

論文・解説

25

ナチュラル・サウンド・スムーザー量産工法の開発 Development of New Manufacturing Process for Natural Sound Smoother

田中 宏明*¹ 船津 昌幸*² 本室 武志*³
Hiroaki Tanaka Masayuki Funatsu Takeshi Motomuro

要 約

SKYACTIV-D1.5エンジンには、ディーゼルエンジンのノック音を低減する技術のひとつとして、ピストンとコネクティングロッドをつなぐピストンピンの内部に組み付けられ、ダイナミックダンパーとして機能するナチュラル・サウンド・スムーザー（以下、NSS）を世界で初めて採用した。NSSの機能を満足させる品質を量産で安定して確保するため、組み付け信頼性の向上、周波数特性の管理、周波数特性の造り込みなどの必要な工法の開発に取り組んだ経緯について紹介する。

Summary

Mazda has mounted the Natural Sound Smoother (NSS), which is installed inside the piston pin for connecting the piston to the connecting rod and acts as a dynamic damper, on the SKYACTIV-D 1.5 diesel engine for the first time in the world as a technology to reduce diesel knocking sound. To ensure stable and high quality of the NSS in mass production, we developed relevant techniques for, for instance, quality control of assembly, and measurement and adjustment of frequency characteristics. This article introduces the process of the technological developments presented above.

1. はじめに

環境志向の高まりとともに、乗用車でもディーゼルエンジンの採用が増えている。しかし、ディーゼルエンジンはガソリンエンジンに比べて燃焼効率が高い半面、静粛性ではガソリンエンジンに劣り、とくにディーゼルノック音の低減が課題である。SKYACTIV-Dではこのノック音低減のため、モデルベース開発の中で燃焼加振力を低減する効果的な技術がエンジンや車体に織り込まれてきた⁽¹⁾。そのノック音低減技術のひとつとして、新たに開発されたナチュラル・サウンド・スムーザー（NSS）がSKYACTIV-D1.5エンジンで世界で初めて採用されている⁽²⁾⁽³⁾。世界初がゆえに製造工程も前例がなく、その効果を最大限発揮できるように量産するためには、新たな工法が必要であった。

2. NSSの構造と特性

2.1 NSSの構造

Fig. 1に示すように、NSSはピストンとコネクティング

ロッドをつなぐピストンピンの中に組み付けられる。Fig. 2左のようにNSSはダンパーとウエイトの2部品で構成されており、ピストンピンの両側から圧入されることでエンジン内での脱落防止機能を備えた構造とし、更にFig. 2右のようにピストンピンへの組み付け後にウエイトの一部をかしめてダンパーに対して引っ掛かりを設け、万一の場合にもエンジン内で脱落しないようにしている。

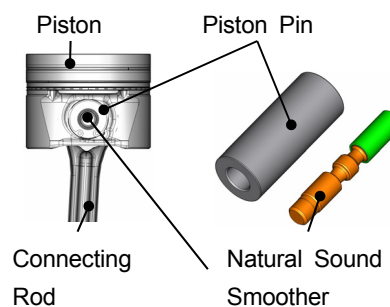


Fig. 1 Position to Install NSS

*1~3 パワートレイン技術部

Powertrain Production Engineering Dept.

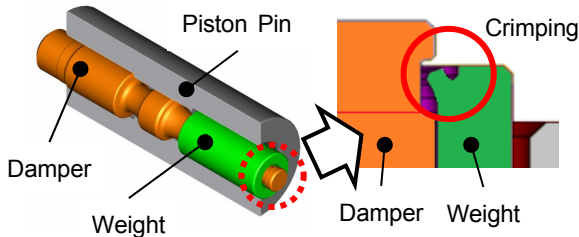


Fig. 2 Structure of NSS

2.2 NSSの効果

NSSはダイナミックダンパーとして機能し、Fig. 3に示すように緩加速時の3.5kHz付近のディーゼルノック音の低減に効果がある。また、音質(燃焼に起因する音の振幅変調)に影響し、聴感で硬い音が柔らかい印象の音に改善する。

