

令和 3 年 6 月 17 日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K06185

研究課題名(和文) DMEの燃料特性を活かした超高効率クリーン熱機関に関する研究

研究課題名(英文) Ultra high-efficiency clean combustion engine fueled with DME

研究代表者

金野 満 (KONNO, Mitsuru)

茨城大学・理工学研究科(工学野)・教授

研究者番号：90205576

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)：詳細素反応モデルを用いた反応解析により、DMEの改質ではより多くの水素をガソリンの場合より低温度で生成すること、および改質反応は空気過剰率に敏感なことを明らかにした。実用化を目指して改質システムを構築する上で、DME/排気の混合精度の確保が重要なことが示されたため、高精度化に必要なDMEインジェクタ流路内挙動の把握に取り組み、石油系燃料に比べて低い差圧でチョーク現象を起こすことを明らかにした。さらに流路の高速度拡大観察と数値流体解析を実施し、チョーク現象が、キャビテーションによる実効流路面積の減少、および発生した気泡による音速の低下の二つ要因により生じることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

DMEはCO₂と再生可能エネルギーから製造可能なカーボンニュートラルに貢献する合成燃料である。本研究では、煤を排出しない性質、改質平衡温度の低さといった特色を活かし、排気熱によるDMEの改質反応を用いた内燃機関の高効率・クリーン化に取り組んだ。DMEの改質特性を明らかにするとともに、実用化の観点から、改質システムのDME/排気混合濃度の高精度化に必要なDMEインジェクタ流路内挙動を数値解析と可視化によって詳細に調べ、石油系燃料に比べて低い差圧でチョーク現象を起こすことを見出し、またその要因を明らかにした。これらの成果を通じてモビリティの脱石油化に向けてバッテリー以外の新たな可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：Reforming characteristics of DME with engine exhaust gas were analyzed using a detailed elementary chemical reaction model. More hydrogen is generated by DME reforming at lower temperatures compared to gasoline reforming. DME reforming reaction was sensitive to DME/oxygen ratio. For a practical application of the DME reforming system, it is important to precisely keep the DME/exhaust mixing ratio adequate. Therefore, the flow behavior of DME in the fuel supply injector was examined in detail by high-speed visualization and numerical analysis. It was found that choking occurs at much lower pressure-difference than those of petroleum fuels, because the effective cross-sectional area of the flow passage decreases by cavitation due to DME's high vapor pressure, and also because the sound speed decreases by a generation of gas-liquid two-phase flow.

研究分野：熱工学

キーワード：e-fuel ジメチルエーテル 内燃機関 合成燃料 改質 キャビテーション

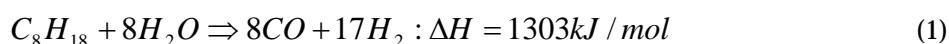
様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

世界的な人口増加や新興国の経済発展に伴い、エネルギー需要は急増する一方、主要エネルギー資源である石油は 2020 年にも生産量のピークを迎えると予測されている。化石資源を持たない我国において、石油以後のエネルギー源を確保することは極めて重要である。ジメチルエーテル (CH_3OCH_3 、以下 DME と略) は、天然ガス、石炭、バイオマス、有機廃棄物等の多様な資源から安価で大量に製造でき、製造技術も確立していることから石油系燃料に変わる新しい高エネルギー密度燃料として注目されている。EUCAR/Concawe/JRC の液体燃料ライフサイクルアセスメント⁽¹⁾によると、GTL (Gas to Liquid)、バイオエタノール、バイオディーゼル燃料等の石油代替燃料の中で、バイオ由来 DME の温暖化ガス排出量およびエネルギー消費量が最も少なく、合成の容易性と併せて最も現実的なモビリティ向けの新燃料と位置付けられている。

