

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：24201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420153

研究課題名(和文) 可変圧縮比による二元燃料機関の天然ガス燃焼モード制御に関する研究

研究課題名(英文) Study on the control of natural-gas combustion in dual fuel engines using variable compression ratio mechanism

研究代表者

河崎 澄 (Kawasaki, Kiyoshi)

滋賀県立大学・工学部・准教授

研究者番号：90346099

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、天然ガス-軽油二元燃料機関に可変圧縮比を採用することにより、天然ガス予混合気の燃焼形態を、高負荷時は火炎伝播、低負荷時は希薄燃焼に適した圧縮着火燃焼にそれぞれ切り替えるという燃焼制御方を提案し、その制御指針を実験的に明らかにした。

すなわち、低負荷から中負荷までの負荷変化に応じて、高い熱効率を維持しながら、燃焼騒音とエミッションを抑制するための圧縮比、排気再循環、および軽油噴射時期の各種パラメータの設定指針を、急速圧縮膨脹装置を用いた指圧線図解析および燃焼可視化観察に基づいて示した。

研究成果の概要(英文)：This study proposed the combustion control method using variable compression ratio mechanism for dual fuel engines with natural gas and gasoil. In this method, a low compression ratio is adopted to promote flame propagation under high load condition. And, a high compression ratio is adopted to promote premixed charge compression ignition under low load condition.

As the results of experiments using a rapid compression and expansion machine, we indicates the strategy for the determination of operation parameters such as compression ratio, exhaust gas recirculation, and gasoil injection-timing to obtain the high thermal efficiency together with low combustion noise and low exhaust emission for low and medium load condition.

研究分野：熱工学

キーワード：二元燃料機関 天然ガス 予混合圧縮着火機関

1. 研究開始当初の背景

(1) 天然ガス二元燃料機関の必要性と課題
メタンを主成分とする天然ガスは耐ノック性が高いため、多くの輸送用天然ガスエンジンは火花点火方式を採用している。しかし、高い熱効率を得るためには、吸気絞りをを用いることなく出力制御を行い、かつ高い圧縮比を適用することのできる、圧縮着火方式が望ましい。

天然ガスを燃料とする圧縮着火機関には、少量のディーゼル燃料油の噴霧火炎を点火源として、天然ガス予混合気を燃焼させる二元燃料機関がある。二元燃料機関では空間的な拡がりをもつ噴霧火炎を天然ガス予混合気の点火源とするため、火炎伝播距離が短く、等容度の高い燃焼が実現できる。しかし、低負荷条件において天然ガス予混合気を、燃焼下限界を超えて希薄にすると、燃焼が不完全となり、熱効率が低下するとともに、多量の未燃炭化水素および一酸化炭素が排出されるという課題がある。

(2) 天然ガス希薄混合気の圧縮自着火燃焼

著者はこれまで、天然ガス予混合気を着火温度以上に高めて多点同時着火させる、予混合圧縮着火 (HCCI) エンジンの研究を行ってきた。これまでの研究により、天然ガス HCCI エンジンでは、燃焼下限界を超える希薄条件でも、高い燃焼効率を実現できることを明らかにした。この方式を二元燃料機関の希薄天然ガスの燃焼に適用すれば、軽負荷時の燃焼を大幅に改善できる可能性が高い。

天然ガス予混合気を自着火させるには、筒内を 1000K 以上の高温にする必要があるため、天然ガス単独のエンジンでは 20 を超える高い圧縮比と、吸気予熱などが必要となる。一方、二元燃料機関では軽油噴霧火炎による筒内温度上昇がまず起こるため、圧縮比を通常のディーゼル機関よりもやや高くすれば、天然ガス希薄混合気が安定に自着火すると試算できる。ただし、天然ガス混合気が理論混合比に近づく高負荷でも、低負荷と同様の自着火燃焼をさせると、瞬間的に過大な熱発生 (ノック) が生じ機関を損傷する。したがって、低負荷と高負荷で燃焼方式を切り替える必要がある。

