

副室式中速ガスエンジンにおける異常燃焼の発生原因とトーチ火炎が燃焼に与える影響に関する基礎的研究

青柳, 享秀

<https://hdl.handle.net/2324/7396259>

出版情報 : Kyushu University, 2025, 博士 (工学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :



氏 名 Name : 青柳 享秀

論文名 Title : 副室式中速ガスエンジンにおける異常燃焼の発生原因とトーチ火炎が燃焼に与える影響に関する基礎的研究

区 分 Category : 甲

論文内容の要旨

Thesis Summary

カーボンニュートラル社会の実現に向けて水素やアンモニアのようなカーボンフリー燃料への転換は喫緊の課題であるが、産業用中速エンジンへの適用を可能とする燃焼技術は未確立であり、有害排出物の後処理が容易で、ディーゼルエンジンより二酸化炭素の排出量が少なく、将来的にグリーンメタンなどのカーボンフリー燃料も利用可能な希薄予混合燃焼方式のガスエンジンの採用例が増加している。希薄予混合燃焼では着火源の強化が必須であり、中大型の船用や産業用のガスエンジンでは副燃焼室（副室）から主燃焼室（主室）に噴出させたトーチ火炎を着火源とする副室式ガスエンジンが普及しているが、燃焼変動や未燃排出物の増加、高負荷時の異常燃焼発生などの克服が求められている。

本研究は、副室式ガスエンジンの高出力・高効率化が停滞している主因は、トーチ火炎の噴出挙動や主室内の燃焼過程の可視化計測例が極めて少なく、副室諸元の最適化と設計指針が未確立なことであるとの認識から、実機と同等の尺度を有する2つの燃焼可視化装置を用いた詳細な計測を実施して、副室式ガスエンジンにおける異常燃焼の発生機構、およびトーチ火炎の噴出挙動および主室内燃焼と副室諸元との相関を明らかにし、さらにトーチ火炎の噴出強を副室諸元から推定する無次元数を提案することを目的としたものである。

第1章では、本研究の構想と着手に至った環境的・社会的な背景を、往復動内燃機関の排出ガス規制やGHG削減目標の推移などを提示するとともに、カーボンニュートラル燃料の普及に伴い、特に海上運輸における中大型の副室式ガスエンジンの将来的な需要の高まりを指摘している。

第2章では、副室式ガスエンジンの高出力・高効率化を阻害している異常燃焼（過大最高圧燃焼と過早着火）の発生原因に関する既往研究を紹介し、それらの成果を検証した後、本研究の目的を提示している。まず、異常燃焼の定義と様態を明確にし、過早着火の有無とエンドガスゾーンの予混合気の自着火の有無の組合せが異常燃焼の様態を決定し、中速ガスエンジンでは点火時期による燃焼開始が制御可能なエンドガスノッキングとThud、および過早着火から急速燃焼に至るRumbleが殆どであるという重要な指摘を行っている。過早着火では潤滑油起源の可能性が推測されているものの、その実態は必ずしも明らかではないとしている。

最後に、副室式ガスエンジンの高熱効率化を阻害している異常燃焼の克服が困難な理由として、筒内現象の可視化計測に基づいてその発生機構を調査した例が極めてないことを挙げ、本研究の目的を説明している。

第3章では、副室式中速ガスエンジンの燃焼室内現象の解析に使用した実験装置と数値解析手法を説明している。既往研究が対象とした小型高速機関よりも光学窓の強度が制約される中低速エンジンでは燃焼室全域の可視化は困難であるが、独自設計の定容燃焼容器と急速圧縮膨張装置を用いて、副室式中速ガスエンジンを模擬した燃焼室全体の可視化に成功するとともに、熱発生過程と排出物特性を同時解析している。数値予測においては、大尺度のエンジンへの適用を念頭に計算負荷が少ないRANS型乱流モデルとメタン-空気予混合気の詳細反応スキームを実装する3次元CFDコードを用い、供試燃焼装置の燃焼室形状を再現した計算空間において、副室と主室の充てん混合気を初期条件とする数値予測を実施している。さらに、副室諸元によるトーチ火炎の噴出強度の変化を把握するため、両室の体積比と熱発生による差圧からTank & tube法に基づいて両室間の質量流量を推定する一次元CFDも補足的に適用している。

