

基調論文 環境維持と安心安全に貢献するデンソーの低騒音技術*

Noise and Vibration Control Technology for Global Environment and Safety Vehicles in DENSO

田中政一 神谷 勝 酒井雅晴 瀬村純一
Masakazu TANAKA Masaru KAMIYA Masaharu SAKAI Junichi SEMURA

The increase in the impact on the global environment and the fatal traffic accidents is critical and complex issues that global society is facing. We, DENSO, have believed that our most important mission is to solve those issues caused by vehicles and we have been striving hard to address them.

The noise and vibration control technology was for preventing noise pollution problem which was the very serial social issue in the past. But, nowadays, it is contributing to the improvement of the calmness of cabin acoustics environment for environmental vehicles such as hybrid electric vehicles and idling stop vehicles. Furthermore it is contributing to the optimization of structural design of automotive parts which were excessive due to the redundant structural design for noise and vibration. The design optimization has facilitated to reduce the weight of automotive parts and resulted in the fuel consumption improvement.

In this paper, the noise and vibration control technology in DENSO is described about the past and current development status, and future prospects of mechanical noise, electromagnetic noise, and fluid dynamic noise respectively.

In addition to that, this paper introduces the new technical study that the sound, which is used as a human-vehicle interface, will be utilized for making vehicles safe and comfortable.

Key words : Noise and vibration, Mechanical noise, Air flow noise, Sound design, Human machine interface

1. はじめに

騒音問題の起源は紀元前に遡るといわれている。古代ローマ帝国では、建築・補修工事の馬車や運搬車両のため、既に交通騒音が社会問題になっていたようである。その後、17世紀になるとヨーロッパでコーチ（懸架式の車体）が普及し、パリでは6頭立ての大型馬車が走り、その情景は「蹄の音、馬車の振動、馭者の叫び声、鞭のしなりなどが渾然一体となって猛烈な騒音をかきたてていた」と描写されている。そのため、馬車の使用に関する規制を導入し、騒音対策していたとの述懐もある¹⁾。

その後19世紀後期に自動車の製造が本格化すると、交通騒音の原因も馬車からトラック・バス・乗用車に変化してきた。20世紀に入り自動車が広く普及すると、自動車騒音は都市部を中心に深刻な騒音公害を引き起こし、我が国でも1950年代から自動車騒音規制が実施されてきた。これに対し、先輩技術者の研究開発の結果、自動車の騒音はモデルチェンジごとに改良され、今では静粛性が自動車の商品性アピールの1つになっている。

一方、昨今の地球環境問題は低騒音技術にも大きな変化をもたらしている。ハイブリッド車やアイドルストップ車の普及によって、エンジン停止中にはエンジン音がなくなり、各種機器の些細な音までが乗員に聞こえるようになってきた。また、燃費向上を目的とした車体や部品の軽量化は、車両各部の振動を増大させる要因にもなり、さらなる軽量化の実現には新しい時代に適応した低騒音技術が必須になっている。このように、低騒音技術は環境維持を支える重要な技術になってきたといえる。

さらに、騒音を低減するだけでなく、音の活用も進んできた。ドア閉まり音やエンジン音には車格に合う音色が求められ、ドアロック操作音やハイブリッド車の接近通報音では音による情報提示も進んでいる。さらに、車線逸脱警報など高度運転支援システムでも音響情報の利用が進みつつあり、自動運転を見据えた安心安全を支えるHMI（Human Machine Interface）の技術としても音の可能性は広がっている。

本稿では、環境維持と安心安全に貢献するデンソーの低騒音技術の開発の現状と将来に向けた取組みを紹介する。

*2015年8月18日 原稿受理

2. 自動車における音の技術動向

日本では、昭和26年（1951年）の道路運送車両の保安基準制定にともない自動車騒音規制が施行された。当初は定常走行騒音と排気騒音の2種類の規制であったが、昭和46年（1971年）から加速騒音規制が導入され、その後も段階的に規制値が強化されてきた。

加速騒音規制の規制値の変遷をFig. 1に示す。規制当初（1971年）と最新の規制（1998年）を比較すると、27年間における規制強化は8dBであり約0.3dB/年の規制強化となる。過去の調査結果²⁾を見ると、市販車両の騒音は騒音規制と概ね同様のペースで低騒音化しており、車両の低騒音化は規制強化に対応しながら進められてきたことが分かる。

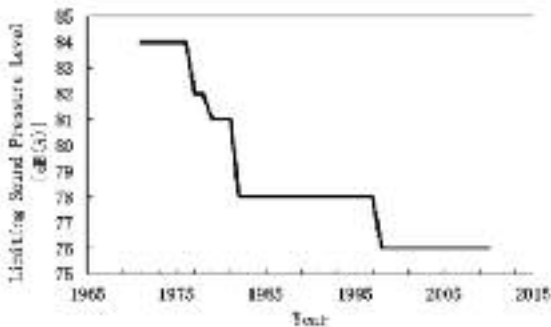


Fig. 1 Transition of vehicle noise emission regulations in Japan

停車時の騒音についても、Fig. 2に示すように加速騒音と概ね同様のペースで低騒音化が進められてきたが、1997年に革新的変化が起こる。量産ハイブリッド車プリウスの登場である。エンジン停止中の車室内の騒音レベルは一気に10~15dB低減され、以後のハイブリッド車、電気自動車、アイドルストップ車等においても同様の静粛性が実現されている³⁾。これを契機に、エンジン停止中に作動する各種機器には一層の静粛性が求められるようになった。

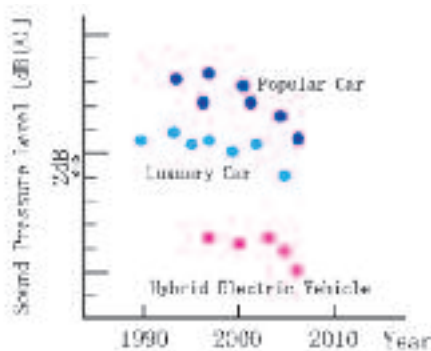


Fig. 2 Trend of noise level in vehicle cabin (measured in DENSO)