一方、内燃機関に目を向けると、 CO_2 排出削減や省エネルギーの観点から熱効率の向上が強く求められている。熱効率向上のためには、各種損失を如何に低減するかがポイントになる。排気損失は損失の中で最も大きく、燃料の持つ化学エネルギーの約 30% に相当する。排気損失から一部でもエネルギーを回収することができれば、熱効率の向上に大きく貢献できる。

排気エネルギーの回収技術として、排気熱による燃料改質が古くから試みられている^(例えば 2)。式(1)は一般的な炭化水素燃料の代表成分であるオクタン (C_8H_{18}) の改質反応の例であるが、排気中の水蒸気を水素および一酸化炭素に改質する。



この反応は吸熱反応であり、式(1)の反応が全て右側に進行すれば、発熱量を 1.257 倍に増やすことができる。ただし、実際のエンジンでは改質に必要な温度を確保できずに反応が十分に進行せず、またコーキングの問題もあって改質による排気エネルギー回収は実用化されていない。一方、燃料が DME の場合の改質反応を式(2)に示すが、改質によるエネルギー回収率 (1.155) はやや小さいものの、改質温度が石油系燃料に比べて低い特徴がある。



図 1 に反応進行度が 95% となる温度 (以下、平衡温度) の燃料別比較を示す⁽³⁾。平衡温度が高いとエンジン排気からの熱回収率が低下し、改質反応が十分に進行しない。DME の平衡温度は約 280 であり、オクタンに比べて 200 程度低い。ターボ下流の排気温度でも十分熱交換できる温度であり、石油系燃料に比べて燃料改質による排熱回収に適した燃料といえる。

DME は上述のように、PM (粒子状物質) 生成傾向が極めて小さく、高当量比であっても PM を生成しない。したがって、炭化水素系燃料で問題となるコーキングの心配がない。また、炭化水素系燃料では PM の発生により EGR 率に制限があるが、DME では PM によって EGR 限界は制限されないため、より多量の改質成分を導入できると考えられる。一方、DME は着火性が良いために、着火遅れ期間中の噴霧への空気導入が軽油噴霧に比べて小さく、CO や NO_x の発生要因となっていた。改質反応で生成される水素は着火を抑制する効果が大きいため、改質成分の導入により過度な早期着火が抑制され⁽⁴⁾、空気導入の促進による希薄化により両排気成分の低減が期待できる。

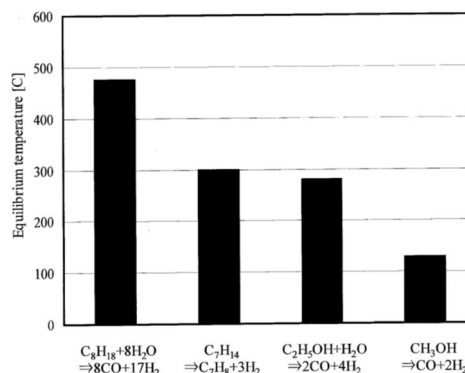


図 1 改質反応の平衡温度⁽³⁾

2. 研究の目的

本研究では、DME の理論空気量の低さ、PM 生成傾向の低さ、改質平衡温度の低さといった特色を最大限に活かし、排気熱を利用した DME の吸熱改質反応を用いて、排気エネルギーの回収、改質成分による着火制御および希薄化により、石油系燃料では達成できない高効率・クリーン内燃機関を実現するための基礎的な知見を得ることを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 詳細素反応モデルを用いた DME 改質特性の検討

DME 酸化に関する詳細素反応モデルには Bruke らの DME2014⁽⁵⁾を用いた。また、燃料種による違いを知るため、三好らのガソリンサロゲートモデル⁽⁶⁾を用いてガソリンの改質成分の予測計算を行った。この際、対象ガソリンをイソオクタン (i- C_8H_{18})、ノルマルヘプタン (n- C_7H_{16})、トルエン ($\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$)、メチルシクロヘキサン (c- C_7H_{14}) およびイソオクテン (e- C_8H_{16}) の 5 成分で模擬したガソリンサロゲート (S5R) とした。

