

論文・解説

25 ガソリンHCCI機関における燃料特性と自己着火に関する解析 Analysis of the Relationship between Fuel Characteristics and Auto-Ignition in Gasoline HCCI Engines

養 祖 隆^{*1} 山 川 正 尚^{*2} 廣 瀬 敏 之^{*3}
Takashi Youso Masahisa Yamakawa Toshiyuki Hirose
田 中 重 行^{*4} 草 鹿 仁^{*5}
Shigeyuki Tanaka Jin Kusaka

要 約

ガソリンHCCI機関の実用化に向けては、予混合圧縮自己着火（HCCI）燃焼と火花点火（SI）燃焼に対する燃料の影響を把握しておくことが重要である。本研究では比較的圧縮比の高いガソリン機関において、吸気加熱方式によるHCCI燃焼とSI燃焼のノッキングという二つの自己着火に対する燃料のオクタン価の影響を、パラフィン系により構成されたモデル燃料を用いて実験と数値計算により解析した。その結果、HCCI燃焼においては、燃料の高温側の着火特性が支配的であり、吸入空気温度が上昇するに従いオクタン価による着火時期の差異は小さくなる。また、SI燃焼においては、燃料の低温側の着火特性が支配的である。このため高圧縮比のSI燃焼であっても、ノッキング特性がリサーチ法オクタン価（RON）との相関があるという結果になった。この際、上死点（TDC）付近での熱発生による特有の現象が見られたため、その現象についても解析を行った。

Summary

For the commercial production of gasoline HCCI engines, it is important to understand the effect of fuel characteristics on HCCI combustion and SI combustion. In this study, using model fuels composed of paraffins, we analyze the effect of octane number on two Auto-Ignition phenomena : 1) HCCI combustion with intake air heating and 2) knocking in SI combustion, through experimental and numerical approaches in a high compression ratio engine. As a result of the analysis, it is clarified that in HCCI combustion, the fuel characteristics in high-temperature region are dominant to the combustion timing. The higher the intake air temperature becomes, the smaller the difference in combustion timing by octane number becomes. In SI combustion, on the other hand, the fuel characteristics in low-temperature region are dominant to the knocking limit. Therefore, with even a high compression ratio, the knocking limit shows a correlation with RON. In the course of this analysis, a characteristic phenomenon was observed in the heat release around TDC, thus this phenomenon has also been analyzed.

1. はじめに

ガソリン機関の高効率・低公害化のために高圧縮比を備えたHCCI燃焼の実用化が期待されている。この機関では現在のところHCCI燃焼のみで全ての負荷を運転することは困難なため、高負荷時はHCCI燃焼からSI燃焼に切り替える必要がある⁽¹⁾。そのため、実用化に向けては燃料性状

がHCCI燃焼時の着火性や高圧縮比SI燃焼時のノッキングといった自己着火に及ぼす影響を把握して制御可能な技術を開発していかなければならない。これまでも燃料とHCCI燃焼の関係に関する幾つかの研究⁽²⁾⁽³⁾が行われており、この中で自己着火に対する燃料成分間の相互作用が確認されている。そこで、本研究では燃料性状がガソリンHCCI機関に及ぼす影響を系統的に調べていくため、まず

*1, 2 パワートレイン技術開発部
Powertrain Technology Development Dept.
*5 早稲田大学
Waseda University

*3, 4 コスモ石油(株)
Cosmo Oil Co., Ltd.

