

論文・解説

26

DISC-HCCIハイブリッド燃焼エンジンの解析

Analysis of Hybrid Combustion Engine using DISC and HCCI

養 祖 隆*¹ 西 本 敏 朗*² 林 好 徳*³
Takashi Youso Toshiaki Nishimoto Takayoshi Hayashi
藤 川 竜 也*⁴ 山 川 正 尚*⁵
Tatsuya Fujikawa Masahisa Yamakawa

要 約

高温混合気場を平易に生成し、予混合圧縮着火（HCCI）燃焼を実現することで燃費の改善を図ることを目的として、直噴成層（DISC）燃焼気筒とHCCI気筒により構成されるDISC-HCCIハイブリッド燃焼システムを考案した。本システムは、DISC気筒から排出される余剰酸素を含んだ高温の燃焼ガスをHCCI気筒に吸気として導入することで高温混合気場を生成しHCCI燃焼を実現した。

そして、DISC-HCCIハイブリッド燃焼システムでHCCI燃焼が可能であることを検証し、更にスパークアシストとEGRによりHCCI運転可能領域を拡大した。また、化学反応計算によるHCCI燃焼解析によりハイブリッド燃焼システムが燃料依存性の低い燃焼システムであることを確認した。

Summary

The DISC-HCCI Hybrid Combustion System is designed to provide an easy way to deliver high temperature air-fuel mixture for HCCI. The system consists of the DISC cylinder and HCCI cylinder. DISC cylinder exhausts high temperature combustion gas with oxygen surplus, which gets aspirated by HCCI cylinder as intake air. This mechanism generates air-fuel mixture at so high temperature that enables to achieve HCCI combustion.

It was verified that DISC-HCCI Hybrid Combustion System enables HCCI combustion, and spark assist and EGR are very effective in enlarging HCCI operation area. Also, the chemical kinetic simulation proved that DISC-HCCI Hybrid Combustion System have little fuel interdependence.

1. はじめに

低燃費と低NO_xを両立する次世代燃焼技術として予混合圧縮着火（HCCI）が期待されている。このHCCI燃焼を自動車用ガソリンエンジンとして成立させるためには、自着火時期の制御、HCCI運転領域の拡大、更にはHCCI運転と火花点火（SI）運転のスムーズな切替えといった課題を解決する必要がある。これに対して吸気加熱や高圧縮比による方法、高温の残留ガスを利用する負のオーバーラップや排気弁二度開きによる方法などのアプローチがなされているが、いずれも複雑で高度な機構を必要とし、より実用的手段で解決していくことが望まれている。そこで、HCCI燃焼への新たなアプローチとして、直噴成層（DISC）燃

焼とHCCI燃焼を組み合わせたハイブリッド燃焼システムを考案し、カムプロファイルスイッチング（CPS）タペットを用いるだけで、通常のSI燃焼に切替え可能な機構とした。本稿では、このDISC-HCCIハイブリッド燃焼システムの基本的な特性について報告する。

2. DISC-HCCIハイブリッド燃焼のコンセプト

DISC-HCCIハイブリッド燃焼エンジンの軽～中負荷のDISC-HCCIハイブリッド燃焼モードにおいては、Fig.1 (a) およびFig.2に示すように新気を#1と#4気筒に吸入してDISCによる希薄燃焼を行い、そこから排気行程にて排出される高温かつ酸素余剰の燃焼ガスを、吸気行程を迎えている#2と#3気筒に直接導き、三元触媒で排出ガスが浄化で

*1～5 パワートレイン先行開発部
Powertrain Advance Development Dept.

