

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 14 日現在

機関番号：37401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420171

研究課題名(和文) アルコール噴霧の自着火現象支配要因に関するデータベース構築

研究課題名(英文) Establishment of the database on the main factors governing auto-ignition phenomenon of an alcohol spray

研究代表者

齊藤 弘順 (SAITOH, Hironori)

崇城大学・工学部・教授

研究者番号：00331059

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：再生可能バイオマス由来のアルコールを燃料とする汎用高効率エンジンの実現を目指し、そのキー技術となるアルコール噴霧の着火・燃焼制御技術を確立すべく、自着火支配要因に関するデータベース構築が本研究の目的である。エタノールとジエチルエーテルの混合燃料を用い、燃料物性と周囲ガス条件が着火遅れに及ぼす影響を調べた。広範なパラメータ試験によって、各燃料の着火遅れに対する周囲ガス条件依存性の定量評価を行い、着火遅れに関する3Dマップを作成した。着火遅れの等値面から、周囲ガスの高圧化が自着火性改善に寄与するために必要とされる周囲ガス温度および酸素濃度条件についても燃料毎の傾向を明確に把握できるようになった。

研究成果の概要(英文)：This study deals with the development of controlled-ignition technology for high performance compression ignition alcohol engines. The objective of this study is quantitative evaluation of main factors that influence auto-ignition of an alcohol spray. This study focuses on the effects of surrounding gas pressure, temperature and oxygen concentration on auto-ignition. Surrounding gas pressure and temperature dependence of the spray auto-ignition was clearly presented by the 3D-surface data of ignition delay for Ethanol-Diethyl ether blended fuels. However, the database is insufficient yet due to the lack of data indicating the effect of Oxygen concentration on ignition delay. Results obtained during these three years indicate that the engine control logic can be drawn and the high performance CI alcohol engines can be developed when the database as 3D-surface data of the ignition delay is completed.

研究分野：熱流体工学

キーワード：アルコール噴霧 ディーゼル機関 自着火 燃焼 再生可能エネルギー

1. 研究開始当初の背景

東日本大震災復興対策本部の「東日本大震災からの復興の基本方針」の中で、災害に強い地域づくりを目指し、エネルギー分野では再生可能エネルギーの利用促進とエネルギー効率の向上を目指したスマート・コミュニティ、スマート・ビレッジのような地域の未利用資源を徹底活用しながら自立・分散型エネルギーシステムを導入し、自然共生社会の実現を目指すことが述べられている。更に、閣議決定された「日本再生のための戦略に向けて」の中で、原発の依存度の低減とグリーン・イノベーション戦略の強化が急務と述べられている。その中でディーゼル発電&エンジン廃熱利用のコージェネシスシステムにおいてはエンジンの燃料として、天然ガス等の化石燃料が主体で考えられているが、真の意味で自立・分散型を目指すにはこれらのエンジン発電機の燃料を地域で生産したバイオマスを用いることが必要と考えられる。また、交通分野におけるエネルギー戦略としては温暖化防止の観点から小型車両ではハイブリッド車、プラグインハイブリッド車および電気自動車の研究開発が活発であるが、流通を支えるトラック・船舶はその要求動力の大きさから今後もその動力源はディーゼルが主役と考えられる。

2. 研究目的

前節の社会背景を踏まえ、エネルギー技術に関する研究開発動向において、「再生可能」、「自立・分散型電源」、「温暖化防止」、「流通経済の維持」という4つのキーワードを結びつけるものとして本研究を位置づけ、再生可能バイオマス由来のアルコールを燃料とする定置型/移動型転用可能な汎用高効率アルコールディーゼルの実現を目指し、そのキー技術となる着火・燃焼制御法の確立が本研究の目的である。

