

アクティブ・サウンド・マネジメント技術の紹介

Introduction to Active Sound Management technology

サンジェイ シング
Sanjay Singh

若松 丈裕
Takehiro WAKAMATSU

石村 桂三
Keizo ISHIMURA

要旨

アクティブ・サウンド・マネジメントは、既存の音響システムを活用し、効果的に音制御を可能にする技術である。パワートレーンから発生する低周波数のうなり音の低減や車室内空間への快適なエンジン音の提供など、近年、車室内における快適音響環境を提供する技術として、その適用が拡大している。

本稿では、Müller BBM 社のアクティブ・サウンド・マネジメントアルゴリズムを DSP 上にコーディングし、当社が開発したシステムについて報告する。

既存のオーディオシステムをベースに、マイク・スピーカなどを加えた構成部品や CAN-BUS の信号処理などシステム設計要件および、実車チューニングの効果確認・分析結果（うなり音の低減効果と創出したエンジン音）について紹介する。

Abstract

Active Sound Management is a technology that enables to control sound effectively leveraging the existing audio system. More recently, it has been expanding to be applied as a technology to provide in-cabin acoustic environment with comfort, such as eliminating uncomfortable low frequency “boom” sound resulting from powertrains and enhancing powerful engine sound.

In this article, the system developed by DENSO TEN, which includes the DSP with Active Sound Management algorithm by Müller BBM GmbH coded, is discussed. Based on the existing audio system, configuration parts added microphone, speaker, and others, system design requirement such as signal processing of CAN-BUS, and analysis of tuning results on actual vehicles (reduction of boom sound and enhancement of engine sound) are introduced.

1. はじめに

1.1 アクティブ・サウンド・マネジメントとは

アクティブ・サウンド・マネジメントは既存の音響システムを活用し効果的に音制御を可能にする技術である。この技術は用途に合わせて様々なオプションを提供できる。過去 10 年間、ノイズバイブレーション（以下 NV）性能を担当する技術者

がパワートレーンから発する低周波数のうなり音を削減する事でドライバの疲労感を軽減しようと本技術を利用してきた。しかし近年ではこの用途に加え車のイメージに合わせた車室内環境、例えば洗練された音、親しみやすい快適な音、スポーツカーの様なエキサイティングな音を作り上げるためにも使用されている。

アクティブ・サウンド・マネジメントのソフトウェアはパワートレーンの好ましくない音を消去

もしくは削減、好ましい音を創出もしくは強調するために位相干渉を継続的に発生させるようプログラムされている。調整されたエキゾーストマニホールド（エキマニ）、導波管、マフラー、ダンパーなど高価な物理的ソリューションに頼る割合を大幅に削減し、ソフトウェアによって理想の音作りを実現できる。

この技術の2つの機能を以下で紹介する。

1.2 アクティブ・ノイズ・キャンセレイション (ANC)

車両の軽量化を主目的としたコンポーネントの削減により振動が増加し、エンジン音の増大やパワートレーン音の発生に繋がっている。また早期のトルクコンバーターロック、シリンダーの不活性化、ハイブリッド車における電気モーターから内燃エンジンへの移行時の音、無段変速機 (CVT) ドライブトレインの採用などにより、不快音が発生する。このような不快音は燃費向上を目的とした技術の副作用であり、車両全体の品質低下に繋がる恐れがある。ANC はこれらの音 (及び関連した倍音) を削減する技術である。

1.3 エンジン・サウンド・エンハンスメント (ESE)

パワフルなエンジン音は車室内で強調される事が望ましい音の一つである。ESE は低燃費、高回転、高トルクの小型化されたエンジンのアコースティックサウンドを低いベース音を鳴り響かせるような伝統的な I5/V6/V8 エンジン音のタッチにすることが出来る。また、親しみやすい4気筒もしくは6気筒エンジン音を作ること、3気筒エンジンの不快音をカバーすることも可能である。電気自動車においては、この技術がエンジン音作りのために使用されることもある。

