

特集：モデルベース開発

16

# SKYACTIV-D ノック音開発

## Knocking Noise Reduction Technology of SKYACTIV-D

白橋 尚俊*1 Naotoshi Shirahashi	阿部 宏司*2 Hiroshi Abe	住谷 章*3 Akira Sumitani
住田 英司*4 Eiji Sumida	岩田 陽明*5 Kiyooki Iwata	松原 武史*6 Takeshi Matsubara

### 要約

マツダは新世代クリーンディーゼルエンジンとして、優れた出力、燃費、エミッション性能に加え、従来モデルから更にノック音性能を改良した SKYACTIV-D 2.2L エンジンを開発し、新型アクセラへ搭載した。本稿では、ノック音低減として取り組んだ、エンジンから車両への伝達経路に基づく新たな開発プロセス及び採用技術の概要について報告する。

### Summary

A new generation clean diesel engine, SKYACTIV-D 2.2L, was developed and applied to the New Mazda Axela. In addition to an excellent output, fuel economy and emission performance, the engine has less knocking noise than that of the previous diesel engine. This report describes the outline of the new development process focusing on the engine-to-vehicle pathway of the noise and adopted technology for the noise reduction.

## 1. はじめに

近年の世界的な環境志向の高まりにより、ガソリンエンジン (GE) に比べて熱効率の高いディーゼルエンジン (DE) に大きな期待が寄せられている。

欧州市場においては、早くから DE が注目され販売台数においても高い比率を占めてきた。一方で、ますます厳しさを増すエミッション規制への対応や、HEV や EV の台頭に伴い、DE においても更なる環境性能改善への取り組みが必要となっている。

これらの取り巻く環境から、DE ではより高効率な燃焼が求められ、その加振力は増大する方向にあり DE 特有のノック音が問題となるケースも増えている。とりわけ GE に遜色のない静粛性が求められる乗用車においては、高い環境性能とノック音性能の両立が大きな課題であり、エンジンと車両トータルでのノック音対応が重要となっている。

本稿では当最新 DE 開発で取り組んだ、ノック音開発プロセス及び採用技術の概要について解説する。

## 2. 新世代クリーン DE の仕様

新開発した SKYACTIV-D 2.2L<sup>(1)(2)</sup>の主要諸元を従来型 MZR-CD 2.2L と対比して Table 1 に示す。

従来型 DE に対し、低圧縮比化、2 ステージターボやピエゾアクチュエータを搭載した高応答インジェクタを採用することで燃費を向上させると共に、国内ポスト新長期規制及び EURO6 規制にも対応している。

これらの高い環境性能とノック音性能の両立を実現するため、新型アクセラに搭載している SKYACTIV-D では、①ノック音伝達経路の解明を基に、②燃焼加振力とエンジン構造特性コントロール、③エンジンから車体への伝達特性コントロールを行っている。これらの各特性はノック音を低減する上で重要な機能であり、この機能を高めることで効果的なノック音開発を行い、相反する性能との両立をより高次元で実現する開発プロセスに取り組んだ。以下それぞれの対応技術について述べる。

\*1~3, 5, 6 エンジン性能開発部  
Engine Performance Development Dept.

\*4 NVH 性能・CAE 技術開発部  
NVH&CAE Technology Development Dept.

Table 1 Specifications of MZR-CD and SKYACTIV-D

Engine	MZR-CD (Previous model)	SKYACTIV-D (New model)
Max. power	136kW / 3500rpm	129kW / 4500rpm
Max. torque	400Nm / 2000rpm	420Nm / 2000rpm
Emission standard	EURO5	EURO6 JPN PNLT
Displacement (cm3)	2184	2184
Bore X Stroke (mm)	φ86 X 94	φ86 X 94
Compression ratio	16.3	14
Peak firing pressure (Mpa)	17.5	13.5
Fuel injection system	common rail system solenoid type(200MPa)	common rail system piezo type(200MPa)
Nozzle	10hole 900cc/min.	10hole 1112cc/min.
Turbocharger	variable geometry turbocharger	serial sequential 2 stage turbocharger
Crankshaft main / Pin journal dia. (mm)	φ60 / φ51	φ52 / φ52
Aftertreatment system	DOC+DPF under foot type	DOC+DPF with engine type

