

令和元年6月3日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K05819

研究課題名(和文) マルチ燃焼モードガスエンジンのダイナミクスと制御

研究課題名(英文) Control and dynamics of a gas engine employing multiple combustion technologies

研究代表者

山崎 由大 (Yamasaki, Yudai)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・准教授

研究者番号：60376514

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：定置用小型ガスエンジンの熱効率向上を目指し、多気筒エンジンの各シリンダで異なる燃焼モードを実現し、高効率化を狙うエンジンシステムを提案し、その燃焼特性調査から制御システム的设计指針を明らかにすることを目的とした研究である。ガスエンジンを対象としメタンや都市ガス13Aを用いたリッチSI燃焼(燃料改質)を行うシリンダから排出される水素や一酸化炭素を含む排ガスを用いて、別気筒でHCCI(予混合圧縮自己着火)燃焼を実現した。リッチSI燃焼の当量比やHCCI燃焼のDEGR率がHCCI燃焼に及ぼす影響を明らかにし、また、両燃焼の適切な運転条件などを整理し、高効率な運転制御アルゴリズムの提案を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

天然ガスを原料とする都市ガスや、その主成分であるメタンを燃料として、燃料リッチの条件でエンジンによって出力を取りながら改質し、さらに、その改質ガスを利用して高効率、低公害なHCCI運転が可能であることを示した。またその燃焼解析結果をもとに、適切な運転制御アルゴリズムを提案した。着火の生じにくいメタンを主成分とする燃料でHCCI燃焼を行う手法を明らかにした点に学術的意義がある。また、小型のガスエンジンを高効率化する技術は、エネルギーのベストミックスが議論される中で重要な役割を果たす分散型電源の価値を変えるものとなり、また自動車用エンジンへ応用、高効率化も考えられ、社会的意義も高いものである。

研究成果の概要(英文)：Aiming at improvement of thermal efficiency and stable operation of stationary small gas engine, new idea to combine different combustion mode achieved in each cylinder of multi-cylinder engine was proposed. Specifically, HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition) combustion was realized using exhaust gas including hydrogen and carbon monoxide generated by rich SI combustion (fuel reforming) in another cylinder with city gas 13 A or methane. HCCI combustion characteristic was clarified when changing equivalence ratio of rich SI combustion and DEGR ratio of HCCI combustion. The appropriate operating conditions of both cylinder were also organized, and a highly efficient operation control algorithm was proposed.

研究分野：エンジン

キーワード：エンジン 燃焼 エンジン制御

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 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、新興国の急激なエネルギー需要上昇問題、さらには 2011 年 3 月の東日本大震災に伴い、エネルギーの有効利用技術の促進が急務となっている。日本のエネルギーのベストミックスが議論される中で、原子力発電所の有無に関わらず、再生可能エネルギーの導入や老朽化した火力発電所の置き換えには分散型電源の導入が重要な役割を果たすものであることに異論はない。このような背景の下で、コージェネレーションの更なる普及が予測されることから、コージェネレーションシステムの発電効率向上は必須となる。

MW 級のガスエンジンでは 48% 程の発電効率を実現されているが、数十 kW 級のものでは最高でも 35% 程度の発電効率<sup>(1)</sup>であり、分散型エネルギーシステム普及には、小型のガスエンジンの効率向上が急務である。

