

特集：新型MAZDA3

7

SKYACTIV-Xに適用する燃焼予測技術 Combustion Simulation Technology Applied to SKYACTIV-X

河野 通治* ¹ Michiharu Kawano	本田 雄哉* ² Yuya Honda	和田 好隆* ³ Yoshitaka Wada
上村 匠* ⁴ Takumi Uemura	植木 義治* ⁵ Yoshiharu Ueki	横畑 英明* ⁶ Hideaki Yokohata

要 約

CO₂排出量の削減に最も寄与する内燃機関の理想追求に向け、リーン圧縮着火による熱効率向上を実現する次世代ガソリンエンジンSKYACTIV-Xを開発した。SKYACTIV-Xでは、圧縮着火・ノッキングのように、混合気の化学反応によっておこる自着火現象を完全に制御する必要があり、その実現のために予測技術を用いたモデルベース開発は重要な役割を担う。そこで、基礎研究による現象解明を通じて、これまで開発してきた流動・噴霧予測技術を高精度化し、新たに素反応を考慮した燃焼予測技術を構築した。加えて、本予測技術を用いて、高速高負荷域で発生するノッキング現象を分析し、その抑制の方向性を確認した。

Summary

In pursuit of an ideal internal combustion engine capable of significantly reducing CO₂ emission, Mazda developed the next gasoline engine Skyactiv-X with lean compression ignition that improves thermal efficiency. Skyactiv-X needs to fully control auto ignition phenomena caused by chemical reactions of air-fuel mixture such as compression ignitions and knocking, and to realize the control, model-based developments using simulation technology is essential. Accordingly, Mazda improved the precision of the Mazda-developed-flow and spray simulation technology through phenomena elucidations by fundamental researches, and established a new combustion simulation technology considering elementary reactions. This simulation technology was also used to analyze knocking phenomena occurred at high loads and speeds to confirm the direction of the phenomena control.

Key words : Heat Engine, Homogeneous Charge Compression Ignition, Numerical Calculation

1. はじめに

マツダは、将来においても地球・社会・人とクルマが共存する世界を思い描き、クルマの実用環境下でのCO₂排出量の削減効果を最大化することを目指している。発電形態・環境規制から、内燃機関以外が適した市場には、電動化技術を投入できるよう研究開発を進めているが、2035年においても、世界的に大多数を占めると予測されているのは内燃機関を主要動力源とするものであり⁽¹⁾、内燃機関の理想追求がCO₂排出量の削減に最も寄与すると考える。そのためマツダは、リーン圧縮着火による熱効率向上を実現する次世代ガソリンエンジンSKYACTIV-Xを開発した。

SKYACTIV-Xでは、圧縮着火・ノッキングのように、混合気の化学反応によっておこる自着火現象を完全に制御する必要があり、その実現のために予測技術を用いたモデルベース開発は重要な役割を担う。

本稿では、SKYACTIV-Xに適用する燃焼予測技術の開発とその適用効果について紹介する。

2. SKYACTIV-Xの特徴

2.1 開発構想

現行ガソリンエンジンSKYACTIV-Gの熱効率を高めるには、比熱比の増加、壁面熱伝達の抑制が効果的である (Fig. 1)。これらの実現手段として、燃料に対する空

*1~6 MBD革新部
MBD Innovation Dept.

気・排気再循環ガスの比率を高めるリーンバーンが挙げられるが、スパークプラグによる火花点火 (Spark Ignition, 以下SI) では、火炎が伝ばしにくくなり、失火する確率が高くなる。そこで、高圧縮比化によって燃焼室内を高圧・高温にして、ディーゼルエンジンのように圧縮着火させるリーン圧縮着火が有効である。リーン圧縮着火の研究開発を進めると、高温時には急峻な燃焼となり燃焼音が増大すること、また低温時には緩慢な燃焼となり燃焼変動が増幅することから、着火時の混合気温度を3℃幅で制御しなければならないことが分かった。そのため、圧縮着火は限られた運転範囲でしか完全に制御することができず、SIとの切り替えが避けられない。熱効率向上には、圧縮着火の運転範囲を拡大しつつ、SIとの切り替えを完全に制御できる Controlled Compression Ignition (CCI) がブレークスルーの鍵になる。

