

— 2024年度JKA補助事業成果 —

カーボンニュートラルグリーン水素及びグリーンメタンの比率を 自在に使えるガス内燃機関の開発研究

森吉 泰生

千葉大学大学院 工学研究院 機械工学コース

1 はじめに

カーボンニュートラル社会の実現に向け、発電用ガス内燃機関の分野では再生可能エネルギーから生成される水素(グリーン水素)やこの水素と別途回収した二酸化炭素より合成(メタネーション)して得られるメタン(グリーンメタン)の活用が期待されている。

一方、再生可能エネルギーから生成される燃料は天候等の影響を受けやすく、供給が不安定であることが想定され、発電用ガス内燃機関では、グリーン水素、グリーンメタンあるいはこれらの混合燃料の比率を自在に使用できることが求められている。しかしながら、現時点ではこのような発電用ガス内燃機関は実現できていない。

これは水素とメタンの燃焼に関連する物性値が大きく異なるためであり、特に大きく影響するのが水素やメタンの自着火特性が大きく異なる点である。よって、上述のようなガス内燃機関の実現においては、水素/メタン比率別に水素異常燃焼の抑制技術を確立することが重要である。

そこで、本研究では、水素やメタンあるいはその混合燃料を自在に使用できる発電用ガス内燃機関の実現を主目的とし、副室式単気筒ガス内燃機関を用いて正味平均有効圧力が2MPaを超える超高負荷条件で水素/メタン混合比率を変化させながら、その正常および異常燃焼特性を調査した。

2 研究内容

(1)幅広い水素/メタン混合比率に対応できる燃焼室の検討と製作

幅広い水素/メタン混合比率(以下、水素混合割合と記す)に対応できる燃焼室を準備するため、主に副室条件(オリフィス径、数)を中心に3Dシミュレーションを用い最適形状の検討した。

副室条件(オリフィス径-数: 1. 80mm-8, 2. 08mm-6, 2. 55mm-4, 副室オリフィス総断面積一定)を検討したところ、水素混合割合が50, 100vol%において、オリフィス径-数=1. 80mm-8の条件において主室の燃焼が活発になり筒内圧が良く上昇することを確認した(図1)。また、水素混合割合0%においても1. 80mm-8が最適であることを従前に確認しており、以上のことから本実験で使用する副室条件は1. 80mm-8とし燃焼室を準備した。

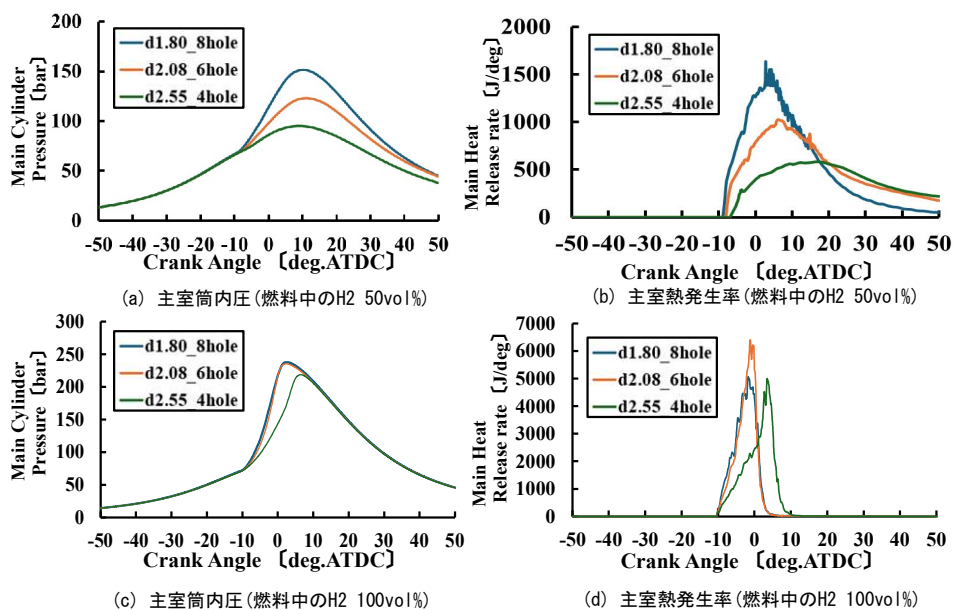


図1 副室オフリス条件(オリフィス径-数)が主室燃焼に与える影響
(主室投入燃料の発熱量一定, 3Dシミュレーション結果)

(2) 水素/メタン混合比率の違いが筒内の燃焼現象に与える影響の調査

本実験には、千葉大学次世代モビリティパワーソース研究センターに設置しているボア200mmの大型の副室式ガス用単気筒試験機を使用した(図2)。主な仕様を表1にまとめている。



