

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760157

研究課題名(和文) バイオマス由来気体液体燃料の柔軟な利用を可能とするエンジン制御アルゴリズムの構築

研究課題名(英文) Study on control algorithm of dual fuel engine system with fuel produced from biomass

研究代表者

山崎 由大 (Yamasaki, Yudai)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：60376514

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、バイオマス由来の燃料を対象に、デュアルフューエルエンジンシステムを対象に安定した高効率運転を実現する制御系構築を目指し、将来的に、計算モデルベースで制御系の検討、設計ができるようにガス組成の変動を考慮したDFEのモデルを構築した。また、液体燃料の噴射条件、液体燃料とガス燃料の熱量比率などの制御が可能とした条件で、これらのパラメーターが着火および燃焼に及ぼす影響を実験的に明らかにした。さらに制御の自由度を上げるべく、吸気へのオゾン添加を検討し、その影響を実験により明らかにすると共に、素反応計算によってオゾンがppmオーダーで添加され場合の反応メカニズムについて明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Aiming to develop control system of dual fuel engine (DFE) with fuels produced from biomass, first, a prediction model of the combustion of DFE is developed by modifying the previous work. The model shows agreement with experiments changing H₂ content in gas fuel. Next, influences of liquid fuel injection conditions, the ratio of gas fuel to liquid fuel, and gas fuel compositions on ignition and combustion are investigated in experiment. Retarded liquid fuel injection is required for higher H₂ content fuel to achieve higher thermal efficiency. Finally, effects of ozone addition to pre-mixture are investigated for increasing freedom of control and for understanding the reaction mechanism. Ozone influences on auto-ignition and combustion of pre-mixture but does not influence on flame propagation initiated from diesel fuel injection. It is clarified by calculation with elementary reactions that pre-mixture added ozone produce H₂O₂ before ignition and H₂O₂ accelerate ignition.

研究分野：内燃機関

キーワード：エンジン バイオマス

1. 研究開始当初の背景

石油資源の量的、経済的不安定問題、地球環境問題、さらに新興国の急激なエネルギー需要上昇問題解決に向けた低炭素循環型社会の実現、また2011年の東日本大震災で生じた大量の木質系廃棄物の処理問題のある中、バイオマス資源の有効利用が急務となっている。

現在でも、バイオマス資源を利用したエタノール、BDF (Bio Diesel Fuel) 等の使用は一部あるが、十分に精製する必要があり、精製過程でのエネルギー消費、CO₂ 排出、コストを考慮すると、バイオマスのメリットは失われる。十分な精製が行われずとも様々な成分を含有する燃料を容易に利用できる、つまりは燃料の多様化がこれからのエンジンには必須となる。燃料の多様化という観点では、ガソリンエンジンでは、水素添加により希薄限界を拡大、サイクル変動を減少させた例や⁽¹⁾、ディーゼルエンジンではアルコールを軽油とは別に噴射することで、効率は低下するものの NOx の大幅な低減が可能であることが示されている⁽²⁾。また、着火、燃焼が従来エンジンよりも、燃料の化学反応過程に大きく影響される次世代型の高効率低公害な HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition) エンジンでは、エンジンに合わせた燃料設計も検討されている⁽³⁾。

しかしながら、現在のエンジン制御は、規格化された燃料を対象に、様々な運転条件を想定した事前の多大な実験を基に構築した制御則をもとに運転がなされており、このような制御系設計、制御手法では今後、多種多様な特性の燃料また運転中にも成分変動の可能性のある燃料に対応することは不可能であり、新たな手法が必要となる。そこで、申請者は、エンジンの燃料多様化を大目標に掲げ、バイオマス由来のガス燃料を対象に、組成が時々刻々と変動する場でも安定した高効率な発電の実現を目指したエンジン制御に関する研究に取り組んできた。

2. 研究の目的

バイオマス資源の更なる利用促進、エンジンの燃料多様性の拡大という位置づけで、単一のエンジンで液体燃料とガス燃料を同時に使用するデュアルフューエルエンジン (以下 DFE) を対象に、効率の観点から最適な混焼制御システム構築に向けた知見を得る。

