

エタノールを用いた管内進行火炎の燃焼改善に関する研究

白川, 博之 / SHIRAKAWA, Hiroyuki

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学研究科

(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)

59

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

4

(発行年 / Year)

2018-03-31

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00014800>

エタノールを用いた管内進行火炎の燃焼改善に関する研究

A STUDY OF COMBUSTION IMPROVEMENT FOR FLAME PROPAGATION IN A TUBE USING ETHANOL

白川博之

Hiroyuki SHIRAKAWA

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修士課程

In recent years, as the energy demand has increased, the increase in the emission of environmental pollutants such as nitrogen oxides and carbon dioxide has become more serious. As a solution to these problems, the use of ethanol and utilization of lean burn have attracted attention.

This experiment has been carried out to examine the combustion improvement effect by injecting a propane-air mixture on the flame surface and the combustion characteristics of ethanol aqueous solution-air mixtures by using flame propagation in a tube. The main conclusions are as follows: 1) It is possible to control the combustion near the lean flammability limit by mixture injection. 2) The flame speed monotonically increases with increasing the mixture injection pressure. 3) Flame speed decreases with the increasing the addition ratio of water in ethanol aqueous solutions. 4) The reduction ratio of flame speed increases with the increasing the addition ratio of water in ethanol aqueous solutions.

Key Words : Injection, Ethanol aqueous solution, Lean burn, Flame shape, Flame speed

1. 緒論

近年エネルギー需要の増加に伴い、環境汚染物質の排出量増加が深刻になっている。特に地球温暖化の主な原因となっている二酸化炭素や、大気汚染の原因となっている窒素酸化物、硫黄酸化物等の排出量低減は急務となっている。また現在エネルギー需要の殆どを化石燃料に依存しており、化石燃料の枯渇を考慮し、代替燃料の活用も必要不可欠である。これらの解決策として、内燃機関では希薄火炎の活用や、カーボンニュートラルの考えに基づき、燃料にバイオエタノールなどの再生エネルギー源を使用することなどが挙げられる。エタノールの使用においては、エタノール水溶液として用いた場合、燃焼温度の低下による窒素酸化物の排出改善等も期待されている。[1][2]しかしながら、希薄燃焼の活用と、低炭素燃料であるエタノールの使用には、発熱量低下による火炎伝播速度の低下や、火炎形成の不規則化等の問題がある。また、希薄燃焼域における乱流燃焼を用いた燃焼改善においては、熱損失の増大による消炎も考慮しなければならない。

本研究ではこれらの観点から、エタノール燃料の利用に着目し、管内進行火炎を用いて、火炎面に直接プロパン-空気混合気を噴射することにより、火炎面積増大及び熱損失低減による燃焼改善の効果についての検討、及び、希薄領域におけるエタノール水溶液-空気混合気の

燃焼特性を把握するため、エタノール水溶液の水分割合が火炎形状及び火炎伝播速度に及ぼす影響について検討を行った。

2. 実験装置

(1) 混合気噴射

実験装置の概略を図1に示す。実験装置は9Ωのニクロム線を点火源とした熱面点火装置、アクリル製の燃焼管、流体用電磁弁、タイマースイッチ、真空タンク、サブタンク、キーエンス製ハイスピードカメラ VW-5000等の装置を用いて実験を行った。燃焼管の寸法は、外径90mm、内径70mm、長さ770mm、燃焼部は670mm、であり両端にABS製の樹脂で蓋が設けてある。蓋の片側に