さらに、車両騒音やタイヤ騒音の規制強化⁴⁾はグローバルで検討され、また車両の風切音低減の研究開発⁵⁾も進んでおり、車載機器における静粛性のニーズは今後ますます高まると予想される。

一方、自動車に求められる感性価値が高まる中、狙い通りの音を作り出す取組みも進んでいる。ドア閉まり音は車両の質感を印象付ける要素として、古くから一般ユーザにも認識されており、現在ではドア閉まり時の過渡状態の音色を作り込む開発が行われている⁶⁾。また、エンジン音も運転操作に必要なインタフェースとして音色を作り込む開発が進んでおり、吸排気系の不快な騒音を低減する一方、必要な音は積極的に車室内に導入する設計⁷⁾も取り入れられている。

さらに、機器の機械的な作動音のみならず、電子的な報知音の作り込みも進んでいる。ハイブリッド車の本格的な普及にともない、エンジン音がないため車両の接近に気づかずに危険との意見がユーザから寄せられ社会問題と化した。この問題に対し、歩行者等に車両の接近を知らせるための車両接近通報装置のガイドライン⁸⁾が制定され、ハイブリッド車や電気自動車等には各メーカーが趣向を凝らした音が搭載されている。

また、車室内においても、機器の作動状態を乗員に適切に伝えるため、従来の「ピー」という単純な音にとどまらず、ユニバーサルデザインを考慮した周波数特性を持つ音のデザイン⁹⁾や、音質的観点で音に意味を持たせる研究開発¹⁰⁾も進んでいる。

このように、音の技術は、感性品質の1つとして車両や企業のブランディングに活用する動き¹¹⁾に拡大しており、自動車の進化に合わせて音の技術も拡がりをみせている。

3. デンソーにおける低騒音技術開発

3.1 低騒音技術開発の経緯

当社では1970年後半から1990年代にかけ、自動車騒音規制への対応と車両メーカーの低騒音化要求に応えるべく、

- ・車両無響室・部品無響室などの試験設備の導入
- ・社内評価基準の策定
- ・品質管理体制の構築

を全社ワーキング活動で進め、直面する騒音問題に対応する技術開発を行ってきた。2000年以降は騒音問題の撲滅を目指し、

- ・音源探査、流れの可視化などの計測技術のレベル

アップ

- ・CAE解析の精度向上と解析対象の拡大
- ・音質評価などの新技術の手の内化

を進めてきた。

現在は、あらゆる製品でますます高まる低騒音ニーズに対応すると共に、低騒音設計のフロントローディングを目指し、製品固有の低騒音技術開発に加えて複数製品に共通する基盤技術として研究開発を進めている。当社では、音の発生メカニズムによって、基盤技術を機械騒音・電磁騒音・流体騒音の3領域に分類している。

機械騒音は、機械・機構の作動にともなって発生する騒音である。当社製品ではフューエルポンプやエアコン用コンプレッサ等の圧縮音、スタータやディーゼルエンジン用噴射ポンプ等のギヤの噛合音・歯打音、直噴ガソリンエンジン用高圧ポンプやインジェクタ等の各種電磁弁の衝撃打音などがある。パワトレイン関連製品に多く、車両の燃費向上・エミッション低減・動力性能向上を背景に起振力の増大が予想されており、これに対応する技術開発が必要となっている。

電磁騒音は、電磁気的な起振力によって発生する騒音である。走行用モータ・ジェネレータや電動パワーステアリング用モータ、エアコン用ブロワモータ等の各種モータで発生する磁気音、インバータ・コンバータ等の電力変換器で発生するスイッチング音などがある。いずれも周波数ピーク音であり、小さな騒音レベルでも耳障りな異音と認知されるため、車両の静粛化を合わせて人の認知限界に迫る低騒音化が必要となっている。

流体騒音は、流体现象によって発生する騒音であり、エアコンやラジエータ冷却ファンなどの空力音、エアコン配管や燃料配管等の流体関連振動などがある。特に送風ファンはエアコン用ブロワファンやラジエータ冷却ファンに加え、ハイブリッド車のバッテリー冷却ファン、各種電子機器の冷却ファンなど、車載用で増加傾向にあり、騒音低減ニーズが高まっている。さらに、車室内の乗員近くに設置されることから、騒音低減だけでなく音質改善も重要になっている。

以下、機械騒音、電磁騒音、流体騒音の低減の取り組みを紹介する。

3.2 機械騒音低減の取り組み

3.2.1 ガソリン直噴エンジンの騒音

低燃費・低エミッション・動力性能向上のため、直

噴ガソリンエンジンはますます拡大傾向にある。ポート噴射エンジンと直噴エンジンのアイドリング騒音の周波数特性をFig. 3に示す。直噴エンジンはポート噴射エンジンに比べ概ね1kHz以上の高周波で騒音レベルが大きく、その要因の1つに高圧ポンプがある。高圧ポンプはFig. 4に示すようにエンジンのカムシャフトで駆動されるプランジャと電磁調量弁によって燃料を高圧化し調量供給する製品であり、電磁調量弁の開閉時に高周波の衝撃打音が発生する。

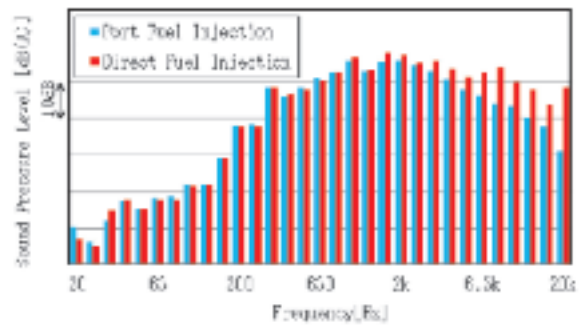


Fig. 3 Frequency characteristics of gasoline engine idling noise (2L, 4cylinder)