3. 研究の方法

具体的には以下の検討を行った。

(1) 将来的に、計算モデルベースで制御系の検討、設計ができるようにガス組成の変動を考慮した DFE のモデルを構築する。

(2) 液体燃料の噴射条件、液体燃料とガス燃料の熱量比率を制御が可能とした条件で、これらのパラメーターが着火および燃焼に及ぼす影響を実験的に明らかにする。

(3) 制御の操作量として吸気へのオゾン添加を検討し、その影響を実験により明ら

かにすると共に、素反応計算によってオゾンが ppm オーダーで添加された場合の反応メカニズムについて調査した。

なお、これまでに他研究者からも液体燃料とガス燃料の混焼発電システムは提案されているが、それらは成分供給量の安定しないガス燃料の単純に着火元として軽油を利用するもの⁽⁴⁾や、ガス燃料の不足熱量を補うためにエンジン回転数が一定になるように液体燃料を利用しているにすぎないところ⁽⁵⁾、当研究では化学反応や物理的な検討を踏まえた制御系の検討を行っている点が異なる。

4. 研究成果

(1) DFE の計算モデル構築

多様な燃料、また運転中にも成分変動する燃料に対し、制御系を構築するにあたり、様々な運転条件での燃焼特性を実験的に調査することは、実験回数が莫大となり現実的ではなく、モデルベースでより簡易に燃焼状態を予測できることが必要となってくる。そこで、実際の DFE の燃焼状態を予測できるよう、モデルの構築を行った。ガス燃料として天然ガスを用いた DFE のモデル化を行った研究として Hountalas ら⁽⁶⁾によって構築されたモデルがあり、このモデルを参考に、ガス組成の変動の影響を考慮できるように改良した。

ガス燃料としてバイオマス由来のガスを想定しており、燃料組成の多様性を考慮するため、燃料組成が大きな影響を及ぼす層流燃焼速度に着目した。具体的には、素反応数値計算ソフト CHEMKIN PRO を使用し、温度、圧力、当量比、燃料中の水素割合の4つの状態量について、それぞれ代表的な点を2~3点を選びそれらの交点での層流燃焼速度を計算しデータベースを構築した。このデータベースをモデルに組み込み、状態量がこれらの代表点以外の値を取る場合には、内挿及び外挿補間によって値を求めることとした。

また、実際のエンジン筒内の流れ場は乱流であり、燃焼速度には乱流の影響も考慮する必要がある。過去の研究では乱流燃焼速度は層流燃焼速度の定数倍として計算されていたが、より実現象に近い状態を表現するため、Tabaczynski ら⁽⁷⁾によって提唱された、Spaghetti-like structure モデルを導入し乱流燃焼速度を求めた。

以上の手法によって改良したモデルの妥当性の検証を行った。検証方法として、モデルによる計算結果と実機結果の比較を行った。運転条件は、軽油噴射量を 4 mg/cycle、出力を BMEP で 0.37±0.02 MPa とし、ガス燃料の組成変化について検討するため、水素の割合を変化させたものについて検証した。水素割合が 20% のものを基準組成 (H₂:CO:CH₄:N₂:CO₂=20:20:5:40:15) としてモデルパラメーターの合わせこみを行った後に、水素割合を 10% から 30% まで 5% おきに変化させた計算を行った。同時に、計算と同条件下で実機による実験を行い、圧力履歴と

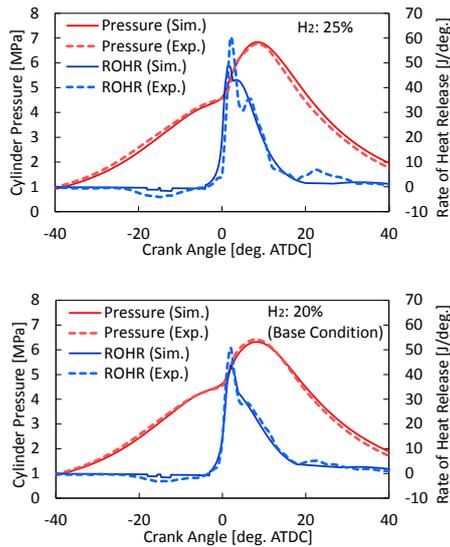


Fig.1 Comparison between simulation and experiment about pressure profile and rate of heat release profile for 25% and 20% in H₂ contents of gas fuel

