くの研究者によって行われている。さらに機関内に旋回流を含めた複合流を発生させることによる、能動的な燃焼制御手法も実機レベルで実現されている。

筆者らの研究においても、管内進行火炎伝播法を用い、燃焼管内に静止羽根や中空円板を設けることにより、進行中の火炎に旋回流を含む複合流を発生させた燃焼促進効果も確認されている。^[1]

一方、これらを用いた燃焼場の改善には、高度な燃焼制御技術や乱れ等の発生状況の把握及び燃焼生成物との同時制御等の問題点も数多く指摘され、また、世界的に需要が増大している小型機関への適応は、装置制約やコスト面から極めて厳しいことは言うまでもない。

そこで本研究では、小型内燃機関の簡便な希薄燃焼方式を実現するために、管内進行火炎伝播法を用いて、火炎伝播中の火炎面に直接混合気を噴射させることにより、火炎面積増大及び乱れによる燃焼促

進効果を利用した、希薄燃焼実現のための検討を行った。また噴射遅延期間や噴射当量比を変更し、それらの火炎伝播速度に及ぼす影響についても考察を行った。

2. 実験装置及び実験方法

(1) 実験装置

本実験における実験装置の概略図を図 1 に示す。実験装置は、燃焼管、混合管、24V 直流安定化電源、点火装置、噴射装置（密閉容器、圧力計、電磁弁、逆流防止弁）、流量計、タイマーおよびスイッチから構成されている。使用した燃焼管は、内径 70mm × 全長 770mm（燃焼部 670mm）の透明アクリル製円筒管であり、その内容積は約 2578cm³である。燃焼管の両端には、ABS 樹脂製の栓が設けてある。点火側の栓には、燃料導入用のバルブとニクロム線を用いた点火装置、他端には、排気用バルブが設けてある。点火装置は、内径 70mm の ABS 樹脂製の栓の二箇所に電極を取り付け、両端に 48W のニクロム線を結線した熱面点火を用いた。ハイスピード

カメラにはキーエンス製 VW5000 を用い、点火端から 500mm の位置に設置されている。燃料は純度 99.9% のプロパン(C_3H_8)、混合気作成には乾燥空気が使用された。

(2) 実験方法

管内進行火炎伝播法を用い、室温、大気圧下で実験は行われた。燃焼管に希薄プロパン-空気予混合気を導入した後、ニクロム線を用いた熱面点火にて点火する。遅延回路を介し一定時間経過後、火炎面に予め作成した可燃限界以下の超希薄プロパン-空気混合気を直接噴射させ、火炎に複合流を発生させた。その様子をハイスピードカメラを用い直接撮影法にて撮影した。火炎伝播速度は、観察範囲内の火炎伝播速度の平均値を火炎伝播速度とした。また各条件に対して 10 回以上実験を行い、算術平均値を用いて火炎伝播速度を求めた。

管内に導入する混合気は Zabetakis の測定したプロパン-空気の希薄可燃限界 $\phi_i = 0.521$ ^[2]に基づき、下限を 0.525 として 0.600 までの 4 つの当量比で測定を行った。

3. 実験結果

噴射遅延期間 1.50sec 固定、噴射期間 0.75sec とした場合の実験条件を表 1 に表す。また図 2 に火炎伝播中の火炎挙動の代表例を示す。

Table 1 Experiment Condition of Injection

Equivalence Ratio of Injection Mixtures	0.40, 0.45, 0.50
Injection Pressure	150kPa
Delay Time from gnition	1.5sec
Injection Time	0.75sec

当量比 $\phi = 0.600$ 及び 0.575 における層流火炎では浮力の影響を受けているため、火炎はやや上方に伸びた形状となっている。なお、混合気噴射をした火炎挙動では予混合気はフレーム下側から垂直上方向に噴射されている。また、各フレーム時間間隔は 4ms である。噴射されたプロパン-空気混合気の当量比は $\phi_i = 0.45$ であり、予め燃焼管内に導入されている当量比をパラメータとしている ($\phi = 0.600$ 及び 0.575)。したがって燃焼管内に総括で投入されている熱量には差異があることを明記しておく。当量比 $\phi = 0.600$ の場合には、火炎面上端部での火炎表面積の増大は一部観察されるが、火炎面全体への著しい影響は観察されない。一方、 $\phi = 0.575$ の場合には、火炎下端部から中央部付近への混合気流入後の火炎伝播全体への乱れが観察された。図 3 に管内に予め導入されているプロパン-空気混合気の各当量比 ϕ に対する火炎伝播速

度を示す。ここで、パラメータは噴射当量比 ϕ_i とした。なお、噴射を行ってない状態での火炎伝播速度についても層流状態と仮定して併せて示す。層流状態の火炎に着目すると当量比の理論量論側への移行に伴い火炎伝播速度が緩やかに増大していることがわかる。層流状態における燃焼速度は当量比 $\phi = 1$ 近傍にて最大値を取ること^[3]が知られてお