3. 研究の方法

これまでの研究から、混合気形成および自着火現象を支配する物理パラメータには燃料物性(蒸発潜熱、理論空燃比)に関わる内部要因と周囲ガス条件(圧力、温度、酸素濃度)に関わる外部要因があることは明白であるが、それぞれがアルコール噴霧の自着火現象に対してどのように影響を及ぼすのかについては明らかになっていない。そこで、エタノールとジエチルエーテルの混合燃料(混合割合の異なる4種および比較対象として軽油)に対し、噴霧混合気形成ならびに自着火現象を物理化学的に解明することを目的に、高温高压定容燃焼炉(表1および図1参照)を用いた噴霧可視化実験を通じてアルコール噴霧自着火現象を支配する主要因につい

Table 1 Principle Particulars of Constant Volume Electrical Heating Chamber

Chamber	Outer Cell	Material (φ × H)	Cr - Mo Alloy (355 mm × 546 mm)
	Inner Core	Material (φ × H)	Ceramics (150 mm × 410 mm)
		Volume	7250cc
Durable Pressure		5.0 MPa	
Heater	Max. Electric Power (Voltage × Ampere)		14 kW (AC 200 V × 70 A)
Windows	Material Thickness		Quartz Glass 50 mm
Injector	Type		Solenoid Type
	Injection	Pressure	50 MPa
		Duration	4.76 ms
Nozzle Type (φ × N)		Hole Type (0.14 mm × 1)	

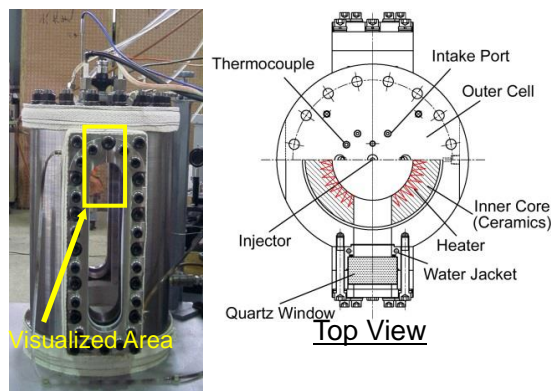


Fig.1 Structure of Constant Volume Electrical Heating Chamber

て調べ、物性の異なる燃料毎に着火遅れと周囲ガス条件の関係を3Dマップとして整理し、自着火特性を定量評価することを試みた。着火遅れを3次元サーフェスとしてデータベース化できれば、供試燃料だけでなく他のバイオ燃料についても燃料特性値から着火遅れを予測することができる。同時に安定した自着火を得るための周囲ガス条件を把握することができ、広くバイオ燃料対応型のエンジン開発に寄与することができる。

自着火現象支配因子の外部要因である噴霧周囲ガス圧力、温度および酸素濃度について、ガス圧力3パターン(2.0MPa, 2.5MPa, 2.8MPa)、ガス温度3パターン(700K, 750K, 800K)、酸素濃度9パターン(15%, 17%, 19%, 21%, 23%, 25%, 27%, 30%, 35%)の下で実験を行った。シャドウグラフ法(現有設備)により現象を可視化した。

表2に供試燃料の熱物性および燃料特性値を示す。エタノールの自着火性が悪いことは周知の事実である。そのエタノールに自着火性が良く燃料特性の上では軽油に近いジエチルエーテルを混合させた。過去の実験で、上記の周囲ガス条件(定容燃焼炉の限界値)ではエタノール単体およびエタノールリッチの混合燃料では自着火現象は得