熱発生率履歴について比較することで、モデルの妥当性の検証を行った。図 1 に、基準組成および水素割合が 25%における圧力履歴および熱発生率履歴の実機結果と計算結果を示す。基準組成では圧力履歴、熱発生率履歴ともにより一致を示している。水素割合 25%では、熱発生率履歴について、熱発生立ち上がりやや早く、ピークが小さくなっているものの、後半の火炎伝播による燃焼が主体となる領域、および圧力履歴では全域において一致しており、この組成変化の範囲においてモデルは妥当であるといえる。

また、図 2 に同様の条件で水素割合を変化させた場合における図示熱効率について、実機結果と計算結果の比較を行ったものを示す。全体的に計算結果が実機結果を 10%程度上回っているが、これは熱損失の見積もりが計算では過少であることが原因であると考えている。エンジンの熱損失の算出には、Woschni の提唱した式⁸⁾を用いているが、エンジンの圧縮過程および膨張過程において熱損失が実機よりも過少に見積もられることで、図示熱効率が過大に計算されていると考えられる。

全体の傾向として、実機結果では水素割合が増加すると共に熱効率も上昇しており、計算では水素割合が 15%以上の範囲において同様の傾向を再現できている。単調増加の傾向については、水素割合が高いガスは層流燃焼速度が速く、それに伴って火炎伝播速度も速くなる。計算においても、水素割合が 15%以上の範囲においてはこの傾向を表現できているといえる。

ただし、水素割合がもっとも低い 10%についてのみ、この傾向から外れている。これは、層流燃焼速度のデータベースが不十分であることが原因と考えられる。用意したデータベースに対し、水素割合 10%は内挿ではなく外挿による補間を行っている領域であり、補間

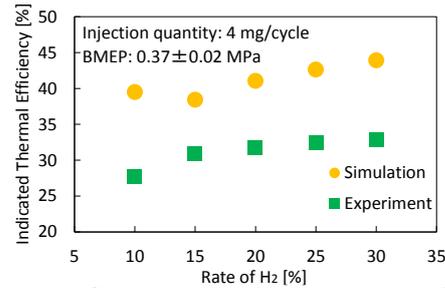


Fig.2 Comparison between simulation and experiment about thermal efficiency for various H₂ content of gas fuel

により算出した値が正しい値から乖離している可能性が高く、層流燃焼速度データベースを広い組成の範囲に対して用意する必要があると考えられる。

以上のように、バイオマス由来ガス燃料と液体燃料を用いる DFE について、組成が変化するガス燃料に対しても、変化の範囲は限定されるものの、圧力履歴、熱発生率履歴を再現し、定性的に図示熱効率の変化を表現できるモデルを構築した。

(2) 各パラメーターが着火および燃焼に及ぼす影響

DFE は、一般的には軽油の着火を起点とした火炎伝播により燃焼が進行するが、条件によってはガス燃料の自己着火燃焼で運転が可能となり、効率も向上する。ここでは、主に自己着火を生じるような条件において、液体燃料の噴射条件とガス燃料の組成および液体とガスの比率が着火および燃焼に及ぼす影響を明らかにするため実験を行った。

市販の単気筒ディーゼルエンジン（ボア x ストローク：86 x 84mm、圧縮比 18）を改造し、コモンレール式燃料噴射装置を搭載することで、任意の噴射量および噴射時期を設定可能とし、吸気には空気加熱用ヒーターを取り付けた。燃料として、液体燃料には JIS 2 号軽油、ガス燃料として木質系バイオマスから熱分解により得られるガスを模擬した組成のガスを使用した。図 3 に実験システムを示す。オゾンの供給方法については、後に説明する。