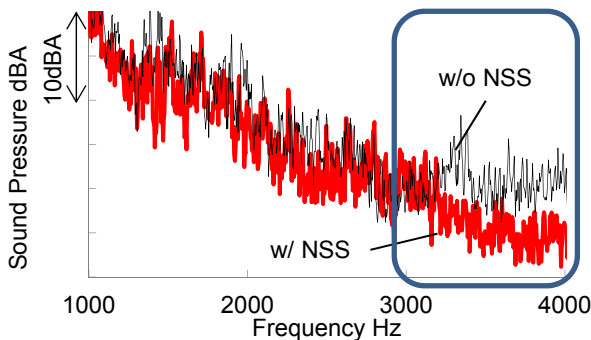


Fig. 3 Effect of NSS (Interior Noise at Moderate Acceleration)

2.3 NSSの周波数特性

NSSの量産においては単体での作動周波数を管理する必要がある。一般的にダイナミックダンパーの量産では、作動周波数は材料物性や形状寸法に置き換えて管理される。しかし、各部品の加工公差を加工機的能力限界にまで狭めても、Fig. 4の正規分布のように、机上計算では量産で予測される作動周波数ばらつきがねらいの周波数公差幅を超えることが明らかであった。そこで、NSSの量産では作動周波数を直接かつ全数管理することとした。管理ではFig. 5のように測定されるイナータンス*のピーク値と周波数を管理する。なお、今回の周波数公差幅は、ねらいの周波数3.5kHz付近の±約1%であり、それに応じた測定精度が要求される。また、作動周波数がねらいから一定範囲内で低い方に外れているものについては追加工により調整可能であるため、調整を前提としてねらいの周波数公差幅の中でも中央より低めをねらった形状設計としている。

