

超希薄エタノール水溶液を用いた燃焼特性に 及ぼす旋回噴流乱れによる燃焼改善

Ma, Yingzhe / 馬, 英哲

(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. 理工学研究科編

(巻 / Volume)

63

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

5

(発行年 / Year)

2022-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00025280>

超希薄エタノール水溶液を用いた燃焼特性に及ぼす 旋回噴流乱れによる燃焼改善

COMBUSTION IMPROVEMENT FOR COMBUSTION CHARACTERISTICS BY USING LEAN ETHANOL
AQUEOUS UNDER TURBULENCE ROTATION FLOW

馬英哲

Ma Yingzhe

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

Recent years, global warming problem caused by exhaust gas has raised up concerns. As one of the alternative fuels of petroleum fuel and the renewable ethanol fuel is attracting attention. However, the flame speed and combustion efficiency of ethanol fuel is lower than gasoline fuel. Previous research studied the influence of the turbulence on ethanol aqueous combustion process, which is one of the methods to achieve the combustion improvement of ethanol aqueous combustion. In this study, in order to improve the flame speed of the ethanol aqueous, we investigated the effect of jet disturbance unit and the water addition rate of ethanol aqueous by the observation of flame behavior. The main conclusion are as follows:1) Turbulence is extremely effective to achieve ethanol aqueous combustion improvement near the lean flammability limit. 2) With the influence of ethanol concentration in the ethanol aqueous, the optimal turbulence condition of combustion improvement near the lean flammability limit exists. 3) The maximum flame speed increasing ratio is about 32% when jet turbulence device is used under the super lean combustion with ethanol aqueous. 4) When the two same jet turbulence units are installed, especially at the ethanol aqueous E60 in Equivalent ratio 0.54, the flame speed increases by up to 49% when using the jet turbulence unit 45 deg compared with the case of single jet turbulence unit 45 deg.

Key Words: Ethanol aqueous , Lean burning , Jet disturbance unit , Flame speed

1. 序論

近年、内燃機関の排気ガスによる地球温暖化が重要な課題になっている。そこで、温室効果ガスを削減する観点から、石油資源の代替燃料としてエタノール燃料が注目を集めているが、バイオエタノールの燃焼効率と発熱量はガソリンより低いため[1]、数多くのバイオエタノール燃料の高効率化に関する研究が行われている[2]。著者らの先行研究からエタノール燃料の燃焼改善の方法の一つとして噴流乱れ装置の有効性が確認されている[3]。

そこで、本研究ではエタノール水溶液燃料の安定燃焼の実現に向けて、予混合希薄エタノール水溶液-空気混合気の火炎挙動を、管内進行火炎伝播法を用いて観察することにより、火炎形状および火炎伝播速度等に及ぼす当量比、水分割合および噴流乱れの影響について検討を行った。併せて、火炎伝播速度の増加率についても考察を行った。

2. 実験装置および方法

(1) 実験装置

実験装置の概略図をFig.1に示す。実験装置は点火装置、火炎挙動観察用カメラ、混合気作成用加熱装置、燃焼管と混合管、また噴流乱れ装置で構成されている。点火装置は9Ωのニクロム線を点火源とした熱面点火装置である。カメラはキャノンEOS KissX4を用いた、火炎撮影に際し外部から光が入らないよう、暗幕で実験装置全体を覆うように設置した。他には加熱装置、温度調節器、熱電対温度計、サーミスタ温度計、混合用耐熱電動ファンを設置した。混合管と燃焼管の乾燥空気温度を加熱装置と混合用耐熱電動ファンで85℃[4]に加熱した。なお、混合管と燃焼管の両端に蓋(ABS製)が設けられ、混合気の作製および導入が可能となっている。混合管と燃焼管の寸法を表1に示す。