Table 1 Engine Specifications and Operation Conditions

Engine Type	DOHC 4-valve
Bore X Stroke	87.5mm X 83.1mm
Compression Ratio	14.0
Combustion Chamber	Pent-roof
Fuel System	Direct Injection
Water Temp. / Oil Temp.	88°C / 90°C
Engine Speed	1500rpm

Table 2 Properties of Test Fuels

		70RON	80RON	90RON
RON		70.8	81.2	90.5
MON		73.3	83.3	89.7
Density 15°C (g/cm ³)		0.6903	0.6915	0.6923
Distillation (°C)	IBP	32.5	33.0	34.5
	10%	57.0	57.5	57.5
	50%	101.5	102.0	101.0
	90%	152.0	151.0	150.5
	EP	188.0	189.0	186.0
Reid Vapor Pressure (kPa)		60	59	60
Composition (vol%)	n-Paraffin	16.8	4.6	4.3
	iso-Paraffin	83.1	95.3	95.7
	Naphthene	0.1	0.1	0
	Olefin	0	0	0
	Aromatics	0	0	0
	Benzene	0	0	0
Net Calorific Value (J/g)		44392	44374	44354

は成分間の複雑な相互作用の影響をできるだけ排除し、更に、簡便に反応動力学計算が可能なパラフィン系成分のみで構成されたモデル燃料を用いて、HCCI燃焼とSI燃焼のノッキングという二つの自己着火に対する燃料のオクタン価の影響を実験と数値計算により解析することとした。

2. 解析方法および供試燃料

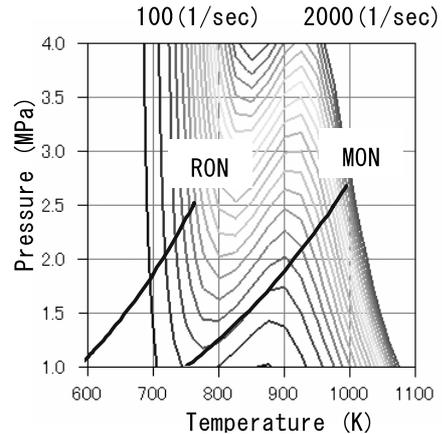
2.1 解析方法

本研究に用いた機関の仕様と運転状態をTable 1に示す。圧縮比14でHCCI燃焼実験、SI燃焼実験ともに無過給で運転した。HCCI燃焼実験においては現象を単純化するために外部吸気加熱装置を用いて吸入空気温度を上げて自己着火させ、そのときの吸入空気温度は吸気ポート内の熱電対により計測した。また、燃料の着火遅れ時間を求めるために、化学反応計算コードCHEMKIN⁽⁴⁾にイソオクタンとノルマルヘプタンの混合燃料 (PRF) での低温酸化反応および高温酸化反応を再現できる化学種38、反応数55のリデューススキーム⁽⁵⁾を化学反応スキームとして用いて計算した。筒内の温度・圧力履歴には、筒内圧センサにて計測した圧力と、その圧力より算出した温度を用いた。

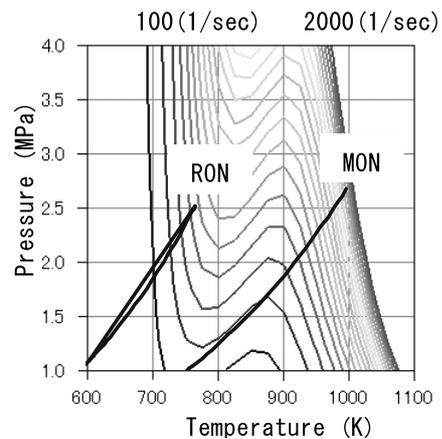
2.2 供試燃料

供試した燃料の性状および組成をTable 2に示す。供試機関の燃料供給は筒内直接噴射方式のため、燃料の気化の差によって混合気形成に差異を生じないようにするために供試燃料の蒸留特性を揃えた。また、成分間の相互作用の影響をできるだけ排除するためにイソパラフィン系とノルマルパラフィン系のみで構成し、RONを70, 80, 90に調

