

先進的なマイクロホンを用いた エンジン騒音低減のための測定方法

By Per Rasmussen

March 2019



先進的なマイクロホンを用いた エンジン騒音低減のための測定方法

By Per Rasmussen, March 2019

車内の音響環境は快適性の主要なパラメータです。内燃機関（ICE）から電動（BEV）または電動アシスト（HEV）への変更に伴い、エンジンベイ内の従来の騒音源と新しい騒音源やキャビン内への伝達経路に改めて焦点を当てる必要があります。

これを研究する方法としては、相反定理を用いて、キャビン内の受信位置に音源を設置し、その結果として得られるエンジンベイ内の音圧レベルを測定する方法があります。相反定理を仮定すると、エンジンベイ内の音源からキャビンへの伝達の減衰量を推定することができます。この測定には、エンジンベイ内に20個以上のマイクロホンを配置する必要があるため、非常に面倒な作業となります。

この測定は従来、自由音場型マイクロホンを使用して行われてきました。この手順を最適化するために、Volvo Carsでは新しい圧力型マイクロホンをテストしました。その結果、セットアップ時間が大幅に短縮されました。また新しい取り付け方法により、精度と再現性が向上し、プロジェクトサイクル全体を通して同じベースラインを維持することが可能になりました。さらに、同じ測定セットアップを使用して、高温のエンジンやトラックテストも可能になりました。

はじめに

車内の音響環境は、主要な快適性のパラメータの1つです。これは、ドライブトレイン、補機、風切り音、タイヤノイズなどの多くの寄与から構成されており、これらはすべて音源から受信機への伝達に影響されます。

内燃機関（ICE）から電動（BEV）または電動アシスト（HEV）への変更に伴い、エンジンルーム内に新たな騒音源が発生することになり、キャビン内の受信側への伝達経路に改めて注目する必要性ができました。

GRAS Sound & VibrationとVolvo Carsが共同で行ったエンジン騒音低減（ENR）の研究では、エンジンベイから車室内のドライバーの位置への音響エネルギーの伝達に焦点を当てています（図1）。

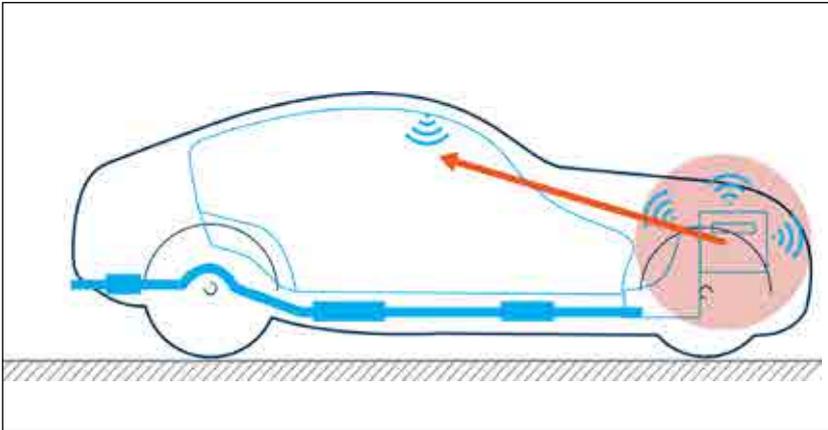


Figure 1
エンジンルームからの音響伝達

一般的に、これらのメカニズムは相反定理を用いて研究されています（図2）。明確に定義された音源を車内のレシーバー位置に取り付け、その結果として生じたエンジンベイ内の音圧レベルを測定します。