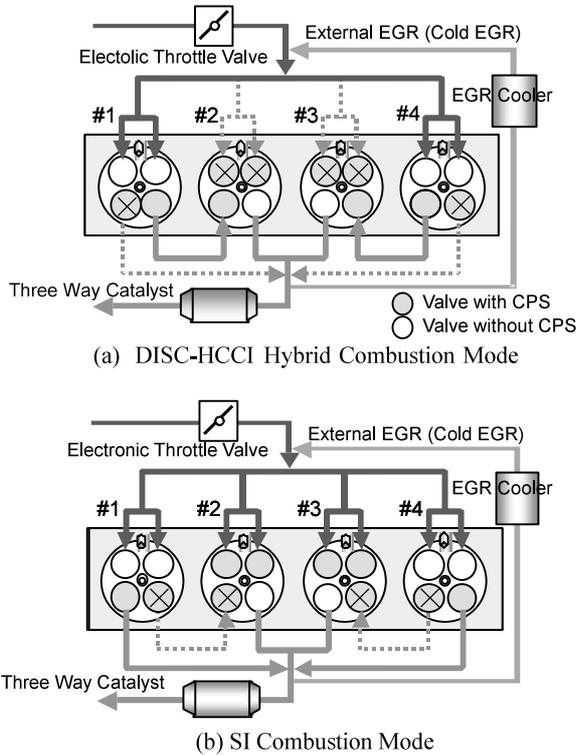


Fig.1 DISC-HCCI Hybrid Combustion Engine

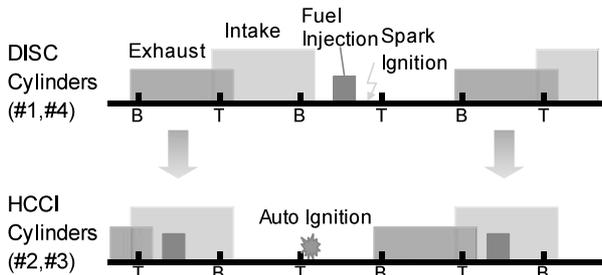


Fig.2 Timing Chart of DISC-HCCI Hybrid Combustion Mode

きるように理論混合比となる燃料量を噴射してHCCI燃焼を行う。また高負荷では、Fig.1 (b) に示すようにCPSタペットによって#1 #2気筒と#4 #3気筒へ通じる各バルブを閉じ、#2と#3気筒の吸気バルブと#1と#4気筒の三元触媒に通じる排気バルブを開き、各気筒独立した通常のSI燃焼モードに切替える。

今回検討に供試したエンジン仕様を、Table 1に示す。排気量1,998ccの直列4気筒の直噴ガソリンエンジンで、

Table 1 Engine Specifications

Engine Type	Inline 4
Bore X Stroke	87.5mm X 83.1mm
Displacement	1998cc
Compression Ratio	11.2 (#1, #4), 10.0 (#2, #3)
Swirl Ratio	5.6 (#2, #3) (DISC-HCCI Hybrid Combustion Mode)
Fuel System	Direct Injection
Fuel	Gasoline 91RON

DISC-HCCIハイブリッド燃焼モード時に使用する吸気ポートのスワール比は定常流試験で5.6、燃料はオクタン価91のガソリンを使用した。

3. 実験結果と考察

3.1 DISC気筒によるHCCI気筒の運転条件制御

DISC-HCCIハイブリッド燃焼システムでは、DISC気筒の運転条件によりHCCI気筒が吸入する混合気の状態を調整して自着火時期を制御する。

まず、DISC-HCCIハイブリッド燃焼システムの運転負荷の制御は、エンジン全体では理論混合比運転のため、DISC気筒に吸入される空気量（体積効率 η_{v-DISC} ）をスロットリングすることで行う。DISC気筒の空気過剰率 λ_{DISC} によって、DISC気筒から排出される燃焼ガス中の余剰酸素量が決まるので、HCCI気筒の燃焼に寄与する吸入空気量（体積効率 η_{v-HCCI} ）と吸気温度 $T_{IN-HCCI}$ を、DISC気筒の空気過剰率 λ_{DISC} によって制御することがこのシステムの特徴である。

Fig.3はその特徴を表したもので、1,500rpmにおけるDISC気筒の運転条件がHCCI気筒に導かれるガスの状態に及ぼす影響を示している。DISC気筒の体積効率 η_{v-DISC} を一定とし空気過剰率 λ_{DISC} を変えることで、HCCI気筒の体積効率 η_{v-HCCI} と吸気温度 $T_{IN-HCCI}$ が制御されている。

3.2 HCCI気筒の運転領域

このような自着火時期の制御手段によりHCCI運転を試みた際の、HCCI運転可能な領域をFig.4に示す。Fig.4はHCCI気筒の運転条件を把握しやすくするためにFig.3をHCCI気筒の空気量と吸気温度の関係で整理しなおしたものである。通常のSI運転では大量EGRで安定した燃焼が得られないような条件にもかかわらずHCCI運転は可能であった。しかしながら、低温かつ低体積効率側は失火が発生し、高温かつ高体積効率側は激しいノッキングの制約を受け、安定したHCCI運転可能な領域は狭い範囲であった。