ガスエンジンの効率向上技術として希薄燃焼が有効である。しかし、SI (Spark Ignition) 燃焼方式では希薄化に伴い着火性が低下、また燃焼速度も低下し効率の低下を招くこともある。これに対して、着火性を向上させるために中大型ガスエンジンを対象にしたものではあるが、点火プラグの先端にカップを配置し、希薄予混合気に確実に点火エネルギーを供給できるようにし点火性能を確保したものがあ。また、多気筒エンジンで、ある気筒でリッチ燃焼（燃料改質）を行うことで水素および一酸化炭素を生成し、他の希薄燃焼の気筒に供給し燃焼速度を確保するといった SwRI (Southwest Research Institute) がガソリン乗用車用に検討してきた Dedicated EGR<sup>(2)</sup>の概念をガスエンジンへ適用すべく、素反応計算によってその有効性の検討が行なわれている<sup>(3)</sup>。一方、SI 燃焼よりも更なる希薄化を可能とする HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition) 燃焼の適用も検討されている<sup>(4)</sup>。HCCI 燃焼の着火および燃焼は反応依存性が高いため、都市ガスを用いる場合には、熱量は保証されるが組成には時間変動があり、着火燃焼特性も異なるためなんらかの制御が必要となる。また、分散型エネルギーネットワークで使用されるようなガスエンジンでは、自然エネルギーの出力変動も吸収すべく、要求出力の時間変動も従来とは異なることから、元来急峻すぎる熱発生と低負荷での未燃成分の多い HCCI 燃焼には厳しい運転条件となる。ガソリン乗用車用では SI と HCCI を担う負荷領域を切り替えて利用する試みがある。なお、都市ガスの主成分であるメタンは他の炭化水素燃料に比べて自己着火温度も高いことから、低負荷での一層の燃焼効率の低下が懸念される。ここで、別気筒のリッチ燃焼によって水素などを制御し供給できれば、着火および燃焼の制御、燃焼効率の確保も可能と考えられる。

### 2. 研究の目的

本研究は、多気筒エンジンの各シリンダにおいて異なる燃焼モードを実現し、高効率化を狙うエンジンシステムを提案し、その燃焼特性調査から制御システムの設計指針を明らかにすることを目的とする。具体的には、ガスエンジンを対象とし運転条件に応じて、リッチ SI 燃焼（燃料改質）、HCCI(予混合圧縮自己着火)燃焼といった燃焼モードの組み合わせや、その燃焼を担当する気筒数を最適に制御する制御アルゴリズムの提案を行う。

### 3. 研究の方法

実機実験と詳細化学反応の数値計算を活用して研究を推進した。

まず、天然ガスの主成分であるメタン (CH<sub>4</sub>) を用い、リッチ SI 燃焼の当量比や DEGR 率が、HCCI 燃焼に及ぼす影響を実機によって調査した。ここでは、リッチ SI 燃焼を行うことによって発生する排ガスと改質された燃料となる Dedicated EGR(以下 DEGR)の組成を詳細化学反応の数値計算に予測に基づき、当量比や DEGR 率が変化した場合の HCCI 燃焼を行う気筒への模擬ガスの組成を決定した。

次に、リッチ SI 燃焼における、燃料改質に最適な運転条件の指針を得ることを目的として、燃料を CH<sub>4</sub> とした過濃 SI 運転時の燃焼および排気特性を実験的に調査した。

続いて、2 気筒のガスエンジンで 1 気筒をリッチ SI 燃焼させ、その DEGR を別の気筒に供給し HCCI 燃焼を行い、その燃焼特性を把握すると同時に、高熱効率で運転することのできる条件や手法について実験的に検討した。

最後に、これまでの結果を整理することで、複数の燃焼を利用して高効率を実現する制御手法について提案した。

### 4. 研究成果

#### 4. 1. 模擬 DEGR を用いた HCCI 燃焼実験

燃焼実験には市販のコージェネレーションパッケージに搭載されている 3 気筒のガスエンジンを改造して用いた。エンジンの諸元を表 1 に示す。SI 燃焼を行う気筒と HCCI 燃焼を行う気筒でピストンの変更により圧縮比を変えてある。以下の実験はすべてこのエンジンを用いて行った。

まず、リッチ SI 燃焼を行った場合に得られる DEGR の組成を、市販の反応動力学を計算するソフト CHEMMKIN-PRO の反応器モデル Equilibrium を用いて予測した。SI 燃焼の当量比変化を想定して、当量比を 1.3~1.65 の範囲で変化させると、各化学種の割合は H<sub>2</sub> と CO が 5~10%、N<sub>2</sub> が 60~70%、CO<sub>2</sub> が 3~5%、H<sub>2</sub>O が 15~18% の範囲で変化した。H<sub>2</sub> と CO は当量比の増加に伴

