

特集：モデルベース開発

17

SKYACTIV-G ノッキング検出性の MBD MBD for Knock Detection in SKYACTIV-G

阿部 広幸*1

Hiroyuki Abe

荒川 博之*4

Hiroyuki Arakawa

森本 博貴*2

Hiroki Morimoto

井上 淳*5

Atsushi Inoue

住谷 章*3

Akira Sumitani

要約

SKYACTIV-G では熱効率を徹底的に追求し、14.0 という高圧縮比を採用した⁽¹⁾。この高圧縮比の採用にはノッキングに代表される異常燃焼の回避が重要であり、Knock Control System を用いた点火時期制御において、従来と比べ高いノッキング検出性に基づく緻密な制御が不可欠であった。今回、ノッキング発生時のセンサ振動状態を燃焼室空洞共鳴とエンジン構造体の連成応答解析で模擬し、エンジン構造変更によるノッキング検出性への影響を定量的に予測する手法を開発したので紹介する。

本技術の適用により机上検討の段階でノッキング検出性のポテンシャル見極めが可能となり、エンジンの点火時期制御開発を早期化した。

Summary

In the pursuit of thermal efficiency improvement, SKYACTIV-G has taken up a high compression ratio of 14.0. The avoidance of irregular combustion such as knocking was essential to the adoption of a high compression ratio, and even for ignition timing control which utilizes the Knock Control System more precision was necessary, requiring high knock detection accuracy. Sensor vibration during knocking was simulated by coupled response analysis of the combustion chamber resonance and the engine structure. The quantitative prediction of the effects of changes in engine structure on knock detection.

This technology enables knock detection ability to be assessed during the preliminary verification stages, accelerating the selection of engine specifications which enhance the ability to control ignition timing.

1. はじめに

SKYACTIV-G では、熱効率を徹底的に追求し、高圧縮比 14.0 を採用している。しかし、高圧縮比化を行うとノッキング（以下、ノック）やプリイグニッション等の異常燃焼が起りやすくなる。これを回避するための制御による無駄なトルク低下なしに、高圧縮比化のメリットを最大限生かすため、ノックセンサで検出する振動でノック発生を判定する KCS (Knock Control System) を開発してきた。ノックによるトルク低下⁽²⁾およびプリイグニッション回避技術⁽³⁾については、既に技報にて紹介しているため詳細は割愛する。

この KCS により点火時期セットを大幅に効率化し

てきた。一方でエンジン開発時にノック強度の代用特性とするため設置した燃焼室圧力センサ値と、ノックセンサ振動値の相関が弱い場合、エンジン構造変更がノック検出性に与える影響が定量的でなく、エンジン制御キャリブレーションに多くの工数を要していた。

そこで今回、燃焼室-エンジンの連成応答解析により机上でノック発生時におけるノックセンサ部振動を模擬する手法を開発した。これによりノックセンサ振動に対するノック加振力や、燃焼室からセンサ部への振動伝達特性に対する多くの制御因子を明らかにし、課題であった燃焼室圧力センサ値とノックセンサ振動値の関係を解明した。以上で得られた知見を基にノック検出性の MBD を行ったのでここで紹介する。

*1~4 エンジン性能開発部
Engine Performance Development Dept.

*5 パワートレイン技術開発部
Powertrain Technology Development Dept.

2. ノック発生～点火時期制御の流れ

ノックが発生すると Fig. 1 のように、燃焼室内の空洞共鳴を励起し、増幅した圧力波が燃焼室壁面を加振することでエンジン全体が振動する。この振動（加速度）をシリンダブロック吸気側壁面にあるノックセンサで検出している。

KCS は上記振動を周波数分析することで、気筒／サイクルごとに特定周波数帯での強度を算出し、振動強度の頻度分布を推定している。その分布の標準偏差などから算出した閾値（ $K\sigma$ ）を振動強度が超えた場合、ノック発生と判定する。