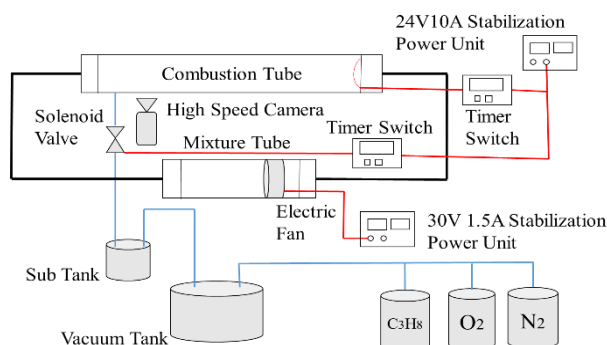


Fig.1 Experimental device

ニクロム線を用いた熱面点火装置が設けられ、外部から電源を供給することで、ニクロム線が加熱され、混合気に点火が行われる。

(2) エタノール水溶液燃焼実験

実験装置の概略を図2に示す。実験装置は9Ωのニクロム線を点火源とした熱面点火装置、ポリカーボネート製の燃焼管と混合管、燃焼管と混合管をつなぐためのフレキシブルホース。実験装置全体を80℃に加熱するためのリボンヒーター、コードヒーター、ラバーヒーター、温度調節器、熱電対温度計、サーミスタ温度計、攪拌用の耐熱電動ファン、電動ファンと熱面点火装置の電源として30V、1.5Aと24V、10Aの安定化電源、キーエンス社製ハイスピードカメラVW-5000等で構成される。燃焼管の寸法は外径89mm、内径77mm、長さ770mm、燃焼部は700mmであり両端にはABS製の蓋が装着されている。蓋の片側には熱面点火装置が設けてあり、外部から安定化電源により電力を供給し、ニクロム線を加熱できるようにした。混合管は燃焼管と外径、内径は同径で長さ370mmであり、燃焼管と同様に、ABS製の蓋が装着している。エタノール水溶液を作成する際には、濃度100%のエタノールに精製水を加え、アントンパール社製DMA-35携帯用濃度計を用いて濃度を測定し、E75、E45のエタノール水溶液を作成した。実験装置にエタノール水溶液を滴下する際にはイー・アンド・デイ社製MPA-1200電動マイクロピペットを使用し、1μl単位でエタノール水溶液の滴下量を調整した。

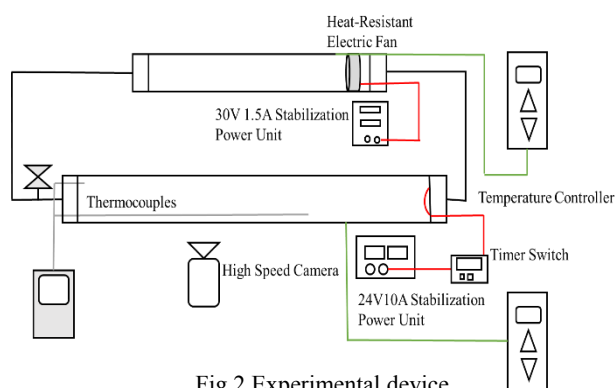


Fig.2 Experimental device

3. 実験方法

(1) 混合気噴射

燃焼管にエタノールを入れた状態で密閉し、攪拌することでエタノール希薄予混合気を作成する。混合気の当量比 Φ は実験条件上の希薄可燃限界である0.774を基準

に、0.801、0.829、0.857の4条件とした。初めに4条件の層流火炎伝播速度を測定し、これを導入混合気として設定した。混合気を噴射する際には、真空タンクに噴射する2.5気圧のプロパン—空気混合気を作成した。作成した混合気はサブタンクに移し、各条件の噴射圧になるように調節した。また、プロパン—空気混合気の当量比 Φ (以下噴射当量比)は0.6、0.5、0.4の3条件、噴射圧は1.3、1.5、1.7気圧の3条件、計9条件を層流時の導入当量比を条件ごとに行い、合計36条件の測定を行った。また、どの条件においても導入混合気の当量比を著しく変化させる噴射は行っていない(1%未満)。測定時は燃焼管をハイスピードカメラの前に置き、熱面点火装置、タイマースイッチ、電磁弁に電源を入れ、熱面点火により火炎を発生させ、発生した火炎面に混合気噴射を行った。噴射のタイミングはタイマースイッチにより制御し、電磁弁の開閉時間は0.04sとした。

火炎の様子を250fpsのフレーム数でハイスピードカメラにより撮影した。各条件において10回測定を行い、撮影した動画をコマ送りで再生し、最大値と最小値を除いた平均値を火炎伝播速度として用いた。

(2) エタノール水溶液燃焼実験

実験装置内部を圧縮空気ですくき、乾燥空気を導入する。エタノール水溶液を気化させるため、乾燥空気導入後、実験装置を密閉し、温度調節器、ヒーター、電動ファンの電源を入れ、中の乾燥空気を80℃(一定)とした。この際、混合作成中に結露の可能性があった為、乾燥空気の温度は80℃以下にならないように調整を行った。実験に際し、予め作成しておいたエタノール水溶液を実験装置内に滴下させ、再度エタノール水溶液が気化するまで実験装置を密閉し、エタノール水溶液—空気混合気を作成した。混合気作成後、混合管と燃焼管を切り離し、熱面点火装置のスイッチを入れ、予混合気への着火が行われる。この際ヒーターの一部を取り除き、管内の火炎伝播状況が観測できるように設定した。火炎伝播の様子は、ハイスピードカメラにて250fpsのフレーム数で撮影した。火炎伝播速度の算出は混合気噴射実験と同様に行った。