表1 エンジン諸元

Cooling system	Water Cooling
Number of Cylinders	3
Bore / Stroke	88mm / 90 mm
Displacement	1641 cc
Compression Ratio of Rich SI cylinder	9.5
Compression Ratio of HCCI cylinder	24.6
Intake valve Open / Close	-20 deg. ATDC / -135 deg. ATDC
Exhaust valve Open / Close	135 deg. ATDC / 20 deg. ATDC

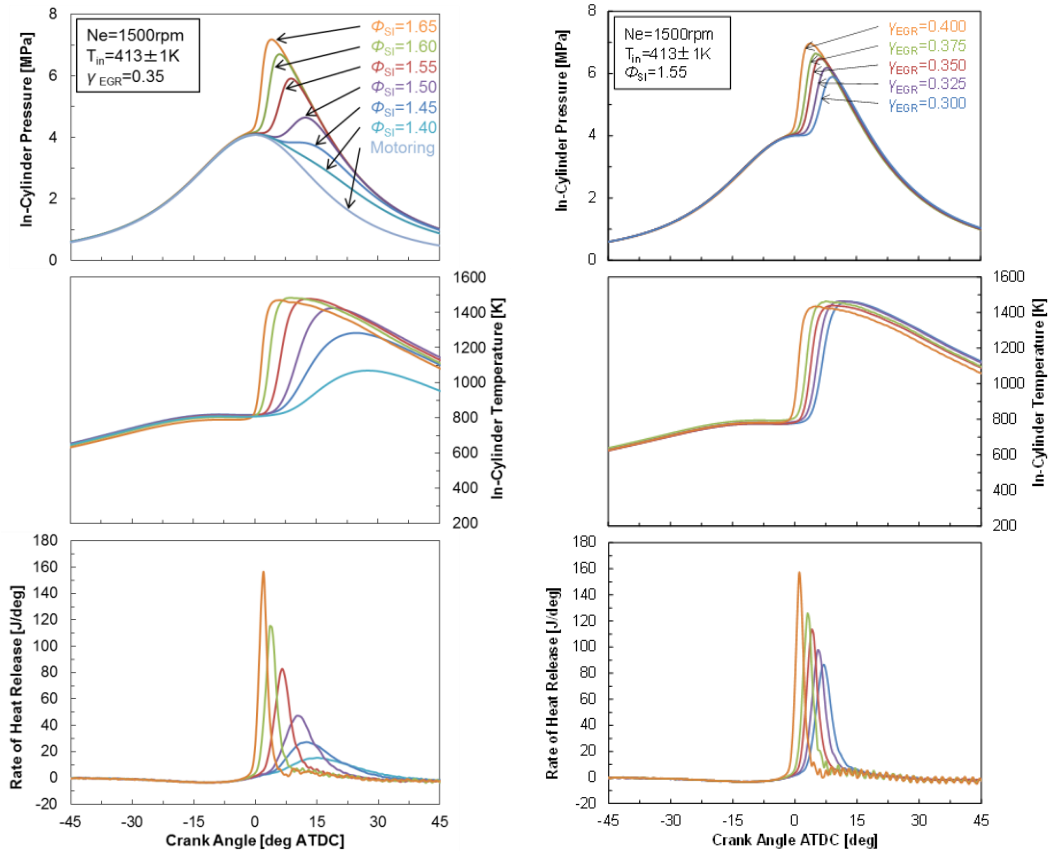


Fig. 1 リッチ SI 燃焼の当量比および DEGR 率の変化を想定した模擬ガスを投入した場合の HCCI 燃焼の筒内圧力, 温度, 熱発生率履歴 (左: リッチ SI 燃焼の当量比変化, 右: DEGR 率変化時)