Table 2 Thermal and fuel properties of tested fuels

Fuel notation		Ethanol	(E)&(D) Mixing fuel			Diethyl ether	Gas oil
		C ₂ H ₅ OH (E)	E:D=3:7 (ED37)	E:D=2:8 (ED28)	E:D=1:9 (ED19)	(C ₂ H ₅) ₂ O (D)	- (G)
Stoichiometric air/fuel ratio	[kg/kg]	9.01	(10.529)	(10.746)	(10.963)	11.18	14.6
Density	[kg/m ³]	785	(731.1)	(723.4)	(715.7)	708	825
Specific heat (liquid)	[kJ/(kg·K)]	2.723	(2.7034)	(2.7006)	(2.6978)	2.695	2.372
Specific heat (gas)	[kJ/(kg·K)]	2.329	(2.0378)	(1.9962)	(1.9546)	1.913	1.915
Boiling point	[K]	351.7	351.7 307.8	351.7 307.8	351.7 307.8	307.8	443~ 663
Heat of vaporization	[kJ/kg]	854.8	(530.91)	(484.64)	(438.37)	392.1	187.2
Minimum ignition temp.	[K]	636	-	-	-	433	530
Lower heating value (Hu)	[MJ/kg]	26.8	(31.7)	(32.4)	(33.1)	33.8	44.4

られなかったため、ジエチルエーテルリッチの混合燃料、ジエチルエーテル単体および軽油に対し、噴霧可視化実験を行った。更に軽油とエタノールを対象に噴霧混合気形成過程および自着火現象までの数値解析を行い、物性の違いによる噴霧内部の濃度・温度分布ならびにそれらの時間履歴を調べた。

4. 研究成果

(1) 噴霧可視化実験

図2および図3に噴霧可視化結果を示す。図はそれぞれ周囲ガス圧力および温度が着火遅れに及ぼす影響を示している。燃料はエタノール (E) とジエチルエーテル (D) の混合燃料であり、混合割合は E:D が 1:9 のもの (ED19 と表記) である。

図2より周囲ガス圧力が上昇するにつれて着火遅れが短くなる傾向が認められる。また図3より周囲ガス温度が上昇するにつれて着火遅れが短くなる傾向が認められる。これは以下の考察で説明がつけられる。

著者らの過去の研究でアルコール燃料は軽油等の石油系燃料と比べ、理論空燃比が小さく且つ蒸発潜熱が大きい為故に早すぎる希薄化と遅すぎる高温化をもたらし、自着火適正濃度・温度の同時的成立が困難であるために自着火性が悪いことが明らかとなっている。この知見は改めて軽油等現行のディーゼル燃料の自着火性の良さおよびサイクルの安定性を裏付けるものである。つまり、現行ディーゼルの圧縮比で得られる高温高压ガスの下では、軽油は燃料噴射後、着火適正温度が早期に達成し、後から濃度が理論空燃比に達するため、燃料噴射が安定している限り、常に同位置・同時刻で自着火適正濃度・温度が成立することを意味している。つまり、自着火は噴霧濃度条件 (局所的な理論空燃比) に依存していると言える。周囲ガス圧力が上昇することは噴霧内にエンタレインするガス密度が上昇し、希薄化を早める。同時に噴霧に供給される熱量も増加する。自着火が噴霧濃度条

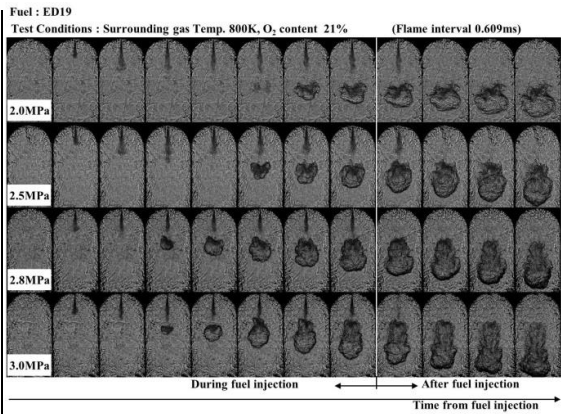


Fig. 2 Visualization results indicating the effect of the surrounding gas pressure on