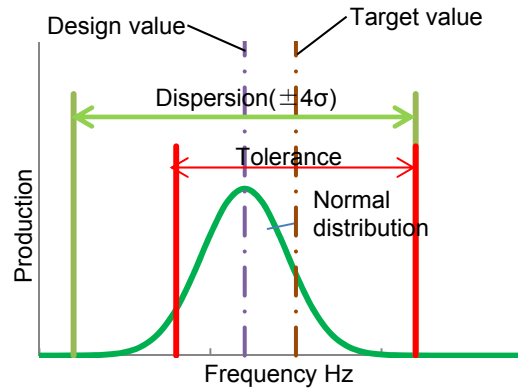


Fig. 4 Prediction Image about Dispersion of Response Frequency of NSS

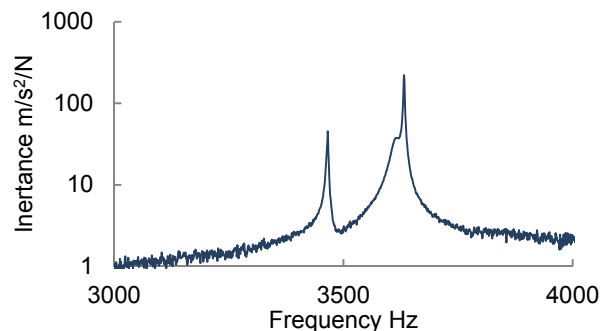


Fig. 5 Sample of NSS Inertance Measurement Result

3. NSS製造工程設計

NSSの組立・加工工程はFig. 6のとおりとなっている。

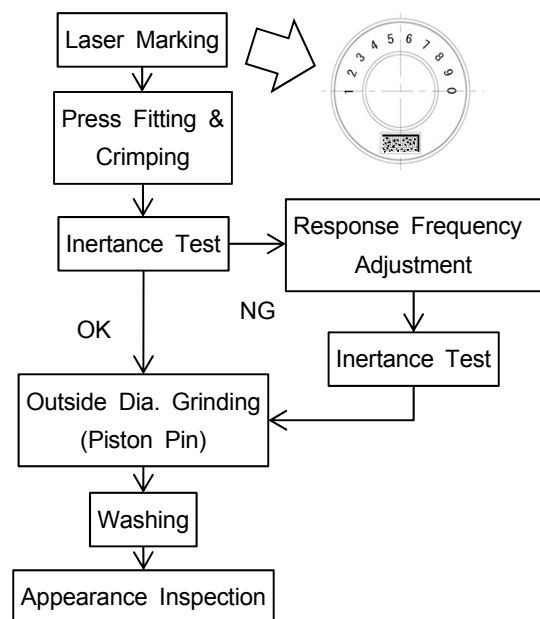


Fig. 6 NSS Manufacturing Process

* 物体に入力した加振力と、それによって生じる加速度の比による周波数応答関数。

- ① レーザー刻印工程
- ② 圧入・かしめ工程
- ③ イナータンス検査工程
- ④ 周波数調整工程
- ⑤ イナータンス検査工程(④を行った場合のみ)
- ⑥ ピストンピン外径研削工程
- ⑦ 洗浄
- ⑧ 外観検査

レーザー刻印はピストンピン端面に製造連番を刻印するもので、どの車両にどのピストンピンが使われているかを記録するトレーサビリティシステムだけでなく、周波数調整工程で一品一葉の調整を行うためにも使用している。ピストンピン外径研削は、ピストンピンとして必要な精度を満足させるため、NSS組み付け後に行い、その後に洗浄と外観検査を行っている。

これらの工程を実現させるため、品質確保に重要な新たな3つの工法開発が必要であった。

- ① かしめ量産条件の確立
- ② イナータンス計測開発
- ③ 周波数調整加工システム開発

以下に、これらの工程開発の概要を紹介する。

4. かしめ量産条件の確立

NSSは各部品をピストンピンに圧入組み付けした後に、Fig. 7のようにウエイトにかしめを行っている。かしめは、刃具をウエイト端面に押し当てることで2箇所を塑性変形させ、ダンパーの溝に引っかける形を作っている。

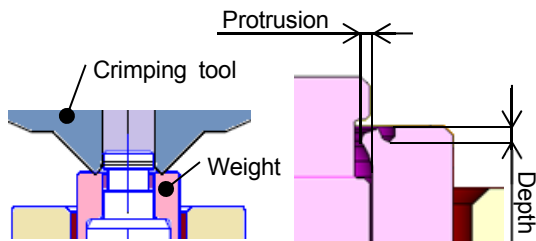


Fig. 7 Inspection Point of Crimping Result

ウエイトの抜き荷重は機能上必要な一定以上の力が求められ、圧入とかしめでこれを満足する。圧入によりその大半を保証するため、かしめは溝に引っかかる最低限の寸法として、その倒れ量が0.14mm以上を満足すればよい。一方、この倒れを得るために加える荷重によってNSSの部品が座屈しないようにする、あるいは塑性変形した部分がせん断して脱落しないようにする必要がある。そこでFig. 8のように、倒れ量とかしめ荷重について、机上計算より機能上必要な条件と、座屈やせん断しない条件を求めた。その上で、材料硬さがかしめに及ぼす影響を、実際の