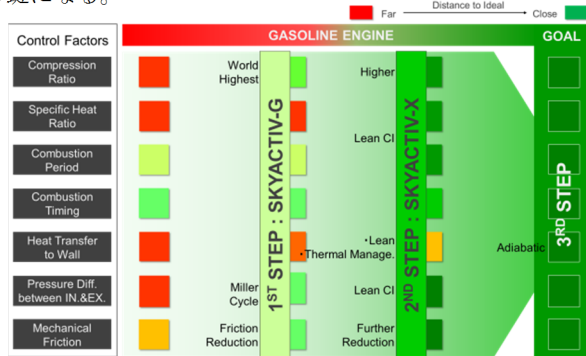


Fig. 1 Roadmap to the Ideal Combustion

2.2 ブレークスルー

全運転範囲で圧縮着火が実現できない場合、SIと圧縮着火の切り替えが必須であることから、スパークプラグをもつ構造は避けられない。そこで、スパークプラグによる点火を圧縮着火の制御技術として活用する新燃焼SPark Controlled Compression Ignition (以下、SPCCI) で、実用運転範囲では一部の冷間時を除くほぼ全てで圧縮着火を実現する。

SPCCIでは、圧縮比を圧縮着火開始直前まで高め、点火による膨張火炎球でその外側に存在する未燃混合気をもう一押しする (Fig. 2)。膨張火炎球の要求されるタイミング・大きさは運転条件によって異なるが、それは点火タイミングで制御できる。この膨張火炎球が未燃混合気を追加圧縮することで、圧縮着火に必要な圧力・温度を加えることができる。

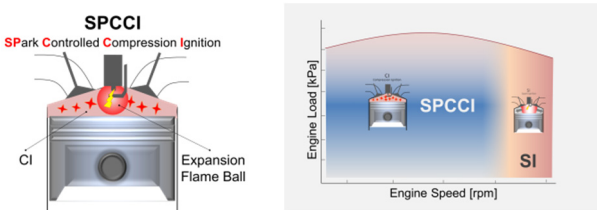


Fig. 2 SPCCI Combustion

3. 燃焼予測技術の開発

3.1 開発の方向性

前述したように、SKYACTIV-Xでは、SPCCIとSIを切り替えながら運転する。まずSPCCIでは、燃料を希薄にした条件、排気再循環ガスで希釈した条件で圧縮着火を行う。この圧縮着火を誘因する膨張火炎球は、スパークプラグの点火で生成される。その生成を安定化するには、スパークプラグ近傍において、燃料濃度を高めて着火しやすい状態、流動・乱流強度を強めて火炎伝ばしやすい状態を形成する必要がある。加えて、未燃混合気を圧縮着火させるために、その化学反応の進行度も制御する必要がある。次にSIでは、タンブル流で生成する乱流で急速燃焼させる一方、高圧縮比化でノッキングが重大な問題となる。その抑制のためには、伝ば火炎の形状、未燃混合気の自着火、自着火後の圧力振動形成について理解し、適切な対策を創出する必要がある。

いずれの燃焼も、未燃混合気の自着火を燃焼室内の局所的状態で完全に制御しなければならない。この局所的状態は、吸気流動制御の多様化・燃料噴射制御の高度化で形成する。吸気流動は、燃焼室内を縦旋回するタンブル流だけでなく横旋回するスワール流も使い、燃焼室ボア径方向の状態制御に利用する。燃料噴射は、高圧噴射・圧縮行程噴射・多段噴射を用い、燃料配置制御に利用する。そのため、これまで独自に開発してきた流動・噴霧予測技術⁽²⁾⁽³⁾をあらゆる条件にも対応できるように高精度化する必要がある。加えて、未燃混合気の自着火を予測するために、新たに素反応を考慮した燃焼予測技術を開発する必要がある。これらSKYACTIV-Xに適用する流動・噴霧・燃焼予測技術の開発を、汎用熱流体解析プログラムCONVERGEを用いて実施した。