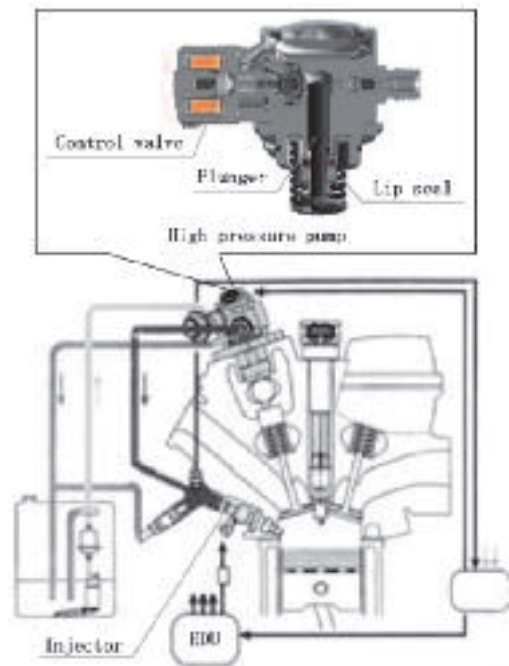


Fig. 4 Schematic diagram of high pressure pump for gasoline direct-injection engine

3.2.2 低騒音化のアプローチ

低騒音化の進め方として実験によるアプローチとCAEによるアプローチがあるが、高圧ポンプのように高周波騒音を問題とする場合、一般的なFEMを用いたCAE解析では固有値の同定が困難であるため、実験によるアプローチが中心となる。ここでは、高圧ポン

ブを例に、実験による騒音対策事例を紹介する。

当社における騒音対策の標準的なアプローチをFig. 5に示す。まず音の時間的・周波数的な特徴を聴感および計測器で特定する。次に、問題とする音の放射位置、および音の原因となる振動現象を明らかにする。そして、振動現象に関連する起振源との対応を分析し、一連の騒音発生メカニズムを解明する。その上で、起振源・伝達系・放射系の各対策を講じている。



Fig. 5 Experimental approach for noise reduction

3.2.3 機械騒音の低減事例

高圧ポンプを評価ベンチで駆動し、音源探査装置で計測・分析した結果をFig. 6に示す。図示する10kHz帯ではポンプ本体から電磁調量弁方向に音が放射していることが分かる。

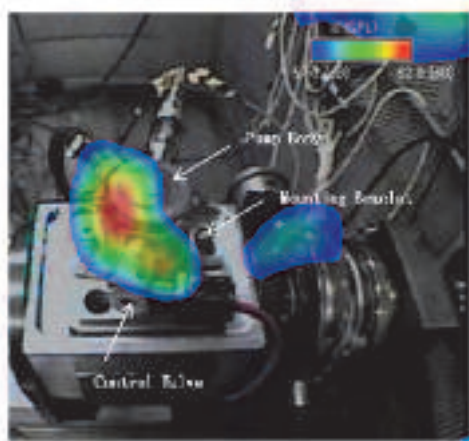


Fig. 6 Result of noise source identification (10kHz)

音の放射位置を特定する音源探査技術は、近年の音響振動計測技術の中で最も進展が見られる分野である。当社では市販の計測ツールを導入し活用するだけでなく、さらに詳細に音源を分析する先進的な計測技術の開発にも取り組んでいる。本誌でも紹介している非定常音源探査技術もその1例である¹²⁾。

次に、音の原因となる振動現象を分析した。振動分

析には、旧来から行なわれているモーダル解析に加え、作動時振動の多点同時計測による振動形状の可視化が有効である。高圧ポンプの振動形状の可視化結果をFig. 7に示す。これは、ポンプおよび固定ブラケットの12カ所（図中●印）の振動を3軸加速度センサで同時計測し、各周波数ごとの振幅・位相を元にアニメーション表示した結果の1例である。図示する10kHz帯では、固定ブラケットと直交する方向にポンプ全体が傾くように振動していることが分かる。これは電磁調量弁方向に音が放射されるFig. 6の結果と整合しており、10kHzの音の発生原因はポンプ本体の首振り振動であることが確認できた。

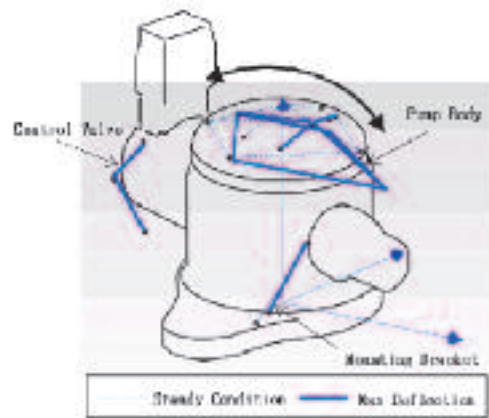


Fig. 7 Result of vibration visualization(10kHz)

上記の分析結果に基づき、ポンプ本体および固定ブラケットを剛性アップする設計変更を行なった。剛性アップによる対策前後の騒音評価結果をFig. 8に示す。本設計変更にて約2dBの騒音低減効果を確認した。

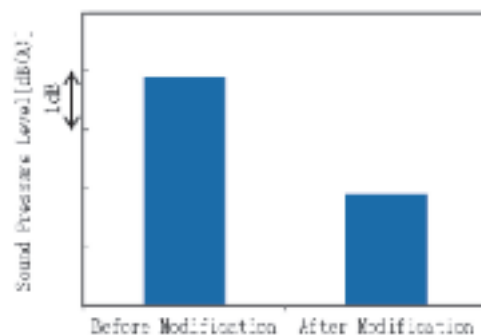


Fig. 8 Noise reduction effect by structural design modification

3.2.4 今後の展望

本節では、実験によるアプローチで高圧ポンプ単体の騒音を低騒音化した事例を紹介したが、昨今、製品単体で騒音が小さくても、システムや車両への搭載時

に騒音が問題となる場合がある。今後、さらなる軽量化やモジュール化に対応しつつ低騒音化を進めていくには、システムへの伝達を考慮し、かつ設計段階に低騒音を作り込む設計技術が必要である。これに対し、当社ではエネルギー伝播の技術に注目している。統計的エネルギー解析法 (Statistical Energy Analysis : SEA) は、従来から板状部材のモード密度の高い高周波域で実用化されているが、この考えを一般化し、高圧ポンプ等のブロック状部材で、かつモード密度が低い低周波域にも適用する研究を進めている¹³⁾。