ウエイトで検証を行い、硬度の上下限品のいずれも倒れ量を満足しつつ座屈あるいはせん断しない範囲内でかしめを行えることを確認し、製品設計に反映した。

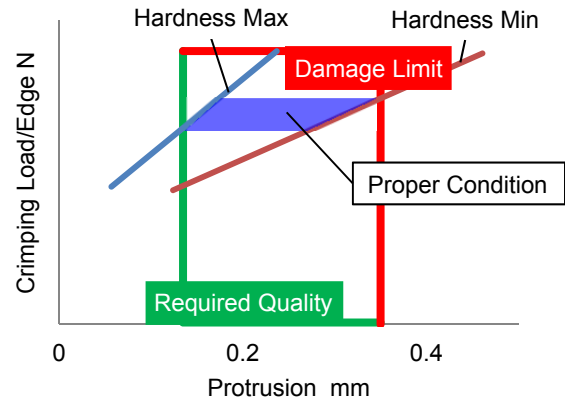


Fig. 8 Criteria for Crimping

しかし、かしめはFig. 7右図のような断面形状であり、この倒れ量を直接測定することはできないため、Fig. 9のように倒れ量とかしめ深さに相関があることを確認した上で、量産ではかしめ深さを全数管理している。

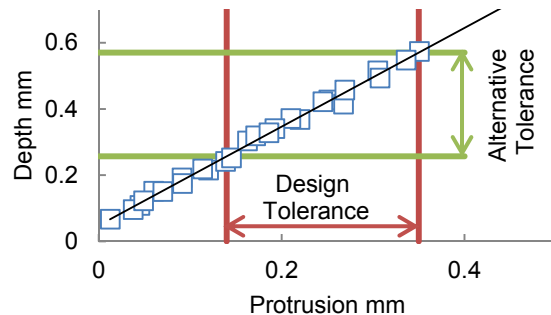


Fig. 9 Correlation between Protrusion and Depth

5. イナータンス計測開発

5.1 検査装置の要件と事前検証

NSSの開発初期段階では、NSSを組み込んだピストンピンをゴムで吊り下げ、インパルスハンマーで打撃し、その自由振動をピストンピン外径に貼り付けた加速度ピックアップ検出することでイナータンスを測定して、NSSの作動周波数を求めていた。この方法は、①ピストンピンのゴムへの取り付けの不確実性や、②加速度ピックアップを固定する方法の困難さ、③作業によるインパクト加振の不確実性、④それらに伴う計測時間の問題があり、量産ラインでの測定には不向きである。そこで、①～④の問題点を解決するための要件として、以下の3つを挙げて新たに測定方法を開発した。

- ① ピストンピン外周をクランプして測定する
- ② 振動計測は非接触で行う

③ 加振は自動で行う

これらの要件を満足する検査装置の成立性を事前検証するため、Table 1の項目についてFig. 10の簡易のテスト機などで検証を行った。その結果を量産検査装置の設計に反映した。

Table 1 Prior Study Items

Item		Method
Clamping Method	Clamper Shape	Test Unit
	Material	↑
	Clamping Force	↑
	Positioning	↑
Shaking Method	Impulse Hammer or Small Shaker	↑
	Directly or Indirectly	(Equipment Manufacturer)
Vibration Measuring Method	Measuring Instrument	Accelerometer or Laser Doppler Vibrometer
	Repeatability	↑
	Difference in measured values	↑
NSS Spec.	Dimensional Tolerance	Theoretical Calculation Test Unit
	Temperature of NSS	Thermometer/Test Unit CAE
	Surface Appearance	Test Piece / Test Unit
	Different Response Frequency in Both Sides	Test Piece / Test Unit CAE

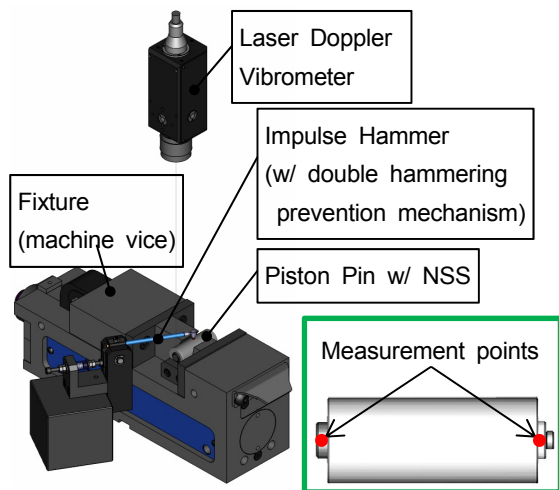


Fig. 10 Test Unit for Inertance Measurement

要件①では、クランプする治具を含む装置の振動特性が測定結果に影響することが予測された。治具の形状や材質、クランプ方法は、ピストンピンの位置決め繰り返し精度と作業性を考慮し、3面固定によるものとし、材質は鋼材に決めた。その場合のクランプ力は、テスト機を使用して、安定して測定できるポイントを探った。