改質成分の予測計算では熱平衡を仮定し、主燃料である DME およびガソリンの空気過剰率 =1.0 における完全燃焼を想定した。燃料量は燃料による発熱量の差異を考慮して、排気中の H₂O のモル数と改質燃料の炭素数の比(S/C)より決定し、S/C を 0.5 ~ 7.0 の範囲で変化させた。排気圧力および排気温度は実機関を想定して、それぞれ 140kPa、600~800K とした。表 1 に解析条件を整理して示す。

表 1 改質特性の解析条件

| | |
|-------------------------|----------|
| Fuel | S5R, DME |
| Excess air ratio [-] | 1.0 |
| S/C [-] | 0.5~10 |
| Exhaust pressure [kPa] | 140 |
| Exhaust temperature [K] | 600~800 |

(2) DME のチョーク現象解明

上述(1)の結果を受けて、改質組成の検証のため改質評価システムの製作に取り組んだが、DME 供給ノズルからの流量を適切に制御することができなかった。流量制御が上手くいかなかった原因を探ったところ、一定燃料供給圧力以上で、噴射流量が一定となるチョーク現象が生じていることが判明した。

燃料改質に当たっては、排気中の H₂O のモル数と改質燃料の炭素数の比を適切に制御する必要があり、高精度の流量制御が要求される。DME の流量制御法を確立することが重要であることから、当初の計画を変更し、改質システムに組み込む予定の燃料供給ノズルを模擬した 2 次元可視化流路を製作し、可視化観察することによりキャビテーションの発生とチョーク現象との関連を実験的に調べることにした。図 2 に実験に用いた装置の構成を示す。燃料供給ノズル流路を模擬した厚さ 0.15mm、幅 0.15mm の微小流路を合成石英で挟み込み、流路の一端を DME 燃料タンクに接続し、他端を加圧されたステンレス製の定容容器内に接続した。DME 燃料タンクを高圧窒素により 10MPa で加圧し、背圧に相当する定容容器内の圧力を変化させて、流路内の様子を高速ビデオカメラを用いて 50,000fps で可視化観察した。図 3 に背圧を変化させた際のキャビテーション数を示す。表 3 に実験条件を示すが、キャビテーション数が急激に上昇する $P^{0.5}=2.5$ 付近が観察できるように、背圧を 1~5MPa で変化させた。

4. 研究成果

(1) DME の改質特性

図 4 に排気温度を 800K、S/C=2 における DME 改質およびガソリン改質の成分別割合を示す。改質により生成される主な燃料成分は、水素(H₂)、メタン(CH₄)および一酸化炭素(CO)であるが、DME 改質はガソリン改質と比べて H₂ と H₂O の生成量が多い。これは DME とガソリンとでは