図2 単気筒試験機外観

表1 単気筒試験機的主要諸元

Bore [mm]		200
Stroke [mm]		240
Displacement [L]		7.54
Compression ratio		13
Volume rate of pre-chamber [%]		1.2
Fuel supply	Main-chamber	Port Injection
	Pre-Chamber	Direct Injection
Boosting system		Supercharger

まず、水素/メタン混合比率の違いが正常燃焼特性および異常燃焼特性に与える影響を調査した。回転速度を1200rpm, 正味平均有効圧力(BMEP)を2.0MPaに固定し水素混合割合を30～50vol%まで変化させた。

着火遅れや燃焼期間は水素混合割合の増大とともに短くなる傾向を確認した。つまり、燃料中の水素が増大することで、燃焼が促進されることが分かった。

本実験で得られた図示および正味熱効率を図3に示す。熱効率について、水素混合割合が30vol%と50vol%の熱効率は概ね近い値を得ているものの、水素混合割合40vol%の熱効率はそれに比べ少し低くなる傾向が見られた。本実験条件の範囲内では、燃料中の水素混合割合と熱効率との間に明確な傾向は見られなかった。

また、本実験条件の範囲内では、異常燃焼は発生しなかった。

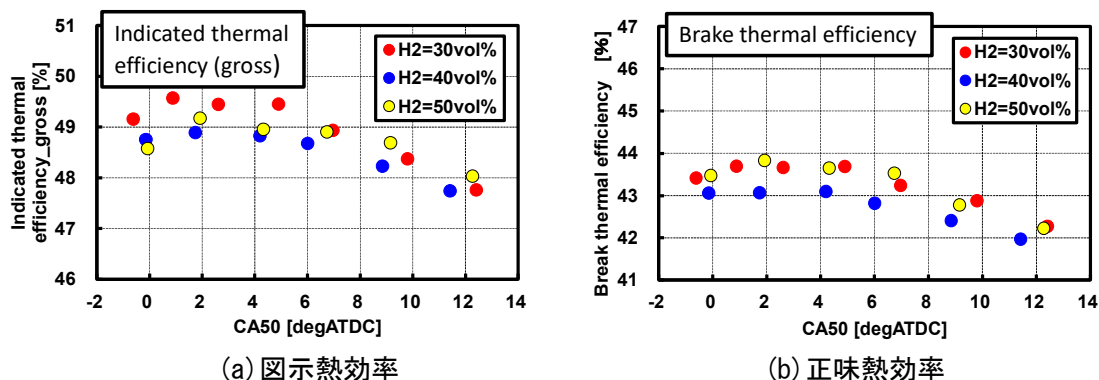


図3 燃料中の水素混合割合の増大が図示および正味熱効率に与える影響

(3) 負荷の違いが筒内の燃焼現象に与える影響の調査

本調査では、回転速度を1200rpmに固定し、BMEPを2.0～2.6MPa、水素混合割合を30～60vol%と変化させ、その際の筒内燃焼現象を調査した。

エンジンの負荷、即ちBMEPが2.0MPaより高い場合や燃料中の水素混合割合が50vol%以上になると異常燃焼が確認され始めた。本研究で観測された異常燃焼はプレイグニッションとサッドである。図4にプレイグニッションおよびサッド発生時の筒内圧力および熱発生率履歴を示す。プレイグニッションとは、点火プラグによる正常点火時期よりも早く点火する現象である。図4(a)や(b)に見られるように、プレイグニッションが発生すると筒内圧力の最大値が大きく上昇する。また、図4(a)より、プレイグニッションは副室燃焼起因の圧力上昇が進角するような形になっていることから、副室内起因の過早着火(特に高温の点火プラグ電極など)と推測する。一方、サッドとは、点火プラグによる正常点火で燃焼がスタートしたにも拘らず燃焼室の予混合気が急速に燃焼する現象である。しかしながら、サッドのメカニズムについては現時点ではよく分かっておらず、引き続き調査を続ける。