2. アクティブ・サウンド・マネジメントシステムの概要

2.1 システム構成

図1は簡潔な LMS (Least Mean Square) システム図を示している [Ref.1]。自動車業界における本技術の利点は、様々なコンポーネントの回転速度 RPM が 12ms から 25ms の間に限られていることである。ターゲットとなるエンジン音やパワートレーン音の幅が狭いため、ソフトウェア上での調整に大幅な時間をかける必要がない。このため完成したソフトウェアは非常に軽く、インフォテインメントシステムやオーディオシステムの CPU、DSP に比較的簡単に組み込める。一般に、複数の ANC と ESE のデータセットは同時に稼働し、スポーツモードにおいてはシームレスにシリンダー不活性化状態からの移行を実現する事が出来る。

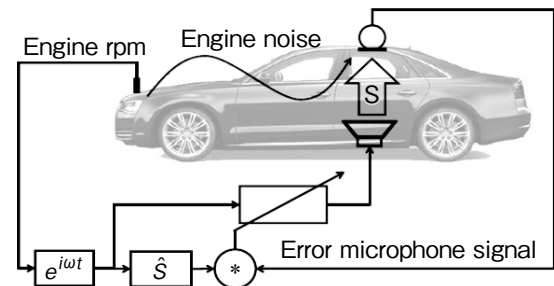


図1 ANC と ESE のブロック図 (1)

2.2 システムの構成部品：マイクロホン

一般的なアクティブ・サウンド・マネジメントアプリケーションは既存のオーディオシステムを活用している。エラーマイクロホン (e-mic) は、ESE には必ずしも必要ではないが、ANC には適

*⁽¹⁾ Rolf Schirmacher of Müller-BBM Active Sound Technology GmbH, "Active Noise Control for the 4.0 TFSI with Cylinder" in SAE International, 2012-01-1533, 2012,

用されている。ANC用のエラーマイクロホンは1KHzなど非常に限られた周波数応答で対応可能である。そのため、ハンズフリー用のマイクと比べるとコストが低い。

ANCの周波数キャンセル領域は、e-micと乗客の頭部の位置の距離によって定まる（例：1/4波94cm = 90Hz）。例えば、車両中心にあるe-mic 1つにより、60Hz以下で大幅なノイズキャンセルが出来るが、全てのシートでは90Hzに達すると効果が低下する。またドライバーポジションに配置されたe-micは240Hzで最大のノイズキャンセルを可能にし、300Hzで効果が低下する。最新のシステムでは、すべてのシートでノイズキャンセルの効果を発揮するため、三～四つのe-micを採用することが一般的となっている（図2）。

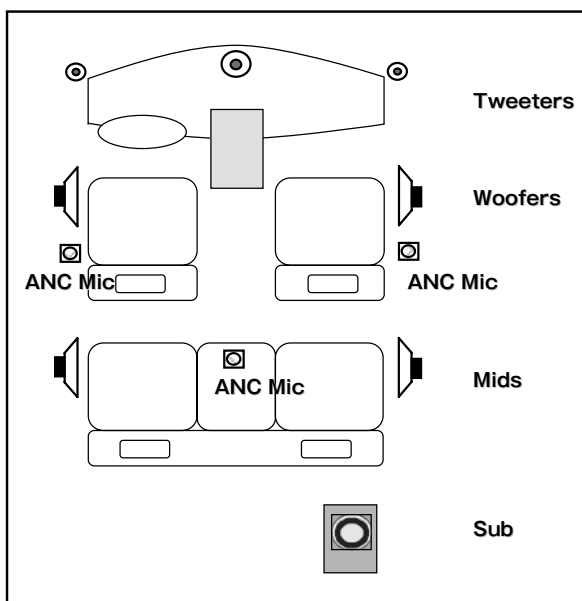


図2 一般的な3エラーマイクの配置構成

2.3 システムの構成部品：スピーカ

アクティブ・サウンド・マネジメントのチューニングは目指す音作りのイメージに依るところが大きい。例えば、エンジン音の直線性を再現するために、2dBのノッチを埋める、30-90Hzにかけて20dB以上をキャンセルする、強力なノンターボエンジンの唸るような変調音を作る、などのアイディアがある。

