

心地良いサウンドを実現する エンジン主運動系減衰技術の開発

マツダ株式会社

代表取締役社長 小飼 雅道

マツダ(株)	エンジン性能開発部	森 恒 寛
マツダ(株)	エンジン性能開発部	神 田 靖 典
マツダ(株)	エンジン性能開発部	住 谷 章
マツダ(株)	エンジン設計部	平 田 耕 一

はじめに

弊社は運転するお客様に“走る喜び”の感動を提供したいと考えており、そのためには、アクセルに連動した車両の加速 G に加え、五感に響く“エンジンサウンド”が重要な要素と捉えている。弊社のディーゼルエンジン SKYACTIV-D 搭載車両は、突出した走りと優れた環境性能に加え、静粛性に関しても“ディーゼルとは思えない”という高い評価を頂いている。

開発のねらい

一般的に、クリーンな排気ガス (EM) や CO₂ 低減には急速燃焼など、高効率の燃焼制御を行うが、そうすると“がらがら”というディーゼル特有のノック音がクローズアップする傾向にある。この両立にはノック音の“からくり(メカニズム) 解明”が必要で、エンジン内部のノック音の原因となる振動を“リンク機構”を用いて計測した。これによりノック音の原因となる現象を解明し、CAE のモデル化を実現。その結果、革新的な技術である世界初の“ナチュラル・サウンド・スムーザー (図 1、以下、NSS という)”を開発した。



図1 ナチュラル・サウンド・スムーザー (NSS)

装置の概要

NSS はエンジン内部のピストンピンの空洞部分に圧入し、動吸収器の機能を果たすものである。ピストンに連結されたコンロッドは、燃焼圧により伸縮モードが発生し、これがノック音の原因となる。この伸縮の動きに対し NSS を逆



図2 NSSの狙いと効果

位相に動かすことで伸縮の動きをキャンセルさせ、ディーゼル特有のノック音を大幅に低減させるものである。

技術上の特徴

ノック音の低減には実運転状態のからくり解明が必要であるが、“高速・高熱”で往復運動中の微小変位計測はこれまで困難であった。このため独自のリンク機構式計測装置を作製し、コード類はビス止め後に接着剤で固め、加速度センサーはノイズを抑える増幅器内蔵型を採用。破損、脱落防止対応した上で有線で“リンク機構”（図3）を通すという独自の手法で、実機運転中の振動を0.01 μ m精度で計測可能にした。

図4に燃焼した瞬間のCPL（燃焼圧力を周波数分析したもの）と、この手法で計測したインターナルの各部振動を示す。CPLには3500Hzにピークはないが、ピストンとコンロッド小端

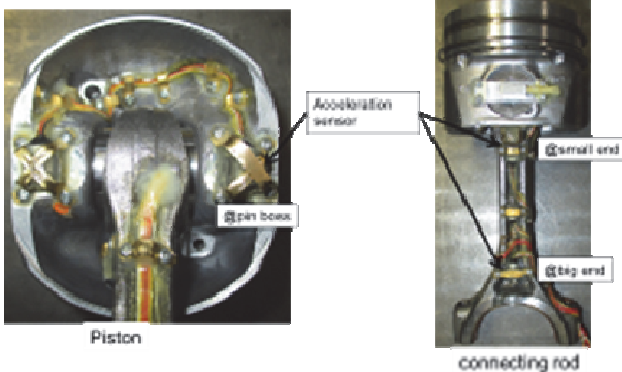


図3 計測および信号取り出し装置

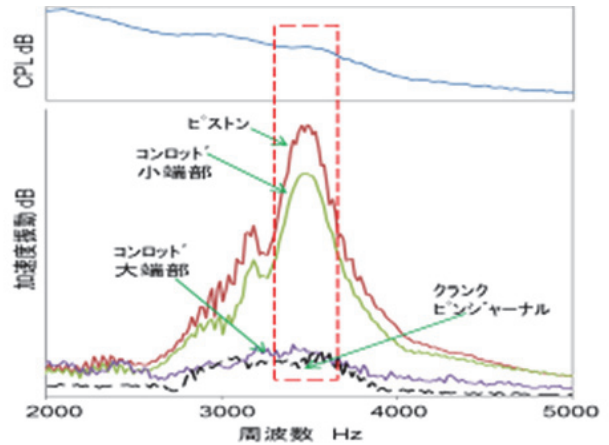
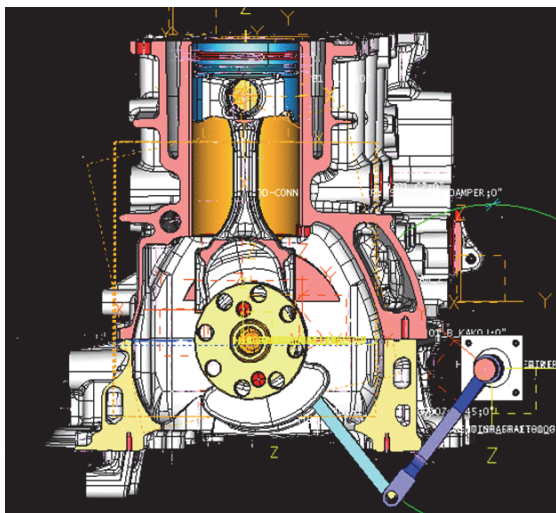