第4章では、副室式中速ガスエンジンの上死点付近の燃焼室形状を模擬した可視化定容燃焼容器を用い、主室内に窒素を充てんした状態で、噴孔数や噴孔径などの副室諸元の変更や、レーザー一点火導入によって実現し

た点火位置の変更がトーチ火炎の噴出挙動に与える影響を、トーチ火炎の先端到達距離や拡がり角の変化として詳細に計測している。その結果、噴孔開口面積が同じ場合、噴孔数や噴孔径が変化しても噴出したトーチ火炎の総体積はほぼ同一であること、噴孔の径長比が大きくなるとトーチ火炎の指向性が強くなること、副室の内容積とトーチ火炎の総体積が正の相関があることなどを明らかにしている。以上により、副室の噴孔諸元からトーチ火炎の噴出速度を表現する指数の導入可能性に言及している。また、供試した 3 次元 CFD により、窒素雰囲気中のトーチ火炎の噴出挙動が良好に予測可能であることを指摘している。

第 5 章では、可視化定容燃焼容器の主室内にメタン-空気予混合気を充てんした状態で、トーチ火炎の噴出挙動や主室内の熱発生過程と排出物特性の変化を通じて、噴孔数や噴孔径の変更がトーチ火炎の噴出および主室内燃焼に与える影響を調査している。その結果、主室内予混合気の燃焼はトーチ火炎が導入した予混合気への着火から開始され、その燃焼はトーチ火炎の進行方向ではなく拡がり角が増大する方向に伝ばすることを指摘している。この着火過程には時間的な着火遅れと、噴孔出口からトーチ火炎に導入された予混合気の燃焼が開始される位置までトーチ火炎が単体で進行する距離（着火遅れ距離）が存在し、両者はトーチ火炎噴出速度に強く影響されることを明らかにしている。さらに、熱発生過程との比較を通じて、主室内燃焼の促進と燃焼効率の向上の両立には、上記の着火遅れ中にトーチ火炎を主室エンドガスゾーン近傍まで到達させる初期噴出速度を与え、体積が大きいエンドガスゾーンから火炎伝ばを開始させることが必要と初めて指摘している。また、供試 3 次元 CFD ではトーチ火炎噴出速度が低い場合のみ良好な予測結果を与えるものの、噴出速度が高くなると乱流混合による消炎効果や着火遅れの伸長を反映するようなサブモデルが必須であると結論している。最後に、副室と主室の諸元に依存するトーチ火炎の噴出速度を代表する無次元指数を提案し、最大熱発生率や排出物特性との相関を調査して、その妥当性を定量的に評価している。

第 6 章では、急速圧縮膨張装置を用いて中速ガスエンジンの異常燃焼の原因と発生機構を調査している。既往研究では主室内に侵入する潤滑油飛沫の自己着火を原因とする説と、主室から副室内に侵入した潤滑油飛沫や副室先端部の過熱壁面を点火源とするトーチ火炎の過早噴出を原因とする説があるが、本研究では、副室内と主室内の同時撮影を可能とする光学系を構築することで、可視化計測に基づく後者の検証に初めて成功し、副室内の過早着火が主導する異常燃焼の発生は極めて稀であることを明らかにしている。その理由として、人為的に点火時期を進角して過早点火を行った場合、トーチ火炎の噴出時期は進角幅程には早期化せず、噴出速度も低下することを挙げている。さらに、1 次元 CFD を利用して副室内過早着火が発生した場合のトーチ火炎の噴出時期と噴出速度を予測し、上記の実験結果を裏付ける結果を得ている。

第 7 章では、本研究を総括して得られた知見を列挙して敷衍するとともに、最終的な結論を導いている。