要件②では、レーザードップラー振動計を用いた非接触での測定とした。ピストンピン外周をクランプすると、ピストンピンは振動せず、NSSに加速度ピックアップを貼り付けると、センサー質量が測定結果に影響することから、レーザードップラー振動計が最適であった。Fig. 10右下の図に示すように、NSSの機能保証のため、ピストンピン両端から出ているNSSの円筒面の2点を測定することとしたが、2点間の距離が狭く機器のサイズを制限するため、機種や配置を検証し、装置仕様を決定した。

要件③では、小型加振器を採用することとした。インパルスハンマーを使った自動加振も検討したが、一般的なハンマー・チップには量産の全数検査を前提とした耐久性はないと判断し、採用しなかった。

これらの事前検証の結果、装置として成立することを確認した。

5.2 NSS部品特性の計測への影響

量産ラインで全数測定するため、NSSに対する要件についてもテスト機を用いて確認を行った。その中でも、レーザードップラー振動計の測定では測定面のレーザ光の反射が重要であり、例えばNSSの振動を測定する円筒部のピストンピン外径に対する振れ(偏心)の反射レベルへの影響をFig. 11のように確認した。これらは要件として製品設計に織り込んだ。

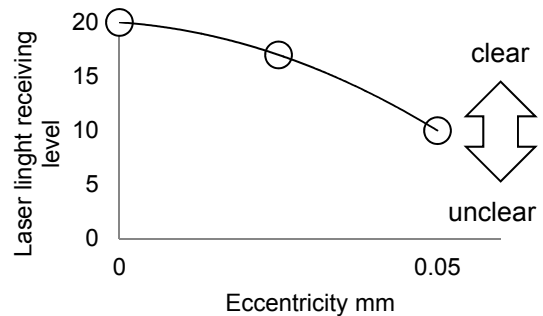


Fig. 11 Influence of NSS Eccentricity on Laser Light Receiving Level

更に、Fig. 12のようにNSSの部品の温度がイナータンス測定結果に影響することを、テスト機での測定で確認した。温度変化により弾性率が変化することに起因する現象であり、先に述べたとおり、NSSのねらいとする作動周波数の範囲は狭いため、わずか数Hzの差が判定や調整に影響する。恒温室に量産ラインを設置することは現実的ではないため、検査装置に温度補正機能を持たせることにした。