3.2 流動予測技術

これまでの流動予測技術は、SIで利用するタンブル流を予測するために開発してきた⁽⁴⁾が、SPCCIで利用するスワール流は、高速で歳差運動を伴う複雑な流動であるため、予測が困難になる (Fig. 4(c), 4(d))。そこで、燃焼室内流動を構成する噴流・衝突流・旋回流など、あらゆる基礎流動に対応できる予測技術を構築するために、現象を単純化した基礎実験を通じて、現象解明・予測技術開発に取り組んだ。ここでは、衝突流に対する取り組みを示す。

衝突流は、1辺30mmの矩形管に最大流量15m³/minの遠心型高圧送風機で常温空気を送り込み、噴流部から50mm離れた平板に噴流を衝突させて形成する。噴流部に設けた可動式オリフィス板で、噴流速度・衝突角を変えることができる。噴流部高さ10mm, 20mm, 30mm, 流入速度10m/s, 20m/s, 各噴流部高さでの最大流速 (25m/s-100m/s) それぞれについて、Particle Image Velocimetry

(以下、PIV)による可視化計測を行った。噴流部高さ30mm、流入速度20m/sの場合、衝突部によみ領域が形成される (Fig. 3(a)) が、この領域は流入速度の増加に伴い扁平になる。衝突角を変えると、よみ領域の様子が変わる (Fig. 3(b))。これらの現象に比較的よい一致を見せる乱流モデルk-e RNG・Smagorinskyそれぞれについて、最適格子サイズを導き、高精度化した。k-e RNGは計算効率が求められる詳細設計開発に、Smagorinskyはノッキング・サイクル変動のような複雑現象を解明する場合に用いる。ここでは、Smagorinskyの計算結果を、Fig. 3(c), 3(d)に示す。

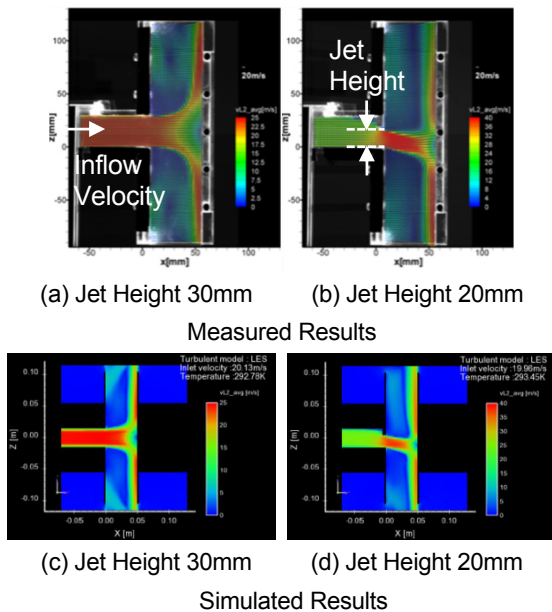


Fig. 3 Comparison of Impinging Flow between Measured Results and Simulated Results

実際の燃焼室内では、複雑形状・非定常流れをあわせもつため、定常流れが形成されることはない。そのため、前述の基礎流動には現れない現象が存在すると考える。そこで、単気筒可視化エンジンを用いてエンジン特有の現象を理解し、予測技術の検証・改善に取り組んだ。

回転速度2000rpm、スロットル全開で、吸気バルブを片弁駆動させることでスワール流を形成し、PIVによる可視化計測を行った。可視化結果では、吸気行程で流速70m/sを超える主流が形成される (Fig. 4(a)) が、吸気バルブが閉まり、空気の流入が止まる圧縮行程においてもその一部が残存する (Fig. 4(b))。一方、計算結果では、圧縮行程において主流が流速40m/sまで減衰する (Fig. 4(c), 4(d))。これは、乱流モデルで導かれる渦粘性が高いためと考えられる。前述の基礎流動は渦運動の影響が小さいが、燃焼室内流動は複雑形状や吸気流動の影響で渦運動の影響が大きいため、この問題が現れたと考える。そこで、乱流モデルの渦粘性係数を調整することで、スワール流の流速・渦中

