

特集：モデルベース開発

11

SKYACTIV エンジンの性能開発に活用した MBD

MBD Applied for the Development of SKYACTIV Engines

横畑 英明*1

Hideaki Yokohata

田所 正*4

Tadashi Tadokoro

佐藤 圭峰*2

Kiyotaka Sato

小林 謙太*5

Kenta Kobayashi

和田 好隆*3

Yoshitaka Wada

植木 義治*6

Yoshiharu Ueki

要約

SKYACTIV エンジン(SKYACTIV-G 及び SKYACTIV-D)は、従来に比べてはるかに高度に燃焼をコントロールして出力、燃費ともに高い性能を実現した⁽¹⁾⁽²⁾。この開発は従来型の実験中心の手法では困難であり、実験と計算モデルをうまく組み合わせた「モデルベース開発」(MBD: Model Based Development)への変革が不可欠であった。マツダでは構想設計、詳細設計の各段階で実用的に使えるモデルの開発を進め、MBDを活用してSKYACTIV エンジンを世の中に送り出すことができた。

Summary

SKYACTIV engines (SKYACTIV-G and SKYACTIV-D) achieve high power and low fuel consumption by controlling a far more complex combustion than in conventional engines. The conventional development approach, which depends on experimental results, couldn't realize such a sophisticated technology. For this reason such approach needed to be replaced with Model Based Development (MBD) applying both experiment results and CAE results. Mazda improved the accuracy and efficiency of CAE process to create an environment for MBD before being able to implement MBD in conceptual and detailed designs. Consequently, Mazda was successfully able to bring SKYACTIV engines into the world.

1. はじめに

SKYACTIV エンジンの目指した出力・燃費性能は、従来の延長線上の開発手法では実現が困難であった。今までになく複雑な開発をやりきるために、マツダでは多くのCAE (Computer Aided Engineering) の解析技術を開発し、CAEツールつまりモデルと実験をうまく活用したMBDでエンジン諸元や細かな形状を決定した。本稿ではこうしたMBD技術について概要を説明する。

2. エンジン性能予測における MBD の必要性

エンジンの設計は、車両としての性能や搭載性も考慮して吸排気管長など大きな諸元を決定する企画・構想設計段階から、ピストン形状など細かい部品の形状を決定する詳細設計段階に至るまで、多くの検討が必要である。Fig. 1に

エンジン開発のV字プロセスを示すが、左バンクでの設計により図面が完成した後、右バンクで実機評価を行う。実機評価で目標が未達成であると左バンクに戻らざるを得ず、開発期間、開発工数ともに大きな損失になる。特にSKYACTIV エンジンは、低速域から高速域まで高い出力性能と燃費性能を達成する必要があるため、従来よりも困難な開発が予測された。そのため、左バンクの開発を充実させることが重要なポイントであり、従来のような実験中心の試行錯誤的な開発から、モデルを使ってメカニズムをきちんと把握した上で多くの諸元の最適化を机上で行う開発へと変革を進めた。

具体的には吸排気系長さといった大きな諸元を決める構想設計段階では、吸排気管を長さや径で表現する1次元サイクルシミュレーション(1Dモデル)もしくは燃焼室を容積

*1, 3~6 エンジン性能開発部
Engine Performance Development Dept.

*2 技術研究所
Technical Research Center

変化で表現する0次元燃焼シミュレーション (0Dモデル) を用いた。また、ピストンなど細かい形状を決定する詳細設計段階では3次元シミュレーション (3Dモデル) を用いた (Fig. 1)。更にそれらの効率的活用のため解析実行の自動化システム⁽³⁾を開発し、机上での検討数を大幅に増やした。

