

# 博士論文概要

## 論文題目

可変バルブタイミング機構を用いた  
ディーゼル燃焼の制御と排気浄化に  
関する研究

Diesel Combustion Control and Emissions Reduction  
Using a Variable Valve Timing Mechanism

申請者

村田	豊
Yutaka	Murata

専攻・研究指導  
(課程内のみ)

機械工学専攻・内燃機関研究

2007 年 9 月

ディーゼルエンジンは熱効率が大きく、ガソリンエンジンに比べて  $\text{CO}_2$  排出量が少ない反面、ディーゼルエンジンから排出される窒素酸化物 ( $\text{NO}_x$ ) と粒子状物質 (Particulate Matter, 以下 PM と略す) は大気環境汚染の主要因とされ、それらの大幅な低減が強く求められている。このような状況のもと、燃焼技術、排気後処理技術、燃料技術それぞれの改善や新たな制御技術の開発が必要とされ、それらの技術を対象に各所で研究が推進されている。

とりわけ、燃焼技術によってディーゼルエンジンからの有害排出ガスを抜本的に低減するためには、燃焼室内の燃焼現象の理解とそれに基づく革新技术の創出により、排気後処理の負担を大幅に軽減する燃焼方式を開発することが求められている。

近年、新たなエンジン燃焼方式として、極めて希薄な予混合気を圧縮自己着火させることにより、 $\text{NO}_x$  と PM が大幅に低減する可能性が見出されている。この方式は均一予混合圧縮着火 (HCCI: Homogeneous Charge Compression Ignition) 燃焼と呼ばれ、次世代のクリーンな燃焼方式として期待され、実用化に向けた研究が世界的に盛んに行われている。ディーゼルエンジンにおいて、燃料の早期噴射等を行って予混合気の希薄化を促進することにより、このような燃焼に近づけることが可能であるが、予混合気の不均一性が不可避免的に存在することから、一般的には PCCI (PCCI: Premixed Charge Compression Ignition) 燃焼とも呼ばれる。その問題点として、現象自体に不明な点が多く、着火時期とその後の燃焼の制御が困難なこと、高負荷では燃焼が極めて急激になり運転が不可能であるといった点が挙げられ、本格的な実用化に至っていないのが実情である。

このような背景のもと、本研究では乗用車用途を想定したディーゼルエンジンを対象とし、本来の高い熱効率を維持しつつ大幅な排気浄化を実現すべく、PCCI 燃焼の実現とその能動的な制御のための具体的な手法の構築を目指した。また、 $\text{NO}_x$  と PM の生成メカニズムについて、エンジン筒内の諸現象に着目して実験と数値計算の両面から解析し、両成分の同時低減を実現するための技術指針を提示することを本研究の目的とした。本論文は以下の 6 章で構成される。

第 1 章では、研究の背景と従来の研究ならびにその課題を説明し、本研究の位置づけと目的を示し、さらに論文全体の概要を述べた。従来のディーゼル機関では、排気再循環 (EGR) により大幅な  $\text{NO}_x$  の低減が可能となる反面、PM が増加するトレードオフ関係を有する。したがって、EGR 条件下における PM の低減法を見出すことが、両者の同時低減に向けた重要な技術的課題となる。このことをふまえ、本研究で提示するディーゼル燃焼の新たなコンセプトについて説明した。

第 2 章では、本研究において使用する供試機関の諸元と実験装置を示し、構築したエンジンベンチ試験の手法について述べた。供試機関は、乗用車に搭載される排気量の直接噴射ディーゼルエンジンを想定したものであり、油圧駆動の可変バルブタイミング機構をはじめ、各種の運転因子制御技術を備えている。

つぎに、実験と数値解析の対象とする運転条件の選定について検討し、本研究で実施する 3 次元熱流体シミュレーションの方法について述べた。本論文では、数値流体計算コード KIVA3V Release2 における燃料噴霧や燃焼に関するサブモデルを改良してこれに組み込んだ。それらの概要について説明した上で、各種サブモデルについては実験結果との比較を通じてその妥当性を検証した。

第 3 章では、第 1 章において提案したディーゼル燃焼コンセプトを実験に適用した際の結果を示した。本研究においてディーゼルエンジンに導入した可変バルブタイミング機構を用いて、圧縮行程中の吸気バルブの閉弁時期を任意に変更することで、有効圧縮比の可変制御が可能となる。これにより圧縮端のガス温度を低温化することができるため、予混合気の着火遅れを長期化する制御が実現することを実証し、着火時期の能動的な制御手法としての有用性を示した。このような制御による着火遅れの長期化に伴い、燃料と空気の予混合化が大幅に促進することが示唆された。