3.3 電磁騒音低減の取組み

3.3.1 電動パワーステアリング用モータの騒音

地球環境の維持を背景に、車両と補機類の電動化が進んでいる。電動機器では小型・軽量・高効率化と同時に、低騒音化のニーズが高まっている。電動パワーステアリング (EPS) は、運転者がステアリング操作を行なう際、路面反力に対する操舵力をモータによって軽減するもので、各種センサの情報を元にモータを駆動して適切な操舵力を得る装置であり、操舵時のモータ磁気音は異音として認知されることがある。今回対象のEPS用ブラシレスモータはFig. 9に示すように、ステータ (固定子)、ロータ (回転子) とレゾルバ (磁極位置検出) で構成され、ステータは巻線を有する積層された電磁鋼板で、ロータは磁石となるインナーロータ式の表面磁石型 (SPM) モータである。モータ磁気音は、モータ本体が振動して発生する直接音と、モータ起振力がシステムに伝達して発生する伝達音に分類される。ここで紹介するコラム搭載式のEPSシステムでは、モータは車室内の運転者に近い位置に搭載されるため、直接音の低減が特に重要である。

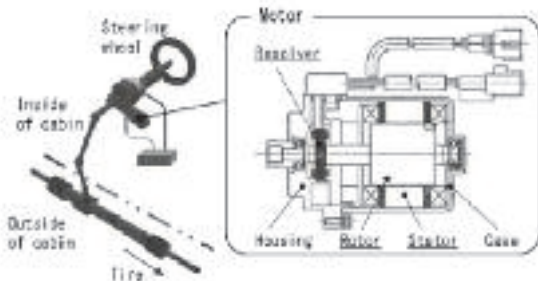


Fig. 9 Schematic diagram of brushless motor of Electric Power Steering (EPS)

3.3.2 低騒音化のアプローチ

設計段階に低騒音を作り込むには、音の伝達経路である加振系・振動伝達系・音響放射系を連成して計算

するCAE解析が必要である。CAE解析モデルを構築することで、音の原因となる現象の分析、設計改良指針の導出、さらに具体的設計の最適化をCAE上で行なえるようになる。ここでは、EPS用ブラシレスモータを例に、騒音を予測するCAE技術とそれを用いた騒音低減事例¹⁴⁾を紹介する。

モータ騒音を予測するCAE解析の概要をFig. 10に示す。モータ駆動時の3相電流を入力とし、ステータのティース先端での電磁力変動を磁場解析で算出し (加振系)、次に共振特性を同定した構造モデルで電磁力変動による振動を算出する (振動伝達系)。さらに音響モデルで構造表面の振動による音の放射を算出する (音響放射系) ことで、所定の評価位置での騒音レベルが予測可能となる。以下、加振系、振動伝達系、音響放射系の概要を説明する。

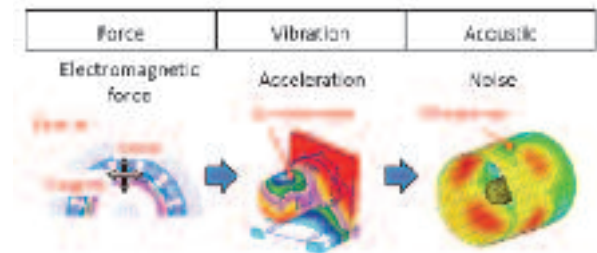


Fig. 10 Overview of electric motor noise CAE

(1) 加振系：ステータのティース先端での電磁力変動
電磁力変動が発生する周期の回転次数は、基準とするN極S極の極対を1周期とする電気1次に対して2n倍 (nは正の整数) である。これはN極・S極それぞれで吸引・反発の電磁力変動が起こるためであり、ベクトル成分としてラジアル成分 (半径方向) ・トルク成分 (接線方向) が発生する。

Fig. 11に静磁場解析で算出した電磁力変動の振幅を示す。電気2n次の電磁力変動は、全体的に周方向より径方向が大きいことが分かる。

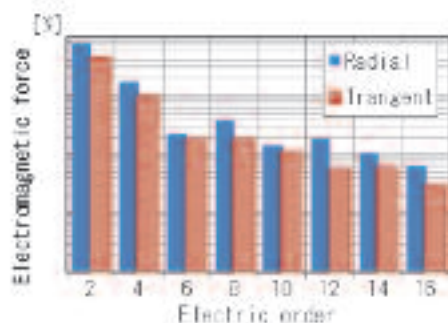


Fig. 11 Electromagnetic force on stator teeth

(2) 振動伝達系：モータケース表面の振動

電磁力変動による振動を算出する上で、振動を増幅する構造の共振特性（共振モード、共振周波数、減衰比）を再現する構造モデルの同定が必要である。Fig. 9に示すモータの主な構成部品であるステータ、ロータ、ケース、ハウジングをモデリングする上で重要なポイントは、薄い電磁鋼板の積層で構成されるステータのモデル化と、各構成部品の結合剛性のモデル化である。ここでは、これらを実機相当に同定し、さらに実験ベンチの治具を含めた構造モデルを構築した。

加振系で求めた電磁力変動を入力条件とし、構造の周波数応答解析でモータケース表面の加速度を算出し、実測値と比較した結果をFig. 12に示す。実験で発生している電気2n次の加速度が精度よく計算できていることが確認できる。

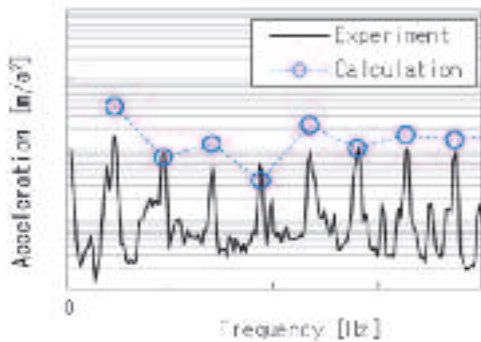


Fig. 12 Comparison of acceleration between experimental and calculated values

(3) 音響放射系：評価位置の騒音レベル

モータから発生する放射音を境界要素法で計算するため、Fig. 10に示す放射面となるモータの構造表面と、音の放射分布の観測面をモデル化した。

振動伝達系で求めた振動分布を入力条件とし、観測面の放射音分布を境界要素法で算出し、所定の評価位置での騒音レベルを実測値と比較した結果をFig. 13に示す。実験で発生している電気2n次の騒音が精度よく計算できていることが確認できる。