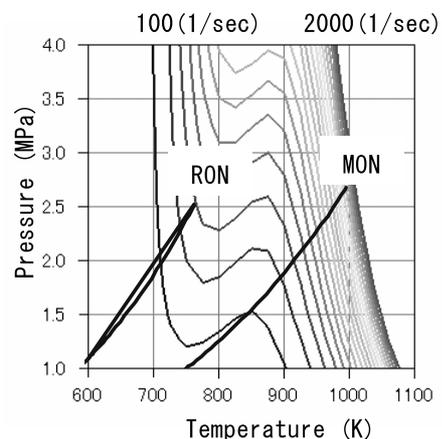
製した3種類の燃料を用いた。Fig.1にこれらの燃料とCFR (Cooperative Fuel Research) エンジンを用いて、石油学会規格JPI-5R-5-93リサーチ法およびモータ法オクタン価測定マニュアルに則った、RONおよびモータ法オクタン価 (MON) 試験時のエンドガス部の温度・圧力履歴を、質量燃焼割合90%時点まで示す。試験により吸入空気温度が異なるため、温度・圧力履歴はRON試験では低温側を、MON試験では高温側を辿る。また併せて、オクタン価の異なる燃料の着火特性の差異を明らかにするために各燃料



(a) Ignition Delay of 70RON



(b) Ignition Delay of 80RON



(c) Ignition Delay of 90RON

Fig.1 Ignition Delay at 1.0 and In-Cylinder History of CFR Engine

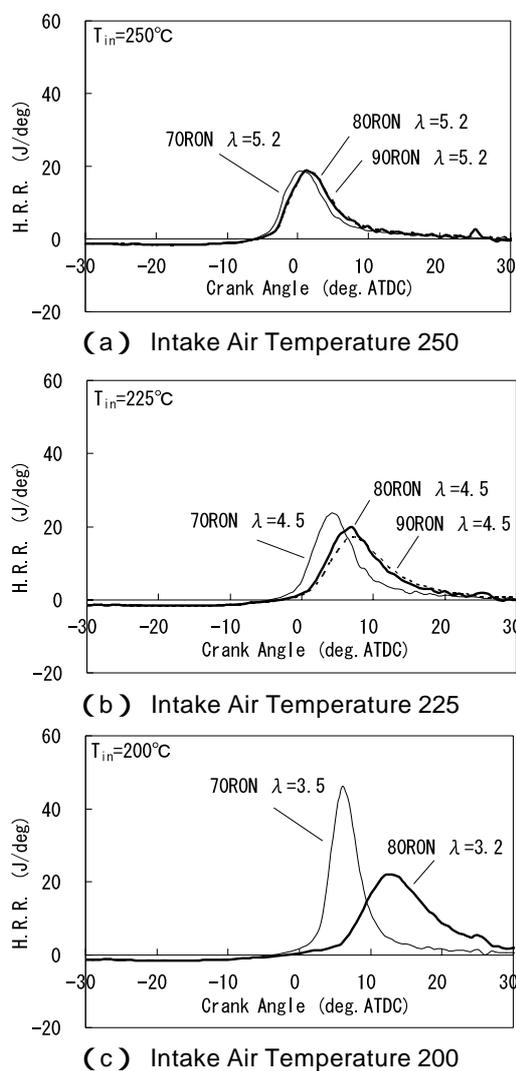


Fig.2 Comparison of Heat Release Rate at 1500rpm WOT

の着火遅れ時間を空気過剰率()が1.0の条件で計算し、着火遅れ時間の逆数を反応速度の代用特性として示す。RON計測条件では筒内状態が800K以下であり、燃料の低温酸化反応領域を辿っていることがわかる。一方、MON計測条件では筒内状態が800Kから900K程度の間が存在する負の温度依存領域から、900K程度以上の高温酸化反応領域を辿っていることがわかる。

3. 結果および考察

3.1 HCCI燃焼

吸気加熱方式HCCI燃焼におけるオクタン価の影響を解析するために吸気加熱装置を用いて吸入空気温度(T_{in})を250, 225, 200とし、スロットル開度全開(WOT)にて安定した状態で運転可能なを設定して運転した。