相反定理を仮定すると、これらの測定値を使用して、エンジンベイ内の音源から車内のレシーバーへの伝達の減衰を評価することができます。

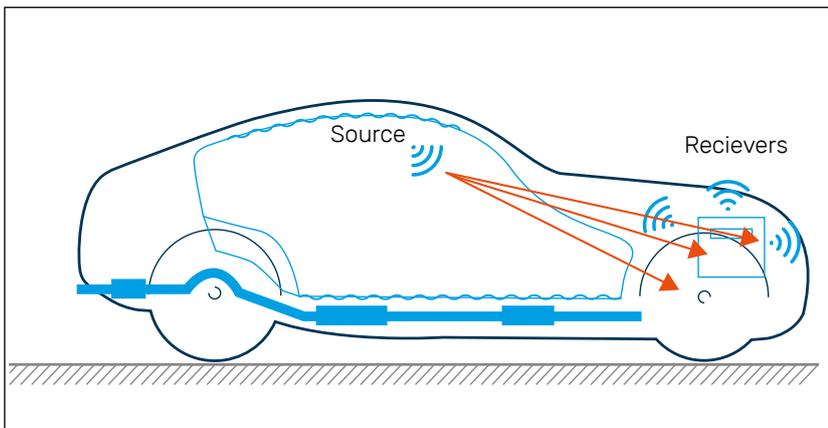


Figure 2
エンジンベイのトランスミッションの相反試験

これらの測定は、エンジンベイ内に20本以上のマイクを設置する必要があるため、面倒で時間がかかります。また、これらの測定で得られる結果の再現性は不十分であり、異なる音響最適化パッケージやダンピング材の構成の効果を定量化することは困難です。エンジンベイへの音の伝達は、ほぼ等しく寄与する多数の異なる経路に分散しているため、個々の伝達経路を低減しても、全体の伝達が大幅に低減することはできません。しかし、全体の大幅な低減を実現するためには、これらの変化を個別に調査することが必要です。

典型的な試験シナリオは、エンジンベイ内の異なる位置に最大24個のマイクロホンを取り付けたベース構成で騒音伝達率を測定し、その後、すべてのマイクロホンを取り外して遮音構成に設計変更を加えます。設計変更後、再度マイクロホンを取り付け、その結果の騒音透過率の変化を測定します。しかし、測定の基本再現性が2~3dBで、設計変更の影響が同じ大きさの場合、その差が設計変更を反映したものなのか、測定の不確かさに起因するものなのかを結論付けることはできません。

従来測定方法の分析

再現性の向上とセットアップ時間の短縮を図るため、ボルボ XC90 乗用車で実施した初期プロジェクトでは、従来方式を慎重に検討しました。試験は、高周波無指向性音源を用いて行いました(図3)。音源ノズルは運転手の頭の位置に設置しました。



Figure 3
高周波無指向性
音源

図4に示すように、エンジンベイ内の指定された24箇所にマイクロホンを取り付け、音の透過率を測定し、全マイクロホン位置の平均値として算出しました。その後、マイクロホンを取り外し、取り付けと測定の手順をさらに2回繰り返しました。



Figure 4
エンジンベイに搭載されたマイクロホン

音の透過減衰量は、キャビン内の基準マイクロホンで測定したレベルとエンジンルーム内で測定したレベルの平均値との差として計算しました。

取り付けと取り外しを繰り返すことで生じる広がりの一例として、3つのマイクロホンをエンジン前方下部の位置に配置して、同じ測定を3回繰り返した結果を示しています（図5）。約1.6kHzまでの周波数範囲では、3つの同じテストの結果は2~3dBの範囲で、それ以上の周波数では6dB以上の差があることがわかります。

