

令和元年6月24日現在

機関番号：82627

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K14889

研究課題名（和文）水素添加およびEGR適用に伴う燃焼改善による船用ガス機関の性能改善に関する研究

研究課題名（英文）Study on performance improvements of marine gas engine by hydrogen addition with EGR

研究代表者

市川 泰久 (Ichikawa, Yasuhisa)

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：20586680

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は船用天然ガス機関に、燃焼を活性化する水素添加と燃焼を緩慢化する排気再循環を併用し、それぞれの利点を引き出すように制御することで、ガス機関の高性能化を達成することが目的である。研究では実機ガス機関に対し水素供給装置およびEGR装置を構築し、定常性能および非定常性能を評価する実験を実施した。この結果、定常・非定常（負荷投入）の双方で水素添加による燃焼速度の増加をEGR適用することで抑制可能であることが分かった。また定常実験の結果から未燃炭化水素の排出を大幅に削減することができることが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は船用天然ガス機関を対象とし、燃焼を活性化する水素添加と燃焼を緩慢化する排気再循環を併用し、それぞれの利点を引き出すことでガス機関の性能を高めることを目的としている。本研究では実機ガス機関に対して定常性能・非定常性能の双方で水素添加とEGR適用を行い、詳細な機関性能の評価を実施した。この結果、水素添加による燃焼速度の増加をEGR適用することで適切に抑制できることが明らかとなり、また水素添加の効果によって未燃炭化水素の排出を大幅に削減することができることが明らかになった。本成果は将来のガス機関の高性能化や温室効果ガス排出対策としての活用が期待できる。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this research is to improve the performance of marine natural gas engines. In order to achieve high performance, we attempted to use hydrogen addition to activate combustion and exhaust gas recirculation to suppress combustion. In the research, a hydrogen supply device and an EGR device were installed for the actual gas engine. Using these, experiments were conducted to evaluate steady-state performance and non-steady-state performance. As a result, it was possible to suppress the increase in the combustion rate due to the addition of hydrogen in both steady state and non-steady state (instant load step) by applying EGR. In addition, the results of steady state experiments showed that the emission of unburned hydrocarbons can be significantly reduced.

研究分野：内燃機関

キーワード：ガスエンジン 水素 排ガス再循環 副室着火

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

国際海事機関 (IMO: International Maritime Organization) による船舶からの排ガス規制への対応手段の一つとして、天然ガスを燃料とする希薄予混合燃焼式船用ガス機関が注目されている。一方、本ガス機関は燃料と酸化剤 (空気) を予め混合させる燃焼方式のため、機関の運転条件によってノッキングや失火といった異常燃焼を生じることが課題となっている。これらの異常燃焼は、通常、空気過剰率と点火時期の調整によって抑制・回避が行われているが、空気過剰率については過給機の応答遅れがあることから、急速な負荷変化があった場合に適切な燃焼状態を維持できない場合がある。このため、本ガス機関はディーゼル機関と比較すると負荷応答性は低くなる。さらに、本ガス機関の排気中に含まれるメタン ( $\text{CH}_4$ ) の排出量は、一酸化窒素 ( $\text{NO}_x$ ) の排出量とトレードオフの関係があり、 $\text{CH}_4$  排出量を低減した運転条件では  $\text{NO}_x$  排出量が大幅に増加し IMO  $\text{NO}_x$  排出量規制値を超える場合がある。したがって  $\text{CH}_4$  および  $\text{NO}_x$  の両者を同時に削減する燃焼技術が求められている。そこで本研究では、希薄予混合燃焼式船用ガス機関の異常燃焼の抑制・回避および環境負荷物質排出量低減といった課題を解決するために、水素添加および排気再循環 (EGR: Exhaust Gas Recirculation) の適用に着目した。

水素は燃焼や動力発生過程で二酸化炭素を排出しない燃料として注目されており、その利用は地球温暖化防止を目指したエネルギーシステムである“水素社会”の実現が期待されている。一方、水素は燃焼速度が極めて速く、着火エネルギーが小さく、可燃範囲が広いなど、他の炭化水素燃料と比較して際立って高い燃焼性を有する。このため、ガス機関に利用される天然ガス燃料への少量の水素添加は、その燃焼を活性化する“助燃剤”となることが知られており、 $\text{NO}_x$  低減やノッキング抑制に効果的な希薄燃焼が実現できる。また、EGR 技術は、排ガス中に含有する二酸化炭素 ( $\text{CO}_2$ ) の効果によって  $\text{NO}_x$  排出量の低減し、ノッキングの発生を抑制でき、

排気中の未燃燃料を再度吸入し燃焼することができるなど利点があることが知られている。しかし、EGR は燃焼を緩慢にするため、燃焼の不安定化、燃焼速度の低下、全炭化水素 (THC) ・一酸化窒素 (CO) 排出量の増加などの課題がある。これら水素添加技術と EGR 技術は、燃焼に対して、一方は燃焼を活性化し他方は燃焼を緩慢化する逆の作用を有するが、これらの技術を組み合わせ各々の利点を引き出すように制御することができれば、船用ガス機関に対して、環境負荷物質 ( $\text{CH}_4$  および  $\text{NO}_x$ ) 排出量の更なる低減、機関性能改善などの相乗効果が期待できる可能性があるとの着想に至った。

そこで、本研究課題では燃焼を活性化する水素添加技術と燃焼を緩慢にする EGR 技術を組み合わせ利用し、副室火花点火・予混合燃焼方式の船用ガス機関における  $\text{NO}_x$ /THC トレードオフ改善 ( $\text{NO}_x$  と THC の同時低減) および非定常性能改善を両立させる、水素添加率・EGR 率制御による新たな燃焼技術を確立する。

### 2. 研究の目的

本研究では、副室火花点火・予混合燃焼方式ガス機関の性能 (定常および非定常) 改善を目指し、燃焼を活性化する水素添加と燃焼を緩慢にする EGR を組み合わせることでより機関性能 (含、環境負荷物質排出量低減) を改善することを目標とする。本研究では、実機ガス機関に対して水素添加および EGR 技術を同時に適用し、水素添加および EGR 適用による機関性能の改善効果を明確にすることを目的とする。

### 3. 研究の方法

#### (1) 実験装置

本研究で用いた実機ガス発電機関の緒元を表 1 に示す。本機は副燃焼室 (副室) を有する超希薄燃焼技術 (始めに副室内で燃焼しやすい条件 (空気過剰率 1 付近) で燃焼させ、この高エネルギー燃焼ガス噴流によって燃焼させることが困難な主燃焼内 (主室) の超希薄混合気 (空気過剰率 2 付近) を燃焼させる技術) を採用している。

表 1 実験機関の諸元

名称	AYG20L-SE (ヤンマー)
方式	希薄 / 火花点火 / 副室
シリンダ径/行程	155 mm / 180 mm
シリンダ数	6
発電出力/回転速度	400 kW <sub>e</sub> / 1800 min <sup>-1</sup>

図 1 に本実験で用いた実験装置の構成を示す。同図に示すように、実験機関に対し主室および副室の各々に水素を供給するシステムを構築している。主室への水素供給は、既設の都市ガスインジェクタ付近に、水素インジェクタを各気筒 2 個ずつ設置した。その水素供給部の外観を図 2(a) に、水素噴射ノズルの断面図を図 2(b) に示す。水素インジェクタはシリンダ内部で水素が均質に分布するように、水素噴射ノズルの側面および端部に複数個の噴射孔を配置し、シリンダに供給される空気の流れに対し垂直に設置した。水素の噴射開始時期および噴射期間は、シリンダの給気行程に収まる範囲に制御した。副室への水素供給は、副室供給燃料に水素を混合することにより実施し、流量計を基にニードルバルブによって混合比の調整を行った。図 3 に設置した EGR 装置の外観を示す。EGR は、過給機タービン出口部から分流した一部の排ガスを EGR クーラで冷却し、凝縮水の分離後に過給機コンプレッサ吸入空気に混合する構成とした。この際、EGR ガス流量は、EGR クーラ出口部に設置した EGR プロアの周波数および過給機コンプレッサ入口部に設置した電制式 EGR スロットルバルブの開度によって調整した。

なお発電負荷、水素噴射期間、EGR プロア周波数、EGR スロットル開度は、PLC(Programmable logic controller)を用いることにより高速同時制御ができるように構築した。

なお、ガス機関に対する EGR 率は、排ガス組成および給気マニホールド内ガス組成の分析結果から、CO<sub>2</sub> 濃度の比を用いて算出した。本ガス機関の燃焼特性は、第 6 気筒に設置した筒内圧力計の計測値から燃焼重心クランク角度等を実時間解析することにより、常時監視した。また、非定常性能の評価には負荷変化に対するガス機関の応答を高速で計測する必要があるため、特に重要となる計測項目（回転速度、発電出力、給・排気圧力・温度、スロットル開度等）はサンプリング間隔 50 msec. でデータ取得し、燃焼圧力波形は毎サイクルのデータを取得した。さらに、燃焼状態を把握するために重要となる排ガス組成は、最大 5Hz で分析可能な高速フーリエ変換型赤外分光多成分ガス分析器（FTIR）によって高い応答速度で計測を行った。

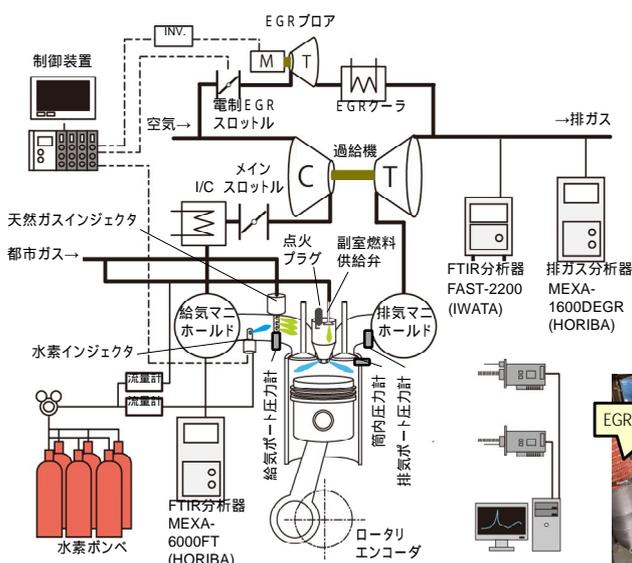


図 1 実験装置構成



図 2 水素噴射部の外観

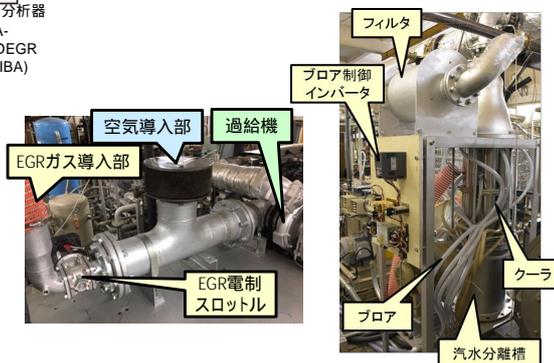


図 3 EGR 装置の外観

### (2) 定常性能評価の実験方法

定常状態性能評価実験では、水素添加・EGR の同時適用時の性能改善効果を明確にするために、水素を供給した状態のガス機関の代表性能が水素無供給時と同一となるように EGR 率および点火時期を調整する実験を実施した。この際、代表性能には、排気特性として規制対象になっている NO<sub>x</sub> 排出率を、燃焼特性として燃焼重心クランク角度 (CA MFB 50%: Crank Angle - Mass Fraction Burned 50%) を選定した。NO<sub>x</sub> 排出率は、船用機関の NO<sub>x</sub>3 次規制値を参考に 1.0 g/kWh になるように空気過剰率を調整し、このときの筒内圧力を元にした燃焼特性や発電効率、排ガス中の主要 5 項目 (O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, THC) 等の排出特性を詳細に評価した。なお、本実験では副室供給燃料へ水素添加を行う実験も実施したが、性能改善効果を確認できなかったため本報では割愛する。

### (3) 非定常性能評価の実験方法

非定常性能評価実験では、船用補機関において重要な非定常特性となる負荷投入性を対象とした。実験では発電出力 200 kW (負荷率 50%) の基準運転条件から +70 kW (負荷率 17.5%) の瞬時負荷投入を行った。なお、基準運転条件では、定常性能評価実験と同様に NO<sub>x</sub> 排出率を 1.0 g/kWh になるように空気過剰率を調整した。瞬時負荷投入時の水素添加および EGR 適用の効果を明らかにするため、以下 (i) ~ (iii) の 3 条件で実験を行った。(i) 水素添加および EGR 適用をしない瞬時負荷投入、(ii) 瞬時負荷投入と同時に水素を 300 Nm<sup>3</sup>/h (供給熱量 55 kJ/sec.) 投入、(iii) 瞬時負荷投入と同時に、条件(ii)の水素供給に加えて EGR スロットル開度を 0% から 40% にし EGR を適用。なお、条件(iii)では EGR プロア周波数を予め 50 Hz に設定した。

## 4. 研究成果

### (1) 定常性能評価結果

図 4 および図 5 に、水素熱量混焼率に対し NO<sub>x</sub> 排出率および燃焼重心クランク角度 (CA MFB 50%) が一定になるように EGR 率および点火時期を調整した結果を示す。まず、図 4 から、水素熱量混焼率に対して NO<sub>x</sub> 排出率および燃焼重心クランク角度 (CA MFB 50%) が一定であることが確認でき、図 5 から水素熱量混焼率に対して調整した EGR 率と点火時期の関係がわかる。両図から水素熱量混焼率に関わらず EGR 率と点火時期を適切に調整することで NO<sub>x</sub> 排出率と燃焼重心クランク角度を一定にできることがわかる。因みに、熱量混焼率 30% では EGR

率を 19 % および点火時期を 1.3 deg.CA 遅角する必要があった。図 6 にクランク角度に対する筒内圧力を示す。同図から、NO<sub>x</sub> 排出率と燃焼重心クランク角度(CA MFB 50%)を一定に調整したことにより、最大筒内圧力の上昇が抑制されることが確認された。一方で燃焼期間(燃焼質量割合立ち上がりから 95 %のクランク角度と定義)は、水素熱量混焼率 30 %で 4 deg.CA 短縮されており、水素による燃焼速度の上昇を完全に抑制できず、特に燃焼初期過程における燃焼期間が顕著に短縮することが確認された。図 7 に水素熱量混焼率に対する排気中メタン濃度を示す。同図から、排気中メタン濃度は水素混焼率の増加に伴って直線的に減少し、水素熱量混焼率 30 %では排気中メタン濃度を 66 %削減することが確認された。本実験では NO<sub>x</sub> 排出率を一定にしていることから、ガス機関の排気特性の特徴である THC/NO<sub>x</sub> 排出のトレードオフ関係を、水素添加と EGR を併用することによって大幅に改善することができることが明らかになった。

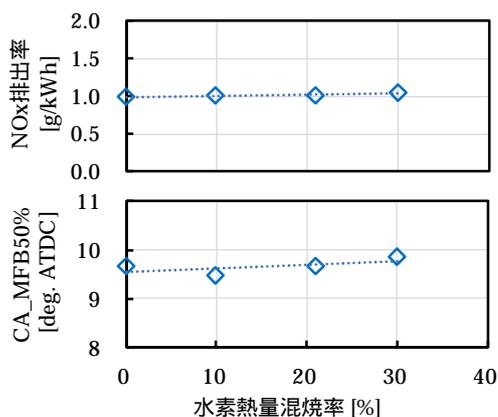


図 4 NO<sub>x</sub> 排出率と燃焼重心クランク角度

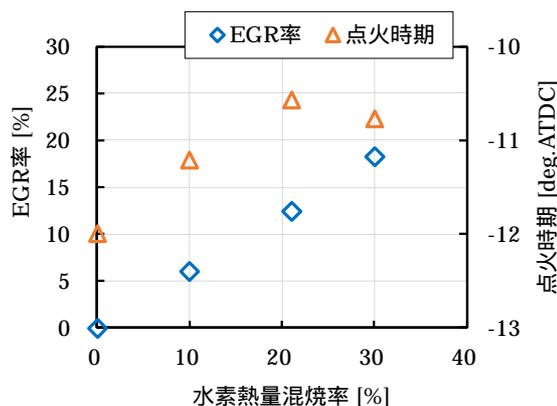


図 5 NO<sub>x</sub> 排出率と燃焼重心位置を一定とするための EGR 率

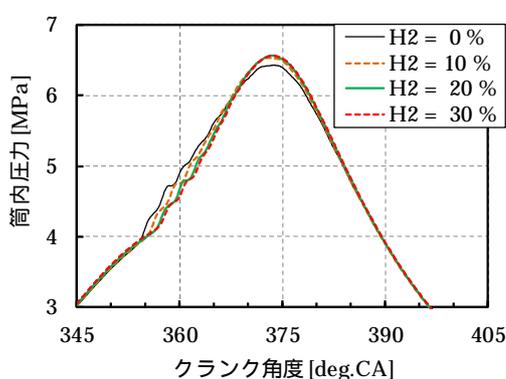


図 6 筒内圧力

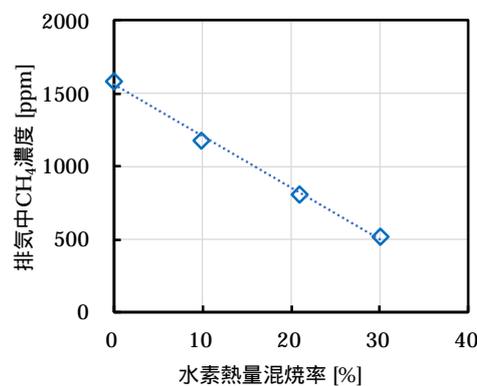


図 7 排気中 CH<sub>4</sub> 濃度

## (2) 非定常性能評価結果

図 8 に瞬時負荷投入からの経過時間に対する(a)エンジン回転速度、(b)排気中 NO<sub>x</sub> 濃度と、瞬時負荷投入後のサイクル数に対する(c)最大筒内圧力と(d)燃焼重心クランク角度の計測結果を示す。同図(a)のエンジン回転速度は、条件(i)では瞬時負荷投入によって 1.6 sec.後に 1730 min<sup>-1</sup>(定格回転速度の-3.9%)まで低下し、その後 3.6 sec.には定格回転速度の±1%(±18 min<sup>-1</sup>)以内に静定していることがわかる。一方、瞬時負荷と水素を同時投入する条件(ii)では 1.2 sec.後に 1760 min<sup>-1</sup>(定格回転速度の-2.2%)となっており、瞬時負荷投入と同時に水素を供給することによって、負荷応答性を改善できることがわかる。同図(b)の排気中 NO<sub>x</sub> 濃度は、全条件(i)~(iii)に対して瞬時負荷投入後に上昇するが、条件(i)では最大値が 320 ppm であり、条件(ii)では 620 ppm と増大した。これらの排気中 NO<sub>x</sub> 濃度の増大は、瞬時負荷投入によって低下した回転速度を回復させるために燃料供給量が増加することによって空気過剰率が低くなり燃焼温度が高まったことが原因と考えられる。一方、条件(ii)では、空気過剰率が更に低下したことで水素添加による燃焼速度の増大によって内部の燃焼温度が更に高くなったことが要因である。この要因は、同図(c)の最大筒内圧力および同図(d)の燃焼重心クランク角度の計測結果からも確認することができ、条件(ii)は、条件(i)と比較して最大筒内が高く、燃焼重心クランク角度が進角していることが確認できる。次に、ノッキング発生を抑制することを目的として実施した EGR 適用の条件(iii)について考察する。同図(a)の条件(iii)のエンジン回転速度は、条件(ii)と同等であることが確認できる。したがって、EGR 適用の有無によりエンジン回転速度の応答性は変化しない。また、同図(b)の NO<sub>x</sub> 濃度の最大値は、条件(iii)は条件(ii)よりも大幅に抑制できていることが確認できる。さらに、同図(c)、(d)から、条件(iii)は条件(i)と比較して、最大筒内圧力は低く、燃焼重心位置は遅角していることが確認できる。これらの結果から、ガス機

関に対して水素添加および EGR 技術を同時に適用することにより、異常燃焼を十分に抑制することができることが明らかとなった。

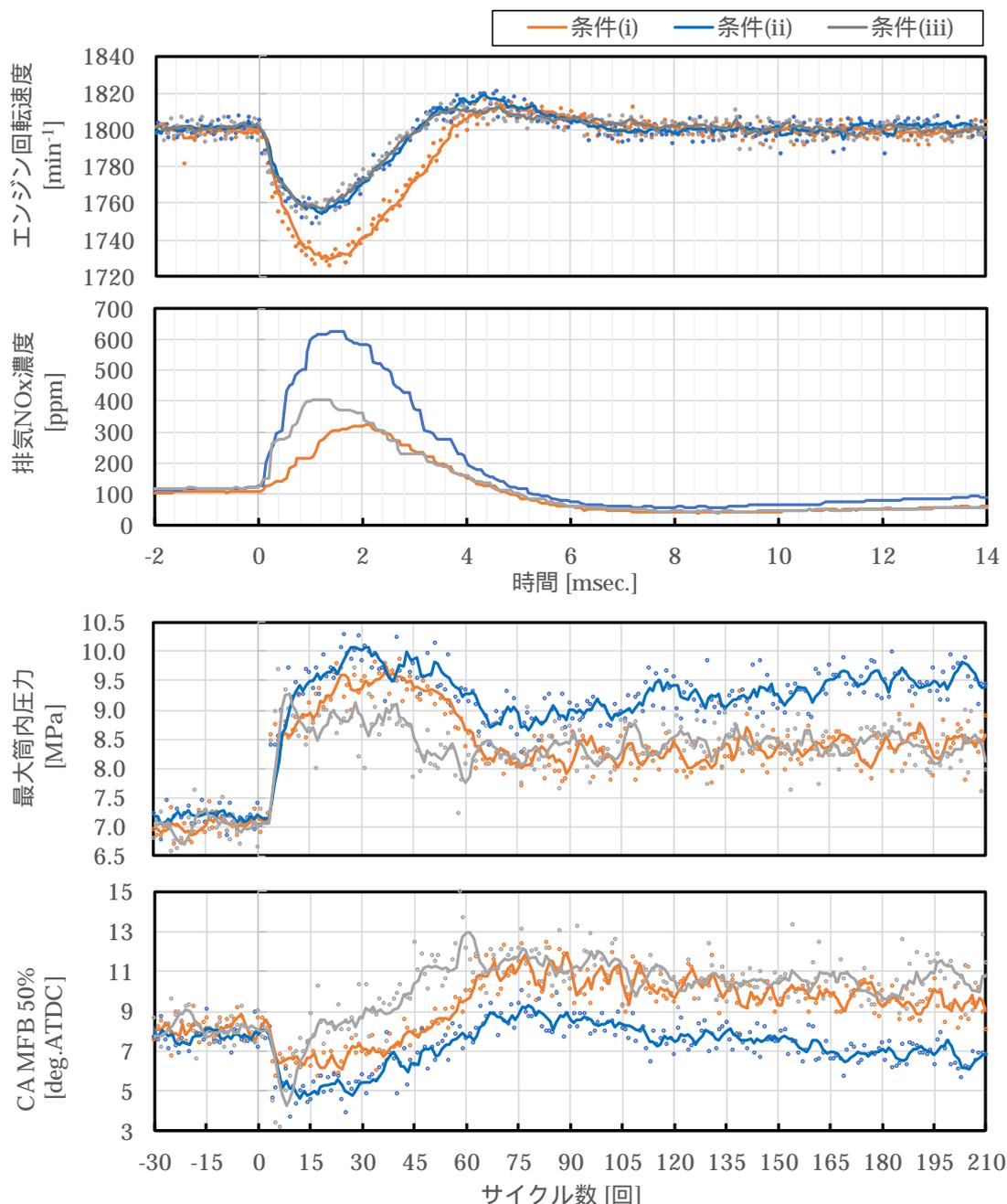


図 8 瞬時負荷投入時の非定常性能

## 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 3 件)

Yasuhisa Ichikawa, Hidenori Sekiguchi and Koichi Hirata, GHG Reduction by Hydrogen Mixed Combustion in Marine Natural Gas Engine, Proceedings of Annual Autumn Meeting of JASNAOE 2018, 査読無し, 2018

市川 泰久、関口 秀紀、平田 宏一、船用リーンバーンガス機関の水素混焼技術に関する研究、第 88 回マリンエンジニアリング学術講演会講演論文集、査読無し、2018、pp. 131-132

Yasuhisa Ichikawa, Hidenori Sekiguchi, Oleksiy Bondarenko and Koichi Hirata, An Exhaust Gas Temperature Increase Technique Using EGR Device for the Application of Waste Heat Recovery Technology on a Lean Burn Gas Engine, Proceedings of ASME 2018 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference, 査読有り, Paper No. ICEF2018-9635, pp. V001T03A017, 2018 ,DOI:10.1115/ICEF2018-9635

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕  
出願状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年：  
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：  
ローマ字氏名：  
所属研究機関名：  
部局名：  
職名：  
研究者番号(8桁)：

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名：  
ローマ字氏名：

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。