(1) 実験結果

Fig.2に各吸入空気温度の運転条件での熱発生率を示す。 T_{in} 250 では燃料による着火時期の差が小さいが、 T_{in} が低下するに伴いこの差は大きくなることがわかる。なお、 T_{in} 200 では90RON燃料はHCCI燃焼しなかった。

(2) 計算結果と考察

Fig.2の結果を考察するために、Fig.3にオクタン価の異なる燃料の着火遅れ時間を各吸入空気温度で運転可能なの代表としてが4.5の条件で計算した結果と、筒内平均場の温度・圧力履歴を質量燃焼割合5%のクランク角まで示す。 T_{in} 250 の条件では燃料による着火特性に差異のない高温領域を筒内状態が辿っている。一方、 T_{in} が225, 200と低下するに従って筒内状態も着火特性が燃料成分による影響を受ける低温領域に移る。このため T_{in} 200 の

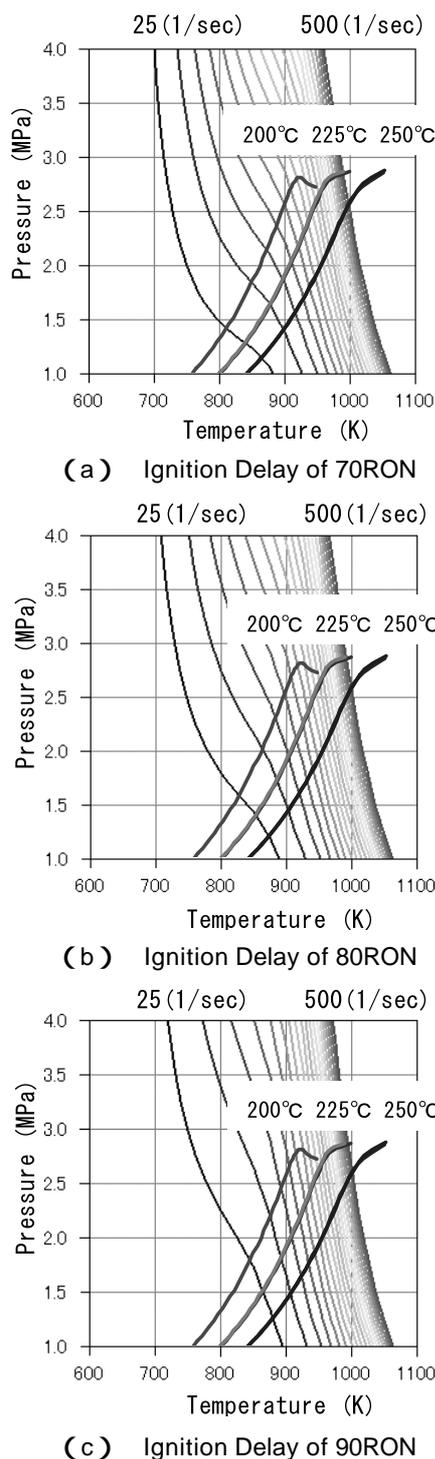


Fig.3 Ignition Delay at $\lambda=4.5$ and In-Cylinder History of HCCI Combustion

条件で燃料による着火特性が最も異なる結果となった。このように高温領域では燃料による着火特性の差が小さくなるため、HCCI燃焼での着火特性を指標化する際には、RONとMONへの依存割合とともに、RONとMONに対する着火時期の感度そのものが筒内温度により変化することを考慮する必要がある。

3.2 SI燃焼

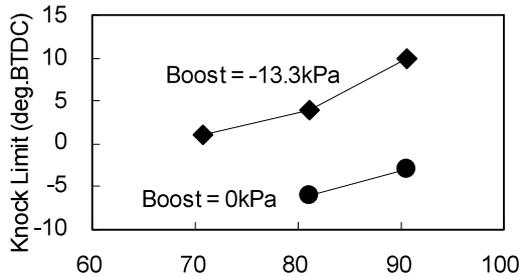
ガソリンHCCI機関で用いられる高圧縮比状態でのSI燃焼のノッキングに対する燃料の影響を解析するために、実験と数値計算を併せて行った。