図4 燃焼圧力とインターナル各部の振動

部には顕著な振動ピークが存在している。

これはピストン〜クランク間に共振が発生し、コンロッドで大きな変形となる振動現象が発生していることを示すものである。

この3500Hzの振動現象（振動モード）を明らかにするためにCAEを実施。CAEの境界条件は、実運転状態の計測結果を基に、油膜荷重分担範囲、コンロッド大端部弾性変形、クランクピンジャーナル/コンロッド大端部バネ特性を同定した。これにより3500Hzの振動現象を正確に表現できるようになり、「コンロッドの伸縮モード」であることを確認した（図5）。

対策に関してはコンロッドをバネとする伸縮モードを低減する必要があるが、CAEでコンロッドの剛性や質量を大きく振っても周波数が多少動く程度で満足いく特性は得られなかった。

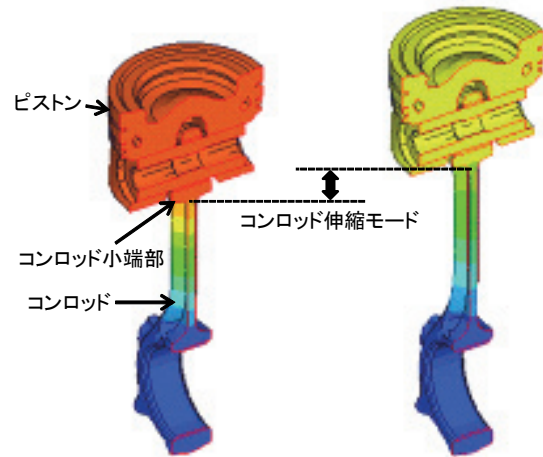


図5 3500Hzコンロッド伸縮モード

多くの検討の後、ピストン、コンロッドの動き（振動モード）と逆位相で動き振動を吸収させることを考えた。その結果、ピストンピンに動吸収器を内蔵し、コンロッドの伸縮モードをキャンセルさせるNSSの機構を考案した。

具体的なNSSの制振原理は、燃焼の力がピストンに加わり、①コンロッドが縮み（下）方向に力が働く時にはNSSの錘が上方方向に力を与え、②伸び（上）方向に働く時にはNSSが下方方向に力を与える。このようにしてコンロッドの伸縮振幅をNSSがキャンセルさせることで、3500Hzの振動を低減させるものである（図6）。

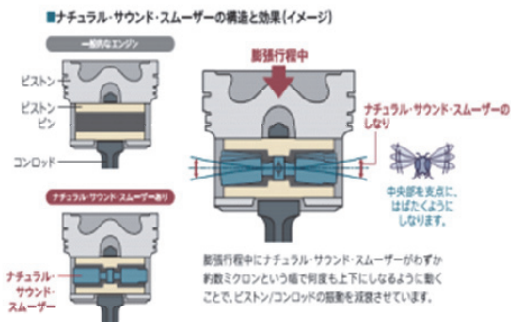


図6 NSSの構造と効果(イメージ)

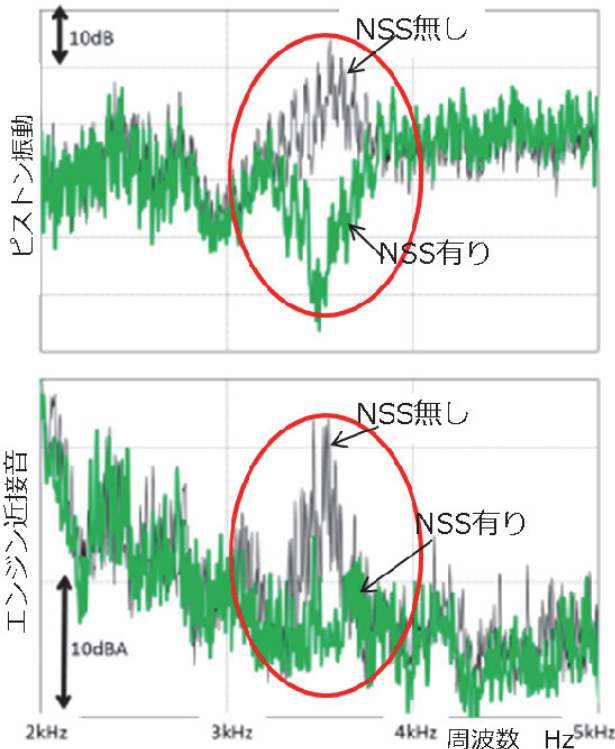


図7 ピストン振動と近接音の低減効果

実際のエンジンにNSSを組み込み、3500Hzの振動低減を検証した。計測したピストン振動とエンジン近接放射音（ブロック壁面から15cm）を図7に示す。NSSの作動周波数（3500Hz）で、ピストン振動、エンジン近接音ともに10dB以上の大幅な低減を確認することができた。