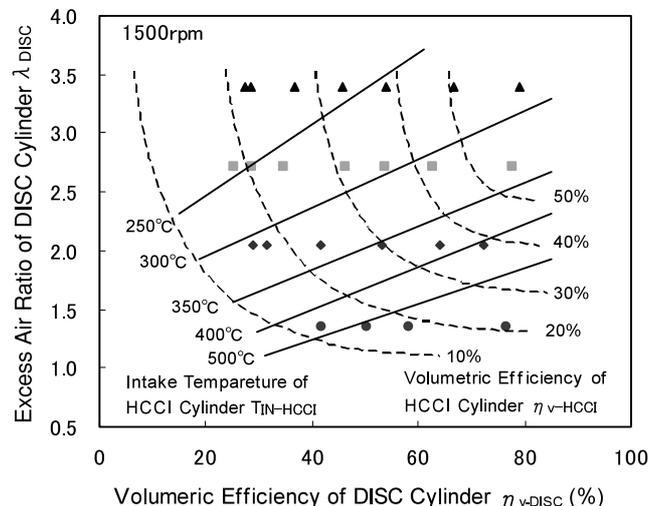


Fig.3 Condition Control of HCCI Cylinder by DISC Cylinder

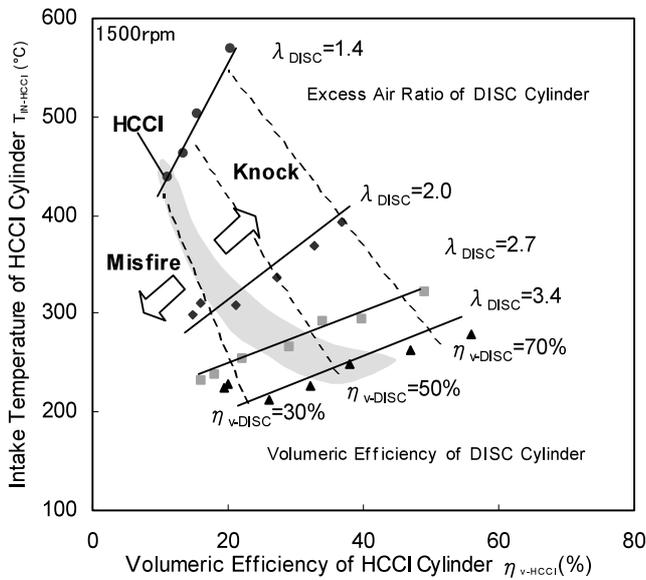


Fig.4 Condition of HCCI Cylinder and HCCI Combustion Area

3.3 スパークアシストと外部EGRによる運転領域拡大
 軽負荷ではDISC気筒の体積効率 η_{v-DISC} をスロットリングで減じるため、HCCI気筒の吸気温度 $T_{IN-HCCI}$ と体積効率 η_{v-HCCI} は低下してしまい、HCCI燃焼が困難になる。そこで、初期にSI燃焼によって筒内圧力と温度を上げて圧縮着火を誘発するスパークアシストを試みた。Fig.5に空気過剰率 $\lambda_{HCCI} = 1.0$ と空気過剰率 $\lambda_{HCCI} = 1.5$ でスパークアシストを行った結果を示す。空気過剰率 $\lambda_{HCCI} = 1.0$ では、火花点火時期の進角に応じてHCCI燃焼の着火時期が進角するが、空気過剰率 $\lambda_{HCCI} = 1.5$ では、火花点火の希薄限界付近であるため圧縮着火の誘発には至らなかった。このことはDISC-HCCIハイブリッド燃焼システムでは空気過剰率 $\lambda_{HCCI} = 1.0$ でHCCI運転を行うために、スパークアシストにより