すべての車両はスピーカが搭載されているが、一般的なアクティブ・サウンド・マネジメントでは1～6個のスピーカが機能している。4箇所のスピーカに加えて二つのツイータを持つ構成が広く見られる（図2）。燃費の良いパワートレインの副作用として発する低周波音を除去する必要があるため、大型SUV車には専用のサブウーファーを追加することが一般的である。またハイエンドなスポーツカーモデルは、ESEのために低周波音のチューニングが可能な音響システムがオプションとして選べることが多い。

2.4 システムの構成部品：信号

アクティブ・サウンド・マネジメントは継続的に変化するエンジンやパワートレインのRPMとマッチする必要がある。遅延すると、好ましくない人工音やゴーストサウンドを引き起こす可能性がある。そのため本システムはパワートレイン信号に対するリアルタイム性が要求される。

ANCにはアナログ入力もしくはCANバスを介したRPM信号が入力信号として必要である。ESEはRPMに加えて、トルクや車速、アクセルペダルの踏み込み具合などの情報を用いる。RPM信号は周波数のマッチングに、他の情報は振幅を調整するために使用される。ドアや窓の開閉、車室内気温、ギアの状態、各種診断結果など、その他の信号を使うことで更に性能向上が可能となる。

3. システム設計

3.1 システムの設計について

アクティブ・サウンド・マネジメントシステムの設計にあたり検討すべき技術的な課題は、LMSアルゴリズム、データセットの数、e-micのSN比と群遅延、e-micの配置、転送機能の測定、コンバージェンス、トラッキング、インパルス雑音の低減、e-micにかかる風音の緩和、安定性

vs. ダイバージェンスの検知・削減、スピーカと e-mic の極性と性能に対する様々なダイアグ、リトライ方法等、数多く挙げられる。

チューニングの難易度は要求のレベルに依る。ダイナモメーターを使用すると、ギアの移行や車両荷重に応じたシミュレーションが可能になるため、チューニングが容易になる。チューニングの最終確認は、テストコース上で専門ドライバと NV と音響専門のエンジニアにより行われる。

3.2 音響性能領域

主流であるアクティブ・サウンド・マネジメントシステムは、ヘッドレストに特別に用意されたスピーカのない従来の車両オーディオシステムを採用しており、これは「遠距離場」システムに該当する。このようなシステムでは ANC によるノイズキャンセルは 300Hz 以下で十分な性能を発揮するが、240Hz 以上になると効果が低下する。これは e-mic と乗客の頭部の距離による限界である（図 2 参照）。また量販車向けの一般的な ESE は 800Hz で性能を発揮し 1000Hz にかけて効果が低下する。これはサウンドローカライゼーション（リスナーが音源の距離と位置を認識できる能力）の限界が一つの要素となっている。従来の低性能の 15cm スピーカでノイズキャンセルや音の強調も可能だが、30Hz 帯で 25dB より大きいノイズをキャンセルするために高級なウーファや専用のサブウーファを採用する場合もある。30Hz 未満では 4 気筒エンジン搭載車で 2 次周波数が 900rpm、6 気筒エンジン搭載車で 3 次周波数が 600rpm になるが、RPM 信号そのものの精度は高くない。そのため遮断周波数の下限は RPM 信号の性能の影響が大きく必ずしもサブウーファのサイズによって決まるものではない。

ANC で 800Hz 未満、ESE で 3000Hz 未満に対応できる近接場も含めハイレベルな ANC と ESE のオプションも存在する。このソフトウェアも軽さをキープできるが専用のスピーカと e-mic を特別な位置に配置する必要があるため、高コストとなり高級車の領域となる。

3.3 マルチメディアにおける音の歪み

アクティブ・サウンド・マネジメントシステムでは、音源の歪みが大きな問題になるリスクは低く、オーディオシステムのチューニングと本技術が干渉を起こす可能性は低いと考えられる。