BMEP: 2.5MPa, H₂: 50%, Ig.T: -10deg.ATDC

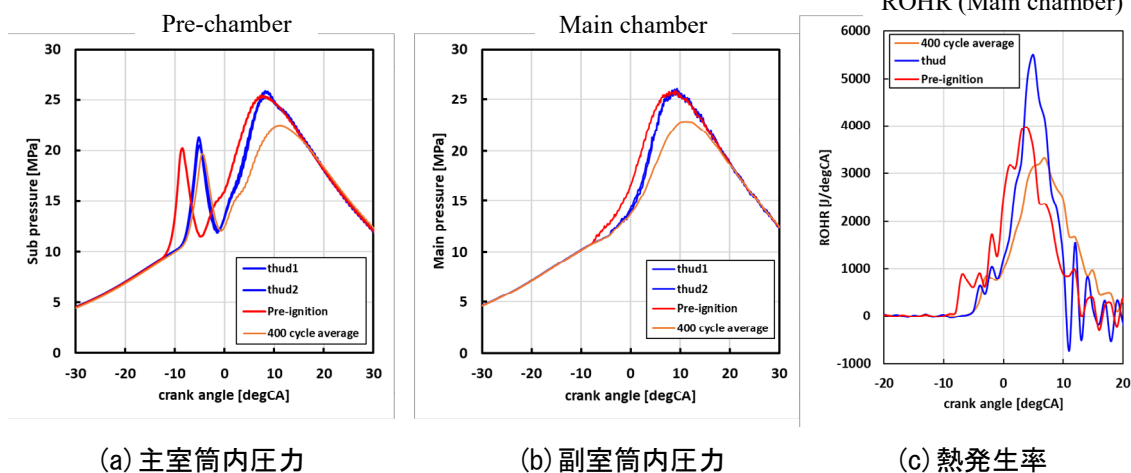


図4 プレイグニッションおよびサッド発生時の主副室筒内圧力および熱発生履歴

(BMEP 2.5MPa, H₂-50vol%, Ig.T -10deg. ATDC)

本実験で得られたすべての結果を、横軸にBMEP、縦軸に燃料中の水素混合割合を取り、エンジン運転状態を整理したグラフを図5に示す。水素混合割合が40vol%以下、かつBMEP 2.5MPa以下の条件であれば、ほぼ異常燃焼は発生せず運転可能であることが確認できた。プレイグニッション発生については、エンジン負荷 (BMEP) というよりは燃料中の水素混合割合に強い感度を有しており、水素混合割合が50vol%を超えるとプレイグニッションの発生が見られるようになった。サッドについては、高い水素混合割合の他、高負荷側でも発生が確認できた。

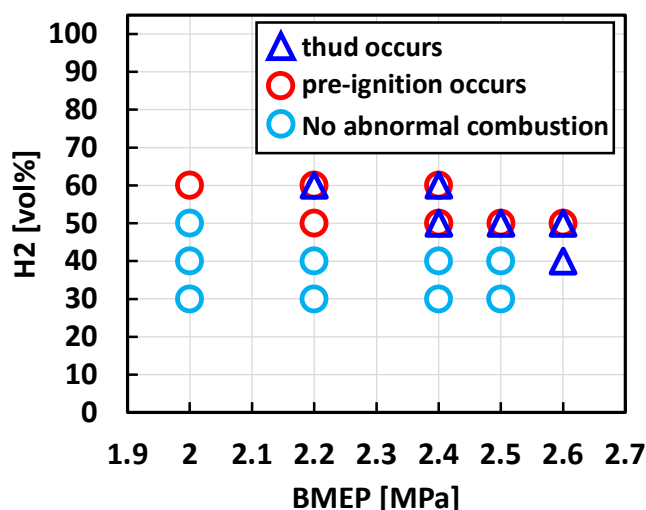


図5 エンジン運転マップ

本実験で得られた図示および正味熱効率を図6に示す。異常燃焼があまり発生しなかった水素混合割合30vol%および40vol%の条件では、BMEPの増大とともに熱効率が增大する様子が確認

できた。また、BMEP2.4MPa以上で図示熱効率が50%を超えた。一方、水素混合割合50vol%の条件では、BMEPが増大しても熱効率は水素混合割合30vol%や40vol%の条件のように増大していない。水素混合割合50vol%ではBMEP2.2MPa以上で異常燃焼が発生しており、これが熱効率向上の阻害要因となった。