2. 研究の目的

以上のように、二元燃料機関において、天然ガス希薄予混合気の燃焼効率を自着火燃焼方式により向上させようとする、以下のように負荷に応じて燃焼モードを切り替える必要が生じる。

高負荷モード)
噴霧火炎 + 火炎伝播 (天然ガス予混合気)

低負荷モード)
噴霧火炎 + 自着火燃焼 (天然ガス予混合気)

このような燃焼モードのシームレスな切り替えは、機関の圧縮比を可変にすれば実現できると考え、本課題を着想した。すなわち、図 2.1 に示すように天然ガス予混合気が理論混合比に近づく高負荷では、圧縮比を低くして噴霧火炎を点火源とする火炎伝播を生じさせ、ノックの発生を回避する。一方、天然ガス予混合気が希薄になる低負荷では、圧縮比を高くして希薄予混合気を自着火燃焼させ、等容度の高い燃焼を実現するものである。

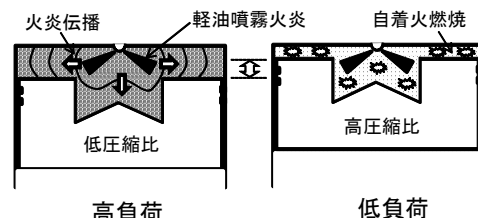


図 2.1 可変圧縮比による燃焼モード切り替えのイメージ

本研究では、負荷の変化に応じて、燃焼騒音を低く抑えつつ高効率を実現するための着火油噴射時期、排気再循環 EGR、および圧縮比を、急速圧縮膨脹装置を用いたエンジン燃焼実験により明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、エンジンの圧縮膨脹行程を 1 回だけ試験することの出来る急速圧縮膨脹装置 (RCEM, 図 3.1) を試作して使用した。

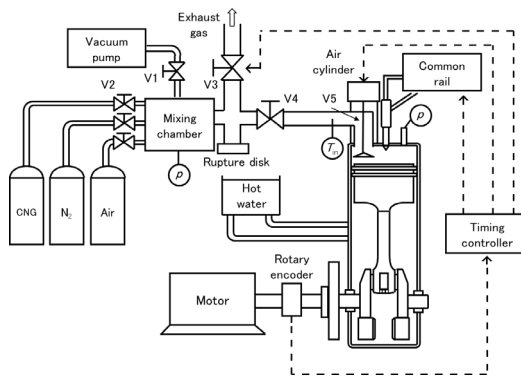


図 3.1 急速圧縮膨脹装置 RCEM の概要

表 3.1 主要諸元

Engine	Single cylinder water cooling
Bore × Stroke	102mm × 105mm
Displacement	857cm ³
Geometric Compression ratio	21.4

本装置は混合室とエンジン部の 2 つからなる。エンジンは燃焼室の吸気弁を開けた状態でモータにより駆動され、その間、予混合気は混合室と燃焼室を往復する。そして所定のタイミングで吸排気弁を閉じることにより燃焼室内に噴射された着火補助軽油が自己

着火し、それを着火源として天然ガス予混合気の燃焼に至る。本研究で製作した RCEM の主要諸元を表 3.1 に示す。ピストンは幾何学圧縮比が 21.4 となるように加工した。実験時には任意のタイミングで吸排気バルブを閉じることにより有効圧縮比を変更した。

図 3.2 には、モータリングにおいて吸排気バルブの閉弁時期を変更した際の、バルブリフトと筒内圧力のクランク角経過を示す。図 3.2 に示すように、閉弁が完了したクランク角を閉弁時期 θ_{vc} と定義し、そこから有効圧縮比を算出した。なお、有効圧縮比 17.6, 10.1 および 6.92 としたときの、モータリング時の圧縮端圧力はそれぞれ、約 4.0, 約 3.5 および約 3.0 MPa である。