ANC ではノッチフィルターを用いることで、特定の周波数をキャンセル出来る。適切なバランスで設計されたノッチフィルタは、音源に微塵の影響も与えない。ANC は、既に音源内で背景のノイズ音として存在する複数のエンジン次数（高調波）を対象とする RPM 信号を使っているため、通常音源の鮮明さを高める。一方、ESE は望ましいエンジン次数を強調する（音量を上げる）ことも、従来では複雑な構造のエキマニやバッフルを利用した変調音によって作られていた数多くの新しい次数を追加することも可能である。ESE は、アクセルが強く踏まれた際や高トルクが要求される際に、非常に正確なタイミングで巧妙に適用されている。体感的には、音の歪みではなくパワフルなエンジン音を認識できる。

燃費性能の良い小型車の中には、エンドユーザが「追加サウンドパック」をダウンロード出来るモデルもある。例えば F1 のレーシングカーの音を擬態することが出来る。ユーザーに楽しさを提供するだけでなくテレマサービスとして収入を生み出す機会ともなる。ESE の効果は図 7 に示したハイパフォーマンスモデル車（350 馬力、440N・m）でもわかるように、低周波領域での緑から赤の部分が大幅に増えており、高回転での重低音が強調されていることがわかる（図 7 参照）。耳が訓練されていないドライバであればドリフトモードによる走行で 100dB の近くまでハイパフォーマンス車のエンジン音を楽しめ、音の歪みには気が付かない可能性が高い。一方でスポーツカーの音に詳しいドライバーであればバッフル、エキマニが無いにも関わらず、4 気筒エンジン搭載車の音環境の実現に驚きすら覚えるであろう。この技術を採用した北米自動車メーカーは、アクティブ・サウンド・マネジメントは製品に魅力をもたらすと同時に新たな利益も生み出すと評価している。

4. システムの性能・効果

4.1 ANC の分析

図3は当社がチューニングした4気筒エンジンの搭載の2018年北米向け中型クロスオーバー車でのANCの事例を示す。ステレオシステムは4チャンネル、前方に2つのツイータ付きの6 x 9インチのスピーカ、後方に2つの6インチのスピーカが付いている当社の基本的なシステムである。各席に一つずつ合計4つのe-micがある。運転席において通常の走行速度におけるRPMでは、2次周波数では10dBから20dB、4次周波数では最大10dBのノイズ削減が見られた。運転席以外でも良い性能が発揮されたが、ここでの説明は省略する。

図4は市場で人気のある中型SUV車6気筒エンジンのANCチューニングを示している。使用されているシステムは図3で示した車両と同様であるが、図4のモデルの方が大きい。メインの6インチのスピーカ、2つのツイータ、そして各席に一つずつ合計4つのe-micが搭載されている。6気筒エンジンであるため、3次周波数のエンジンノイズが最も大きい。この車両には小さなスピーカも付いているが、通常の走行速度において20dBまでの3次周波数の安定的なノイズキャンセルが確認できた。