(1) 実験結果

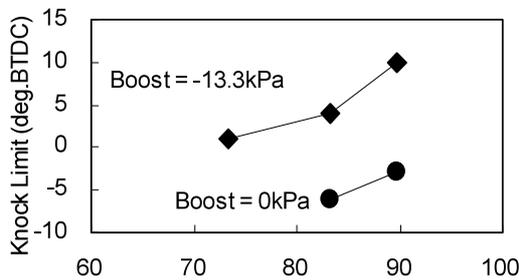
Fig.4に燃料のRONおよびMONとノッキング限界点火時期との関係を示す。全負荷では70RON燃料は点火時期前に自己着火するプリイグニッションを発生したので、スロットリングして70RON燃料のプリイグニッションが収まるまで負荷を下げた実験も行った。RON, MONともに、ノッキング限界点火時期との相関があった。

(2) 計算結果と考察

SI燃焼のノッキング限界点火時期と燃料特性の関係を考察するために、 ϕ が1.0の条件での着火遅れ時間の逆数をFig.5に示す。併せてエンドガス部の温度・圧力履歴を質量燃焼割合90%時点まで示した。高圧縮比でのSI燃焼ではノッキングを回避するためにTDC後に点火するため、TDCで筒内温度が最大となりエンドガス部の温度・圧力は低下しながらの燃焼となる。このためエンドガス部の温度・圧力履歴は燃焼期間中も圧縮行程とほぼ同じ領域を辿ることになり、その領域はFig.1に示したCFRエンジンでのRON計測時の温度・圧力履歴の領域(800K以下)に近

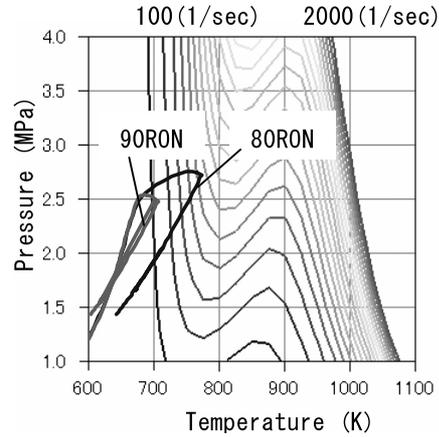


(a) RON

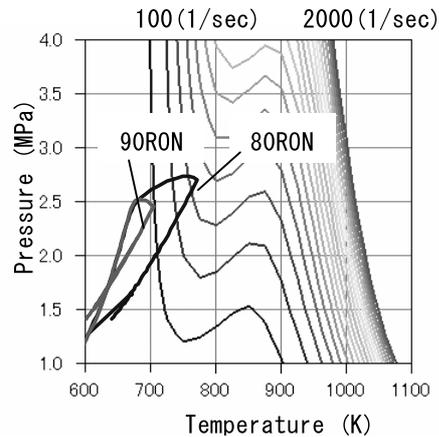


(b) MON

Fig.4 Comparison of Ignition Characteristics at 1500rpm



(a) Ignition Delay of 80RON



(b) Ignition Delay of 90RON

Fig.5 Ignition Delay at $\phi = 1.0$ and In-Cylinder History of SI Combustion

い。したがって、高圧縮比状態でのSI燃焼であっても、ノッキング特性とRONとの相関がある結果になったと考える。また、今回の供試燃料ではTable 2に示すようにRONとMONの差が比較的小さい。これはパラフィン系成分のみで構成されたモデル燃料であるため、各供試燃料のRONを決める燃料の低温側の着火特性とMONを決める燃料の高温側の着火特性の両方が、Fig.1に示すオクタン価の異なる燃料の着火特性と同様であるためと考えられる。よって、結果としてノッキング特性がMONとの相関がある結果となったと考える。