### 3. ノック音の低減

ノック音は、燃焼と同期して発生する間欠的な変動音であり、Fig. 1のように2.8kHz~3.8kHzの周波数帯域で特徴的に現れる。

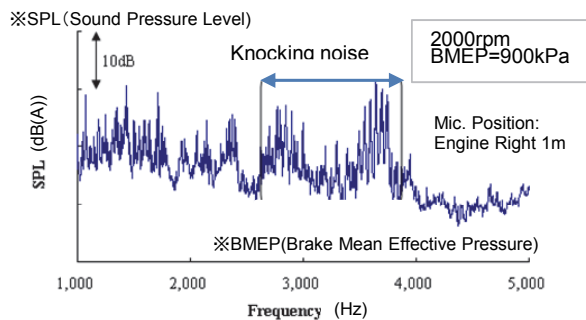


Fig. 1 Knocking Noise Frequency of SKYACTIV-D

このノック音を低減する手段として、従来から燃料噴射のタイミングや噴射量を最適化することで燃焼加振力を低減させる手法で対応してきた。

ノック音は Fig. 2 に示すように燃費性能や出力、エミッションなど関連する性能と相反する関係にあることが知られており、これらの各種性能要求との両立を燃焼特性の最適化のみで達成させるのは困難になってきている。そのため燃焼系の対応に加え、構造系の伝達特性においても支配的な特性因子を抽出しそれをコントロールすることが肝要となる。

SKYACTIV-D では、あらかじめ伝達特性の支配的な機能を抽出し、それをコントロールするプロセスを適用することで、高い環境性能を達成しながら従来モデルから大幅な低減を行った (Fig. 3)。

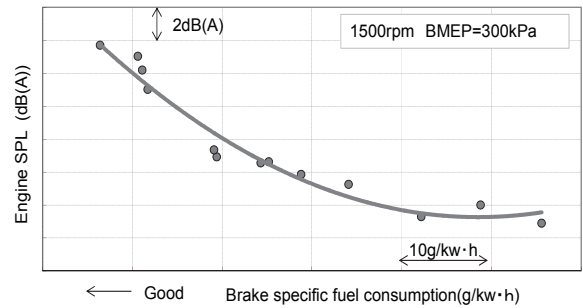


Fig. 2 Tradeoff between SPL and Fuel Consumption

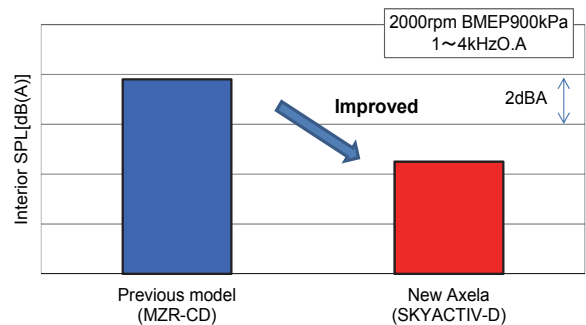


Fig. 3 Knocking Noise Level of New Axela

### 4. ノック音機能開発と低減技術

#### 4.1 燃料噴射制御による燃焼加振力の低減

ノック音の加振力である CPL (Cylinder Pressure Level) の高周波成分は、筒内での燃え方に依存する。この燃え方と CPL の関係をシミュレーション及び実機運転により解析した結果、影響度の高い因子は熱発生率の最大高さおよび最大傾斜であることがわかってきた (Fig. 4)。

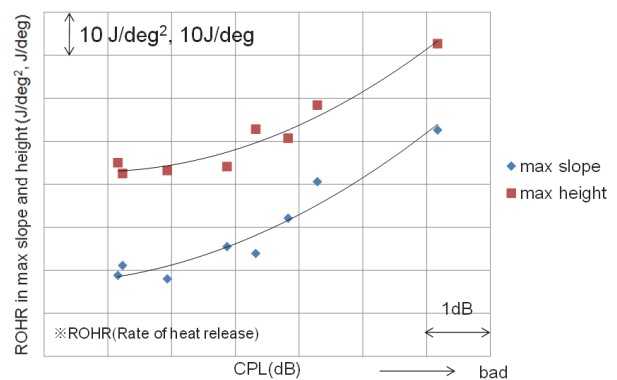


Fig. 4 Relation between CPL and ROHR

SKYACTIV-D では高応答のピエゾインジェクタと高圧コモンレールシステムを採用することで熱発生率の

高さや傾斜をより緻密にコントロールし、燃焼加振力の悪化を抑制しながら相反する燃費やエミッション性能との両立を図っている。

熱発生率をコントロールするには、メイン燃焼の着火をアシストするプリ燃焼の熱量を一定量確保することが重要であり、Fig. 5 に示すようにエンジン回転数、負荷、環境条件に合わせ最適な熱量となるように 2~4 回の近接マルチ噴射を行っている<sup>(3)</sup>。