従来研究の範囲では、多量 EGR による NO<sub>x</sub> の低減は PM の増加を伴うことが避けられなかったが、これに有効圧縮比の低下を組み合わせた燃焼を行うことにより、NO<sub>x</sub> と PM の大幅な同時低減が可能となることを実験的に明らかにした。このとき成立した予混合型のディーゼル燃焼では膨張比は変化させておらず、膨張仕事を確保しながら圧縮仕事の低減が可能な Miller サイクルを形成していることから、ここでは Miller-PCCI 燃焼と呼ぶこととした。

また、エンジン回転数と有効圧縮比を変化させ広範な運転領域に対して試験を行い、回転数に対する Miller-PCCI 燃焼のロバスト性を評価するとともに排出ガスの低減効果について調査した。いずれのエンジン回転数においても、有効圧縮比の低下と高 EGR 制御の組み合わせは、NO<sub>x</sub> と PM の低減につながることを明らかにした。さらに、このような Miller-PCCI 燃焼では、排出ガス流量の減少、排気温度の上昇に寄与するなど排気後処理の触媒活性を向上させる効果も得られることを見出した。

第 4 章では、第 3 章で実証した Miller-PCCI 燃焼条件において NO<sub>x</sub> と PM が大幅に低減したメカニズムを解明するため、3 次元の数値流体シミュレーションを実施した結果について述べた。その中で、特にディーゼルエンジンにおいて NO<sub>x</sub> と PM を低減するために求められる混合気形成と燃焼温度について考察した。その結果、燃料噴射期間中に着火が起こる従来燃焼の条件では、着火直前において局所的に高い当量比域を有する不均一な予混合気が形成されるのに対して、長い着火遅れ（予混合気形成時間）を有する Miller-PCI 燃焼条件では、着火前までにより希薄で均一な予混合気が燃焼室内に形成されていることを確認した。また、従来の燃焼条件では、燃焼室内で局所的に燃焼温度の高い領域が存在するのに対し、Miller-PCCI 燃焼条件では、燃焼室内のほぼ全域から熱発生が起きており、局所的な高温領域は存在しないことが示された。したがって、Miller-PCCI 燃焼は、

PM の生成につながる局所的な燃料過濃領域ばかりでなく、NO<sub>x</sub> の生成につながる局所的な高温領域をも回避することが可能となり、このことが NO<sub>x</sub> と PM の大幅な同時低減が実現した理由であることを明らかにした。以上の結果から、ディーゼルエンジンにおいて NO<sub>x</sub> と PM を低減するための混合気形成、燃焼温度の制御に関する具体的な燃焼制御の方向性を見出すことができた。

第 5 章では、エンジン負荷率が増大する条件においては PCCI 燃焼の実現が極めて困難になることを明確にしたうえで、そのような条件で PCCI 燃焼を成立させるための検討を実験と計算の両面から行った。その結果、高負荷域では、燃料噴射時期の遅延によって膨張行程中の筒内温度低下を利用した Miller-PCCI 燃焼を適用することで、NO<sub>x</sub> の大幅な低減につながる EGR 条件下での PM の抑制効果が得られ、同時に燃焼騒音の低減効果も有することを明らかにした。ここでも燃料と空気の予混合化の促進により、燃焼期間中の混合気に局所的に含まれる高当量比・高温域が回避され PM が低減したものと推察された。

これをもとに、実際の走行時に使用頻度の高いエンジン回転数、負荷率条件それぞれにおいて、Miller-PCCI 燃焼を適用した際の排出ガスの改善率を明らかにした。その結果、ある負荷率以上の領域では、通常の燃焼では EGR に伴って増加する PM は燃料の高圧噴射を行っても抑制することができないのに対して、Miller-PCCI 燃焼の適用によって PM が大幅に低減する効果が顕著に現れることを確認した。すなわち、本燃焼法は、PM が増加するため従来は適用されなかった高 EGR 率条件下での PM の低減法を新たに提示するものである。このように、本論文で提案した Miller-PCCI 燃焼は、幅広いエンジン回転数、負荷率において大幅にディーゼルエンジンの排出ガスを低減しうる特徴があることを明確にした。

以上により、自動車用のディーゼルエンジンにおいて使用頻度の高い IMEP: 1.3 MPa までの広い運転条件に対して、Miller-PCCI 燃焼の適用が可能であることを実証し、NO<sub>x</sub> と PM の抜本的な低減につながるクリーンディーゼル燃焼制御の方向性を明らかにした。