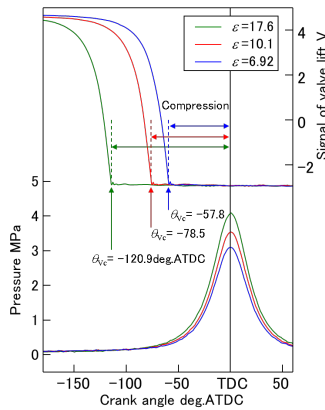


図 3.2 吸排気バルブリフトと筒内圧力

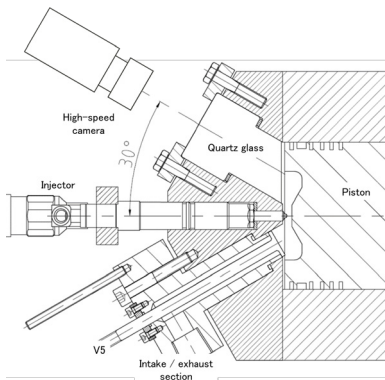


図 3.3 シリンダヘッド断面図

また、図 3.3 に示すように、シリンダヘッドに観察窓を設けて、シリンダ中心に設置されたインジェクタから放射状に噴射される噴霧 1 本分の燃焼を観察できるようにした。

予混合気用の燃料には 13A 天然ガス標準ガスを用い、窒素 79%, 酸素 21% の標準ガスおよび窒素 99.99% のガスを混合することで、所定の当量比および吸気酸素濃度となる予混合気を作成した。着火補助のための軽油には JIS 2 号軽油を用いた。

4. 研究成果

(1) 低負荷条件に適した燃焼条件

① 着火補助軽油噴射時期の影響

まず、当量比約 0.4 の低負荷条件において、軽油噴射時期 θ_j が燃焼に及ぼす影響を調べた。

圧縮比は最も大きい $\varepsilon = 17.6$ とした図 4.1 に、 θ_j を変更した際の筒内圧力 p および熱発生率 ROHR のクランク角経過を、図 4.2 には各種の燃焼特性値を示す。

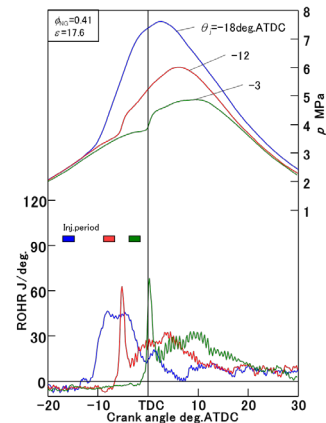


図 4.1 筒内圧力・熱発生率に及ぼす軽油噴射時期の影響 ($\phi_{NG}=0.41$)

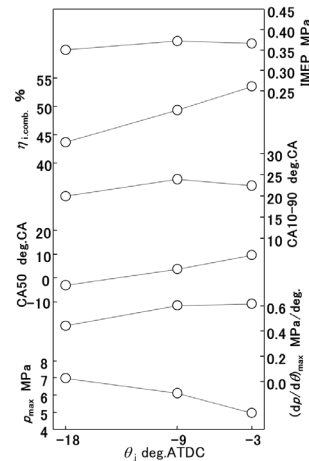


図 4.2 燃焼特性値に及ぼす軽油噴射時期の影響

図 4.1 から、 $\theta_j = -3 \text{ deg.ATDC}$ から -9 deg.ATDC へ早めると着火遅れ期間は若干伸び、初めに軽油主体の燃焼が起こり、その噴霧火炎を着火源として残りの予混合気が火炎伝播燃焼したと考えられる。一方、 $\theta_j = -18 \text{ deg.ATDC}$ まで早めると、着火遅れが長くなるとともに、ROHR のピークが一つになる。これは、長期化した着火遅れ期間中に、軽油と天然ガス予混合気の混合が促進し、分散化した軽油の自着火火炎核によって、天然ガス予混合気が燃え広がり、ROHR のピークが、二つから一つになったと考えられる。つまり、軽油の噴霧火炎を着火源とした予混合気の火炎伝播燃焼から、多点に着火源を持つバルク燃焼に近づいたと考えられる。

図 4.2 より、 θ_j の進角に伴って着火時期が早くなり、筒内最高圧力 p_{max} は上昇する。さらに、図示平均有効圧力 IMEP は、 $\theta_j = -9 \text{ deg.ATDC}$ において最大値を示す。これは、ROHR の二つ目のピーク、すなわち予混合気主体の燃焼が上死点付近にあり、比較的等容度の高い燃焼となったと考えられる。また、

みかけの燃焼効率 η_{comb} は、 $\theta=-3deg.ATDC$ の場合に最大値を示す。これは、 $\theta=-18deg.ATDC$ まで早めると、着火時期が早くCA50は上死点前にあり、熱損失の影響を受けやすい。一方、 $\theta=-3deg.ATDC$ にすると、着火が上死点付近で起こるため、熱損失の影響が低いと考えられる。

つぎに、騒音の指標である最大圧力上昇率 $(dp/d\theta)_{max}$ に着目する。ROHRのピークが二つの燃焼形態をとる、すなわち予混合気を軽油の噴霧火炎を着火源とした火炎伝播燃焼させると、軽油の自着火時に急激な圧力上昇がおこり、 $(dp/d\theta)_{max}$ は0.5MPa/deg.CAを超える。しかし、 $\theta=-18deg.ATDC$ まで早め、着火遅れ期間を長くし、ROHRのピークが一つの燃焼形態をとる、すなわち予混合気を多点に着火源を持つバルク燃焼させることで、軽油の自着火時の圧力上昇を抑えられるため、 $(dp/d\theta)_{max}$ を0.5MPa/deg.CA以下に抑えることができる。

つぎに、燃焼の直接撮影を行った。図4.3に、図4.1の条件における、 $\theta=-3$ 、 -9 および $-18deg.ATDC$ の場合の燃焼可視化画像を示す。

図4.3から、比較的着火遅れ期間の短い、 $\theta=-3deg.ATDC$ および $-9deg.ATDC$ の場合には、初期の燃焼開始時、すなわち軽油の着火直後に噴霧位置に青い火炎が確認できる。その後、強い気炎発光後に、燃焼室全体に火炎が広がる様子が確認できる。 $\theta=-9deg.ATDC$ では、 $-3deg.ATDC$ よりも、着火遅れ期間が少し長く、軽油の分散が進んだために、青い噴霧火炎が広範囲に確認できた。一方、 $\theta=-18deg.ATDC$ まで早めると、着火遅れが長く、軽油の希薄化が進行したために、着火時に広範囲に薄く青い火炎が確認できる。その後、燃焼室全体に火炎が広がる。軽油と予混合気の混合が促進したのちに燃焼したため、局所的な酸素不足となる領域が小さく、 $\theta=-3deg.ATDC$ および $-9deg.ATDC$ の場合と比較して、輝炎発光が抑えられる結果となった。

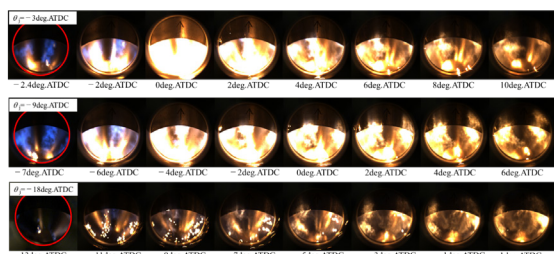


図4.3 火炎発達に及ぼす軽油噴射時期の影響 ($\phi_{NG}=0.41$)

②EGRの影響

前節では、 $\phi_{NG}=0.41$ において、 $\theta=-3$ から $-18deg.ATDC$ へ早めると、着火遅れが長くなることで、軽油の着火時の燃焼が緩慢になり、 $(dp/d\theta)_{max}$ を抑えることができた。しかし、予混合気の燃焼が $-10deg.ATDC$ 、す

なわち圧縮行程中に開始しており、熱損失が大きくなり、 η_{comb} が下がる結果となった。そこで、軽油の着火時の燃焼を抑えつつ、燃焼位相を制御する方法として、排気再循環EGRに着目した。ここでは、予混合気中の窒素の割合を増やすことでEGRを模擬した。図4.4に、 $\phi_{NG}=0.41$ において、EGR率を0~50%の間で変更した際の p およびROHRのクランク角経過を、図4.5には、 θ に対する燃焼特性値の変化を示す。

図4.4から、EGR率の増加に伴い、ROHRの立ち上がりおよび立ち下がりも緩やかになり、燃焼位相は徐々に遅角する。EGR率を高くすると、予混合気中の酸素濃度が低下し、着火遅れ期間が長くなる。その間に軽油と予混合気の混合が促進される。加えて、予混合気中の酸素濃度低下による燃焼速度の低下が生じ、燃焼が緩慢になった。EGR率を50%まで高めると失火する。

図4.5から、EGR率を0%から40%まで増加させるに伴い、IMEPはほとんど変化せず、 p_{max} および $(dp/d\theta)_{max}$ は低下し、 η_{comb} は増加する。これは、EGR率の増加に伴い、着火遅れ期間が長くなり燃焼位相が遅角、すなわち、燃焼が圧縮行程から膨張行程に移ったことで、 p_{max} および $(dp/d\theta)_{max}$ を抑えることができたと考えられる。さらに、EGR率40%では、燃焼が上死点付近で開始するため、燃焼期間が短くなり、熱損失が低下したことで、 η_{comb} は増加したと考えられる。しかし、EGR率を45%まで高めると、IMEPおよび η_{comb} は低下する。これはEGR率を高めすぎると、燃焼位相が遅角しすぎるため、筒内温度が低くなり予混合気の反応が途中で凍結したためと考えられる。

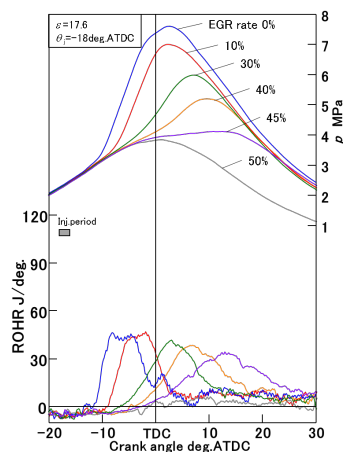


図4.4 筒内圧力・熱発生率に及ぼすEGRの影響 ($\phi_{NG}=0.41$)

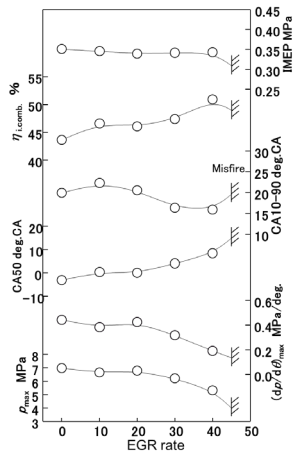


図 4.5 EGR 率に対する燃焼特性値の変化 ($\phi_{NG}=0.41$)

(2) 中負荷条件に適した燃焼条件

つぎに、中負荷条件に適した燃焼条件を明らかにするために、燃焼に及ぼす EGR 率および、圧縮比 ϵ の影響を調べた。

図 4.6~図 4.8 に、それぞれ EGR 率を 10~30%としたときの、 p および ROHR のクランク角経過に及ぼす圧縮比の影響を示す。図 4.7 には、圧縮比をパラメータとしたときの、EGR 率に対する燃焼特性値を示す。当量比は中負荷相当の $\phi_{NG}=0.61$ である。

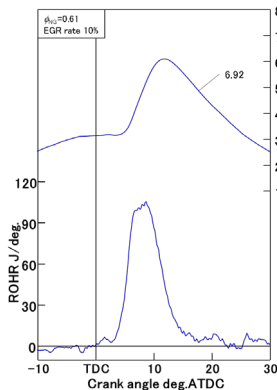


図 4.6 筒内圧力・熱発生率に及ぼす圧縮比の影響 ($\phi_{NG}=0.61$, EGR=10%)

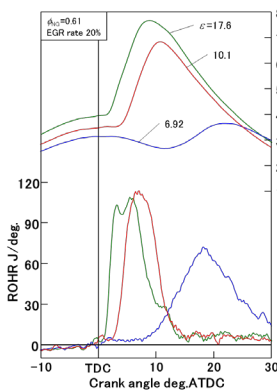


図 4.7 筒内圧力・熱発生率に及ぼす圧縮比の影響 ($\phi_{NG}=0.61$, EGR=20%)

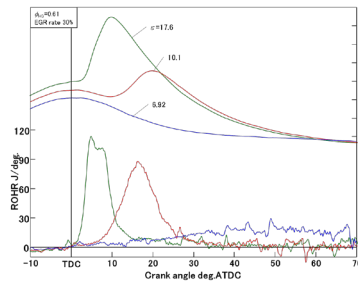


図 4.8 筒内圧力・熱発生率に及ぼす圧縮比の影響 ($\phi_{NG}=0.61$, EGR=30%)

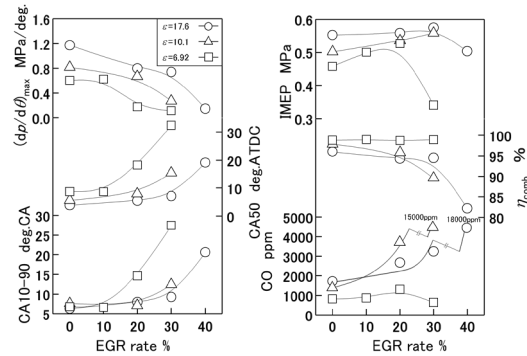


図 4.9 燃焼特性値と EGR 率の関係に及ぼす圧縮比の影響 ($\phi_{NG}=0.61$)

図 4.9 より、 $\epsilon=6.92$ では EGR 率 20%以上とすると、また $\epsilon=17.6$ では EGR 率 30%以上とすると IMEP は低下する。これは、EGR 率が増加することで、着火遅れ期間が長くなることに加えて、燃焼速度が低下する。その結果、図 4.6 および図 4.7 にみられるように、燃焼位相が遅角して、等容度が低下することで、IMEP が低下したと考えられる。また、EGR 率の増加に伴い、 $\epsilon=6.92$ を除いて η_{comb} は減少する。一方、全ての ϵ において、EGR 率の増加に伴い、CO の発生量は増加し、 $\epsilon=10.1$ では EGR 率 30%を境に、 $\epsilon=17.6$ では EGR 率 40%を境に急増する。これは、EGR 率の増加に伴い、予混合気中の酸素濃度が低下するために燃焼速度が低下し、燃焼位相が遅角して、膨張による筒内温度低下で燃焼が不完全になり、CO の発生量は増加すると考えられる。しかし、 $\epsilon=6.92$ および EGR 率 30% の条件では、IMEP は低いにも関わらず、 η_{comb} が高く、CO の発生量も非常に少ない。本研究では、 η_{comb} を燃焼後の排気ガスに含まれる CH_4 および CO の残量から算出しており、 CH_4 が反応により減少し、それが CO まで酸化されず、中間生成物で反応が終了していると仮定すると、CO はほとんど発生せず、見かけ上、 η_{comb} は高い値を示す。したがって、見かけ上、 η_{comb} が高い、 $\epsilon=6.92$ および EGR 率 30% の条件は、実用的でないと言える。なお、この詳細を調べるためには、排気ガス中の炭化水素の成分解析を行う必要がある。