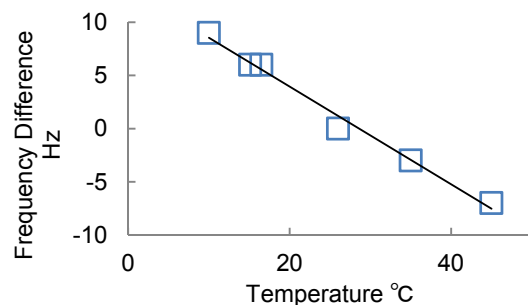


Fig. 12 Correlation between Temperature and Response Frequency of NSS

5.3 量産用検査装置の概要と測定ばらつき抑制

量産ラインに導入した検査装置の外観及び概略についてはFig. 13に示す。

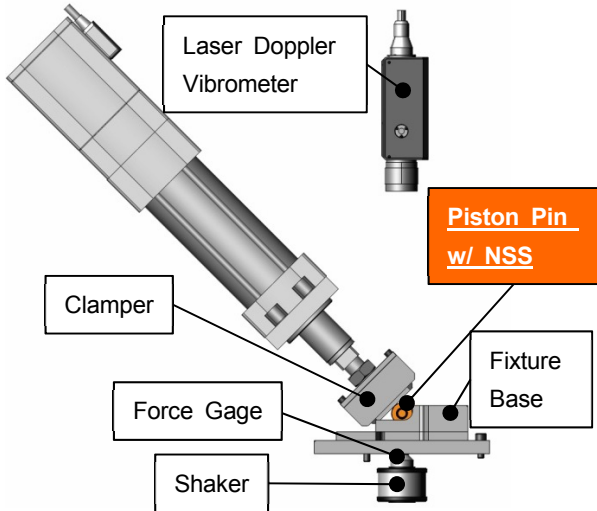


Fig. 13 Placement of Apparatus

イナータンス検査装置の測定ばらつきは、可能な限り抑える必要があるため、装置についてばらつきの要因となるものを整理した。その結果から、ばらつきに対して影響の大きいと考えられる治具の共振と、治具の組み付け時のボルト締め付けに絞って、調査と対策を行った。

共振については、CAEにより変更前の治具の固有値解析を行った結果、治具部品点数に起因する振動モードの多さと、NSSの作動周波数の近傍に共振周波数をもつことが明らかになった。Fig. 14左図に変更前の治具外観と固有値解析結果の一例を示す。Fig. 14左下では治具部品がばらばらに振動している様子が分かる。このような振動モードが各部品の固有振動数の数だけあり、実際には治具の製作誤差や組み付け誤差に応じて共振周波数が変動することになるため、測定ばらつきの要因となる。そこで、Fig. 14右図のように部品点数を減らして治具に起因する振動モードを減らし、NSSの作動周波数近傍に振動モードがないことを確認できた形状で治具を製作した。

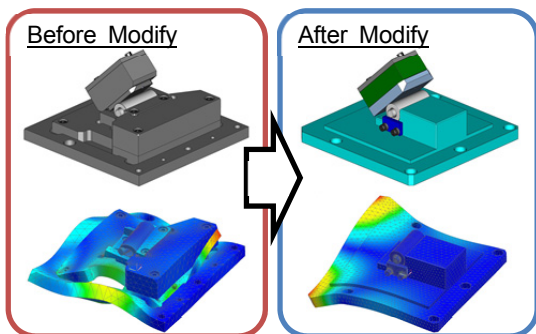


Fig. 14 Modified Fixture and CAE Result Sample

治具の組み付け時のボルト締め付けについて、その締め付け力の条件を変えると、一例としてFig. 15のように、同一のNSSを測定してもグラフの形が変化することを実際の装置で確認した。そこで装置への治具の組み付けに際しては、周辺部品含めてボルトで固定しているものについて、ボルトサイズに応じた締め付けトルクを規定し、トルクレンチによる締め付けを実施することとした。

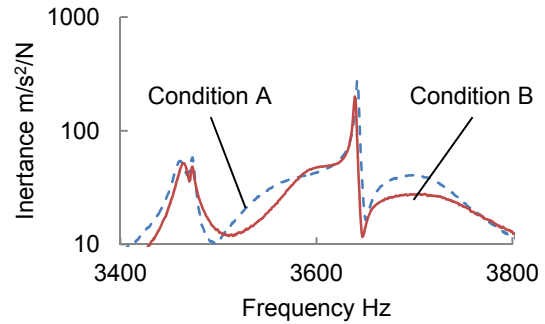


Fig. 15 Difference in Inertance Result by Difference in Fixture Bolts Tightening Condition

6. 周波数調整加工システム開発

NSSの作動周波数は、Fig. 16に示すようにダンパー端面を研削して振動等価質量を微修正することで調整する。この研削代と周波数変化量の関係はFig. 17のとおり、比例関係にあることを確認している。その関係を基に、イナータンス検査では測定される作動周波数に応じてNSSをランク分けすることとし、端面研削盤ではその各ランクに対する研削代を設定した加工プログラムを準備している。