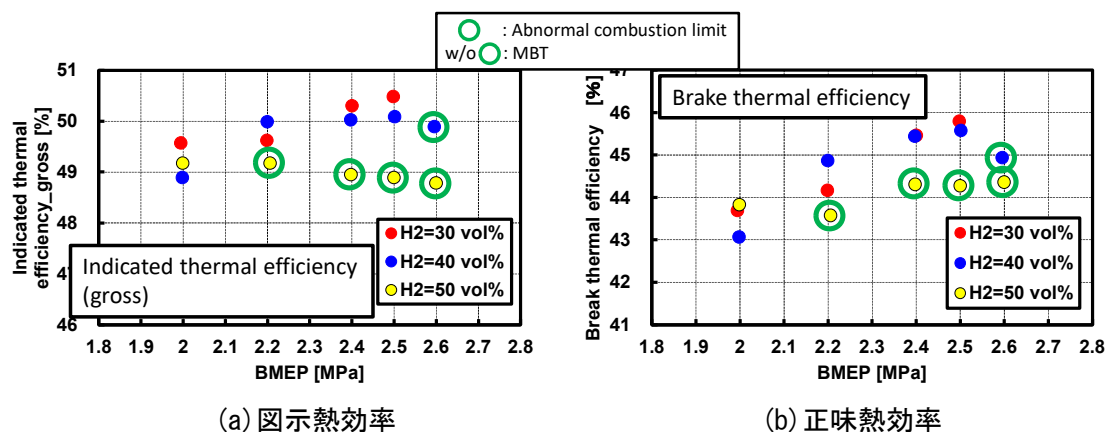


図6 燃料中の水素混合割合およびBMEPが図示および正味熱効率に与える影響

以上の実験結果は基本的に副室の空気過剰率を1に固定した条件であるが、次に副室の空気過剰率を1.3にして副室をよりリーンにした実験を行った。この実験で得られた図7に示す。図より、副室リッチ($\lambda=1$)の条件では、CA50が-7deg.ATDCより進角側でプレイグニッション発生が確認されたが、副室をリーン($\lambda=1.3$)にすることで、プレイグニッション発生タイミングが更に進角側に移ることを確認した。つまり、副室をリーンにすることはプレイグニッション抑制に一定の効果があることを示している。副室をリーンにすることでプレイグニッションを抑制できた要因としては、副室リーン化により副室から主室に噴出されるガスジェットの温度低下による効果によるものと現時点では推測している。

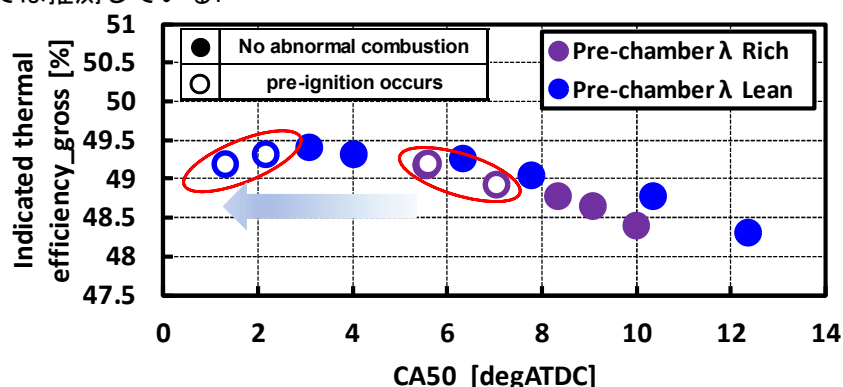


図7 副室リーン化が図示熱効率やプレイグニッション発生に与える影響
(BMEP 2.4MPa, H2-50vol%, 点火時期-16~-8deg. ATDC, 主室空気過剰率2.1)

3 まとめ

本研究では、水素やメタンあるいはその混合燃料を自在に使用できる発電用ガス内燃機関の実現を主目的とし、副室式単気筒ガス内燃機関を用いて正味平均有効圧力が2MPaを超える超高負荷条件で水素/メタン混合比率を変化させながら、その正常および異常燃焼特性を調査した。得られた知見を以下にまとめる。

- 本研究では、燃料中の水素混合割合と熱効率との間に明確な傾向は見られなかった。
- BMEPが2.0MPaより高い場合や燃料中の水素混合割合が50vol%より更に大きくなると異常燃焼が確認され始めた。本研究で観測された異常燃焼はプレイグニッションとサッドである。プレイグニッションとは、点火プラグによる正常点火時期よりも早く点火する現象である。副室圧力履歴よりプレイグニッションは副室内起因の過早着火(特に高温の点火プラグ電極など)と推測した。また、サッドとは点火プラグによる正常点火で燃焼がスタートしたにも拘らず燃焼室の予混合気が急速に燃焼する現象である。しかしながら、サッドのメカニズムについては現時点では把握できていないので、引き続き調査を続ける。
- プレイグニッションについては、BMEPよりも燃料中の水素混合割合のほうに強い感度を持ち、燃料中の水素混合割合が50vol%以上で多く発生が確認された。サッドの発生については、燃料中の水素混合割合にもBMEPにも感度を持っていることを確認した。
- 副室をリーンにすることでプレイグニッション抑制に一定の効果があることを見出した。
- 本研究では、燃料中の水素混合割合を30～60vol%の間で、また、BMEPを2.0～2.6MPaの間で実験を実施した。その結果、いずれの点においても安定運転は実現できた。水素混合割合が大きい条件やBMEPが非常に高い条件では、異常燃焼(プレイグニッション、サッド)が発生したが、熱効率はやや低下するが本実験範囲であれば点火時期を遅角することでこれら異常燃焼を回避することが出来た。