

予混合圧縮着火燃焼の機構解明と改善に関する研究

学位論文内容の要旨

予混合圧縮着火 (PCCI) 燃焼は、超低 NO_x・無煙燃焼への大きな可能性を有する燃焼方式であるが、その燃焼範囲が低負荷に限定されること、着火時期および急激燃焼の制御が困難であること等に大きな課題がある。しかし、この課題を解決する燃焼技術はまだ確立されていない。

本論文は、燃焼制御を目途として主燃料とは別に反応抑制物質を少量筒内直接噴射することによって、PCCI 機関の燃焼制御と安定燃焼域の拡大に対する可能性を明らかにすると同時に、その機構についても解明したものであり、全 9 章から構成されている。

第 1 章は序論であり、本研究の目的および得られた結果の概要について述べると共に、研究の背景ならびに PCCI 燃焼に関する研究動向について記述した。

第 2 章では、本研究で用いた実験の装置と方法を記述した。特に燃料等の導入については、吸気管からの主燃料導入法および反応抑制物質の筒内直接噴射法について述べた。

第 3 章では、混合気分布と NO との関連について基礎的な解明を行い、PCCI 燃焼における超低 NO 化のための予混合気分布特性の方向を示した。すなわち、混合気濃度の均一化を増加させると、NO 濃度は総括濃度が希薄な領域では大幅に減少するが、過濃領域では若干増加することを定量的に示した。また、PCCI 燃焼での熱効率が通常ディーゼル燃焼よりも高くなる可能性があること、均一混合気燃焼において EGR を行った場合、NO 濃度が増加する燃焼条件が存在すること等を明らかにした。

第 4 章では、通常ディーゼル燃焼との比較において PCCI 燃焼の特性を記述した。通常ディーゼル燃焼と比較して PCCI 燃焼は、無煙・超低 NO_x が可能ではあるが、運転領域が低負荷域に限られていること、燃焼室壁への燃料付着により未燃 HC および熱効率が悪化すること、潤滑油への燃料混入が生じ易いこと等を示すと同時に、燃料として蒸発性が高く着火性が比較的良好な燃料、例えばライトナフサあるいは DME 等がこの燃焼方式には適していることを提示した。

第 5 章においては、反応抑制物質の筒内直接噴射による燃焼制御の可能性とその機構について論述した。すなわち、反応抑制物質噴射によって低温酸化反応が抑制され、その結果として高温酸化反応発現時期の制御が可能であること、この反応抑制効果は、水および低着火性の非含酸素系炭化水素で若干認められるが、含酸素物質のアルコー

ル類、特にメタノールにおいて顕著であること等を明らかにした。

また、反応抑制物質噴射による反応抑制効果は、気化潜熱による温度低下よりは、むしろ低温酸化反応発現前における OH ラジカル低下によって説明されること、この OH ラジカル低下は主として OH ラジカルとアルコール分子との反応によるものであって、低温酸化反応発現時の OH ラジカル濃度は反応抑制物質の種類あるいはその有無に関わらず 4×10^{-10} 程度であること等を示した。

第 6 章では、反応抑制物質として特に水に着目し、それを筒内直接噴射することによる、過早着火および急速燃焼の抑制効果と運転可能領域の拡大効果について論述した。筒内直接水噴射によって、着火時期および急激燃焼の制御と、無煙・超低 NO_x 燃焼を維持しつつ IMEP=0.67 MPa までの高負荷運転、つまり運転領域拡大とが可能であることを実証した。その場合、水噴射時期を低温酸化反応発現時から前進させるほど、水噴射による着火および燃焼への抑制効果は大きくなるが、過度に前進させると、水の蒸発が阻害されてその効果はむしろ低下するため、60° CA BTDC 程度が水噴射時期の最適値であること、水噴射量が増加するほど水による燃焼抑制効果は増すが、過度に増加すると排出 THC 濃度および熱効率が悪化するため、運転条件に応じてその量を設定する必要があること等を明らかにした。

熱効率に対して大きく関与する燃焼効率は、筒内ガス最高温度に極めて大きく依存し、その上昇にともなって向上するのに対し、圧力上昇率は最高温度の上昇で著しく増加するため、高燃焼効率と静粛燃焼とを両立する上で最高温度範囲は極めて限定されることも示した。

第 7 章では、反応抑制物質として最も効果が大きいメタノールを筒内直接噴射することによる、過早着火および急速燃焼の抑制効果と運転可能領域の拡大効果について論述した。筒内へのメタノール直接噴射を行うことによって、着火時期および急激燃焼の制御と、低 NO_x および無煙燃焼を維持しつつ IMEP=0.9 MPa までの高負荷運転が可能であることを示した。その場合、メタノール噴射の早期化によって低温および高温酸化反応を著しく抑制することができ、その噴射量増加によって低温酸化反応量の減少とその発現時期の遅延効果が著しく得られると共に、高温酸化反応の発現時期の遅延と急激燃焼の大幅な緩和が可能になることを見出した。

また、超低輝度火炎の観察により、PCCI 燃焼における低温および高温酸化反応が燃焼室内で同時かつ均一に進行すること、およびメタノール噴射により両反応火炎の発現遅延と著しい輝度低下が生ずること等を検証した。

