

# 博士論文概要

## 論文題目

HCCI 燃焼における炭化水素の  
自己着火特性に関する研究  
The Effect of Fuel Properties on HCCI  
Engine Combustion Characteristics and  
Performance

申請者

氏名

柴田	元
Shibata	Gen

専攻・研究指導  
(課程内のみ)

--

エンジンにおける予混合圧縮自己着火（Homogeneous charge compression ignition, HCCI と略す）燃焼とは燃料を吸気中に噴射して均質混合気を作り、ピストンの圧縮により自己着火をさせる方式である。このような形態をとる燃焼はガソリンエンジンの燃費改善と NO<sub>x</sub> 低減を両立しうる可能性があることから、次世代の燃焼方式として現在最も注目されている方式である。

しかしながら、HCCI 燃焼は、エンジンの運転因子や制御因子によって変化する温度、圧力、当量比に加えて燃料組成自体の影響を強く受けることが知られているものの、これらを包括的に調べた研究例は乏しい。また、セタン価やオクタン価といった従来の燃料指標で HCCI 特性を表すことは難しく、さらに、各種炭化水素の反応速度データの不足から、その着火と燃焼を支配する分解や酸化反応を数値計算により予測することはできないのが現状である。

そこで本論文では、燃料設計の観点から、エンジン運転因子とともに燃料組成に注目し、これらが HCCI 燃焼（自己着火特性）に与える影響について実験的に詳細に調べるとともに、その結果から着火特性を的確に表すことができる新たな指標を案出した。

第 1 章では、自動車メーカー、大学、研究機関等が HCCI エンジンの燃焼研究に取り組んできたこれまでの成果や知見について詳細に調査した。とりわけ、HCCI エンジンを実現するためには、エンジン側の設計・運転因子に関する研究だけでは不十分であり、燃料を構成する組成レベルで調べ、各種の炭化水素成分が HCCI 燃焼に対してどのように影響を及ぼし合っているかを詳細に調べ、その特性を表す指標を見出すことがきわめて重要であることを指摘して、本研究の目的を明確にした。

第 2 章では、ガソリンエンジンを改造した直列 4 気筒 HCCI エンジンを用い、HCCI 燃焼を起こす支配的な要因について実験的に詳しく調査した。その結果、HCCI 燃焼では 750K～850K 付近で低温酸化反応が起こり、続いて 900K～1050K 付近で高温酸化反応が起こることを確認した。これらの反応は相互に影響し合い、低温酸化反応の大きさや起こるタイミングにより高温酸化反応の立ち上がるタイミングが決まり、その結果エンジン性能が変化することを見出した。具体的には低温酸化反応の発現のタイミングが遅く低温酸化発熱量の小さい燃料ほど高温酸化反応は遅く立ち上がり、低温酸化反応の発現が早く低温酸化発熱量の大きい燃料ほど高温酸化反応は早く立ち上がる傾向を見出した。前者のような燃料では失火しやすい特性をもち、後者のような燃料ではノッキングしやすい特性をもつことを確認した。また、例え同一のオクタン価であっても燃料の組成が異なると HCCI 燃焼条件によって低温酸化反応の大きさは異なり、その結果異なるエンジン性能を示すことを明確にした。

第 3 章では、11 種類の炭化水素を混合して作製した 23 種類のモデル燃料を用いてエンジン試験を行い、それらの低温酸化反応性と炭化水素の構造の関係を詳

細に調べた。一般にノルマルパラフィン系の炭化水素が最も大きな低温酸化反応性を示し、直鎖の長さが長いほど低温酸化反応は大きくなる傾向があり、これに続く炭化水素類はイソパラフィン、オレフィン、ナフテン、アロマの順となる。実験結果から、オレフィン、ナフテン、アロマの中には混合相手のもつ低温酸化反応性を弱める効果である「インヒビター作用」を呈するものがあることを見出した。インヒビター作用の発現メカニズムには2種類あり、一つは燃料分子中の脱水素反応を起こす水素が反応活性種であるOHラジカルを捕捉し、低温酸化反応を弱めることによる作用である。もう一つは、反応中に生成される反応中間体のラジカルやオレフィンが安定化して活性化しないことに起因する作用である。このような特性により、ガソリンや軽油のような炭化水素混合物では、燃料を構成するそれぞれの炭化水素の低温酸化反応やインヒビター作用が複雑に絡み合っ

て燃焼していることを明らかにした。

第4章では吸気加熱が低温酸化反応性に及ぼす影響について調べた。吸気を加熱すると空気の密度が低下し予混合気の熱容量が小さくなるため、同じエンジン回転数でも低温酸化反応を起こす温度領域を通過する時間が短くなり、燃料の低温酸化反応の影響を小さくすることができると考えられる。そこで、ここではエンジンの吸気マニホールド内にヒーターを内蔵させ、50℃(IMEP530kPa)、80℃(IMEP420kPa)、100℃(IMEP380kPa)、150℃(IMEP270kPa)、180℃(IMEP240kPa)の5つの吸気温度条件をとり、吸気温度により低温酸化反応がどのように変化するかを23種類のモデル燃料を用いて調べた。その結果、吸気温度50℃の条件ではパラフィン系炭化水素は大きな低温酸化反応性を、それ以外の炭化水素は大きなインヒビター作用を呈することを確認した。また、吸気温度を上げるに従い、これらの特性は各々小さくなり、高温酸化反応の発熱の燃料間差は小さくなることを確認した。