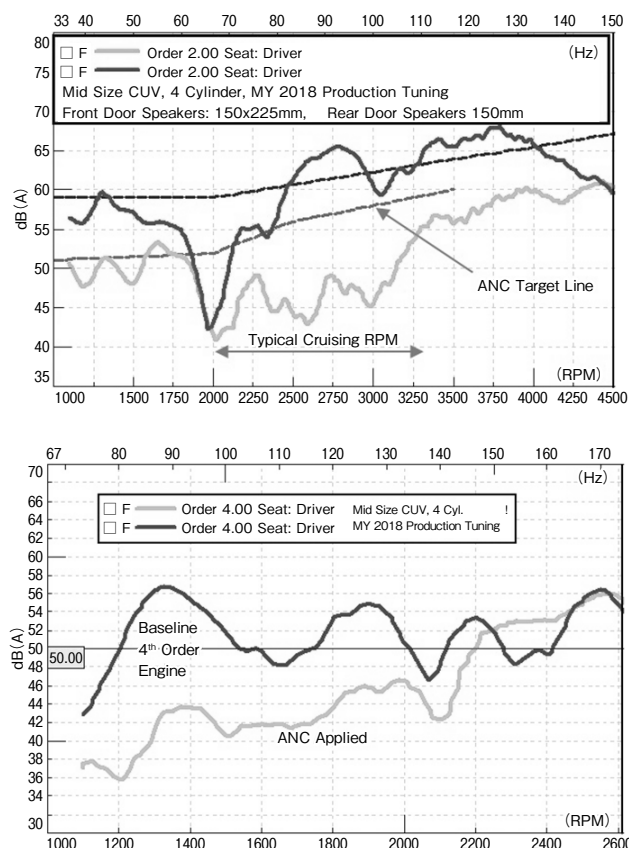


図3 中型CUS車、4気筒エンジンのANC効果

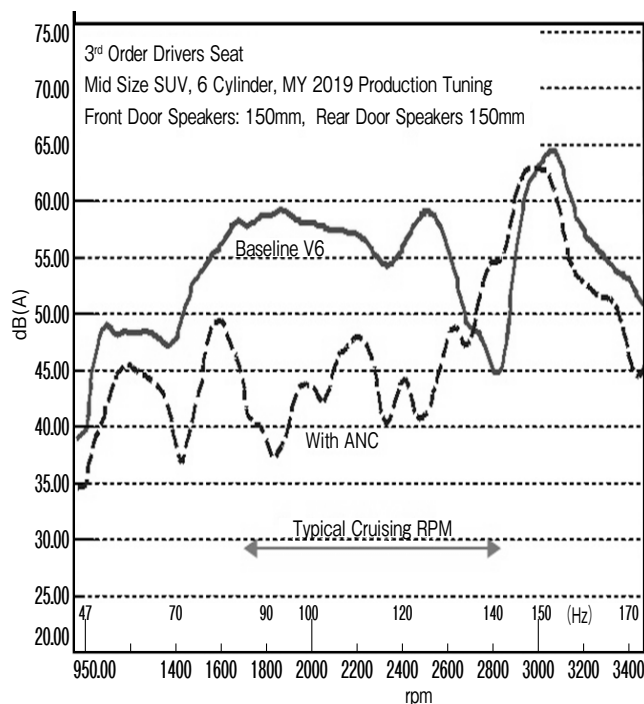


図4 中型SUV車、V6エンジンでのANC効果

図5は図3、4と同じシステムを用いたANCデモの結果を示したキャンパベル図である。使用した車種は4気筒エンジンのミニバンである。この車両は非常に騒音レベルやRPMが高く、スピーカ性能が不十分であったため、前方スピーカは6.5インチの市販品にアップグレードした。ANCは前方2つのスピーカのみ、e-micは前方2列の4席に各一つずつに搭載されている。3列目のシートは本実験では対象外であり、運転席のみの結果を示している。1次周波数は最大10dB、2次周波数は最大20dB、4次周波数は最大10dBまでノイズキャンセルがそれぞれ計測された。