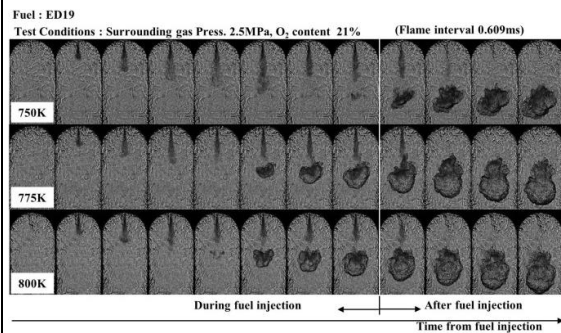


Fig. 3 Visualization results indicating the effect of the surrounding gas temperature on

件の成立時期に依存している燃料であれば、周囲ガス温度・圧力の上昇は噴霧の高温化を更に早め、且つ濃度条件達成も早めるため、着火遅れ時間を小さくすると考えられる。図2および3はジエチルエーテルリッチの混合燃料の可視化結果であり、物性的には軽油に近い為、周囲ガス圧力・温度の上昇に伴い着火遅れが短くなったものと考えられる。この傾向はジエチルエーテル単体およびED28でも認められた。しかし、エタノール混合割合が30% (ED37) を超えると、急激に自着火性は悪くなり、混合割合がジエチルエーテルの方が大きな場合でも、エタノールの特性が顕著に現れた。

(2) データベース構築

上記の結果を着火遅れと周囲ガス圧力および温度の3次元サーフェイスデータとして整理したものを図4に示す。

ジエチルエーテル単体 (図4 (a)) では、自着火現象の周囲ガス圧力依存性は低温条件であるほど顕著であることがわかる。同様に自着火現象の周囲ガス温度依存性は低圧条件であるほど顕著である。着火遅れの絶対値は異なるものの、上記傾向・特徴は他の供試燃料でも同様に認められる。

また、自着火現象の周囲ガス酸素濃度依存性については、パラメータ試験および再現性を含め結果の確認が終了しておらず、図4のような着火遅れに関する3Dマップの整理に至っていないが、ジエチルエーテル

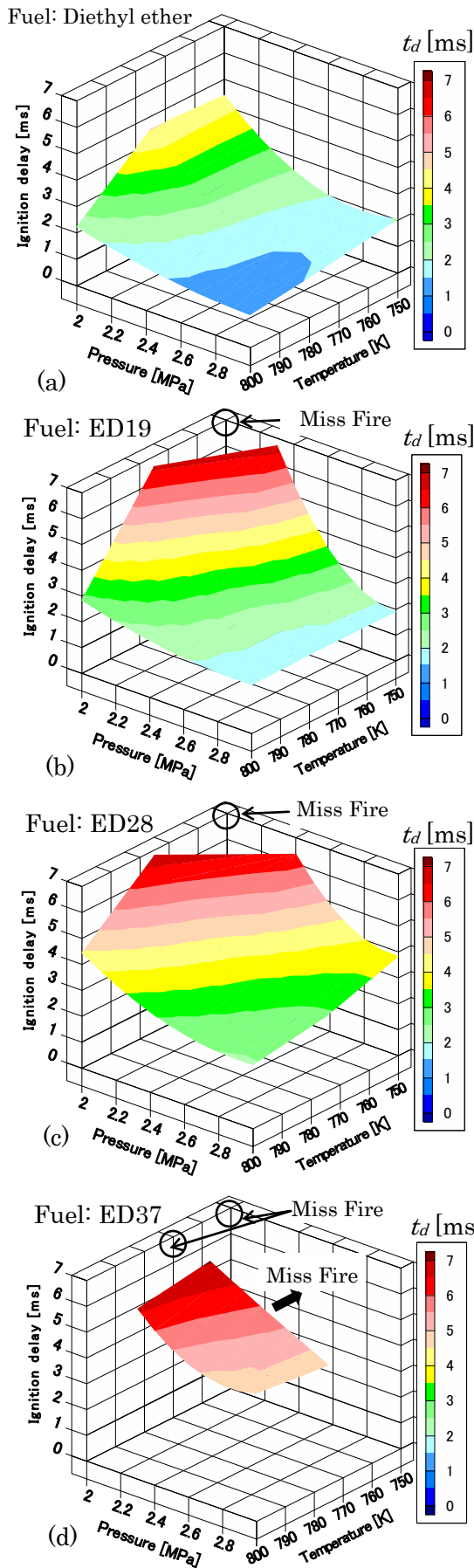


Fig. 4 Surrounding gas pressure and temperature dependence of auto-ignition represented in a form of 3D-surface data of ignition delay for each tested fuel