って割合が増加した。この結果をもとに、過濃 SI 燃焼の当量比を  $\phi_{SI}$ 、この時の DEGR とともに HCCI 燃焼気筒へと供給される新気の  $\text{CH}_4$  空気予混合気の当量比を  $\phi_{Fresh}$  とし、DEGR 率を  $\gamma_{EGR}$  として、HCCI 燃焼気筒の吸気組成を決定した。なお、 $\text{H}_2\text{O}$  については、実験設備の関係でエンジンに供給することが不可能であったため、 $\text{N}_2$  により代替した。

図 1 に投入熱量一定のもと、一定のエンジン回転数でリッチ SI 燃焼の当量比  $\phi_{SI}$  および DEGR 率  $\gamma_{EGR}$  を変化させて燃焼実験を行った場合の筒内の圧力履歴、温度履歴、熱発生率履歴を示す。リッチ SI の当量比は 1.3 から 1.65 まで DEGR 率は 0.3 から 0.4 まで変化させたところ、リッチ SI の当量比および DEGR 率の増加に伴って、着火時期が早期化し、熱発生ピーク値が大きくなり、熱発生の期間が短くなることが確認された。特に、リッチ SI の当量比が 1.4 の場合には、十分な熱発生を行えなかったが、リッチ SI の当量比を増加させることで、HCCI 燃焼の燃焼効率が増加しており、DEGR によって安定した HCCI 運転が可能となることが分かった。また、着火時期はリッチ SI の当量比、DEGR 率を変化させた場合とも供給した予混合気中の  $\text{H}_2$  濃度に大きく依存していることが明らかになった。

#### 4. 2. リッチ SI 燃焼実験

リッチ SI の DEGR を模擬したガスを供給することで HCCI 燃焼を実現できることは先の実験で明らかになったが、HCCI 燃焼が成立するような条件で必ずリッチ SI 燃焼が行えるかどうか、またリッチ SI 気筒自体の燃焼特性も不明である。そこで、リッチ SI 燃焼の運転指針を得

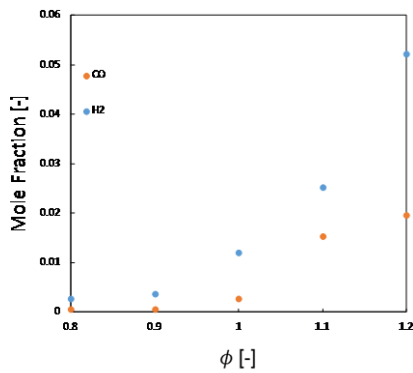


Fig. 2 実機の SI 燃焼で当量比を変化させた場合の排気中の H<sub>2</sub> および CO 濃度

るために、リッチ SI 燃焼の実機試験を行った。この時 HCCI 燃焼は行わず、1 気筒のみを用いて運転した。

当量比を 0.8-1.2 まで変化させて、点火時期-30 deg. ATDC 一定で実験を行った際の排ガス中の H<sub>2</sub> および CO のモル分率を図 2 に示す。なお、当量比が 1.2 を超えると燃焼が不安定になったため、リッチ側は 1.2 までとした。当量比の増加に伴い、H<sub>2</sub> および CO が燃料リッチになると急激に増加していることが分かる。先の計算による予測とは、定量的には必ずしも一致はしないが、リッチ SI 燃焼によって CH<sub>4</sub> の改質が可能であり、DEGR としてパーセントオーダーで H<sub>2</sub>, CO が供給できることが示された。

次に当量比 1.2 のリッチ条件での SI 燃焼で点火時期を変化させた際の排気中の H<sub>2</sub> および CO 濃度を図 3 に示す。点火時期-35 deg. ATDC を除いては、H<sub>2</sub>, CO のモル分率とも点火時期によらずほぼ一定であった。当量比 1.2 において H<sub>2</sub> が大きく変化した原因を探るため、連続 50 サイクルの筒内圧力を解析したところ、当量比 1.2 において、点火時期-25 および-30 deg. ATDC では失火に近いサイクルの割合がそれぞれ 14% および 8% であったのに対し、-35 deg. ATDC では 40% と非常に高くなっており、これが原因ではあると考えられる。点火時期-35 deg. ATDC のように H<sub>2</sub> を多く供給できると言っても、SI 燃焼が不安定すぎるため、このような条件で運転することは望ましくないといえる。