まず、液体燃料とガス燃料の比率が着火燃焼に及ぼす影響を調べるため、吸気温度を 398K、ガス組成を先に述べた基準組成に固定し、ガス燃料空気予混合気の当量比および軽油の噴射時期を変化させ BMEP が 0.25MPa 一定となるよう軽油噴射量を調整

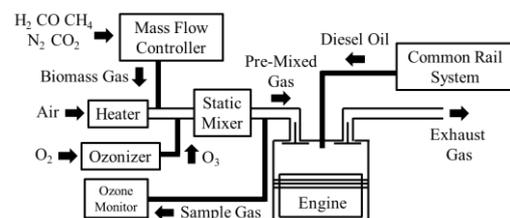


Fig.3 Experimental system

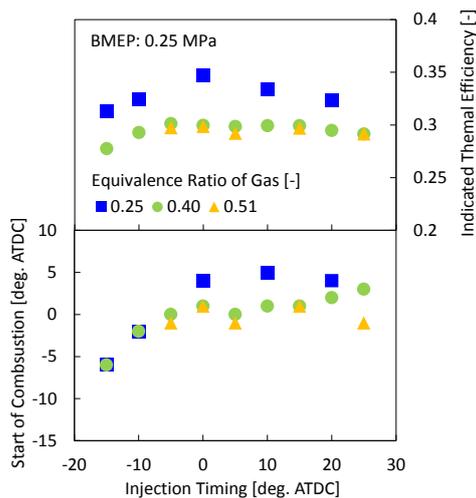


Fig.4 Indicated thermal efficiency and ignition timing for injection timing and equivalence ratio change

して実験を行った。この場合、ガス当量比が大きいほど軽油噴射量は減少し、全投入熱量におけるガス燃料の熱量割合は大きくなり、ガス燃料の当量比が 0.25 で 60%程度、0.40 で 80%程度、0.51 で 97%程度となる。

図 4 に各当量比における、噴射時期を変更した際の図示熱効率および着火時期を示す。当量比が 0.25, 0.40 では、軽油の噴射時期を -15deg ATDC から遅くしていくに従い、図示熱効率は上昇し、-5deg から 0deg 以降はほぼ一定となった。一方、当量比 0.51 の条件では、液体燃料の噴射時期によらずほぼ一定となった。着火時期を見ると、本実験ではガス単体でも自着火が生じることもある程度にまで吸気温度を上げているため、軽油の噴射時期が早い場合には軽油の着火を起点としてガスの火炎伝播あるいは自己着火が生じ、噴射時期が遅い場合には軽油の噴射前にガスが自己着火するような状態となっていると考えられる。特に当量比 0.25 の条件では、軽油噴射時期が 0deg でピークを持っており、当量比が低い条件では軽油の噴射時期が図示熱効率に影響するが、当量比が大きくなるに従ってその影響が小さくなるのが分かる。

次に、ガス組成が着火燃焼に及ぼす影響を調査するため、ガスの当量比を 0.4 一定とし、水素割合を基準組成の 20%に対し、10%と 25%に変更した 3 通りのガス組成で実験を行った。軽油噴射時期は先ほどと同様に 5 ないし 10 deg ごとに変更し、BMEP 0.25 MPa 一定とするため軽油噴射量を調整した。いずれの条件においても、全投入熱量におけるガス熱量の割合は 80%程度となっている。

図 5 に 3 種類のガス組成に対し軽油噴射時期を変化させた際の図示熱効率および着火時期を示す。各組成において図示熱効率が最大となるのは、水素割合 25%では軽油噴射時期 0 deg. ATDC, 20%では -5 deg. ATDC, 10%では -10 deg. ATDC の場合となった。着火時期を見ると、ガスと軽油で先に着火する燃料が