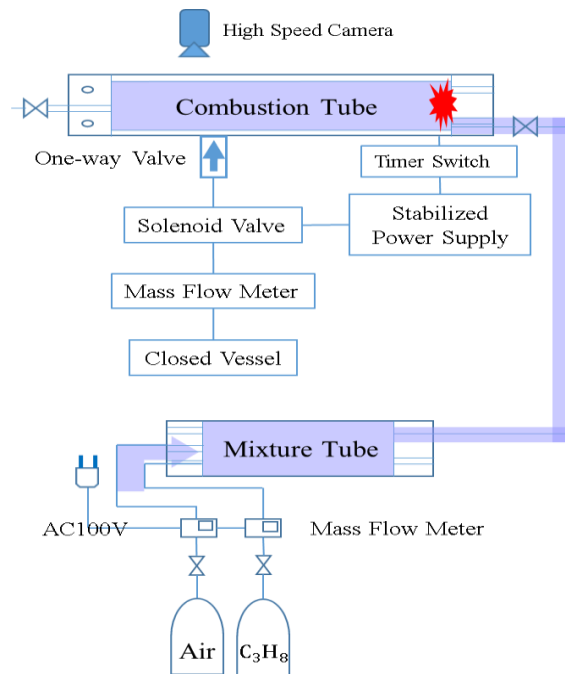


Fig.1 Experimental Apparatus

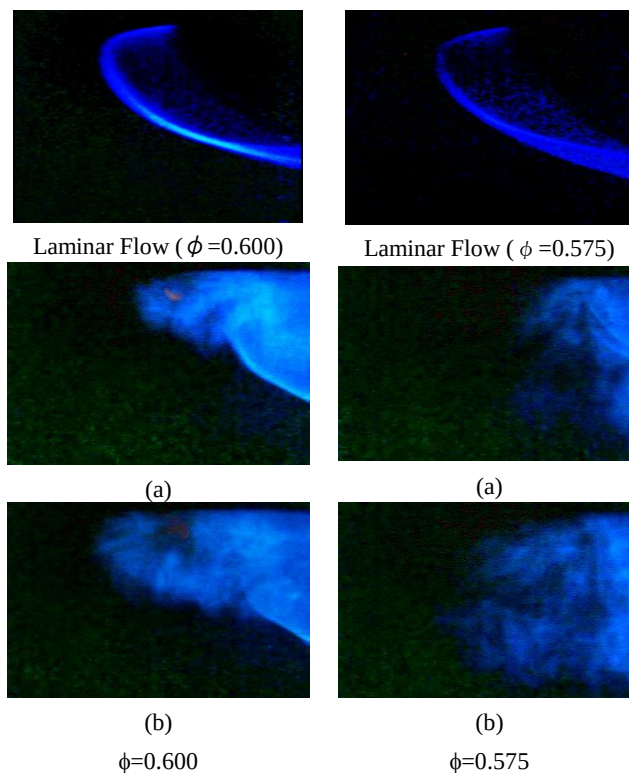


Fig.2 Flame Behavior

り希薄側の一部ではあるが、その傾向が確認された。また、火炎面に直接予混合気の噴射を行った場合、実験範囲内ではすべての条件で層流状態と比較して、火炎伝播速度が著しく増大している。これは、噴射による乱れの発生及び火炎面への混合気導入によるものであり、希薄予混合火炎の燃焼促進効果には、噴射による複合流が有効である。また、同一当量比においては噴射当量比が増加するとともに火炎伝播速度も増大している。さらに、層流状態においては当量比の理論量論側への移行に伴って火炎伝播速度が単調増加しているが、予混合気を火炎面に噴射させた場合には当量比 $\phi = 0.525$ から $\phi = 0.575$ にかけては増加しているものの、当量比 $\phi = 0.600$ では大きく減少している。これは進行中の火炎面への未燃混合気の流入割合は、進行中の火炎伝播速度に依存する為と思われる。

ここで、どの条件において最適な燃焼促進効果が得られるかを検討するため、増大率についての考察を行った。各条件において投入熱量が異なるため以下のように補正増大率 R^* を定義した。

$$R^* = \frac{R}{K} \times 100[\%] \quad (1)$$

$$R = \frac{V}{V_L}, \quad K = \frac{Q_i + Q}{Q} \quad (2)$$

ここで、

R^* : 補正増大率 [%]

R : みかけの増大率 [-]

K : 投入熱量係数 [-]

V : 燃料噴射を行った場合の火炎伝播速度 [m/s]

V_L : 同一当量比における層流火炎伝播速度 [m/s]

Q : 噴射された混合気の投入熱量 [J]

Q_i : 予め導入されている混合気の投入熱量 [J]