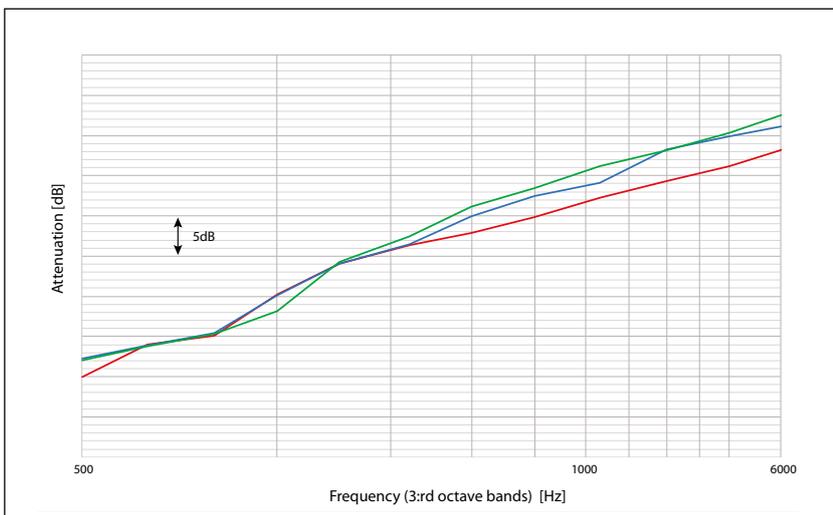


Figure 5
3つの代表的な音の透過率測定

これらの結果から、個別のマイクロホン位置周辺の局所的な音場と、エンジンベイ内の音場の全体的な変動性を詳細に調査することができました。

その一例として、4つのマイクロホンを15mmの間隔をあけて並べて取り付けアセンブリを用いて、わずかに異なる位置で同じ音場を測定しました。（図6）。



Figure 6
4本のマイクロホンを同じ位置に搭載

図7は、車室内の音源から発生したエンジンルーム内の音圧レベルを間隔が狭い4つのマイクロホンで測定した例を示しています。間隔が狭い位置での測定でも、500Hzから5kHzまでの臨界周波数範囲では、3dB以上の差があることがわかります。同様に、エンジンベイの異なるエリアの音圧レベルは、対象となる周波数範囲全体で10dB以上異なることがわかりました。

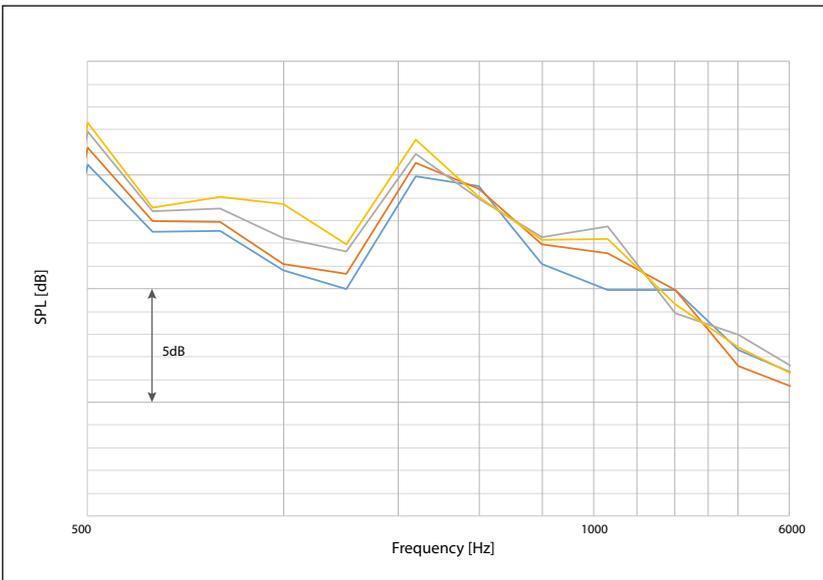


Figure 7
4つの近い位置で測定した音圧レベル

初期の手法検討から得られた多くの結論の中で、再現性を得るためには、マイクロホンの正確な取り付け位置と配向が非常に重要であることがわかりました。また、オペレータによる位置決め指示の解釈の違いにより、結果に差が生じる可能性があることがわかりました。

新しい測定方法とその実用化

従来の測定方法の調査が示すように、マイクロホンの位置が不正確であることが主な制限要因の一つであった。この方法は従来の測定用マイクロホンの使用に基づいていました。円形型のマイクロホンは、音源や障害物から遠く離れた自由音場の条件で、基本的に反射がなく、1つの支配的な音源が存在している音場に最適化されています。これは、ほとんどすべてのスペースが埋まっており、マイクロホンを設置する場所を見つけるのが困難な、現代のエンジンベイの典型的なレイアウトとは大きく異なります。多くの場合、マイクはその場しのぎの取り付け装置を使って取り付けられたり、空いている構造物にテープで固定されたりしています。これにより、テストごと、またオペレータごとに、正確なマイクロホンの位置にばらつきが生じます。また、エンジンベイ内のレイアウトが変わるため、異なるバージョン、モデル、プラットフォーム間での比較が難しくなります。従来の自由音場型マイクロホン（図 8a）の代わりに、構造物への取り付けを目的とした新しい圧力型マイクロホン（図8b）が導入されました。