従来構造のNSS無しとNSS採用エンジンの車室内音も、狙い通りの3500Hz付近で5dB以上の大幅改善ができています（図8）。

一方で、強い爆発力、高速回転、高温と過酷な条件で使用されるNSSは絶対に壊れない信頼性を確保する必要がある。特に強度向上のため「浸炭焼き入れ」「表面研磨」「ダブルショットピーニング」「高纯净度鋼」を採用し、疲労限1000MPa以上の無限寿命を確保している。多くのエンジン耐久、車両走行試験をクリアし、確かな信頼性を保証している（図9）。

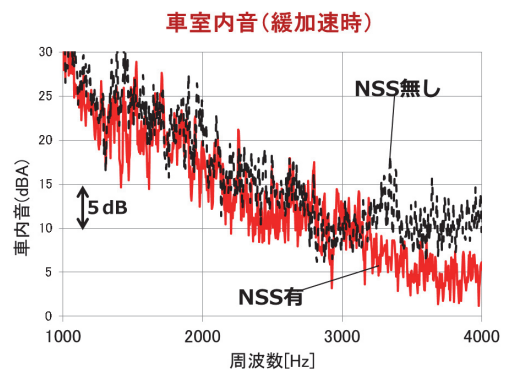


図8 NSSの車室内音への効果

- | | |
|--------|--------------|
| 【重要特性】 | 【採用技術】 |
| 発生応力 | 形状最適化 |
| 強度 | 浸炭焼入れ |
| | 表面研磨 |
| | ダブルショットピーニング |
| | 高纯净度鋼 |

図9 信頼性向上の採用技術

加えて、生産ラインにおいて全数をレーザードップラー振動計で周波数計測（図10）し、必要なものは調整加工する“マツダ初の生産管理システム”を構築し優れた品質を実現している。

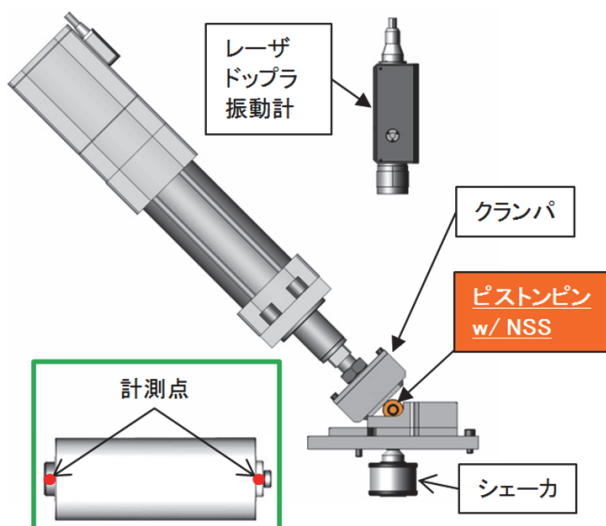


図10 全数検査&調整加工システム

実用上の効果

ディーゼルエンジン搭載車両に NSS を採用することで、渋滞中やゆっくりと加速するシーンにおいて大幅にノック音を低減した。これによりドライバーの快適性や疲労低減を図ると共に、車外音低減による住宅地などの生活環境改善にも貢献している。緩慢な燃焼にすればノック音は低減できるが燃費は悪化する。NSS によるノック音低減は、燃焼対応での 1%燃費改善に相当し、結果的に CO₂削減にもつながっている。また NSS は中空ピストンピンを採用しているすべて(農機具やトラックなど)のエンジンに適用可能な汎用的技術であり、幅広い展開が期待できる。

知的財産権の状況

- ① 日本国特許第 5983750 号
国際公開番号 WO2014/034034A1
名称：エンジンのピストン構造
概要：ピストンピンの中空部に動吸振器を設けたもの
- ② 米国特許第 9347396 号

名称：PISTON STRUCTURE FOR ENGINE

概要：ピストンピン内部から動吸収器の抜け止め機構を設けたもの。

その他 13 件を出願中

むすび

NSS は“走る喜び”と環境性能改善に有効な技術で、クリーンディーゼル車普及 (CO₂削減) の政府政策にも貢献できたと考える。

NSS の加工はサプライヤーとの協働技術開発を実施し、サプライヤーの育成に加え、精密製品の加工などを通して地域の経済的効果にも繋がっている。

我々は内燃機関にこだわり、燃費性能の向上を命題と考えている。燃費は走り、排気ガス、信頼性、音などのトータル機能で決まり、優れた音のコントロールは、これを成立させるキー技術になっている。将来的にはどんなに激しい燃焼にも対応できる技術を開発すること、それが結果的に様々なパワーソースの進化につながっていくものと考えている。