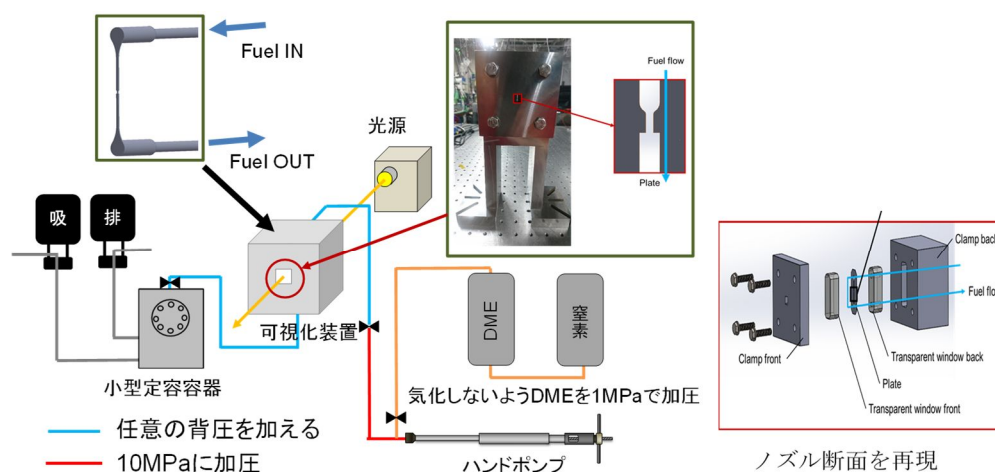


図 2 燃料供給ノズル流路を模擬した 2 次元可視化流路観察装置の構成

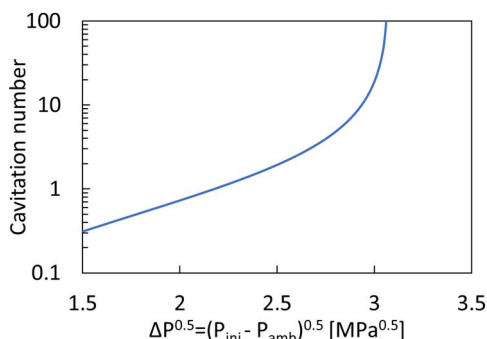
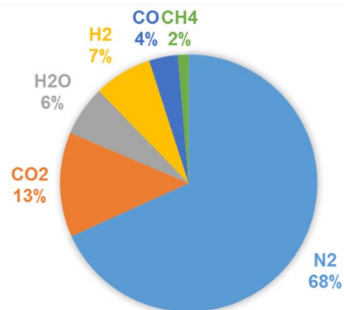
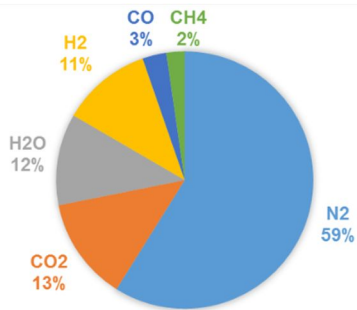


図 3 燃料圧 10Pa 一定で背圧を偏差させた際のキャビテーション数

表 3 流路可視化の実験条件

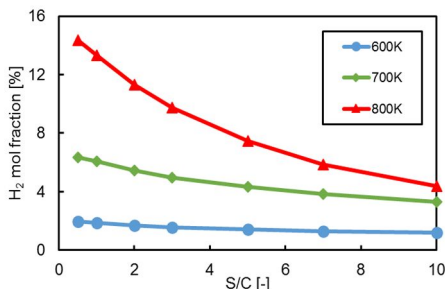
| | |
|------------|---------------|
| 噴射圧力 [MPa] | 10 |
| 背圧 [MPa] | 1, 2, 3, 4, 5 |
| 撮影速度 [fps] | 50,000 |



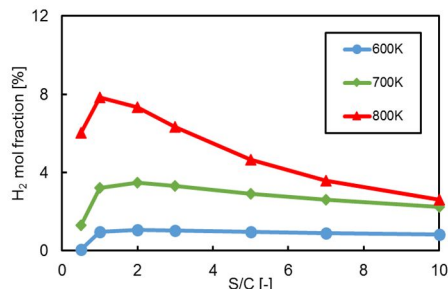
(a) DME の改質ガス組成

(b) ガソリンサロゲートの改質ガ

図 4 排気温度 800 K、S/C=2 における改質ガス組成の比較



(a) DME 改質による水素生成



(b) ガソリンサロゲート改質による水素生成

図 5 改質による水素 (H₂) 生成量の比較

分子内の炭素原子と水素原子の比である H/C 比が異なるためと考えられる。今回使用した S5R の H/C 比が 1.8 であるのに対し、DME の H/C 比は 3 である。分子内に含まれる水素原子が多いため、DME 改質はガソリン改質よりも多くの H₂ および H₂O を生成したと考えられる。