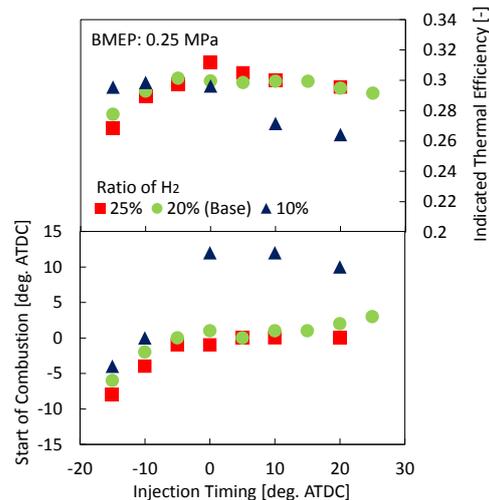


Fig.5 Indicated thermal efficiency and ignition timing for injection timing and fuel composition change

切り替わる軽油噴射時期は、水素割合 25%および 20%では 0~5 deg ATDC, 10%では 10~15 deg ATDC と考えられる。水素割合が基準組成よりも高い場合には、噴射時期を遅角し、水素割合が低い場合には進角することで、それぞれの組成に合わせて高効率な運転が可能であると考えられる。

以上のように、低負荷でガスの吸気温度を高めた条件において、液体燃料の噴射条件、ガス組成および液体とガスの比率が着火および燃焼に及ぼす影響を実験的に明らかにした。

(3) 制御操作量としてのオゾン添加の有効性の検討

先に示したように、DFE では、運転条件によって噴射した軽油の自己着火をトリガーとして、火炎伝播燃焼を行う場合と、自己着火燃焼を行う場合がある。一般的には前者であるが、先に示したように限られた条件では後者も起こすことが可能で熱効率も上昇する。なお、前者ではガス燃料の組成によっては必要な液体燃料が多くなる、また後者の場合には、ガス燃料の自己着火燃焼の依存度が高くなるため、液体燃料の噴射制御以外の手法での燃焼位相の制御が必要になってくるなどの課題がある。そこで、制御の自由度を上げるといった実用的な観点と、燃焼方式によって添加物の影響がどのように異なるかといった学術的な観点から、液体燃料の噴射条件に加えて、酸化力の強いオゾンを予混合気へ添加する方法を検討した。ガスの火炎伝播燃焼への影響を検討する場合には吸気温度を 320K とした DFE 運転とし、また自己着火燃焼への影響を検討する場合は、吸気温度を 410 から 420K とし、より簡単な条件とするために軽油の噴射はなし（いわゆる HCCI 燃焼）としてオゾンを添加した実験を行った。なお、図 3 に示すように、オゾンの添加は、オゾン発生器を用いて吸気管に連続投入し、オゾン濃度計によって、その添加濃度を把握した。

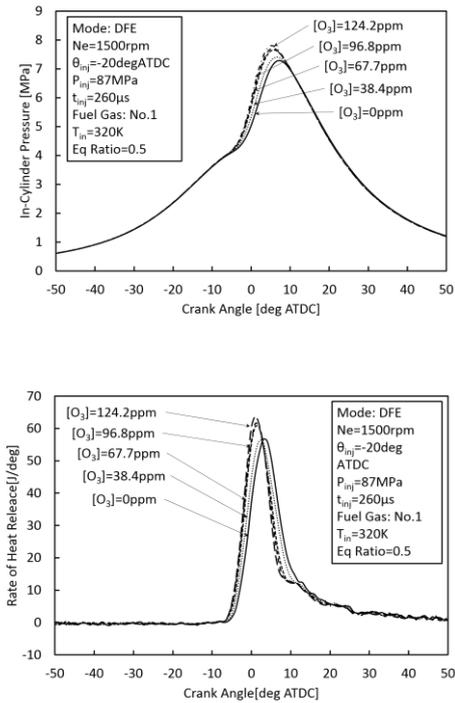


Fig.6 Pressure profiles and rate of heat release profiles for ozone content change at $T_{in}=320K$

まず、DFEでの火炎伝播に及ぼす影響を検討した。図6にガス燃料の組成を基準組成、当量比0.5として軽油の噴射時期を-20deg ATDCとした場合に、オゾン添加量を0から124ppmまで変化させた場合の圧力履歴および熱発生率履歴を示す。オゾンを添加しても着火時期はほとんど変化しないものの、オゾン添加が67.7ppmより大きい2設定では、熱発生の波形が変化し、ピーク値の上昇、熱発生期間の短期化が起こり、筒内圧力のピーク値がわずかに上昇した。