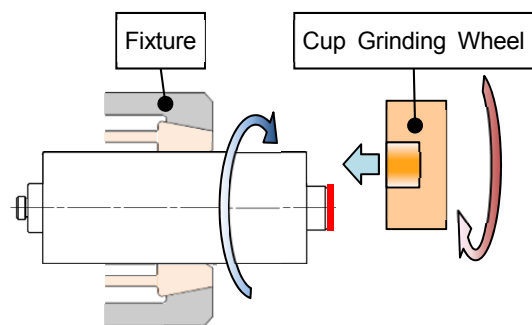


Fig. 16 End Face Grinding for Adjustment of Response Frequency of NSS

NSSの作動周波数調整は、周波数ランクに応じて一品一葉の対応をする。これには、ライン内で展開されるトレーサビリティシステムをFig. 18のように応用している。トレーサビリティシステムには今回の組立・加工工程での品質データが全て記録されており、周波数ランクも同様に記録される。周波数調整工程では、ピストンピン端面の刻

印を使ってイナータンス検査結果の周波数ランクを端面研削盤がシステムから呼び出し、そのランクに応じて加工プログラムを選択、加工する。

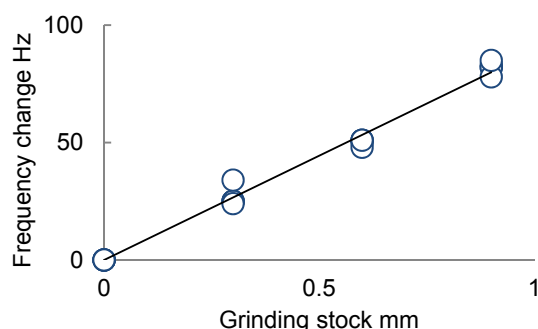


Fig. 17 Correlation between Grinding Stock and Response Frequency Change

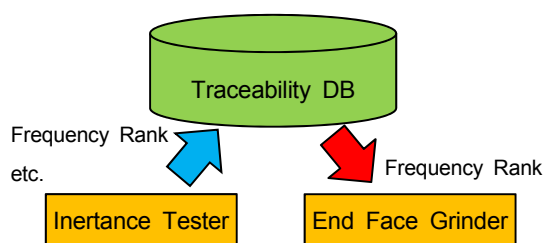


Fig. 18 NSS Response Frequency Adjustment System Outline

7. 成果

今回の活動での成果を以下のとおりである。

- ① 安定したかしめ品質による組立信頼性の確保
- ② 量産ライン内での作動周波数の計測技術の確立
- ③ 一品一葉の作動周波数造り込み工法の確立

2015年1月よりNSSの量産を開始した。かしめ深さと作動周波数については全数測定を行い、100%保証を行っている。

8. おわりに

ここに紹介した工法開発以外にも、社内に例のない工法に関する技術・技能不足や、NSSの形状やサイズなどに起因するさまざまな課題を、社内外の関係者を巻き込みながら克服していき、量産ラインを立ち上げた。

今回のNSS量産工法の開発を通して、関係者全員が「世界初の実現」に向けてベクトルが合っていたことを実感している。今回の活動を通してメンバーが得たこのような経験は、NSSの今後の展開、更にはブランド価値向上に生かされていくものと確信している。

参考文献

- (1) 白橋尚俊ほか：SKYACTIV-D ノック音開発，マツダ技報，No.31，pp.85-90(2013)
- (2) Yasuhiro Kanda, Tsunehiro Mori：Diesel Combustion Noise Reduction by Controlling Piston Vibration, SAE paper, 2015-01-1667 (2015)
- (3) 白橋尚俊ほか：新型1.5L低圧縮比クリーンディーゼルエンジンの開発（第3報），自動車技術会春季大会 学術講演会講演予稿集，No.18-15，pp.485-490 (2015)

■ 著 者 ■



田中 宏明



船津 昌幸



本室 武志