単体、ジエチルエーテルリッチの混合燃料 (ED19, ED28 および ED37) では周囲ガス酸素濃度が高いほど、着火遅れが短くなるという結果が得られている。これは先述の自着火適正濃度・温度の成立という観点で考えると、合理的な予想した通りの結果である。周囲ガス酸素濃度が高いということは、噴霧内にエントレインされるガス質量が同じであっても酸素の量が多いため、理論酸素量に達する時間が短くなる (見掛け上の理論空気が減少する) ことを意味し、希薄化を促進する。つまり自着火が噴霧濃度条件成立に依存する燃料に対しては、図 4 で示された結果と合わせ、周囲ガス圧力、温度および酸素濃度がそれぞれ高い条件程、着火遅れは短くなり、自着火の周囲ガス条件依存性は小さくなると予想される。周囲ガス酸素濃度が自着火に及ぼす影響については、パラメータ試験が終了次第、3D マップを作成し、データベースの構築を進める予定である。更に実機関燃焼場と同等の更に高い周囲ガス圧力および温度条件に対しては、図 5 に示す急速圧縮膨張装置を導入して噴霧可視化実験を実施し、3D マップの範囲を広げてデータベースの完成を目指す。本研究期間内に今後の研究展開を見据えて、急速圧縮膨張装置をほぼ完成 (現在、試運転を行い軽微な改良を進めている段階) させることができたことも本研究費での成果である。



本体	行程容積	5670cc
	すきま容積	270cc
	可視化範囲	H × W = 90mm × 50mm
	圧縮比	最大 $\epsilon = 22^{*1}$
	圧縮圧力	6.0 MPa ^{*1}
圧縮温度		1000 K ^{*2}
		^{*2} : 吸気温度変更により調整可能
モーター	駆動出力	7.5 kW / 650 rpm
インジェクタ	種類	ソレノイドタイプ
	ノズル寸法	Hole type, $\phi \times n = 0.14\text{mm} \times 1$
	噴射圧・期間	50MPa, 4.76ms