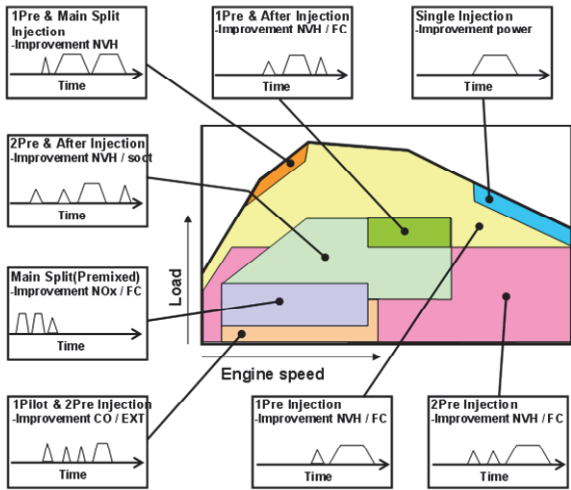


Fig. 5 Multi-Injection Pattern of SKYACTIV-D

一方で、追い越し加速などの急峻な過渡状態においては、定常走行状態と異なり過給や EGR などの空気系の遅れ、更に筒内の温度上昇の遅れから、着火環境が悪化し CPL が悪化する現象が発生する。

SKYACTIV-D では、時々刻々の過給圧や EGR 量の変化、及び筒内のシリンダ壁温を予測するモデルベース制御を用い、定常走行時の安定状態に対する着火環境の変化を推定し、Fig. 6 のようにパイロット噴射及びプリ噴射の噴射量及び時期を緻密に補正する噴射制御を採用している。

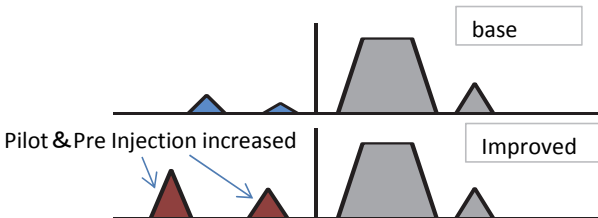


Fig. 6 Acceleration Control by Multi-Injection

これにより過渡中に弱まるプリ燃焼を強化し熱発生率の最大高さや傾斜の悪化を抑制した (Fig. 7)。

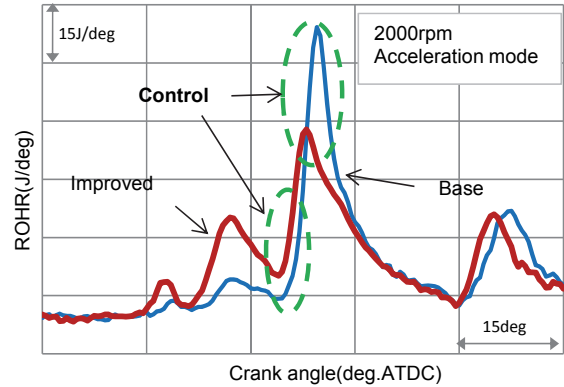


Fig. 7 ROHR Improved by Pre-Combustion Control

過渡制御の採用により、熱発生率をコントロールすることで、Fig. 8 に示すように過渡運転においても CPL の悪化を抑制することができた。

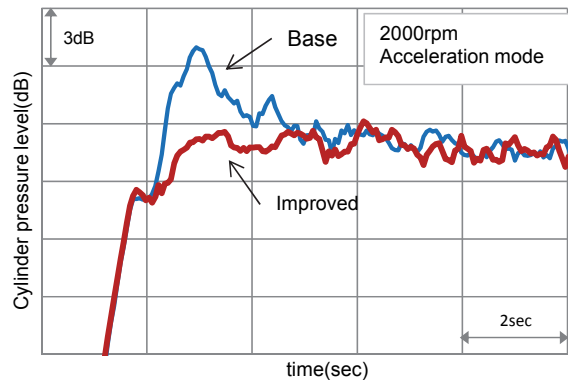


Fig. 8 CPL Performance of Acceleration

#### 4.2 ノック音の伝達経路

ノック音はその原因となる燃焼からドライバーの耳位置に至るまでには、エンジン本体内、エンジン本体から車体、そして車内のドライバー位置まで、非常に多くの伝達経路が考えられる。効率よくノック音を抑制するためには、主要な伝達経路を解明することが重要である。

そのために、加振力となる燃焼圧力からエンジン音源に至る、エンジン本体内の主要な伝達経路の把握及び、エンジン音源部から車室内へ伝播する主要な伝達経路の把握を行った。

Fig. 9 に、エンジン本体から放射されるノック音成分の伝達経路の寄与率を示す。CAE 及び試作エンジンでの計測結果から、約 80%がピストンからコンロッドを介し、クランクシャフトへノック音成分の振動が伝わり、更にクランクシャフト軸受部、シリンダブロック側壁面へと振動伝達していることがわかった。

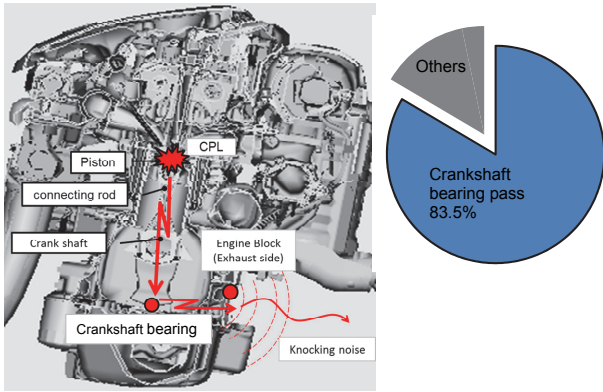


Fig. 9 Major Transfer Pass and Contribution Ratio in Power Train

また、Fig. 10 に、エンジンからドライバ耳位置に至る伝達経路の寄与率を示す。主に車室内に近いエンジン排気系側を音源として、約 75%はダッシュパネル下部及び、フロントコンソール（シフト部）を含むフロアからの伝達寄与が大きいことがわかった。

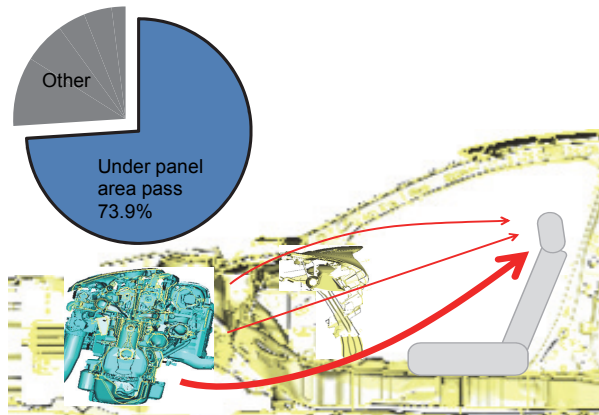


Fig. 10 Major Transfer Pass and Contribution Ratio in Vehicle

これら燃焼室からエンジンの各部品、そして車両に至る DE ノック音の主要伝達経路に基づき、各重点機能及びその制御因子の抽出を行った (Fig. 11)。

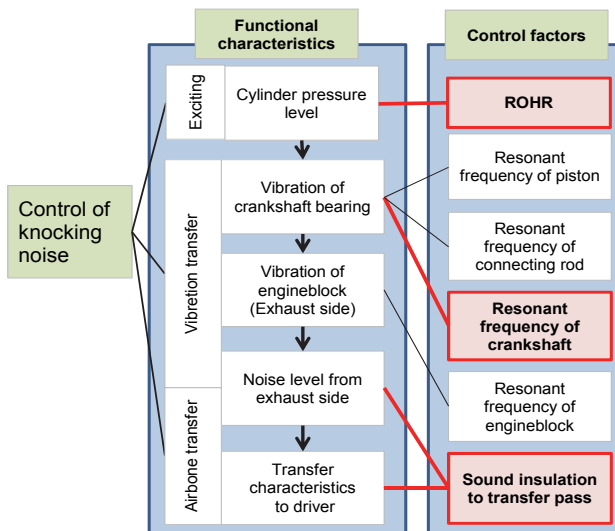


Fig. 11 Functional Characteristics and Control Factors

SKYACTIV-D は開発の初期段階で、これらの重要機能のうち、前項で述べた燃焼特性のコントロールに加えて、伝達経路に対し影響度の高いクランクシャフト軸受部振動特性、車室内への伝達特性に着目し対応を行うことで効率的にノック音を低減することができた。

### 4.3 クランクシャフトの振動伝達低減

ノック音コントロールの重要機能であるエンジン本体の伝達特性を改善するため、試作エンジンを用いてピストン、コンロッド、クランクシャフトなどの主運動系部品ならびにシリンダブロック周りの動特性を加振計測により把握することで、これらの特性とノック音とに高い相関があることがわかった (Fig. 12)。

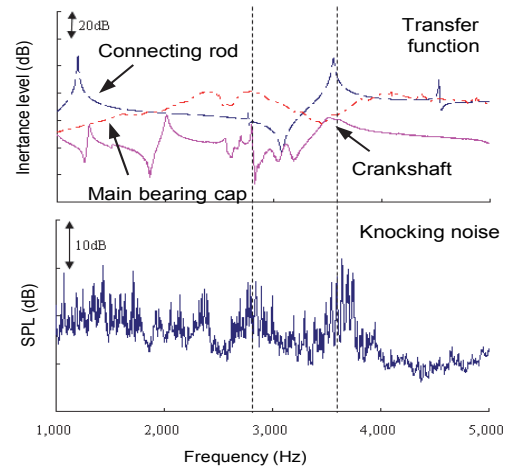


Fig. 12 Relation between Transfer Function and Knocking

SKYACTIV-D では、クランクシャフトの振動モードと伝達特性に注力して改善検討を行った。対象として着目したのはクランクシャフト後端近傍に曲げが発生する振動モードである (Fig. 13)。

CAE でウェブ部やカウンターウェイト形状の最適化を行い、また DMF (Dual Mass Flywheel) のプライマリ質量変更を行うことで対象モードの再配置を行っている。

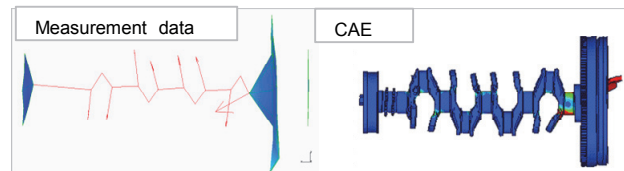


Fig. 13 Resonance Mode of Crankshaft

これによりクランクシャフトの振動伝達特性を Fig. 14 のように変化させ、Fig. 15 に示すようにエンジン本体から放射されるノック音を低減した<sup>(4)</sup>。

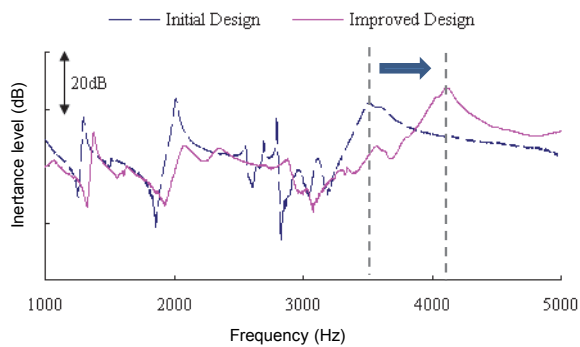


Fig. 14 Transfer Function of Crankshaft

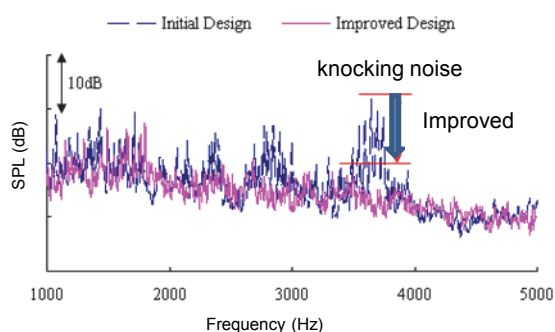


Fig. 15 Improved Design Effect on Knocking Noise

#### 4.4 伝達経路への遮音対応

DE ノック音の車室内への伝達を効率よく制御するため、主要伝達経路に着目し、エンジン・車体による最適な遮音設定を行っている。

音源であるエンジンについては、アコースティックカメラによる音場解析により、排気系側の発生部位を更に詳細に切り分けを行い、部品別の寄与率を求めることで、Fig. 16 に示すようにシリンダブロックやオイルパン、排気系部品などに効果的な遮音材を設定した。

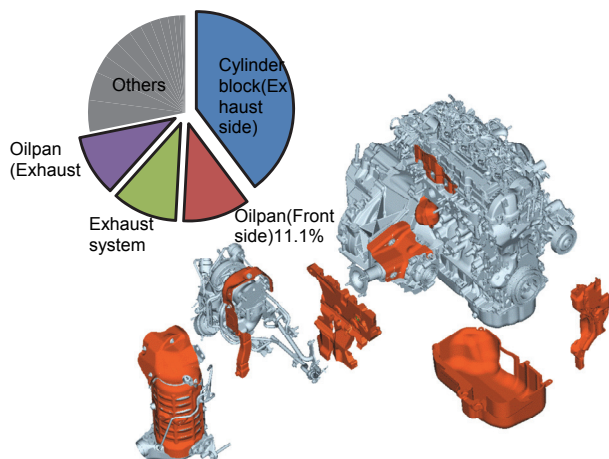


Fig. 16 Insulation Cover of Engine

車体側においても、実走行状態のエンジンルームや車内の多点計測、更にスピーカ加振による遮音量計測もあわせて行うことで、主要伝達経路であるダッシュパネル下部からアンダ構造にかけて更に詳細に経路分析を行った。それぞれの寄与率を求めることで、Fig. 17 に示すような、ダッシュパネル下部からアンダ構造部に設定しているインシュレータ及び、車内フロア領域のコンソール内部に効果的な遮音材の設定を行っている。

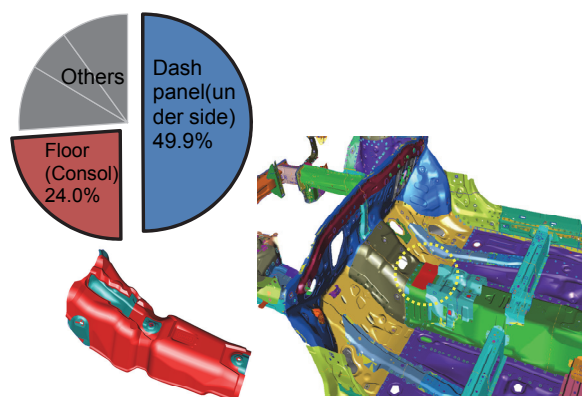


Fig. 17 Insulation Cover of Vehicle Components

#### 5. まとめ

マツダは出力、燃費、エミッション性能を高次元でバランスさせつつ、従来型を上回る静粛性を達成した新世代クリーンディーゼルエンジン、SKYACTIV-D 2.2L を搭載した新型アクセラを開発した。

(1) 開発初期より、ノック音の伝達経路に基づいた重要機能の絞り込みと、その機能を CAE と実機検証により強化する開発プロセスに取り組んだ。これにより効果的な対策を行い、高い環境性能と両立しつつ大幅なノック音の低減を実現した。

(2) ピエゾインジェクタによる精密な噴射制御に加え、着火環境予測モデルにより、定常だけではなく過渡時の熱発生率コントロールも行うことで、加速シーンでの適切な燃焼加振力に制御することを行った。

(3) 主要な伝達経路内でエンジン・車体トータルで伝達特性や遮音機能を最適化することで、重量やコストとの高次元な両立を行った。

今後、重要機能のモデルベース開発を加速させ、お客様に走る歓びと高い環境性能・快適性を提供できるよう、SKYACTIV-D の更なる進化を目指していく。

## 参考文献

- (1) 大塚雅也：ディーゼル燃焼騒音のエンジン構造での低減方法，自動車技術会学術講演会前刷集 20055143 (2005)
- (2) Sakono, et al. : Mazda SKYACTIV-D 2.2L Diesel Engine, AACHEN COLLOQUIUM 2011, p.943 (2011)
- (3) 森永真一ほか：SKYACTIV-D エンジンの紹介，マツダ技報, No.30, pp.9-13 (2012)
- (4) 住谷章ほか：最新ディーゼル機関の静粛性向上技術，自動車技術会論文集 Vol.67, No.7 (2013)

## ■著者■



白橋 尚俊



阿部 宏司



住谷 章



住田 英司



岩田 陽明



松原 武史