第 6 章では、本研究で得られた成果を総括した。今後は、本研究で確立した数値モデルや実験手法を改良、発展させるとともに、燃費の改善につながる燃焼制御の方向性を明確にする研究も求められる。また、本燃焼方式をエンジンの車両の走行状態に対応した過渡運転条件に適用した際の効果を検証し、さらには排気後処理システムも含めた包括的な最適制御に関わる検討へと拡大する必要がある。このような多角的かつシステム的な研究を展開することにより、エネルギー効率や環境特性に優れたディーゼル車の開発、実用化を可能にし、運輸分野の環境・エネルギーに関わる社会の要請に応え得るとした。

# 研 究 業 績

村田 豊 (1/3 ページ)

種 類 別	題名, 発表・発行掲載誌名, 発表・発行年月, 連名者 (本人含む)
○論文	Miller-PCCI Combustion in an HSDI Diesel Engine with VVT, SAE World Congress 2008, Diesel Particulate and NOx Control, SAE 2008-01-0644, 2008 年 4 月, <b>Yutaka Murata</b> , Jin Kusaka, Yasuhiro Daisho, Daisuke Kawano, Hisakazu Suzuki, Hajime Ishii, Yuichi Goto
○論文	Emissions Suppression Mechanism of Premixed Diesel Combustion with VVT, International Journal of Engine Research, Vol.8, No.5, p.415-428, 2007 年 10 月, <b>Yutaka Murata</b> , Jin Kusaka, Matsuo Odaka, Yasuhiro Daisho, Daisuke Kawano, Hisakazu Suzuki, Hajime Ishii, Yuichi Goto
○論文	低圧縮比高膨張比によるディーゼル燃焼の排出ガス低減効果, 日本機械学会論文集, B 編, Vol.073, No.731, p.18-23, 2007 年 7 月, <b>村田 豊</b> , 草鹿 仁, 大聖泰弘, 川野大輔, 鈴木央一, 石井 素, 後藤雄一
○論文	可変バルブ機構による高負荷ディーゼル燃焼のエミッション低減に関する研究, 自動車技術会論文集(Transactions of JSAE), Vol.37, No.1, JSAE 20074134, p.157-162, 2007 年 1 月, <b>村田 豊</b> , 吉見泰広, 草鹿 仁, 大聖泰弘, 川野大輔, 鈴木央一, 石井 素, 後藤雄一, 小高松男
○論文	Potential of Emissions Reduction by Premixed Diesel Combustion with Variable Valve Timing, Review of Automotive Engineering, Vol.27, JSAE 20064446, p.379-386, 2006 年 7 月, <b>Yutaka Murata</b> , Jin Kusaka, Matsuo Odaka, Yasuhiro Daisho, Daisuke Kawano, Hisakazu Suzuki, Hajime Ishii, Yuichi Goto
○論文	Achievement of Medium Engine Speed and Load Premixed Diesel Combustion with Variable Valve Timing, SAE World Congress 2006, SP-2005, Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) Combustion 2006, SAE 2006-01-0203, p.99-109, 2006 年 4 月, <b>Yutaka Murata</b> , Jin Kusaka, Matsuo Odaka, Yasuhiro Daisho, Daisuke Kawano, Hisakazu Suzuki, Hajime Ishii, Yuichi Goto
○論文	可変バルブタイミングによる予混合ディーゼル燃焼の中速中負荷域への適用, 自動車技術会論文集(Transactions of JSAE), Vol.36, No.6, JSAE 20054866, p.73-78, 2005 年 11 月, <b>村田 豊</b> , 川野大輔, 草鹿 仁, 大聖泰弘, 鈴木央一, 石井 素, 後藤雄一, 小高松男
○論文	詳細な素反応過程を考慮した噴霧・燃焼の 3 次元モデリング, 自動車技術会論文集(Transactions of JSAE), Vol.36, No.2, JSAE 20054173, p.19-2, 2005 年 3 月, <b>村田 豊</b> , 草鹿 仁, 石井 素, 大聖泰弘
○論文	The 3-D Modeling Combined with Detailed Chemistry for Diesel Spray Combustion, Japan Society of Mechanical Engineers (JSME), JSME No.04-202, The Sixth International Symposium on Diagnostics and Modeling of Combustion in Internal Combustion Engines (COMODIA 2004), p.183-188, 2004 年 8 月, <b>Yutaka Murata</b> , Jin Kusaka, Hajime Ishii, Yasuhiro Daisho
論文	多段噴射による大型ディーゼルエンジンの排出ガス低減, 自動車技術会論文集, Vol.38, No.2, JSAE 20074207, p.161-166, 2007 年 3 月, 神谷憲太郎, 宮本祐輔, <b>村田 豊</b> , 菅野秀昭, 草鹿 仁, 大聖泰弘
論文	Ignition and Combustion Control of Diesel HCCI, SAE Fuels and Lubricants, SAE 2005-01-2132, 2005 年 5 月, Daisuke Kawano, Hisakazu Suzuki, Hajime Ishii, Yuichi Goto, <b>Yutaka Murata</b> , Jin Kusaka, Yasuhiro Daisho