心位置を改善させることができた (Fig. 4(e), 4(f))。

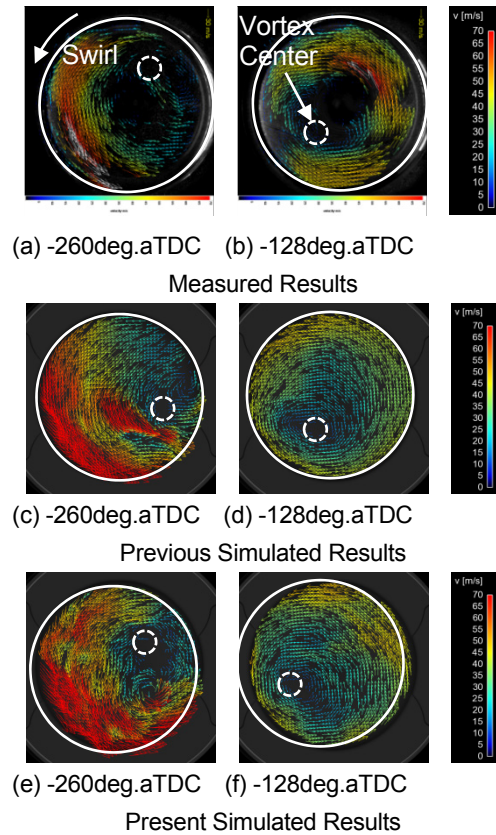


Fig. 4 Comparison of Incylinder Flow between Measured Results and Simulated Results

3.3 噴霧予測技術

燃焼室内で混合気を形成する際、最も重要になるのは燃料液滴の微粒化過程である。この過程には、Kelvin-Helmholtz and Rayleigh-Taylor (KH-RT) モデルを用い、自由噴霧写真やノズルから数十mm下流における平均液滴径からモデル係数を導き、SKYACTIV-Gの開発に適用してきた⁽²⁾⁽³⁾。しかしSKYACTIV-Xでは、圧縮行程後半の燃料噴射で燃焼を制御するため、ノズルからピストンまでの距離が短くなり、ノズル近傍の噴霧挙動を考慮してモデル係数を導く必要がある。そこで、産業技術総合研究所との共同研究で、ノズル近傍の微粒化特性・ダイナミクスについて研究している⁽⁴⁾。

本研究では、大型放射光施設SPring-8の高輝度X線を噴霧に照射し (Fig. 5)、噴射圧力20MPa、40MPa、60MPa、雰囲気気密度2kg/m³、10kg/m³、18kg/m³それぞれについて、ノズル近傍の液滴速度・径を計測した。雰囲気気密度2kg/m³の計測結果をFig. 6に示す。噴射圧力に依らず、ノズル近傍のSauter Mean Diameter (以下、SMD) はノズル径およそ100μmよりも小さくなっており、ノズル近傍でも微粒化が進行していることが分かった。加えて、噴霧軸上の液滴速度をノズル位置の液滴速度で正規化した相対

速度が0.72に達した時点で、SMDはほぼ一定になることから、これが微粒化終了位置と考えられる⁽⁵⁾。これらの現象に基づき、一次分裂長さや分裂後の液滴径を決めるモデル係数を噴射圧力・雰囲気密度の変化に対応できるように関数化することで、ノズル近傍の微粒化過程を高精度化した。噴射圧力40MPa、雰囲気密度10kg/m³の自由噴霧挙動を、Fig. 7に示す。

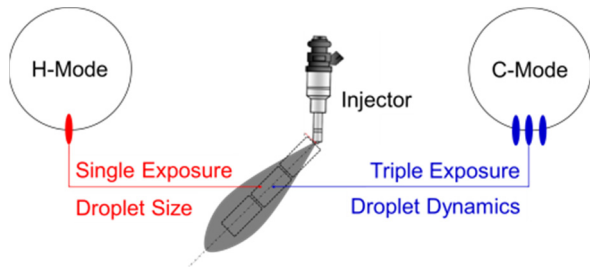
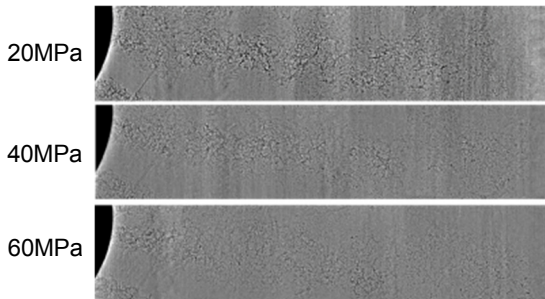
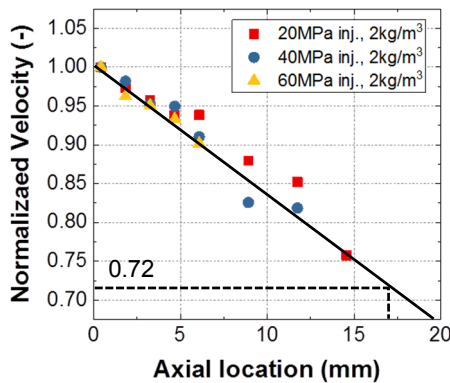


