

COMSOL NEWS

SPECIAL EDITION **ACOUSTICS**
日本語版



音響シミュレーションは設計工程の中での初期段階で、初期洞察力そして予測能力を与えてくれます

音響を議論する上で多くの人がまず連想するのはサブウーファーやコンサートホールのバツフルなどでしょう。しかし実際には、我々のごく身近にも音響学の適用分野が数多く存在しています。音響学は分野横断的な科学です。顧客のニーズを満足する製品に到達するには、技術者は持てる独創性をすべて出し切り、最も強力な数学モデリングツールを駆使して課題に取り組む必要があります。

今回の COMSOL News 特別号では、音響学の分野で活躍する設計者、技術者、研究者の皆様に盛大な拍手を送りたいと思います。本号を読めば、高品位マルチフィジックスモデリング、柔軟性、そしてシミュレーションアプリケーションを通じて同僚や顧客と仕事の成果を共有することが、記事を寄稿して下さった方々にとって共通の原動力になっていることがお分かりいただけると思います。

仮想製品の開発に始まり、NVH パフォーマンス、音響クローキング、そしてフィードバックの低減に至るまで、現実的な問題の解決および革新的な製品の開発が計算音響解析によってさまざまな形で進められている現場からの証言を読めば、読者諸氏にも必ずやインスピレーションが湧いてくるであろうと確信しております。

それではお楽しみください。



Valerio Marra
マーケティング部長
COMSOL, Inc.

INTERACT WITH THE COMSOL COMMUNITY



COMSOL, Inc.



COMSOL Multiphysics



@COMSOL_Inc



plus.google.com/+comsol

BLOG comsol.com/blogs

Forum comsol.com/community/forums

We welcome your comments on COMSOL News; contact us at info@comsol.com

COMSOL NEWS 2017

SPECIAL EDITION ACOUSTICS

日本語版お問い合わせ先

計測エンジニアリングシステム株式会社 comsol@kesco.co.jp Tel: 03-5282-7040

※記事の投稿も上記まで

© 2017 COMSOL.COMSOL, COMSOL Multiphysics, Capture the Concept, COMSOL Desktop, COMSOL Server, および LiveLink は、COMSOL AB 社の商標です。その他の商標は各所有者の商標または登録商標です。COMSOL AB および同社の子会社ならびに製品は、これら商標所有者から一切の承認、出資、支援を受けていません。また、これら商標所有者との間に提携関係を有していません。各商標の所有者について詳細は www.comsol.com/tm を参照してください。

IN logo は LinkedIn Corporation および米国内外の関連各社の登録商標です。「f」のロゴマークは Facebook, Inc. 社の登録商標です。鳥のロゴマークは Twitter, Inc. 社の登録商標です。G+ のロゴマークは Google, Inc. 社の登録商標です。

目次



音響シミュレーション

- 4 | 音響モデリングおよびシミュレーションアプリケーションの有用性

仮想製品開発

- 6 | 自動車オーディオシステムの仮想チューニング

高精度マイクロフォン

- 9 | 正確度という性能～完璧な計測の迫り

燃焼の不安定性

- 12 | ロケットシステムの流量拡張音響特性をマルチフィジックスソフトウェアモデルで

NVH 性能

- 15 | マヒンドラオートバイ爆音の舞台裏

変圧器ハム

- 18 | 表計算ソフトからマルチフィジックスアプリケーションへ、ABB 社は継続的に変圧器事業をパワーアップ



表紙:

アドベンチャーツーリングバイク
「Mahindra Mojo」
写真提供: Mahindra Two Wheelers Ltd.

FEATURES

多体 - 音響学相互作用

- 22 | ギヤボックス内の振動およびノイズのモデリング



音響クローキング

- 25 | 音を操作し制御する：数学モデルによってサポートされる最先端の音響メタマテリアル研究

インフラサウンドによる振動

- 28 | 振動、騒音、そして轟音

フィードバックの低減

- 30 | 補聴器研究の最先端

非浸潤型音響技術

- 33 | マルチフィジックス解析で進化する
上水道管の漏水検知

高精度トランスデューサ

- 36 | 音楽をあなたへ：新型トランスデューサと静電型ヘッドフォンの邂逅

マルチフィジックスモデリング

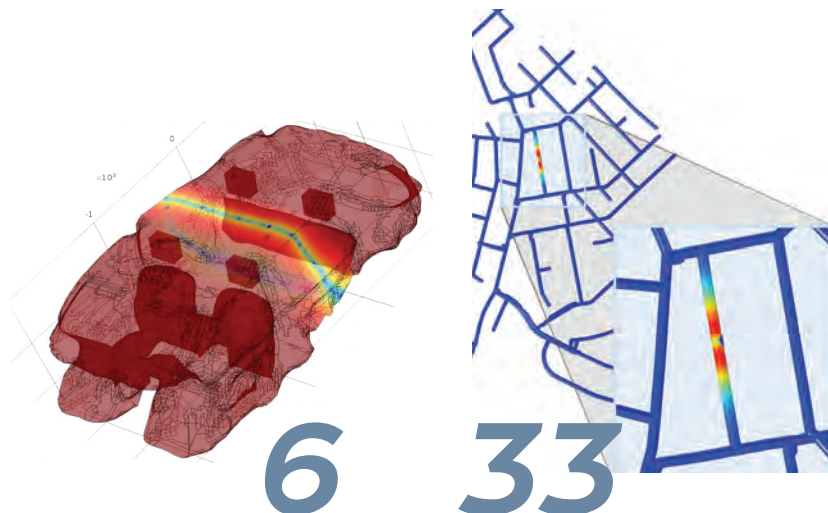
- 39 | マルチフィジックスのレンズを通して世界をシミュレーションする

ゲスト論説

- 40 | マルチフィジックスが計算音響学にもたらすメリット

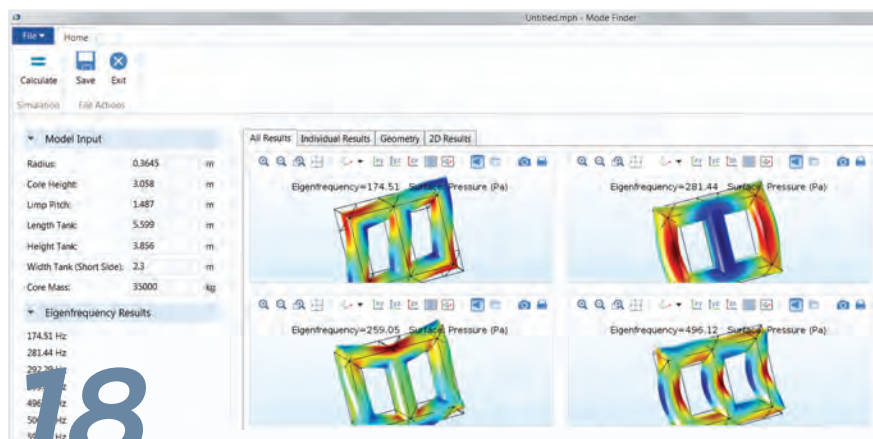


36



6

33

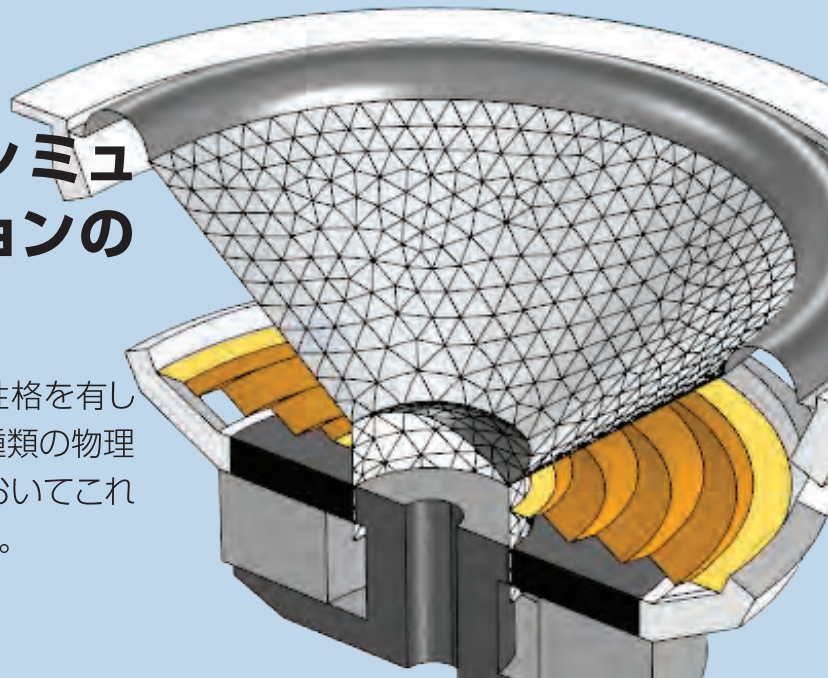


18

音響モデリングおよびシミュレーションアプリケーションの有用性

音響現象は本質的にマルチフィジックス的な性格を有しています。モデルを構築する際、技術者は数種類の物理を考慮し、異なるスケールおよび周波数帯においてこれら物理現象間の連成を検討する必要があります。

執筆者 **MADS J. HERRING JENSEN** 氏



システムが複雑さを増し、プロジェクトの短納期化がさらに加速する中、音響技術者の間で数値シミュレーションソフトウェアへの関心が高まっています。計算ツールを用いることにより、設計作業を加速させ、高価でしかも時間を要するプロトタイプ作成を減らすことができます。さらに音響シミュレーションの結果、得られたデザインに関する理解が深まり、全体をより深く把握した上で決定を行うことが可能になり、より一層高品質な製品につながります。

では、そのメリットを最大限に引き出すために、音響シミュレーションにはどのような能力が要求されるのでしょうか。多くの事例において、アプリケーションには幅広い環境における音響信号の再生、伝搬、および受信の機能が含まれます。これには構造体、多孔質材料、および流れと音響信号の相互作用だけにとどまらず、音響信号の生成および検出に関するトランスデューサのモデリングも含まれます。これらはすべて本質的にマルチフィジックス問題であり、これらを念頭に置いておかなければ音響技術者は新製品や新技術を効率的に開発することはできません。この事実、モデリングソフトウェアに対し、省略することができない死活的な要件を科すことになります。すなわち、システム全体において該当する物理効果をすべてカップリング（連成）できる能力がモデリングソフトウェアには要求されます。

音響分野が現在直面している技術課題

いま多くの業界で、音響クオリティが話題になっています。これは自動車の車内におけるオーディオ再生（図1）、排気系およびマフラー音などにも関係しています。その他の例としては、ヘッドホ

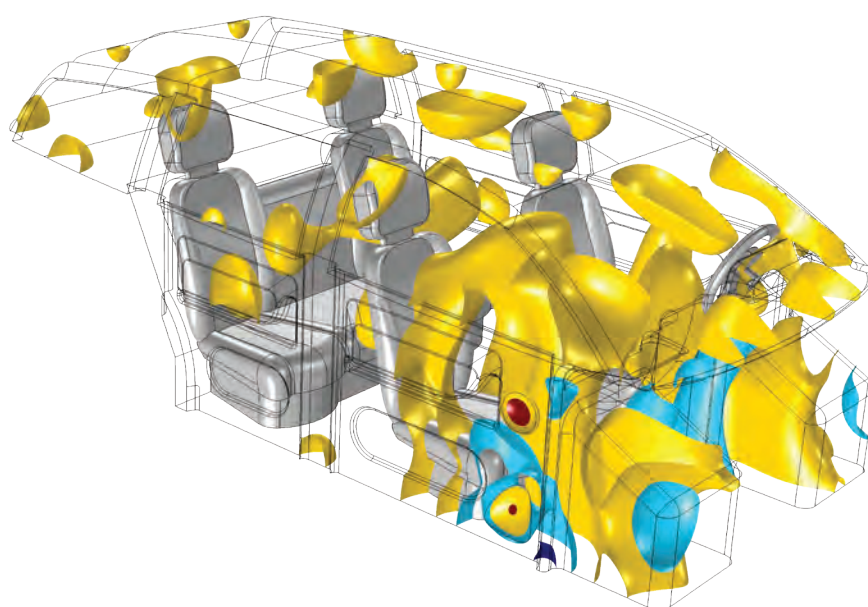


図1. セダンの車内の音響シミュレーション。典型的なスピーカー設置箇所に音源を配置しています。計算結果は、車内の総音圧場を示します。

ンやスピーカー、モバイル機器のスピーカーシステムの性能向上と最適化などを挙げることができます。これらすべての事例において、システムを最適化する上で、音の伝搬とトランスデューサの挙動に関する詳細な理解が不可欠です。システムの挙動を向上させ「心地良い音」を実現するには、もはやデジタル信号を巧みに処理するだけでは不十分です。一例として、補聴器の性能を適応制御によるフィードバック抑制を向上させるには、超小型スピーカーの振動音響モデルを音響および固体力学の有限要素（FE）モデルと連成させ、正確なシミュレーション結果を得る必要があります。

スピーカー業界では、単純なトライアンドエラー方式のテストによる標準型ドライバの設計改善はすでに限界に達して

います（図2）。さらなる最適化には詳細な数値解析が要求されます。近年の超小型スピーカーシステムは極端に大きな音圧レベルで駆動されるため、非線形性による音の歪みや減衰を考慮する必要があります。同様の非線形性は、航空宇宙分野の事例において、機内内壁の生地素材の選択などにも大きな役割を演じます。

マルチフィジックスカップリング（静電現象、薄膜構造、熱粘性音響）が関与するもう一つの例は、コンデンサーマイクのもデリングです。これらの物理現象のすべてが相互に密接に関係しており、正確なマイクの感度予測を行うにはこれらすべてをカップリング（連成）させる必要があります。