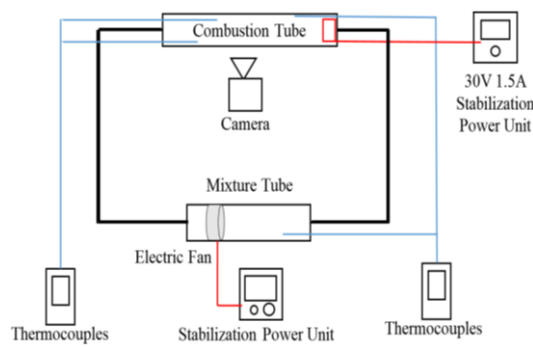


Fig. 1 Experimental device

Table1 Dimensions of mixing tube and combustion tube

	Combustion tube	Mixing tube
Outer diameter(mm)	89	89
Inner diameter(mm)	77	77
Length(mm)	770	400

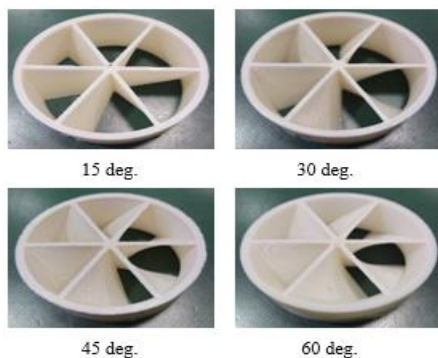


Fig. 2 Jet disturbance unit

噴流乱れ装置をFig. 2に示す. 噴流乱れ装置は外径77 mm, 幅35mm, ABS樹脂製を使用し, 点火端から300 mmの位置に設置した. 噴流乱れ強さを変更するため, 羽角度を15, 30, 45, 60degに設定した. 実験に際し, エタノールに精製水を加え, エタノール水溶液を作成した. なお, 本実験ではエタノール水溶液はE45, E50, E55, E60を使用した[6]. エタノールと水分の体積割合を表2に示す.

Table2 Ratio of ethanol and purified water

		Ethanol ratio(%)	Purified water ratio(%)
Ethanol fuel type	E45	45	55
	E50	50	50
	E55	55	45
	E60	60	40

燃焼管が水平状態で設置されているため, 可燃限界測定標準装置である下端点火による上方向伝播よりも可燃範囲が縮小されることは, 先行研究で確認されている[5]. そこで, 標準装置の可燃限界当量比の約85 %程度の当量比 $\Phi=0.85$ をエタノール水溶液の希薄燃焼する際の理論混合比側限界として設定した.

エタノール水溶液の当量比 Φ は, 各実験条件により, 希薄側当量比 $\Phi=0.50$ から0.54を設定した. エタノール燃焼

の化学式の計算から, 各条件におけるエタノール水溶液の滴下量を算出した. 表3に各条件でのエタノール滴下量を示す.

Table3 Dropping amount of ethanol aqueous

	Equivalence Ratio				
	0.50	0.51	0.52	0.53	0.54
E45(μ l)	744	758.8	773.6	788.4	803.2
E50(μ l)	670	683	696	709.6	723
E55(μ l)	609	621	633	645	657.2
E60(μ l)	558	569	580	591.2	602

(2) 実験方法

実験では, 噴流乱れ装置の火炎加速効果の継続性を検証するため, 本実験ではFig. 3のように噴流乱れ装置を一つ設置した場合と同じ羽根角度の噴流乱れ装置を二つ設置した場合について, 実験を行った. ここで, 二つ装置を設置した場合の噴流乱れ装置間の距離は一つ目の装置から197.5mm後方とした. Normalは噴流乱れ装置なしの平均火炎伝播速度, α は一つ噴流乱れ装置を設置した場合の平均火炎伝播速度, β は二つ噴流乱れ装置を設置した場合の平均火炎伝播速度である.

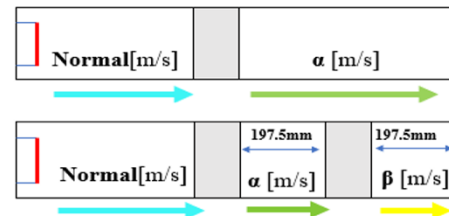


Fig.3 In the Occasion of single Jet disturbance unit and double Jet disturbance units

噴流乱れ装置を事前に燃焼管内に設置した後, 作成した各エタノール水溶液を実験装置内に滴下させ, 気化するまで15分間実験装置を密閉し, 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投入し, 点火を行った. カメラを用いて火炎挙動を観察し, 平均火炎伝播速度(Normal, α , β)を円管内の所定区間を通過する時間から算出した.