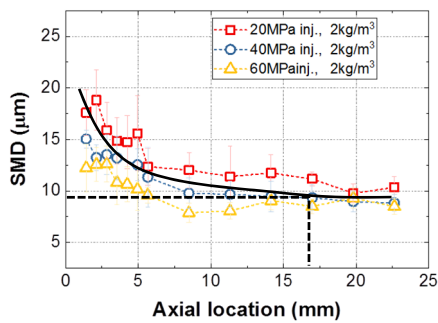
Fig. 5 X-ray Measurement Method



(a) Raw Image



(b) Droplet Velocity



(c) SMD

Fig. 6 Measured Results

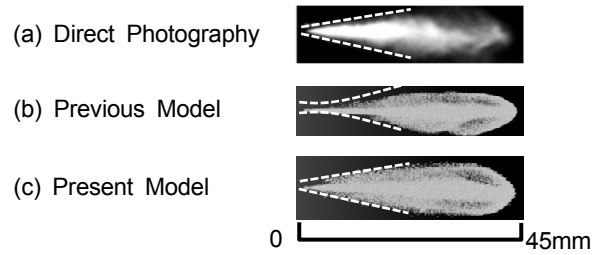


Fig. 7 Comparison of Free Spray between Measured Results and Simulated Results

燃焼室内に直接噴射された燃料は、微粒化しながら燃焼室壁面に衝突するため、その衝突挙動も重要になる。この挙動予測には千田モデルを用いているが、圧縮行程噴射のように、ノズルからピストンまでの距離が短い条件で検証した事例はない。そこで、広島大学との共同研究で、衝突噴霧の挙動について研究している⁽⁶⁾。

本研究では、単噴孔ノズルから噴射圧力10MPaで噴射した噴霧を、大気圧条件下で22mm離れた平板に45°で衝突させ、衝突前後の液滴速度・径をPIV・Particle Image Analyzer (PIA) で計測した。計算結果では壁面衝突後に微小液滴が巻き上がる (Fig. 8(b)) が、計測結果ではその現象は見られない (Fig. 8(a))。この差に基づき、壁面衝突後の液滴速度・径・反射角に影響するモデル係数を修正することで、壁面衝突挙動を高精度化した (Fig. 8(c))。

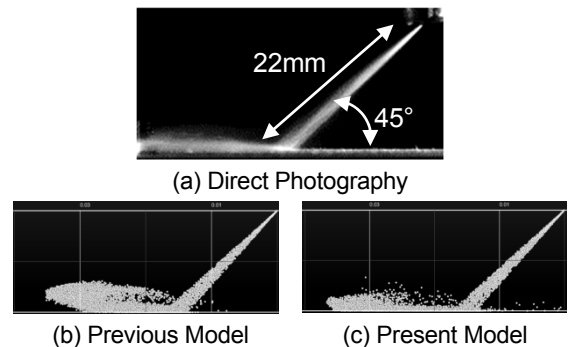


Fig. 8 Comparison of Impinging Spray between Measured Results and Simulated Results

3.4 燃焼予測技術

SPCCIの圧縮着火やSIのノッキングのような未燃混合気の自着火は、流体と化学反応の相互干渉でおこるため、変動的かつ局所的現象である。その予測には、前述の流動・噴霧予測技術と素反応を考慮した燃焼予測技術を連成して用いる必要がある。そこで、広島大学・北海道大学との共同研究で、定容容器内のノッキングを対象に、現象解明・予測技術について研究している⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

