

令和元年6月13日現在

機関番号：37401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06135

研究課題名(和文) 再生可能バイオマス由来アルコール燃料の噴霧自着火現象解明およびその制御技術開発

研究課題名(英文) Study on the Auto-Ignition Phenomenon of Biomass based Recyclable Alcohol Fuels and the Development of their Controlled Ignition Technology

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) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は再生可能植物由来アルコールを燃料とする高効率ディーゼルの実現を目指し、そのキー技術となるアルコール噴霧の着火・燃焼制御技術の確立が本研究の目的である。噴霧形成過程の可視化実験と素反応まで考慮した数値解析を実施した。実験では、燃料物性が着火遅れに及ぼす影響ならびに着火遅れの周囲ガス圧力・温度・酸素濃度依存性の定量評価を行い、数値解析では、噴霧混合気形成における噴霧内濃度・温度の空間分布およびその時間履歴を明らかにし、エタノールの噴霧自着火成立の周囲ガス圧力および温度の推定を行った。その結果、噴霧構造にまで踏み込んで、アルコール燃料の自着火を成立させるための条件を定量的に明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

実験による現象観察と数値計算による噴霧内部構造解析によって、アルコール着火制御技術確立に向けた技術開発の方向性を明らかにした。これまで、自着火成立には着火適性濃度(理論空燃比)・温度の時空間的マッチングが重要との知見を得ていたが、エタノールの詳細な数値解析によって、噴射開始からどの時期どの位置で着火を制御的に起こせるかについて定量的な知見が得られたことは大きく、この技術が確立すれば、他の発電技術とのベストミックスによる自立・分散型の安定した電源確保のみならず、自立・分散型という特徴に加えエネルギーの地産地消という最もロスの少ない形でのエネルギー利用を実現できる。

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 to make clear the conditions for stable auto-ignition of an alcohol spray. Experimental and numerical visualization of mixture formation process was conducted with focusing on the required surrounding gas pressure and temperature for stable auto-ignition with acceptable ignition delay of an Ethanol spray. Main findings are as follows:

Condition of stable auto-ignition of an Ethanol spray is the existence of the region where excess air ratio () =1 and temperature higher than the minimum ignition point is simultaneously satisfied during mixture formation, and actual minimum ignition point of an Ethanol spray under high pressure condition such as compression pressure of conventional diesel engines is expected around 940K, and 1100K is recommended as compression gas temperature to achieve 940K inside a spray by fuel injection.

研究分野：熱流体工学

キーワード：アルコール ディーゼル 自着火 燃焼 再生可能エネルギー

1. 研究開始当初の背景

平成 26 年 4 月に閣議決定された「エネルギー基本計画(経産省)」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推進を前提として、徹底した省エネルギー社会の実現、再生可能エネルギーの導入加速化、石炭・天然ガス火力の発電効率向上および分散型エネルギーシステムの普及拡大の必要性が述べられている。また、地方創生政策に関連し、平成 25 年の臨時国会にて成立した「農山漁村再生可能エネルギー法(農水省)」の中で、熱・電気コージェネレーションの推進と再生エネルギーの地産地消推進が謳われている。上記概要にあるディーゼル発電&エンジン廃熱利用のコージェネ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として、地域で生産したバイオマス由来の燃料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. 研究の目的

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・燃焼制御法の確立に向け、自着火に至るまでの混合気形成過程を物理化学現象として解明すること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。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、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してきた。H25~H27 年の 3 年間で周囲ガス圧力と温度を横軸に、着火遅れを縦軸にとった着火遅れの 3D サーフェースデータを作成した。本研究期間では、残っていた着火遅れの周囲ガス酸素濃度依存性について定量評価を行い、上記同様の 3D マップを作成し、周囲ガス条件と着火遅れに関するデータベースを構築した。これによって着火遅れの等値面が得られ、周囲ガスの高压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。

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

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
	Type		Solenoid Type
Injector	Injection	Pressure	50 MPa
		Duration	4.76 ms
	Nozzle Type (φ×N)		Hole Type (0.14 mm × 1)