図 2. スピーカーのドライバエンクロージャー内の音圧の分布を示すシミュレーション結果。

COMSOL Multiphysics® と音響モジュール

音響学に関係する周波数帯は超低周波音から超音波まで何桁にも上ります。さらには、熱粘性による損失メカニズムや航空音響その他に見られるように、スケールの異なる現象を同時に取り扱わなければならないマルチスケールな性格があります。COMSOL Multiphysics® ソフトウェアのアドオン製品である音響モジュールはそうした現象のモデリングに最適です。COMSOL ソフトウェア自体の音響シ

ミュレーション機能としては、異なる物理現象間のマルチフィジックスカップリング（連成）が、使いやすい組み込み機能として、一つのモデリング環境内にシームレスにセットアップされています。これに対し音響モジュールでは、音響物理学の支配方程式に特化された数多くの式が追加されます。

音響シミュレーションのアプリケーション

シミュレーションソフトウェアに熟達していないユーザーであっても、こうしたユーザーを念頭に作成された専用アプリケーションを実行して既定値の入力することにより、適切な範囲の出力を得ることができ、産業界で多くの技術者が直面する音響物理の難題を取り扱うことができます。COMSOL Multiphysics® には Application Builder が同梱されており、これを用いて専用アプリケーションを作成することができます。シミュレーションアプリケーションによって、カスタマイズされたユーザーインターフェースを介してマルチフィジックスモデルを利用することができますようになります。このツールにより、シミュレーション専門家は複雑なシミュレーションを 1 つのパッケージにすることができます。ユーザーはシミュレーションアプリケーションの設計パラメータを変更し、業界の基準および顧客の要求に応じて自動的にシミュレーション結果を解析することができますようになります。

COMSOL Server™ 製品はローカルにインストールすることができるため、社内

の全ての同僚そして全世界の顧客を対象に簡単にアプリケーションを導入できます。ユーザーは COMSOL Client または主要 Web ブラウザ経由でアクセスできます。シミュレーションの専門家の立場からすると、これほどの高解像度で、これほど簡単に音響装置のモデリングを行い、そのメリットを同僚に共有できたことはいまだかつてありませんでした。❖

音響モジュールで利用可能な物理インターフェース

圧力音響：音場は、雰囲気気圧の静圧からの変動値として表現されます。多孔質材料、繊維質材料、狭い構造、およびバルク吸収の挙動がモデリングされています。完全整合層（PMLs: Perfectly Matched Layer）による開領域の切り捨てが可能です。

音響 - 構造間の相互作用：流体の圧力が固体領域に負荷を生じさせ、流体 - 固体境界の全域にわたって構造の加速が流体領域に影響を及ぼすような現象のモデリングを行います。圧電材料、弾性波および多孔質弾性波、およびパイプの音響に対応しています。

航空音響：背景の流れが音場から受ける一方向の作用を計算します。

熱粘性音響：壁の近傍で粘性境界層および熱境界層の役割が重要になるような形状における音響を正確にモデリングします。

超音波：静的な流れ場を背景にした、多くの波長を含む大規模の線形遷移音響問題の計算を行います。

形状音響：代表的な形状フィチャーと比べて、上限周波数の波長が顕著に小さい場合の音響をモデリングします。

参考

COMSOL Blog

COMSOL ビデオ・ギャラリー

COMSOL アプリケーションギャラリー

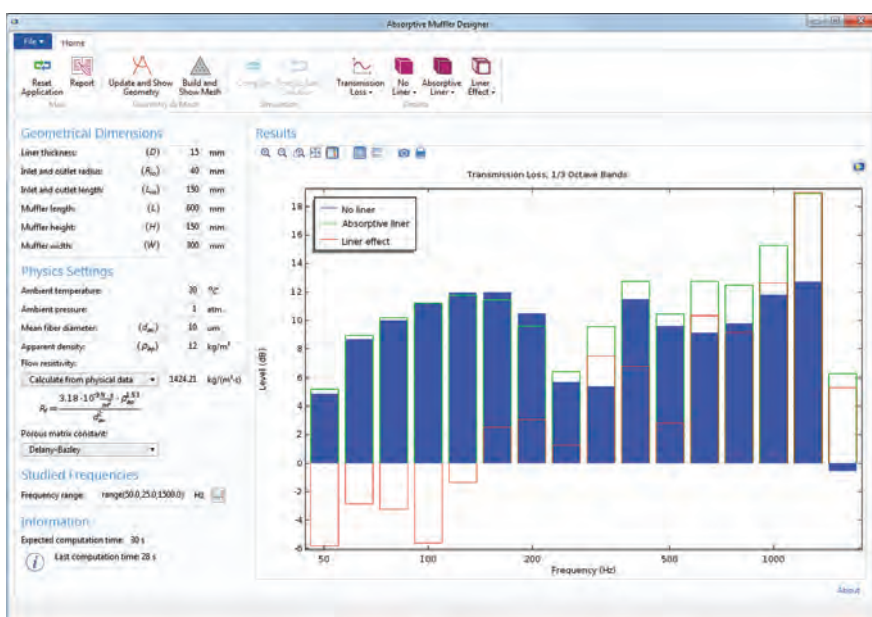


図 3. この例題アプリケーションは、COMSOL Multiphysics® に提供されている消音マフラーのモデルをベースにして作成されています。アプリケーションのユーザーはマフラーの形状設計、雰囲気気圧の温度と圧力、ならびに材料特性を変更して、音響的な挙動を評価することができます。

自動車オーディオシステムの 仮想チューニング

HARMAN 社では、物理実験を数学的モデリングおよび数値シミュレーションと組み合わせることによって、最新の車内情報娯楽テクノロジーの開発工程を向上させています。

執筆者 **JENNIFER HAND** 氏



図 1. 車内におけるスピーカーの配置。

スマートフォン接続から対話型ディスプレイやビデオ画面まで、今日の自動車は驚くような電子エンタテインメントの可能性を提供してくれます。HARMAN 社はネット対応車の車内装備における市場リーダーで、高級車に搭載の最上級オーディオシステムで 80% を超えるシェアを誇ります。

自動車は、車種モデルごとに固有の構成が要求されます。そのため、HARMAN 社の音響およびシミュレーションの専門家チームは各コンポーネントおよび自動車音響デバイスの一つ一つについて、各々の設計工程において必ず検討が行われるよう万全を期しています。スピーカーの理想の配置や向きなどの詳細、スピーカーのパッケージング、車両ドアなどドライバーエンクロージャーの形状などはすべて、音質に影響します。

開発チームは、現物のプロトタイプを作成に先立ちシステムを仮想的にチューニングして、物理的な実験を数値計算と組み合わせることにより、製品の導入時期を加速しています。実車に機材を搭載しての視聴を仮想テストで置き換えることが可能になるため、音響チームは車両設計の完了を待たずに製品設計に着手することができますように、物理テストに要する時間の短縮につながっています。

「我々は極めて初期の段階、すなわちオーディオシステムに何を要求すべきかについて車両設計者がイメージを描く前から、自動車開発に関与する場合があります。」HARMAN 社で仮想製品開発およびツール (VPD) 担当シニアマネージャーを務める Michael Strauss 氏は言います。「また、事例によっては車内空間のサイズ、容積などの基本情報しか得られない場合もあります。そのような状況下でも、数日以内にコンセプトを作成して提示しなければならない

場合もあります。顧客の要求を満たすべく自らに敢えて困難な目標を課し、クオリティの高いシステムに到達することができます。」

シミュレーションと実験の連携により、顧客満足度を最大化

お客様に迅速、かつ正確なレスポンスを提供するため、HARMAN 社の技術者は COMSOL Multiphysics® ソフトウェアの数学的モデリングに着目しました。「我々は力学

「我々は力学的、音響的、電気的シミュレーションを一つの統合環境で行える能力を必要としていました。独自のツールを作成、更新するために費やす時間と労力の削減につながるソフトウェアを探していたのです。」

的、音響的、電気的シミュレーションを一つの統合環境で行える能力を必要としていました。独自のツールを作成、更新するために費やす時間と労力の削減につながるソフトウェアを探していたのです。」HARMAN 社の主席音響技術者 Principal Acoustics Engineer である François Malbos 氏はこう言います。

「マルチフィジックス的アプローチは、仮想製品開発工程の最重要コンポーネントの一つです。」HARMAN 社のシミュレーション技術者であり、同プロジェクトのリーダーを務める

Michał Bogdanski 氏はこう言います。「車体構造の任意の部分（たとえばドアの堅さ）がスピーカーの音響的挙動にどのように寄与するかを探求し、ドアの設計ガイドラインを顧客に提供することができます。」

ある事例では、数値モデルを検証し、その後の音響装置の最適化に使えるかどうかを検討するために、同社のチームはメルセデスベンツ ML の車内 (図 1) で実際に音圧レベルを測定して、シミュレーションの結果との比較を行いました。「自動車の車内のシミュレーションは、異なる数多くの物理領域を網羅しているため、最もチャレンジングな課題の一つになっています。」Strauss 氏はこう説明します。幸いにも、COMSOL® ソフトウェアは音響的、力学的、および電気的な効果をシステム全域にわたり連成 (カップリング) するオプションを提供してくれます。

社内技術者の開発作業を全社的に支援するため、Strauss 氏のチームは検証済みのモデルおよび既知のソリューションのライブラリを構築し、幅広いスピーカー構成について性能を予測することに成功しました。「高水準のトレンド解析から、サブシステムの性能を検査するための詳細な設計まで、あらゆるサービスを提供できる態勢を整えています。」彼はこう続けました。

車載用スピーカーの性能解析

HARMAN 社の技術者はある研究の際に、とりわけ低周波

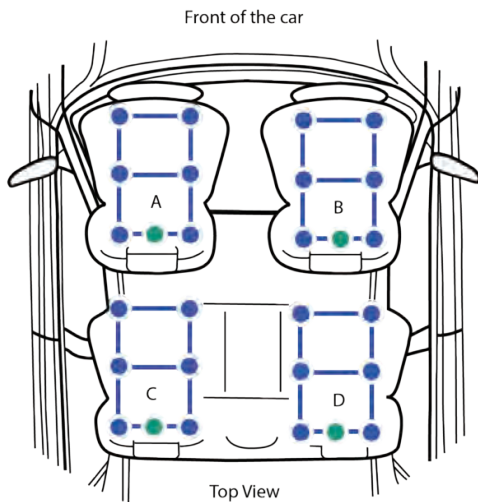


図 2. 4箇所に離して配置したマイクアレイ（図は車両の上、左寄りの位置からの見下ろし）。



図 3. HARMAN社による車内の3Dスキャン。

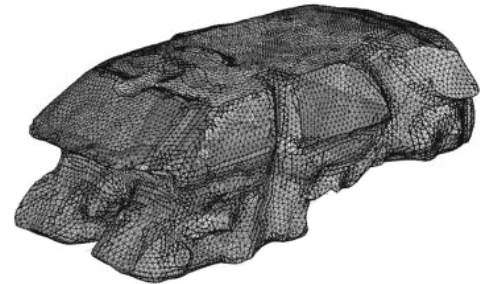


図 4. 乗車空間の表面メッシュ。

数帯域の音波についてスピーカーの音響を最適化するために COMSOL® を用いて車内の音響システムのシミュレーションを作成しました。研究に続き、彼らは一連のテストを設計してモデルを検証しました。モデルの検証を終えたのち、HARMAN 社の技術チームは任意の車について、このモデルを用いて最適なスピーカー構成に到達できるようになりました。

検証テストでは、スピーカーは運転手座席の近くに設置された剛体エンクロージャー上に固定されました。4組のマイクアレイが車内全体に分散して配置され、各位置における音圧レベルの平均値が計測されました（図 2 参照）。

1kHz 未満の周波数については、ボイスコイル端末における電圧およびサスペンションとスピーカーの薄膜表面の剛性を考慮し、単純化のため、ランプパラメータモデル（LPM）に締結された平らな剛体ピストンとしてスピーカーを表現しました。形状は手作業による 3D スキャンに基づいて生成されました（図 3 参照）。MATLAB® ソフトウェアに実装のポストプロセッサアルゴリズムと COMSOL® のアドオン製品で、両アプリケー

ション間に双方向リンクを確立する LiveLink for MATLAB® を用いることにより、同社の技術チームはスキャンによって作成された点群を車体の表面メッシュに変換して（図 4 参照）音響圧力波の解析に最適化されたメッシュを作成しました。

フロントガラス、フロア、座席、ヘッドレスト、ハンドル、その他のコンポーネント（ルーフ、ドア、計器パネルなど）はそれぞれ吸音特性が異なりますが、本シミュレーションでは、これら各コンポーネントに用いられる材料を変化させた場合について、スピーカーで生成された

音波と各コンポーネントの相互作用の解析を行いました。

音響モデルの最適化

多種多様な材料に加え、技術チームは Livelink™ for MATLAB® を用いることにより、さらにエンクロージャー内の音量に基づいてスピーカーの薄膜の運動および加速を定義し、プリプロセスおよびポストプロセスの作業を簡素化するために特別の MATLAB® のスクリプトを開発しました。

「すべてが完全に最適化、自動化されているため、案件ごとに加速度を計算する必要がありません。1つのシミュレーションが完了すれば、次のシミュレーションに着手できます。」Michal Bogdanski 氏はこう言います。「これにより全工程を簡単かつエラーフリーにすることができます。単純化を極め、すべてをスクリプトに委ねています。」

さらに同チームは、測定値とシミュレーションによって得られた音圧との間に、確たる相関関係が得られるように周波数依存の吸収係数を最適化しました。次に、各マイクアレイから得られた音圧レベルをプロットしました（図 5 参照）。

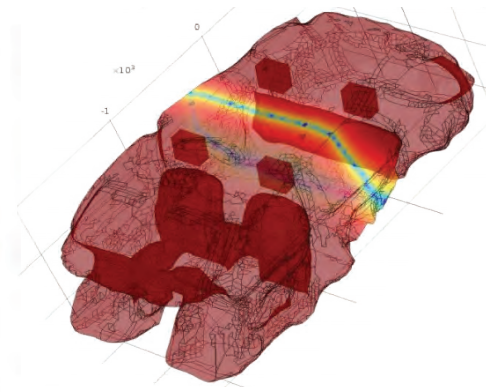
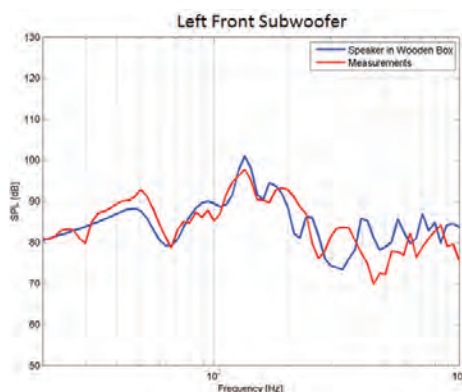