(3) 低中負荷条件における燃焼制御の指針

これまでの実験結果を基にして、それぞれの負荷において高効率を得るための燃焼制御指針を整理した。図 4.10 に、有効圧縮比をパラメータとして、図示平均有効圧力 IMEP に対する各種燃焼特性値の変化を示す。天然ガス当量比に応じて背景が色分けされている。また、 $\phi_{NG}=0.21$ および 0.31 の範囲のプロットの添え字は軽油噴射時期 θ を、 $\phi_{NG}=0.41, 0.51$ および 0.61 の範囲のプロットの添え字は EGR 率を示す。なお、 $\phi_{NG}=0.41$ において、 θ および EGR 率を変更した際の実験結果は、排気ガスの組成分析を行なっていないため、IMEP の範囲のみ示す。

図 4.32 から、超低負荷域の $\phi_{NG}=0.21$ および 0.31 に対して、 $\varepsilon=17.6$ および軽油の噴射量 $q_f=1.5\text{mg/cycle}$ 一定で、 θ の変更し、燃焼の改善を試みたが、 θ を早めることで、バルク燃焼に近づくことで、 $(dp/d\theta)_{\max}$ を 0.5MPa/deg.CA 以下に抑え、CO の発生量を低減できたが、その際に、 η_{comb} が 80% 前後と、燃料の未燃分が排出される。このことから、超低負荷域では、 ε をさらに高めるなど改善が必要である。

一方、中負荷域の $\phi_{NG}=0.51$ および 0.61 では、低い ε の選択および EGR の適応は有効であることが示された。しかし、EGR 率を高めすぎると、CO の発生量が増加し、 η_{comb} が低下する限界があるため、条件に応じて、選択する必要がある。中負荷域では、 $q_f=1.5\text{mg/cycle}$ および $\theta=-3\text{deg.ATDC}$ では、できる限り有効圧縮比を下げ $\varepsilon=6.92$ を選択し、EGR 率を 20% にすることで、燃焼の改善が確認できた。以上から、本報の目的とした、高負荷域では低圧縮比、低負荷域では高圧縮比を選択する、負荷に応じて有効圧縮比を変更する燃焼制御は有効であると言える。

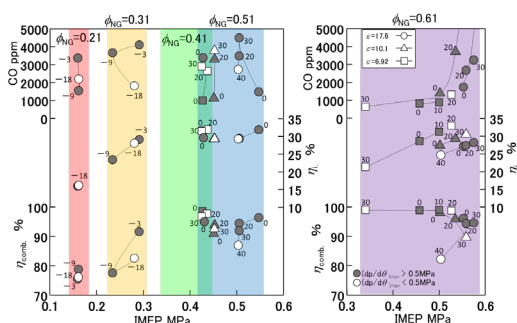


図 4.10 様々な当量比における図示平均有効圧力に対する燃焼特性値の変化

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 2 件)

田崎大地, 富田潤, 河崎澄, 山根浩二, 天然ガスデュアルフェューエル機関の燃焼に及ぼす圧縮比の影響, 自動車技術会関西支部, 学生自動車研究会 第 32 回卒業研究発表講演会, (2016), p36-37.

富田潤, 河崎澄, 山根浩二, 天然ガス予混合

圧縮着火機関における軽油噴射および圧縮比変更による燃焼制御, 自動車技術会 2016 年秋季大会 学術講演会予稿集, No. 1-132, (2016), p852-857.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

河崎澄 (KAWASAKI, Kiyoshi)
滋賀県立大学・工学部・准教授
研究者番号: 90346099

(2) 連携研究者

滋賀県林立大学・工学部・教授
山根浩二 (YAMANE, Koji)
研究者番号: 10210501

(3) 研究協力者

犬飼祐輔 (INUKAI, Yusuke)
富田潤 (TOMITA, Jun)
田崎大地 (TAZAKI, Daichi)
田中昌希 (TANAKA, Masaki)