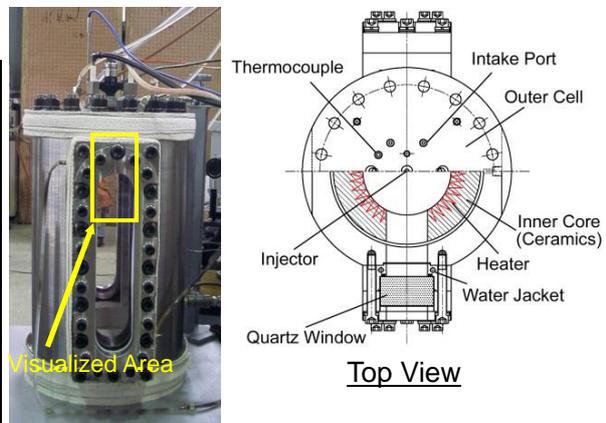


Fig.1 Structure of Constant Volume Electrical Heating Chamber

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瞬時噴霧内濃度・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。

4. 研究成果

(1) 実験

図2に着火遅れの周囲ガス酸素濃度および圧力依存性を着火遅れの3Dサーフェスデータとして示す。同図(a),(b),(c)および(d)は、それぞれ燃料がD, ED19, ED28および軽油に関するデータである。ここでDはジエチルエーテル、Eはエタノールを表し、ED後の数値はEとDの混合割合を示している。図よりD単体およびED19は同一傾向を示しており、着火遅れの周囲ガス酸素濃度依存性は低圧下ほど顕著であり、また、周囲ガス圧力依存性は低酸素濃度下ほど顕著である。それに対し、ED28では、周囲ガス酸素濃度が21%（大気相当）より低い場合は極めて着火は不安定である。過去に得られた着火遅れの周囲ガス圧力&温度依存性と合わせて考えると、ED28および軽油においても図2

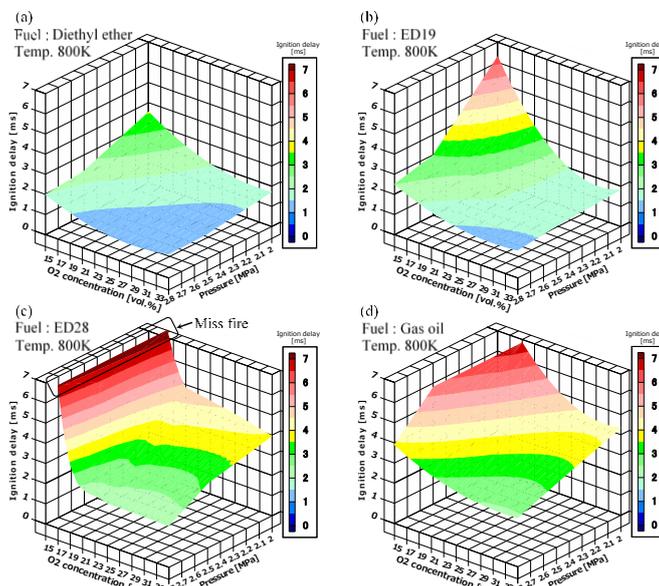


Fig.2. Surrounding gas oxygen concentration and pressure dependence of auto-ignition represented in a form of 3D-surface data of ignition delay for each tested fuel.

の温度条件(800K)よりも高温になれば、図2(a),(b)と同様の傾向が得られるものと推測される。これらの結果から安定した自着火成立のための周囲ガス条件は燃料物性によって大きく異なるが、総じて高圧、高温、高酸素濃度ほど着火遅れは短くなる。しかし、それぞれある一定の値を超えると着火遅れ時間に大きな変化は認められなくなる。高圧・高酸素濃度領域では混合気の希薄化が進行するため、ある一定値を超えると、逆に着火遅れは長くなる傾向を示すことが明らかとなった。これは軽油についても確認された。その理由はアルコール燃料の自着火性が悪い原因と同じで、自着火適性濃度・温度が時空間的にマッチしなくなるためであると思われる。しかしながら、この考察を実験的に検証するには現有の定容燃焼炉ではスペック的に無理があるため、数値解析を導入し、噴霧の内部構造(混合気形成過程における物理化学現象)の解明を試みた。