図 5. マイクアレイの中の一つにおける音圧レベル（左図）および車内全体の音圧レベル（右図）。

運転席における客観的および主観的な評価

HARMAN 社では、同社で検証済みのシミュレーションを用いることにより、新車種の設計が進行中の段階でも音響システムの設計に着手することができ、車内の隅々まで音圧場の正確な予測ができれば、オーディオシステムのパフォーマンスを最適化することができます。さらに、チューニングアルゴリズムにイコライザーと音響心理学的効果が含まれているため、実際のプロトタイプを作成しなくても設計の変更を行う

「HARMAN 社の技術者はシミュレーションを用いることにより、実物がまだ存在しない状態であるにもかかわらず、提案されているサウンドシステムの性能を最適化、予測し、さらには主観的に評価することができます。」

ことが可能です。

最高峰のサウンドシステムの追求では、現在、「可聴化」（計算によってバーチャルに作り出される音響を用いて再生音を制御する技術）が注目を集めています。HARMAN 社の技術者はサブウーファー、ミッドレンジ、およびツイーターから構成されるオーディオシステムのリスニング、評価、および比較をハイエンドのヘッドホンを用いて行うことが可能な再生システムを開発しました。「すべてはシミュレーション結果と信号処理に基づいています。」Malbos 氏はこう言います。

HARMAN 社の技術者は、人間の頭部、胴体、および外耳が音響に及ぼす影響を考慮した結果、バイノーラルインパ

ルス応答（BRIR: Binaural Impulse Responses）——つまり耳がどのように音を受け取るかの予測に成功しました。完全な 3D サウンドを捉えるため、頭部の水平断面内のさまざまな位置で BRIR の計算が行われました。リスナー（運転席に座る人間など）が体験するのと同じサウンド体験を完璧に再現するため、再生システムにはヘッドトラッキングが導入されています。

COMSOL® ソフトウェアを用いて作成され、BRIR の予測に用いられたメッシュを図 6 に示します。図 7 は、予測によって得られた BRIR と、シミュレーションによる BRIR の比較を示します。

可聴化の手法に全く問題点がないわけではありません。可聴化の品質は主観的に測らざるを得ないため、現実の音響との比較が不可欠です。そのため「人の感覚」による確認を行い、リスニング体験の品質を維持しています。

HARMAN 社では、完全にシミュレーションだけでオーディオシステムを評価する能力が確立した結果、製品の品質が向上し、製品開発のスピードが加速しました。顧客のレスポンスも良くなり、設計変更のコストが低下し、技術者の間で一種の「設計の自由度」が増しました。

「シミュレーションが素晴らしいのは、システムエンジニアがデスクにいながらにしてヘッドホンを装着し、実車に乗車することなくシステムのチューニングを行える点です。」と Strauss 氏は言います。「HARMAN 社の技術者はシミュレーションを用いることにより、実物がまだ存在しない状態であるにもかかわらず、提案されているサウンドシステムの性能を最適化、予測し、さらには主観的に評価することができます。」❖

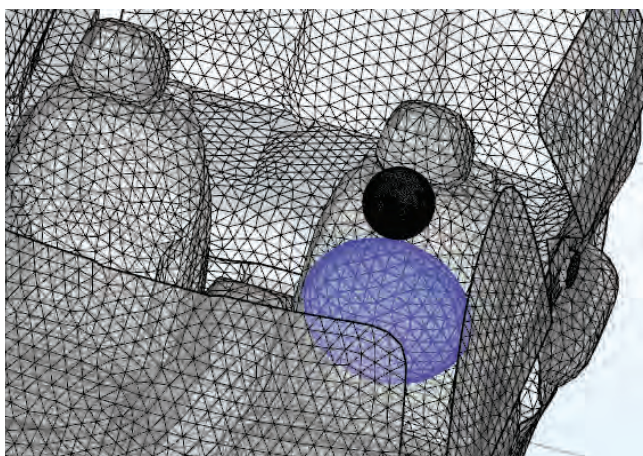


図 6. バイノーラルインパルス応答（耳がどのように音を受け取るかの予測のため COMSOL® を用いて作成されたメッシュ）。

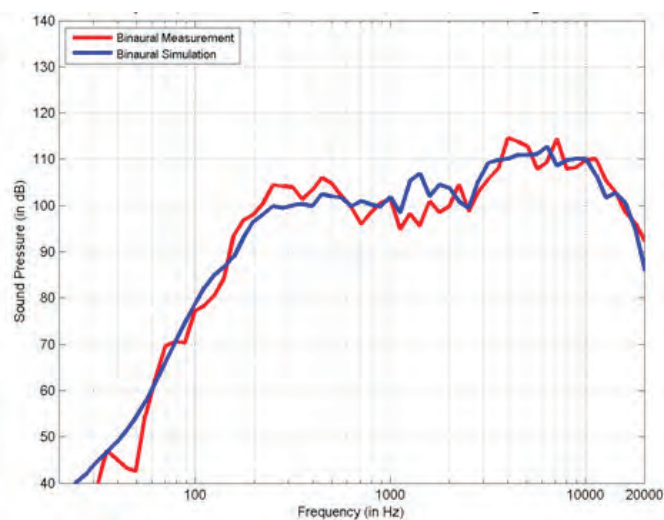


図 7. 測定された BRIR とシミュレーションによる BRIR の周波数領域における比較。



HARMAN 社の VPD チーム（向かって左から右へ）Maruthi Srinivasarao Reddy、Michał Bogdanski、Michael Strauss、Ninranjan Ambati、François Malbos。

正確度という性能～完璧な計測の追及

Brüel & Kjær 社の研究者たちは、産業用、計測用のマイクロフォンおよびトランスデューサの正確度と精度をこれまでにない水準に引き上げるためにシミュレーションを用いています。

執筆者：ALEXANDRA FOLEY 氏

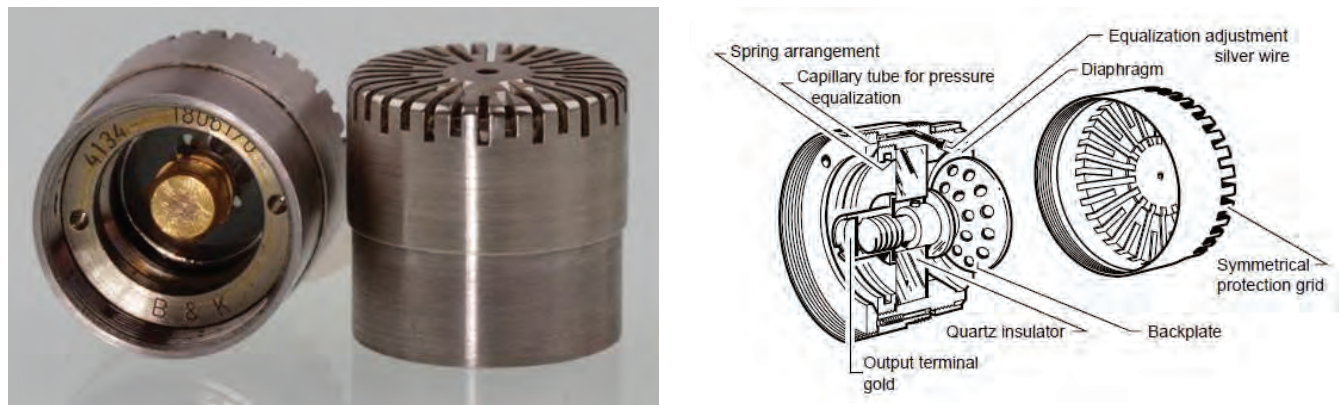


図 1. 左：4134 マイクロフォンの写真。振動板の上に保護グリッドが置かれている。右：一般的なマイクロフォンカートリッジの断面図。主要な部品が示されている。

完璧な計測や、絶対に間違いのない道具というのはいつになっても現実にはならないものです。自分で計測したものを無条件で信用することはままありますが、計測に誤りは付きものです。というのも、機器は計測したものを定義する訳ではないからです。計測機器は定義するのではなく、周囲の現象に反応し、絶対的な標準を不完全に表したものに照らし、計測したデータを解釈します。

そのため、すべての機器にはある程度の許容誤差、つまり有用性を損なわずに計測を誤ることが許される範囲が設定されています。難しいのは、既知かつ一貫した誤差範囲を、長い期間にわたって持つ機器を設計することです。

Brüel & Kjær A/S は 40 年以上にわたる音響や振動の計測および分析の分野をリードしてきました。同社の顧客には、Airbus, Boeing, Ferrari, Bosch, Honeywell, Caterpillar, Ford, Toyota, Volvo, Rolls-Royce, Lockheed Martin, NASA などが名を連ねます。

産業界での音響、振動に関連した課題は、道路や空港での騒音から車載エンジ

ンの振動、風力タービンの騒音、生産品質管理まで多岐にわたるため、Brüel & Kjær 社はさまざまな測定規格を満たすマイクロフォンや加速度計を設計しなければなりません。これらの要件を満たすため、同社の研究開発プロセスには、開発した機器の正確度や精度を検証し、新しく革新的な設計をテストするための一手段として、シミュレーションが組み込まれています。

精度の高いマイクロフォンの設計、生産

Brüel & Kjær 社では、超低周波不可聴音から超音波までの周波数、並びに聴覚域値よりも低いレベルから通常の大気環境下での最大音圧レベルまで対応するコンデンサマイクロフォンの開発および生産を行っています。そのリストには作業標準や実験室標準となるマイクロフォン、特殊な用途専用のマイクロフォンなどが含まれます。一貫性と信頼性は、同社でのすべてのマイクロフォン開発における重要な要素です。

「当社では、コンデンサマイクロフォンの開発や、開発したマイクロフォンが国

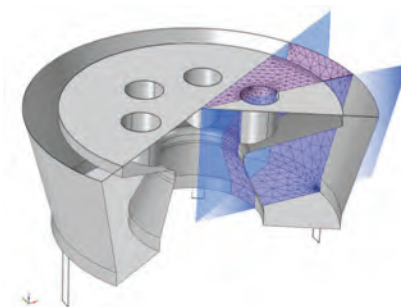


図 2. 4134 コンデンサマイクロフォンのジオメトリ図。セクタ数を削減したジオメトリで用いたメッシュの図であり、ジオメトリ全体の 12 分の 1 が示されている。

際電気標準会議（ICE）や国際標準化機構（ISO）の関連規格を満たすことを確実にするためにシミュレーションを使っています」と Brüel & Kjær 社 Microphone Research and Development 部の開発エンジニアである Erling Olsen 氏は話します。「シミュレーションは私たちの研究開発プロセスの一部として用いられており、他のツールとともに、当社のマイクロフォンが幅広い条件下で確実に機能することを確認させてくれます。例えば、静圧、温度、湿度などの影響、また、その他のパラメータが当社のそれぞれの製品にどのように影響するのかを正確に知ること

ができます。シミュレーションを使わずにこれら进行评估しようとしたら非常に難しかったでしょう。」

Brüel & Kjær 社の 4134 コンデンサマイクロフォン（図 1）は、長年にわたり論理的、実用的研究の対象となってきた旧型のマイクロフォンです。4134 マイクロフォンは Brüel & Kjær 社でコンデンサマイクロフォンのマルチフィジックなモデルを開発する際にもプロトタイプとして使われてきました。Olsen 氏のシミュレーションには、マイクロフォンの性能を分析するため、振動板の動き、振動板の変形と電気信号生成との電気機械的相互作用、共振周波数、マイクロフォン内部の空洞における音の粘性損失、熱損失が含まれます。

マイクロフォンのモデリング

音がマイクロフォンに入ると、音圧波が振動板を変形させ、これが電気信号として測定されます。電気信号はその後デシベルで表される音に変換されます。「マイクロフォンのモデリングでは、動くメッシュや、緊密に連成した機械的、電気的、音響的な問題を解く必要があり、これらはマルチフィジックスな機能なしでは不可能です」と Olsen 氏は述べています。「（マイクロフォンカートリッジの形状に起因する）大きなアスペクト比とサイズの小ささにより、多くの場合、熱および粘性損失がマイクロフォンの性能に重大な影響を与えることになるため、モデルは非常に細かい部分まで作り込む必要があります。」

このモデルは、バックプレートと振動板との間で起こる相互作用の予測にも使うことができます。この相互作用は、マイクロフォンの指向性に特に影響します。「私たちは、このシミュレーションを使って振動板の曲がり方のパターンを分析しました」と Olsen 氏は話します。熱応力や共振周波数などのシミュレーションでは、計算時間短縮のために対称モデルが使われました（図 2）。セクタ数を削減したモデルは、振動板に垂直入射する音

の、マイクロフォン内での音圧レベル分析にも使われました（図 3）。しかし、音が垂直入射しない場合、振動板は非対称な境界条件におかれることになります。振動板の曲がり方を正確に把握するためには、ジオメトリ全体を考慮したシミュレーションが必要となります（図 4）。

マイクロフォン内の空気孔が低周波数の音の計測に与える影響を確認するためにもシミュレーションが使われました。「マイクロフォンのモデルは、空気孔が外部の音場に曝露されているもの、音場外（曝露なし）のもの、空気孔なしのもの、を準備しました」と Olsen 氏は話します。「最後の一つは実際にはあり得ないのですが、空気孔の配置と入力抵抗の結果との間に起こる相互作用をさまざまな低周波数音について確認することができました。これはシミュレーションの最も大事な点の一つと言えます。すでに生産されている機器から離れてモデルのパラメータに変更を加えることができ、他の設計をテストしたり機器の限界を探索したりできるのです（図 5）。」

