

持続可能なモビリティ技術の研究

研究代表者 草鹿 仁
(創造理工学部 総合機械工学科 教授)

1. 研究課題

近年、温室効果ガスの大量排出に伴う地球温暖化の悪化が問題視されている。また自動車の排ガス問題の解決策として期待されていた電気自動車においても大容量バッテリーを製造時に多量のCO₂を排出すること、輸送用大型自動車においては航続距離不足に悩まされているなど課題が浮上した。これらを考慮し、現状より高効率で排ガスがクリーンな内燃機関の開発は急務と言える。そこで、環境対応車及び高効率熱機関の開発、性能評価、情報技術などを通じてこれらの諸問題の解決方法を追求し、その成果を社会に還元することを目指している。本研究では、特にCO₂排出削減効果が期待されるCH₄-H₂混合燃料を用いた副燃焼室式内燃機関に着目し、その実用化に向けた課題である異常燃焼の抑制を目的として、その発生条件および特性を調査した。

2. 主な研究成果

2.1 実験装置

予燃焼室式機関におけるCH₄-H₂混焼時に生じる過早着火の発生条件を解明するために局所的な壁面高温部を模擬したグロープラグを挿入した状態で急速圧縮膨張装置(以下、RCEM: Rapid compression and expansion machine)を用いて実験を行った。また、3次元数値熱流体計算を用いて、壁面高温部の温度や位置が過早着火に及ぼす影響についてより詳細に検討した。Fig. 1に本研究で使用したRCEMの概略図を示す。本装置を用いて内燃機関の圧縮・膨張行程を再現し、燃焼試験を行う。また、実験結果を基に汎用三次元数値解析ソフトを用いたシミュレーションを行うことで、過早着火の特性を調査した。

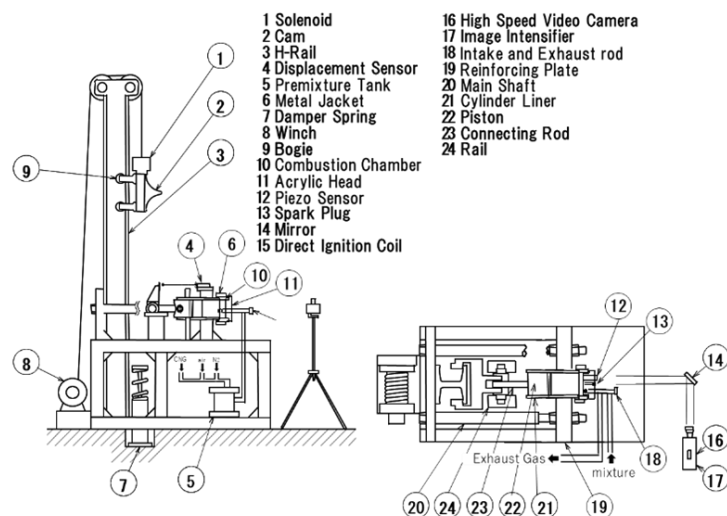


Fig. 1 Schematic of RCEM

2.2 実験条件

本研究では、シリンダヘッド部に予燃焼室を追加し、機関回転数を 800 rpm として、燃料の $\text{CH}_4\text{-H}_2$ 混合率や空気過剰率、壁面高温部を模擬したグロープラグへの印加電力や挿入位置を変更することでそれらの影響を調査した。具体的な実験条件を、Table 1 に示す。

Table 1 Experimental condition of each case

	H ₂ 40 vol.%	H ₂ 50 vol.% λ change			Plug position change	Pre volume change
Item	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6
Bore/Stroke mm	125/140	125/140	125/140	125/140	125/140	125/140
Displacement cc	1718	1718	1718	1718	1718	1718
Pre Chamber Volume cc	1.61	1.61	1.61	1.61	1.61	2.27
Compression ratio	11.60	11.60	11.60	11.60	11.60	11.58
Initial pressure kPa	140	140	140	140	140	140
Initial temperature K	332	332	332	332	332	332
Ignition type	Glow pre	Glow pre	Glow pre	Glow pre	Glow main	Glow pre
Excess air ratio (total)	1.8	1.6	1.8	2.0	1.8	1.8
Hydrogen ratio vol.%	40	50	50	50	50	50