図 4 に上記(1)式から求めた補正増大率を示す。この図から明らかなように、投入熱量の増大を定性的に評価した場合、補正増大率は、 $\phi = 0.575$ において最大となっている。また、どの当量比においても噴射当量比 $\phi_i = 0.50$ が最大である。これらの結果から、希薄燃焼領域での混合気噴射による燃焼改善には、最適条件及びある程度希薄領域での混合気形成が必要である。

続いて、より詳しい混合気噴射の最適条件を検討するために噴射遅延期間を 1.40s から 1.60s までを 0.02s 間隔で変更したときの火炎伝播速度を図 5 に、式(1)より求めた補正増大率を図 6 に、噴射条件を表 2 に示す。予め管内に導入する当量比 ϕ は先の実験結果より、最も燃焼促進効果が確認された 0.575

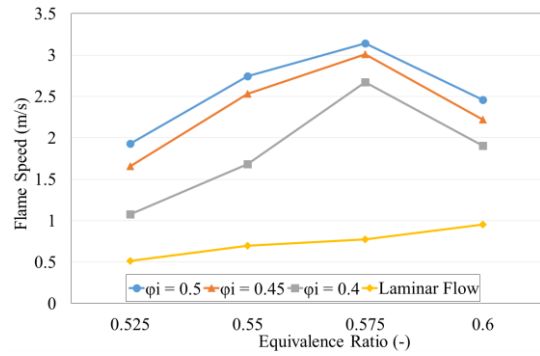


Fig.3 Flame Speed

(Delay Time from Injection = 1.50sec,
Injection Time = 0.75sec
 $\phi = 0.525 \sim 0.600$, $\phi_i = 0.40 \sim 0.50$)

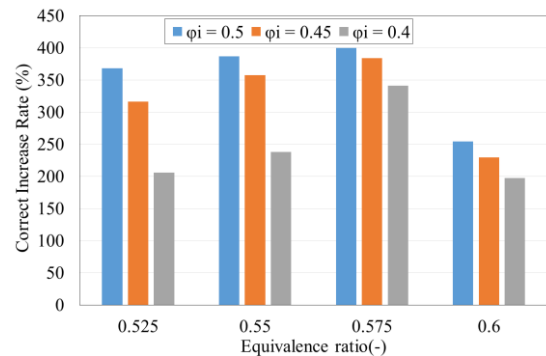


Fig.4 Correct Increase Ratio

(Delay Time from Injection = 1.50sec,
Injection Time = 0.75sec
 $\phi = 0.525 \sim 0.600$, $\phi_i = 0.40 \sim 0.50$)

一定とした。噴射当量比は 0.30 から 0.50 まで 0.05 刻みで変化させた。また、噴射遅延時間差による影響がより明確になるよう、噴射期間を 0.04s に短縮化した。なお、この噴射期間短縮化により、燃料噴射量が約 32%まで減少していることを明記しておく。

図 5 より、噴射を行った場合、全噴射当量比、全噴射遅延期間において当量比 $\phi_i = 0.575$ における層流状態と比較すると、火炎伝播速度の増大が見られた。噴射当量比 0.50、噴射遅延期間 1.46sec においては層流状態に比べ火炎伝播速度が約 4.7 倍まで増加している。また、どの噴射当量比においても、噴射遅延期間が増大するに従い火炎伝播速度が増大し、最大値が観察された後に減少する。それぞれの最大値をとる噴射遅延期間は噴射当量比によって異なることから、噴射当量比それぞれに最適な噴射遅延期間が存在する。火炎面前方で噴射した場合、乱れによる火炎面増大が大きい。しかし、噴射当量比が低い場合には、十分な未燃混合気の取り込みができなくなるため噴射遅延期間を長くすることで火炎伝播速度がより増大する。図 6 の補正増大率よ

り噴射遅延期間 1.5sec, 噴射当量比 $\phi_i=0.45$ 及び 0.40 において増大率は 450%を上回っている. 図 4 の同当量比・同噴射当量比の場合では 400%に満たない. 投入熱量が低下しているにも関わらず, 火炎伝播速度は増大しており, 火炎伝播速度増大には適切な噴射量が存在する. これは噴射量が適正量より多い場合に, 噴射による熱損失の影響や, 局所的な当量比の低下が発生すること起因する.

図 7に図 5 の各噴射当量比における火炎伝播速度の最大値及び各噴射当量比の火炎伝播速度(噴射遅延期間 1.40~1.60)の平均値を示す. この図から明らかなように, 噴射当量比の理論量論側の移行に伴い, 平均火炎伝播速度並びに最大火炎伝播速度ともに僅かに増大している. 噴射当量比 $\phi_i = 0.3$ と $\phi_i = 0.5$ を比較した場合, 最大火炎伝播速度で約 1.18 倍, 平均火炎伝播速度で約 1.24 倍の増大が確認された. これは噴射の乱れによる火炎面増大がもたらす燃焼促進効果のほか, 噴射された混合気の熱量投入によって, ごく短時間での噴射においても噴射当量比の変化による火炎伝播速度の増大によるものと考えられる.