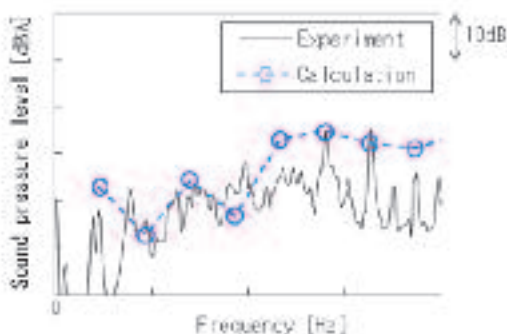


Fig. 13 Comparison of noise level between experimental and calculated values

3.3.3 電磁騒音の低減事例

構築したCAE解析モデルを用いて、騒音レベルに対する電磁力変動の半径方向と接線方向の寄与率を計算した結果をFig. 14に示す。電気6次、12次は周方向の電磁力変動の寄与率が75%以上と径方向より大きいことが分かる。これはFig. 11に示した電磁力変動の大きさの関係とは異なり、電気6次、12次の騒音低減には周方向の電磁力変動低減が効果的といえる。

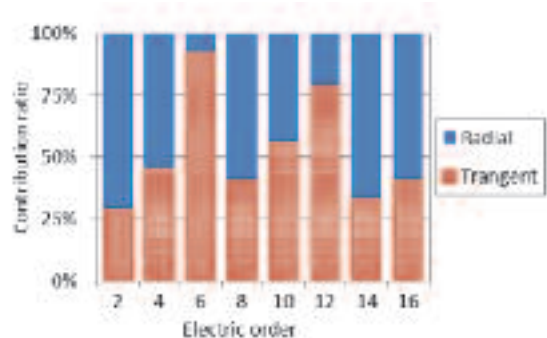


Fig. 14 Direction contribution ratio of electromagnetic force

さらに、電磁力変動の発生要因について、制御で発生する電流歪みと磁気回路で発生する誘起電圧歪みの各々の影響をCAE解析上で分析した結果、騒音低減には誘起電圧歪みの低減が効果的と分かった。

製品に適用するには、誘起電圧歪みだけでなく、トルク変動や体格との両立が重要となるため、誘起電圧歪み・トルク変動・体格を目的関数として磁気回路の最適化計算を行なった。得られた結果を基に設計変更を行なった結果、Fig. 15に示す騒音低減効果を確認した。

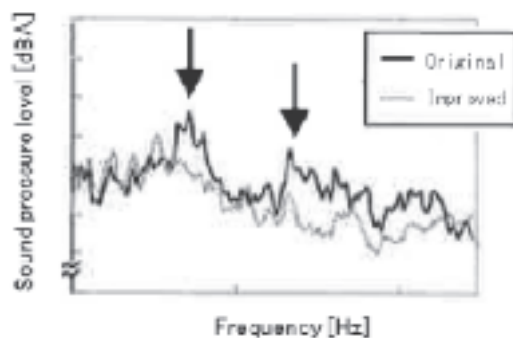


Fig. 15 Effect of design modification

3.3.4 今後の展望

本節では、インナーロータ式SPMモータを対象に、CAE解析を活用してモータ磁気音を低騒音化する事例を紹介した。今後、ますます増加する電動機器と、さ

らに高まる低騒音化ニーズに応じていくにはCAE解析のレベルアップによる設計のフロントローディングが重要になる。上の例では、実験で測定した電流値を入力としてモータ単体から放射される騒音を計算しているが、さらに計算範囲の拡大が必要である。実測することなく電流から求める回路解析や、モータの直接音だけでなくシステムの伝達音の解析など連成範囲を拡大し、制御から音まで一気通貫のCAE解析で低騒音設計をフロントローディングする技術開発を進めている。

3.4 流体騒音低減の取組み

3.4.1 エアコンHVAC用ブロワファンの騒音

カーエアコンの室内ユニットであるHVAC用ブロワファンは、必要風量が大きいことに加え、車室内に搭載されることから、騒音低減ニーズは高い。HVAC用に広く使用されているシロッコファン (Fig. 16) は、小型でも大風量・高圧力が得られることが特徴であり、多数枚の翼が円筒状に配置されたファンと、ファンを取り巻くスクロールケーシングより構成される。

一般にファン騒音は、翼通過騒音 (BPF騒音) や低周波騒音などの異音と、広帯域騒音 (乱流騒音) とに分類される。異音は乗員の不快感につながるため、これまでも様々な改良がされてきた。しかし異音が発生しなくても、広帯域騒音は会話明瞭度の低下につながるため、近年では広帯域騒音の低減が重要な課題となっている。

Fig. 17にファン騒音の周波数特性の一例を示す。HVACは冷房時 (Faceモード) と暖房時 (Footモード) で内部の通風抵抗が変化するため、送風機の作動点もこれに伴って変化する。一般にFaceモードの方がFootモードに比べてファンの騒音レベルは大きく、1kHz～2kHzの広帯域騒音の寄与が大きいことがわかる。

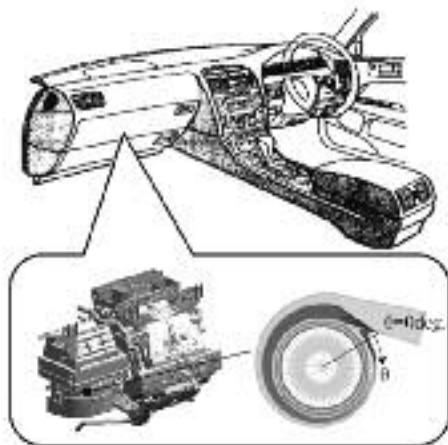


Fig. 16 HVAC and blower fan

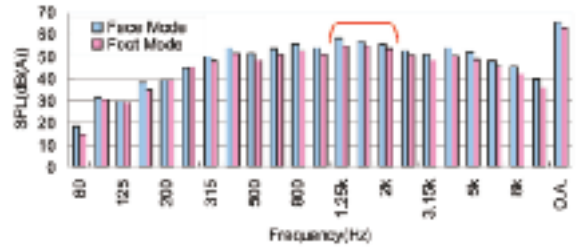


Fig. 17 1/3 octave band spectrum of fan noise in case of Face Mode and Foot Mode

3.4.2 低騒音化のアプローチ

これまでの研究^{15) 16)}から、ファン騒音は翼間流れの寄与が大きいことが知られているが、広帯域騒音についての研究事例は少ない。また最近では計算技術の進歩により、数値解析による研究が盛んであるが、製品における実現象を調べた研究例は極めて少ない。ここでは、HVAC用ブロワファンを例に、回転翼間流れの高速PIV計測と、内部流れに起因する放射音計測で広帯域騒音の発生メカニズムを詳細に調べ、低騒音化した事例¹⁷⁾を紹介する。