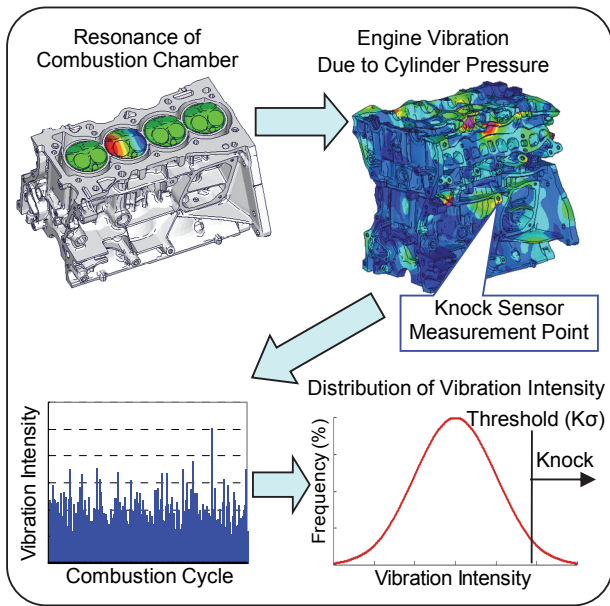


Fig. 1 Knock Detection Flow

3. 解析手法

3.1 解析モデル

解析は燃焼室（燃焼ガス）、PT（Powertrain）ユニットを有限要素でモデル化して行う（Fig. 2）。

ここでいう燃焼室はノックが発生するクランクアングルにおける容積をモデル化する。解析で使用する燃焼ガス物性値は、燃料噴射量と燃焼室容積から求めた質量密度と式(1)から求めた音速を使用する。

$$\alpha = \sqrt{\frac{\kappa P}{\rho}} \quad (1)$$

α : 音速
 κ : 比熱(1.25)
 ρ : 質量密度
 P : 燃焼指圧

有限要素長は、ノック発生周波数帯の燃焼室空洞共鳴、エンジン振動状態を十分表現できる長さとする。今回は平均メッシュサイズ 8mm、約 300 万自由度でモデル化を行った。

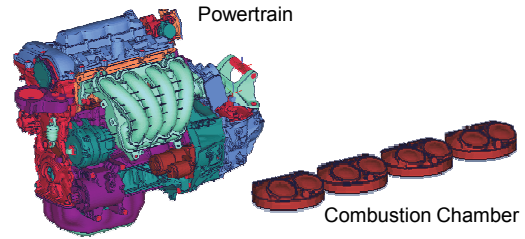


Fig. 2 Finite Element Model

3.2 解析手法

計算はモーダル周波数応答解析（NASTRAN Solution 111）で燃焼室-PT ユニットを連成させて行った。ここでは振動の伝達特性を評価するため、体積加速度（球面放射の加速度）で単位加振を行い、燃焼室-PT ユニット構造体でノックに対する振動応答感度を評価する。

加振点は燃焼室内のノック発生点とした。ノックは主にエンドガスゾーン（シリンダ外周部の未燃混合気部）で発生すると考えられており、本解析ではエンドガスゾーン全周でノックが発生すると想定した（Fig. 3）。

応答評価は以下で行う。

- (1) 燃焼室指圧計測用センサ部の圧力
- (2) ノックセンサ位置の振動（加速度）（Fig. 4）

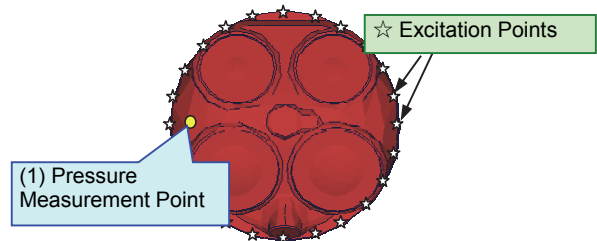


Fig. 3 Load and Response Points of Combustion Chamber

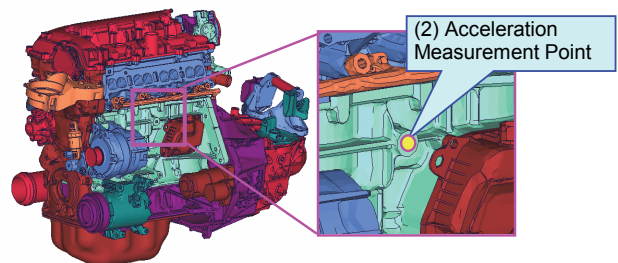


Fig. 4 Response Point of Knock Sensor

3.3 結果処理方法

結果処理は制御性評価周波数帯のノックセンサ加速度、燃焼室圧力値それぞれで RMS（Root Mean Square）値をとり、燃焼室圧力を横軸、ノックセンサ加速度を縦軸として加振点ごとに（ここでは 28 点）プロットする（Fig. 5）。