研究開発プロセスの一環としてシミュレーションがあることで、Olsen 氏と同僚らは Brüel & Kjær 社の主力商品のいくつかを設計しテストするだけでなく、顧客

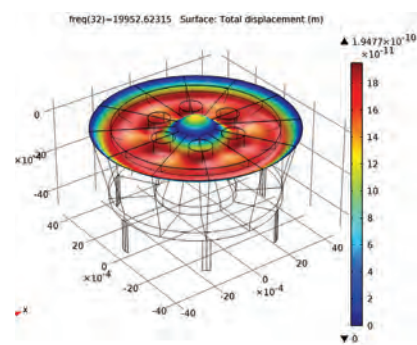


図 3. セクタジオメトリを使って計算した、振動板の下での垂直入射時の音圧レベルを図示したもの。振動板の変形は $f = 20$ kHz で評価した。

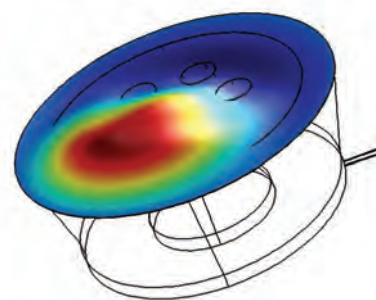


図 4. 25 kHz での非垂直入射での振動板の変形をシミュレーションした結果。変形が非対称であるため、フル 3D モデルを使って計算した。

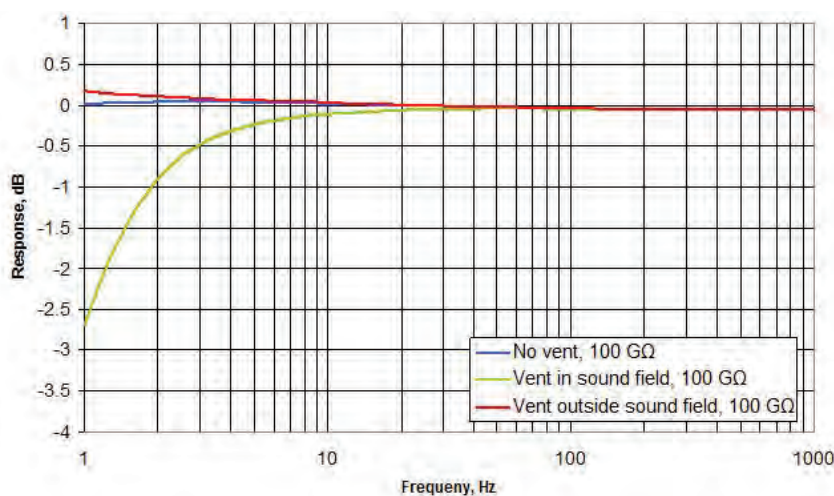


図 5. 空気孔なしの構成の場合、感度が増すのは超低周波ではマイクロフォン内部の音場が完全に等温になるため。音場の外に空気孔がある構成の場合、最初は空気孔なしと同様に推移するが、空気孔が振動板の裏側で圧力を解放し感度がさらに増す。

それぞれの要件に合わせて機器を製作することも可能になりました。

「シミュレーションがあれば、顧客のニーズに基づく具体的な改善に向けた正確なアプローチが可能になります。マイクロフォンの音響はテストだけでは計測が非常に難しいのですが、ある特定の構成について物理モデルとの比較でシミュレーションを検証した後は、そのシミュレーションを使って、他の構成や環境をケースバイケースで分析することが可能です。」

振動トランスデューサのモデリング

Brüel & Kjær 社の開発技師である Søren Andresen 氏も、振動トランスデューサの設計およびテストにシミュレーションを使っています。

「振動分析に用いるトランスデューサの設計で難しいことのひとつが、このような機器は過酷な環境での使用に耐える必要があるということです」と Andresen 氏は述べています。「私たちの目標は、極めて厳しい環境に耐えるに十分な抵抗力を備えた機器を設計することでした。」

機械システムの多くでは、共振周波数は比較的狭い範囲に限定されている傾向があり、一般的には 10 ~ 1000Hz の間です。トランスデューサの設計で重要な側面の一つは測定する振動と同じ周波数で共振しないということであり、共振すると計測結果にまで影響が及んでしまいます。図 6 には、吊下げ型 [suspended] 振動トランスデューサの機械的変位と、共振周波数のグラフが示してあります。

「私たちが望むのは、測定の対象となる振動域でのトランスデューサの周波数応答がフラットであり、共振周波数がないことです」と Andresen 氏は話します。「特定の設計でフラットなプロファイルが得られる（共振がゼロとなる）材料と形状の組み合わせを突き止めるため、私たちは COMSOL を用いてさまざまな設計の実験を行いました。トランスデューサ

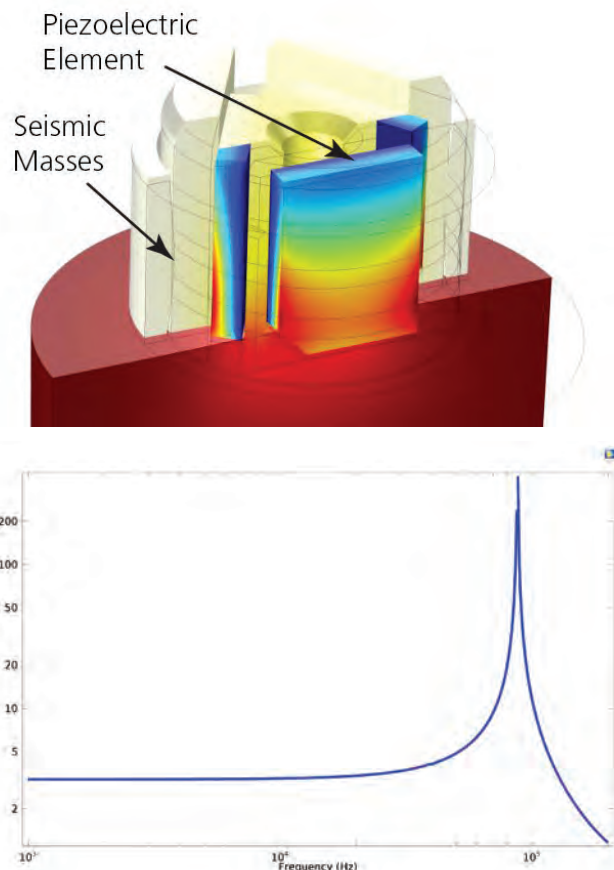


図 6. 吊下げ型圧電振動トランスデューサのシミュレーション結果。上：圧電部品と振動物質における機械的変位および電場。下：トランスデューサの最初の共振が約 90 kHz で生じることを示す周波数応答のグラフ。この機器での計測は、90 kHz よりもかなり低い周波数のものを対象とすべきである。

はこのような領域で使用されます。」

トランスデューサの設計では、もし共振した場合でも不要な信号を取り除けるよう、ローパスフィルタ、別名メカニカルフィルタを使うことが可能です。このようなフィルタでは、媒材（一般的にはゴム）が 2 つの装着用ディスクの間に接合されており、トランスデューサと装着面の間に固定されます。

「経験則から、当社では周波数上限をトランスデューサの共振周波数の 3 分の 1 に設定しています。そうすることで、振動部品の周波数上限が 10 ~ 12% を超えない誤差範囲内になると考えられます」と Andresen 氏は話します。

できるだけ正確かつ高精度に

完璧なトランスデューサを設計すること、絶対に確実な計測を行うことは不可能かもしれませんが、シミュレーションは多種多様な運用シナリオに対応した新しい設計ソリューションを素早くかつ効率的にテストすることを可能とし、研究チームと開発チームをこれまでよりもずっと近づけます。

「競争相手よりも常に前に出ておくためには、独自の知見が必要になります」と Andresen 氏は述べています。「シミュレーションは私たちにその知見を提供してくれます。実験では不可能だった調整を行い、事実上の計測ができることで、革新的な新しい設計をテストし最適化することができるようです。」❖

「シミュレーションを使えば顧客のニーズをピンポイントで実現できる」

—Erling Olsen, development engineer at Brüel & Kjær

ロケットシステムの流量拡張音響特性を マルチフィジックスソフトウェアモデルで

固体ロケットモーターおよび液体エンジンにおける燃焼の不安定さは、従来から設計者や技術者の課題となってきた複雑な要素です。マルチフィジックス解析を活用した高品質モデリングアプローチ採用により、高い分析力と予測能力が得られます。

執筆者 **SEAN R. FISCHBACH** 氏

多くのロケットシステムでは、燃焼プロセスと気体力学的特性の間の複雑な相互作用から生じる圧力、速度、温度において激しい変化が生じます。燃焼が極端に不安定になると、その変動幅は、燃焼室圧の平均値に達する、もしくはそれをはるかに上回る値に達する恐れがあります。大きな振動は、燃料噴射装置の損傷、ロケット性能の低下、積載物の破損につながり、場合によっては、カバーの損傷を引き起こし、宇宙飛行ミッション自体の中止になりかねません。

サターンV型ロケットに動力を供給する
F1エンジンのフェースプレート

燃焼の不安定性をモデル化し、これを予測することは非常に難しく、不安定性の問題を抱えるロケットシステムの多くの事例で、検査によるコストのかかる調整や修理（図 1 参照）、あるいはシステム自体の開発中止を招いています。

「グローバルエネルギーベース評価を使用することで、燃焼不安定性振動のより完全な描写が達成されます。」

ロケット推進の初期の開発段階では、技術科学者やエンジニアは、振動する実験装置での測定や変動する排気プルームの観察記録から、さらには、不安定性に伴う可聴音などを通じて、その結果を表す基本的な物理特性から手がかりを得ました。燃焼の不安定性研究の先駆者たちは、これらの観察記録により、燃焼室内の音響波に重点を絞ってそのモデル化の試みを始めるようになりました。

この音響特性に焦点を絞り込む方法は、測定された振動周波数が燃焼室の通常の音響モデルと多くの場合でほぼ一致することを考えれば、きわめて理論的です。しかし、こうした焦点を絞った方法は、音響波の直接の結果または緊密に関連する回転波および温度波によって生じる影響を見落とすこととなります。グローバルエネルギーベース評価を使用することで、燃焼不安定性振動のより完全な描写が達成されます。

エネルギーをベースとする燃焼の不安定性に関するモデル化の最近の進歩には、音響周波数およびモード形状の正確な特定が必要とされます。特に関心が高いのは、ロケット・ノズルの集束部分内での音響の平均流量特性の相互作用であり、そこでは、圧力の勾配、密度、速度が大きくなっています。ロケットのノズルを通過する不安定なエネルギーの排出は、多くのロケットシステムの音響減衰の主要な原因として認識されます。

最近、平均流量特性効果でノズル減衰を解決するアプローチは、French^{※2}によって実践されました。この新しいアプローチは、Euler の方程式^{※3}を変化させ

て公式化した音響速度ポテンシャル方程式（AVPE: Acoustic Velocity Potential Equation）を解くことによって Sigman と Zinn^{※4} が考案した研究を拡大したものです。 ψ を複素音響ポテンシャル、 λ を複素固有値、 c を音速、 M をマッハベクトルとする AVPE の固有値を決定することは、

$$\nabla^2 \psi - \left(\frac{\lambda}{c}\right)^2 \psi - M \cdot [M \cdot \nabla(\nabla \psi)] - 2 \left(\frac{\lambda M}{c} + M \cdot \nabla M\right) \cdot \nabla \psi - 2\lambda \psi \left[M \cdot \nabla \left(\frac{1}{c}\right)\right] = 0$$

伝統的に活用されてきた圧力ベース波方程式よりもさらに複雑になり、

$$\nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho} \nabla p\right) + \frac{1}{\rho c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0$$

燃焼室の流動領域および固有値の近似値が必要となります。

燃焼室の空気力学モデル

高速流体における振動の乱れの最新の理論的モデルでは、燃焼室の音響固有モードを必要とします。しかし、最初に燃焼室の平均流量特性のシミュレーションが実行されなければなりません。

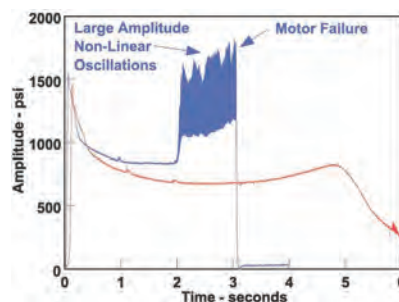


図 1. 固体ロケットモーターの安定性（赤）と不安定性（青）の圧力波形^{※1}。

COMSOL Multiphysics[®] は、燃焼室の気体力学的特性と燃焼室内部の音響特性の両方を簡単かつ正確にシミュレーションする数値計算プラットフォームを提供します。この有限要素法ソフトウェアパッケージは、一般的な数学的インターフェースとともに多数の設定済みフィジックスを提供します。

現在の研究は、高マッハ数層流（High Mach Number Laminar Flow）フィジック

スインターフェースを使って、液体エンジンの安定流動場パラメータをモデル化するために COMSOL の有限要素フレームワークを採用しました。このインターフェースは、エネルギー保存の法則および質量方程式とともに理想気体のために、完全に圧縮可能な Navier-Stokes 方程式を活用するものです。

燃焼する推進剤に起因する高温ガスの噴射を考慮に入れるために、燃料噴射装置の表面プレートは、燃焼する高圧ガスの均一な内向き流とともにモデル化されます（図 2 参照）。他の全ての固体物質境界は、スリップ境界条件でモデル化され、流出レベルは、亜音速でも超音速でも可能であることを意味するハイブリッド流出条件でモデル化されます。

この平均流量解析から得られる結果は、有効かつ収束性のソリューションであることを確認するために見直されます。圧力、密度、速度、音速などの平均流量パラメータが AVPE をモデル化するために必要となります。音速チョーク面に近いノズルの集束部分における平均流量の値は大変興味深いものがあります。この音速面は、マッハ数が 1 であり、流れの中に遮音壁を作り出します。この音響解析用の正確なジオメトリを作るために、この音速面（図 3 に赤紫色で描かれている）が平均流量解析から導き出されます。

