



Title	改質ガス添加による火花ノック抑制効果に関する研究〔論文内容及び審査の要旨〕
Author(s)	後藤, 隼
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第15359号
Issue Date	2023-03-23
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/89592
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Jun_Goto_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（工学） 氏名 後藤 隼

学 位 論 文 題 名

改質ガス添加による火花ノック抑制効果に関する研究
(A Study on Spark Knock Suppression with Reformed Gas Addition)

地球温暖化防止の見地から 2050 年におけるカーボンニュートラル実現に向けた動きが世界各国で加速しており、電気自動車への移行がクローズアップされている。しかし、その普及には課題が山積していることから、ハイブリッド車を含めた内燃機関を搭載したパワートレインも当面は主要な選択肢の一つであり、その熱効率向上による二酸化炭素低減を継続して図ることが必要不可欠である。とくに、ガソリンエンジンは乗用車用として莫大な台数が普及していることから、高効率化による二酸化炭素削減効果への寄与が非常に大きいものに対して、熱効率向上の大きな障害となる火花ノックの発生が課題となっている。このような背景において、排気再循環 (EGR) 経路中に炭化水素燃料を導入し、水素、一酸化炭素、およびメタンに触媒で改質する Reformed EGR が報告されており、その適用で吸熱反応による排熱回収と改質ガスによる火花ノック抑制による熱効率の改善が期待できる。火花ノックは低速時と高速時で特性が異なるものに対して、火花ノックに関しての従来研究はほとんど低速ノックに限定されており、高速ノックの特性や低速ノックとの相違には未解明な点が多い。従来、高速ノックが発生する高負荷・高速条件では、多くの場合に混合気濃度を過濃に設定することで火花ノックを回避していたが、熱効率改善および排気清浄化の観点から従来の過濃運転に代わる新たな抑制手法の確立が求められている。そこで本研究では、水素およびメタンに代表される改質ガス添加が低速ノックおよび高速ノックに及ぼす影響を明らかにするとともに、低速ノックと高速ノックの相違点を把握し抑制手法を提唱することを目的とし、実機試験およびゼロ次元化学反応解析による検討を行った。

本論文は 6 章から構成されており、その概要は以下の通りである。

第 1 章は序論であり、内燃機関を取り巻く社会的背景と熱効率向上の重要性を述べた上で、火花ノックとその抑制手法に関する研究動向について記述している。さらに、火花ノックの抑制に加えて排熱回収による排気損失の低減が可能な燃料改質技術、および本研究で対象とする改質ガス添加による火花ノック抑制効果に関する研究動向について詳述するとともに、本研究の目的および本論文の構成を記している。

第 2 章では、本研究で用いた実験装置および機関性能の測定・解析手法について詳述している。

第 3 章では、化学平衡解析から燃料改質により得られる主要成分が水素およびメタンであることを明らかにした上で、それらの添加が低速ノックおよび高速ノックに及ぼす影響を実機実験より調査した結果について述べている。まず、水素添加が低速ノックおよび高速ノックのいずれも抑制し、その添加割合の増加にともなってノック限界 CA50 が進角する一方、低速ノックと比較して高速ノックを抑制する効果が低下することを明らかにした。この結果に関しては、水素によるノック抑制の主要因が低温酸化反応抑制効果によるものであるものに対し、高機関回転速度では低温酸化反応が出現する温度域の滞留時間が短いことに起因して高速ノックが低温酸化反応に強く依存しないことが要因であると結論できた。

主燃料にオクタン価正標準燃料 (PRF) を用いた際には、水素添加による火花ノック抑制効果のオクタン価に対する依存性は低速ノックでは小さいものに対して、高速ノックでは高オクタン価燃料ほど水素添加の効果が低下した。この結果から、低温酸化反応に強く依存しない高速ノックではイソオクタン起点の反応によって水素のラジカル消費反応が阻害されていることを示すことができた。一方、

メタンを添加すると、水素添加時と同様に火花ノックの抑制は可能であるものの、低速ノックと比較して高速ノックに対する抑制効果は低下した。低速ノックに対して、主燃料に PRF を用いた際には、水素添加のほうがメタン添加よりも抑制効果が強くなり、ラジカル消費効果は水素がメタンよりも顕著であることが示された。

主燃料にガソリンを用いた際には、ガソリンに含まれるオレフィンおよび芳香族炭化水素が水素添加による火花ノック抑制効果を弱めるため、結果として水素添加とメタン添加による低速ノック抑制効果は同程度となった。一方、高速ノックに対しては、主燃料に PRF を用いた場合でも水素添加とメタン添加による抑制効果は同等となり、低温酸化反応に強く依存しない高速ノック条件では水素によってむしろ系の反応を活発化させる反応の存在が示唆された。

第 4 章では、低温酸化反応が出現する低温および出現しない高温のそれぞれにおいて、定容断熱条件における化学動力学解析を行い、改質ガス添加が主燃料の自着火過程に及ぼす影響を検討した結果について述べている。解析により、水素を添加すると希釈効果に加えて水素が OH ラジカルを消費する反応によって低温酸化反応および H₂O₂ ループによる熱発生が抑制され、着火遅れ時間が長期化することが示された。一方、水素による OH の消費にともなって H ラジカルが生成されるが、高温域では H ラジカルを起点に生成した H₂O₂ の熱分解によって OH を増加させることに加えて、水素の OH 消費反応および H ラジカル消費反応による発熱にともなう温度上昇により、水素を添加するとむしろ熱発生率が増大し、低温酸化反応が出現しない高温条件では希釈に対して着火遅れ時間を長期化する効果が得られないことが明らかとなった。さらに、高温域ではイソオクタンが開裂した化学種を起点に O ラジカル濃度が増加し、水素の一部が OH に代わって O ラジカルと反応することに加えて、水素の O ラジカル消費反応によって OH が生成されることに起因して水素による OH 消費効果が小さくなることが示された。この結果により、低温酸化反応が出現しない高温条件では、イソオクタン濃度の高い高オクタン価燃料では水素による着火遅れ長期化効果が低下することを説明することができた。

第 5 章では、実際のエンジンの筒内ガスの状態を再現するためにピストン圧縮を考慮した二領域モデルを構築し、推定した未燃ガス温度の推移に対応した化学反応解析を行うことによって低速ノックと高速ノックの差異および改質ガス添加による火花ノック抑制メカニズムについて検討した結果について述べている。低速ノックと高速ノックの相違は低温酸化反応に対する依存性によるものであり、高速ノックのほうが筒内温度に対する火花ノックの感度が大きくなることが示された。水素添加による火花ノック抑制メカニズムは主に水素の OH 消費にともなう低温酸化反応の抑制によるものであり、低温酸化反応による発熱が顕著に表れる低速ノックに対しては自着火発生時期を大幅に遅らせるのに対し、これが生じない高速ノックに対してはその効果が低下することを実証することができた。

第 6 章は結論であり、本研究で得られた成果を総括するとともに今後の研究の展開について述べている。

以上を要するに、本研究によって改質ガス添加時の火花ノック抑制効果に対する機関回転速度、主燃料のオクタン価、および主燃料組成依存性を明確化するとともに、低速ノックと高速ノックの現象およびメカニズムの相違について新たな知見を得ることができた。