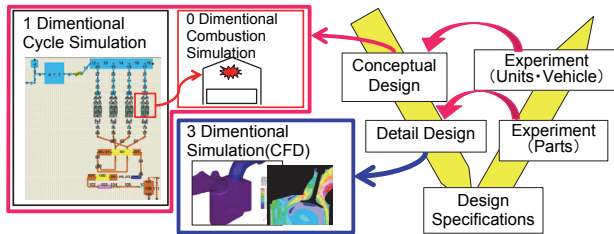


Fig. 1 V-process of Engine Development

例えばSKYACTIV-Dでは、高価なNO_x後処理装置なしにEuro6の自動車排ガス (EM) 規制をクリアし、同時に高トルク、低燃費を実現している。こうした性能はエンジン回転数、負荷に応じてターボチャージャやEGR (Exhaust Gas Recirculation) パルプなどの切り替えを細かく行い、燃料の噴射パターンを大幅に変えて、空気量、不活性ガス量、燃料量を常に最適にすることで実現した。SKYACTIV-Dのように複雑なエンジンで性能を出し切るためには、開発初期から各種性能を満足させる燃焼を考えながら、ターボチャージャの選定や吸排気管、燃焼室の諸元設定を行うことが極めて重要である。この膨大な数の検討を実機エンジンの試作だけに頼ることは困難であるため、構想設計段階でのMBDは重要である。

構想設計段階のあとは詳細設計段階になる。この場合もMBDが高性能化の鍵を握る。例えばSKYACTIV-Gは、従来にない高圧縮比を採用したガソリン直噴エンジン (DI: Direct Injection) であり、高出力・低燃費を生み出すポテンシャルを持つ。しかし、それだけに開発が難しい。例えば燃料を筒内に噴射する際、少しでも筒内流動と燃料噴射パターン、燃焼室形状の組み合わせが適切でないと、燃焼が悪化して性能が大幅に低下する。つまり、高性能を生み出すためには、詳細形状の最適化検討が必須であり、机上で多くの仮想実験を行う必要がある。

このように、SKYACTIVエンジンの開発においては、構想設計段階でも詳細設計段階でも、MBDが重要なポイントであった。机上での検討を充実させるには実用的な予測精度が必要不可欠であるが、当初は十分なレベルになかった。そのため、最初に予測技術の精度を大幅に高めるための開発を行った。並行して、多くの検討を行うために解析効率を向上させる開発も行った。こうして確立した解析技術と実験を組み合わせることでエンジンの内部で起きている現象を解明し、その知見を活用して諸元、形状を決めてきた。これ以降、各段階について詳細に述べる。

3. 構想設計段階でのモデルの活用

エンジンの出力・燃費・EMは、筒内の温度、圧力、不活性ガス量などに起因する着火性や燃焼速度と、吸入する空気量で多くの部分が決まる。これらは、エンジンの吸排気管諸元、圧縮比、バルブタイミングなどに大きく影響を受ける。こうした諸元を構想設計段階に机上で検討するために、0Dもしくは1Dモデルが一般的によく活用される。3Dモデルに比べて計算時間が短く多くの計算が可能なることから、大きな諸元決定には欠かせないモデルである。従来からこうした手法は活用されていたが、SKYACTIVエンジンの開発においては、高精度な検討が必要なため、従来モデルをそのまま使うことはできなかった。

例えばディーゼル燃焼の場合、燃料の着火や燃焼速度は、燃焼室内の温度、圧力、燃料の噴霧形態や筒内流動により大きく左右される。こうした燃焼の検討を行う場合、廣安らが開発したHIDECS⁽⁴⁾という燃焼を計算する0Dモデルを活用することができる。0D計算でありながら、噴霧を疑似的に3Dで解くことができるため、燃焼計算には有効である。SKYACTIV-Dでは、出力・燃費・EMや音の両立を図るため、燃料を1サイクル中に一度に噴く一括噴射に加え、パイロット噴射、遠隔パイロット噴射、アフタ噴射を組み合わせる (Fig. 2)。