次に図7にガス組成は図6と同じとし、吸気温度を410K、軽油噴射なしでガス燃料が自己着火する条件でオゾンを添加した場合の圧力履歴と熱発生率履歴を示す。オゾンの添加量の増加に伴って、着火時期が早期化し、熱発生率の最大値も増加していることが分かる。

この影響の違いについては、オゾンは約500Kでオゾンが分解されOラジカルを放出する⁹⁾が、HCCI運転の場合には初期温度が高いために、早くから多くのOが供給され、オゾンの添加量増加に伴い、着火時期が早期化したと考えられる。一方、DFEの場合には、軽油の自己着火から熱発生が開始するはずであるが、噴霧の微粒化、混合、蒸発などの物理的な着火遅れ時間に比べて、オゾンの化学反応的な着火遅れ短縮の影響が小さいことが考えられる。また、DFEでオゾン濃度が高くなった2設定では、着火時期が早期化しており、この場合は多くのOラジカルがオゾンから供給されたことで、ガス燃料が液体燃料よりも先に自己着火した可能性が考えられる。

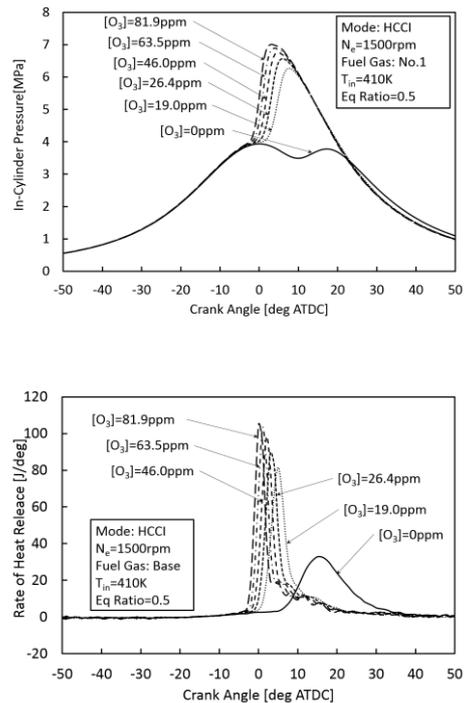


Fig.7 Pressure profiles and rate of heat release profiles for ozone content change at $T_{in}=410K$

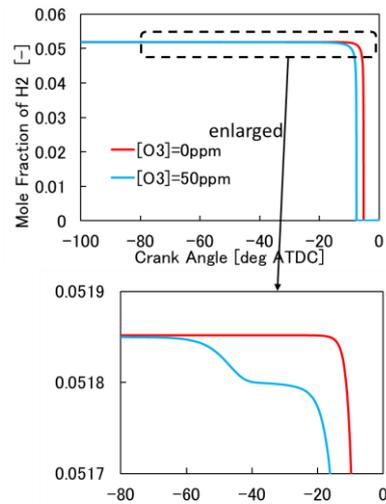


Fig.8 H_2 mole fraction profiles for ozone change

オゾンがガス燃料の自己着火燃焼過程に及ぼす影響について、素反応数値計算による解析も行った。初期温度410K、エンジン回転数1500rpm、ガス燃料の組成を基準組成、当量比0.5として、添加するオゾン量を0ppmと50ppmとした場合の計算結果を図8に示す。図は水素のモル分率履歴を示しており、下段は上段の拡大図となっている。いずれの条件でも-10deg ATDC付近から急激に H_2 のモル分率は減少しているが、オゾン50ppm添加の方が0ppmに比べて減少し始める時期は早くなっている。拡大図を見ると、オゾンを添加した方は、-60deg ATDC付近で H_2 のモル分率は減少し、一旦一定値を取った後に、急激

