

エタノール水溶液の燃料性状および燃焼特性 に関する一考察

石川, 陽 / ISHIKAWA, Akira

(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)

7

(発行年 / Year)

2018-03-31

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00014611>

エタノール水溶液の燃料性状および燃焼特性に関する一考察

A STUDY OF FUEL PROPERTIES AND COMBUSTION CHARACTERISTICS FOR ETHANOL WATER SOLUTION

石川陽

Akira ISHIKAWA

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

Bioethanol is well known that the oil-alternate fuel for automobiles as carbon neutral fuel adapted to environmental problem. Furthermore, ethanol water solution is thought effective to depletion problems of fossil fuel resources. This study aims to examine that the evaporation characteristics, fuel properties and combustion characteristics of ethanol water solution using a hot plate, a spirit lamp and a swirl burner. The images of flame structure for ethanol water solution was visualized for various air ratio and water contents by using glass tube. The exhaust gases (NO_x, CO, O₂) and combustion temperature are measured in combustion chamber and exhaust pipe by using N type thermocouples. The main conclusions are as follows: 1) The Leidenfrost temperature of ethanol water solution increases with decreasing ethanol concentration. 2) The brightness and length of flame for ethanol water solution at the low concentration for ethanol water concentration (E45) decrease compared to the others ethanol water concentration (E60, E80 E95). 3) The combustion temperature decreases for the low concentration of ethanol water concentration (E45) than that of others for ethanol water concentration (E60, E80 E95) at any air ratios under constant ethanol flow rate condition. 4) The CO emission decreases with increasing the air ratio for the low concentration of ethanol water concentration (E45). 5) The NO_x emission decreases with decreasing the ratio of ethanol addition at any air ratios. 6) Fuel flow rate has small influence for NO_x emission under high air ratios at any ethanol water concentration.

Key Words: Ethanol, Ethanol water solution, Combustion temperature, Exhaust gas

1. 緒言

近年、エタノールは安全性の高い石油代替燃料として注目を集めており、輸送機器用燃料としての利用拡大が期待されている。そのため内燃機関の燃料としてエタノールを混合した研究は数多く行われている。[1][2]

しかし、エタノール水溶液を直接燃料として用いる場合には、その着火性、燃焼温度及び排気特性等に関する燃焼特性を把握することが必要不可欠であり、また、水添加がそれらに及ぼす影響についても詳細な検討が求められている。

そこで本研究では、エタノール水溶液の燃料性状及び燃焼特性を把握するために、熱面上でのエタノール水溶液滴の蒸発挙動について検討を行い、さらにアルコールランプを用いてエタノール添加率がエタノール水溶液の可燃限

界及び燃焼特性に及ぼす影響について検討した。また、エタノール水溶液をスワールバーナーによって噴霧燃焼させた場合の燃焼温度及びバーナー出口付近における排気成分に関する検討を行った。併せて、石英ガラス管を用いて各エタノール添加率、各空気比における火炎の可視化を行い、火炎形状を検討することにより燃焼温度や、NO_x、CO等の燃焼生成物の低減効果に及ぼすエタノール添加率や空気比の影響について考察を行った。

2. エタノール水溶液の蒸発特性

2. 1 実験方法

セラミックホットプレート (CHP-250DN アズワン) 上に設置したステンレス台を試験温度まで加熱し、台上にマイクロピペットを用いてエタノール水溶液を滴下するこ

とで水溶液のエタノール添加率及び熱面温度に対する気化時間を記録した。

供試液は E100, E80, E60, E45, E20 及び水(E0)とし、熱面の設定温度は全ての供試液について 50°C~390°C とした。なお、E45 はエタノール 45 vol.%, 水 55 vol.%の水溶液を意味する。

2. 2 実験結果

熱面にエタノール水溶液を 20 μ L 滴下した場合の熱面温度に対する気化時間を、エタノール添加率をパラメータとして、図 1 に示す。また、それぞれの水溶液において、ライデンフロスト温度[3]及び参考値として可視化観測の結果からライデンフロスト現象が開始したと思われる温度を、それぞれ表 1 に示す。