4. 結論

本研究では, 管内進行火炎伝播法を用いて進行中の火炎に希薄予混合気を噴射させることによる燃焼改善について実験・考察を行った. 以下に結果を示す.

- (1) 火炎面に直接混合気を噴射させた場合, 層流火炎伝播と比較して火炎伝播速度は著しく増大する.
- (2) 予混合気噴射による希薄可燃限界近傍での燃焼改善には, 最適な噴射条件が存在する.

謝辞: 本研究を進めるにあたり, 終始ご指導を頂きました川上忠重教授に心より感謝致します. また, 長きにわたり実験にご一緒させていただいた研究室 OB 岸本和輝氏, 大学院生, 学部生の皆様にも感謝致します. ありがとうございました.

参考文献

- (1) 神義幸, 岸本和輝, 川上忠重: 管内伝播火炎を用いた希薄予混合気の燃焼特性について, 山梨講演会 講演論文集, [No. 140-3], p. 141-142, 2014
- (2) M.G.Zabetakis, Flammability characteristics of combustible gases and vapors, US Bureau of Mines, Bulletin 627, 1965
- (3) 新岡嵩, 河野通方, 佐藤順一: 燃焼現象の基礎, オーム社, p21-22, 2001

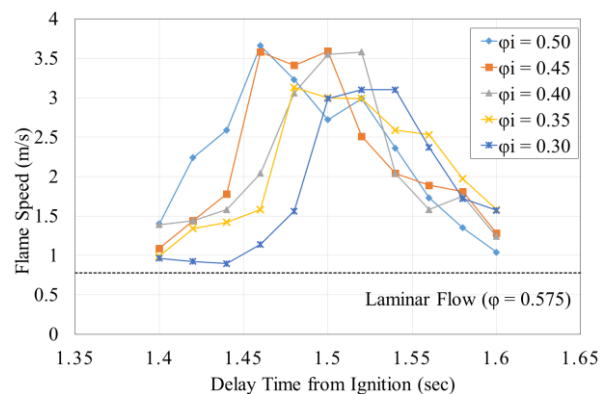


Fig.5 Flame Speed

(Delay Time from Injection = 1.40~1.60sec,

Injection Time = 0.04sec

$\phi = 0.575$, $\phi_i = 0.30 \sim 0.50$)

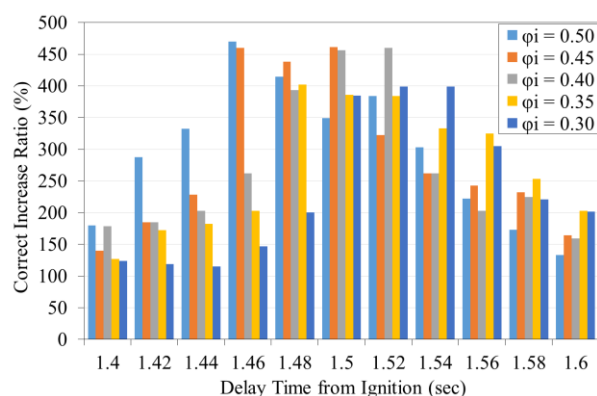


Fig.6 Correct Increase Ratio

(Delay Time from Injection = 1.40~1.60sec,

Injection Time = 0.04sec

$\phi = 0.575$, $\phi_i = 0.30 \sim 0.50$)

Table 2 Experiment Condition about Injection

Equivalence Ratio of Injection Mixtures	0.30, 0.35, 0.40, 0.45, 0.50
Injection Pressure	150kPa
Delay Time from Ignition (sec)	1.40, 1.42, 1.44, 1.46, 1.48, 1.50, 1.52, 1.54, 1.56, 1.58, 1.60
Injection Time	0.04sec

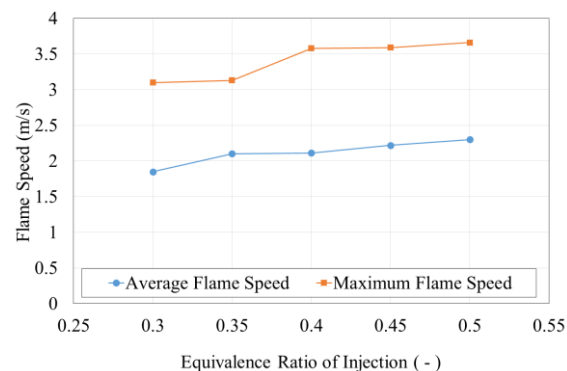


Fig.7 Average Flame Speed and Maximum Flame Speed