さらに、吸気加熱実験における燃焼圧力の測定データより低温酸化反応と高温酸化反応の各開始のタイミングにおける筒内平均温度と圧力の関係を求めた。その結果、低温酸化反応が開始する温度圧力条件は炭化水素の種類によって異なるが、高温酸化反応は低温酸化反応で蓄積された $H_2O_2$ がOHラジカルに分解して開始することから $H_2O_2$ 分解依存となり、着火時の温度圧力間の相関が高くなることがわかった。つまりここで得られた高温酸化反応が開始する温度圧力線(SUモデルと呼ぶ)は $H_2O_2$ がOHラジカルに分解する条件であると推論した。

第5章では、第4章のデータより燃料を構成する炭化水素の着火性とガソリンのノッキングの指標であるオクタン価のもつ意味について詳細に調べた。HCCIエンジン燃焼とノッキングは「自己着火現象」という意味では同じ範疇に入り、濃い空燃比条件で短時間に起こる着火がノッキングであり、空燃比を高めてゆっくりと着火させたものがHCCI燃焼である。そこで第4章の各吸気加熱5条件におけるHCCIエンジンの燃焼データから炭化水素のオクタン価の計算を試み、燃

料を構成する炭化水素の着火性について詳細に調べた。その結果、いかなる条件においてもパラフィン系炭化水素は低温酸化反応のみを、アロマ系炭化水素はインヒビター作用のみを示すことがわかった。一方、オレフィンとナフテンは低温酸化反応とインヒビター作用の2つのパスをもっており、着火する際の雰囲気条件により低温酸化反応またはインヒビター作用の強い方の特性が出現することを確認した。

つぎに、各炭化水素のリサーチ法オクタン価（RON）およびモーター法オクタン価（MON）を Kalghatgi が提唱しているオクタンインデックスを用いて各吸気温度条件で計算より得られたオクタン価と照合した。その結果、本吸気加熱試験条件の中に RON と MON の着火条件を見出すことができ、熱発生率のデータより低温酸化反応発熱を伴う高温酸化反応性を油種間で比較しているものが RON であり、低温酸化反応発熱が存在しない系で高温酸化反応性を油種間で比較しているものが MON であるとの結論にいたった。

第6章においては、燃料の HCCI 指標を新たに提案した。ここまでの知見を総合すると、燃料の着火を決めている因子は低温酸化反応の①ポテンシャル（正の発熱量）と②タイミング、インヒビター作用の③ポテンシャル（負の発熱量）と④タイミング、並びに⑤低温酸化反応に依存しない高温酸化反応の特性の5つである。①～④に関しては、燃料の組成（ノルマルパラフィン、イソパラフィン、オレフィン、ナフテン、アロマの5つの炭化水素類から選ばれた4つの炭化水素類）で置き換えることによりそれぞれ独立した因子として表現することができる。また⑤に関しては MON で置き換えることができる。そこで、MON と4種類の炭化水素類から計算される燃料の HCCI 指標を作成した。その結果、計算より求められた燃料の HCCI 指標は従来の RON や MON、オクタンインデックスよりも HCCI エンジン性能との相関が高く、得られた各炭化水素の係数に低温酸化反応性とインヒビター作用が反映されていることを確認した。

このように、オクタン価（RON 及び MON）、セタン価といった現在広く使われている着火性指標は燃料の炭化水素の着火性をノッキングという一面から見たものに過ぎず、様々な温度、圧力、当量比の条件における HCCI 特性の評価には、ここで得られた燃料の HCCI 指標を用いるのが適当であるとの結論を得た。

さらに、本研究に関する残された課題とその解決の見通しについて述べるとともに、本研究の成果が果たす今後の HCCI エンジンの研究開発に対する寄与について展望した。