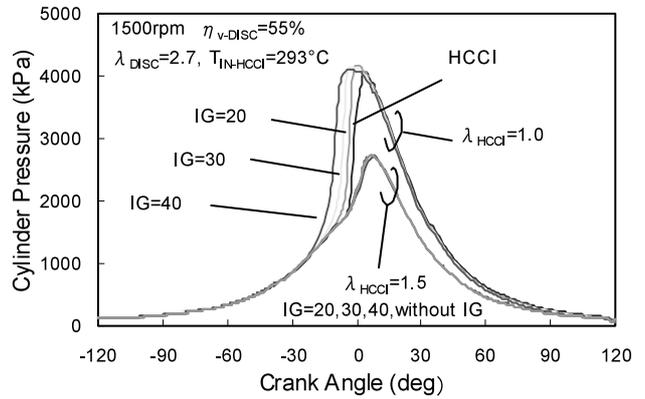


Fig.5 Effect of Spark Assist on Excess Air Ratio

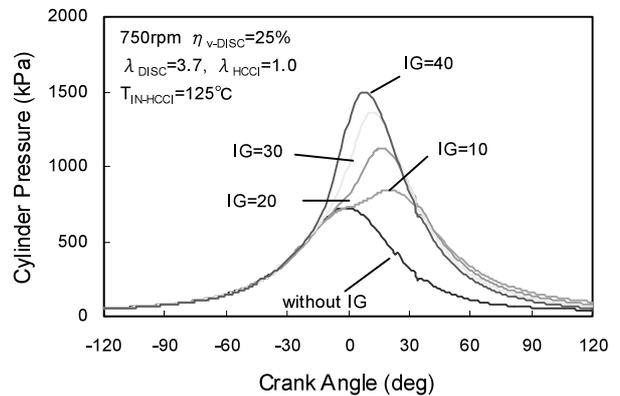
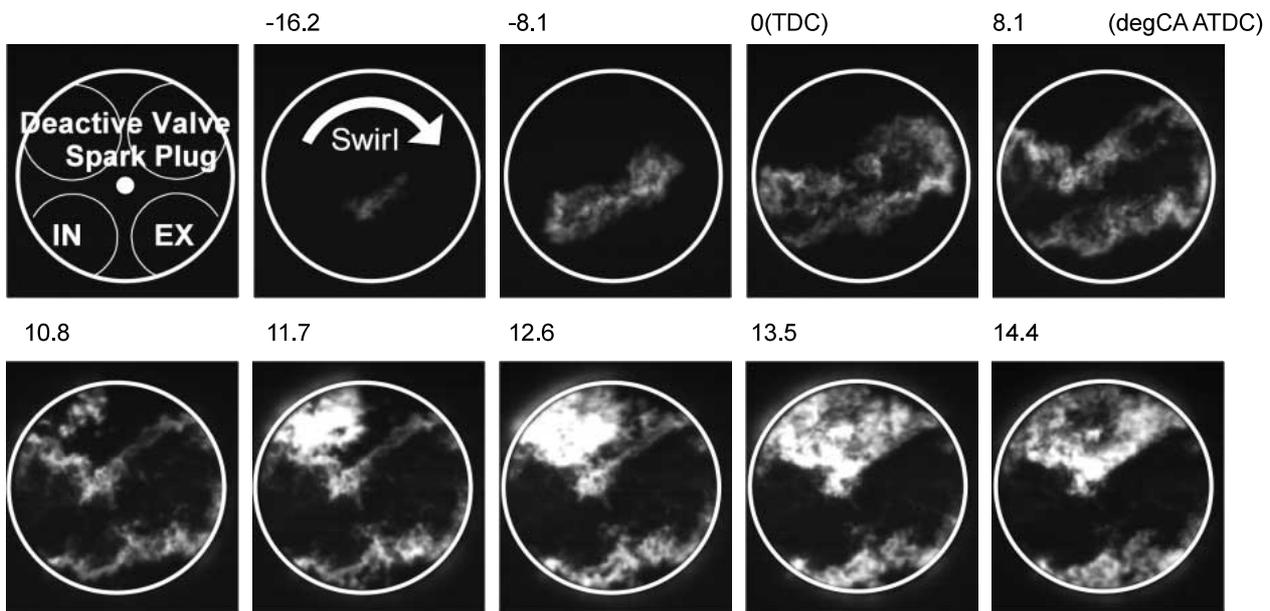


Fig.6 Effect of Spark Assist on HCCI Combustion at Idle

HCCI燃焼を誘発しやすいという特長を示している。更にFig.6にはアイドル相当の750rpm、空気過剰率 $\lambda_{HCCI} = 1.0$ の軽負荷でのスパークアシストの効果を示す。スパークアシストを行うことで圧縮着火しにくいアイドル状態でも圧縮着火を誘発し、点火時期の進角に伴う着火時期の進角も確認できた。Fig.7には可視化エンジンにおけるスパー



(750rpm, $\eta_{v-DISC} = 64\%$, $\lambda_{DISC} = 2.7$, $\lambda_{HCCI} = 1.0$, Spark Assist IG= 30degCA BTDC)