# 研 究 業 績

村田 豊 (2/3 ページ)

種 類 別	題名, 発表・発行掲載誌名, 発表・発行年月, 連名者 (本人含む)
講演	可変弁機構によるディーゼル燃焼の制御と排出ガス低減, 自動車技術会シンポジウム「ディーゼルクリーン化を目指す最新後処理・燃焼技術」, No. 01-07, JSAE 20074078, p.32-39, 2007 年 1 月, 村田 豊, 草鹿 仁, 大聖泰弘
講演	低圧縮比高膨張比によるクリーンディーゼル燃焼, 第 19 回内燃機関シンポジウム(The 19 <sup>th</sup> International Combustion Engine Symposium)-世界をリードするエンジンシステム技術を求めて-, 講演論文集 No.06-251, p.111-116, 2007 年 1 月, 村田 豊, 草鹿 仁, 大聖泰弘, 川野大輔, 鈴木央一, 石井 素, 後藤雄一
講演	Miller-PCCI Combustion Concept for Lowering Diesel Emissions, FISITA 2006 World Automotive Congress, F2006P417, 2006 年 10 月, <b>Yutaka Murata</b> , Jin Kusaka, Matsuo Odaka, Yasuhiro Daisho, Daisuke Kawano, Hisakazu Suzuki, Hajime Ishii, Yuichi Goto
講演	中・高負荷域での低 NOx 無煙ディーゼル燃焼を実現する主要因子の解析, 自動車技術会ディーゼル機関部門委員会, 2006 年 6 月, 村田 豊, 草鹿 仁, 小高松男, 大聖泰弘, 川野大輔, 鈴木央一, 石井 素, 後藤雄一
講演	可変バルブ機構による高負荷ディーゼル燃焼のエミッション低減に関する研究, 2006 年度自動車技術会春季大会, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.75-06, JSAE 20065010, p.21-26, 2006 年 5 月, 村田 豊, 吉見泰広, 草鹿 仁, 小高松男, 大聖泰弘, 川野大輔, 鈴木央一, 石井 素, 後藤雄一
講演	Achievement of Medium Engine Speed and Load Premixed Diesel Combustion with Variable Valve Timing, SAE World Congress 2006, SP-2005, Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) Combustion 2006, SAE 2006-01-0203, p.99-109, 2006 年 4 月, <b>Yutaka Murata</b> , Jin Kusaka, Matsuo Odaka, Yasuhiro Daisho, Daisuke Kawano, Hisakazu Suzuki, Hajime Ishii, Yuichi Goto
講演	Numerical Analysis of Premixed Diesel Combustion with Variable Valve Timing, 18th Internal Combustion Engine Symposium (International), 20056087, 2005 年 12 月, <b>Yutaka Murata</b> , Daisuke Kawano, Jin Kusaka, Yasuhiro Daisho, Hisakazu Suzuki, Hajime Ishii, Yuichi Goto, Matsuo Odaka
講演	可変バルブタイミング機構を用いた予混合燃焼化によるディーゼル排気改善の可能性, 日本機械学会, RC220 ディーゼル機関における均一および不均一現象を制御する燃焼物理と燃料化学に関する研究分科会, 2005 年 11 月, 村田 豊, 川野大輔, 草鹿 仁, 大聖泰弘, 鈴木央一, 石井 素, 後藤雄一, 小高松男
講演	可変バルブ機構による予混合ディーゼル燃焼の排出物特性 -NOx と黒煙の同時低減につながる燃焼条件の検討-, 2005 年度自動車技術会秋季大会, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.91-05, JSAE 20055890, p.11-16, 2005 年 9 月, 村田 豊, 川野大輔, 澤本重朝, 草鹿 仁, 大聖泰弘, 鈴木央一, 石井 素, 後藤雄一, 小高松男
講演	可変バルブタイミングによる予混合ディーゼル燃焼の着火時期制御, 日本機械学会 2005 年度 年次大会 講演論文集, No.05-1, Vol.3, p.55-56, 2005 年 9 月 (同 10 月 <b>日本機械学会ベストプレゼンテーション表彰 受賞</b> ), 村田 豊, 川野大輔, 草鹿 仁, 大聖泰弘, 鈴木央一, 石井 素, 後藤雄一, 小高松男