(2) 数値解析

図3に実験に用いた定容燃焼炉と解析領域の比較を示す。定容燃焼炉は円筒形状であり、電気ヒーター内蔵した構造である。数値解析においては同様の円筒形状の閉空間を解析領域としているが、計算コストを考え、噴霧の壁衝突が生じない範囲で領域を小さくした。表2に実験に使用した定容燃焼炉と数値解析領域の比較を示す。サイズ以外は燃料噴射条件を同一とし、燃料をエタノールとして解析を行った。支配方程式は圧縮性流体としての連続の式、ナビエーストークス方程式、およびエネルギー式である。更に化学反応には化学種輸送方程式を用いた。表3に解析条件および解析に用いた物理モデルを示す。周囲ガス酸素濃度21%一定の下、温度及び圧力をそれぞれ800K~1200K、2.5MPa~9.0MPaの5パターンに対しエタノールの噴霧混合気形成過程についてシミュレーションを実施した。乱流にはLESモデル、液滴分裂にはKH-RTモデル、化学反応にはSAGE素反応モデルを採用した。メッシュサイズや各種モデルの妥当性については、軽油(解析No.1)の数値計算と過去の可視化結果(自着火含む)との比較

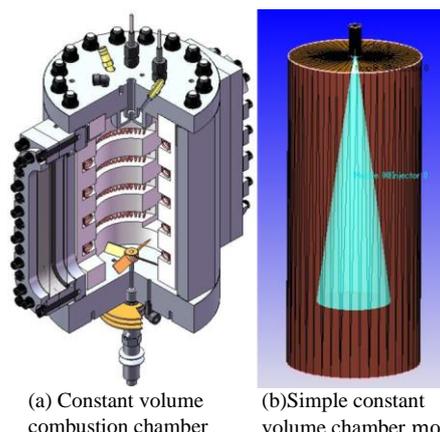


Fig.3 Comparison between constant volume combustion chamber and computational domain

Table.2 Comparison of specification combustion chamber and computational domain

	Constant volume chamber	Simple constant volume chamber model
Chamber Size (φ×H)	150 mm × 420 mm	82.6 mm × 200 mm
Volume	7250 cc	1072 cc
Injection Pressure	50 MPa	
Injection Duration	4.6 ms	
Nozzle Type (φ×N)	Hole Type (0.14 mm × 1)	

によって検証した。エタノールの素反応機構については、Lawrence Livemore National Laboratory (California, USA)が Web 上で公開している Marinov らによる機構を採用した。

Table.4 Fuel Properties

Properties	Fuel notation		Ethanol	Gas oil
Stoichiometric a/f ratio: L_{th}	[kg/kg]		9.01	14.6
Density: ρ_f	[kg/m ³]		785	825
Specific heat (liquid): c_{fl}	[kJ/(kg·K)]		2.723	2.372
Specific heat (gas): c_{fg}	[kJ/(kg·K)]		2.329	1.915
Boiling point: T_b	[K]		351.7	443~663
Heat of evaporation: γ_f	[kJ/kg]		854.8	187.2
Minimum ignition temp.: T_{ig}	[K]		636	530
Lower heating value: Hu	[MJ/kg]		26.8	44.4

※ Under Atmospheric Pressure Condition

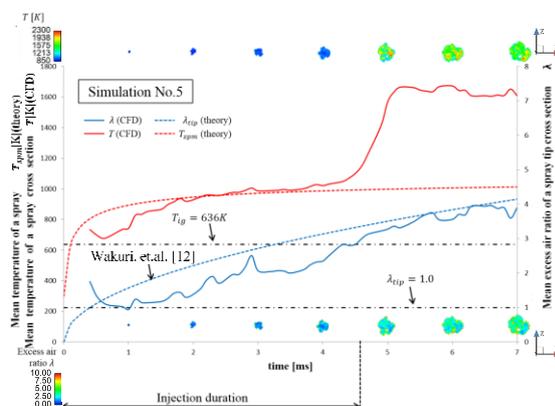
数値解析において用いた燃料の物性値を表 4 に示す。エタノールについては周囲ガス条件の異なる 5 パターンについてシミュレーションを実施したが、その内、No.5 および No.6 のみ自着火が認められた。図 4 に No.5 の解析結果を示す。図 4(a)は燃料噴射開始からの噴霧内最大横断面における空気過剰率分布および温度分布の断面平均値の時間履歴を示している。また、同図(b)は噴霧軸を含む縦断面の瞬時空間分布およびその時間履歴を示しており、上から擬似シャドウグラフ S (3 方向における密度の 2 階微分値の RMS 値)、空気過剰率、温度分布である。図より燃料噴射開始から 4ms~4.5ms 付近で熱源である周囲ガスよりも高温となる急激な温度上昇が認められる。これは燃焼化学反応による発熱の証拠である。同図(b)の S 図においても温度上昇と同時に燃焼による膨張と思われる噴霧形状が認められる。自着火の判定については、温度によるものや特定化学種のモル分率によるものなど幾つか提唱されているが、本研究においては、噴霧構造がまだ明確でないために厳密な自着火判定基準を設けてはいない。しかし、熱源である周囲ガス温度以上の温度は、連鎖反応が生じない限り生じ得ないので、少なくとも解析 No.5 では、燃料噴射から 4ms~4.5ms の時期に自着火現象が生じたものと考えられる。解析 No.6 (周囲ガス圧力 9.0MPa, 温度 1200K) では更に早い時期での自着火が得られた。

これまでの研究で、燃料噴射による自着火成立の条件として、噴霧内局所において、混合気濃度が理論空燃比 ($\lambda = 1$) で且つ温度が化学反応進行に至る活性化領域に達していること、つまり着火適性濃度・温度の時空間的マッチングであると結論づけてきた。アルコール燃料は軽油等のディーゼル燃料と比べ理論空燃比が小さく蒸発潜熱が大きいという物性を有するが故に、早すぎる希薄化と遅すぎる高温化をもたらし、上記着火適性濃度・温度の時空間的マッチングが得られないために自着火性が極めて悪いという知見である。この知見を踏まえ、図 4 を見てみると、混合気濃度は局所的には $\lambda = 1$ なる領域が存在し、且つ断面平均温度がエタノールの最低着火温度 (636K) 以上の条件を満たすのは燃料噴射開始から約 2ms 後である。しかし、シミュレーションの結果ではそれよりもかなり遅れて、4ms~4.5ms 後に自着火が生じている。化学

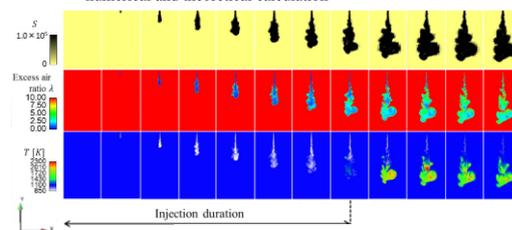
Table 3. Physical & chemical model and analysis conditions

Index of calculation	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
Fuel	Gas Oil	Ethanol	Ethanol	Ethanol	Ethanol	Ethanol
Surrounding Gas Temperature [K]	800	800	1000	1000	1100	1200
Surrounding Gas Pressure [MPa]	2.5	2.5	6.5	9.0	5.5	9.0
Surrounding Gas Oxygen	21% (vol.)					
Turbulence Model	LES Model (LES: Large Eddy Simulation)					
Spray Model	*KH-RT Model					
Chemical Reaction Model	SAGE detailed elementary reaction model					

*KH: Kelvin-Helmholtz, RT: Rayleigh-Taylor



(a) Comparison of λ and T histories from fuel injection between numerical and theoretical calculation



(b) Visualized images of S , λ

Fig. 4. Result of simulation No.5 (Surrounding gas conditions: $P=5.5\text{MPa}$, $T=1100\text{K}$, $O_2=21\%(\text{vol.})$)

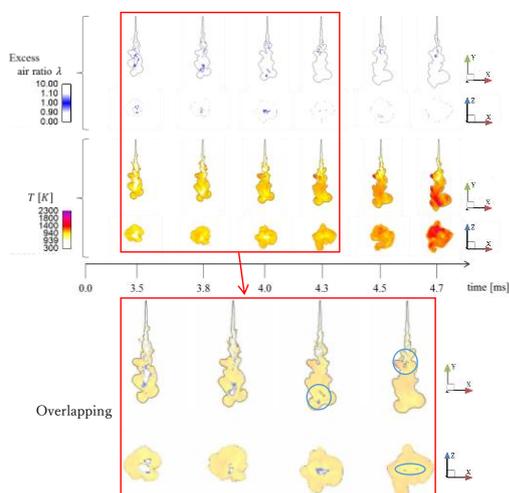


Fig. 5. Simultaneous attainment of auto-ignition-suitable concentration and temperature during mixture formation process of an Ethanol spray (Surrounding gas conditions: $P=5.5\text{MPa}$, $T=1100\text{K}$, $O_2=21\%(\text{vol.})$)

遅れがこれほど長いことは考え難い。以上より、高圧下でのエタノールの最低着火温度は大気圧下で計測された値 (636K) よりもはるかに高いのではないかという考えに至った。この考察が正しいか否かを検証するために、噴霧横断面の混合気濃度が $\lambda=1$ のみコンター図において着色し、且つ温度がある一定以上のみ着色するという形で、本周囲ガス条件である 5.5MPa において着火適性濃度・温度が時空間的に合致する (つまりコンター図の着色領域が重なる) 温度を試行錯誤的に調べた。その結果を図 5 に示す。図 5 上部は、燃料噴射開始からの時刻 3.5ms, 3.8ms, 4.0ms および 4.3ms における噴霧縦断面と最大横断面の瞬時空気過剰率および温度分布である。混合気濃度については理論空燃比 ($\lambda=1$) 付近の領域にのみ青色のカラーコンター表示し、温度については 940K 以上の領域についてオレンジ~赤色のカラーコンター表示したものである。図 5 下部は、両者を重ね合わせて拡大した図であり、青とオレンジ-赤の色の重なりが認められた箇所を○印で表示した。図より、燃料噴射開始から 4.0ms で噴霧縦断面の先端付近で 2 色の重なりが認められる。また、4.3ms においては噴霧縦断面の根元付近および最大横断面の中央付近で 2 色の重なりが認められる。2 色の重なりが認められたタイミングおよび位置と図 4 に示す噴霧断面平均温度が急上昇するタイミングおよび噴霧の膨張が認められる空間的位置は一致している。この解析により、5.5MPa の圧力下におけるエタノール噴霧の最低着火温度は 940K 付近であると思われる。この知見を基に、自着火が認められた解析 No.6 (周囲ガス圧力 9.0MPa, 温度 1200K) においても、図 5 同様の解析を行った結果、解析 No.5 と同じく、着火適性濃度と温度の同時成立を意味する 2 色の重なりが生じるタイミングならびに位置は急激な温度上昇を示すタイミングおよび空間的位置と一致した。

(3) 結論

H28~H30 の期間中に得られた結論を以下に示す。

実機関相当の高圧場におけるエタノール噴霧の安定した自着火成立の条件は、噴霧内に混合気濃度が理論空燃比で且つ温度がエタノールの最低着火温度以上となる領域が存在することであり、最低着火温度は大気圧下での値 (636K) よりもはるかに高い 940K 付近である。また、燃料噴射によって噴霧内に着火適性濃度 ($\lambda=1$) と温度 ($T>940K$) の同時成立する領域を得るためには、燃料噴射前の雰囲気温度として 1100K 以上が必要である。

(4) 今後の展開

実験においては、可視化実験によってマクロな視点で、燃料噴射開始から自着火までの遅れ時間 (着火遅れ) の支配因子依存性についての定量評価を完了し、実用化までの着火・燃焼制御技術開発の方向性は把握している。しかし、噴霧の内部構造は数値解析による予測に留まっており、特に自着火という化学反応の観点では、現象論としての考察にまで踏み込めていない。つまり、自着火現象自体は化学的要因に律則するはずであるが、現時点では化学的律則条件を満たすための物理要件のみを明らかにしたという段階である。今後は数値解析において、化学反応経路にまで踏み込んで燃焼化学反応の起点となる自着火現象を律則する化学的メカニズムの解明を目指す。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

① 内田 浩二, 齊藤 弘順

「エタノールと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および酸素濃度依存性」自動車技術会論文集 Vol. 47, No. 5, pp. 1019-1024

② Hironori Saitoh and Koji Uchida

「SURROUNDING GAS PRESSURE AND TEMPERATURE DEPENDENCE OF THE AUTO-IGNITION PHENOMENON FOR ETHANOL-DIETHYL ETHER BLENDED FUELS」
Transactions of TSME (2016) Journal of Research and Applications in Mechanical Engineering, Vol.4, No.1, pp.79-86