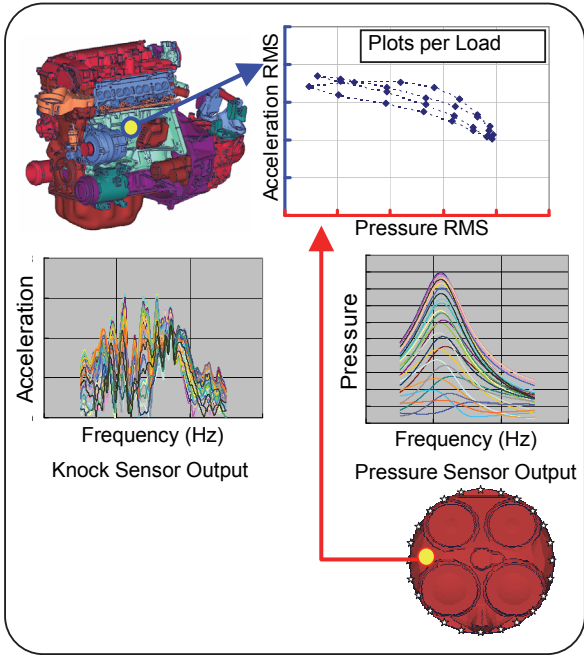


Fig. 5 Treatment of Calculated Data

ここで P_{max} (時間軸での指圧最大値) 付近で定義された燃焼室形状において 1 次の空洞共鳴は Front-Rear モードと Intake-Exhaust モードがあり、これらはほぼ同じ周波数帯に存在する。

例えば Front もしくは Rear 側でノックが発生した場合、Front-Rear モードを主に励振することから指圧計測点は応答の腹となり、圧力値は大きくなる (Fig. 6(b))。

一方、Intake もしくは Exhaust 側でノックが発生した場合、Intake-Exhaust モードが主に励振され、指圧計測点は応答の節となり、圧力値は小さくなる (Fig. 6(a))。

この結果より、ノック強度が一定でもノック発生位置により指圧センサ圧力はおよそ 8 倍も変わることを示している。よって冒頭で述べた燃焼室圧力センサ値とノックセンサ振動値との相関が弱いメカニズムの解明ができた。

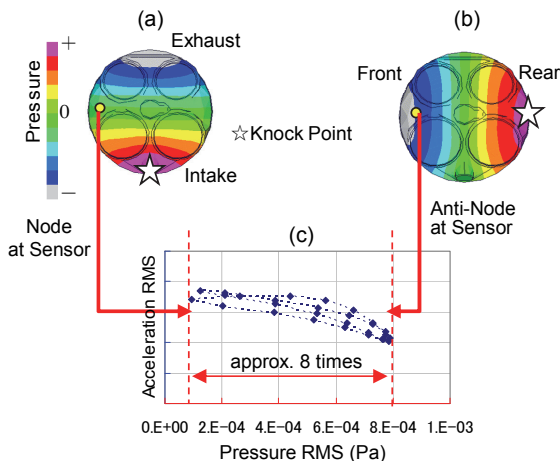


Fig. 6 Sensor Pressure by Loaded Point

前述のようにノック発生点 (加振点) ごとに励起される空洞共鳴が変わり、それによりセンサ振動が変化するため、加振点をエンドガスゾーン全周として評価すると Fig. 6(c) のような点群となる。更にノックは P_{max} から以後 10° あたりの特定 CA (Crank Angle) 間で発生するため、それぞれの燃焼室状態において Fig. 6 のような点群を求める必要がある。

Fig. 7 に例として、2 つの点火時期状態を評価するために行った下記 4 条件 CA の解析結果を示す。

- ① 弱ノック発生点火時期から 1° 点火進角した場合の P_{max} 時の CA
- ② 上記進角時の P_{max} 後 10° の CA
- ③ 弱ノック発生点火時期から 5° 点火遅角した場合の P_{max} 時の CA
- ④ 上記遅角時の P_{max} 後 10° の CA