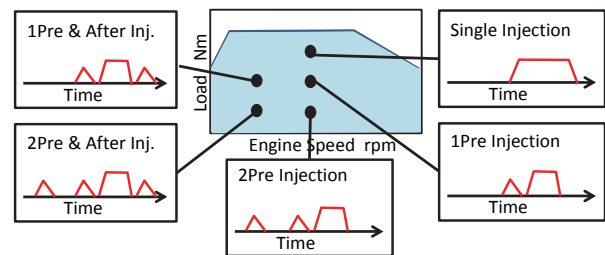


Fig. 2 Injection Concept of SKYACTIV-D

しかしHIDECSは一括噴射を対象に作られているため、こうした複雑な燃料噴射パターンに適用するには精度が十分ではなかった。例えばパイロット噴射では、噴射した燃料が圧縮されて化学反応が急速に進み、実際よりも急激な圧力上昇になるという予測精度の問題が起きていた (Fig. 5(a))。こうした予測精度悪化は、燃焼という現象が複雑な化学反応の組み合わせであることに起因する。例えば Fig. 3 に、ある温度、圧力における燃料の着火遅れ時間を示す τ -mapと呼ばれる燃焼特性を示す。筒内温度圧力履歴の一括噴射のラインとパイロット噴射が通るラインを比べると、後者では温度が上昇すると着火が遅れる、という負の温度依存領域を通る。こうした現象は従来のHIDECSに組み込まれた簡易な化学式を使った予測では再現できなかった。そこで、燃焼過程を細かく再現する化学反応速度論に基づく化学反応解析 (以下、詳細化学反応モデル) を使った着火遅れ時間予測技術を新

たに開発することで複雑な燃焼パターンによる燃焼予測に対応した⁽⁵⁾。

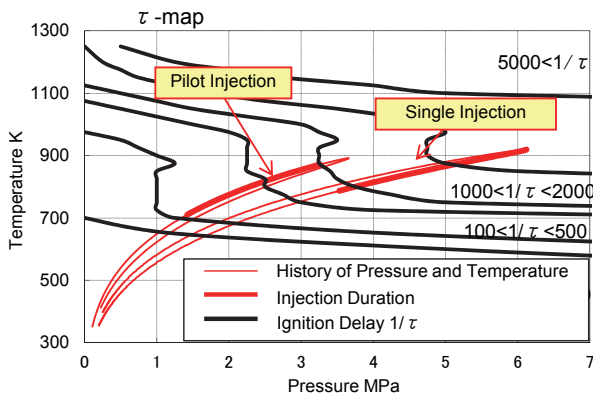


Fig. 3 Ignition Delay Map (τ -map)

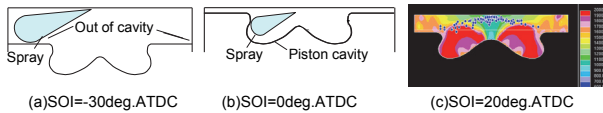


Fig. 4 Schematic (a) (b) and CAE (c) of the Spray Injected to Inside and Outside of Piston Cavity Area

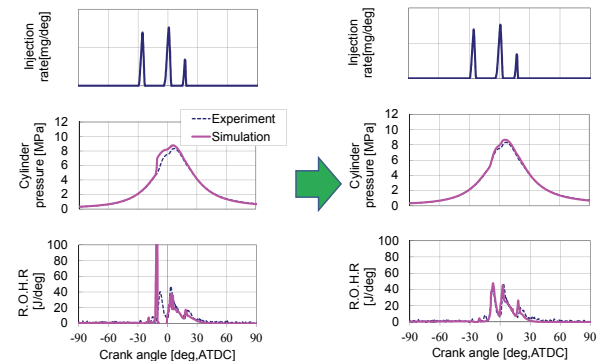
こうした詳細化学反応を用いた改良に加え、0Dで表現の難しい形状の影響も検討を可能にした。SKYACTIV-Dは、遠隔パイロット噴射やアフタ噴射を採用し、燃料を噴射する時期が幅広い。例えばFig. 4(b)の噴射開始時期 (SOI : Start of Ignition) = 0deg.ATDCの場合はピストンキャビティ内に燃料を噴射するが、Fig. 4(a) (SOI=-30deg.ATDC) ではキャビティ外に燃料を噴射することになり、Fig. 4(c) (SOI = 20deg.ATDC) では燃焼中の熱いガスの中に燃料を噴射ことになる。これらを0Dモデルで考慮するため、まず3Dモデル、具体的には空気の流動や噴霧を計算する流れ解析 (CFD : Computational Fluid Dynamics) を活用し、現象のメカニズムを解明した。その上で、代表的な回転数・負荷・燃料噴射パターンで3Dモデルの計算を行ってその結果を関数化し、更に0Dモデルに組み込むことで精度改善を行った。