図 5 に S/C に対する H₂ のモル分率を示す。DME 改質ではガソリン改質よりも多くの水素を生成し、排気温度 800K、S/C=0.5 で水素濃度は最大 14.3%となる。ガソリン改質は排気温度 800K、S/C=3.0 で 6.3%の H₂ を生成するのにに対し、DME 改質は排気温度 700K、S/C=1.0 で同等の 6.1%の H₂ を生成している。このことから DME はガソリンと比べ、より低温で改質反応が進行し、高 EGR 燃焼のような低温燃焼下でも改質を利用できる可能性があることが示された。

(2) チョーク現象の実験的説明

観察結果の代表例として、燃料供給圧力 10MPa 一定とし、背圧をキャビテーション数が 1.14 となる 5MPa ($\Delta P^{0.5}=2.236$) とした場合、およびキャビテーション数が 2.92 となる背圧 3MPa ($\Delta P^{0.5}=2.645$) とした場合のノズル流路内の可視化観察結果をそれぞれ図 6 および 7 に示す。図 6 において、黒く見えている部分が壁、白く見えている部分が流路であり、DME は上から下方向に流れている。流路はノズル部分に向かって滑らかに絞られ、幅 0.15mm のノズル部分を通過して出口に見立てた部分で直角に広がる形状をしている。キャビテーション数が 1.14 の図 6 の場合、燃料供給開始後、ノズル出口にわずかにキャビテーションによる黒い部分が見られるが、ノズル内にはキャビテーションは認められない。一方、キャビテーション数が 2.92 の図 7