Fig.7 Photographs of HCCI Combustion with Spark Assist

クアシスト時の燃焼の自発光撮影結果を示す。8.1degCA ATDCまでは通常のSI燃焼の火炎伝播が観察されるが、10.8degCA ATDCより未燃部で圧縮着火が誘発されている。一方、高負荷側ではDISC気筒の体積効率 η_{v-DISC} と燃料量を増やすため、軽負荷側とは逆にHCCI気筒の吸気温度 $T_{IN-HCCI}$ と体積効率 η_{v-HCCI} が高くなってしまい激しいノッキングが発生する。このノッキングを抑制するため、DISC気筒上流に外部EGRを導入し、Fig.8に示すようにDISC気筒の燃焼ガス温度、すなわちHCCI気筒の吸気温度 $T_{IN-HCCI}$ を下げ、EGRの熱容量増加とあまってHCCI燃焼を緩慢化した。

以上のように、軽負荷側のスパークアシストによる圧縮着火の誘発と、高負荷側の外部EGRによるノッキング回避で、Fig.9に示すような広い運転条件下でHCCI気筒の運転を可能とした。

3.4 DISC-HCCIハイブリッド燃焼の運転範囲と性能

Fig.10にDISC-HCCIハイブリッド燃焼システムのDISC気筒とHCCI気筒の負荷の負担割合と運転範囲の特性を示す。

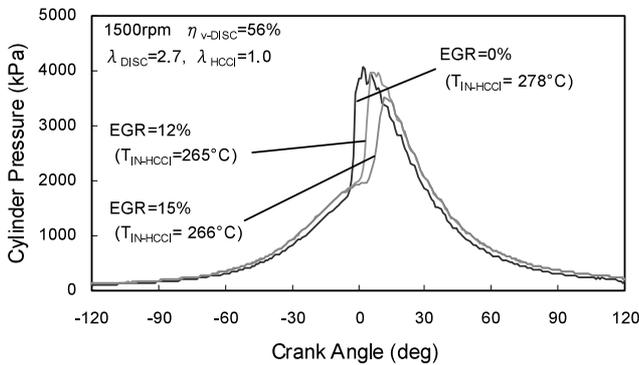


Fig.8 Effect of External EGR on Compression Ignition Timing

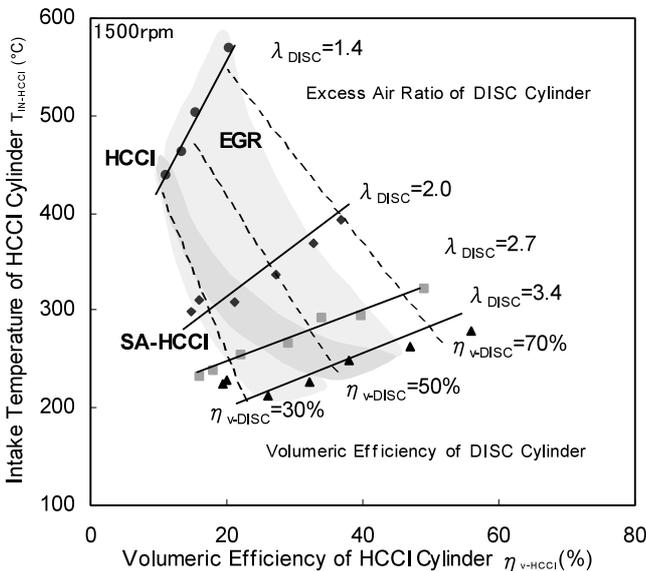


Fig.9 Effect of Spark Assist and External EGR on HCCI Combustion

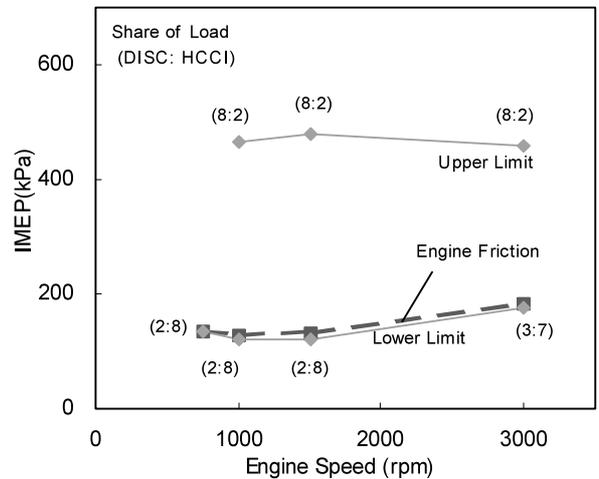


Fig.10 Operation Area of DISC-HCCI Hybrid Combustion