(3) 高圧縮比のSI燃焼形態

Fig.6に全負荷の点火時期8deg.ATDCでの熱発生率を示す。火花点火の前にTDC付近で熱発生が見られる。80RON燃料の方がTDC付近での熱発生量が多いが、その後の熱発生率の差異はほとんどない。このTDC付近での熱発生による圧力上昇のために、Fig.7のP-V線図に示すように等容度が改善した。Fig.6の熱発生率から求めた等容度改善率は3%であり、このときの図示平均有効圧の改善率3%を充足する。その結果、Fig.8に80RON燃料と90RON燃料での点火時期と図示平均有効圧の関係を示すように、ノッキング限界点火時期での比較では90RON燃

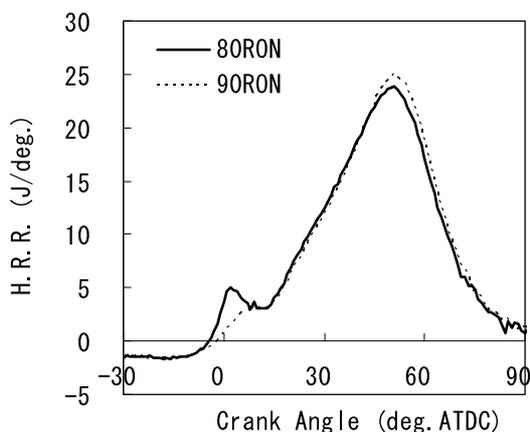


Fig.6 Comparison of H.R.R. at TDC (1500rpm WOT Ig.Timing 8deg.ATDC)

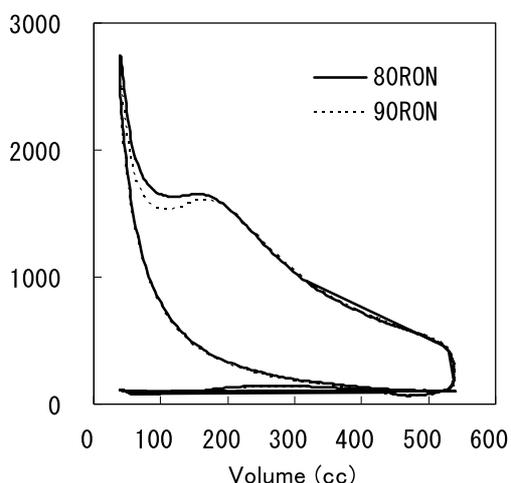


Fig.7 Comparison of Pressure-Volume Diagram (1500rpm WOT Ig.Timing 8deg.ATDC)

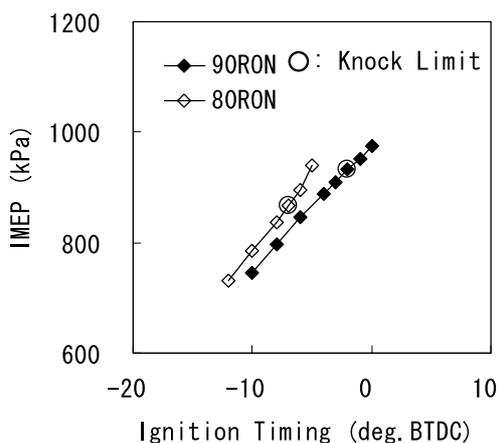


Fig.8 Characteristic of IMEP at 1500rpm WOT

料で高い負荷が得られたが、同一点火時期では80RON燃料で高い負荷が得られた。このように高圧縮比のSI燃焼時には通常の火炎伝播の前に熱発生が生じ、その直後に火炎伝播していく燃焼形態をとっている。そこで、数値計算を用いてこの燃焼形態を更に詳細に検討した。計算コードは数値熱流体コードKIVA-3V⁽⁶⁾にCHEMKIN-のサブルーチンを組み込んだ計算コードであり⁽⁷⁾、計算メッシュは供試