2.3 RCEM による燃焼実験結果

RCEM を用いた燃焼試験では、各種条件において燃焼過程でのシリンダ内圧力を測定し、熱発生率を算出することで、グロープラグへの印加電力を上昇させた際の着火時期の変化を調査し、過早着火の発生のしやすさを評価した。まず、 H_2 混合割合 50 vol.% で空気過剰率 λ を変更したときの結果を Fig. 2 に示す。次に、空気過剰率 $\lambda = 1.8$ とした場合に、水素割合を変更した際の結果を Fig. 3 に示す。さらに、水素割合 50 vol.%, 空気過剰率 $\lambda = 1.8$ の状態で、グロープラグ挿入位置を主燃焼室と副燃焼室に変更した場合の比較を Fig. 4 に示す。

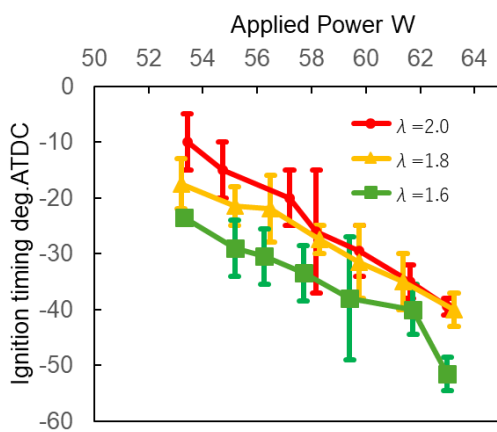


Fig. 2 Variation of ignition timing depending on λ (PC type, 50 vol.% H_2)

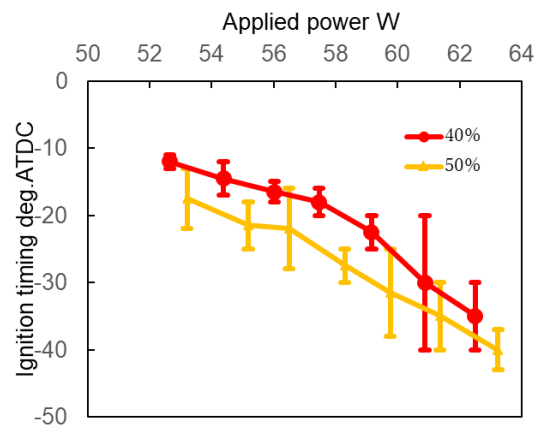


Fig. 3 Variation of ignition timing depending on H_2 vol.% (PC type, $\lambda = 1.8$)

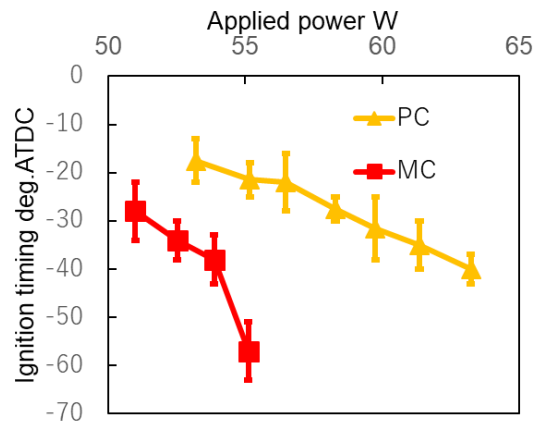


Fig. 4 Variation of ignition timing depending on glow plug position (50 vol.%H₂, $\lambda=1.8$)

これらの結果から、すべての条件に共通して、グロープラグへの印加電力が上昇し表面温度が上昇するにつれて着火時期が進角すること、また、同条件の場合でも着火時期に不安定性が生じることが確認された。また、Fig. 2 より空気過剰率が上昇するにつれて、着火時期が遅角すること、Fig. 3 から水素割合の上昇によって着火時期が進角することが確認された。さらに、グロープラグの設置位置を変更した場合には Fig. 4 のように、同じ印加電力の場合でも、主燃焼室にグロープラグを挿入した場合により着火時期が進角した。