# 研 究 業 績

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、	発表・発行年月、	連名者（申請者含む）
○論文	The Interaction between Fuel Chemicals and HCCI Combustion Characteristics under Heated Intake Air Conditions	SAE Technical Paper 2006-01-0207 2006年4月	Gen Shibata(Author) Tomonori Urushihara
○論文	燃料の組成が HCCI エンジンの燃焼特性に与える影響（第二報）	自動車技術会 論文集 2006年3月	柴田 元（主著者） 漆原友則
○論文	Correlation of Low Temperature Heat Release with Fuel Composition and HCCI Engine Combustion	SAE Technical Paper 2005-01-0138 2005年4月	Gen Shibata(Author) Koji Oyama Tomonori Urushihara Tsuyoshi Nakano
○論文	The Effect of Fuel Components on HCCI Combustion Characteristics	Review of Automotive Engineering 2005年10月	Gen Shibata(Author) Koji Oyama Tomonori Urushihara Tsuyoshi Nakano
○論文	燃料の組成が HCCI エンジンの燃焼特性に与える影響	自動車技術会 論文集 2005年5月	柴田 元（主著者） 尾山 宏次 漆原 友則 仲野 剛
○論文	The Effect of Fuel Properties on Low and High Temperature Heat Release and Resulting Performance of an HCCI Engine	SAE Technical Paper 2004-01-0553 2004年3月	Gen Shibata(Author) Koji Oyama Tomonori Urushihara Tsuyoshi Nakano
論文	The Effect of Oxygenate-and Gasoline-Diesel Fuel blends on Diesel Engine Emissions	SAE Technical Paper 2000-01-1173	Chol-Bum Kweon David E. Foster Gen Shibata
論文	The Development of Drive-Ability Index and the Effects of Gasoline Volatility on Engine Performance	SAE Technical Paper 952521 1995年10月	Gen Shibata(Author) Keisuke Oda Kyouji Hosono
論文	Effect of Gasoline Composition on Engine Performance	SAE Technical Paper 930375 1993年2月	Keisuke Oda Hatsuo Nagaishi Gen Shibata
論文	Effect of Intake Valve Deposits and Gasoline Composition on SI Engine Performance	SAE Technical Paper 922263 1992年10月	Gen Shibata(Author) Hatsuo Nagaishi Keisuke Oda

# 研 究 業 績

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、	発表・発行年月、	連名者（申請者含む）
講演	The Auto-Ignition Characteristics of Hydrocarbons and the Development of New HCCI Fuel Index	SAE HCCI Symposium (San Ramon) 2006年9月	Gen Shibata
講演	RON や MON で計測される着火性とはどのようなものか？	化学システム工学セミナー 東京大学 2006年6月	柴田 元
講演	炭化水素の自己着火特性と燃料の HCCI インデックスの考え方	自動車技術会 春期学術講演会 2006年5月	柴田 元（発表者） 漆原友則
講演	The Interaction between Fuel Chemicals and HCCI Combustion Characteristics under Heated Intake Air Conditions	SAE World Congress (Detroit) 2006年4月	Gen Shibata(Author) Tomonori Urushihara
講演	燃料の組成が予混合圧縮自己着火エンジンの燃焼特性に与える影響	日本技術士会 2006年1月	柴田 元
講演	炭化水素の低温酸化反応特性と高温酸化反応の着火条件について	化学システム工学セミナー 東京大学 2005年12月	柴田 元
講演	ガソリン型予混合圧縮自己着火燃焼に求められる燃料特性	石油学会 石油石油化学討論会 2005年10月	柴田 元（発表者） 漆原 友則
講演	燃料の組成が HCCI エンジンの燃焼特性に与える影響（第二報）	自動車技術会 秋季学術講演会 2005年9月	柴田 元（発表者） 尾山 宏次 漆原 友則 仲野 剛
講演	Correlation of Low Temperature Heat Release with Fuel Composition and HCCI Engine Combustion  (同タイトルにて、日本機械学会北海道支部シンポジウムでも講演 2005年7月 北大小川教授) (同タイトルにて、MIT Sloan Automotive Laboratory でも講演 2005年4月 Prof. Cheng)	SAE World Congress (Detroit) 2005年4月	Gen Shibata(Author) Koji Oyama Tomonori Urushihara Tsuyoshi Nakano

# 研 究 業 績

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、	発表・発行年月、	連名者 (申請者含む)
講演	燃料の組成が HCCI エンジンの 燃焼特性に与える影響	自動車技術会 秋季学術講演会 2004 年 9 月	柴田 元 (発表者) 尾山 宏次 漆原 友則 仲野 剛
講演	The Effect of Fuel Properties on HCCI Engine Combustion Characteristics and Performance	IFP International Conference (Paris) 2004 年 10 月	Gen Shibata(Author) Koji Oyama Tomonori Urushihara Tsuyoshi Nakano
講演	The Effect of Fuel Properties on Low and High Temperature Heat Release and Resulting Performance of an HCCI Engine <small>(同タイトルにて、同志社大学工学部 International Seminar on Engine Sysytem Combustion Process でも講演 2004 年 5 月 同志社大学 千田教授)</small>	SAE World Congress (Detroit) 2004 年 3 月	Gen Shibata(Author) Koji Oyama Tomonori Urushihara Tsuyoshi Nakano
講演	ガソリンの揮発性が内燃機関の 運転性に及ぼす影響	石油学会 石油 製品討論会 1991 年	柴田 元
総説	燃料からみた予混合圧縮自己着火 (HCCI) 燃焼研究	石油学会誌 ペトロテック 2005 年 8 月号	柴田 元
総説	フォーミュラワンガソリンの 一般特性	自動車技術会 エンジンテクノロジー 第 19 号	柴田 元
表彰	優秀講演発表賞	自動車技術会 2005 年 5 月	柴田 元
表彰	論文賞	自動車技術会 2006 年 5 月	柴田 元 (著者) 尾山 宏次 漆原 友則 仲野 剛