す。負荷が高くなると、HCCI気筒のノッキングが回避できなくなるため、HCCI気筒の負荷の負担割合を小さくしてDISC気筒の負担割合を大きくした。その結果、軽負荷側は無負荷まで、また、高負荷側はスロットル全開まで運転可能であったが、高負荷限界は新気を吸入する能力がDISC気筒の2気筒分しかないという制約を受けた。

つづいて、DISC-HCCIハイブリッド燃焼とポート噴射エンジンにおける通常のSI燃焼、ならびに直噴ガソリンエンジンにおけるDISC燃焼の燃費率とNOxをFig.11に示す。ここで、DISC-HCCIハイブリッド燃焼は、スパークアシストやEGRを使いながら、安定したHCCI燃焼が得られるようにDISC気筒の運転状態を最適にしたものである。DISC燃焼は、燃焼安定性を確保した上で燃費が最良となるようEGRと空気過剰率を設定したものである。その結果、軽負荷の燃費率はDISC燃焼と同等で、負荷が高くなるとSI燃焼の燃費率に近づいた。この燃費率の悪化は、負荷が高くなるとDISC気筒の燃焼ガス温度が上がるので、

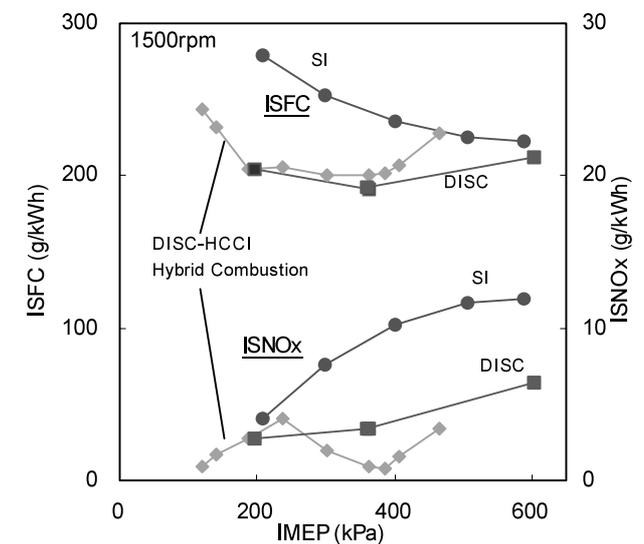


Fig.11 Comparison of Fuel Consumption and NOx among DISC-HCCI, SI and DISC

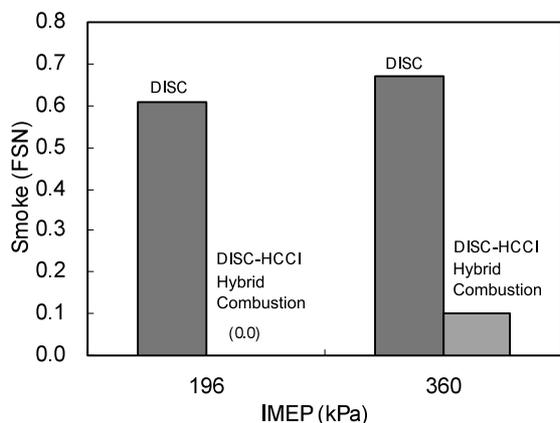


Fig.12 Comparison of Smoke between DISC-HCCI and DISC

HCCI気筒の吸気温度 $T_{IN-HCCI}$ が高くなり過ぎて過早着火するためである。なお、DISC-HCCIハイブリッド燃焼エンジンは2気筒でDISC燃焼を行うためDISC燃焼エンジンの半分程度のNO_xの排出は避けられないが、理論空燃比運転なので三元触媒により問題なく浄化できる。

また、Fig.12にDISC-HCCIハイブリッド燃焼とDISC燃焼のスモーク排出量を示す。DISC燃焼によりスモークが生成されるが、HCCI気筒に導入され再燃焼されることによりエンジンからの排出は極めて少ない量に低減される。