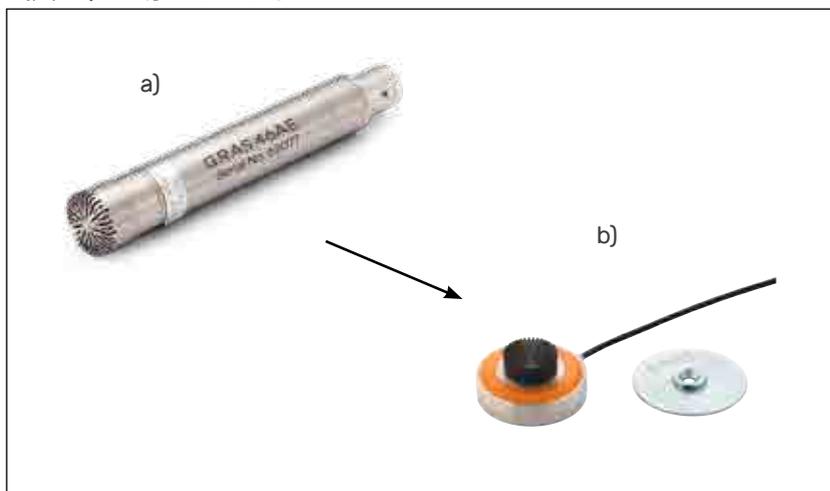


Figure 8
従来の自由音場マイク(a)
と新しい圧力マイク(b)

新しいマイクロホンは、自動車の過酷なNVH試験環境を念頭に置いて特別に設計されています。設計検証の一環として、HALT(高加速度寿命試験)をマイクロホンに行っています。振動、衝撃、落下試験を与え、マイクロホンの耐久性を確認しています。ケーブルを含むマイクは、125℃までの高温用に設計されています。さらに、過酷な環境でも使用できるように防水・防塵仕様になっています。

マルチチャンネル測定の大きな問題の一つは、チャンネルの識別と校正です。これを容易にするために、マイクロホンにはLEDが装備されており、マイクロホンが適切に接続され、使用可能な状態になっていることを簡単に確認することができます。さらに、電源電圧を逆にすることで起動できるTEDS (Transducer Embedded Data Sheet) が内蔵されています。この状態では、トランスデューサーはチャンネル識別のために付属のシグナルアナライザーに完全な校正データを送信します。TEDSを読み取るとLEDが点灯し、特定のトランスデューサーの位置を確認することができます。

マイクロホンには取り付けディスク（図9）が付属しており、両面テープなどで簡単に代表的な位置に取り付けることができ、マイクロホンは、このマウントベースにマグネットで固定されています。これにより、手の届きにくい場所でも、数秒でマイクロホンを取り付けたり取り外したりすることができます。



Figure 9
マイクロホンをマグネットで
取り付けるための取付ディス
ク

ここで説明した試験では、車両やエンジンの構成に依存しない典型的な構造要素を表すようにポイントを選択されるため、車両プラットフォームや車種を超えて結果を比較できます。さらに、取り付けディスクは、プロジェクトの期間中ずっと装着されたままになっています。マイクロホンは取り外して、他の試験のために車両を移動させている間に、他の試験に使用することができます。車両が返却された際には、全く同じ位置のマイクロホンを使用して、最小限のセットアップ時間でテストを行うことができます。取り付け位置を図10に示します。