2.4 三次元数値熱流体計算を用いた計算結果

汎用三次元数値熱流体コードを用いて、副室内にグロープラグを挿入した場合の実験結果を基にフィッティングを行い、燃焼モデルを構築した。このモデルを用いて、グロープラグ表面温度変化時の着火特性について調査した。Fig. 5 にグロープラグ表面温度を変化させた場合の副燃焼室周辺のメタン質量割合の時間変化を示す。グロープラグ表面温度 T_{glow} が 920 K の場合、燃料の副燃焼室噴孔からの噴出時期が -22 deg. ATDC となった。 $T_{\text{glow}}=1020$ K の場合、-45 deg. ATDC 付近でメタン割合が最大となったが、副燃焼室からの噴出は生じなかった。 $T_{\text{glow}}=1120$ K の場合、-90 deg. ATDC で燃料が副燃焼室噴孔から噴出した。この結果から、グロープラグ表面温度の上昇に伴い、副室内での着火が早まることが確認された。さらに、グロープラグ表面温度が低く着火が遅い場合には、副室の圧力が十分に上昇し燃料物質量が増加してから着火するため、火炎が副燃焼室から噴出し、プラグ表面温度が十分に高い場合には、副燃焼室内の燃料物質量が増加する前に着火するが高温のため反応性が高く、火炎が副燃焼室から噴出する。しかし、その中間の温度では、副燃焼室内の燃料物質量と反応性の双方が不足するため、過早着火発生時に噴孔で消炎される場合があることが分かった。これが着火時期の不安定性の原因と思われる。

また、Fig. 6 に数値計算でモータリングの再現を行った際の乱流エネルギー密度 (TKE) の燃焼室内分布の時間変化の履歴を示す。同図から、圧縮行程において主燃焼室から副燃焼室への燃料の流れが生じ噴孔通過時に乱れが発生することで、副燃焼室内の TKE が増加することが確認された。TKE が高い場合、着火性は悪化するため、これがグロープラグ挿入位置を副燃焼室にした際に、着火タイミングがより遅くなった原因と考えられる。このことから、本研究で用いた装置での過早着火防止においては、主燃焼室の冷却がより重要となることが示唆された。

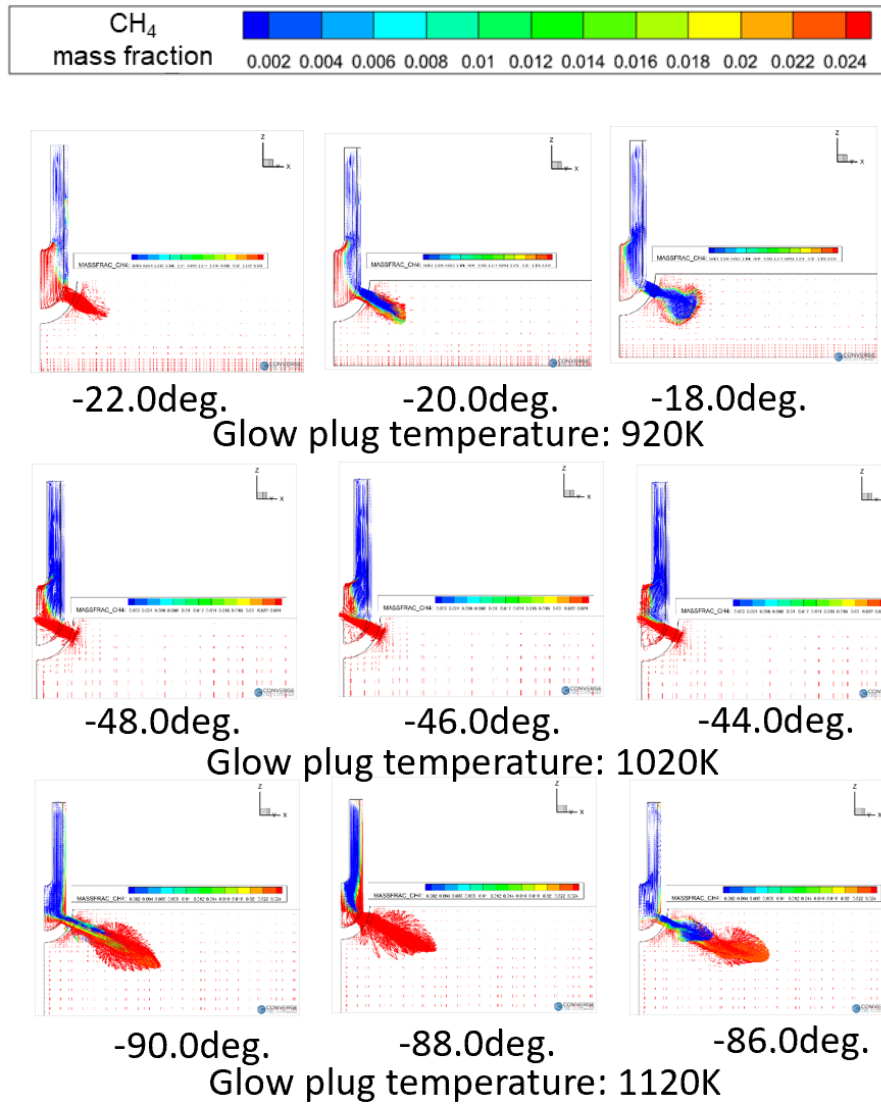


Fig. 5 Comparison of CH₄ mass fraction distribution for glow plug temperature
(Glow plug position: pre-chamber, $\lambda=1.8$, 50% vol.%H₂)