③ Koji Uchida and Hironori Saitoh

「SURROUNDING GAS PRESSURE AND OXYGEN CONCENTRATION DEPENDENCE OF THE SPRAY AUTO-IGNITION PHENOMENON FOR ETHANOL-DIETHYL ETHER BLENDED FUELS」
Transactions of TSME (2018) Journal of Research and Applications in Mechanical Engineering, Vol.6, No.1, pp.1-12

④ Akihiro Umeno, Koji Uchida, Norihiko Watanabe and Hironori Saitoh

「Numerical Prediction of Mixture Formation Process of an Ethanol Spray in a Rapid Compression and Expansion Machine」
IOP Conference Series, Material Science and Engineering (Open Access Journal), Vol.501, pp.1-12

[学会発表] (計 9 件)

- ① Hironori Saitoh
「BEHAVIOR OF A PULSATING DUCT FLOW WITH INTERMITTENT FLOW RATE FLUCTUATION」ISTP-27 (The 27th International Symposium on Transport Phenomena), 2016.9., Hawaii Convention Center, Honolulu, USA
- ② Hironori Saitoh, Yuya Tohjo and Koji Uchida
「Numerical Analysis on the Mixture Formation Process up to Auto-Ignition of an Ethanol Spray」TSME-ICoME2016 (The 7th TSME International Conference on Mechanical Engineering), 2016.12., Duang Tawan Hotel, Chiang Mai, Thailand
- ③ Koji Uchida and Hironori Saitoh
「Surrounding Gas Pressure and Oxygen Concentration Dependence of the Spray Auto-Ignition Phenomenon for Ethanol-Diethyl Ether Blended Fuels」TSME-ICoME2016 (The 7th TSME International Conference on Mechanical Engineering), 2016.12., Duang Tawan Hotel, Chiang Mai, Thailand
- ④ 小谷 雅輝、齊藤 弘順
「流量が断続的にパルス変動する矩形管内脈動流中に設置された平板周りの流れと熱伝達」第45回可視化情報シンポジウム 2017.7, 工学院大学
- ⑤ 内田 浩二、齊藤 弘順
「ディーゼル型次世代バイオ燃料対応エンジン開発に向けた自着火成立条件の解明」自動車技術会秋季大会 2017.10, グランキューブ大阪
- ⑥ 内田 浩二、齊藤 弘順
「高圧縮比小型直噴ディーゼル機関における Hot EGR が低級アルコール燃料の着火・燃焼特性および熱効率に及ぼす影響」第28回内燃機関シンポジウム 2017.12, 福岡リーセントホテル
- ⑦ Masaki Kotani, Hironori Saitoh
「Flow and Heat Transfer around the Flat Plate Installed in a Pulsating Duct Flow with Intermittent Flow Rate Fluctuation」TSME-ICoME2017 (The 8th TSME International Conference on Mechanical Engineering), 2016.12., Armona Hotel, Bangkok, Thailand
- ⑧ Akihiro Umeno, Koji Uchida, Norihiko Watanabe and Hironori Saitoh
「Numerical Prediction of Mixture Formation Process of an Ethanol Spray in a Rapid Compression and Expansion Machine」TSME-ICoME2018 (The 9th TSME International Conference on Mechanical Engineering), 2018.12., Thavorn Parm Beach Resort, Phuket, Thailand
- ⑨ Hironori Saitoh, Koji Uchida and Norihiko Watanabe
「Numerical Study on the Required Surrounding Gas Conditions for Stable Auto-Ignition of an Ethanol Spray」TSME-ICoME2018 (The 9th TSME International Conference on Mechanical Engineering), 2018.12., Thavorn Parm Beach Resort, Phuket, Thailand

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：内田 浩二
 ローマ字氏名： UCHIDA Koji
 所属研究機関名：崇城大学
 部局名：工学部
 職名：准教授
 研究者番号（8桁）：00454950

研究分担者氏名：渡邊 則彦
 ローマ字氏名：WATANABE Norihiko
 所属研究機関名：崇城大学
 部局名：工学部
 職名：准教授
 研究者番号（8桁）：10806582