燃焼室内の音響特性のモデル

AVPE の複素固有値を決定するため、COMSOL Multiphysics[®] の係数型 PDE（偏微分方程式）数学インターフェースが使われます。AVPE の平均流量条件は平均流量解析のソリューションから得られます。燃焼室内の空気力学的特性は、音響分析の境界条件を定義する際に重要な役割を担います。ロケット・ノズルの集束および分流部分内で、音速面がマッハ 1 の場合、燃焼室の圧力、速度、密度の勾配は、理論的には無限に増加します。音速面の下流において、音響障害が音速よりも早い速度で平均流量を循環させます。

この状況は、音速レベルでの下流の攪乱が上流へ伝わることを抑える働きをします。ノズルの分流部分は、音響的には

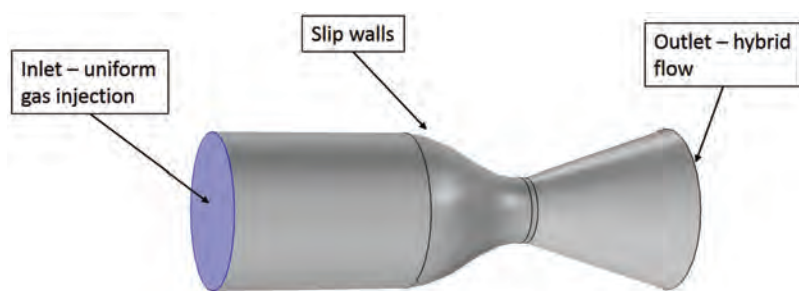


図 2. 境界条件のある液体エンジンジオメトリのシミュレーション。

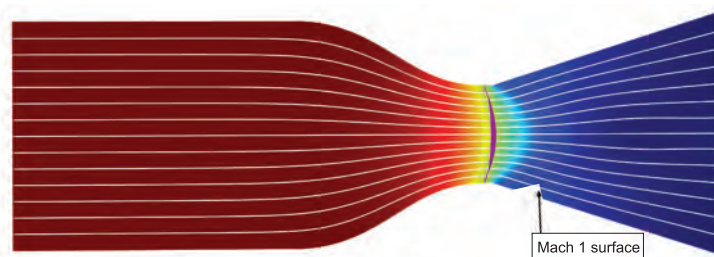


図 3. 燃焼室内圧力に関してプロットされた速度流線形。

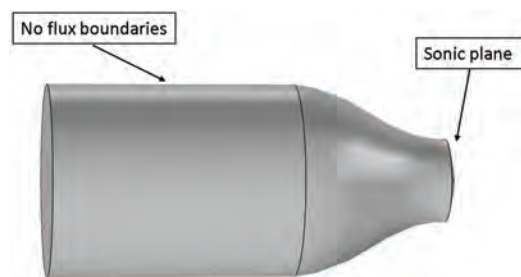


図 4. 境界条件のある音響解析図。

静かな部分で燃焼室内の音響には影響しません。このシミュレーションジオメトリは、ゼロフラックス境界条件が満足されるノズル音速線で切断されます（図 4 参照）。残りの境界が、全ての表面上でゼロ吸音と仮定して、ゼロフラックス境界条件でモデル化されます。

固有値解析は、それぞれの音響モードを表す複素固有モードおよび固有値、複素共益を備えています。この複素固有値の実数部は音響モードの一次的な減衰を示し、虚数部は振動数を定義します。固有ベクトルは音響波の空間振幅と位相を表します。

古典的な Helmholtz 方程式を使って導き出された音響モード形状を、AVPE を使って導き出された音響モード形状と比較すると、正確に基礎物理特性を表す信

頼性の高いモデルの効果が明らかになります（図 5 参照）。平均流量条件を AVPE に含めて、安定した気体流によって起きる位相シフトをモデル化します。燃焼の不安定性モデルは音響固有ベクトルの時間積分および空間積分を使用するので、位相は特に重要です。

ロケットガス動力および音響固有モードをシミュレーションするために COMSOL Multiphysics® を活用すれば、以前の技術を超える正確なモード形状を得ることができます。この信頼性の高い音響特性は、簡単に燃焼の不安定性モデルに組み込まれ、ロケット設計者や技術者に大きな予測能力を与えます。バップルのような減衰装置あるいは稼働条件の変更を含めることにより、実験前に正確なモデルを得ることができます。

今後の研究

燃焼の不安定性の完全な描写には、燃焼室内の音響特性と関連して、回転振動や熱振動があげられます。回転振動は、音響振動の直接の影響で起こり、音波変動がない場合でも、そこで温度波が現れます。COMSOL Multiphysics® を活用した今後の研究では、全ての音響振動にと

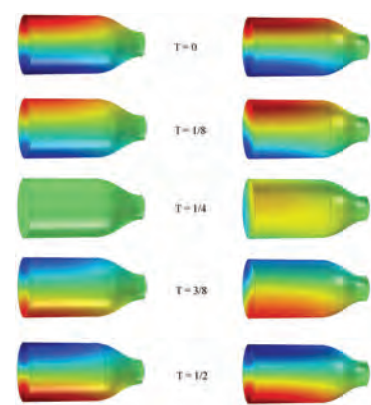


図 5. 振動の半周期 (T) について、標準的な Helmholtz 波動方程式（左）と AVPE（右）を使って計算された最初の接線固有モードの比較。

もなつて起こる粘性回転波の問題解決に重点を置いた研究を行う予定です。❖

参考資料

- ※1. F. S. Bloomshield, Lessons Learned in Solid Rocket Combustion instability, 43rd AIAA Joint Propulsion Conference, AIAA-2007-5803, Cincinnati, OH, July 2007
- ※2. J.C. French, Nozzle Acoustic Dynamics and Stability Modeling, Vol. 27 Journal of Propulsion and Power, 2011.
- ※3. L. M. B. C. Campos, On 36 Forms of the Acoustic Wave Equation in Potential Flows and Inhomogeneous Media, Vol. 60, Applied Mechanics Reviews, 2007, pp. 149-171
- ※4. R. K. Sigman and B. T. Zinn, A Finite Element Approach for Predicting Nozzle Admittances, Vol. 88 Journal of Sound and Vibration, 1983, pp. 117-131.



マヒンドラオートバイ： 爆音の舞台裏

Mahindra Two Wheelers 社は、同社の最高級オートバイをエンジン騒音規制に適合させ、同時に顧客満足度を維持するためにマルチフィジックスシミュレーションを活用しました。

執筆者 **VALERIO MARRA** 氏

Mahindra Two Wheelers 社は、インド国内のスクーターおよびオートバイ市場向けに幅広い製品ラインアップを展開しています。開発サイクルの初期段階に数値シミュレーションツールを採用したことにより、ライダーおよび同乗者は高性能・高燃費に加え、インドの悪路条件でも卓越した操縦体験を存分に楽しむことができます。Mahindra 社は、同社オートバイのエンジンおよび吸排気系の NVH（騒音、振動、静音性）パフォーマンス解析にマルチフィジックスシミュレーションを活用しました。

数値シミュレーションを用いて解析を行うことにより、同社の技術者はオートバイエンジンの構造設計を向上させ、目標の騒音レベルを達成することができました。「以前は、設計案に小さな変更を加えて多数の試験を行う必要がありましたが、COMSOL ソフトウェアのおかげで試行数を大幅に減らし、開発時間の短縮につなげることができました。」Mahindra 社の研究開発部課長代理 Niket Bhatia 氏はこう言います。

最適な騒音レベルを達成する

吸気系、燃焼工程、ピストン、ギヤ、バルブトレイン、排気系など、エンジンには数多くの騒音源が内在しています。燃焼騒音は、シリンダ内の急激な圧力上昇により発生する構造的振動に起因しま

す。この振動は、パワートレインからベアリングを経てエンジンのケーシングに伝わり、騒音を発生させます。

物理試験だけに依存した音響解析は、コスト高でしかも時間がかかります。Mahindra 社の開発チームは、エンジンの構造が騒音拡散を助長する可能性およびそのメカニズムを解析するため、物理試験を音響モデリングで補完することにしました。研究の目標は、エンジン内で最も騒音を発生している箇所を特定し、騒音を減少させるために構造にどのような設計変更を加えればよいのかについて結論を導き出すことでした。

研究者は COMSOL Multiphysics® ソフトウェアを用いて、燃焼負荷下の単気筒内燃エンジンについて音響 - 放射解析を実行しました。技術者は、PML（Perfect Matched Layer）に囲まれた計算領域内にエンジンスキンを封入しました。PML は、外

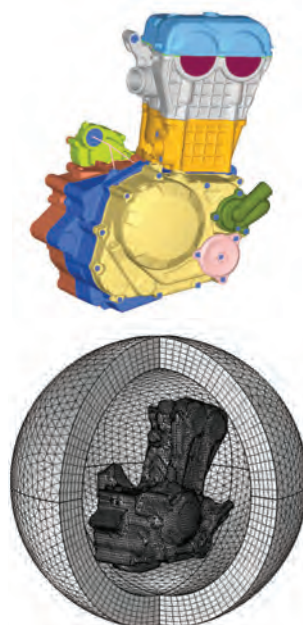


図 1. 上：エンジンの CAD 形状。
下：メッシュが作成され、PML
に封入された 3D モデル。

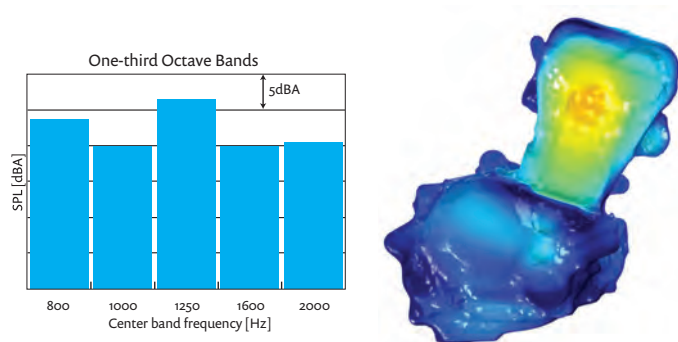


図 2. 左: 1/3 オクターブ帯のプロット。右: 音圧レベル (SPL) シミュレーション結果の 3D 面プロット。

向きに放出された波を無反射またはごく小さい反射でダンピングします (図 1)。これにより、計算領域のサイズを削減しながら正確な計算結果を得ることができます。

燃焼負荷下のオートバイエンジンの騒音が 800Hz ~ 2000Hz の音響スペクトル帯で支配的であることが物理的な実験結果によって判明しているため、開発チームはこの周波数帯を解析の焦点に定めました。この選択により、開発チームは計算資源を節約することができ、どの領域が最大の騒音発生源になっているかについて、より詳しい理解を得ることができました。

この解析に基づいて音圧レベル (SPL) の解析が実施され、シリンダヘッドおよびシリンダブロックに対して、リップの高さや壁の厚さを増したり搭載位置の強度を高めるなどの変更が加えられました (図 2)。これらのパラメータを調節することにより、目的の周波数領域で SPL の減少が得られました。

吸気構造ノイズの低減

吸気ノイズ、排気ノイズはいずれも、走行時の騒音の主因の一つです。エアフィルタ構造 (一般的にはプラスチック製) から発する騒音は、インテークノイズの主因の一つです。プラスチック製のフィルタ壁について音響変換関数 (ATF) 解析が行われました。エアフィルタ構造に変更が加えられ、ATF を向上するためにリップが取り付けられました (図 3)。これはエアフィルタにおける構造ノイズの削減に貢献しました (図 4)。

変換損失の解析によるマフラー音の改善

オートバイのパワーの象徴としてのマフラーの「爆音」への顧客の要求と、法規制は常に相反します。Mahindra 社の技術者に与えられたチャレンジは、走行時の騒音規制の範囲内でマフラーの「爆音」のうち高周波数音を減らし、低周波数音を増やすことでした。

マフラーの最大の機能はエンジンの排気音を減衰させることですが、背圧を減らしたり、走行中の騒音規制に適合させることも考慮する必要があります。自動車の排気系におけるマフラーの性能は、変換損失、挿入損失、発散される騒音レベルという 3 つのパラメータで特徴づけられます。変換損失は最も重要なパラメータと考えられ、マフラー設計だけで決定し、圧力源には依存しません。Mahindra 社の開発チームにとってチャレンジは、オートバイマフラーの変換損失を予測し、特定の周波数帯における損失を目標のレベルに最適化することでした。

解析では、単気筒オートバイのエンジンマフラーが考慮されました。COMSOL Multiphysics® を用いてマフラーの変換損失の

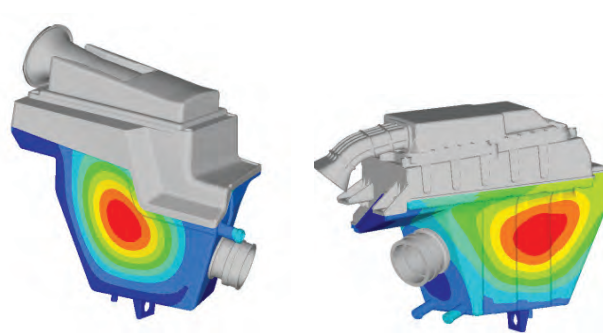


図 3. エアフィルタ構造。左: オリジナルの設計。右: 変更後の設計 (ATF 向上をもたらすリップが特徴的)。

解析が行われました。音響モジュールを併用することで、連続性や遮音壁などの境界条件が適切な位置に適用されました。

排気管内のパーフォレーションは、モジュールに組み込みの変換インピーダンスモデルを用いて、パーフォレーション領域における多孔率の詳細を与えることにより定義されました。解析に必要な入力、領域の多孔率、バッフルおよび排気筒の厚さ、および穴の直径でした。ソフトウェアに提供される多孔質音響モデルを用いて、グラスウールなどの多孔質材料に流れの抵抗率が定義されました。吸気側の入力として単位圧力が与えられ、吸気