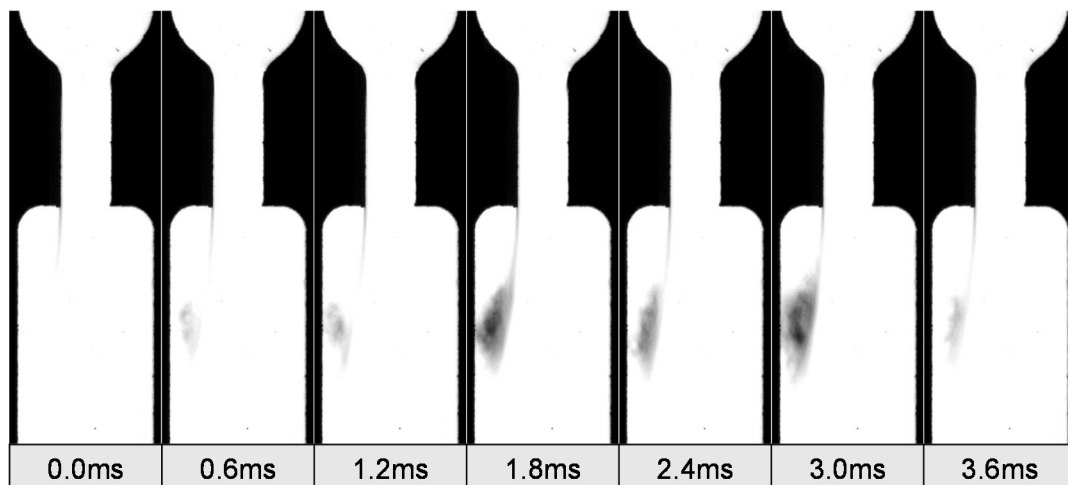


図 6 燃料供給圧力 10MPa、背圧 5MPa ($P^{0.5}=2.236$) のときの流路内の様子

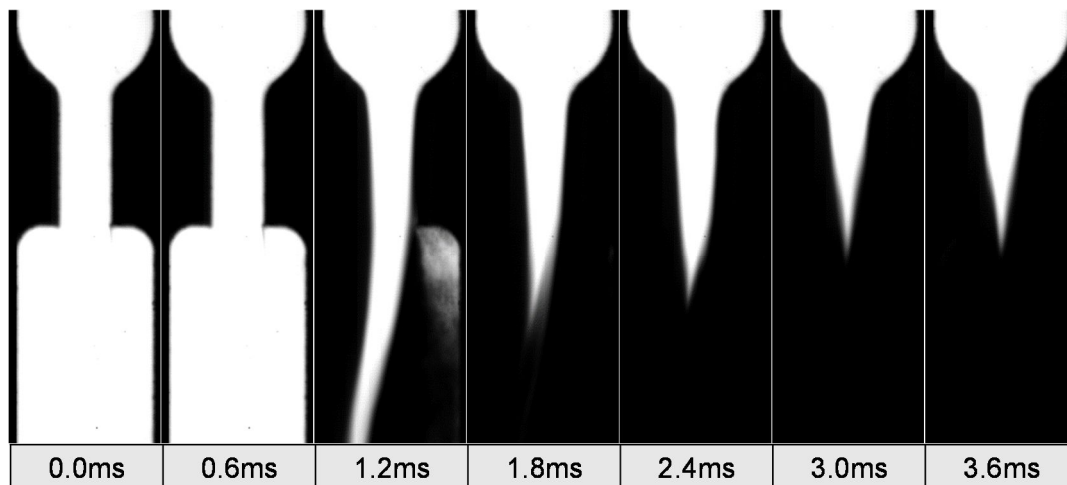


図7 燃料供給圧力 10MPa、背圧 3MPa ($P^{0.5}=2.645$) のときの流路内の様子

では、燃料供給開始から 1.2ms 後にノズル入り口でキャビテーションが発生し、それが壁面に沿って発達しているのが認められる。その後キャビテーション領域は時間経過とともに拡大し、燃料供給開始から 3.0ms 後にはノズル出口断面中心部までキャビテーション領域となる。このことからチョーク現象はキャビテーションによりノズル出口における有効断面積の低下により生じることが確認できた。

(3) 数値解析によるチョーク現象の検討

チョーク要因を詳しく知るため、数値解析による検討を実施した。その結果、断面係数は差圧が大きくなるほど低下して有効断面積が減少するが、一方では流路内速度はわずかに上昇することが示され、チョークは有効断面積の減少と流速の増加の兼ね合いで発生することがわかった。さらにキャビテーションにより気泡が発生した時の音速の変化について解析した結果、気泡を含む 2 相流では音速が 100 ~ 200m/s に急激に減少することがわかった。キャビテーション発生に伴う気泡がノズル出口全体に広がる場合には、流速が 2 相流の音速に達してチョークする可能性が示唆された。

< 引用文献 >

- (1) Edwards R, Larive` J, et al., Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in The European Context Report , JRC65998, 2007
- (2) K. Ashida et al., Study of an On-board Fuel Reformer and Hydrogen-Added EGR Combustion in a Gasoline Engine, SAE 2015-01-0902, 2015
- (3) 島田敦史, 燃料改質型排熱回収による火花点火機関の熱効率向上に関する研究, 茨城大学大学院理工学研究科博士学位論文, 40, 2011
- (4) 首藤, 他, DME 改質ガスによる DME 予混合圧縮着火燃焼機関の着火制御, 日本機械学会論文集(B), 70/696 , 303-310, 2004
- (5) Ultan Burke et al., "An Ignition Delay and Kinetic Modeling Study of Methane Dimethyl Ether and Mixtures at High Pressures", Combustion and Flame 162, 315-330, 2015
- (6) 三好明ほか, "ガソリンサロゲート詳細反応機構の構築", 自動車技術会論文集, #2017474, 48 (5) ,1021-1026, 2017