(1) 回転翼間流れの高速PIV計測

これまでの研究^{18) 19)}では、翼がある角度位置における瞬時の翼間流速場を回転プリズムを用いて計測した事例はあるが、当社では翼間流れを時間連続的に画像計測する装置を開発した (Fig. 18)²⁰⁾。この装置では、像回転プリズムはファンに対して1/2の角速度で同方向に回転しており、プリズムを通して翼間部を望遠レンズで拡大した像を高速ビデオカメラで撮影できる。そして、得られた画像をPIVシステムで解析し、時間連続的な速度場、渦度場を求めることができる。

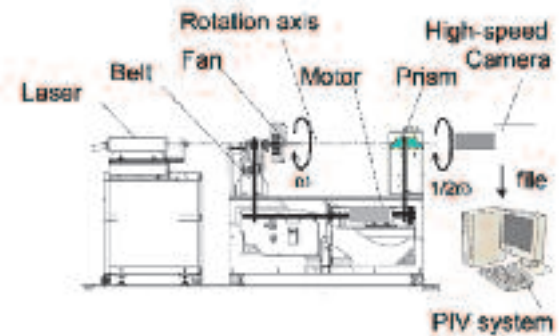


Fig. 18 Image rotator device and PIV system

スクロールケーシングの角度 $\theta = 0 \sim 45 \text{deg}$ において、流速分布と渦度分布を表した結果を Fig. 19 に示す。翼間で多数の渦が発生していることが分かる。これはスクロールケーシングの舌部の影響によりファン吐出側の圧力が高くなるため、翼間で吸込み流れと逆流が干渉して、大小様々な渦が発生消滅していると考えられる。

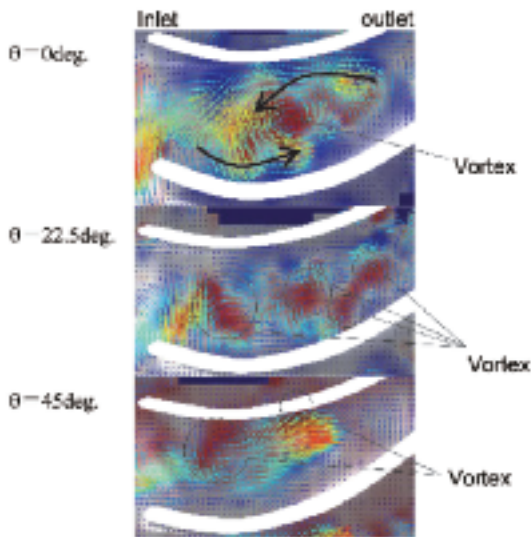


Fig. 19 PIV analysis result

(2) 内部流れに起因する放射音計測

翼間流れによって生じる音を調べるため、音響透過スクロールケーシング (Fig. 20) を用いて透過音を測定した。音響透過スクロールケーシングは、約 $100 \mu\text{m}$ のガラスビーズをエポキシ系樹脂接着剤と混合させ、型枠に押し込んでケーシングを製作した。この製法は曲面が多い形状に対しても成型性よく音響透過材で製作することができる。



Fig. 20 Sound permeable scroll casing

送風機の回転軸中心から半径 160mm の側方位置で 22.5deg 毎 (計16点) に音圧を無響室で計測し、舌部 ($\theta = 0 \text{deg}$) と舌部の反対位置 ($\theta = 180 \text{deg}$) で計測した音圧の周波数特性を Fig. 21 に示す。 $\theta = 0 \text{deg}$ では

$\theta = 180 \text{deg}$ に比べ、 $0 \text{kHz} \sim 4 \text{kHz}$ の広い範囲で騒音が増加していることが分かる。

(1), (2) の結果より、周方向の音圧分布と、翼間の平均流速、渦度分布を Fig. 22 に示す。角度 θ が $0 \sim 45 \text{deg}$ の範囲では、 $45 \sim 360 \text{deg}$ に比べ音圧レベルと渦度は大きく (図中○)、渦度の大きさは翼間での発生騒音と関連があることが推測される。また、翼間流れのPIV解析結果より、 $0 \sim 45 \text{deg}$ の範囲は翼間全域で大小様々な渦がランダムに発生する流れ状態であり、剥離渦が安定した挙動を示す他の領域 ($45 \sim 360 \text{deg}$) に対して広帯域騒音が増加していると考えられる。

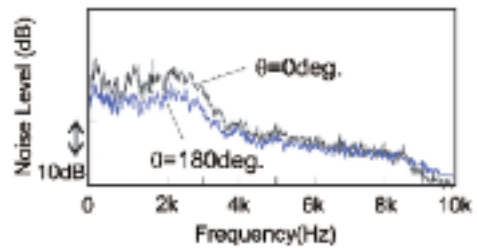


Fig. 21 Comparison of the noise spectra

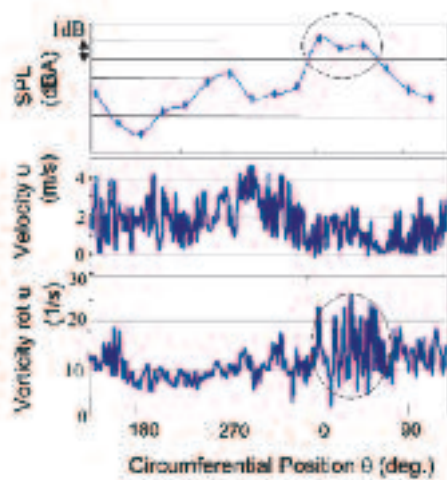


Fig. 22 Circumferential position sound pressure distribution and PIV analysis result