Fig.5 Rapid Compression & Expansion Machine

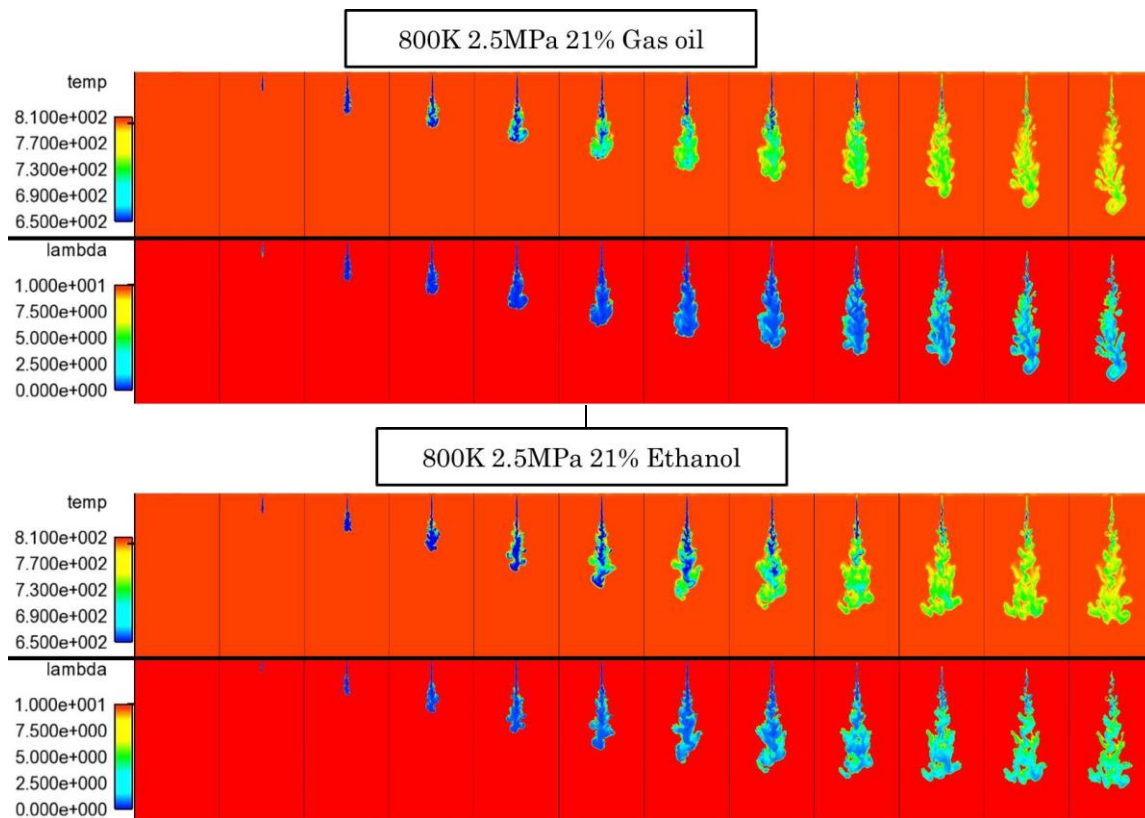


Fig. 6 Numerical prediction on the mixture formation process for Gas oil and Ethanol in terms of spatial temperature and concentration distribution and their temporal history

(3) 数値解析

実験においては噴霧をシャドウグラフ法で可視化し、着火遅れ、噴霧形状および着火位置を把握しているに過ぎず、供試燃料の自着火特性を調べたに過ぎない。実用化まで考えると、現象の解明が必要であり、物理・化学的に自着火に至るまでの混合気形成のメカニズムを明らかにする必要がある。そこで、数値解析を導入し、燃料噴射開始からの噴霧内濃度・温度分布ならびにそれらの時間履歴の予測を行った。計算にはエンジン燃焼解析に優位性のある市販CFDコード“CONVERGE”を用いた。圧縮性流体解析をベースに、乱流に対してはLES、液滴分裂モデルにはKH-RTモデルを採用した。またSAGE詳細化学反応モデルにて化学種の濃度も計算した。図6は実験と同等の周囲ガス圧力2.5MPa、温度800K、酸素濃度21vol%条件下での軽油とエタノールの混合気形成過程の計算結果である。上段が軽油、下段がエタノールに対応している。また、各々の上段・下段はそれぞれ噴霧温度分布および濃度（空気過剰率）分布の時間履歴である。

温度分布に着目すると軽油の方がエタノールよりも高温化が早いことが分かる。これは微粒化過程と蒸発潜熱の違いによるものであり、エタノールの方が微粒化が促進され、それに伴い蒸発も促進された分、蒸発潜熱の影響で高温化が妨げられたものと考えられる。また、濃度分布はエタノール

の方が希薄化が急速に進行している。過去にも噴霧運動量理論によって空間平均値的な理論検討を行い、上記と同様の考察をしたものの、噴霧の内部構造が不明であったため、推察の域を脱しなかった。しかし、今回の数値解析の結果、噴霧の内部構造についても詳細な時系列定量データが得られたことは大きな成果である。これらの結果は噴霧可視化実験の結果とも照合し、噴霧到達距離、噴霧角、噴霧形状のいずれにおいても整合性が確認された。これまでの空間平均値論から得ていたアルコール燃料の自着火性の悪さに関する理由を噴霧内部構造の解明によって理論的に裏付けることができたとともに、実験結果との比較から数値計算精度の妥当性についても検証することができた。今後、実機燃焼場相当の周囲ガス条件での計算ならびに噴孔径や噴射圧ならびにデュアル噴射などハード的に改造しないと実験が難しい事項に関し、数値実験を進め、高効率アルコールディーゼル実現に向け、着火制御技術の確立を目指して、開発の方向性を示唆するとともに具体的な方法論を提案し、且つ実験によってそのアイデアの効果を検証していく予定である。