こうした結果のうち、パイロット噴射で精度改善を行った例をFig. 5(b)に示す。改良前の予測 (Fig. 5(a)) ではパイロット噴射を行った場合に圧縮上死点前に急激に燃焼が立ち上がっているが、改良後はそうした反応は起きず、大幅な精度改善が実現できた。こうした燃焼予測の精度向上により、燃料噴射パターンの違いを燃焼の違いとして正確に表現することが可能になった。

上述のように燃焼の予測精度は大幅に改善できたが、実際にエンジンを車両に載せて走る場合には、ターボチャージャーやEGRバルブ切り替えによる導入空気量の遅れや、燃料噴射パターンの組み合わせにより、希薄状態や過濃状態になりやすく、失火やEMの悪化を招きやすい。つまり、吸

排気系の制御と燃焼を切り離して考えることはできない。そこで、上述の詳細化学反応燃焼モデルをマツダ内製の1DモデルGSP⁽⁶⁾に組み込んで燃焼と同時に吸排気計算を可能にした。更に、マツダ内製の車両モデルPT-VTES⁽⁷⁾及び制御モデルと組み合わせ、車重やギヤ比、制御などを考慮した上で燃焼挙動を検討する解析技術を開発し、吸排気・燃焼系諸元の検討を行うことが可能になった⁽⁸⁾ (Fig. 6)。Fig. 7にEMモードを走行した時の予測・実測結果を示すが、よく一致していることがわかる。

従来は実車での評価に頼らざるを得なかった過渡運転時の車の挙動も机上で検討が可能になり、実機と机上の組み合わせで諸元の最適化を図り、高品質な性能を実現できた。



(a) Previous model (b) Improved model

Fig. 5 Comparison of Heat Release Rate and Cylinder Pressure between Experimental and Simulated Result

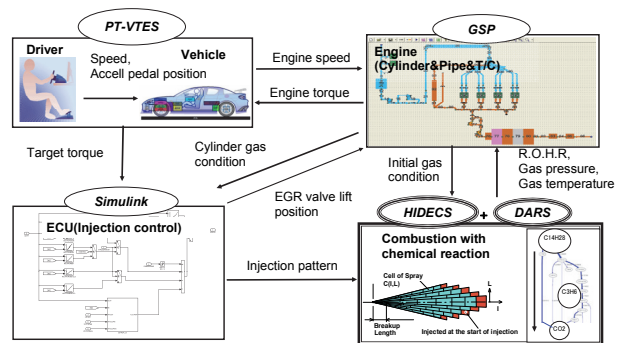


Fig. 6 Schematic of Total Transient Analysis System

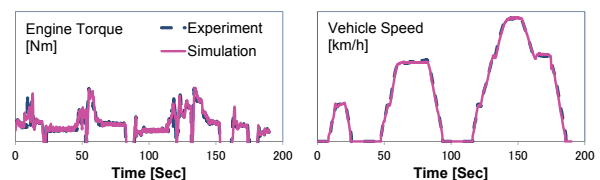


Fig. 7 Comparison of Transient Analysis Result and Experimental Result

4. 詳細設計段階でのモデルの活用

一般的に燃焼室の詳細な形状はエンジンの性能に大きく影響するが、特に高性能を狙うSKYACTIVエンジンの場合、

影響は大きい。例えばSKYACTIV-Gは燃焼室内に直接燃料を噴射するDIエンジンであり、従来にない高圧縮比を実現するため、Fig. 8(b)に示す独自のピストン形状を採用している。従来型のポート噴射エンジンでは燃焼室内の混合気分布はほぼ均質になるのに比べ、DIは不均質性が高い。この不均質性はEM悪化につながるほか、火花点火時期における点火プラグ付近の混合気が薄ければ着火性が悪化し、燃焼安定性が極端に悪化するため、設計が極めて難しい。例えばFig. 11(a)は燃料噴射時期と燃焼安定性の関係を示したものであるが、少し燃料噴射時期が変わると極端に燃焼安定性が悪化することがわかる。商品性を確保するために、さまざまな条件においても問題なく運転できるようにロバストな燃焼特性にする必要があり、そのためには形状の最適化が必要である。