機関の燃焼室をモデル化したもので下死点において約2万3千セルである。化学反応計算のスキームには化学種109, 反応数591のChalmers Gasoline Surrogateスキームを用いた。燃料組成はPRFでオクタン価80とし、タンブル比0.5相当の初期流動で吸気弁閉時期から計算を行った。Fig.9に中間生成物の生成履歴を示す。実機点火時期の8deg.ATDCで初期燃料成分のイソオクタンとノルマルヘプタンの6割程度が分解し中間生成物が生成していることがわかる。この中間生成物が火炎伝播に及ぼす影響を明らかにするために、CHEMKIN-に上記のChalmers Gasoline Surrogateスキームを用いて1次元層流燃焼速度を計算した。中間生成物としては、低温酸化反応での代表的な生成物(CO, CH₂O, H₂O₂)と分解された炭化水素(C₂H₄, C₃H₆, iC₄H₈)のみを考慮し、Fig.9の実機点火時期8deg.ATDCでの存在割合とした。上記以外の成分は不活性成分であるアルゴンで置換した。計算条件、計算結果をFig.10に示す。中間生成物を付加した条件では層流燃焼速度が低下した。中間生成物では分子中の炭素結合数が低下しているため燃焼温度が低下し層流燃焼速度が低下したと考えられる。更に温度を上昇させた条件では未燃部温度の上昇により層流燃焼速度が改善した。この結果から、中間生成物による層流燃焼速度低下の影響と筒内温度上昇による層流燃焼速度向上の影響が相殺して火炎伝播速度に有意差がなくなると考えられる。このため、Fig.6からもわか

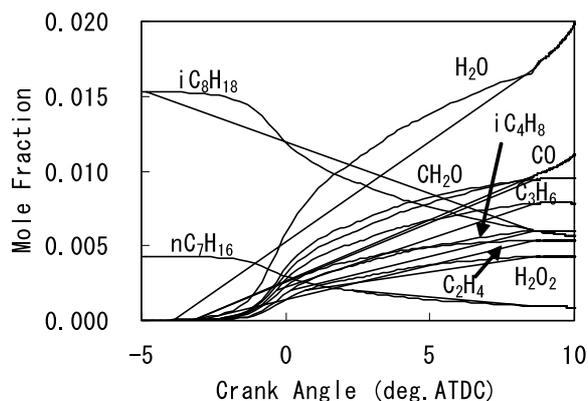
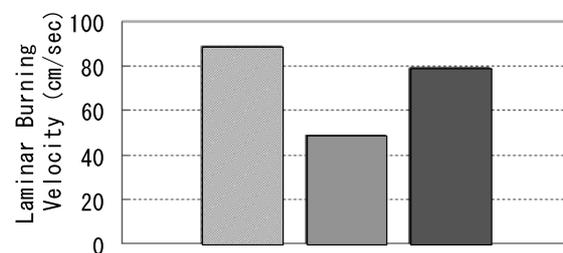


Fig.9 Calculated Chemical Species Histories



Intermediates	none	addition	addition
Temperature (K)	759.6	759.6	887.6
Pressure (MPa)	2.9	2.9	3.5