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

| | |
|---|--------------------|
| 1. 著者名 TAKADA Ryuhei, WAKABAYASHI Rio, KIKUCHI Shinsuke, MITSUGI Yuta, SAKAIDA Satoshi, TANAKA Kotaro, KONNO Mitsuru | 4. 巻 86 |
| 2. 論文標題 Spray characteristics of supercritical DME | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Transactions of the JSME (in Japanese) | 6. 最初と最後の頁 1-12 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.19-00050 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|---|-----------------------------|
| 1. 著者名 M. Naruke, K. Morie, S. Sakaida, K. Tanaka, M. Konno | 4. 巻 44 |
| 2. 論文標題 Effects of hydrogen addition on engine performance in a spark ignition engine with a high compression ratio under lean burn conditions | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 International Journal of Hydrogen Energy | 6. 最初と最後の頁 15565 - 15574 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijhydene.2019.04.120 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|--------------------|
| 1. 著者名 菊地 真輔・大越 淑央・高田 竜平・田中 光太郎・境田 悟志・横田 卓政・陳 之立・金野 満 | 4. 巻 84 |
| 2. 論文標題 臨界点を含む広範囲の圧力、温度におけるDME中の音速計測および体積弾性率の算出 | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 日本機械学会論文集 | 6. 最初と最後の頁 1-12 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.18-00166 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件／うち国際学会 0件）

| |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名 若林森音、高田竜平、境田悟志、田中光太郎、金野満 |
| 2. 発表標題 実機相当雰囲気におけるOMEの噴霧特性 |
| 3. 学会等名 第30回内燃機関シンポジウム |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 佐々木旺雅、若林森音、境田悟志、田中光太郎、金野満 |
| 2. 発表標題 多噴孔ノズルインジェクタを用いたオキシメチレン ジメチルエーテルの噴霧特性および燃焼特性 |
| 3. 学会等名 2020年度茨城講演会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名 若林森音、高田竜平、境田悟志、田中光太郎、金野満 |
| 2. 発表標題 実機相当雰囲気におけるOMEの噴霧特性 |
| 3. 学会等名 第30回内燃機関シンポジウム |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名 成毛政貴、森江康柄、境田悟志、田中光太郎、金野満 |
| 2. 発表標題 燃料の着火特性が超希薄条件におけるノックに及ぼす影響 |
| 3. 学会等名 第30回内燃機関シンポジウム |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 成毛政貴、境田悟志、田中光太郎、金野満、山田裕之、小島健、古閑恵一 |
| 2. 発表標題 高濃度酸素吸気が火花点火機関の機関性能に及ぼす影響 |
| 3. 学会等名 第57回燃焼シンポジウム |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 佐藤和樹、細谷竜太、堀川諒太、境田悟志、田中光太郎、金野満 |
| 2. 発表標題 ノルマルヘプタンとアルケン類の複合燃料を用いたHCCI燃焼に関する実験的研究 |
| 3. 学会等名 第27回茨城講演会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 佐藤 就平, 船見 信太郎, 境田 悟志, 田中 光太郎, 金野 満 |
| 2. 発表標題 エンジン排気を利用したDMEの改質特性 |
| 3. 学会等名 日本機械学会2018年度茨城講演会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 高田 竜平, 若林 森音, 境田 悟志, 田中 光太郎, 金野 満 |
| 2. 発表標題 超臨界DME噴霧の高速度観察 |
| 3. 学会等名 日本機械学会2018年度年次大会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 佐藤就平, 船見信太郎, 金野満, 田中光太郎, 境田悟志 |
| 2. 発表標題 水素添加が火花点火機関の高EGR希薄燃焼に及ぼす影響 |
| 3. 学会等名 日本機械学会2018年度年次大会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 菊地真輔, 高田竜平, 田中光太郎, 金野満 |
| 2. 発表標題 DME燃料噴霧ノズルのチョーク現象に関する実験的および数値解析的考察 |
| 3. 学会等名 第28回内燃機関シンポジウム |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 菊地真輔, 高田竜平, 大越淑央, 三次勇太, 田中光太郎, 金野満 |
| 2. 発表標題 超臨界DME噴霧の燃焼観察 |
| 3. 学会等名 日本機械学会2017年度年次大会 |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名 高田竜平, 菊地真輔, 田中光太郎, 金野満 |
| 2. 発表標題 燃料噴射弁ノズル出口におけるDMEの噴射速度計測 |
| 3. 学会等名 第25回茨城講演会 |
| 4. 発表年 2017年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|---------------------------|-----------------------|----|
|---------------------------|-----------------------|----|

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|