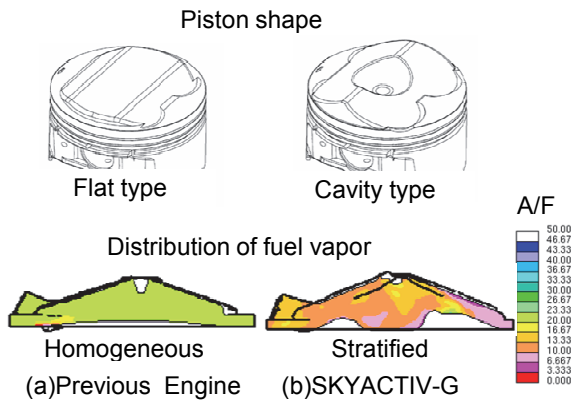


Fig. 8 Combustion Chamber of SKYACTIV-G

従来の形状検討は3Dモデルの精度不足のために、実験による試行錯誤を行うしかなかった。SKYACTIVエンジンでは、こうした状況をブレークスルーするために、モデルの精度を大幅に向上させ、メカニズムを把握して形状を決めてきた。燃料噴霧解析を事例に説明する。

筒内の現象は大変複雑であるため、物理現象を全て理論式で再現することは難しく、乱流モデルに代表される物理モデルを使った簡易化をせざるを得ない。こうした現状の3Dモデルでは、実機計測結果を手本としてパラメータチューニングを行って精度を向上させることが基本である。その際、時々刻々変化する燃焼室内に燃料を噴射する、という複雑さを緩和するため、まず定積の容器でインジェクタの基礎計測を行う。その後噴霧モデルパラメータの同定を行い、インジェクタの特性を精度良く再現する。この場合、一般的には、常温・常圧の定容器にインジェクタをセットして燃料を噴射し、それを高速度カメラで光学撮影を行い、噴霧先端到達距離や噴霧の粒径を計測する。しかし、SKYACTIV-Gでは燃料を吸気行程から圧縮行程までさまざまなタイミングで噴射して燃焼をコントロールするため、例えば圧縮行程での噴射では高温・高圧下での燃料噴射となる。こうした条件の場合、噴射された燃料は早期に蒸発

するが、従来の光学撮影では蒸発していない液滴と燃料蒸気を同時に計測することが不可能なため蒸気の挙動が不明で、3Dモデルの精度は大幅に低下する。そのため、広島大学との共同研究で、高温・高圧下において蒸気相と液相を分離して計測する手法の開発から始めた。その結果、高圧容器とLAS法 (Laser Absorption Scattering technique : 2波長レーザー吸収散乱法) (9) (Fig. 9) という手法により計測が可能になり、常温・常圧から高温・高圧まで各種条件下で噴霧挙動を正確に計測できるようになった。

こうした計測が可能になったことから、モデルの精度も大幅に向上できた。例えば、Fig. 10(b)に予測精度改善前と改善後の結果の比較を示す。改善前では液相の挙動は実測と合っているが、蒸気相の挙動が大きく異なる。改善後は液相・蒸気相ともによく一致していることがわかる。

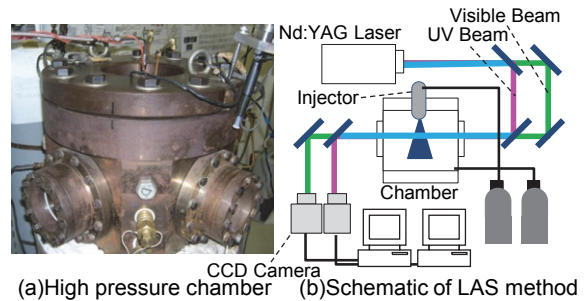


Fig. 9 High Pressure Chamber and LAS Method

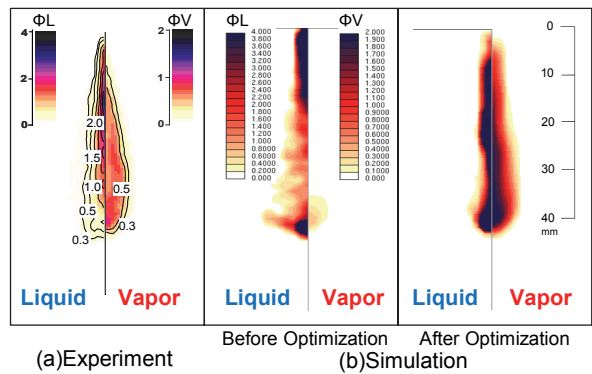


Fig. 10 Liquid and Vapor Phase Equivalence Ratio Distribution (Comparison of Experiment and Simulate Result)

これらの基礎実験で精度改善を行ったモデルをエンジン性能予測に活かした事例をFig. 11に示す。噴霧レイアウトの異なったTypeAとTypeBというインジェクタでの燃焼安定性の実測値と予測値の比較結果であるが、改善後は実機の結果と解析結果の傾向が良い一致を示し、相対比較が十分に可能なことがわかる。SKYACTIVエンジンの開発においては、こうした精度を大幅に向上させた解析技術を用い、筒内流動・噴霧挙動に大きな影響を及ぼすポート形状、ピストン形状、インジェクタの噴孔レイアウトなどを決めていった。

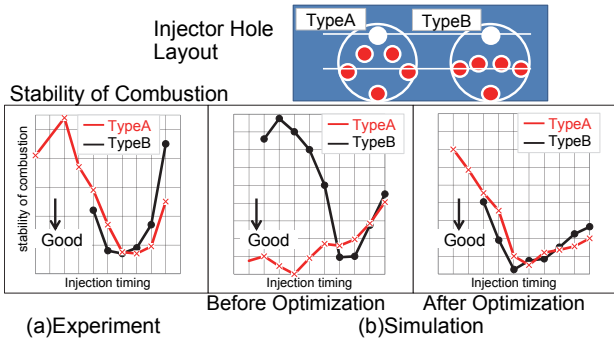


Fig. 11 Difference of Stability of Combustion between Injector Type A and Type B (Effect of Nozzle Holes Layout)

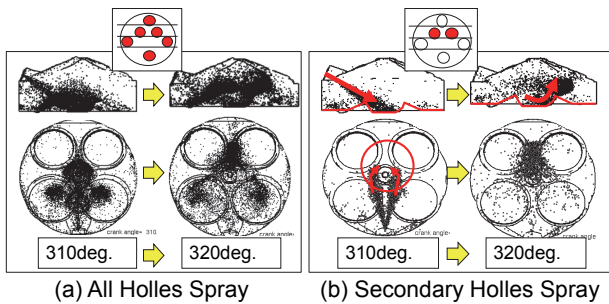


Fig. 12 Spray Droplet Distribution

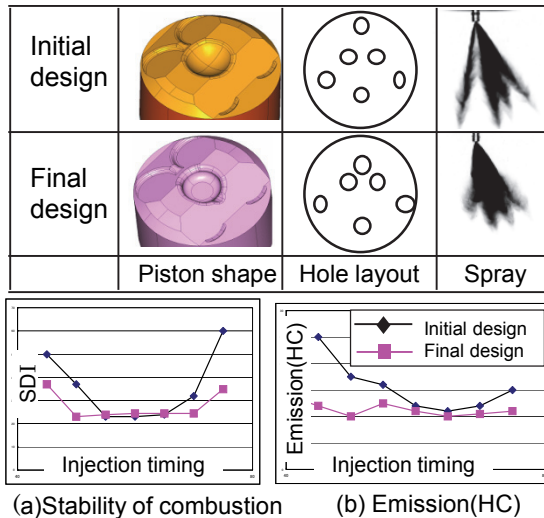


Fig. 13 Improvement in Robustness by the Shape Optimization

ただし、インジェクタの噴霧レイアウトとピストン形状だけでも、組み合わせは無数にあるため、最適値を見つけることは難しい。そのためインジェクタの噴孔の1つ1つの役割を解明しながら開発を進めた。実機の計測では各噴孔からの噴霧の挙動を切り分けて考えることは困難であるが、モデルなら比較的容易である。例えばFig. 12(a)に全ての噴孔からの噴霧結果を表示したが、これでは各噴孔の役割がわからない。Fig. 12(b)に2段目から噴射された燃料液滴だけを表示させたが、ピストンキャビティ部から点火プラグ

付近に向かって燃料粒子が回り込み、プラグに可燃混合気を形成させる役割を持つことがわかる。このように、1つ1つの噴霧の持つ役割を明確にしなが、噴霧レイアウト・ピストン形状を決めていった。

また、市場におけるさまざまな運転条件や、経年劣化、製造上のわずかなバラツキにより、性能が低下することは防がなければならない。そこで、モデルを用いてロバスト性を確保可能な形状を探っていく。例えばインジェクタのわずかな製造バラツキが噴霧挙動に与える影響を網羅的に解析し、バラツキに強い噴霧レイアウトを決めていった。こうした検討により、開発当初に比べ性能が向上し、ロバスト性確保可能な形状を見つけることができた (Fig. 13)。

5. MBD を支える効率化技術

極めて複雑な燃焼で高性能を達成したSKYACTIVエンジンの性能開発では、従来にない膨大な量の解析実行が必須であった。複雑な現象を扱う3Dモデルの実行は、スーパーコンピュータを活用することもあり、CFDの知識の他にシステムの知識が必要である。それに加えて、モデルの作成、解析実行、結果処理の操作自体が難しい。更に、解析モデルの作成や条件設定にはさまざまなノウハウが必要である。こうした難しさから、精度の良い結果を出すためには長年の経験を積む必要があり、解析実行が可能なメンバは限られる。これでは十分な検討ができないため、解析の大幅な効率化を図る必要があった。そこで市販のCFDソルバを使って精度を確保した上で、マツダの解析業務を対象にして操作を簡易化し、更に多くの解析ノウハウを織り込んだ設計者向けCFDシステム (PT-ECS : Powertrain Easy CFD System) を独自に開発した⁽³⁾ (Fig. 14)。このシステムはWindows PC上からスーパーコンピュータの存在自体を意識せず、解析ソフトの複雑な操作なしにCFD計算用データを作成、実行して結果を見ることができ、操作方法の習得時間はほとんど必要ない。解析ノウハウを組み込んでいるため、経験が浅くてもベテランと同様な結果を出すことができる。このシステムは2002年から量産開発に適用して、3Dモデルを使った開発を効率化している。

従来のPT-ECSでは一般的な定常流及び非定常流の解析を対象にしていたが、SKYACTIVエンジンの開発にあたり、ピストンの動きなどを表現する移動メッシュを伴う筒内流動や、噴霧、燃焼解析にも活用できるよう機能を拡張した。また、自動実行の機能も大幅に強化して、従来に比べて約10%程度という少工数で解析が実行できるようになった⁽¹⁰⁾。例えば前述の噴霧挙動を液相・蒸気相ともに精度良く予測するためには、分裂計算など9つのパラメータの同定が必要であり (Fig. 15)、従来は結果算出に200日以上かかっていた。こうした検討が、現在はPT-ECSを使い約5日で完了する。この効率化システムがあって初めて膨大な量の計算実

行が可能になり、モデルがエンジン開発の中に完全に定着して多くの諸元、形状を机上で決めることができたといえる。

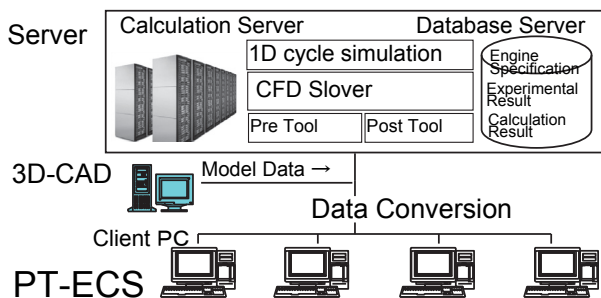


Fig. 14 PT-ECS System Constitution

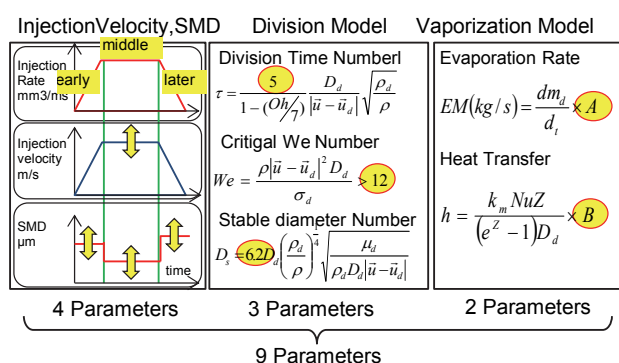


Fig. 15 Spray Optimizational Parameter

6. おわりに

SKYACTIVエンジンの出力・燃費性能は、従来型の開発方法では実現が困難であったため、モデルの予測精度を大幅に向上させ、自動化技術により効率を大幅に改善した。こうして実用性を増したモデルと実験を組み合わせたMBDを構築することで、燃焼のメカニズムを把握して諸元、形状を最適化し、高性能なエンジンを生み出すことができた。

マツダでは20年以上前からモデルの開発を行ってきたが、実際のエンジン開発に十分貢献できない時代が長く続いた。しかし、地道な基礎実験の積み重ねと高度なモデルの開発で予測精度を大幅に向上させることで、SKYACTIVエンジンの開発にとって、モデルがなくてはならないものになった。これらは、紙面の都合上共著に載せられなかった多くの解析メンバ、設計・実験研究メンバ、システム開発メンバ、また、広島大学をはじめとする多くの大学及びソフトウェアメーカーが力を合わせて技術開発を進めてきた結果である。今後は更なる高性能エンジンの開発に向け、力を合わせて開発を続けていく予定である。

参考文献

- (1) 富澤ほか：新型デミオのエンジン技術，マツダ技報，No.29, pp.8-13 (2011)
- (2) 森永ほか：SKYACTIV-D エンジンの紹介，マツダ技報，No.30, pp.9-13 (2012)
- (3) 横畑ほか：設計者向けCFDシステム (PT-ECS) の開発，マツダ技報，No.21, pp.180-185 (2003)
- (4) 廣安ほか：“直接噴射式ディーゼル機関の燃焼モデルと性能予測：第1報，燃焼モデル”，日本機械学会論文集. B 編, No.48-432, pp.1606-1613 (1982)
- (5) 田所ほか：“0次元現象論モデルを用いたディーゼル燃焼予測技術の構築”，第 21 回内燃機関シンポジウム, No.B3-5, pp.321-326 (2010)
- (6) 大西ほか：“コンピュータシミュレーションによる吸排気性能予測技術の開発”，マツダ技報 1988, No.6, pp.84-93 (1988)
- (7) 平松ほか：パワートレイン構想設計の Virtual Testing 技術の紹介，マツダ技報，No.22, pp.50-55 (2004)
- (8) 小林ほか：“詳細燃焼反応を考慮した DEsim による車両過渡性能の予測”，第 23 回内燃機関シンポジウム, No.A1-12 (2012)
- (9) Yamakawa, M. et al., Quantitative Measurement of Liquid and Vapor Phase Concentration Distributions in a D.I. Gasoline Spray by the Laser Absorption Scattering (LAS) Technique, SAE Paper, 2002-01-1644, pp.1-13 (2002)
- (10) 佐藤ほか：DISI エンジン噴霧モデルの最適化手法の開発，マツダ技報，No.25, pp.134-139 (2007)

■ 著 者 ■



横畑 英明



佐藤 圭峰



和田 好隆



田所 正



小林 謙太



植木 義治