

CASE STUDY

いすゞ自動車 - ディーゼルエンジンの音質改善

Automotive

日本

PULSE ビームフォーミング、音響ホログラフィ

ディーゼルエンジンの音質を改善するために、いすゞ自動車はブリュエル・ケアーと共同で音質メトリクスマッピングを開発しました。ラウドネスやシャープネス、ラフネスなど、音の知覚に基づいたパラメータ（音質メトリクス）を用い、音の特徴別に騒音源の位置を特定できます。同時に、ディーゼルエンジンのどこから衝撃的な騒音が発生しているかを特定するために、「インパルス」の新しい計算アルゴリズムも開発しました。いすゞとブリュエル・ケアーのプロジェクトによって、ビームフォーミングとSONAH（統計的最適化近距離場音響ホログラフィ）システムで使用できる、世界初の音質メトリクスマッピング用ソフトウェアが誕生しました。

Photos courtesy of Isuzu



いすゞ自動車

いすゞ自動車は日本の商用車およびディーゼルエンジンの製造会社であり、東京に本社を置いています。最初のトラックを生産ラインで完成させてから 80 年以上、先駆的に技術を革新してきました。いすゞは商用車、ディーゼルエンジン、そしてカスタマーサポートや環境への配慮において、最先端を行くことを目指しています。

いすゞ自動車は日本やタイ、その他様々な国で生産されるトラックやバスに重点的に取り組んでおり、小さなピックアップから大型トラックまで、幅広いトラックを取り扱っています。

Fig.1
いすゞの研究開発施設

また、エンジンは今日でもいすゞの中核であり、これまでに 2000 万台ものエンジンが世界中の顧客に届けられました。エンジンは 2.5 リットル (4 気筒) から 16 リットル (6 気筒) にわたり、信頼性と耐久性の高さで知られています。実際、いすゞは オペルやゼネラルモーターズにディーゼルエンジンを供給しています。トラックの他にも、いすゞのエンジンは海運の分野や、掘削機やクレーンなどの産業機械でも使われています。いすゞが重点的に取り組んでいるのは、ディーゼルパワートレインの開発と、パワートレインの品質改善です。



いすゞの研究開発施設は、神奈川県藤沢工場内にあります。

藤沢工場の広大な敷地は、1961 年に稼働し始めて以来、商用車の組み立てや部品の製造にも使用されています。

いすゞとブリュエル・ケアーの関係は 30 年以上前から続いており、すべてのマイクロホンと大半の加速度ピックアップはブリュエル・ケアーの製品です。さらに、いすゞは多数の PULSE データ収集分析システム、そして数セットのマイクロホンアレイを所有しています。また、いすゞにおける FFT 分析とオクターブバンド分析の大部分は、PULSE により行われています。

なぜ音質メトリクスマッピングなのか？



近年、自動車の排気や騒音による環境問題が注目を浴びています。乗客や道路周辺住民の快適さのためには、放射音の音圧レベルを低減するだけでなく、音質を改良することがますます重要になっています。いすゞは音質を重要なセールスポイント、かつ差別化要因と考えています。

ディーゼルエンジンは、ディーゼルクラッタやディーゼルネイリング、ディーゼルノックとして知られる特徴的な騒音を発生します。これらの騒音は、燃焼が始まる時点ですでに蒸発している燃料の突然の燃焼が主因となって発生します。この騒音は好ましくありませんが必ず発生するものであり、またどこで発生しているのか正確に特定するのが難しいことで知られています。

ビームフォーミングや近距離場音響ホログラフィ (NAH) などの従来のマイクロホンアレイ技術では、音圧や音響インテンシティのような物理量で騒音源の位置を特定します。しかし音質メトリクスをパラメータにすると別の音源がより高い値を示すことがあり、客観的な値である物理量のコンター図が、主観的な知覚を正確には反映できていない可能性があります。たとえば、知覚されるディーゼルエンジンの音質を改善するためには、音圧レベルの高い騒音源ではなく、衝撃的 (インパルス) な、または粗い (ラフ) な音を発生している騒音源を特定することが求められます。このため、いすゞとブリュエル・ケアーは共同で音質メトリクスマッピングを開

発しました。音質メトリクスマッピングでは、ラウドネスやシャープネスやラフネスなど、人間の知覚に基づいたメトリクスを用い、音の特徴別に騒音源を特定することができます。同時に、ディーゼルエンジンから発生する衝撃的な音の発生源を明確に特定するため、インパルスネスの新しい計算アルゴリズムを開発しました。

騒音・解析実験グループのマネージャでスペシャリストの齋藤氏は、次のように語っています。「音質メトリクスマッピングの目標は、不快な音や質の悪い音がどこから発生しているのかを特定することです。以前は、オーバーオール音圧レベルを測定していました。しかし測定結果はあくまで客観的で、音が人間に知覚されるのと同じように主観的に分析することはできませんでした。」

シミュレーション

音質メトリクスマッピングを検証するため、音質の異なる仮想的な点音源によるシミュレーションを行いました。使用した計算手法は、ビームフォーミングと音響ホログラフィです。シミュレーションでは、分散配置した複数の音源がそれぞれ特徴的な（音圧レベル、ラウドネス、シャープネス、ラフネス、インパルスネスなどのいずれかが特に高い）性質を持っており、それらの音源を空間的に分離することとしました。

ビームフォーミングのシミュレーションでは、直径 1m、66 チャンネルのホイールアレイを使う設定としました。そして、単極音源をマイクロホンアレイから 1m 離れた音源平面上に分散配置しました。音響ホログラフィのシミュレーションでは、マイクロホン間隔 5cm、8ch × 8ch の矩形アレイを使用し、アレイと音源の距離は 7.5cm としました。

このように 2 種類のアレイ技術でシミュレーションを実施したところ、音圧などの従来のパラメータでは識別できなかった音源の位置を、音質メトリクスマッピングでは音源の性質に基づいて特定することができました。また、シミュレーションにより同定した音源の特性は、各音源に入力値として与えた特性とよく一致しました。

アルゴリズムの統合

シミュレーションと検証に続き、いすゞとプリュエル・ケアーは、ディーゼルエンジン騒音を聞いた時に知覚されるインパルスネス（衝撃性）を確実に予測するため、インパルスネスの計算アルゴリズムを開発しました。主観評価実験によってインパルスネスがどの程度知覚されるかを評価し、計算したインパルスネスと比較することで計算アルゴリズムの有用性を確認しました。そして、衝撃性の高い騒音の発生源をより効率的に特定するため、インパルスネスアルゴリズムを音質マッピングに組み込みました。

エンジン騒音実験

上記の過程を経て、音質メトリクスのマッピングが実際のディーゼルエンジン（A と B）の測定に適用されました。エンジンは、5.2 リットルの直列 4 気筒エンジンと、9.8 リットルの直列 6 気筒エンジンです。

Fig. 2
84 チャンネルのセクターホイールアレイを使用し、エンジン A とエンジン B を対象として半無響室で行われた SONAH（左）およびビームフォーミング（右）の測定

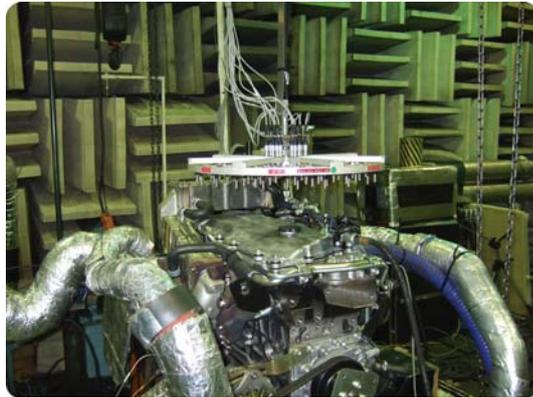


Fig. 3
いすゞの音質マッピング用機材の中の PULSE フロントエンド

広い周波数範囲をカバーするために、ビームフォーミングと SONAH の両方を使用しました。ビームフォーミングは高周波の、SONAH は低周波の音源同定に用いられます。すべての測定には、直径 0.5m、84 チャンネルのセクターホイールアレイを用いました。「システムをセットアップして 3 面について測定し、プリュエル・ケアーの PULSE ソフトウェアでデータを処理するのに必要だった時間は、ほぼ 1 日でした。」と齋藤氏は語っています。測定ではアイドル状態から最高回転数までの加減速試験と、定常試験の両方が行われました。

実験により得られた音質マップの騒音源位置は、従来の音圧マップの結果とは大きく異なっていました。エンジン A および B のビームフォーミング



と SONAH の測定では、ヘッドカバーとバルブギャップの状態を変更した場合の変化を検証するため、エンジンから 1m 離れた位置の単一マイクロホンによる測定も行いました。

「問題を特定することで設計を変更でき、最終的には音質を改善できます。そのためには、様々なエンジン条件に対してどのメトリクスが重要なのかを突き止める必要があります。たとえば 1 つの方法は、音質メトリクスを記録しておき、その後で多数の被験者による主観評価実験を行うことです。」と齋藤氏は語ります。「今のところ、我々は空気伝搬音に焦点を合わせています。ディーゼルエンジン騒音で支配的なのは 800 Hz から 4 kHz の成分です。インジェクタやターボチャージャの騒音は 10 kHz にまで及ぶことがあり、単一のマイクロホンと PULSE で測定しています。音質メトリクスマッピングの周波数範囲が広がればこれらの騒音を評価できるので、それが実現可能かどうか、大変興味を持っています。」

Fig. 4
ビームフォーミングによる
様々なメトリクスのマッ
ピング：左から、定常ラウド
ネス、ラフネス、結合メ
トリクス



いすゞは音質メトリクスマッピングをもはや試行的な技術とは考えておらず、世界に先駆けて積極的に実際の測定に利用しています。「音質メトリクスマッピングソフトウェアはいすゞにとって非常に有益なものになるでしょうし、今後ますます価値のあるツールとなっていくでしょう。テストベンチでパワートレインの音質を調べる初期試験を行ったのですが、エンジンを取り付けた全車の試験を担当する部署がその結果を見て、同じ技術を使うことに非常に興味を持ちました。」と齋藤氏は述べています。「音質メトリクスマッピングには非常に満足しています。この技術は、いすゞが今後も世界トップレベルのディーゼルエンジンを開発し続けるために、大きく貢献する可能性を持っています。」

標準品として利用可能

いすゞ自動車とブリュエル・ケアーの協力により、音質メトリクスマッピングは 8608 型 PULSE ビームフォーミングおよび 8607 型 音響ホログラフィに実装され、世界初の市販の音質メトリクスマッピングソフトウェアとなりました。これは、キーカスタマーとブリュエル・ケアーが協働し、自動車産業においてどのようにして最新技術を開発するかを示す好例といえます。



© Brüel & Kjær. All rights reserved.

ブリュエル・ケアー・ジャパン www.bksv.jp info_jp@bksv.com
東京：03-6810-3500 大阪：06-4807-3261 名古屋：052-220-6081

HEADQUARTERS: Brüel & Kjær Sound & Vibration Measurement A/S · DK-2850 Nærum · Denmark
Telephone: +45 7741 2000 · Fax: +45 4580 1405 · www.bksv.com · info@bksv.com

Local representatives and service organisations worldwide

Brüel & Kjær