# 研 究 業 績

村田 豊 (3/3 ページ)

種 類 別	題名, 発表・発行掲載誌名, 発表・発行年月, 連名者 (本人含む)
講演	可変バルブタイミングによる予混合ディーゼル燃焼の中速中負荷域への適用, 2005 年度自動車技術会春季大会, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.46-05, JSAE 20055167, p.17-22, 2005 年 5 月, <b>村田 豊</b> , 川野大輔, 草鹿 仁, 大聖泰弘, 鈴木央一, 石井 素, 後藤雄一, 小高松男
講演	The 3-D Modeling Combined with Detailed Chemistry for Diesel Spray Combustion, Japan Society of Mechanical Engineers (JSME), JSME No.04-202, The Sixth International Symposium on Diagnostics and Modeling of Combustion in Internal Combustion Engines (COMODIA 2004), p.183-188, 2004 年 8 月, <b>Yutaka Murata</b> , Jin Kusaka, Hajime Ishii, Yasuhiro Daisho
講演	詳細な素反応過程を考慮した噴霧・燃焼の 3 次元モデリング, 2004 年度自動車技術会春季大会, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.48-04, JSAE 20045274, p.1-6, 2004 年 5 月, <b>村田 豊</b> , 草鹿 仁, 石井 素, 大聖泰弘
共著講演	多気筒ディーゼル機関における各種 EGR 方式の適用性(第 1 報)ーHPL-EGR と LPL-EGR の効果比較ー, 2007 年度自動車技術会秋季大会, 自動車技術会学術講演会前刷集, JSAE 20075625, 2007 年 10 月, 金子淳司, 小宮 怜, 足立悠介, <b>村田 豊</b> , 草鹿 仁, 大聖泰弘, 川野大輔, 鈴木央一, 石井 素, 後藤雄一
共著講演	多気筒ディーゼル機関における各種 EGR 方式の適用性(第 2 報)ーGTL 燃料使用時の排出ガス特性等への影響ー, 2007 年度自動車技術会秋季大会, 自動車技術会学術講演会前刷集, JSAE 20075923, 2007 年 10 月, 石井 素, 川野大輔, 鈴木央一, 後藤雄一, 金子淳司, 小宮 怜, 足立悠介, <b>村田 豊</b> , 草鹿 仁, 大聖泰弘
共著講演	多段噴射による大型ディーゼルエンジンの排出ガス低減, 2006 年度自動車技術会秋季大会, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.88-06, JSAE 20065616, p.11-16, 2006 年 9 月, 神谷憲太郎, 宮本祐輔, <b>村田 豊</b> , 菅野秀昭, 草鹿 仁, 大聖泰弘
共著講演	Ignition and Combustion Control of Diesel HCCI, SAE Fuels and Lubricants, SAE 2005-01-2132, 2005 年 5 月, Daisuke Kawano, Hisakazu Suzuki, Hajime Ishii, Yuichi Goto, <b>Yutaka Murata</b> , Jin Kusaka, Yasuhiro Daisho
共著講演	多成分系燃料のディーゼル噴霧特性に関する数値シミュレーション, 2004 年度自動車技術会秋季大会, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.98-04, JSAE 20045774, p.11-14, 吉見泰広, <b>村田 豊</b> , 長島巨樹, 桑原史雄, 菅野秀昭, 大聖泰弘, 草鹿 仁
その他(雑誌)	SAE 2007 World Congress の報告, Engine Technology, Vol.09 No.03, p.78-86, 2007 年 6 月, 石山拓二, 奇成サブ, 堀部直人, <b>村田 豊</b> , 堀井愛士, 伊東輝行, 大須賀 稔, 川那辺 洋
その他(雑誌)	SAE 2006 World Congress の報告, Engine Technology, Vol.08 No.03, p.88-94, 2006 年 6 月, 川野大輔, 北村泰隆, 堀井愛士, 堀田 勇, <b>村田 豊</b> , 川那辺 洋
	以上