4. 数値計算による燃料依存性の検討

4.1 数値計算の方法

HCCI燃焼は化学反応が支配的なため、燃料性状の影響を受けやすいことが知られている⁽¹⁾。そこで、DISC-HCCIハイブリッド燃焼システムにおけるオクタン価の影響を数値計算により検討した。このDISC-HCCIハイブリッド燃焼システムはDISC気筒の空気過剰率 λ_{DISC} によって決定されるHCCI気筒のEGR率が正確に把握できるため、EGRを利用する他のHCCI燃焼方式に比べ数値計算の適用が図りやすいという利点がある。DISC-HCCIハイブリッド燃焼システムでは軽負荷側の運転領域拡大にスパークアシストが有効であり、既存のサイクルシミュレーションでのSI燃焼の火炎伝播モデルとの連携を考慮し、化学反応計算により着火遅れ時間を算出し、式(1)のLivengood-Wu積分⁽²⁾による着火時期判定を行う手法を検討した。

$$\int_{\theta_0}^{\theta_{18}} \frac{1}{\tau(\theta)} d\theta = 1 \quad (1)$$

具体的には、筒内圧力と筒内温度に対応した定常の着火遅れ時間をCHEMKIN⁽³⁾を用いた化学反応計算で求め、とLivengood-Wu積分で着火時のクランク角 θ_{18} を求めた⁽⁴⁾。

4.2 燃料依存性の検討

化学反応モデルはオクタン価を設定できるリデューストスキーム (Reduced Scheme : 化学種数32, 素反応数55)⁽⁵⁾

を用い、市場のオクタン価の状況を考慮してオクタン価80とオクタン価100に設定して行った。Table 2に計算を行った実験条件を示す。Fig.13に示すように、オクタン価の違いによる着火時期の差はほとんどない結果であった。DISC-HCCIハイブリッド燃焼システムでは自動車用ガソリンのオクタン価がHCCI燃焼の着火時期に与える影響は少ないと考えられる。

DISC-HCCIハイブリッド燃焼システムでの代表的な運転状態であるEGR率50%のID1, 2, 3でのオクタン価80とオクタン価100の着火遅れ時間と、HCCI気筒の温度と圧力の履歴をFig.14に示す。DISC-HCCIハイブリッド燃焼システムでは、HCCI気筒の温度と圧力の履歴が、オクタン価で顕著な差が出る着火遅れ時間の負の温度依存領域を通らないため、燃料の影響が小さくなったものと考えられる。自動車用エンジンとしてDISC-HCCIハイブリッド燃焼システムは、燃料依存性の低いHCCI燃焼システムであることが、この化学反応モデルによる計算で確認できた。

Table 2 Test Conditions for Calculation

ID	DISC Cylinder		HCCI Cylinder		
	λ_{DISC}	η_{V-DISC} (%)	η_{V-HCCI} (%)	EGR Rate (%)	$T_{IN-HCCI}$ (°C)
1	2.0	29	15	50	293
2	2.0	33	17	50	307
3	2.0	43	22	50	328
4	2.7	34	24	37	264
5	2.7	42	26	37	289
6	2.7	34	21	37	255