ここで②、④はノック発生タイミングばらつきでの最遅角側を表している。

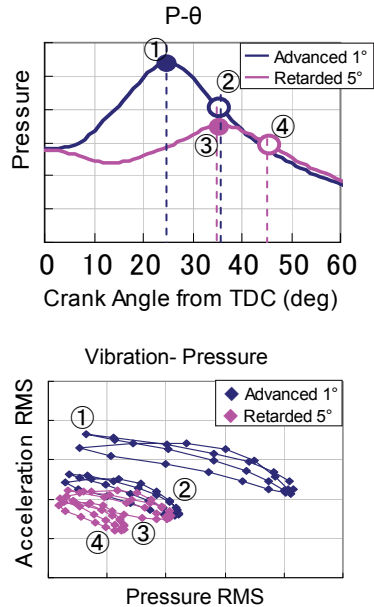


Fig. 7 Calculated Data for Each Crank Angle

Fig. 7 点群分布において、 1° 進角状態 (紺色点) では CA 25° (①) と 35° (②) 間に分布が存在し、 5° 遅角状態 (マゼンタ点) では CA 35° (③) と 45° (④) 間に分布が存在すると仮定し、No.1~4 気筒ごとに実機結果と CAE 点群分布比較を行うと、単位加振の解析結果にもかかわらず実機同様の特徴を再現しており、実機との相関があると判断した (Fig. 8)。

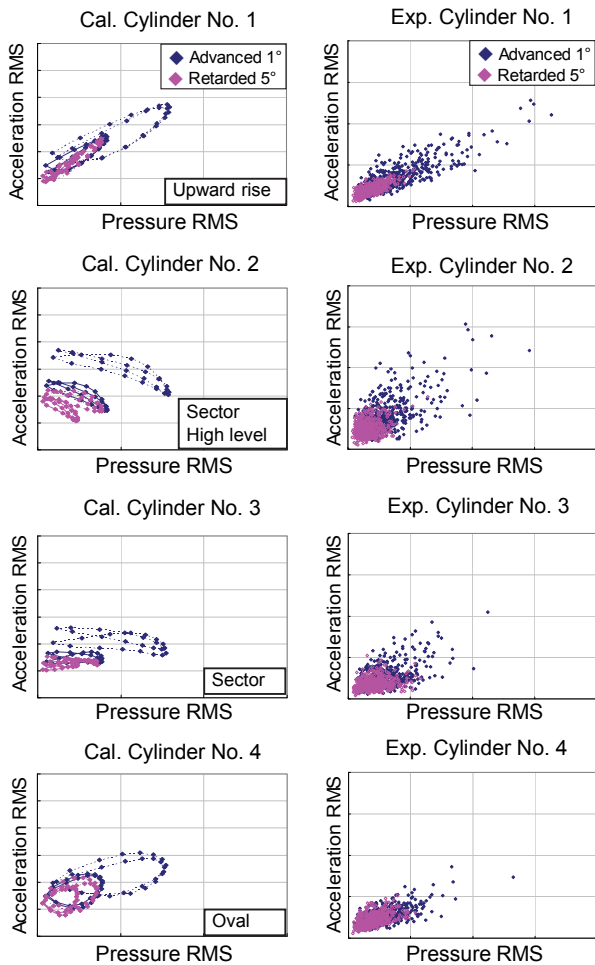


Fig. 8 Calculation/Experiment Vibration- Pressure

従ってこの振動-圧力分布結果を基にノック検出性の評価指標を定めた。

4. ノック検出性評価手法

KCS の点火時期制御では以下 2 つの現象が課題となる。

- (1) ノックを判定できないため、必要な遅角を行わずノック音が聞こえる。
- (2) ノックを誤判定し、不要な遅角を行ってしまいトルクが低下する。

これら現象はノック判定閾値に対するノックセンサ値の関係で決まるが、これに対して Fig. 8 の振動-圧力分布から理想特性を考えると以下ようになる。

Fig. 9(a)のように振動-圧力分布の縦軸（ノックセンサ振動）に着目すると同一加振力にも関わらずノック発生点、ノック発生タイミング CA25°, CA35°で縦軸値が S の幅でばらつく。つまりノック発生点-ノックセンサ振動への応答感度が S だけばらつくことを示している。

2 章「ノック発生～点火時期制御の流れ」で述べたが、KCS は振動強度の頻度分布を推定し、Kσ（閾

値）を超えた時をノック発生と判定するため、応答感度ばらつきはない方がノック判定閾値は安定し、更に純粋なノック強度を評価できるため、ノック検出性としては理想である (Fig. 9(b))。