各条件におけるエタノール水溶液の滴下量を表1に示す。混合気の当量比 Φ は実験条件上のE45の希薄可燃限界 $\Phi=0.693$ を基準として、0.750、0.800、0.850、0.900、0.950、1.00の合計7条件とした。エタノール濃度条件はE100、E75、E45の3条件、の21条件の測定を行った。

Table 1 Dropping amount of ethanol aqueous solution

		Equivalence Ratio						
		0.693	0.750	0.800	0.850	0.900	0.950	1.00
Ethanol Concentration	E100	503[μl]	545	581	617	653	690	726
	E75	671	726	774	823	871	920	968
	E45	1118	1210	1291	1372	1452	1532	1614

4. 実験結果及び考察

(1) 混合気噴射実験

図3に、噴射圧力 $P_i=1.3\text{atm}$ (一定)条件での、混合気当量比に対する火炎伝播速度を、噴射当量比をパラメータとして示す。この図から明らかなように本実験範囲内での希薄当量比領域では、当量比 $\Phi=0.774$ を除いて層流火炎伝播速度(混合気噴射無し)に著しい差異は観測されない。一方、乱流火炎伝播速度(混合気噴射あり)では、若干の変動はあるものの、増加が観測された。すなわち、希薄エタノール—空気混合気においても、混合気噴射による燃焼改善が観測された。これは、混合気噴射による火炎表面積増大によるものである。

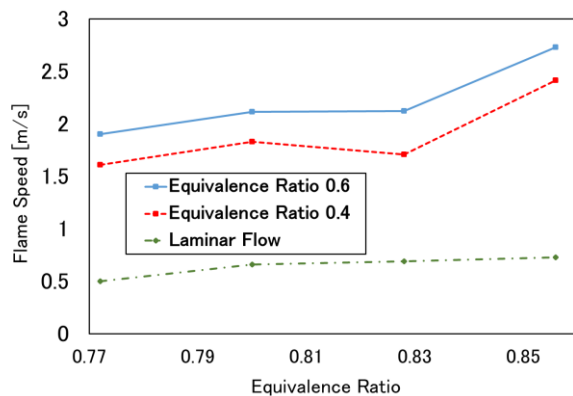


Fig.3 Flame speed

(Injection equivalence ratio $\Phi=0.4$ and 0.6)

図4に、混合気の当量比に対する火炎伝播速度を、噴射当量比及び噴射圧力をパラメータとして示す。この図から明らかなように、どの噴射当量比においても、同一混合気当量比では噴射圧力の増大に伴って、火炎伝播速度は著しく増大している。また、噴射圧力の増大により火炎伝播速度に及ぼす噴射当量比の影響が、顕著となっている。すなわち、希薄当量比領域においても、混合気噴射による燃焼制御が可能であると思われる。

火炎伝播速度に及ぼす噴射圧力の影響を評価する為、図5に噴射圧力に対する乱流火炎伝播速度を、混合気当量比をパラメータとして示す。この図から明らかなように、どの混合気当量比においても、噴射圧力の増大に伴って単調に火炎伝播速度は増加している。これは、噴射圧力の増大によって火炎面に及ぼす乱れ強さが増大した為、火炎面積が著しく増加した為と思われる。なお、本実験においても、噴射圧力の増大による火炎面形状の変化が、高速ビデオカメラ映像により観測されている。

図6に、混合気当量比に対する火炎伝播速度の増大率を、噴射当量比及び噴射圧力をパラメータとして示す。ここでの増大率は、各混合気当量比の層流状態での火炎伝播速度を基準とした。この図から、本実験の範囲内では、混合気噴射により約2.5倍から7倍程度の火炎伝播速度の増加が観測された。すなわち、希薄当量比領域における混合気噴射による燃焼促進効果には、最適条件が

存在することが示唆される。今後、混合気噴射による火炎冷却効果の影響を含めて、詳細に検討を行う予定である。

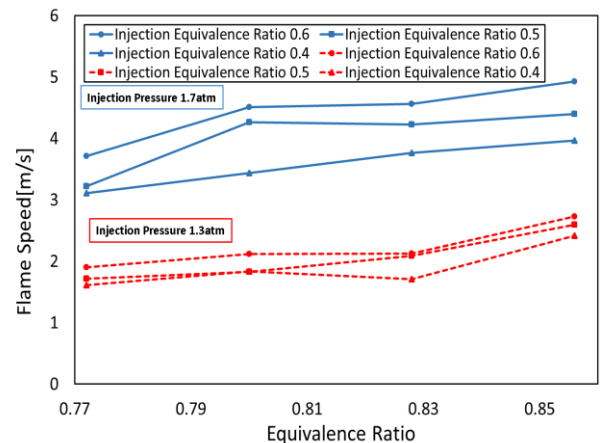


Fig.4 Flame speed

(Injection pressure $P_i=1.3$ and 1.7atm)

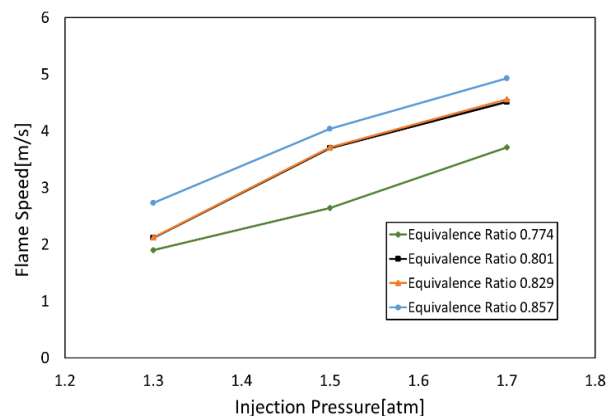


Fig.5 Flame speed

(Injection equivalence ratio $\Phi=0.6$)

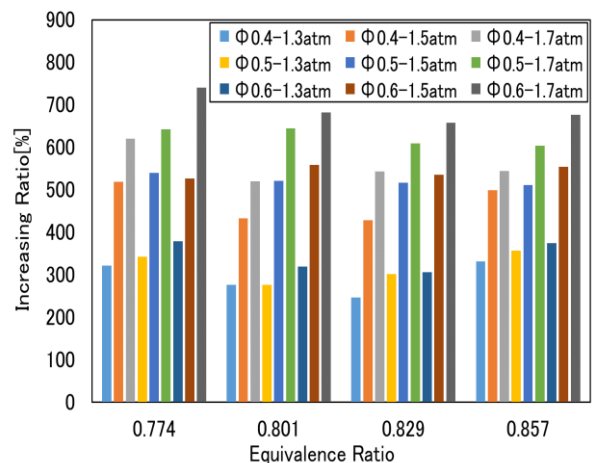


Fig.6 Flame speed increase rate

(2) エタノール水溶液燃焼実験

図7に、エタノール水溶液 E45, E75, E100 の当量比 $\Phi=0.693, 0.850, 1.00$ における火炎形状を示す。ここで、E45 の火炎形状に着目すると、どの当量比条件においても、火炎帯が他の条件と比較して薄い形状となつて

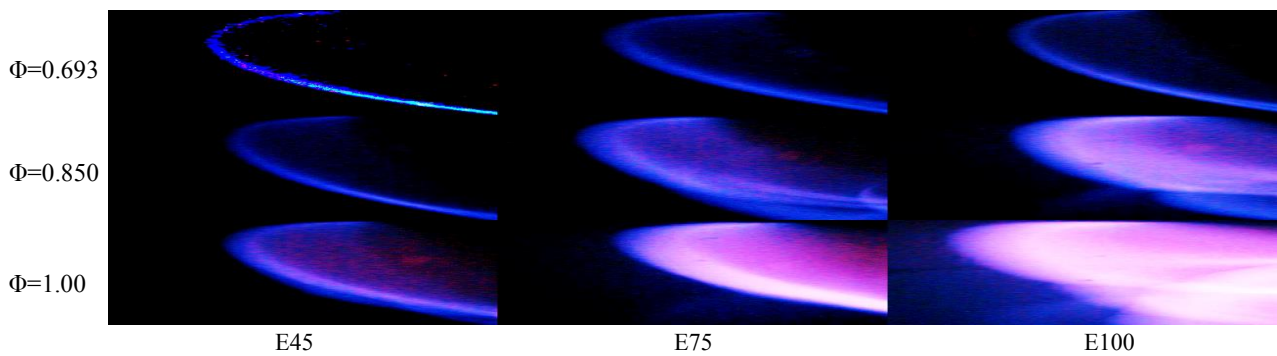


Fig.7 Flame behavior

いる。特に E45 の当量比 $\Phi=0.693$ では、他の条件と比べて著しく薄い火炎帯形状を呈しており、火炎温度の低下が発生しているものと思われる。すなわち、エタノール水溶液の水分添加量の調整により、燃焼制御が可能であることが示唆される。一方、E75 の場合には、E100 とほぼ同程度の火炎帯厚み及び火炎輝度が観測されており、エタノール水溶液の濃度の燃焼特性に及ぼす影響の検討が必要である。

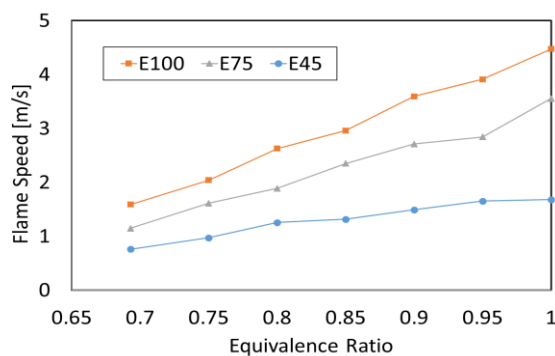


Fig.8 Flame speed (Ethanol concentration E100, E75, E45)

図 8 にエタノール水溶液—空気混合気の当量比に対する火炎伝播速度を、エタノール水溶液の濃度をパラメータとして示す。エタノール水溶液の濃度減少に伴って、どの当量比においても、火炎伝播速度の減少が確認された。これは、添加濃度の変化に伴う火炎形状、特に火炎帯厚みの減少により、全体として反応量が低下した為だと思われる。一方、E100 と E75 に着目すると、当量比の理論量論側への移行に伴って、火炎伝播速度は単調に増加しているが、E45 と比較して、増大率に差異が発生している。すなわち、火炎伝播速度の変化率に及ぼす水溶液濃度に関する検討が必要である。

図 9 に E100 の火炎伝播速度に対する同一当量比での E75, E45 における火炎伝播速度の減少割合を示す。ここで、E75 では当量比の変化に対して、減少割合は 2~3 割程度で移行しており、ほぼ様な減少率となっている。一方、E45 では当量比の理論量論側への移行に伴って、E100 に対する火炎伝播速度の減少割合が増加する傾向が確認された。これは、エタノール水溶液濃度の低下により、混合気に対する水蒸気の割合が増加するため、燃焼

温度が低下したことに起因するものと考えられるが、今後詳細な検討が必要である。また、減少率や火炎伝播速度の値から、エタノール水溶液の実用化には乱流などを用いた火炎伝播速度の増大が必要であると思われる。

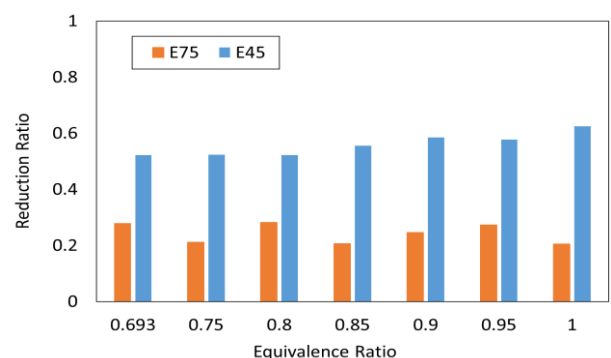


Fig.9 Flame speed reduction rate
(Ethanol concentration E75, E45)

5. 結論

本研究ではエタノール燃料を用いて、希薄領域における混合気噴射による燃焼改善効果、及びエタノール水溶液の燃焼特性について検討を行った。以下に結論を示す。

- (1) 希薄可燃限界近傍においては混合気噴射による燃焼制御が可能である。
- (2) 噴射圧力の増大に伴って火炎伝播速度は単調に増加する。
- (3) エタノール水溶液—空気混合気では、水分添加率の増大に伴って火炎伝播速度は減少する。
- (4) エタノール水溶液の水分添加率の増大に伴って火炎伝播速度の減少率は増加する。

参考文献

- 1) 宮本登, 山崎賢治, 村山正: アルコール駆動ディーゼル機関に関する研究, 日本機械学会論文集(B編), Vol.48, pp.1781-1782, 1982-1984
- 2) ハリ. セティアブラジャ, 小澤琢磨, 原孝祐, 山崎賢治, 小川英之: 含水エタノール-軽油エマルジョン燃料によるディーゼル燃焼の改善, Vol.78, pp-145, 2012