本研究では、内径20mm、長さ80mmの定容容器に空気・ノルマルヘプタン混合気を充填し、中央で点火するこ

とで伝ば火炎を生成する (Fig. 9)。圧力0.5MPa, 温度500K, 当量比1.0, 壁温500Kを初期条件として点火した場合, 火炎が35mm伝ばした時点で火炎前面より自着火がおこる (Fig. 10)。火炎による圧縮効果は, 未燃混合気全体に一樣に寄与するため, 火炎前面でおこるといふ局所的現象には不明点が残る。

この現象を解明するために, 素反応を考慮した2次元燃焼予測技術を構築した。反応モデルはLiu (48化学種, 152反応式), 格子サイズは20 μ m, Courant Friedrichs Lewy (以下, CFL) 数は0.8とし, 対称境界を用いて計算負荷を低減した。その結果をFig. 11に示す。未燃混合気が火炎に圧縮される際, その温度は壁温よりも高くなるため, 壁面近傍の未燃混合気の温度は相対的に低くなる。一方, 火炎前面の未燃混合気は, 火炎の圧縮効果に加え, 火炎からの熱伝導で温度がわずかに高くなる。これにより, 中間活性種ホルムアルデヒド (CH₂O) が生成されることで冷炎の発現時期が早まり, 火炎前面で自着火するという局所的現象を引き起こすと考えられる。

実際の燃焼室では, 混合気の温度・濃度の空間分布が存在する。そのため, 3次元燃焼予測技術が必要だが, 格子数増加で計算負荷が高くなる。そこで, 複数の計算機を用いて並列計算する際の負荷を平準化し, 30%超の高速化を行った上で, 3.2で決定した格子サイズを適用した。乱流モデルはSmagorinsky, 反応モデルは広島大学との共同研究を通じて開発した簡略化反応機構 (133化学種, 558反応式), 燃料は5種サロゲート (オクタン価95), CFL数は0.8とし, エンジンノッキングの自着火現象について検証した。

エンジンにはSKYACTIV-G 2.0を使用し, 回転速度3000rpm, 充填効率75%で, 点火タイミングの進角でノッキングを誘発し, VisioKnockを用いて未燃混合気の自着火位置・頻度・時期を計測した。計測結果では, 排気側で10deg.aTDCから15deg.aTDCに自着火がおこる (Fig. 12) が, 計算結果でも同様の現象を示すことを確認した (Fig. 13)。計算結果からこの現象を考察する。SKYACTIV-Gでは, 吸気行程で形成される強いタンブル流が燃焼開始時点でも残存し, 3000rpmでは排気側から吸気側への強い流れが存在する。この状態で点火すると, 吸気側への火炎伝ばが速く, 逆に排気側が遅くなる。これにより, 未燃混合気が排気側に多く残存するため, 火炎面が到達する前に自着火がおこりやすくなる。加えて, 圧縮上死点前で点火タイミングを進角すると, 圧縮上死点での燃焼割合が増加するため, 火炎による圧縮効果が上がる。これにより, 未燃混合気の温度は1000K超まで上昇し (Fig. 13(a)), ホルムアルデヒドが生成された後 (Fig. 13(b)), 自着火に至ることを確認した。