図 4 には、当量比と点火時期を変化させた際の図示熱効率を示す。なお、図示熱効率は、リッチ SI 燃焼の排気中の未燃成分が、他の気筒において全て燃焼して利用されると仮定し、投入熱量から未燃成分の熱量を差し引いたものを投入熱量として求めた。その結果、リッチ条件においては-30 deg. ATDC で熱効率が最大となり、点火時期-30 deg. ATDC において今回運転できた当量比範囲ではあるが、当量比を変化させても熱効率の変化はほとんどなかった。

従って、比較的安定した燃焼をしている条件では、点火時期は組成に影響を及ぼさないため、リッチ SI 燃焼の効率がよくなるように点火時期を決定すればよく、効率が最大となるような点火時期では、当量比を変化させても効率はほとんど変化しないことから、リッチ燃焼の当量比を HCCI 燃焼気筒に必要な DEGR の組成から設定できることが示唆された。

#### 4. 3. リッチ SI 燃焼の DEGR を利用した HCCI 燃焼実験

次に一つのエンジンで、リッチ SI 燃焼気筒の DEGR を HCCI 燃焼気筒に供給して運転し、その燃焼特性を把握すると共に、単一の気筒ではなくエンジンとして高熱効率に運転することのできる条件や手法について実験的に検討した。なお、ここでの実験は、天然ガスを原料とする都市ガス 13A を燃料として用いた。図 5 に示すように、リッチ SI 燃焼を行う気筒の排気を、HCCI 燃焼を行う気筒の吸気とつなぎ、配管途中にバルブを設けることで、DEGR 率を変化させられるようにした。なお、実験設備の都合上、DEGR の配管が長くなり、放熱が大きくなることからヒーターを利用して、吸気温度は制御した。

都市ガス 13A のリッチ SI 燃焼の DEGR を HCCI 燃焼気筒に供給することで、HCCI 燃焼の実現に成功した。図 6 には、DEGR 率およびリッチ SI 燃焼の当量比を変化させた場合のそれぞれの気筒の図示熱効率とトータルの図示熱効率を示す。HCCI 気筒は、リッチ SI 燃焼気筒よりもはるかに高い熱効率を示したが、トータルでは大きな熱効率の向上は得られなかった。これはリッチ SI 燃焼気筒への投入熱量が大きく、その影響が大きかったためである。