側および排気側の両方の境界に平面波の放射条件が与えられました。

計算結果に基づき、マフラー内の管の長さを伸ばす形でマフラーの設計が変更されました。設計変更されたマフラーにより、開発チームは低周波数域における変換損失を低減させることができました (図 5)。結果として、低周波数域における音量増加または「重厚な爆音」という目的を達成することができました。

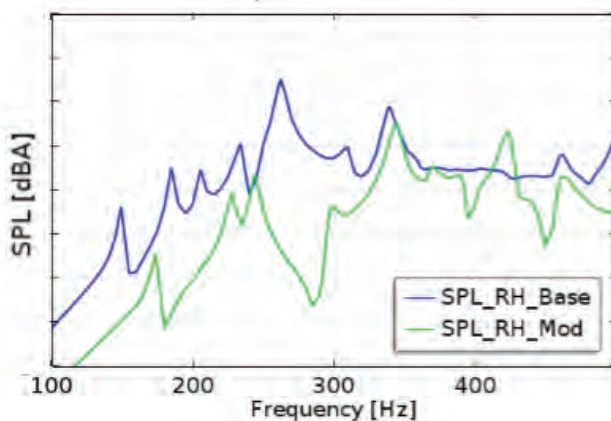


図 4. シミュレーション結果は、エアフィルタの設計に変更を加えたことにより構造ノイズが低減したことを示しています。

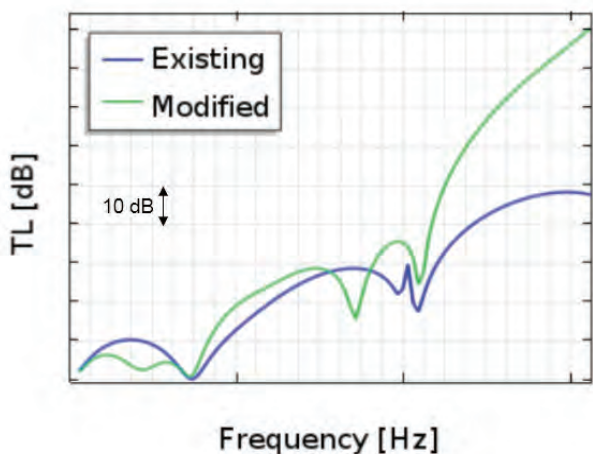


図 5. 設計が異なる場合の変換損失 (TL) の比較。設計変更後の特徴として、低周波数域の変換損失が減少し、高周波数域の変換損失が増大しています。変更後の設計では、法規制に適合しながら、目標に掲げた「重厚な爆音」が達成されています。

「Application Builder を用いてシミュレーションアプリケーションを作成し、解析で得られた出力ファイルを比較したり SPL データをプロットした結果、大幅な時間節約につなげることができました。」

— ULHAS MOHITE、MAHINDRA 社研究開発部長

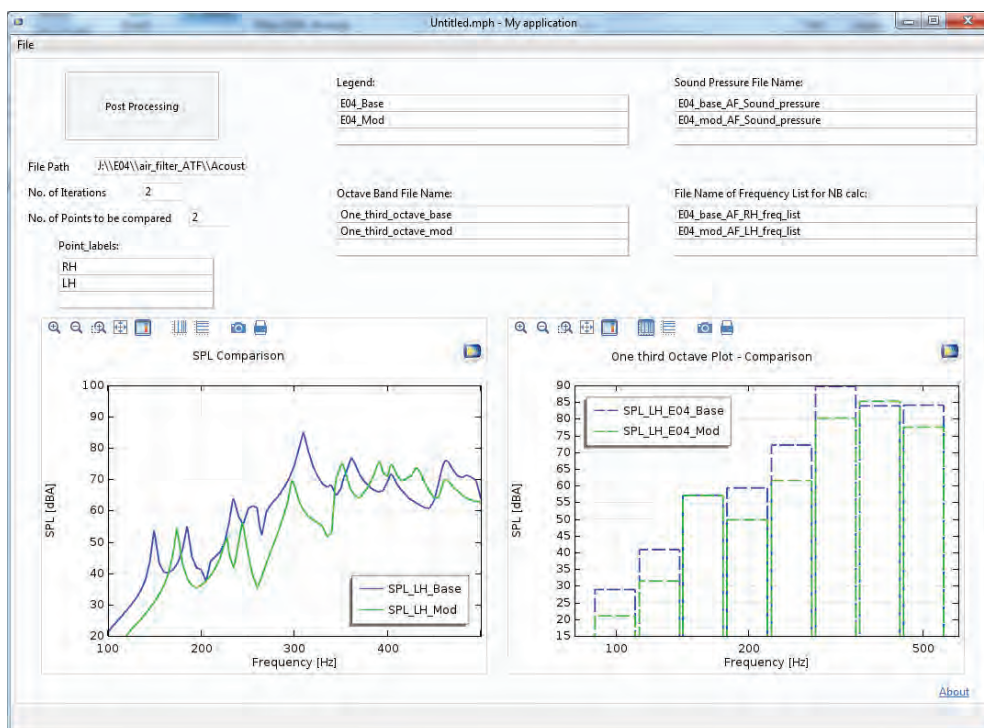


図 6. Application Builder により、Mahindra 社の技術者は簡単に解析ファイルを比較したり、音圧レベル (SPL) のデータをプロットできるシミュレーションアプリケーションを作成しました。

設計サイクル初期段階の最適化でコストと時間を節約

Mahindra 社の研究開発部長 Ulhas Mohite 氏はこう言います。「個人的に、私はソフトウェアの柔軟性と COMSOL API など利用可能なツール群が非常に気に入っています。「COMSOL ソフトウェアでは Java 言語を用いて自動化することができるため、たとえば音響解析において、周波数ステップが異なる場合には別のメッシュを使用できるので、シミュレーションの精度と計算時間の間に適切な妥協点を見いだすことができました。また、面 SPL プロットや遠距離場 SPL データなど、シミュレーション実行中に特定の出力を自動的にエクスポートできました。ポストプロセスの段階で、手動でデータをエクスポートしなければならなかった時代と比べ、多くの時間を節約することができました。」

また、Mohite 氏は COMSOL 付属の Application Builder ツールが非常に便利だったと述べています。「Application Builder を用いてシミュレーションアプリケーション (図 6) を作成し、解析で得られた出力ファイルを比較したり SPL データをプロットした結果、大幅な時間節約につなげることができました。」

解析結果は、物理的な実験データと非常によく一致することが

確認されました。シミュレーションのおかげで、Mahindra 社の技術者は解析結果に基づいて設計の初期段階で構造に変更を加え、是正措置を行うことができました。これは製品開発に関わる時間とコスト、両方の削減に寄与しました。「シミュレーションは、これを実験結果と組み合わせることにより、オートバイの騒音問題の効果的な解決策にたどり着くため正しい方向に私たちを導いてくれます。」Bhatia 氏はこのように締めくくりました。❖

参考文献

1. Mohite, U., Bhatia, N., and Bhavsar, P., "An Approach for Prediction of Motorcycle Engine Noise under Combustion Load," SAE Technical Paper 2015-01-2244, 2015, doi:10.4271/2015-01-2244. (<http://papers.sae.org/2015-01-2244/>)
2. Reducing Motorcycle Engine Noise with Acoustics Modeling, COMSOL Blog, <https://www.comsol.com/blogs/reducing-motorcycle-engine-noise-with-acoustics-modeling/>



表計算ソフトからマルチフィジックスアプリケーションへ、ABB 社は継続的に変圧器事業をパワーアップ

新型で改良型の変圧器施設を開発している企業は、変圧器ハム音低減の研究に伴い、試作品作成や検査のコストが負担になっています。ABB 社では、ある技術者チームがマルチフィジックス・シミュレーションとカスタマイズしたアプリケーションを開発し、自分たちの設計に対する洞察を提供しています。

執筆者 **LEXI CARVER** 氏

調理から電話機の充電にいたる全ての物事において、私たちは毎日、家や職場、学校などの建物に電力を供給する電力網に依存しています。この複雑なネットワークは、発電所や遠く離れた場所に電気を送る高圧送電線、個人の家や地域に電気を送る配電線、電流制御および保護に利用される関連施設から構成されています。

これらの設備の間には、交流電流を送る電線で電圧を増減するための変圧器があります(図1参照)。高電圧での送電は、

電力損失が低くなるため、長距離の送電に向いています。しかし、こうした高電圧は電線の両端部で危害を及ぼすため、変圧器を使って、送電するポイントで電圧を上げ近隣地や建物の近くで電圧を下げています。

しかし変圧器はノイズを発し、しばしば微かなハム音またはブーン音として感じられ、その近くを歩いている時でも聞こえることがあります。これらのノイズを完全に静音させることは不可能ですが、

規制により安全な騒音レベルの遵守が求められ、また良い製品設計を行うことによりこれらの音響効果を最小化することが可能です。

最大の変圧器製造メーカーの1つで、世界中でその変圧器が使用されている、ABB 社(本社スイス、チューリッヒ)は、数値解析と計算アプリケーションを自社変圧器内の騒音レベルの予測と最小化のために使ってきました。彼らは COMSOL Multiphysics® シミュレーションソフトウェ



図 1. 高圧送電線用変圧器設備の写真。

アおよびその Application Builder を利用して、仮想設計チェックを実行し、異なる設定値で検査し、シミュレーション結果を配布してきました。その際には、彼らの解析モデルを基に、カスタマイズしたユーザー・インターフェースを通して行いました。

いくつかの発生源からの騒音の静音化

変圧器のノイズは、しばしばいくつかの発生源から生じています。例えば、変圧器コア内部や補助ファン内部の振動や、冷却機構内部のポンプからなどです。それぞれの発生源のノイズを抑えるためには、別々の方法で解決する必要があります。

ABB 社の変圧器は、数力所に巻かれた金属線コイル付きの金属コア、これらの部品を防護する筐体またはタンク、そしてタンク内部の絶縁油から構成されています（図 2 上参照）。

コイル巻線を交流電流が通過することで、隣接するコイルに電流を誘導する磁束が生じます。異なる巻数のコイルを通

過することで、電圧の調整が行われます。

このコアはスチール製の磁歪材料で作られているため、方向が交互に入れ替わる磁束は、力学的歪みの原因となります。これが金属の急激な膨張と収縮による振動を生み出します。これらの振動は、オイルや内部コアを固定する締め付け部分を通じてタンク壁面に伝わり、コアノイズとして知られるハム音を発生させます（図 2 下）。

コアノイズに加え、コイル内の交流電流はそれぞれ個別の巻線内でローレンツ力を作りだし、タンクに伝わる機械的エネルギーが加わることで生じる負荷ノイズという振動をもたらします。

ノイズの発生源や相互に関連した電磁効果、音響効果、機械的な要因に関して、変圧器のハム音を最小限に抑える最適な設計を行うため、スウェーデンのベステルオース本社研究センター（ABB CRC）の技術者たちは変圧器の内部動作を理解する必要がありました。

音響効果、機械的效果、電磁効果を相互完全連成

「私たちは、COMSOL Multiphysics® を使って研究する方法を選択しました。なぜならば、この手法によって多くの異なる物理を簡単に連成できるからです。このプロジェクトでは、電磁気学、音響学や機械工学をモデル化する必要があります。従って、単一の環境下でこれら 3 つの物理を求解するために、COMSOL ソフトウェアは最高の選択肢でした。」と ABB CRC の科学者 Kavasoglu 氏は述べました。

Kavasoglu 氏、主任科学者 Anders Daneryd 博士および主任技師 Romain Haettel 博士は、変圧器の音響特性の研究チームを ABB CTC で立ち上げました。

彼らの目的は、変圧器コアや巻線内に生成される磁束（図 3 左参照）、巻線内のローレンツ力（図 3 右参照）、磁気歪みによって生じる機械的変位、タンク中

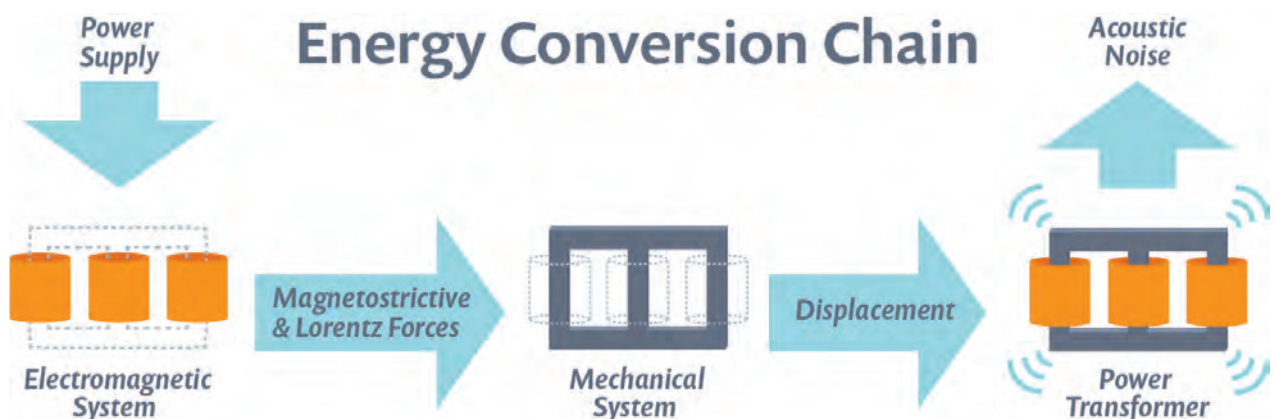
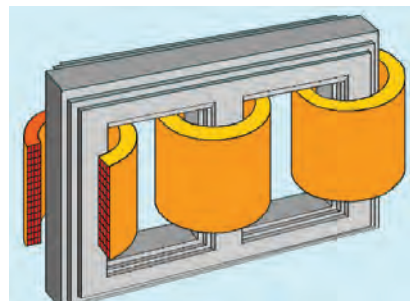