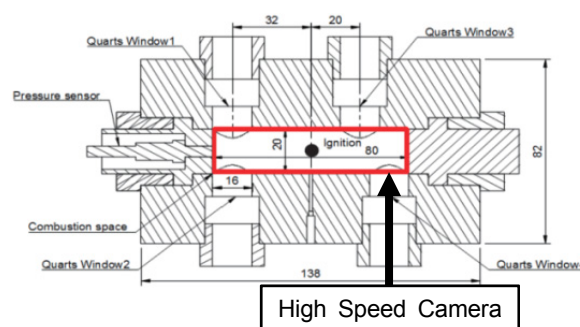


Fig. 9 Schematic of Combustion Vessel

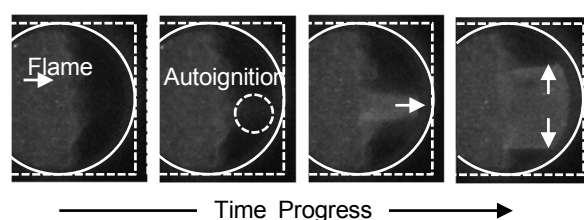
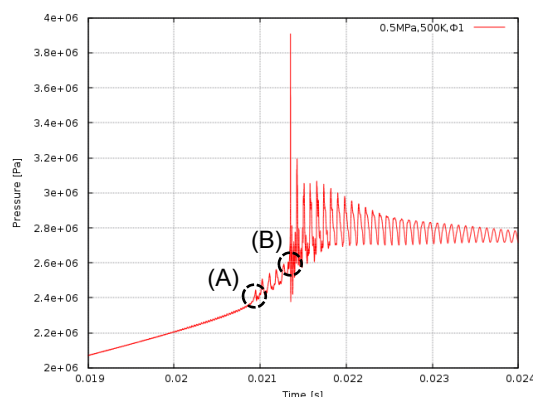
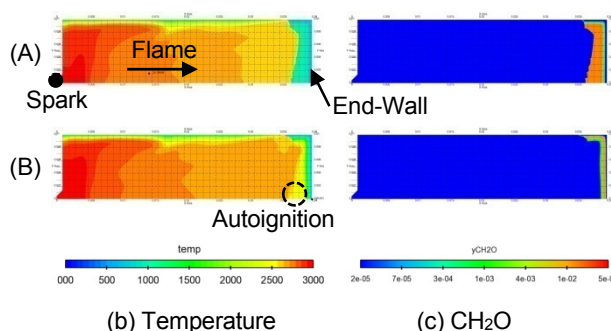


Fig. 10 Direct Photography Results



(a) Pressure History at End-Wall



(b) Temperature (c) CH₂O

Fig. 11 Simulated Results

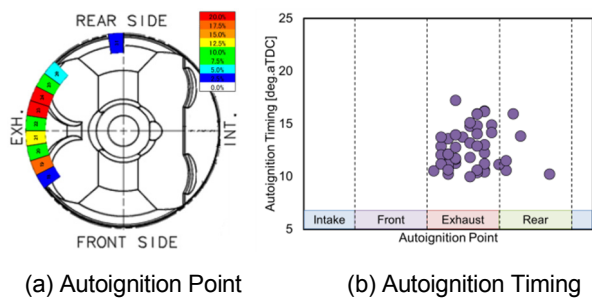


Fig. 12 Measured Results

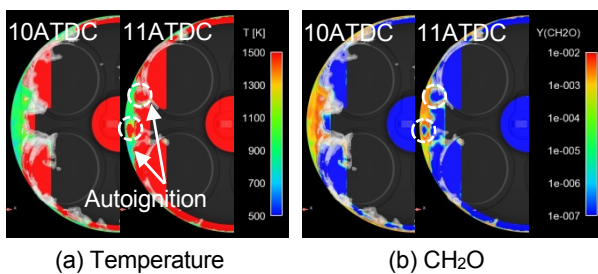
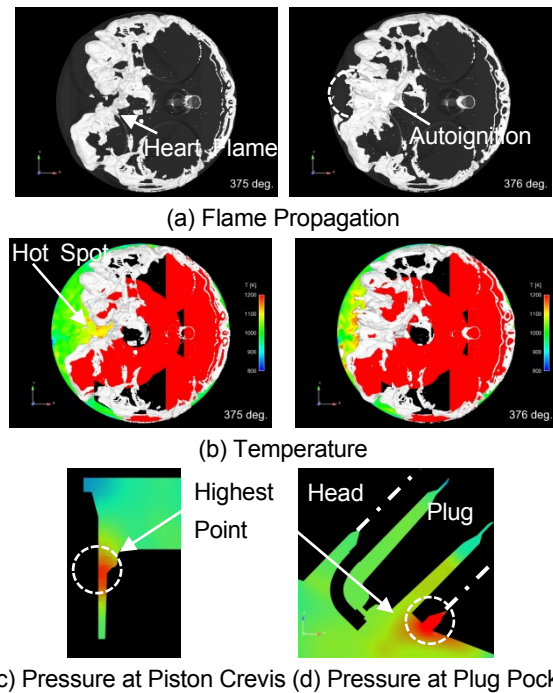