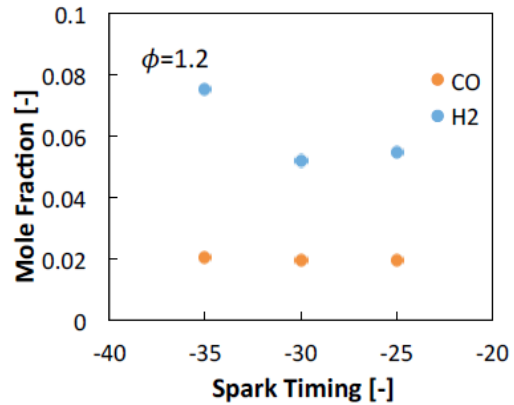


Fig. 3 実機の SI 燃焼で当量比を変化させた場

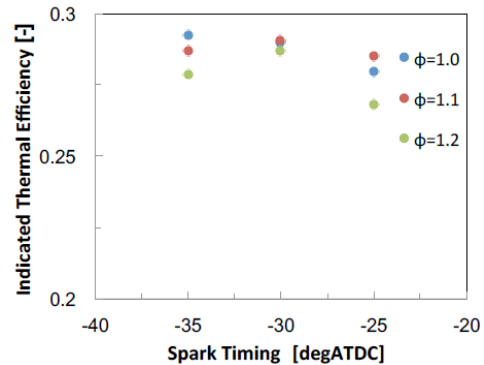


Fig. 4 点火時期および当量比と図示熱効率の関係

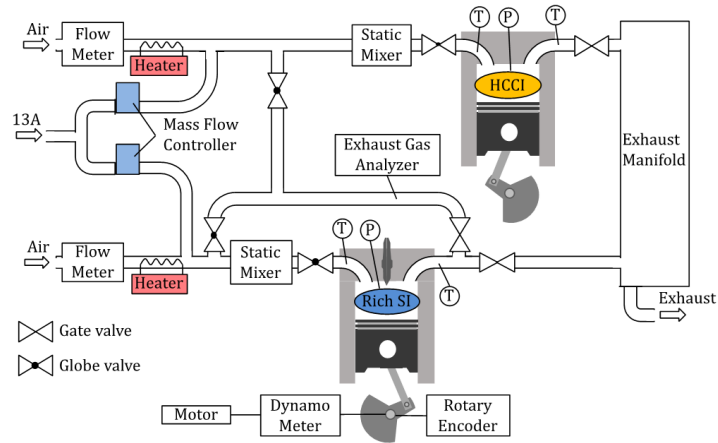


Fig. 5 リッチ SI 燃焼による DEGR を用いた HCCI 燃焼を行うエンジン実験システム

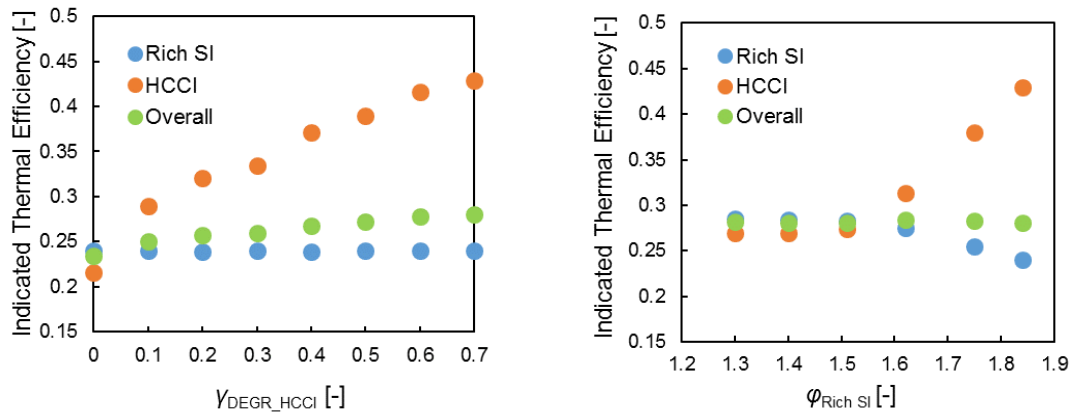


Fig. 6 DEGR 率およびリッチ SI 燃焼の当量比を変化させた場合の図示熱効率  
(左: DEGR 率変化, 右リッチ SI 燃焼の当量比変化)

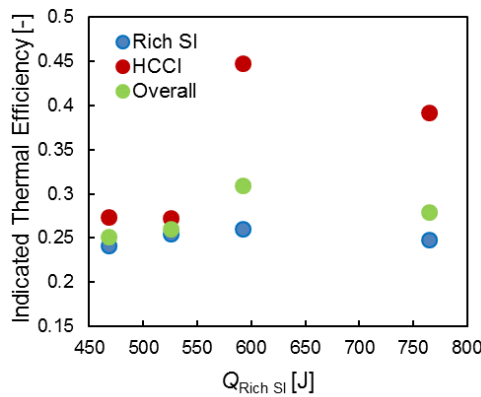


Fig. 7 リッチ SI 燃料気筒への投入熱量を変化させた場合の図示熱効率

そこで、リッチ SI 気筒の投入熱量を変化させて実験を行った。その時の図示熱効率を図 7 に示す。リッチ SI 燃焼気筒への供給熱量に対して、トータルの図示熱効率は上に凸の形状となり、気筒の出力配分に最適値があることが明らかになった。