3. 実験結果及び考察

(1) 装置なしの火炎伝播速度

Fig. 4に噴流乱れ装置無しの場合の各エタノール水溶液条件における平均火炎伝播速度を示す. 噴流乱れ装置無しの場合, 各当量比において, 平均火炎伝播速度は, エタノールの濃度の増大に伴い, 増加が確認された. また, 同一エタノール水溶液濃度の条件では, 当量比の理論量論比側への移行に伴って, 平均火炎伝播速度が増加することが確認された. 本研究では, E60の0.54当量比では最大値2.9m/sが観察された.

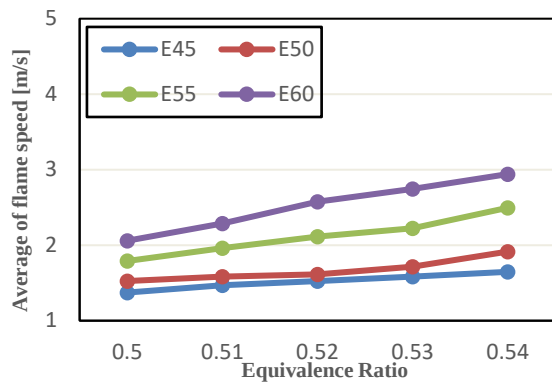


Fig. 4 Average of flame speed

(2) 装置なしの火炎形状

Fig. 5に噴流乱れ装置無しの場合の各エタノール水溶液濃度E45, E50, E55, E60における火炎挙動の代表例を示す。エタノール濃度の増加に伴って、火炎帯厚さと火炎輝度が著しく増加することが確認された。Fig. 4及びFig. 5の結果から、エタノール水溶液の水添加割合の調整により、希薄燃焼での燃焼制御が可能であることが示唆される。

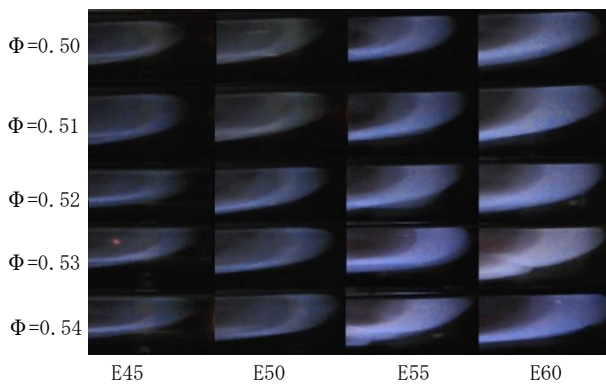


Fig. 5 Flame behaviors

(3) 噴流装置1つ設置した場合の火炎伝播速度増加率

Fig. 6からFig. 9に噴流乱れ装置15, 30, 45, 60degを使用した場合の各燃料濃度と当量比条件での平均火炎伝播速度をそれぞれ示す。これらの図から噴流乱れ装置無しの場合に比べ、噴流乱れ装置ありの場合では、噴流乱れを発生させることにより、平均火炎伝播速度が著しく増加していることがわかる。また、どの噴流乱れ装置を用いた場合でも、エタノール割合および当量比の増加に伴って、平均火炎伝播速度の増大が確認された。これは、噴流乱れ装置無しの場合の結果と一致している。特に噴流乱れ装置60degの場合、E60の当量比0.54の条件において、最大火炎伝播速度4.2m/sが確認された。すなわち、希薄予混合火炎の燃焼促進効果には噴流乱れが極めて有効であることが示唆される。

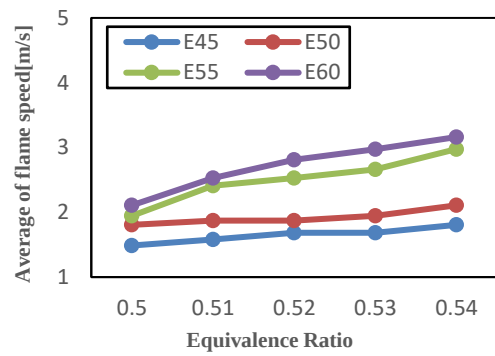


Fig. 6 Average of flame speed in 15deg Jetdisturbance unit (Ethanol concentration E45, E50, E55, E60)

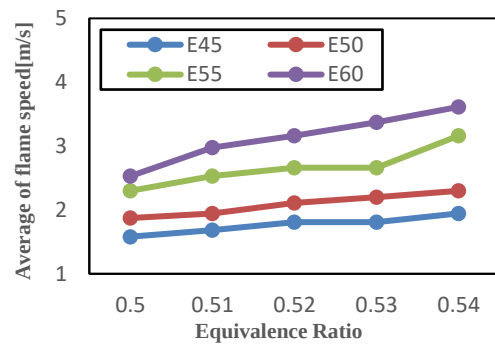


Fig. 7 Average of flame speed in 30deg Jetdisturbance unit (Ethanol concentration E45, E50, E55, E60)

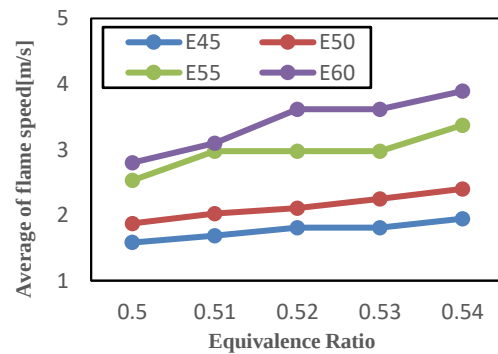


Fig. 8 Average of flame speed in 45deg Jetdisturbance unit (Ethanol concentration E45, E50, E55, E60)

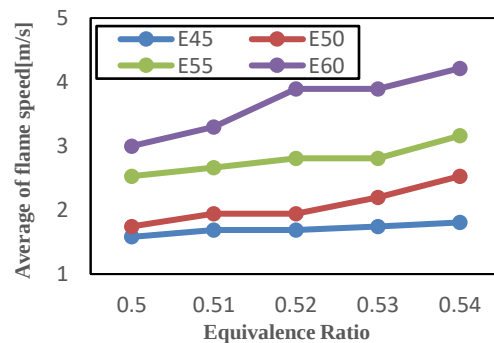


Fig. 9 Average of flame speed in 60deg Jetdisturbance unit (Ethanol concentration E45, E50, E55, E60)

Fig. 10からFig. 14に、各エタノール水溶液の、各当量比および各噴流乱れ装置を用いた場合の平均火炎伝播速度の増加率を示す。噴流乱れ効果による、平均火炎伝播速度の増加が観察された。希薄側エタノール濃度（E45, E50）の条件において、当量比0.54の際に噴流乱れ装置60degを用いた場合、E50で平均火炎伝播速度の増加率が最大値32%が確認された。すなわち、エタノール添加割合がE50と低い場合でも、噴流乱れ装置を用いることにより、著しい燃焼促進効果が希薄混合気でも発生することが確認された。また、E60（当量比0.52, 60deg）、E55(当量比0.51, 45deg)において51%の最大増加も確認された。

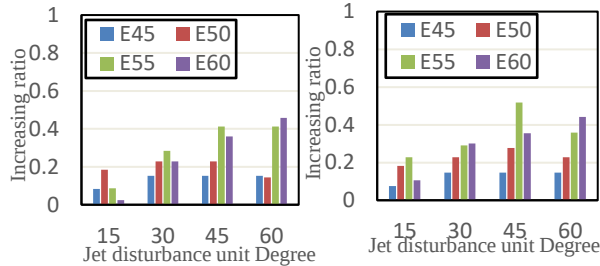


Fig. 10 Increasing rate of flame speed in the equivalence Ratio 0.50

Fig. 11 Increasing rate of flame speed in the equivalence Ratio 0.51

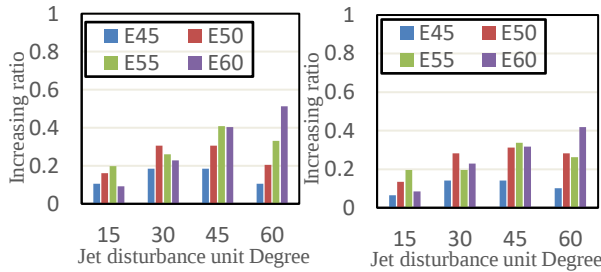


Fig. 12 Increasing rate of flame speed in the equivalence Ratio 0.52

Fig. 13 Increasing rate of flame speed in the equivalence Ratio 0.53

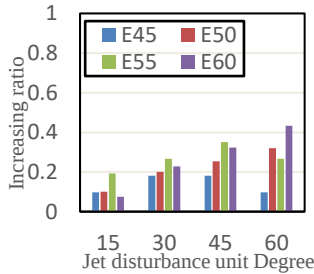


Fig. 14 Increasing rate of flame speed in the equivalence Ratio 0.54

(4) 噴流装置2つ設置した場合の火炎伝播速度増加率

噴流乱れ装置を一つ及び二つ設置した場合の火炎伝播速度に及ぼす影響を検討する為、本研究では、火炎伝播速度の増加率 γ を(1)式から算出した。ここで、 α は一つ噴流乱れ装置を設置した場合の平均火炎伝播速度、 β は二つ噴流乱れ装置を設置した場合の平均火炎伝播速度である。

$$\gamma[\%] = \frac{\beta - \alpha}{\alpha} \times 100 \quad (1)$$

Fig. 15からFig. 18から各エタノール水溶液濃度での火炎伝播速度の増加率 γ をそれぞれ示す。エタノール水溶液空気混合気のエタノール濃度の増大により、二つ噴流乱れ装置を設置した場合の火炎伝播速度の増大効果も増加することが観察された。エタノール水溶液濃度の増大により、最大値は当量比0.54の時、E60が二つ噴流乱れ装置羽根角45degを設置した場合、火炎伝播速度の増加率に49%となった。すなわち、二つ噴流乱れ装置を設置した場合の相乗効果が確認された。ただし、エタノールE45の場合、特に当量比0.5, 0.51, 0.52, 0.54の場合、二つ噴流乱れ装置を設置したことによる相乗効果は明らかに現れておらず、火炎伝播速度の減少が観測された。それは、エタノールE45を用いた場合、二つ目の噴流乱れ装置を通過する際に、低濃度エタノールの火炎温度が著しく低い為、乱れによる燃焼促進効果よりも、熱損失の影響が増大したこと起因すると考えられる。よって、二つ噴流乱れ装置を設置する場合には、その効果の安定性を維持するためには、E50濃度以上のエタノール水溶液濃度が必要である。本研究では、僅かな噴流乱れを希薄エタノール空気混合気に与えることによる、火炎伝播速度の増大が確認された。これは燃焼工学及び安全工学的な見地からも極めて興味深い点であり、今後、さらに旋回噴流乱れを用いた超希薄混合気の燃焼促進に関する最適化条件について検討を行う予定である。

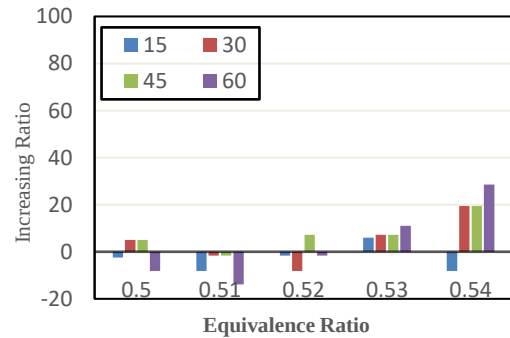


Fig. 15 Increasing rate of flame speed in the ethanol E45

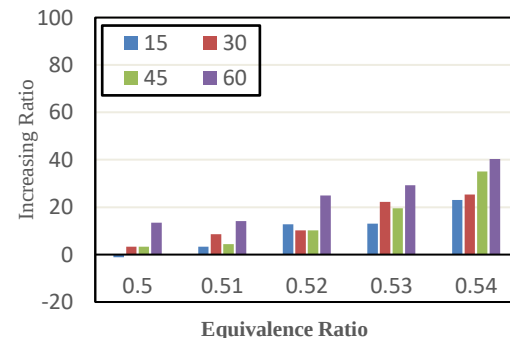


Fig. 16 Increasing rate of flame speed in the ethanol E50

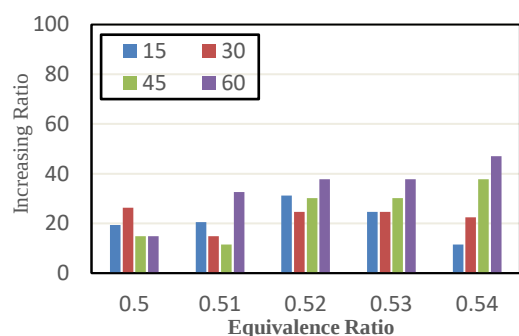


Fig. 17 Increasing rate of flame speed in the ethanol E55

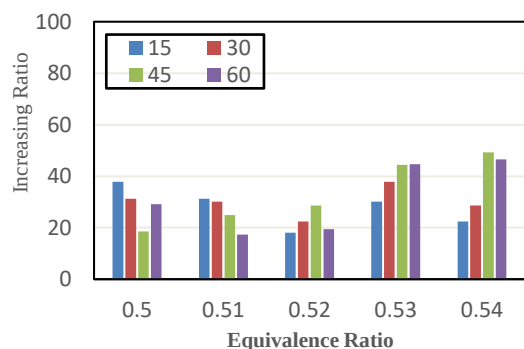


Fig. 18 Increasing rate of flame speed in the ethanol E60

4. 結論

本研究では、エタノール水溶液を用いた希薄可燃限界近傍でのエタノール水溶液混合気の燃焼特性に及ぼす噴流乱れの影響について検討を行った。以下に結論を示す。

- (1) 希薄側可燃限界近傍での燃焼改善には、噴流乱れが極めて有効である。
- (2) 希薄側可燃限界近傍での燃焼改善には、水溶液中のエタノール濃度により最適な噴流乱れ条件が存在する。
- (3) 超希薄エタノール水溶液混合気においても、最大32%程度、火炎伝播速度は噴流乱れ装置を用いた場合で増加する。
- (4) 同じ噴流乱れ装置を二つ設置した場合、特にE60の当量比0.54において、一つ設置した場合と比較して、羽根角45degで火炎伝播速度が最大49%増大する。

謝辞：本研究を行うため、暖かい激励とご指導、ご鞭撻を頂いた法政大学理工学研究科機械工学専攻川上忠重教授に心より感謝申し上げます。そこで、実験を進めるにあたり協力と助言をくれました、同研究室とワークショップの皆様、特に四年生の笠原諒君、須黒秀一君、並びに、卒業した先輩鍵山昂希様、誠に感謝申し上げます。

参考文献

- (1) <https://www.meti.go.jp/report/downloadfiles/g10928pj.pdf> 経済産業省, アルコール類の自動車用燃料としての一般的特徴(参照日2021年9月28日)
- (2) (株) 日立製作所: 低濃度エタノール燃料使用高効率改質エンジン等革新的バイオエタノール利用技術の開発, CO₂排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業, 成果発表会, 2017
- (3) 鍵山昂希, “管内進行火炎法によるエタノール混合気を用いた噴流乱れによる燃焼改善”, 法政大学大学院紀要, 理工学・工学研究科編, (62), 2021-03-24, 1-3.
- (4) 白川博之, “エタノールを用いた管内進行火炎の燃焼改善の研究”, 法政大学大学院紀要, 理工学・工学研究科編, (59), 2018-03-31, 1-3.
- (5) Kawakami et al, “A study of flame propagation limit of very lean propane-air mixture in a combustion tube” Journal of KONES Internal Combustion Engines, 2003, vol, 10, No3-4, pp. 149-153.
- (6) 馬英哲, 川上忠重, “エタノール水溶液を用いた希薄可燃限界近傍での予混合火炎の燃焼改善に関する研究”, 日本機械学会, 山梨講演会講演論文集, 2021