Fig. 13 Simulated Results at Exhaust Area

4. 燃焼予測技術の適用効果

SPCCIにより実用運転範囲の熱効率向上を実現するSKYACTIV-Xでは、SIで運転する高速高負荷域のノッキング抑制が主要課題となる。本章では、前述の予測技術を用いてノッキング現象を分析し、抑制の方向性を確認した事例を紹介する。

開発段階の試作エンジンでは、回転速度5000rpmの全負荷で、1000サイクル中に数回強いノッキングが観察された。強いノッキングがおこるサイクルは、共通して熱発生時期が過進角状態であったため、計算では点火タイミングを進角させて現象を再現した。強いタンブル流を利用する高速高負荷域では、燃焼開始時点でもタンブル流が残存するため、点火後にハート型火炎が形成される (Fig. 14(a))。火炎に挟まれた未燃混合気部は高温になり (Fig. 14(b))、この温度上昇が自着火を引き起こす。この局所的自着火で発生した圧力波は、ピストンクレビス (Fig. 14(c))・プラグポケット (Fig. 14(d)) のような狭い空間で増幅されるため、溶損・破損の原因となる。これらの結果から、圧縮上死点で残存するタンブル流を崩壊させ球状火炎を形成する、未燃混合気部が形成される排気側の混合気分布を制御して自着火しにくい状態にする、自着火で発生する圧力波が狭い空間に伝ばしにくい形状にする、ことをノッキング抑制の方向性と定めた。この指針に基づき開発を進めることで、ガソリンエンジンがもつ気持ちのよい高回転の伸びを実現した。本予測技術はSPCCIの開発にも適用し、SKYACTIV-Xは高い動力性能と優れた環境性能を実現した。



(c) Pressure at Piston Crevis (d) Pressure at Plug Pocket

Fig. 14 Simulated Results

5. おわりに

基礎研究による現象解明を通じて、SKYACTIV-Xのモデルベース開発を主導する燃焼予測技術を構築した。流動・噴霧予測技術では物理モデルの修正・格子サイズの最適化で適用範囲を拡大し、燃焼予測技術では素反応を考慮することで自着火予測を可能にした。今後も産学連携を強化し、内燃機関の理想追求に向けモデル主導での飽くなき挑戦を続けていく。

参考文献

- (1) IEA/ETP Energy Technology Perspectives 2015, pp. 45, Fig. 16
- (2) 佐藤ほか：SKYACTIV-GにおけるCAEの活用、[マツダ技報, No. 29, pp. 47-52 \(2011\)](#)
- (3) 横畑ほか：SKYACTIVエンジンの性能開発に活用したMBD、[マツダ技報, No. 31, pp. 54-59 \(2013\)](#)
- (4) S. Moon et al. : Governing parameters and dynamics of turbulent spray atomization from modern GDI injectors, *Energy*, Vol. 127, pp. 89-100 (2017)
- (5) R. Payri et al. : Diesel nozzle geometry influence on spray liquid-phase fuel penetration in evaporative conditions, *Fuel*, Vol. 87, pp. 1165-1176 (2008)
- (6) H. Luo et al. : Microscopic behavior of spray droplets under flat-wall impinging condition, *Fuel*, Vol. 219, pp. 467-476 (2018)
- (7) H. Terashima et al. : Mechanisms of strong pressure wave generation in end-gas autoignition during

knocking combustion, Combustion and Flame, Vol. 162, pp. 1944-1956 (2015)

- (8) 佐藤ほか：ノッキング振動を伴わない末端ガス自着火燃焼モード，第55回燃焼シンポジウム講演論文集，No. B313 (2017)
- (9) 伊藤ほか：定容容器を用いた高温高圧条件におけるエンドガス局所自着火現象の解析，第55回燃焼シンポジウム講演論文集，No. B324 (2017)

■ 著 者 ■



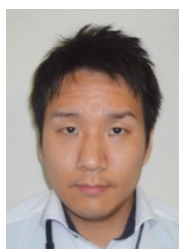
河野 通治



本田 雄哉



和田 好隆



上村 匠



植木 義治



横畑 英明