図 2. 左上：三相変圧器の能動部品 CAD モデル。コア周囲には巻線付き。右上：変圧器の能動部分。絶縁油で満たされたタンク中に設置されている。下：コアノイズと負荷ノイズ発生におけるエネルギー交換連鎖図（コア内部に磁気歪み、巻線中にローレンツ力）

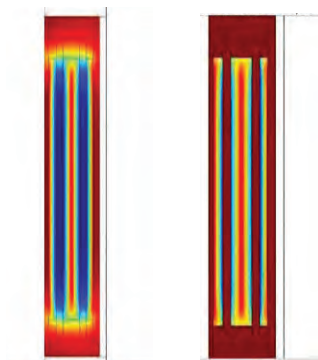


図 3. 変圧器のコイル巻線における磁束密度 (左) およびローレンツ力 (右) を示すシミュレーション結果

に伝播する音響波から生じる圧力レベルなどを計算するためのシミュレーションや計算アプリを作成することでした。

彼らは、事業ニーズと要求を満たすことを確実に実行するために、ABB 変圧器事業部と密接に連携し、変圧器分野の著名な専門家 Christoph Ploetner 博士の経験と専門性に信頼を寄せました。

あるシミュレーションでは、磁気歪みによるコアから発生するノイズをモデル化しています。このチームは、最初に交流電流によって引きおこされる磁場を予測するために電磁気モデルを作成し、次に、スチール内の磁気歪みをモデル化しました。

彼らのジオメトリ設定には、スチール製コア、巻線、タンクとして表現される外部領域が組み込まれました。「私たちは、磁気歪みから生じる変位を得ることができたので、モーダル解析を使用して異なる周波数で共振音を計算しました (図 4 参照)。共振音は、磁気歪みから簡単に励起され、それぞれの周波数帯で高い振動の増幅を引き起こしました。」と Kavasoglu 氏は述べました。

その結果、彼らは、オイルを通過する音波を予測し、タンクに生じる振動を計

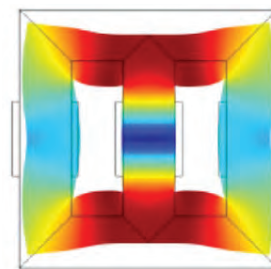
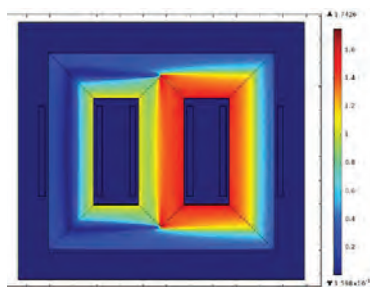


図 4. 左：スチール状の磁束レベルを示す COMSOL ソフトウェアでの結果。右：中心部の共振を示す結果。見やすくするためにデフォルメされている。

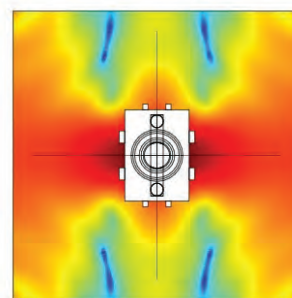
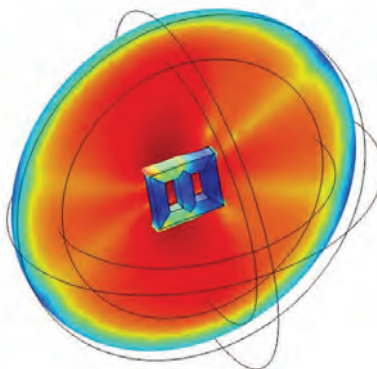


図 5. 中心部周辺 (左) と変圧器周辺の音圧領域を示す音響解析結果。

算することができ、周囲の環境への音の放射を示す事ができました (図 5 参照)。

彼らはまた、負荷雑音の原因となるコイル巻線の変位をシミュレーションし、その音場によりタンク壁面上にかかる表面圧力を測定しました (図 6 参照)。

パラメトリック・スタディを追加することで、設計パラメータ (例えばタンク厚や材料物性) と変圧器ハム音との複雑な関係性を図解でき、ジオメトリの調整と、コア、巻線それにタンク設定が決まり、ノイズ最小化が可能になります。

ABB 全社に拡大するシミュレーション機能

CRC チームは、彼らの理解やモデル化を向上させるためだけでなく、得られた知識を ABB 社の設計者や事業部の全

ての人に広めるために COMSOL ソフトウェアを使用し続けています。COMSOL Multiphysics® の Application Builder を使用して、彼らは自分たちのマルチフィジックス・モデルからアプリを作成できるようになりました。このアプリは、各部門の必要に応じて簡単にカスタマイズできます。

これらのシミュレーション・アプリケーションにより、設計者や研究開発技術者の検査や検証は単純化されます。「設計者は統計と経験則モデルを基にしたツールを使用してきました。私たちはシミュレーション・アプリを展開し、そのギャップを埋めています。Application Builder を使用すれば、有限要素理論を学ばずともユーザー・インターフェースを通じて有限要素解析を利用することができます。」と Haettel 博士は説明しました。

またとあるアプリケーション (図 7 参照) では、変圧器コアの特定の固有周波数を算出し、それがノイズに関連する不具合を引き起こし、その結果周波数が可聴域まで落とされることが示されます。こ

「私たちは、自分たちのアプリを検査用として他の研究室にも提供するため、COMSOL Server™ライセンスもまた使用してきました。これによりアプリをシェアして使うことが簡単に可能となります。このワールドワイド向けライセンスは素晴らしい。グローバル企業において、世界中の様々な地域の支社のユーザーが、これらのアプリから便益が得られることを私たちは期待しています。」

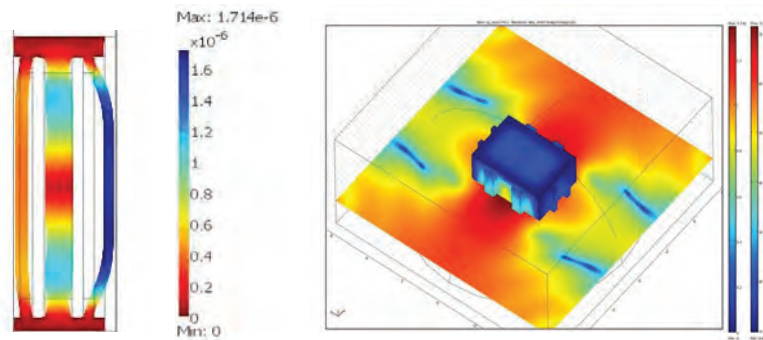


図 6. 左：巻線の変位を示すシミュレーション結果。見やすさのためにデフォルメされている。右：タンク外側の音圧レベルとタンク壁の変位を示す結果。

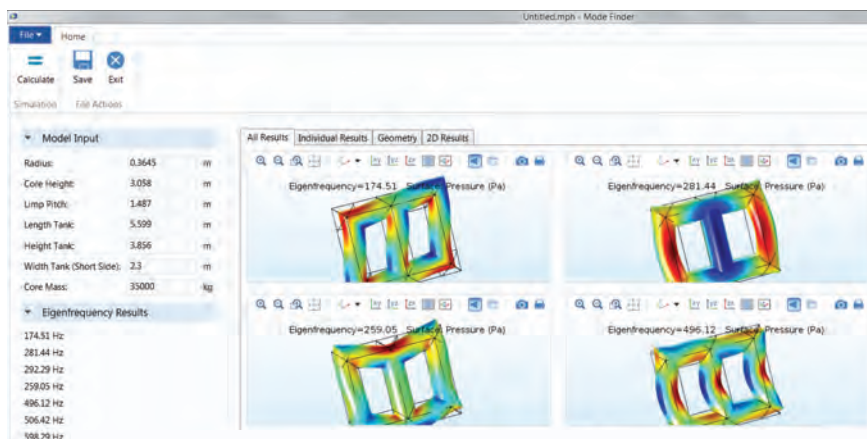


図 7. 変圧器の中心部の固有振動数を計算するために作成された最初のシミュレーション・アプリで得られた画面。左側では、このアプリのタブがモデル入力を示し、右側の結果は計算された固有振動数を示している。

のアプリケーションには、COMSOL ソフトウェアで開発された物理モデルおよび、Application Builder の内部でプログラミングを行った Java コードで記述されたカスタムメソッドの両方が含まれています。

「私たちの設計者は、彼らが頻繁に作成した、変圧器向けの標準スプレッドシートを使用します。しかし新しい設計や異なる寸法の変圧器が導入された時には、このアプローチでは問題に直面するでしょう。例えば、『正確な騒音レベルが求められません。』というエラーが表示されるかもしれません。また従来の方では、ノイズ低減のために追加計測が必要になった場合には、非常に高い追加費用がかかるでしょう。」Haettel 博士は続けて述べました。

「費用的なこの側面に加えて、時間的な側面もあります。この新しいアプリによって、設計者の業務はより簡略化され、

より効率化されます。それは、精緻な有限要素解析コードが使用されているためです。」

このカスタムアプリケーションは、ジオメトリと材料特性それにその他の設計パラメータの組み合わせが、どのように変圧器ハム音に影響を及ぼすかをユーザーに確認できるようにするため、利便性のレベルが一段と向上します。「私たちはどのパラメータをユーザーへ公開するかを選択について、慎重に検討してきました。その際には、パラメータの重要性について焦点を絞りました。」Kavasoglu 博士は付け加えました。

ABB 社が変圧器を設計するために活用する幅広い産業用途ではこの柔軟性が、設計工程および仮想検査工程において極めて有用です。「ABB 社は、それぞれの産業分野の必要に応じて変圧器を製造しています。現在、私たちは、市街地

全体に送電および配電を行っている電力会社が一般的に使用する大型交流電流変圧器に重点を置いています。」と述べました。

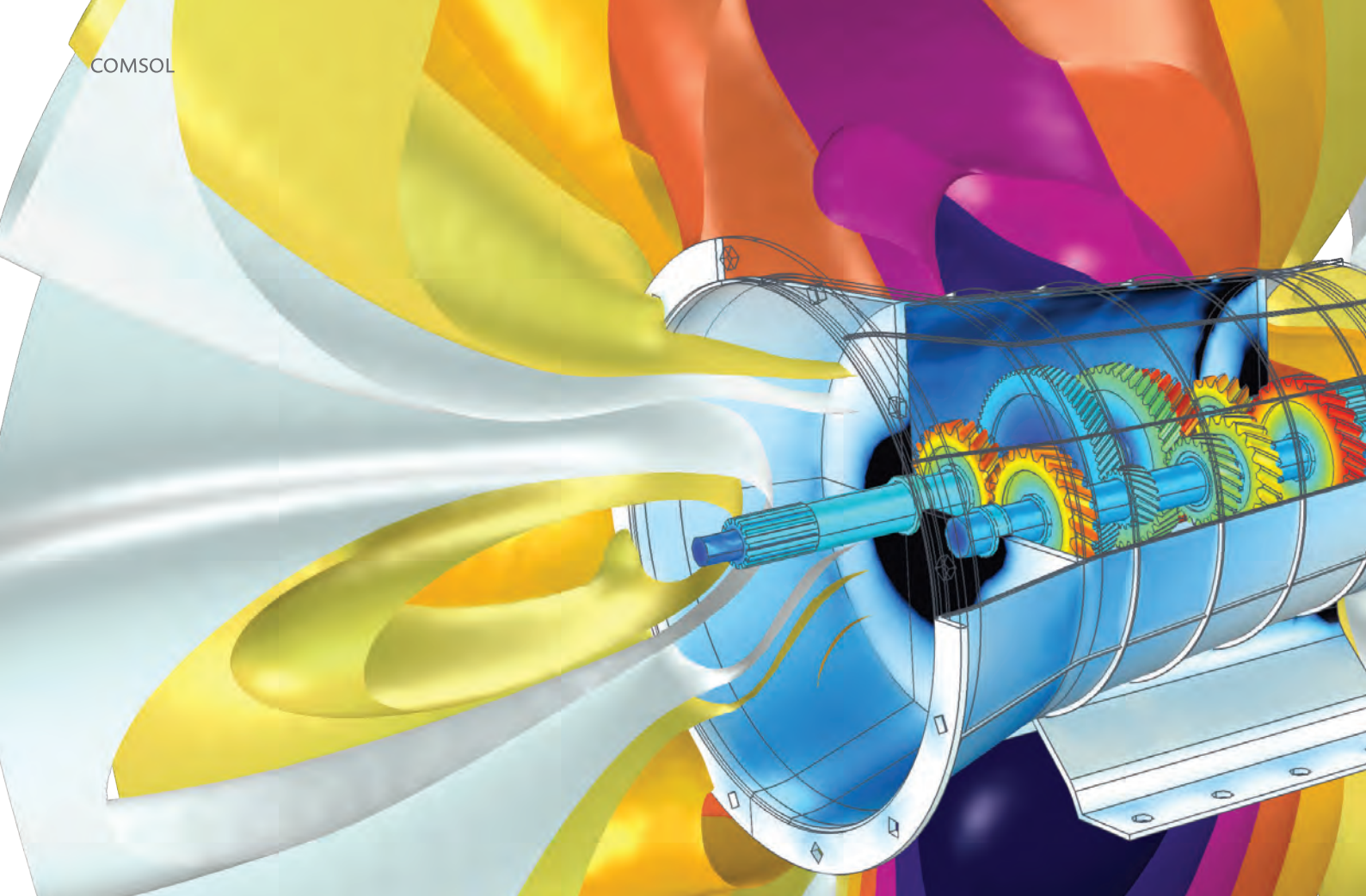
「しかし、私たちが行っている研究は、他のタイプの変圧器にも転用できるものであり、もちろん、特定の要求があれば、アプリをそのニーズに対応させることも可能です。このことで私たちは容易に機能追加開発を行うことができます。Application Builder を使うことで、知識と技術を極めて簡単に移転することができました。」