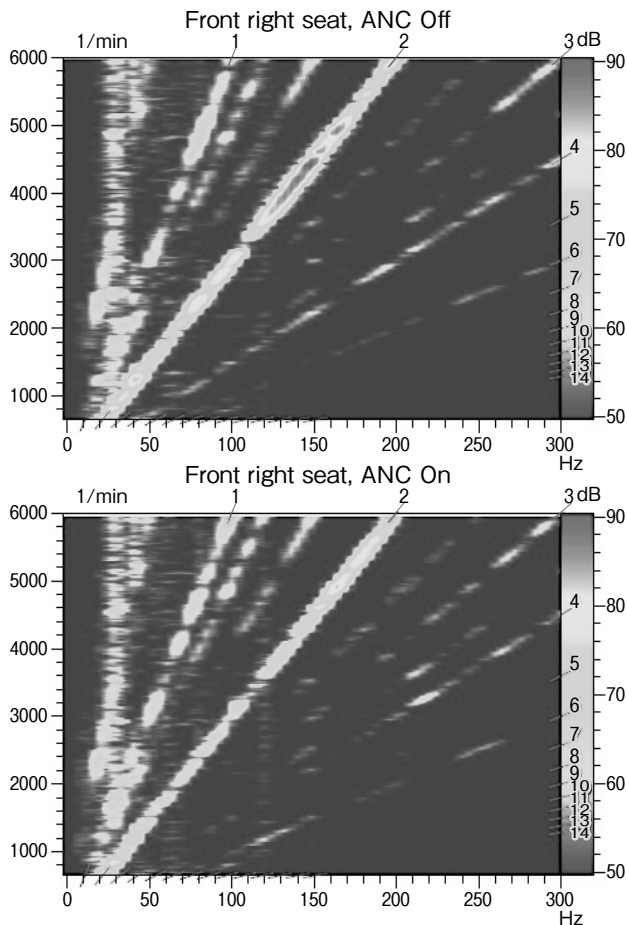


図5 4気筒エンジンのミニバン、キャンパベル図

4.2 ESE の分析

欧州のスポーツカーの様々なタイプの音の実現性を示すために、当社のデモ車両を用いて、サブ

ウーファー有り無し、600Hzまでの音の強調、最大10次周波数までの処理をおこなった結果を図6に示す。左下はチューニング前、右上がサブウーファーによる低周波強調、右下が高周波強調の結果である。狙い通り、赤枠で示した領域が強調され、効果が得られていることがわかる。図7では、4気筒のターボチャージャ搭載エンジンのスポーツカー(350馬力、440N・m)での結果が示されている。キャンパベル図でも強調の効果が確認できるが、本対象車両は100dBの大きな音で21次周波数までのエンハンスメントを採用しており、最終的には5気筒エンジンの音に聞こえる。

F-Ten ESE Demo Vehicle

- Soccer Mom Minivan
- Quiet 4 Cylinder Engine (below)
- 8 Channel Premium Audio System
- 20cm Dual voice coil Subwoofer

ESE Effect 1: Right Top

- Low Frequency Emphasized (Subwoofer)

ESE Effect 2: Right Bottom

- Higher Frequency Emphasized (No Subwoofer)