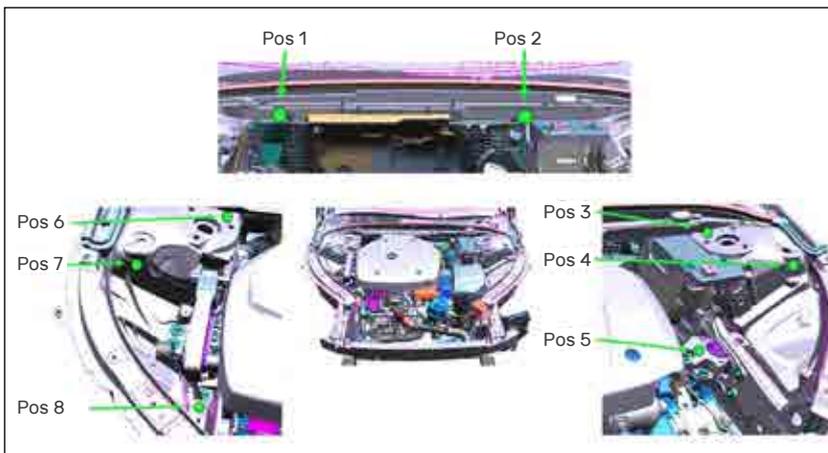


Figure 10
定義された構造点での測定
位置

新しい測定方法での結果

新しい測定方法では、従来方法と同等の試験結果が得られたため、従来の試験で得られた知識ベースが大きく維持されています。しかし、新測定方法では、各試験のセットアップ時間が大幅に短縮され、試験に必要なチャンネル数を24チャンネルから大幅に少なくすることが可能となり、同時に試験の再現性を向上させることができました。

再現性を検証するために、同じ測定を新旧両方の方法で3回行いました。各テストの間に、すべてのマイクロホンは取り外され、次のテストのために再び取り付けられました。旧方式では、図11に示すように、3回のテストでは2.5kHz以上の周波数で1dB以上の変動が見られました。

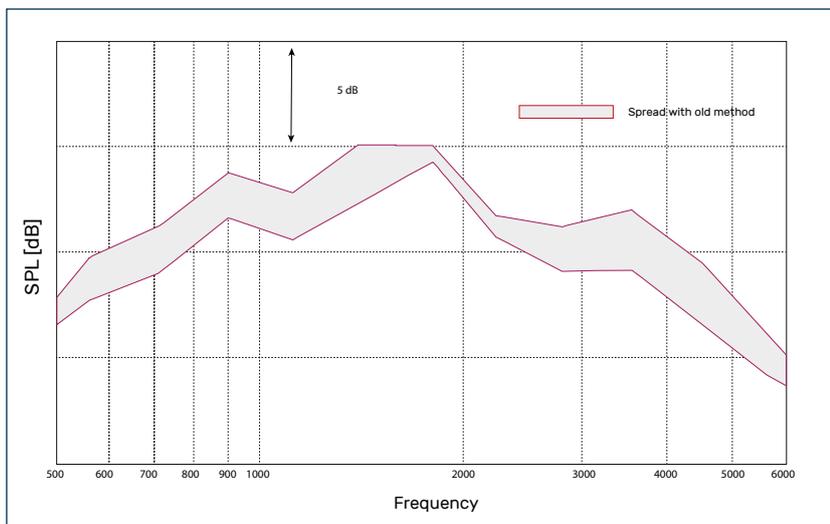


Figure 11
従来方式による誤差範囲

図 12 に示すように、旧方式では 24 本のマイクロホンを使用していたのに対し、新方式では13本のマイクロホンでも同じ周波数範囲で 0.2dB 以内の再現性を示しています。