EGR rate = The mass of burnt gas / The mass of induction gas

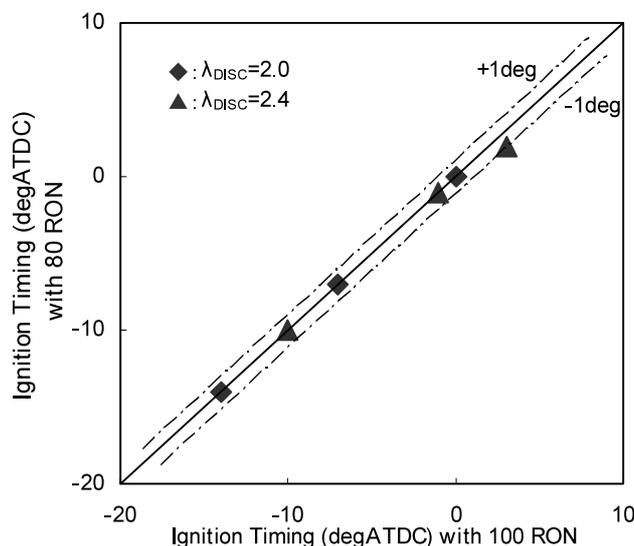


Fig.13 Comparison of Ignition Timing with Octane Number 80 and 100

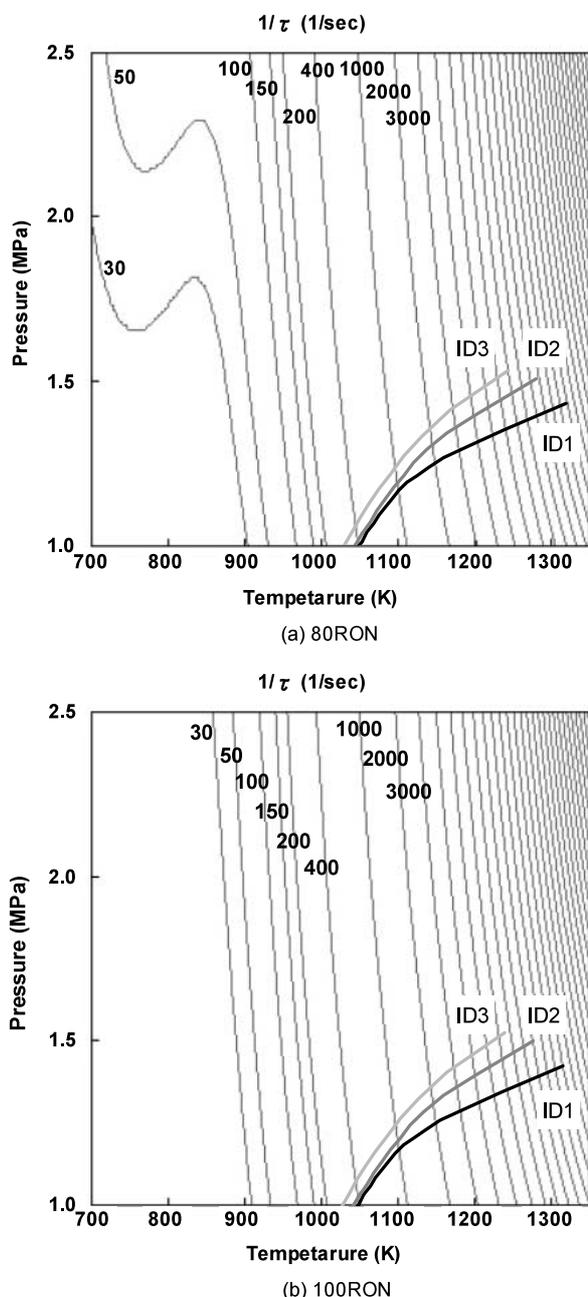


Fig.14 Comparison of Ignition Delay between Octane Number 80 and 100

5. まとめ

HCCI燃焼への新たなアプローチとしてDISC-HCCIハイブリッド燃焼システムを考案し、基本的な特性を調べるとともに、化学反応計算による解析を行った。

- (1) DISC気筒の燃焼によるHCCI気筒の吸気状態の特性を明確にし、DISC-HCCIハイブリッド燃焼システムにおけるHCCI燃焼が実際に可能であることを確認した。
- (2) HCCI気筒の運転領域拡大には、軽負荷側では理論混合比でHCCI燃焼を行うためスパークアシストが、また、高負荷側ではEGRが有効であった。しかしながら、高負荷限界は吸気がDISC運転する2気筒分の吸気量しか

い制約を受けた。

- (3) DISC-HCCIハイブリッド燃焼システムが、燃料依存性の低いHCCI燃焼システムであることを確認した。

参考文献

- (1) G. Shibata et al. : The Effect of Fuel Properties on Low and High Temperature Heat Release and Resulting Performance of an HCCI Engine, SAE paper, 2004-01-0553 (2004)
- (2) J. C. Livengood et al. : Correlation of Autoignition Phenomena in internal Combustion Engine and Rapid Compression Machines, Proceeding of 5TH Symposium (international) on Combustion , p.347-356 (1955)
- (3) R. J. Kee et al. : CHEMKIN- A Fortran Chemical Kinetics Package For The Analysis of Gas-phase Chemical Kinetics, Sandia National Laboratories Report, SAND89-8009 (1989)
- (4) K. Yoshizawa et al. : Numerical Analysis of Combustion in Gasoline Compression Ignition Engines, SAE paper, 2002-01-2865 (2002)
- (5) S. Tanaka et al. : A reduced chemical kinetic model for HCCI combustion of primary reference fuels in a rapid compression machine, Combustion and Flame, 133 , p.467-481 (2003)

著者



養祖 隆



西本敏朗



林 好徳



藤川竜也



山川正尚