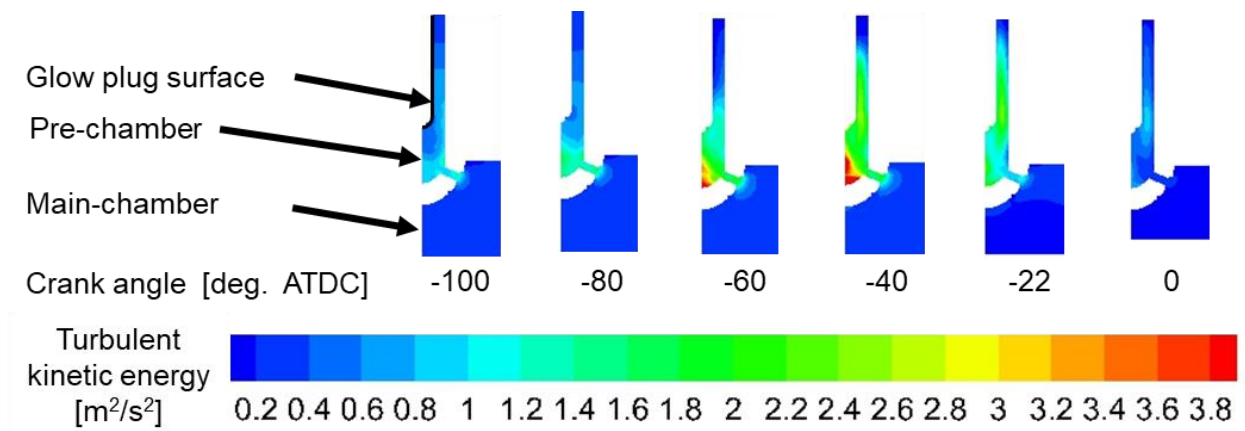


Fig. 6 Turbulent kinetic energy distribution near the pre-chamber in motoring

3. 共同研究者

Ratnak Sok	(早稲田大学研究院・准教授)
馮 芸欣	(草鹿研究室・修士)
江利川 透磨	(草鹿研究室・修士)
楊 溢	(草鹿研究室・修士)
中尾 隆太	(草鹿研究室・学士)

4. 研究業績

4.1 学術論文

なし

4.2 総説・著書

なし

4.3 招待講演

なし

4.4 受賞・表彰

なし

4.5 学会および社会的活動

馮 芸欣, 森田 慧, 中尾 隆太, Ratnak Sok, 草鹿 仁 “Combustion characteristics of blended CH₄-H₂ in Pre-Chamber Engines using Rapid-Compression Expansion Machine Experiments and 3D-CFD Kinetics Simulations”, 2024 年自動車技術会秋季大会, 仙台国際センター(宮城), 2024 年 10 月 23 日

5. 研究活動の課題と展望

シリンダ内にグロープラグ挿入した燃焼試験の結果から、消費電力と着火時期の関係性を確認できたが、グロープラグの表面温度を静止場で測定した値と同一であると仮定したため、正確な表面温度と着火時期の関係は確認できていない。したがって、対流熱伝達を考慮した表面温度の計算が必要である。加えて、数値計算から副室燃焼の不安定性の原因が着火タイミングと副室内燃料質量に関係することが示唆されたが、実際の燃焼でも同様の現象が起こっているか検証するため、筒内の可視化が求められる。さらに、本研究で用いた燃焼室形状では、TKE の値が大きいため副燃焼室の壁面高温部では過早着火が生じにくくなると分かったが、他の燃焼室形状でも同様の結果を得られるかについては更なる検証を要する。

また、運輸交通問題の解決には機械工学以外にも電気工学、環境工学、情報通信技術、運輸交通システムや人間工学など多くの分野における研究成果が必要である。今後はさらに厳しくなる環境規制、燃費規制を意識し効率向上及び電動技術との連携、排気ガスのクリーン化を目指し有効な技術の評価を行っていきたい。