#### 4. 4. マルチ燃焼の制御システムの提案

これまでの燃焼実験を整理すると、DEGR 率によって最大の熱効率で運転できるリッチ SI 当量比は変化することが分かった。これに対し、図 8 に示すように、Rich SI 気筒のスロットル開度と当量比を操作量とし、回転数と HCCI 気筒の CA50 (投入燃料のうち 50% が燃焼するクランク角) を制御することを提案する。この制御のコンセプトは、1) 負荷が変化しても定回転数で運転、2) CA50 制御による高熱効率運転の 2 点である。制御コンセプトとして、スロットル開度を操作し、負荷が変化しても回転数が一定となる制御を目指し、リッチ SI 気筒のスロットル操作により DEGR 率が変化する場合に、リッチ SI 当量比を最適値に設定することで最大熱効率での運転が可能になると考える。

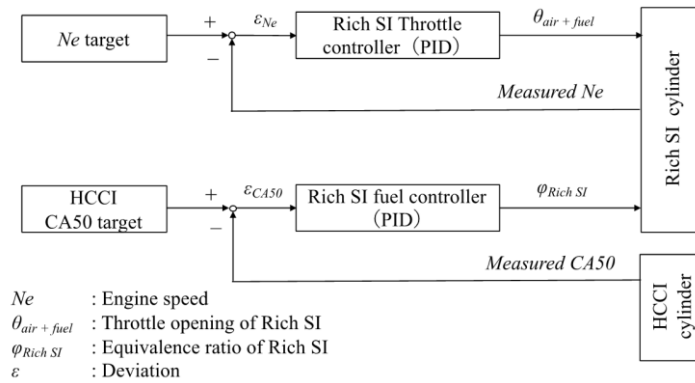


Fig. 8 提案するマルチ燃焼システムの制御

参考文献

- (1) コージェネ財団 [http://www.ace.or.jp/web/chp/chp\\_0040.html](http://www.ace.or.jp/web/chp/chp_0040.html) (last access 20141022)
- (2) Chadwell, C., etc, SAE Int. J. Engines 7(1):434-447, 2014
- (3) Sejun Lee, etc, SAE 2014-32-0108
- (4) Kazunobu Kobayashi, etc, J. of Natural Gas Science and Engineering, Volume 3, Issue 5, 2011, pp. 651-656

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計2件)

- ①竹内智顕, 山崎由大, 上道茜, 金子成彦, Dedicated EGR を用いたガスエンジンシステムにおける複数燃焼モードの併用, 日本機械学会論文集, No.18-00354, 掲載可 (20190422)
- ②三好正城, 山崎由大, 金子成彦, 上道茜, “過濃 SI 燃焼による筒内燃料改質がメタン HCCI 燃焼に及ぼす影響”, 日本機械学会論文集, Vol.83, No.847, 2017

〔学会発表〕 (計3件)

- ①竹内智顕, 山崎由大, 上道茜, 金子成彦, “Dedicated EGR を用いたガスエンジンシステムにおける複数燃焼モードの併用” 第23回動力・エネルギー技術シンポジウム, 日本機械学会, (2018年6月14-15日 宇部市国際ホテル宇部)
- ②柿木将, 三好正城, 山崎由大, 上道茜, 金子成彦, “メタンを燃料とする過濃 SI 運転時の燃焼および排気特性”, 第22回動力・エネルギー技術シンポジウム, 日本機械学会, (2017年6月14-15日 豊橋商工会議所)
- ③三好正城, 山崎由大, 金子成彦, 上道茜, “過濃 SI 燃焼による筒内燃料改質がメタン HCCI 燃焼に及ぼす影響”, 第21回動力・エネルギー技術シンポジウム, 日本機械学会, (2016年6月16-17日 横浜市開港記念会館)

〔図書〕 (計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

〔その他〕

特になし

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 上道茜

ローマ字氏名: (UEMICHI akane)

所属研究機関名: 東京大学

部局名: 大学院工学系研究科

職名: 助教

研究者番号 (8桁): 10734155

(2) 研究協力者

研究協力者氏名: 金子成彦

ローマ字氏名: (KANEKO shigehiko)

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。