図 1 及び表 1 から、エタノール添加率の減少に伴いライデンフロスト温度が増大する傾向が観察された。また、図 1 から熱面温度が高温でない (100°C 前後) 領域においては、E80 を除いた 5 種の水溶液ではエタノール添加率の減少に伴って気化時間が増大するが、E80 のみ他の水溶液と比較して、気化時間が最小となっている。これはエタノール添加率の異なるそれぞれの水溶液において、エタノールと水の表面張力の差異によって熱面と接している面積に差異が発生したことに起因していると考えられる。

3. エタノール水溶液の灯芯燃焼

3. 1 実験方法

エタノール水溶液をアルコールランプに 60 mL 投入し、エタノール添加率及び芯の突出し長さの増減に伴う燃焼状態の変化を検討した。

供試燃料として、E100, E90, E80, E70, E60, E50 及び本実験範囲において点火及び 5 秒程度の継続燃焼が確認された限界のエタノール添加率である E45 を使用した。

アルコールランプはその拡散火炎の特性上、ランプ外に突き出ている芯の長さ (灯芯の長さ) によって火炎長さや燃焼形態が大きく異なる。これは、灯芯の露出面積増加に伴い、毛细管現象によって液溜まりから吸い上げられた燃料の蒸発速度が増大することに起因する[4]。したがって本実験では、燃料性状の影響を正確に把握するために芯の突出し長さを調整して検討を行った。

3. 2 実験結果

図 2 に各エタノール水溶液の、突出し長さ 5 mm の場合における、直接火炎画像、図 3 に突出し長さ 10 mm の場合での直接火炎画像を、それぞれ示す。

これらの図から明らかなようにエタノール添加率の減少に伴って火炎長さも減少するが、単調減少ではなく E50 において著しく減少している。さらに、E50 及び E45 は 30 秒程度で消炎したことからアルコールランプを用いた際のエタノール水溶液における連続燃焼の限界は、エタノール 50 vol.%付近に存在すると考えられる。

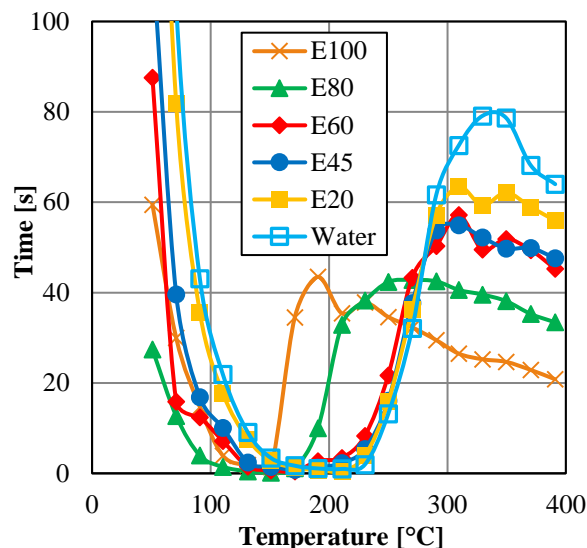


Figure 1 Evaporation time of ethanol water solution (20 μ L)

Table 1 Leidenfrost point

Ethanol content [vol.%]	Leidenfrost point [°C]	Leidenfrost point (Starting) [°C]
E100	190	170
E80	270	210
E60	310	250
E45	310	270
E20	310	270
Water	330	270

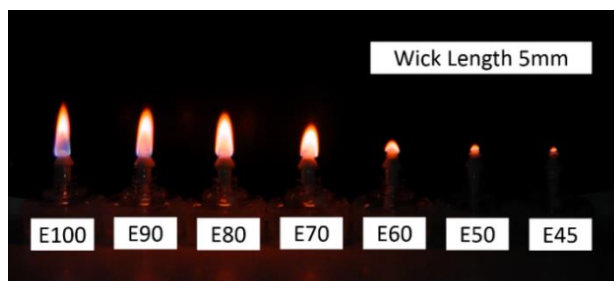


Figure 2 Image of flame structure of ethanol water solution using spirit lamp for various water contents (wick length 5 mm)

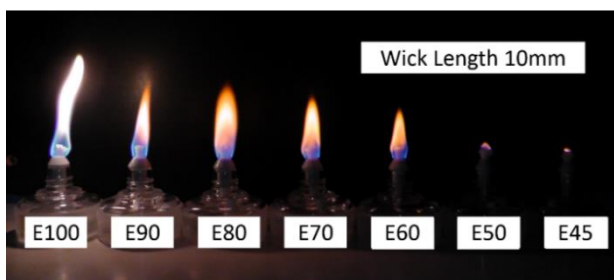


Figure 3 Image of flame structure of ethanol water solution using spirit lamp for various water contents (wick length 10 mm)

4. エタノール水溶液の噴霧燃焼

4. 1 実験装置

供試機関として、汎用スワールバーナーを用い、エタノール添加率の異なるエタノール水溶液を燃焼させた。

図4に燃焼温度・排気成分測定時における実験装置概略を示す。燃料供給は汎用ノズルによって行い、燃料供給管の途中に流量調節弁を設置した。流量調節弁の開度を変更することによって、燃料噴霧量を調節した。

図5にノズル付近に設置したスワラーを示す。スワラーは直径70mmで、中央部が開放された形状となっており、火炎安定性の向上が図られている。ノズル後方には、火炎可視化実験時には内径120mm、長さ400mmの石英ガラス管を、燃焼温度・排気成分測定時には燃焼室として内径204.7mmのステンレス製外筒を設置した。点火方法は火花点火とした。空気は送風機にて燃焼室に導入し、その流量によって空気比 λ を設定した。排気成分はNOA-7000及びCGT-10-1A(島津製作所)を用いて、燃焼室後方の配管部においてNO_x、CO及びO₂を計測した。

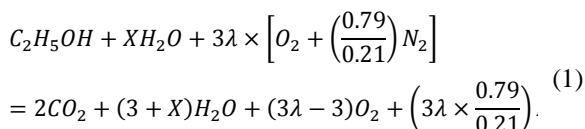
図6に燃焼室内に設けた5箇所の測定点(測定点1~5)の配置概略を示す。それぞれの測定点にてN型熱電対を用いて温度測定し、測定点1及び2における平均温度を燃焼温度として算出した。

4. 2 実験方法

供試燃料はエタノール添加率によって分類され、本供試機関において3分以上の連続燃焼が確認されているE45, 60, 80, 95とした[5]。燃料噴霧量は、エタノール添加率の異なる燃料においてもエタノール噴霧量が等しくなるように調節した。空気比 λ は1から5とし、各エタノール添加率、空気比において燃焼温度及び排気成分を測定した。各燃料、空気比における燃料流量及び空気流量を表2に示す。また、排気ガス成分の計測では、比較として、燃料供給管内に流量調節弁を設置せず、全燃料において燃料流量を4.3 L/h(一定)とした実験を行った。

4. 3 断熱火炎温度

図7に各エタノール水溶液の空気比に対する断熱火炎温度を示す。断熱火炎温度 T_{ad} はエタノール水溶液の燃焼における化学反応式(式1)からエタノール低位発熱量 H_l 、水の気化潜熱 ΔH_w 、湿り燃焼ガス質量 G_w 、平均定圧比熱 c_{pm} 、入口温度 T_0 を用いて熱バランス(式2)によって算出した。



$$T_{ad} = \frac{H_l - \Delta H_w}{G_w c_{pm}} + T_0 \quad (2)$$

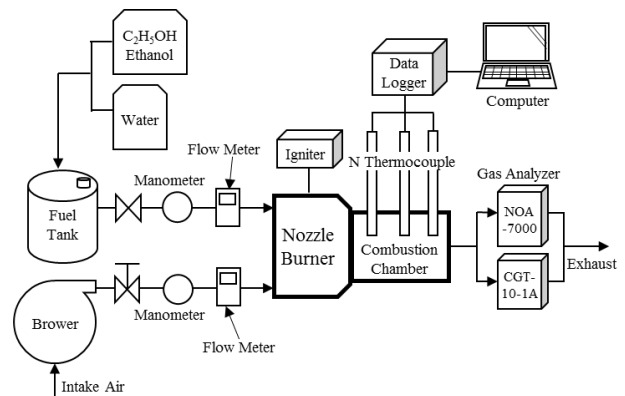


Figure 4 Block diagram of experimental system



Figure 5 Swirler and nozzle

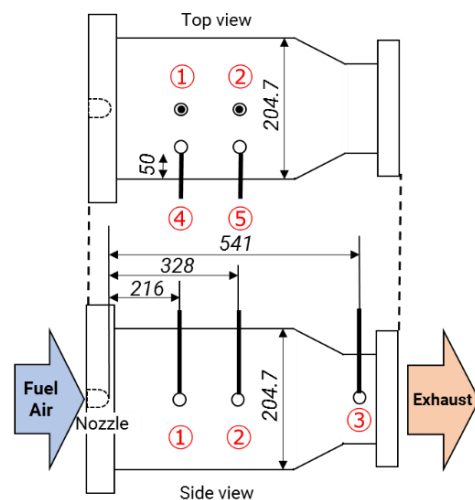


Figure 6 Temperature measuring points

Table 2 Fuel flow rate and air flow rate

Ethanol content [vol.%]	E45	E60	E80	E95
Fuel flow rate [L/h]	4.67	3.50	2.63	2.21
Ethanol flow rate [L/h]	2.10			
Air flow rate [m ³ /h]	$\lambda=1$: 12.9, $\lambda=2$: 25.9, $\lambda=3$: 38.8, $\lambda=4$: 51.8, $\lambda=5$: 64.7			

4. 4 可視化試験結果

図 8 にガラス管を用いた火炎挙動の代表例を示す。各条件において、左端にノズルが存在し、右方向へと流れが進行している。

図 8 から、火炎形状に着目すると、エタノール添加率の増加または空気比の低下に伴って火炎長が増大する傾向が確認された。また、いずれのエタノール添加率においても $\lambda=1$ の条件では他の空気比と比較して火炎形状が不安定となった。具体的に、 $\lambda=1$ の条件において、E45 では火炎の部分的な吹き飛びが一時的に確認された。これは、水添加量増大に伴う気化潜熱による損失増加の影響が E45 では大きく、水溶液として濃度の可燃限界付近の燃料であることに起因すると考えられる。その結果、部分的な不完全燃焼が発生したと考えられ、併せてノズル後方約 80 mm の位置のガラス管壁面に未燃分を含んでいると考えられる液滴の付着が観察されている。また、E80 および E95 では、 $\lambda=1$ の条件において、浮力の影響による火炎のガラス管内上方向への移動が確認された。

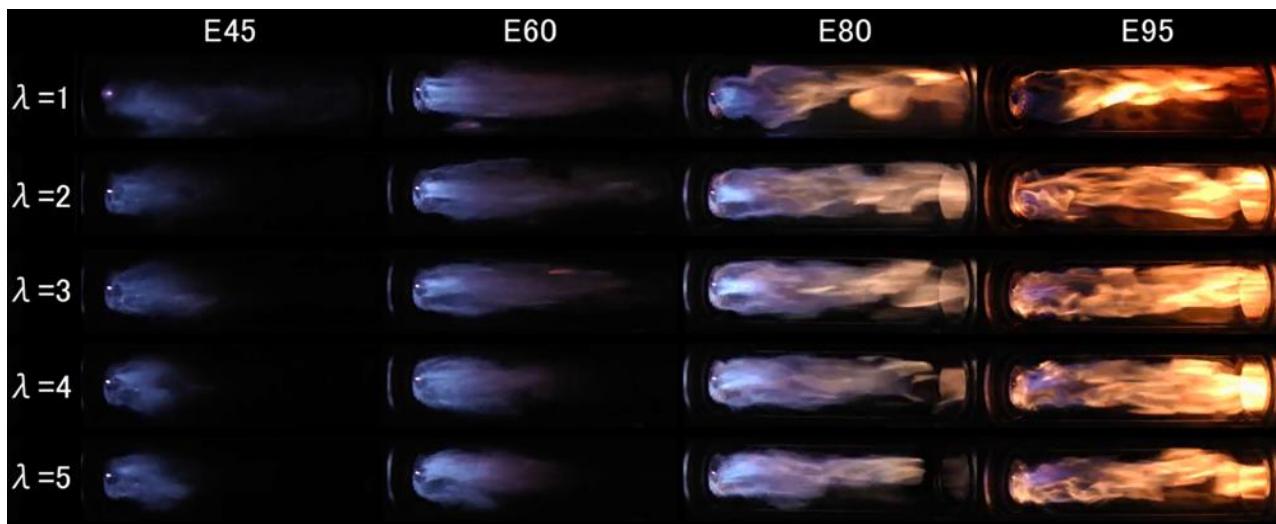


Figure 8 Images of flame structure for various air ratio and water contents (constant ethanol flow rate, 2.1L/h)

ここで、火炎色を比較するとエタノール添加率の増加に伴って輝炎の割合が増加していることがわかる。さらに、E80、E95 の燃料においては空気比の低下に伴って輝炎の割合が増大していることが確認された。これは、燃焼によって生成された煤などの微粒子物質から発生する連続スペクトルに起因すると考えられるが、燃焼室後方にて捕集布を用いて煤の確認を行った結果、目視レベルでの煤は確認されなかった。

4. 5 燃焼温度測定結果

図 9 及び図 10 に各エタノール水溶液の空気比に対する燃焼温度を示す。図 9 は燃焼室内に取り付けられた 5 点の熱電対での最高温度を、図 10 は図 6 における温度測定点 1 及び 2 の平均値を、それぞれ示す。

図 9 から明らかなように、エタノール添加率の異なる燃料をエタノール流量一定として燃焼させた場合、E45

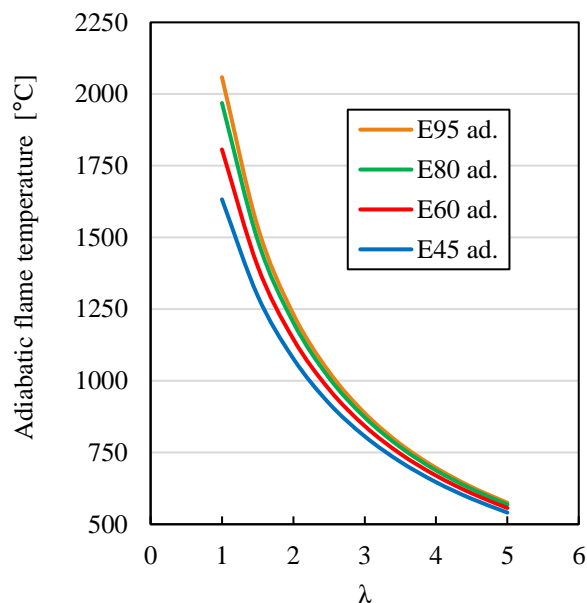


Figure 7 Adiabatic flame temperature as a function of air ratio and water contents

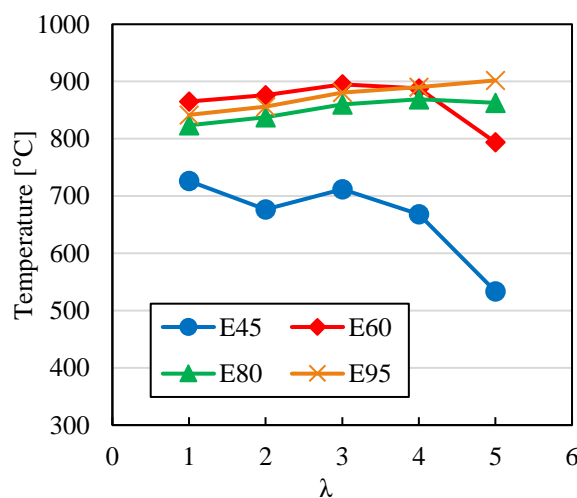


Figure 9 The variation of maximum combustion temperature in combustion chamber versus air ratio (constant ethanol flow rate, 2.1 L/h)

では、その他の燃料と比較して、 $100^{\circ}\text{C}\sim 250^{\circ}\text{C}$ 近く燃焼温度が低下している。これは4.4節で述べたようにE45では部分的な不完全燃焼が発生していたことに起因すると考えられる。また、 $\lambda=1\sim 4$ の条件ではE60, E80, E95の燃料で燃焼温度に著しい差異が発生していないことがわかる。これはエタノール流量を一定にしたことにより、燃焼室内に供給される単位時間あたりの発熱量が一定となったことに起因すると考えられる。 $\lambda=5$ の条件では、E45とE60において燃焼温度が低下した。これは図8からも明らかのように、空気量を増加させた事により火炎長が減少し、それに伴い火炎先端部の冷却効果が増大したためと考えられる。

図10から、温度測定点1及び2の平均燃焼温度は、図9に示す最高温度と比較して、E45の $\lambda=1$ の条件において 100°C 近く燃焼温度が低下している。これは、可視化試験において観察された、火炎の一時的な吹き飛びに起因すると考えられる。また、 $\lambda=4\sim 5$ の高空気比領域において $50^{\circ}\text{C}\sim 150^{\circ}\text{C}$ 近く燃焼温度が低下している。これは、図8からも明らかのように、空気量を増加させた事によって火炎長が減少し、測定点2において測定された燃焼温度が低下したことに起因すると考えられる。

4. 6 排気成分測定結果

4. 6. 1 CO 排出量

図11に空気比に対するCO排出量を、エタノール添加率をパラメータとして示す。また、比較として図12に燃料流量を4.3 L/hで一定とした場合でのCO排出量を示す。併せて、表3にエタノール流量を2.1 L/h及び燃料流量を4.3 L/hとした実験における $\lambda=1$ の条件での燃焼温度（温度測定点1及び2の平均値）と燃焼室の後流側に接続した配管での排気温度（ノズルからの距離約1500 mm）を示す。

図11及び図12から明らかのように、E45は低空気比領域（ $\lambda=1\sim 2$ ）において、その他の燃料と比較してCO排出量が増大している。これは燃焼温度低下や、局所的な空気供給不足に伴う不完全燃焼によるCO排出が増加したためと考えられる。

図11から、 $\lambda=1$ の条件において高エタノール添加率の燃料（E95, E80）のCO排出量が、低エタノール添加率の燃料（E60, E45）と比較して低下した。これは、表3に示すように高エタノール添加率の燃料では排気温度が他の燃料と比較して増大していることに起因すると考えられる。エタノール流量を一定とした実験においてE80, E95ではいずれも排気温度が 700°C を超える値となっており、COの発火点が 609°C であることや、高エタノール添加率燃料の燃焼において火炎長が増大していることから、燃焼室後方の配管内においてCOが酸化し CO_2 として排出されたことが考えられる。また、 $\lambda=1$ の条件において、E95はE80と比較して1600 ppm程度CO排出量が増大している。これは、燃焼中に局所的な熱解離が発生している

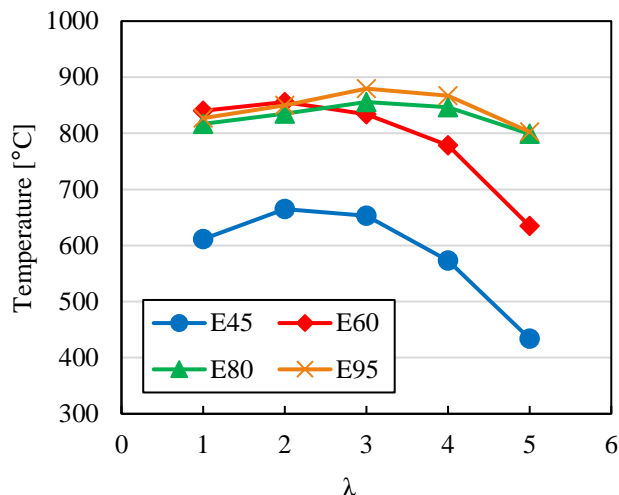


Figure 10 The variation of mean combustion temperature on measuring points 1 and 2 versus air ratio (constant ethanol flow rate, 2.1 L/h)

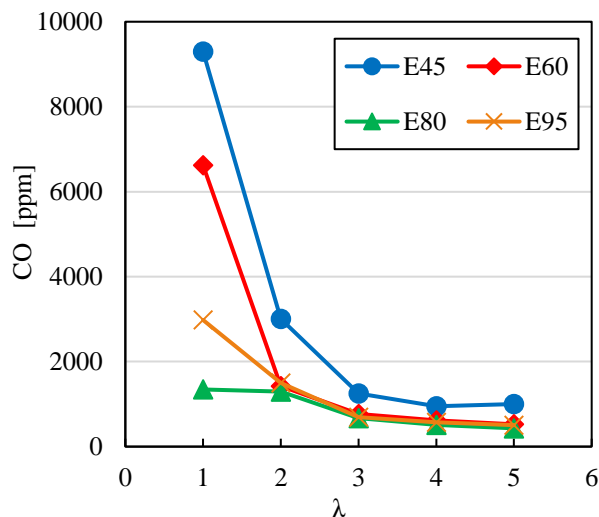


Figure 11 The variation of mean CO emission versus air ratio (constant ethanol flow rate, 2.1 L/h)

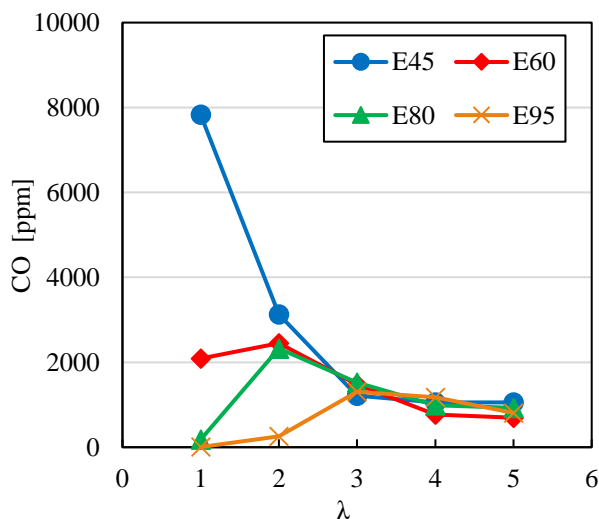


Figure 12 The variation of mean CO emission versus air ratio (constant fuel flow rate, 4.3 L/h)

ことに起因していると考えられるが、詳細な検討が必要である。

一方、高空気比領域 ($\lambda \geq 3$) では、CO 排出量に及ぼすエタノール添加率の影響は観察されず、ほぼ一定となっている。

4. 6. 2 NOx 排出量

図 13 に、燃料流量を 2.1 L/h で一定とした場合の空気比に対する NOx 排出量実測値の O₂ 換算値を、エタノール添加率をパラメータとして示す。また、比較として図 14 に燃料流量を 4.3 L/h で一定とした場合での NOx 排出量実測値の O₂ 換算値を示す。換算された NOx 排出量 $NOx_{calculated}$ は NOx 実測値 $NOx_{measured}$ 、標準酸素濃度 O_n 、O₂ 実測値 $O_{2measured}$ を用いて換算式 (式 3) によって算出した。なお、標準酸素濃度 O_n は 0% とした。

$$NOx_{calculated} = NOx_{measured} \times \frac{(21 - O_n)}{(21 - O_{2measured})} \quad (3)$$

図 13 及び図 14 から、同一空気比においては、エタノール添加率の減少に伴って NOx 排出量は減少しており、エタノール水溶液の顕著な燃焼特性の 1 つである。

特に低空気比領域において、エタノール流量を固定した場合は燃焼温度低下によるサーマル NOx 排出量の減少が確認された。これは表 3 から、燃焼温度と排気温度ともに大きな差異が確認されたことから明らかである。その他の空気比については全燃料種において NOx 排出量の差は 10 ppm 前後であり、燃料供給条件による顕著な影響は確認されていない。特に E95 においては、燃料流量を固定した場合、エタノール流量を固定した場合と比較して燃料流量が約 2 倍となっている (2.21 L/h から 4.3 L/h) が、NOx 排出量は高空気比領域において大幅な差異は確認されていない。このことから、高空気比領域においてエタノール水溶液の NOx 排出量に対する燃料流量の影響は小さいことがわかる。

5. 結言

本研究では、エタノール水溶液の燃料性状及び燃焼特性について熱面、アルコールランプ及び汎用スワールバーナーを用いて検討を行った。以下に結果を示す。

1. エタノール水溶液のライデンフロスト温度は、エタノール添加率の減少に伴って増大する。
2. エタノール添加率 E45 の場合には、他のエタノール添加率 (E60, E80 及び E95) と比較して著しく火炎輝度及び火炎長が減少する。
3. 噴霧燃料内のエタノール流量を一定とした場合、低エタノール添加率 (E45) では、空気比によらず他のエタノール添加率と比較して燃焼温度が低下する。
4. エタノール添加率 E45 の場合には、空気比の増大に

Table 3 Combustion temperature and exhaust temperature for various water contents ($\lambda=1$)

Ethanol content [vol.%]		E45	E60	E80	E95
Constant ethanol flow rate	Combustion temperature [°C]	611.5	840.4	816.8	826.9
	Exhaust temperature [°C]	569.8	546.3	706.3	710.8
Constant fuel flow rate	Combustion temperature [°C]	846.0	950.4	1003.5	1033.8
	Exhaust temperature [°C]	488.8	568.0	682.5	766.6

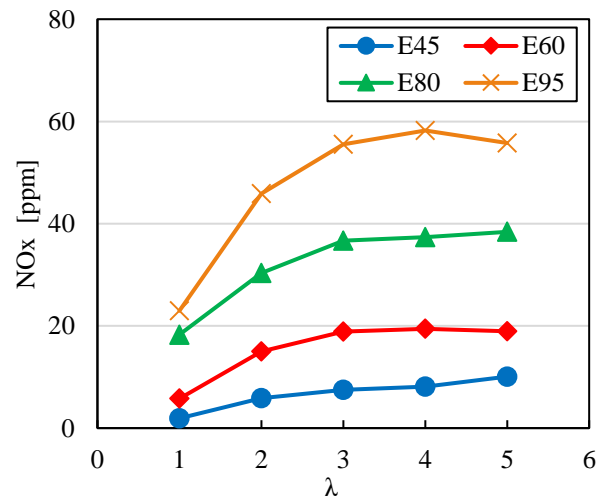


Figure 13 The variation of mean calculated NOx emission versus air ratio (NOx emission is corrected to 0% oxygen) (constant ethanol flow rate, 2.1 L/h)

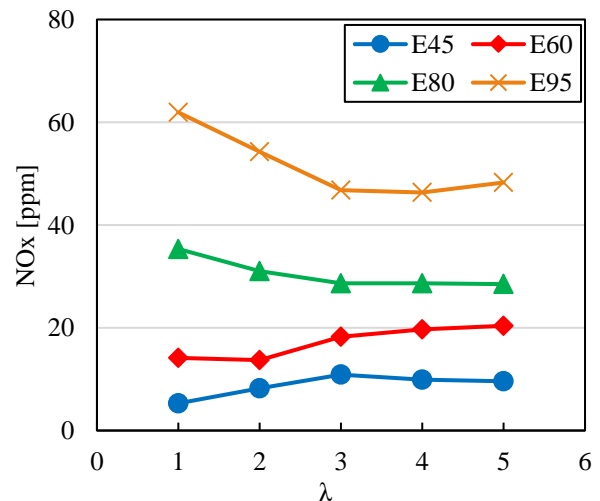


Figure 14 The variation of mean calculated NOx emission versus air ratio (NOx emission is corrected to 0% oxygen) (constant fuel flow rate, 2.1 L/h)

伴って CO 排出濃度は著しく減少する。

6. エタノール添加率の減少に伴って、空気比によらず NOx 排出量が低下する。
7. 高空気比下での NOx 排出量に及ぼす燃料流量の影響は、エタノール添加率によらず小さい。

謝辞

本研究は 2016 年度及び 2017 年度に日産自動車株式会社総合研究所との共同研究の一環として行われたものである。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 井上泰宏他：エタノールの混合がバイオディーゼル燃

料の噴霧、着火および燃焼特性に及ぼす影響，日本マリンエンジニアリング学会誌，Vol.46，No.2，pp.116-121，2011

- 2) 白川雄三他：低濃度含水エタノールを用いた燃料改質エンジンシステムによる熱効率向上と NOx 低減，日本機械学会論文集，Vol.82，No.840，pp.15-00573，2016
- 3) 西尾茂文，平田 賢：ライデンフロスト温度に関する研究，日本機械学会論文集，Vol.44，No.380，pp.1335-1346，1978
- 4) 水谷幸夫：燃焼工学，森北出版，2002
- 5) 石川陽他：ノズルバーナーを用いたエタノール水溶液の燃焼特性に関する研究，日本機械学会東北支部第 52 期総会・講演会論文集 pp.193-194，2017