Fig.10 Comparison of Laminar Burning Velocity

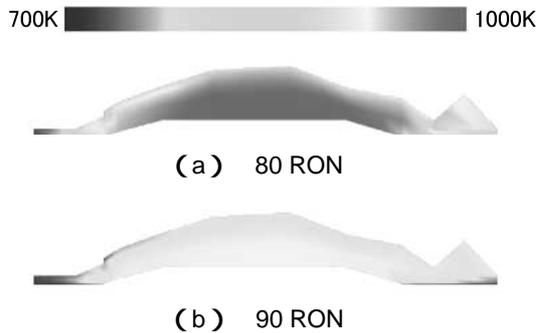


Fig.11 In-Cylinder Temperature Distribution at 8deg. ATDC

るように主燃焼期間はほぼ同一となる。次にこのTDC付近での熱発生がノッキングに及ぼす影響を考察する。Fig.5よりエンドガスの迎る領域の着火遅れ時間は圧力依存性が低く温度依存性が高いことがわかるため、エンドガス部の温度のみに着目した。TDC付近での熱発生によるエンドガス部の温度への影響を前述のKIVA-3VにCHEMKIN- のサブルーチンを組み込んだ計算により求めた。化学反応計算のスキームにはリデューススキームを用い、TDC付近での熱発生量を変化させるために燃料組成はPRFでオクタン価を80と90とした。Fig.11に8deg.ATDCでの燃焼室断面の温度分布を示す。オクタン価によりTDC付近での熱発生量が異なるため、発熱反応が起きている燃焼室中心部の温度は大きく異なるが、燃焼室外周部の温度は差が小さい。そのため、TDC付近の熱発生によっても、エンドガスの着火遅れを支配する火炎伝播中の温度履歴に大きな差は生じず、ノッキングに及ぼす影響は小さいものと考えられる。したがって、TDC付近の熱発生は、ノッキング限界を大きく悪化させることなく、等容度改善で図示平均有効圧の向上を図ることができる。

4. まとめ

本研究では高圧縮比を備えたガソリンHCCI機関においてパラフィン系により構成されたモデル燃料を用いて、吸気加熱方式によるHCCI燃焼とSI燃焼のノッキングという二つの自己着火に対する燃料のオクタン価の影響を実験と数値計算により解析し以下の結論を得た。

- 1.HCCI燃焼においては、燃料の高温側の着火特性が支配的であり、吸入空気温度が上昇するに従い燃料による着火特性の差異は小さくなる。
- 2.高圧縮比のSI燃焼においては、燃料の低温側の着火特性が支配的である。このため高圧縮比のSI燃焼であっても、ノッキング特性がRONとの相関がある結果になった。
- 3.高圧縮比低オクタン価でのSI燃焼においてはTDC付近での熱発生が見られるが、これによる火炎伝播速度、エンドガス部の温度の差は小さい。このためTDC付近の熱発生は、ノッキング限界を大きく悪化させることなく、等容度改善で図示平均有効圧の向上を図ることができる。

なお、本研究を実施するにあたりコスモ石油(株)には燃料提供において、早稲田大学熱エネルギー反応工学研究室には数値計算においてご協力頂いたことを記し、謝意を表する。

参考文献

- (1) Y.Urata et al. : A Study of Gasoline-Fuelled HCCI Engine Equipped with an Electromagnetic Valve Train, SAE paper No.2004-01-1898 (2004)
- (2) G.Shibata et al. : A Study of Auto-Ignition Characteristics of Hydrocarbons and the Idea of HCCI Fuel Index, Review of Automotive Engineering, 28, p.169-174 (2007)
- (3) G. T. Kalghatgi et al. : The Available and Required Autoignition Quality of Gasoline-Like Fuels in HCCI Engines at High Temperatures, SAE paper No.2004-01-1969 (2004)
- (4) R. J. Kee et al. : CHEMKIN- : A Fortran Chemical Kinetics Package for the Analysis of Gas Phase Chemical Kinetics, Sandia Report, SAND 89-8009 (1989)
- (5) S.Tanaka et al. : A reduced chemical kinetic model for HCCI combustion of primary reference fuel in a rapid compression machine, Combustion and Flame, 133, p.467-481 (2003)
- (6) A. A. Amsden : KIVA-3V : A Block-Structured KIVA Program for engines with Vertical or Canted Valves, Los Alamos National Laboratory report, LA-13313-MS (1997)
- (7) 草鹿ほか：詳細な素反応過程を考慮した数値流体コードによるディーゼル燃焼の数値解析 - 高速微分方程式ソルバーを用いた3次元シミュレーション - , 自動車技術会学術講演会前刷集, No.66-05, p.7-10 (2005)

著者



養祖 隆



山川正尚



廣瀬敏之



田中重行



草鹿 仁