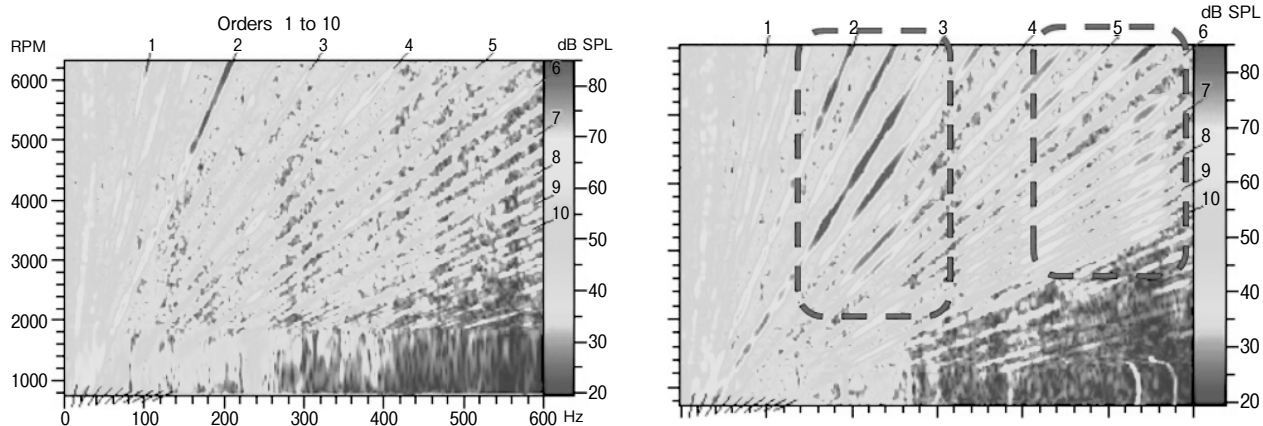


図6 ESE効果のキャンパベル図による比較（通常、サブウーファー有、高周波強調有）

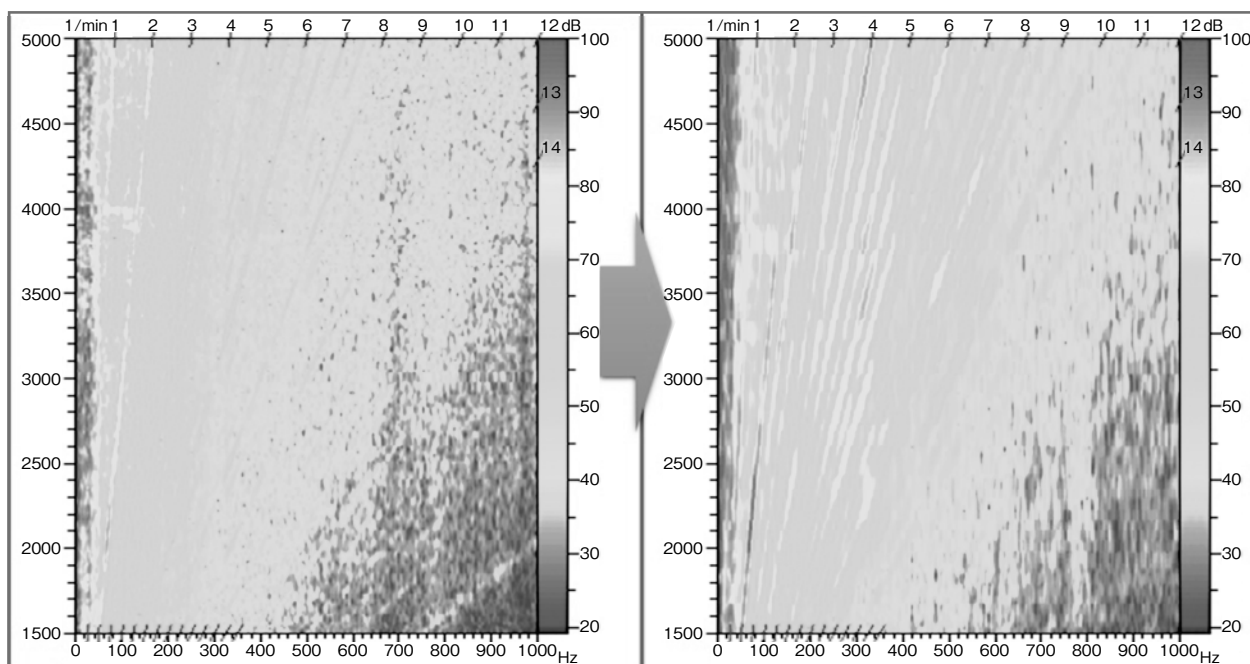


図7 4気筒ターボ付きエンジン（350馬力）搭載、北米スポーツカーにおけるESEの効果（3rdギア）

5. おわりに

アクティブ・サウンド・マネジメントは過去 10 年間は高級車向け、もしくはサウンドにこだわるドライバー向けの技術であった。しかし最近では Mid～Low グレード車への採用も広がり始めている。また、OTA (無線ネットワーク) や USB ダウンロードを通して音響環境をアップデートするテレマサービスのコンテンツとしても注目されており、今後の適用拡大が期待されている。

アクティブ・サウンド・マネジメントは風切音やロードノイズ除去のソリューションとしても期待されており、今後更なる研究開発に取り組んでいきたい。

筆者紹介



サンジェイ シング
Sanjay Singh

DENSO TEN
AMERICA Limited



若松 丈裕
わかまつ たけひろ

DENSO TEN
AMERICA Limited



石村 桂三
いしむら けいぞう

DENSO TEN
AMERICA Limited