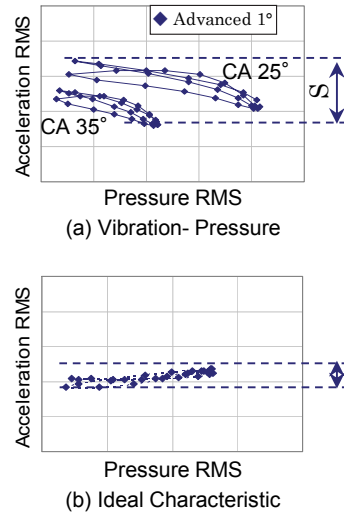


Fig. 9 Interpretation of Response Sensitivity

4.1 定常時のノック検出性評価

上記理想特性を踏まえ 1°進角状態のノック検出性を評価する場合、Fig. 10 のように分布の縦軸のばらつき幅を各気筒で評価し、ばらつき小をノック検出性良、ばらつき大をノック検出性悪と定義する。

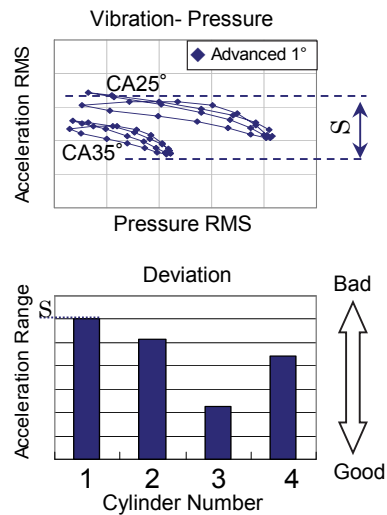


Fig. 10 Evaluation of Knock Detection During Steady State

4.2 過渡時のノック検出性評価

ある気筒でノック判定した場合、点火時期が一気に遅角するので、遅角前と評価する CA、燃焼ガス物性が変わる。それによる燃焼室圧力分布の変化からノックセンサ部への応答感度も大きく変化する。しかしながら遅角時において通常ノックは発生しない（粗悪燃料使用時、吸気高温時など除く）ため、応答感度が下

がる場合は問題ではない。一方、応答感が大きく上昇する場合、遅角切り替わりでセンサ振動が上昇し、ノック判定閾値も上昇することでノック検出性が悪化する可能性がある。よって遅角切り替わり前後のノック検出性評価も必要であり、Fig. 11における遅角前（進角時）分布の最小値と遅角時の最大値の幅 S' をばらつきとして各気筒を評価する。

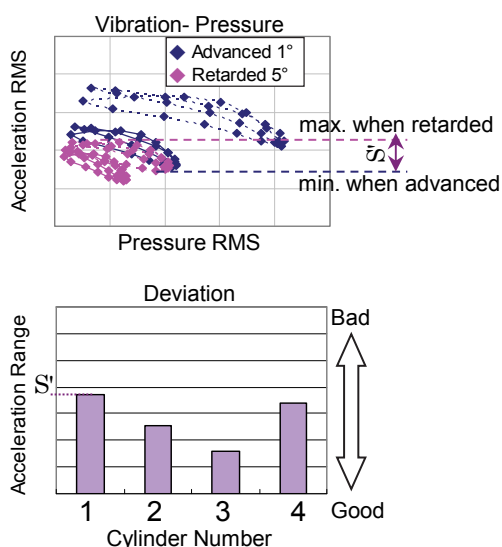


Fig. 11 Evaluation of Knock Detection During Transient

上記のように定常時（4.1 節）と過渡時（4.2 節），2 つの場合のノック検出性を評価することで，対象ユニット構造のノック検出性優劣を机上で評価できる。

5. おわりに

今回開発した技術により，ノックによるセンサ部の振動発生メカニズムを明らかにし，机上でノック検出性を評価する指標を確立した。この指標からノック検出性に優れた PT ユニット仕様検討が可能となり，高精度な点火時期制御を実現し，ノック音とエンジントルクを高次元でバランスしたエンジンを短期間で開発するプロセスを構築できた。

今後は次世代のエンジンに対しても本技術適用を進め，更にお客様に喜ばれる高品質な商品開発に貢献していく所存である。

参考文献

- (1) 富澤和廣ほか：SKYACTIV-G 新型ガソリンエンジンの紹介，2012 年自動車技術会シンポジウム (2012)
- (2) 長谷川裕一ほか：CX-5 SKYACTIV-G のエンジン技術，マツダ技報，No.30，pp.3 - 8 (2012)
- (3) 江角圭太郎ほか：SKYACTIV-G 制御技術の紹介，マツダ技報，No.29，pp.36 - 40 (2011)

■ 著 者 ■



阿部 広幸



森本 博貴



住谷 章



荒川 博之



井上 淳