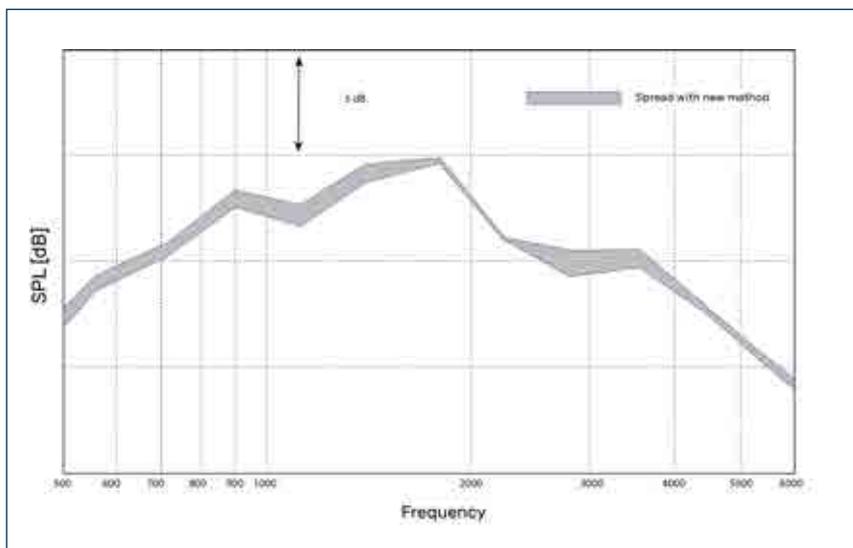


Figure 12
新方式による誤差範囲

500Hzから6kHzまでの周波数範囲での全体的な再現性を0.75dBから0.3dBに向上させました。これにより、プロジェクトの進行中の音響減衰性能の小さな、しかし重要な変化を正確かつ確実に評価することが可能になりました。

測定点の一部のみを見ると、再現性の向上がさらに大きくなります。図13は、エンジン後部付近の3つのポイントについての新旧方法の再現性を示しています。従来の方では、結果はほぼ全周波数範囲で2~3dBの変動があるのに対し、新しい方法では1dB以内であることがわかります。500Hzから6kHzまでの全周波数範囲では、再現性は1.85dBから0.69dBに改善されています。これらの改良により、新しい方法を使用して、全体的な効果だけでなく、エンジンベイの特定の領域の音の伝達を評価することが可能になりました。

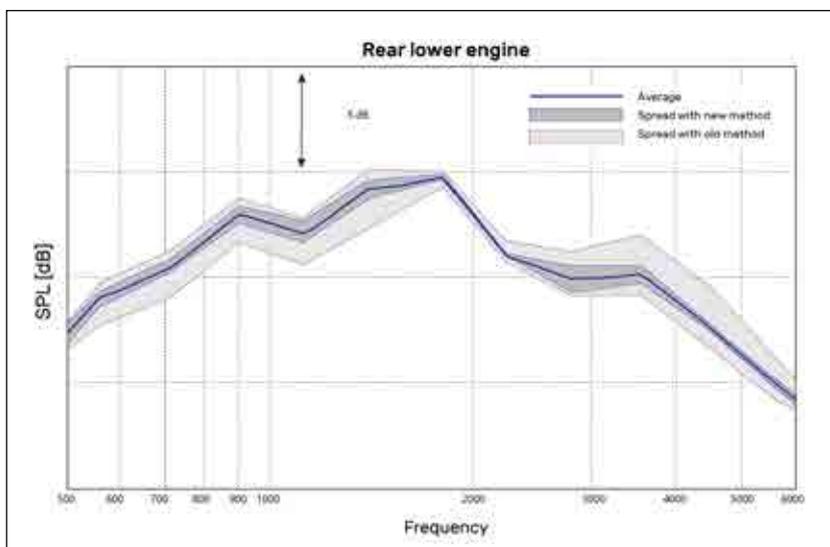


Figure 13
リアエンジン付近の3点について、新旧方式での再現性

まとめ

この新しいマイクロホンの取り付け方法により、音響透過率測定の再現性が向上し、さまざまなサウンドパッケージの最適化戦略や、さまざまな材料選択の評価を正確かつ信頼性の高いものにすることが可能になりました。

セットアップ時間の短縮とチャンネル数の削減により、利用可能な時間内でより多くのオプションや構成をテストすることが可能になりました。また、全体的な効果だけでなく、エンジンベイの特定の領域の音響伝達を評価することも可能になりました。

新しい取り付け方法は、現在、ロードテスト、高温エンジンテスト、ブレーキ音、排気音などの同様のテスト状況で評価を行っています。

謝辞

GRAS Sound and Vibrationは、この研究を可能にしてくれたボルボ・カーズに感謝の意を表します。



お問い合わせ先
丸文株式会社

E-mail: gras@marubun.co.jp

〒103-8577

東京都中央区日本橋大伝馬町8-1

システム営業第1本部 営業第1部 計測機器課

TEL: 03-3639-9881

中部支社

〒450-0003

愛知県名古屋市中村区名駅南1-17-23

システム営業第1本部 営業第3部 システム営業第2課

TEL: 052-563-1181

GRAS Sound & Vibration A/S
Skovlytoften 33, 2840 Holte, DK

gras@gras.dk
+45 4566 4046
gras.dk

GRAS Sound
& vibration