3.4.3 流体騒音の低減事例

Fig. 23 にFaceモードでの翼出口流速の周方向分布を示す。 Fig. 22 に示したとおり、従来ファンはノーズ ($\theta = 0 \text{deg}$) 付近で流速変化が大きい不均一な分布を示している。これはノーズ部では翼出口からスクロール側壁面までの距離が小さいため、スクロール巻終り部に比べて翼間をスムーズに流ることができず、流速が急減することによって考えられる。

そこで、翼間流速を周方向に均一化するため、ノーズギャップを従来より大きくし、ノーズ付近の翼間流

速の均一化を図った。その結果、広帯域騒音を低減でき、Faceモードにてファン効率5%向上、比騒音4.5dB低減を確認した (Fig. 24)。

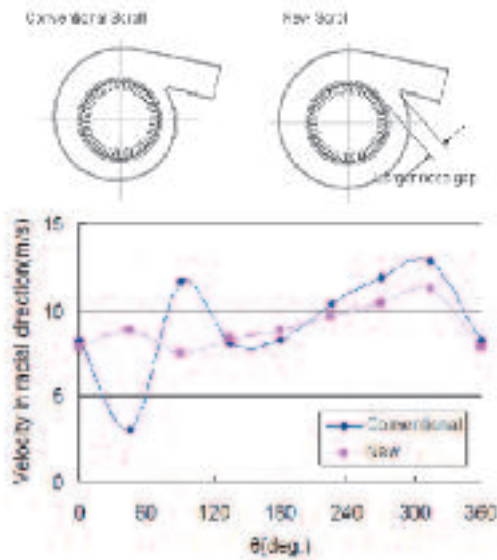


Fig. 23 Effects of new scroll casing

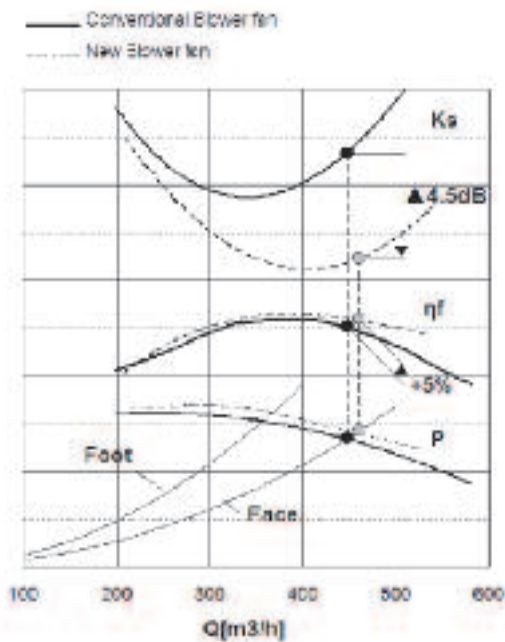


Fig. 24 Effects of the new blower fan (in the condition of the same volume as conventional blower fan)

また、本技術を小型高性能化を狙ったHVACに適用した効果をTable 1に示す。従来品に対し、体積▲35%の小型化と同時に、消費電力15%低減、比騒音1dB低減を実現した。

Table 1 Effects of newly developed technology in blower fan

Item	New Blower Fan
Volume	▲35%
Power Consumption (In the condition of the same flow rate and total pressure)	▲15%
Specific Noise Level	▲1dB

3.4.5 今後の展望

本節では、ファンで発生する広帯域騒音を実験的に分析し、低騒音化する事例を紹介した。ファン騒音のさらなる低減には、実験的な分析にとどまらず、CFDを活用した詳細な空力音解析が必要であり、京コンピュータなどのHPC (High Performance Computing) を活用した大規模・高精度な数値解析の進展に注目している。さらに、これまでの翼断面形状の改良のみならず、例えばフクロウの風切羽に代表されるように翼近傍の渦を制御する技術開発にも注目している。

4. 音技術の将来 (騒音低減から音の活用へ)

ここまで、騒音低減に関する当社の取組みを紹介した。今後は、騒音を低減するのみならず、音を積極的に活用することも重要になると考えられる。自動車における音響情報の利用は、古くは速度警告音に始まり、ドアロック操作音やシートベルト着用警告音、近年では車線逸脱警報など多くに利用されており、今後は人と車のインタフェースとしてさらなる発展の可能性がある。ここでは、音技術の将来として、音の活用に関する研究事例を紹介する。

音像位置に関する研究では、音による運転行為の誘導効果に着目している。この研究では、音像位置を可変的に設定可能な立体音響システムを開発し、カーオーディオから流れる音楽の音像位置の可変制御を試みた。熟練ドライバーの運転中の注視点方向に音像位置を設定することで、ドライバーの視線を適切に誘導でき、コーナリング中の車両挙動を安定化させる効果を確認している²¹⁾。

また、音色に関する研究では、音による情動の誘導効果に着目している。高次感性は、種々の感覚器から入力された情報と当人の経験 (記憶)、さらにはそのときの生理状態などが統合されて誘起されると言われ

ている。そのため、例えば聴覚情報から温熱感が生成されることも想定される。音色を表す言葉として「涼しい音」「暖かい音」という表現があるが、空調の音と温熱感の関係を調べた実験では、音の周波数特性はスペクトル重心が高いほど涼しく、重心が低いほど暖かく感じ²²⁾、また、特定の変動周期で音がゆらぐ時に涼しさを強く感じる結果²³⁾が得られている (Fig. 25)。これは、機器の音をデザインし聴覚に適切な音刺激を与えることで、体性感覚ひいては情動に対しても作用をもたらし得る可能性を示している。