5. 主な発表論文等

【雑誌論文】(計2件)

- ① Hironori SAITOH & Koji Uchida
“STUDY OF THE CONDITIONS FOR CONTROLLED IGNITION OF FUELS WITH A POOR AUTO-IGNITION QUALITY”, 査読有 Journal of Flow Visualization and Image Processing, Vol.20, Issue1-2, pp.93-109, 2014
DOI:10.1615/JFlowVisImageProc.2014010306
- ② Hironori SAITOH & Koji Uchida
“Effect of Surrounding Gas Oxygen Content on the Spray Mixture Formation and Auto-Ignition Phenomenon for Ethanol-Diethyl Ether Blended Fuels”, 査読有 SAE Paper 2013-01-0025, 2013
DOI:10.4271/2013-01-0025

【学会発表】(計7件)

- ① Hironori SAITOH & Koji Uchida
“Surrounding Gas Pressure and Temperature Dependence of the Spray Auto-ignition Phenomenon for Ethanol-Diethyl Ether Blended Fuels”, 6th TSME International Conference on Mechanical Engineering, 2015.12.16-18 (Cha-Am, THAILAND)
- ② 内田浩二、齊藤弘順
「エタノール・ジエチルエーテル混合燃料の噴霧自着火現象に対する周囲ガス圧力・酸素濃度依存性」, (公社)自動車技術会 2015 秋季大会 2015.10.14-16 北九州国際会議場 (福岡県北九州市)
- ③ 内田浩二、齊藤弘順
「エタノール・ジエチルエーテル混合燃料の噴霧自着火現象に対する周囲ガス圧力・温度依存性」, 第25回内燃機関シンポジウム 2014.11.26-28 (独)産業技術総合研究所つくば中央第1共用講堂 (茨城県つくば市)
- ④ 内田浩二、齊藤弘順
「アルコール噴霧の自着火現象支配要因に関するデータベース構築」, 日本機械学会九州支部大分講演会 2014.9.19-20 ホルトホール大分 (大分県大分市)
- ⑤ Hironori SAITOH & Koji Uchida
“On The Key Technology for The Development of High Performance Engines Flexible for Any Kinds of Bio-Fuels”, Grand Renewable Energy 2014 International Conference & Exhibition, 2014.7.28-8.1. Tokyo Big Sight (東京都江東区)

- ⑥ Hironori SAITOH & Koji Uchida
“STUDY OF THE CONDITIONS FOR CONTROLLED IGNITION OF FUELS WITH A POOR AUTO-IGNITION QUALITY”, 9th International Symposium on Flow Visualization and Image Processing, 2013.8.25-29 (Busan, KOREA)
- ⑦ Hironori SAITOH & Koji Uchida
“Effect of Surrounding Gas Oxygen Content on the Spray Mixture Formation and Auto-Ignition Phenomenon for Ethanol-Diethyl Ether Blended Fuels”, 17th Asia Pacific Automotive Engineering Conference, 2013.4.1-5 (Bangkok, THAILAND)

【その他】(計1件)

- ① Hironori SAITOH & Koji Uchida
“The Outstanding Paper Award”
6th TSME International Conference on Mechanical Engineering, 2015.12.16-18 (Cha-Am, THAILAND)

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
齊藤 弘順 (SAITOH Hironori)
崇城大学・工学部・教授
研究者番号:00331059
- (2) 研究分担者
内田 浩二 (UCHIDA Koji)
崇城大学・工学部・准教授
研究者番号:00454950