第 8 章では、高い揮発性と着火性を有しかつ次世代燃料の一つとされる DME (ジメチルエーテル) に着目し、それを主燃料とした PCCI 燃焼における反応抑制物質導入による燃焼制御特性について論述した。すなわち、DME においてもライトナフサの場合と同様に少量の反応抑制物質導入によって、燃焼の着火時期および急激燃焼の制御、ならびに低 NO_x および無煙燃焼を維持しつつ最大 IMEP を 0.24 MPa から水噴射により 0.78 MPa まで、またメタノール噴射によって 0.76 MPa までそれぞれ大幅に運転領域拡大が可能になることを実証した。この場合、反応抑制物質の噴射時期、噴射量等による燃焼制御特性はライトナフサの場合と定性的に一致していることも併せて示した。

第 9 章は本研究の結論であって、得られた結果を総括した。

学位論文審査の要旨

主査	教授	宮本	登
副査	教授	菱沼	孝夫
副査	教授	伊藤	献一
副査	助教授	小川	英之

学位論文題名

予混合圧縮着火燃焼の機構解明と改善に関する研究

予混合圧縮着火 (PCCI) 燃焼方式は、超低 NO_x ・無煙燃焼への大きな可能性を有しているが、その燃焼範囲が低負荷に限定されること、着火時期および急激燃焼の制御が困難であること等が大きな課題である。

本論文は、主燃料とは別に反応抑制物質を少量筒内直接噴射することによって、PCCI 機関の燃焼制御と安定燃焼領域の拡大を図ったものであり、その特性と機構を解明している。

第1章は序論であり、本研究の目的および背景等について述べている。

第2章では、本研究で用いた実験の装置と方法について記述している。

第3章においては、混合気分布と NO との関連について基礎的な解明を行い、超低 NO 化のために必要な予混合気分布特性を示している。すなわち、混合気濃度の均一化にともない、 NO 濃度は総括濃度が希薄な領域では著しく減少するのに対し、空気過剰率がほぼ 1.4 以下の過濃域では若干増加するが濃淡二層化で大幅に減少させ得ること、均一混合気燃焼では EGR 導入によって NO 濃度が増加する燃焼条件が存在すること、また通常のディーゼル燃焼に比べて PCCI 燃焼では熱効率がより高くなる可能性があること等を明らかにしている。

第4章では、通常ディーゼル燃焼との比較において PCCI 燃焼の特性を検証している。通常のディーゼル燃焼に比較して PCCI 燃焼は、無煙・超低 NO_x 化が可能ではあるが、運転領域が低負荷域に限られていること、燃焼室壁への燃料付着により未燃 HC および熱効率が悪化すること等を示すと同時に、燃料として高蒸発性・低着火性を有する燃料、例えばライトナフサ等が適していることを実証している。

第5章においては、反応抑制物質の筒内直接噴射による燃焼制御の可能性とその機構を明らかにしている。反応抑制物質噴射によって低温酸化反応が抑制され、その結果として高温酸化反応発現時期の制御あるいは抑制が可能であること、その抑制効果は水および低着火性の非含酸素系炭化水素に比べて含酸素物質のアルコール類、特にメタノールにおいて顕著であり、それはアルコール分子との反応による OH ラジカル

低下に起因する低温酸化反応の抑制現象であること、更に低温酸化反応発現時の OH ラジカルモル濃度は反応抑制物質の種類あるいはその有無に関わらず 4×10^{-10} 程度であること等を見出している。

第 6 章では、反応抑制物質として特に水に着目し、その筒内直接噴射による過早着火および急速燃焼の抑制効果と運転可能領域の拡大効果を実証している。筒内直接水噴射によって、着火時期および急激燃焼の制御と、無煙・超低 NO_x 燃焼を維持しつつ IMEP=0.67 MPa までの高負荷運転、つまり運転領域拡大とが可能であり、その場合、60° CA BTDC 程度が水噴射時期の最適値であること、水噴射量が増加するほど水による燃焼抑制効果は増すが、過度に増加すると排出 THC 濃度および熱効率が悪化するため、運転条件に応じてその量を設定する必要があること等を明らかにしている。

第 7 章では、反応抑制物質として最も効果が大きいメタノール筒内直接噴射による、燃焼抑制効果と運転可能領域の拡大効果について論述している。筒内へのメタノール直接噴射によって、着火時期と急激燃焼の制御、ならびに超低 NO_x 状態で IMEP=0.9 MPa までの高負荷運転が可能であることを実証している。また、メタノール噴射の早期化あるいは噴射量の増加にともなう低温および高温酸化反応の抑制、特に高温酸化反応の発現時期遅延と著しい緩和とが可能になることを見出している。

第 8 章においては、次世代燃料の一つとされる DME に着目し、それを主燃料とした PCCI 燃焼における反応抑制物質導入の燃焼制御効果と機構を明らかにしている。DME においてもライトナフサの場合と同様に少量の反応抑制物質導入によって、着火時期および急激燃焼の制御、ならびに安定燃焼が可能な最大 IMEP を 0.24MPa から、水噴射により 0.78MPa まで、またメタノール噴射によって 0.76 MPa までそれぞれ大幅に拡大し得ることを実証している。

第 9 章では本研究の結論を総括している。

これを要するに、著者はディーゼル燃焼の新しい方式である予混合圧縮着火燃焼の特性とその改善手法に関する新知見を得ており、内燃機関工学および燃焼工学に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。