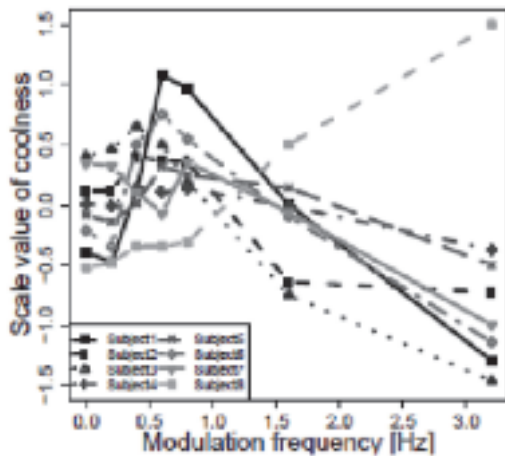


Fig. 25 Subjective evaluation result of sound coolness

上記のようなHMIの観点では、音圧レベル等の物理量のみならず、人の主観印象評価が重要となる。現状、人の主観印象評価は心理的手法で行なうことが多い。ところが、心理的手法では、繰り返し判断を求めために被験者の負担が大きい、心理的バイアスが重畳しやすい、意識下で生じる聴感印象を捉えにくいといった問題がある。そこで、近年では、生理的計測、特に脳活動計測による印象評価も試みている (Fig. 26)。



Fig. 26 Brain activity measurement using magnetoencephalography

人間は外界からの情報を得るために80%以上を視覚に依存しているといわれる。ところが、視覚は目を開けて意識的に注意を向けていないと情報を得ることができない。一方、聴覚には、睡眠中も含めて常に情報が得られるという特徴がある。将来、自動運転が実用化されるとドライバは常に前方を向いているとは限らない。その時、聴覚は安心安全を支えるHMIの有効な手段となる可能性がある。自動車の進化に合わせ、音が果たす役割は今後ますます高まるであろう。そうした世界を先取りし、機器から発生する機械的な音、スピーカーを通して電子的に生成する音、さらにはその音を聴取する人間特性に踏み込んだ研究を深め、新たな価値創造に貢献していきたい。

5. おわりに

本稿では、環境維持と安心安全に貢献するデンソーの低騒音技術の開発の現状と将来に向けた取組みを紹介した。デンソーは、2020年に向けた長期方針として、地球と生命を守り、次世代に明るい未来を届けることを目指し、「地球環境の維持」と「安心・安全」にこだわった事業活動を行っている。低騒音技術は、多くの製品を支える共通基盤技術の1つであり、その責務は大きい。基盤技術として足元を固めつつ、世界中のお客様のニーズに先回りし新たな価値提供を目指して、ますます研究開発に励む所存である。

<参考文献>

- 1) ラスロータール, 野中邦子訳: 馬車の歴史, 平凡社 (1991)
- 2) 近森, 松永: モーターファン・ロードテストからみた自動車性能の長期的変遷, 自動車技術, Vol.56, No.1 (2004)
- 3) 神谷: 自動車用電動機器の音色から見た低騒音化, 第29回モータ技術シンポジウム (2009)
- 4) 自動車単体騒音専門委員会, 国土交通省ホームページより, <http://www.env.go.jp/council/07air-noise/yoshi07-01.html>
- 5) 飯田, 他: EV/HEVも含めた車内騒音の予測技術の開発~現状とこれから~, 自動車技術会シンポジウムNo.19-13 (2014)
- 6) 前田, 他: ドア閉まり音発生メカニズムに基づいた音質向上技術の検討, 自動車技術会, 春季大会

- 2012前刷集
- 7) 太田：音質付加デバイス「サウンドクリエータ」：心地良い吸気音を創り出す，自動車技術67(7)，72-77 (2013)
 - 8) 「ハイブリッド車等の静音性に関する対策について（報告）」の取りまとめ等について，国土交通省ホームページより，http://www.mlit.go.jp/report/press/jidosha07_hh_000049.html
 - 9) 倉片，他：サイン音のユニバーサル・デザイン：標準化の動向を中心に，日本音響学会誌68(1)，49-54 (2011)
 - 10) 和氣，他：車両周辺状況認知支援システムにおけるサイン音の感性的側面に関する実験と考察，ヒューマンインターフェースシンポジウム2008 (2008)
 - 11) 吉川：音とブランド力，騒音制御31(3)，186-191 (2007)
 - 12) Ikeda K, Semura J, Ohzawa T : “Mechnism of Noise Generation on Outer Rotor Motor,” Proc. of Internoise 2014
 - 13) 安藤，他：実験SEAモデル化に関する検討，日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2015 講演論文集 (2015)
 - 14) 山村：電動パワーステアリング用ブラシレスモータ，第27回モータ技術シンポジウム (2007)
 - 15) 森主：多翼ファンの騒音発生源，日本機械学会論文集 (B)，Vol. 57, No.543 (1991)
 - 16) 川口，他：多翼ファン低騒音化の研究（第2報，ファン翼間流れと圧力変動），日本機曾学会論文集 (B)，Vol. 60, No.570 (1994)
 - 17) 酒井，他：車両空調用小型高性能送風機の開発，自動車技術会，春季大会2009前刷集
 - 18) 門田，他：多翼ファン低騒音化の研究（第1報，翼間三次元流れの可視化），日本機曾学会論文集 (B)，Vol. 60, No.570 (1994)
 - 19) 山本，他：多翼ファン翼間流れの流速分布可視化計測，ターボ機械，Vol. 23, No.10 (1995)
 - 20) 三石，他：車両空調用送風機の翼間流れ実験解析，自動車技術会論文集，Vol.34, No.4 (2003)
 - 21) 伊能，他：音像空間がドライバーの注視点（首振り）に与える影響，日本感性工学会生命ソフトウェアシンポジウム2011前刷集
 - 22) Hotehama and Nakagawa : “Auditory impression concerning coolness and warmness for automative HVAC noise”, Proc. of Internoise 2015
 - 23) 保手浜，他：脳磁界計測によるエアコン音の“涼しさ”の印象評価の試み，第30回日本生体磁気学会大会論文集，Vol.28, No.1 (2015)

<著 者>



田中 政一
(たなか まさかず)
研究開発2部
機械系システムおよび製品の
先行開発に従事



神谷 勝
(かみや まさる)
研究開発2部
音振動の研究開発に従事



酒井 雅晴
(さかい まさはる)
研究開発2部 博士 (工学)
音振動の研究開発に従事



瀬村 純一
(せむら じゅんいち)
研究開発2部
音振動の研究開発に従事