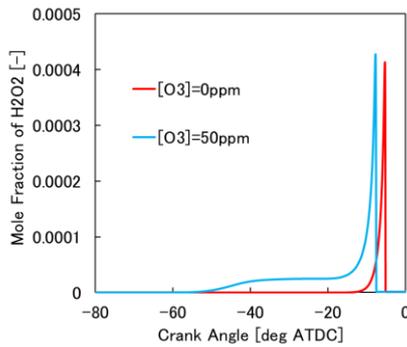


Fig.9 H₂O₂ mole fraction profiles for ozone change

に減少している一方で、オゾンを追加しなかったものは-10deg ATDC 付近での急激な減少のみとなっている。オゾン添加時の最初のH₂の減少は、500K 付近でオゾンが分解し、O₂とOとなり、OがH₂を酸化することで生成されるOHがさらにH₂を酸化する反応が生じていることが確認された。さらに、H₂とO₂よりH₂O₂が生成される反応も生じており、図9に示すように早い時期にH₂O₂が蓄積されることで、着火時期がオゾンを追加しない場合よりも早くなったと考えられる。

参考文献

- [1] S. Wang, et al., "Improving the performance of a gasoline engine with the addition of hydrogen-oxygen mixtures", *Int.J.of Hydrogen Energy*, Vol.36, No.17, 2011, pp.11164-11173
- [2] R. Michikawauchi, et al., "Combustion Improvement of Diesel Engine by Alcohol Addition - Investigation of Port Injection Method and Blended Fuel Method", *SAEpaper 2011-01-0336*
- [3] Lu Xingcai, et al., "Fuel design and management for the control of advanced compression-ignition combustion modes", *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol.37, No.6, 2011, pp.741-783
- [4] 原ら, 他6名 "木質バイオマスガス化発電システムの発電特性", *日本エネルギー学会誌*, Vol.83 No.10, 2004 pp.815-820
- [5] 深谷ら, 他4名, "バイオマスを用いた熱分解ガス軽油着火過給エンジンにおける燃焼および排気特性", *日本機械学会論文集 B* Vol.73, No.730, 2007, pp.1337-1344
- [6] D. T. Hountalas, et al., "A Simulation Model for the Combustion Process of Natural Gas Engines with Pilot Diesel Fuel as an Ignition Source", *SAE Technical Paper*, 2001-01-1245, 2001
- [7] Rodney J. Tabaczynski, et al., "Further Refinement and Validation of a Turbulent Flame Propagation Model for Spark-Ignition Engines", *Combustion and Flame* Vol.39, 1980, pp.111-121

- [8] Sihling, K. and Woschni, G., "Experimental Investigation of the Instantaneous Heat Transfer in the Cylinder of a High Speed Diesel Engine," *SAE Technical Paper 790833*, 1979
- [9] 高橋巧明, 清末涼, 山下洋幸, "オゾン添加によるガソリン HCCI 低温燃焼特性の改善", *マツダ技報 No.31*(2013)

6. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ① 山崎由大, 野口雄平, 藤原直人, 金子成彦, "バイオマス熱分解ガスを用いるディーゼルエンジンに関する研究", *日本エネルギー学会*, Vol. 92 (2013) No. 10 p. 957-963

[学会発表] (計3件)

- ① Yudai Yamasaki, Shigehiko Kaneko, "Prediction of Ignition and Combustion Development in an HCCI Engine Fueled by Syngas" *SAE 2014-32-0002/JSAE 20149002, SETC2014(Pisa, Italy)*
- ② 藤原直人, 野口雄平, 山崎由大, 金子成彦, "バイオマス利用 Dual Fuel エンジンの着火燃焼特性", *日本機械学会年次大会 (日本機械学会, 石川, 2012) Vol.2012 (CD-ROM)*
- ③ 宮内健太, 藤原直人, 山崎由大, 金子成彦, "バイオマス熱分解ガスを利用した Dual Fuel エンジン" 第19回動力エネルギー技術シンポジウム講演論文集 (日本機械学会, 福井, 2014)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

なし

○取得状況 (計0件)

なし

[その他]

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山崎 由大 (YAMASAKI YUDAI)

東京大学・大学院工学系研究科・准教授

研究者番号：60376514

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし