

特集：モデルベース開発

14

## SKYACTIV-D i-stop 開発における MBD 適用事例の紹介

### Introduction of MBD for SKYACTIV-D i-stop Development

中本 仁寿*1 Yoshihisa Nakamoto	中島 宏幸*2 Hiroyuki Nakashima	朝倉 浩之*3 Hiroyuki Asakura
寺岡 陽一*4 Yoichi Teraoka	田賀 淳一*5 Junichi Taga	

#### 要約

SKYACTIV-D に搭載した i-stop は、確実な着火を可能にする多段プリ燃焼制御技術及び圧縮ストロークを十分確保するためのエンジン停止時ピストン位置制御技術により、SKYACTIV-G 搭載の i-stop と同等の再始動時間を実現している。

本稿では、SKYACTIV-D i-stop をマニュアルトランスミッション車に搭載する上で課題となった DMF (Dual Mass Flywheel) の共振現象による再始動時間の問題について、MBD (モデルベース開発) を適用した内容について紹介する。

#### Summary

For SKYACTIV-D i-stop, shortening the restart time of the engine is focused on. A multistage pre-fuel injection combustion control technology that secures ignition and a piston position control technology at engine stops that secures adequate compression strokes were developed, which enable equivalent engine-re-start time to that of the SKYACTIV-G i-stop.

Engine re-start time of the SKYACTIV-D i-stop installed on MT model was deteriorated due to DMF resonance phenomena, and the solution by the model-based development was shown in this paper.

#### 1. はじめに

停車時にエンジンを停止し、発進時に自動でエンジンを再始動するアイドリングストップ技術は、比較的シンプルな構成で高い燃費改善効果を得ることができ、費用対効果の高い燃費改善技術であり、現在ではほとんどの自動車メーカーから採用車両が販売されている。しかしながら、以前のアイドリングストップ技術では、再始動時間が長いために発進遅れが生じ、実交通流下で使い難く市場での展開は限定的であった。これに対し、マツダでは燃焼始動により再始動時間を大幅に短縮し使い勝手を改善した i-stop を開発<sup>(1)</sup>、2009 年発売のアクセラに搭載し高評価を得たことを受け、順次採用車種を拡大してきた。

このような状況から SKYACTIV-D i-stop 開発では、再始動時間の短縮を第一目標とし、圧縮着火機関で再

始動時に最初の燃焼気筒である停止時圧縮行程気筒から燃焼を開始できる技術の確立を目指した。その結果、低圧縮比 ( $\epsilon=14.0$ ) でも確実な着火を可能にする多段階プリ燃焼制御技術及びエンジン停止位置制御技術を開発し、SKYACTIV-G i-stop と同等の再始動時間を実現した。一方で、SKYACTIV-MT との組み合わせにおいて、ディーゼルエンジン特有のトルク変動に伴うトランスミッション歯打ち音低減のため採用した DMF の始動時共振現象を回避するため、スタータ駆動時間を長くせざるを得ない問題が発生した。この問題解決のために DMF 付きエンジンの再始動挙動を再現できる CAE モデルを構築し、相反する再始動時間短縮と DMF 共振現象の回避を同時に満足するための再始動時燃焼制御の開発及び共振現象を最小化する DMF 仕様の決定にモデルベース開発を適用した。

\*1 技術研究所  
Technical Research Center

\*2, 3 ドライブトレイン開発部  
Drivetrain Development Dept.

\*4, 5 パワートレインシステム開発部  
Powertrain System Development Dept.

## 2. SKYACTIV-D i-stop 迅速再始動技術

### 2.1 システム構成

Fig. 1にSKYACTIV-D i-stopのシステム構成を示す。i-stopシステム特有のデバイスとしては、エンジン停止中でも燃料圧力を保持しエンジン再始動開始直後から燃料噴射できるコモンレールシステム、及びエンジン停止中でもエンジンの位置を正確に検出するための逆転検出可能な回転センサを採用した。

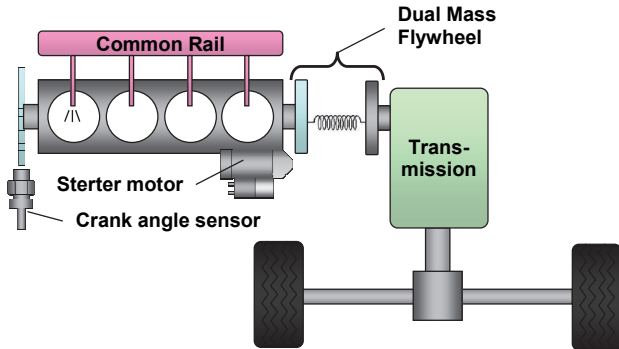


Fig. 1 SKYACTIV-D i-stop System Configuration

### 2.2 再始動方法

一般に、ディーゼルエンジンの始動は、スタータを駆動しエンジンを回転させながら各気筒のピストン位置を特定し、同時にコモンレール圧を上昇させて圧縮行程気筒に燃料を噴射、燃焼させることでエンジン回転数を上昇させていく。そのため、Fig. 2に示すようにスタータ駆動から2~3回程度燃焼させることができないサイクルが存在する。一方でSKYACTIV-Dで採用した一圧縮燃焼始動では、エンジン停止中に圧縮行程途中で停止している気筒（以下、第一圧縮行程気筒）を特定し、その気筒から燃焼を開始するため、SKYACTIV-Gのi-stopと同等の迅速再始動を実現できる。

### 2.3 第一圧縮行程気筒の着火技術

前述のとおり、ディーゼルエンジンで迅速に始動させるためには第一圧縮行程気筒での燃焼が不可欠である。スパークプラグを持たないディーゼルエンジンで筒内に噴射した燃料を確実に着火させるためには、①筒内に着火性に優れた混合気を形成する、②着火に必要な筒内温度、圧力を確保するため第一圧縮行程気筒のピストン停止位置を下死点（BDC）寄りにする、の2点が有効である。

SKYACTIV-D i-stopでは、これらを達成するため、再始動時に燃料を複数回分割して噴射することで着火性を確保する「多段プリ噴射制御技術」と、エンジンの停止過程でオルタネータ負荷を使い回転挙動を制御するとともに、停止直前の筒内の空気量を制御することでピストン停止位置をBDC寄りに制御する「エンジン停止位置制御技術」を採用した。

これらの技術により、第一圧縮行程気筒から確実に燃焼させることができるようになり、アイドリングストップ状態からの再始動時間をSKYACTIV-G i-stopと同レベルまで短縮することができた。以下、一圧縮燃焼始動を実現するために開発した「多段プリ噴射制御技術」、「エンジン停止位置制御技術」について詳細を説明する。

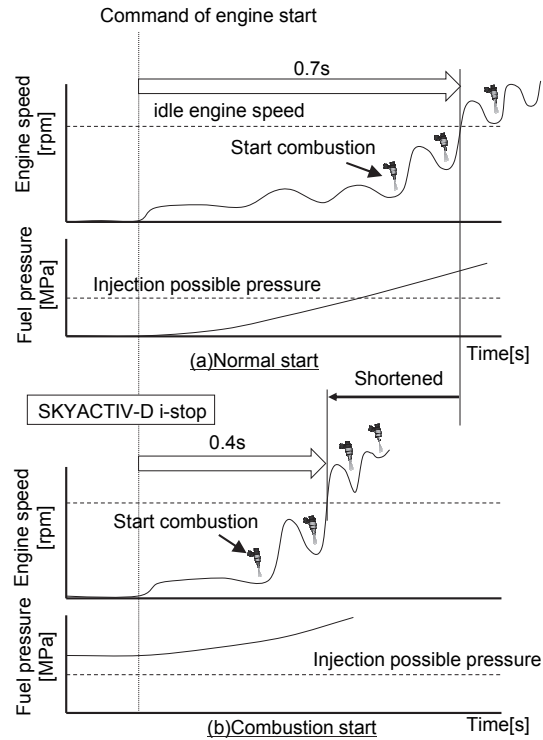


Fig. 2 Comparison of Engine Re-Start Behavior between Normal Start and SKYACTIV-D i-stop

#### (1) 多段プリ噴射制御技術<sup>②</sup>

第一圧縮行程気筒では、通常の燃焼サイクルと比較して圧縮行程途中からの圧縮による低温低圧雰囲気により着火しにくくなる。このような筒内雰囲気確実に着火させるためには、燃料リッチな混合気を長期間維持する必要がある。そのためには、噴霧貫徹力を抑制し、蒸発特性に優れた微粒化の良い噴霧を供給する必要がある。このことを踏まえ、次の多段プリ燃焼制御技術を検討した。

- ① 微粒化の良い噴霧を得るため、エンジン停止期間中コモンレール圧を保持し、多孔タイプ噴射ノズルを用いる。
- ② ピストン燃焼室内に噴霧をトラップできるタイミングで、噴霧貫徹力を抑制した少量の噴射（プリ噴射）を複数回に分けて行うことで、燃焼室内の同じ個所に噴霧を重ね、長く漂う燃料リッチな混合気を形成する。
- ③ プリ噴射による燃料リッチな混合気を上死点（TDC）付近まで維持し着火・燃焼させ、筒内の圧力・温度を上昇させる。その結果、TDC付近で噴射するメイン

噴射を確実に着火・燃焼させ十分な燃焼トルクを得る。

上記の多段プリ燃焼制御技術を用いた際の第一圧縮行程気筒の燃焼可能範囲を評価した結果を Fig. 3 に示す。再始動開始位置が 77deg.BTDC よりも下死点側であれば一定値以上の Pmax が得られており、確実に一圧縮燃焼が可能であることが分かる。

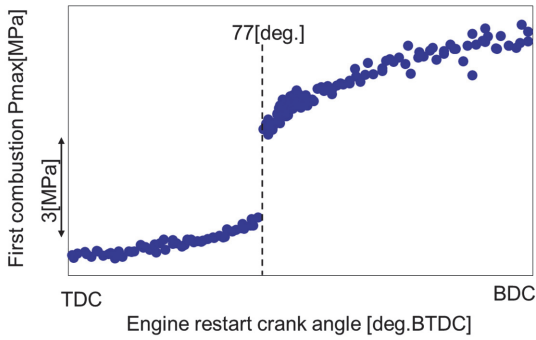


Fig. 3 Restart Possibility Boundary of 1st Compression Cylinder's Combustion with Pre-Combustion

(2) エンジン停止位置制御技術<sup>(2)</sup>

第一圧縮行程気筒での燃焼を確実にを行うための二つ目の要件である、「着火に必要な筒内温度、圧力を十分確保する」には、第一圧縮行程気筒のピストン停止位置を下死点寄りにすることが効果的である。エンジン停止時に第一圧縮行程気筒のクランク角位置を下死点寄りに停止させるには、①エンジンが完全停止する直前の TDC を通過する時のエンジン回転数を低くする、②エンジン停止時の膨張行程気筒の空気量を少なくかつ圧縮行程気筒の空気量を多くし圧縮反力の作用を活用する、の 2 点を実施する必要がある。

エンジン回転数制御にはオルタネータ負荷を利用した。燃料停止直後からエンジン回転数の下降状態を検出し、エンジン停止直前の TDC 通過回転数を予測しながら、目標回転数になるようオルタネータ負荷を調整した。空気量制御では、エンジン停止制御開始直後からスロットルを閉じ停止時膨張行程気筒の空気量を少なくした上で、停止時圧縮行程気筒の吸気行程でスロットルを開け、停止時圧縮行程気筒の空気量だけを増加させるようにした。以上の制御で、再始動時に第一圧縮燃焼可能な位置に確実にエンジンを停止させることができた (Fig. 4)。

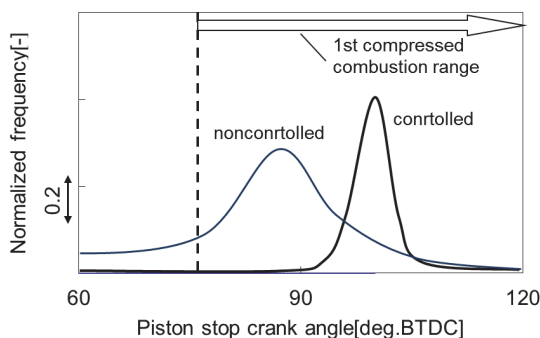


Fig. 4 Effect of Engine Stop Position Control

3. エンジン始動時の DMF 共振現象

3.1 DMF 付きシステム構成の狙い

Fig. 5 に Single Mass Flywheel (以下, SMF) を採用した SKYACTIV-G, 及び DMF を採用した SKYACTIV-D の駆動系模式図を示す。前者では一体構造となっているフライホイール質量を、後者ではクランクシャフト側に締結されるプライマリフライホイールとセカンダリフライホイールに分割し、その間に弾性部材と摩擦部材を配置している。SKYACTIV-D では、DMF を採用することで駆動系のねじり共振周波数を 10~15Hz, 4 気筒エンジンでの回転数で 300~450rpm とし、通常走行中に使用する回転数範囲から外すことで、車両振動性能を改善した。

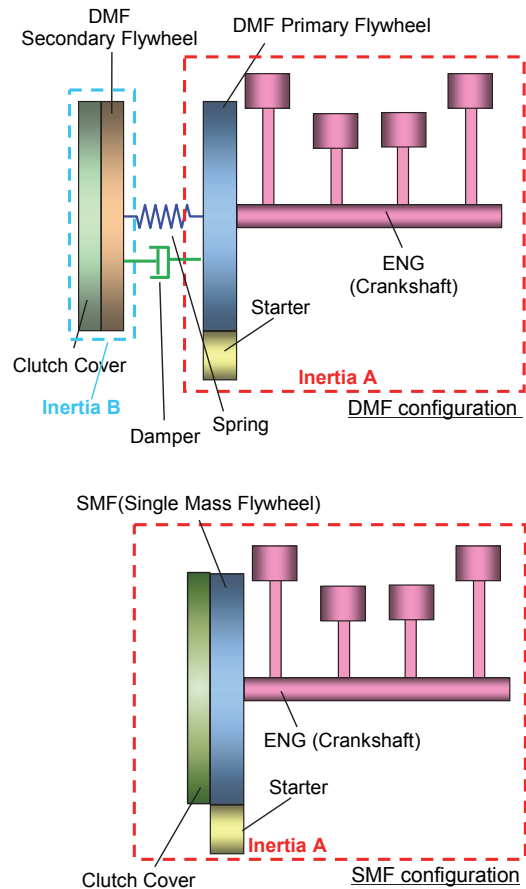


Fig. 5 Comparison of DMF and SMF Configuration

3.2 始動時 DMF 共振現象

前述の駆動系ねじり共振周波数変更の結果、エンジン始動時に駆動系ねじり共振回転数を通過するようになる。この影響で、Fig. 6 で示すように共振回転数以下でスタータ駆動を停止すると、エンジンの燃焼起振力周波数と駆動系ねじり共振周波数とが一致し、共振状態となる。DMF 共振時は、DMF 内部の弾性部材に大きな力が加わることで過大なインパクトトルクが発生し、車体振動の悪化とともに、DMF 本体の信頼性にも著しい悪影響を及ぼす。

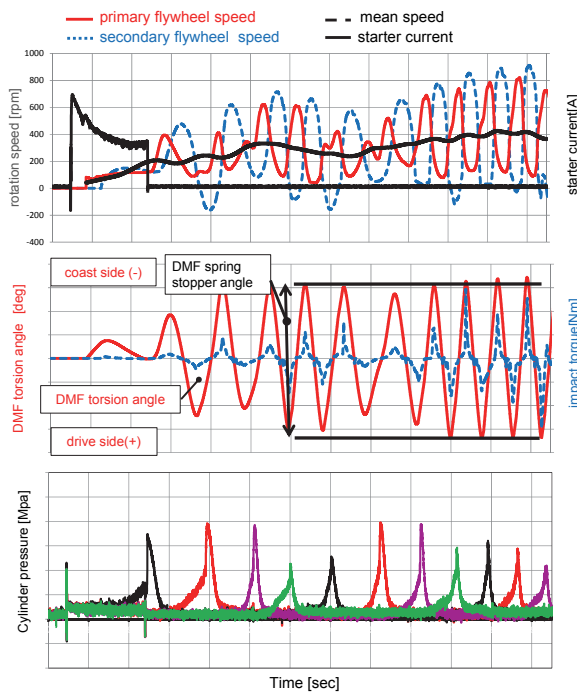


Fig. 6 DMF Resonance Behavior at Engine Start

3.3 始動時 DMF 共振抑制

SKYACTIV-D 迅速再始動には始動時の DMF 共振を回避しながら始動を完了することが不可欠である。Fig. 7 に SKYACTIV-D 迅速再始動の機能系統図を示す。DMF 共振を回避しながら迅速再始動を完了するには、燃焼トルク増大とエンジントルク変動抑制という、相反する性能を同時に満足する必要がある。そのために、①始動時の燃焼時期を制御し、DMF ねじれ角が小さくなるよう制御する、②DMF 仕様を共振現象が最小化するよう設定する、ことが必要である。今回、これらの

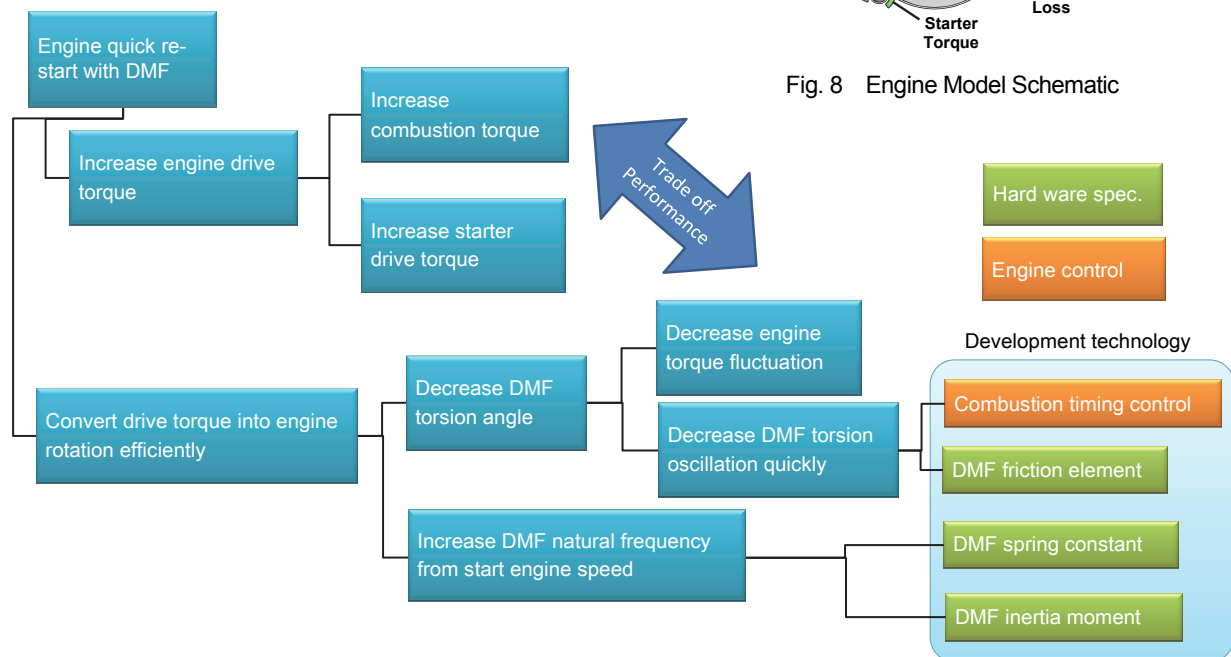


Fig. 7 Quality Function Deployment Diagram of Quick Re-Start System with Diesel Engine

技術を開発するために、再始動時のエンジン挙動を再現するエンジン始動モデルを開発し、始動完了までの各燃焼の着火時期をきめ細かく制御する「着火時期による DMF ねじれ角制御技術」と、DMF 共振を最小化する仕様選定にモデルベース開発を適用した。

4. エンジン始動モデル

4.1 エンジン始動モデルについて

DMF 共振は、起振源であるエンジン燃焼トルクと、応答である DMF の作用による現象のため、エンジンのトルク挙動と DMF のねじり振動発生機構に主眼を置きモデル化を行った。以下、それぞれのモデルについて説明する。

(1) エンジンモデル

エンジンモデルは、燃焼室内の熱発生と筒内圧の上昇、筒内圧をトルクに変換するクランク・ピストン機構を主な構成要素とした。熱発生モデルには Wiebe 関数を用い、燃焼ガスのクランクケースへの漏れや冷却損失を考慮した。構築したエンジンモデルの概要を Fig. 8 に示す。

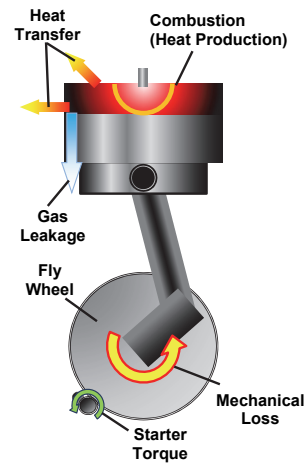


Fig. 8 Engine Model Schematic



## (2) DMF モデル

先述のとおり、DMFは2つのマス（プライマリ／セカンダリフライホイール）が弾性部材と摩擦部材で接続されていることから、Fig. 9 のようにイナーシャ、バネ、摩擦要素を組み合わせてDMFモデルを構築した。

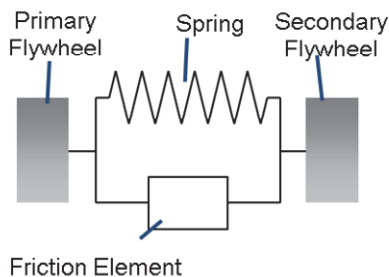


Fig. 9 DMF Model Schematic

## 4.2 モデル精度検証

始動時の実機の回転数、筒内圧、クランク角挙動などが先述のエンジンモデルの挙動と一致するよう燃焼モデルや冷却損失モデルのパラメータを調整した。更にエンジンイナーシャと機械抵抗を適切に設定することで、実機の筒内圧及び回転数挙動を再現することが可能となった。エンジン挙動を再現した結果をFig. 10に示す。再始動時の筒内圧挙動及び回転数挙動を精度良く再現できていることが分かる。

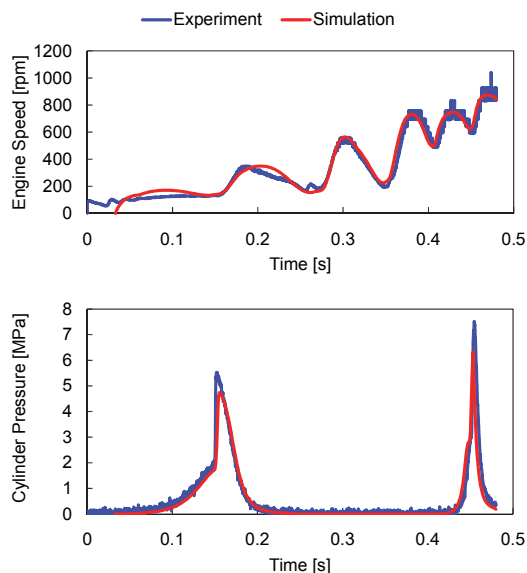


Fig. 10 Simulation Result of Engine Model

## 5. 共振コントロール技術確立

### 5.1 MBDによる共振コントロール技術の検討

#### (1) DMFねじれ角制御技術の開発

先述のエンジン始動モデルを用い、共振が発生する場合の筒内圧とDMFの挙動の違いを明らかにした。評価は、始動完了までの各燃焼の着火時期をモデル上で任意に変更することで行った。結果をFig. 11及び

Fig. 12に示す。DMFが共振する場合（Fig. 11）、DMFのねじれ角の速度（プライマリフライホイールとセカンダリフライホイールの角速度差）が減少しているタイミングで着火が発生する（図中×印）と角速度差が増大し、その後ある瞬間にねじれ角速度と燃焼タイミングとが逆位相となり、これにより共振現象が発生することが分かった。

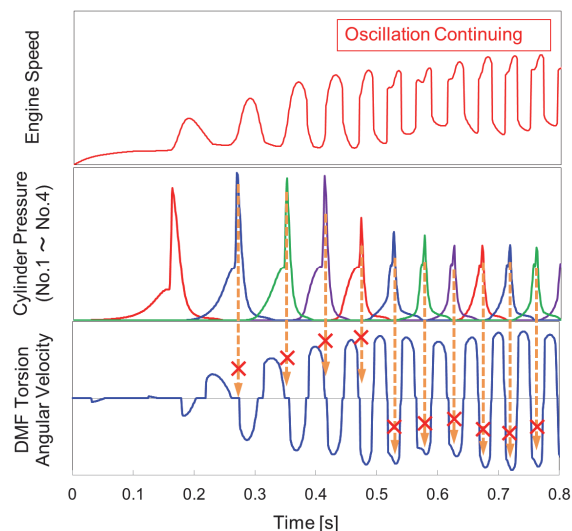


Fig. 11 Combustion Timing at Resonance

一方、共振が発生しない場合（Fig. 12）、DMFのねじれ角速度が減少中の着火ではねじれ角速度が増大する方向であるが、ねじれ角速度が増大中に着火が発生すると（図中○印）、ねじれ角速度差が急激に減少し、その後DMF共振が収束することが分かった。以上より、燃焼タイミング（着火時期）をねじれ角速度差のピークに対して進角側にすることで、共振を収束できることが明らかになった。

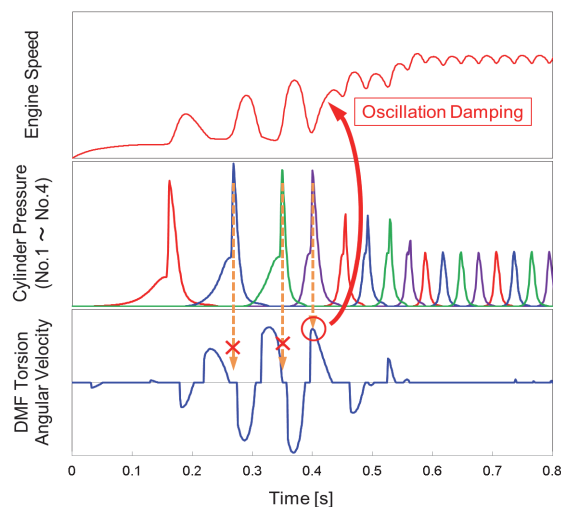


Fig. 12 Combustion Timing at No-Resonance

確認のため、始動から3回目の燃焼までを共振発生時と同条件とし、それ以降の燃焼で着火時期を進角さ

せる評価を行った (Fig. 13)。4 回目の燃焼以降 (図中△印), ねじれ角速度差の変動幅が徐々に減衰し, 最終的に共振が回避できることが確認できた。

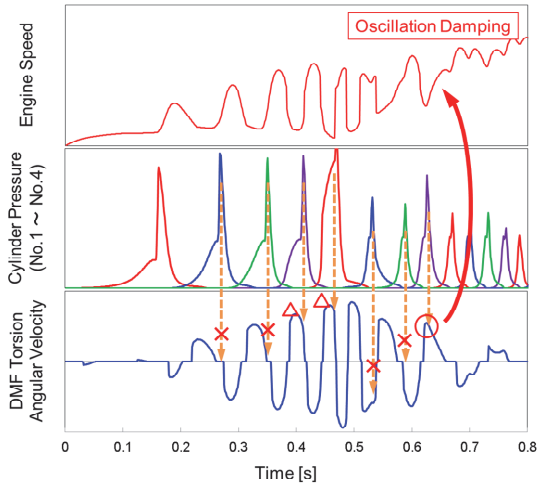


Fig. 13 Effect of Shift of Combustion Timing

(2) ハードウェア仕様の選定

DMF の仕様選定により共振を最小化するために, 前述の DMF ねじれ角制御を適用し, エンジン停止位置や始動時の噴射量を同一とし DMF 共振周波数を変えて始動時間を評価した (Fig. 14)。この結果, DMF の共振周波数が低いほど始動時間が短縮 (共振しにくい) できることが明らかになった。これにより, DMF 採用の本来の目的である走行時の車両振動性能を改善しながら, 始動性能に対して最大限有利となる仕様選定を CAE により行った。

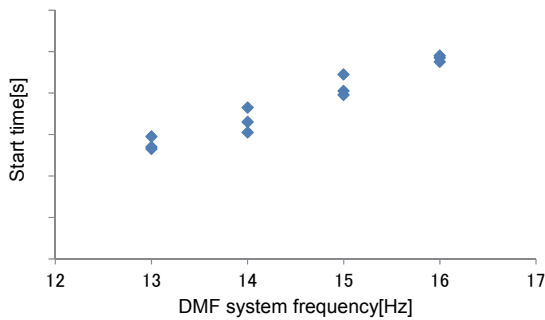


Fig. 14 Engine Start Time - Frequency Relation

5.2 実機検証

前述の共振を最小化する DMF 仕様を適用し, DMF ねじれ角制御技術の有無による第一圧縮行程気筒のピストン停止位置-138deg.ATDC から再始動した時のエンジン回転数挙動の違いを Fig. 15 に示す。制御なしの結果と比較し, DMF ねじれ角が抑制されることにより始動後半のエンジン回転数 500rpm 付近を中心にエンジン回転数が大きく振れる現象が抑制されているのが分かる。

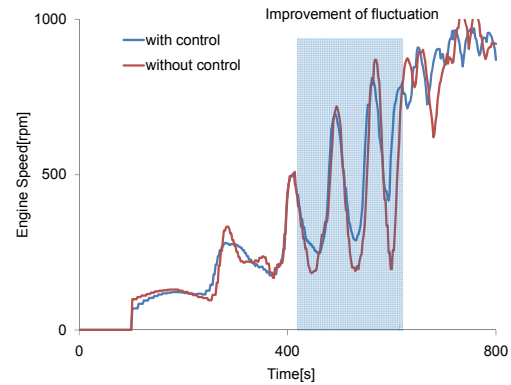


Fig. 15 Experimental Results of Restart from -138deg ATDC between with and Without DMF Torsion Angle Control

6. おわりに

CX-5 に採用された SKYACTIV-D i-stop の開発では, 開発のさまざまな段階で, モデルベース開発を適用することにより, 従来の実車を相手に実験を繰り返す開発手法から脱却し, 開発期間を劇的に短縮できた。今後も本手法の適用範囲を更に拡大し, お客様にマツダ車らしい「感動的なドライビング体験」を提供できる車を効率的に開発していきたい。

参考文献

- (1) 猿渡ほか: マツダ i-stop (アイ・ストップ), マツダ技報, No.27, pp.9-14 (2009)
- (2) 中本ほか: 新型ディーゼルエンジンのアイドルストップ技術, 第 22 回内燃機関シンポジウム, pp.415-420 (2011)
- (3) H.J.Curran ほか: A Comprehensive Modeling Study of n-Heptane Oxidation, Combustion and Flame, Vol.114, pp.149-177 (1998)

■ 著 者 ■



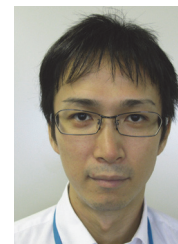
中本 仁寿



中島 宏幸



朝倉 浩之



寺岡 陽一



田賀 淳一