「また私たちは、自分たちのアプリを検査用として他の研究室にも提供するため、COMSOL Server™ライセンスもまた使用してきました。これによりアプリをシェアして使うことが簡単に可能となります。このワールドワイド向けライセンスは素晴らしい。グローバル企業において、世界中の様々な地域の支社のユーザーが、これらのアプリから便益が得られることを私たちは期待しています。」COMSOL Server™を自社に導入することにより、シミュレーションの専門家は自分たちでアプリを管理、配備することができ、COMSOL Client またはウェブブラウザを通して、アプリが利用可能となります。

このチームは、負荷ノイズを算出する 2 個目のアプリケーションの開発に注力しています。このアプリケーションが事業部門で開発されれば、面倒な計算の負担が大きく取り除かれ、設計者やセールスエンジニアは、詳細モデルで作業する必要なく、仮想実験を行うことができるようになります。ABB 社は素早く簡単に、世界最高の変圧器を製造することが可能となるでしょう。❖



左から右へ：ABB CRC の Mustafa Kavasoglu 氏, Romain Haettel 博士, Anders Daneryd 博士



ギヤボックス内の振動およびノイズのモデリング

ギヤボックスなどの動的システムから放射するノイズを予測することは、設計の初期段階で技術者に洞察を与えてくれます。

執筆者 **PAWAN SOAMI** 氏

エンジンの動力を車輪に伝達するギヤボックスは、2つの理由で騒音を放射します。まず、片方のシャフトからギヤを介してもう片方のシャフトへ動力が伝達される際、ギヤからベアリングやハウジングに対し、垂直方向および軸方向に余計な力が加わります。第2の理由として、ギヤボックス内のベアリング、ハウジングなどの各部品には一定の柔軟性があるため、振動を発生させる可能性があります。

ギヤボックスでは、ギヤメッシュを構成する各々のギヤの剛性が異なることにより持続的な振動が発生し、この振動がハウジングに伝わり、さらにギヤボックスの潤滑油など周囲の流体を振動させると同

時にエネルギーを伝達します。その結果、音波が放射されます。この連成現象を正確にモデリングして、シミュレーションを行うには接触解析、マルチボディダイナミクス解析、および音響解析を行う必要があります。本解析で対象となっているギヤボックスは、ドライブシャフトがカウンターシャフトに接続されており、5対のヘリカルギヤから構成されているものとします（図1）。ギヤのサイズは各々で異なりますが、材料は同じ構造用鋼製です。

ギヤメッシュの接触解析

ギヤメッシュは弾性体と見なすことができ、これが持続的な振動の源になっています。そのため、ギヤの各部で剛性を計

算する必要があります。運転中のギヤの歯は変形するため、静的なパラメトリック解析を実行して、ギヤメッシュの1サイクルを通じた剛性の変化を明確にする必要があります。ペナルティ接触法を用い拘束を定義して、接触力につながるようなギヤの捻れを表現しました。

ギヤ対におけるフォンミーゼス応力の分布のシミュレーション結果は、接触点および歯の付け根において高い応力を示しました（図2）。図2に示すように、シミュレーションを用いればシャフトの回転に伴いギヤメッシュの剛性が変化する様子を確認することができます。

シャフト、ギヤ、およびハウジングのマルチボディダイナミクス解析

接触解析によって予測されたギヤメッシュの剛性を用い、ドライブシャフトの一回転分について、時間領域でのマルチボディダイナミクス解析を行いました。この解析は、ギヤの動力学およびその結果としてのハウジングの振動を計算するために必要です。図2の事例では、エンジン回転数 5,000 RPM、出力トルク 2,000 N・m の条件下で解析を行いました。ギヤメッシュ以外のシャフトおよびギヤは剛体

と仮定します。ギヤメッシュについては、前述の接触解析に基づいて剛性を決定しました。ハウジングは構造用鋼製の弾性体と仮定しています。

ドライブシャフトおよびカウンタシャフトによって伝達される力によるハウジング内のフォンミーゼス応力の分布を図3に示します。さらに、ノイズ放射の原因である振動するハウジングの鉛直方向の加速度も図3に示します。

図4は、ハウジングの頂点における鉛直方向の加速度の時間履歴および周波数スペクトルを示します。ハウジングが振動をしている支配的な周波数帯は 1500 Hz ~ 2000 Hz であることが分かります。ハウジングの変形を図5に示します。

ハウジングから放射されるノイズの音響解析

ハウジングで実際に体験され、マルチボディダイナミクス解析で予測される鉛直方向の加速は、音響解析を行う際にノイズ源として用いられます。シミュレーションは周波数領域で実行され、ギヤボックス外の音圧レベルを予測します。鉛直方向の加速は時間領域の値なので、前方FFT（高速フーリエ変換）を用いて周波数領域に変換されます。音圧の計算は、一つの大気領域がギヤボックスを包み込むようにして行われます（図6）。計算の精度を落とすことなく計算領域のサイズを削減するため、大気領域の外側の境界に球面波放射の条件を適用し、音響波がモデルの領域から外に出て行く際の反射

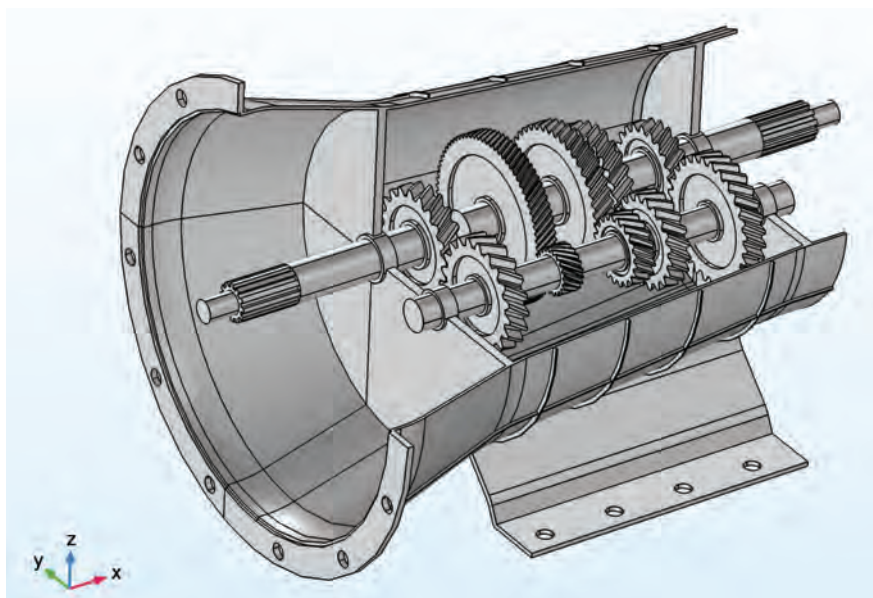


図1. マニュアル変速車の5速シンクロメッシュ型ギヤボックスのモデル形状。ギヤボックスの部品のうち、マルチボディダイナミクス解析で計算の対象となる部品だけが抽出されています。

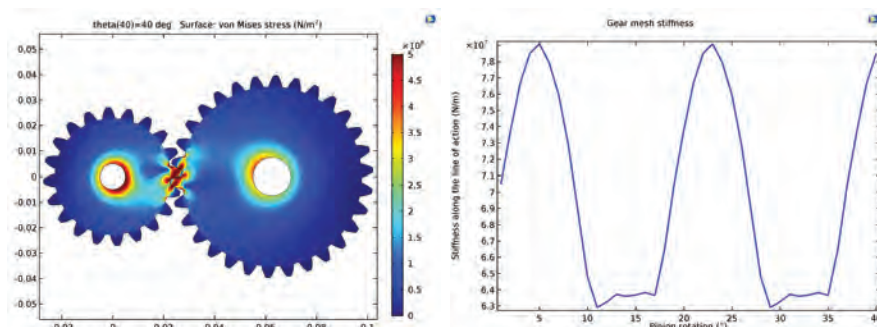


図2. 左：一对のギヤにおけるフォンミーゼス応力の分布。右：シャフトの回転に伴うギヤメッシュの剛性の変化。

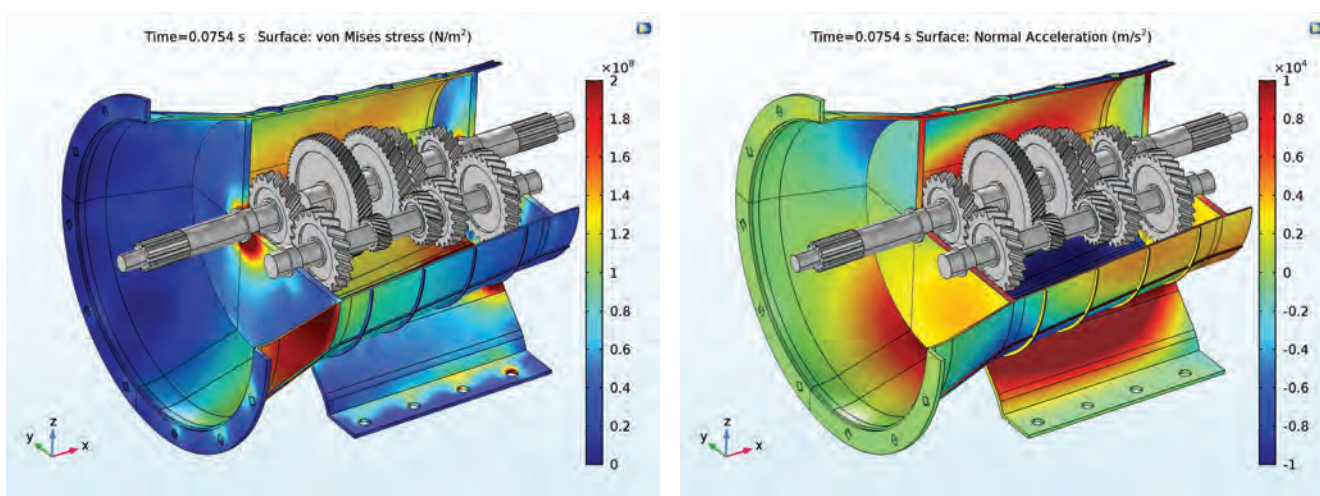


図3. 左：ハウジング内のフォンミーゼス応力の分布。右：ハウジングの鉛直方向の加速。

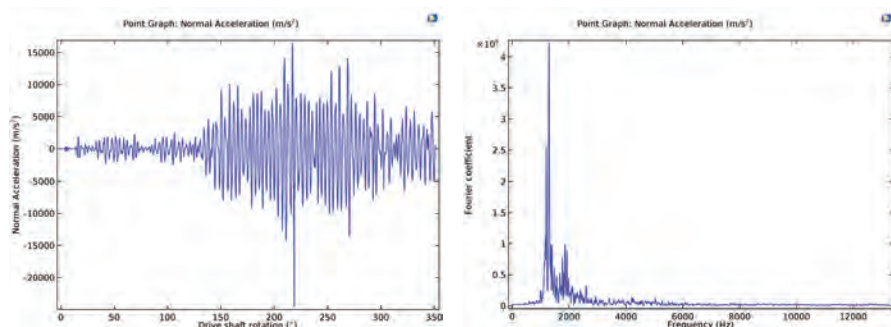


図 4. ハウジングの最上部における鉛直方向の加速。左：時間履歴。右：周波数スペクトル。

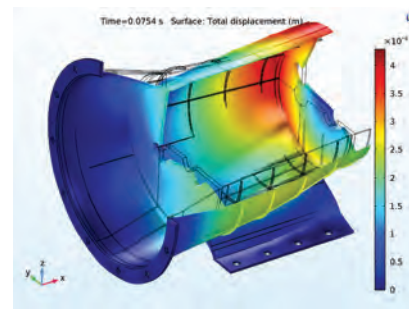


図 5. ハウジングの変形（倍率 200 倍）。

が最小になるようにしています。

ハウジング上および近接場での音圧レベル（SPL: Sound Pressure Level）を図 7 に示します。図 8 に示すように、遠距離場においても SPL をプロットすることができます。さまざまな曲面についての遠距離場のプロットや距離 1m における値から、ノイズが主に放射される方向についておよそその見当をつけることができます。

まとめ

マルチボディダイナミクス - 音響学相互作用モデリングの手法を用いて、発生する振動およびノイズのシミュレーションを行いました。この手法は、ギヤボックス設計の初期段階で用いることができるため、さまざまな運転環境で騒音の発生が最小化するように設計を改善することが可能になります。❖

参考

- Using Software For Gearbox Noise Prediction, Auto Tech Review（2017 年 6 月）
- How to Model Gearbox Vibration and Noise in COMSOL Multiphysics®, COMSOL Blog
- Modeling Vibration and Noise in a Gearbox（COMSOL アプリケーションギャラリー）

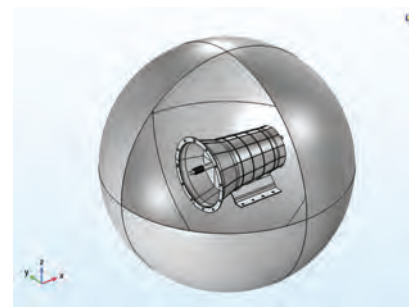


図 6. 音響解析で用いた、ギヤボックスを包み込む空気領域。

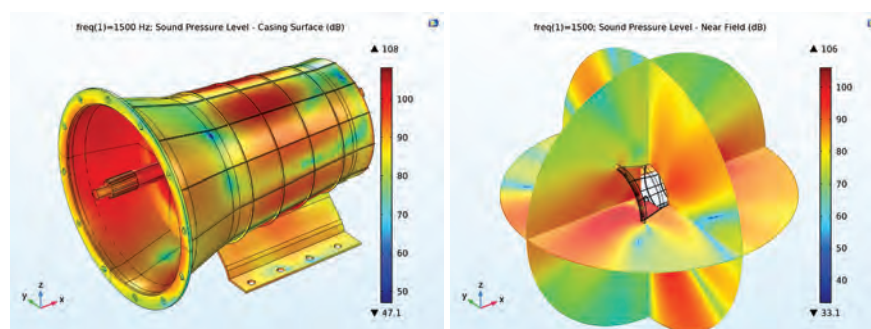


図 7. 1,500Hz における音圧レベル。左：ハウジングの表面。右：近接場の領域。

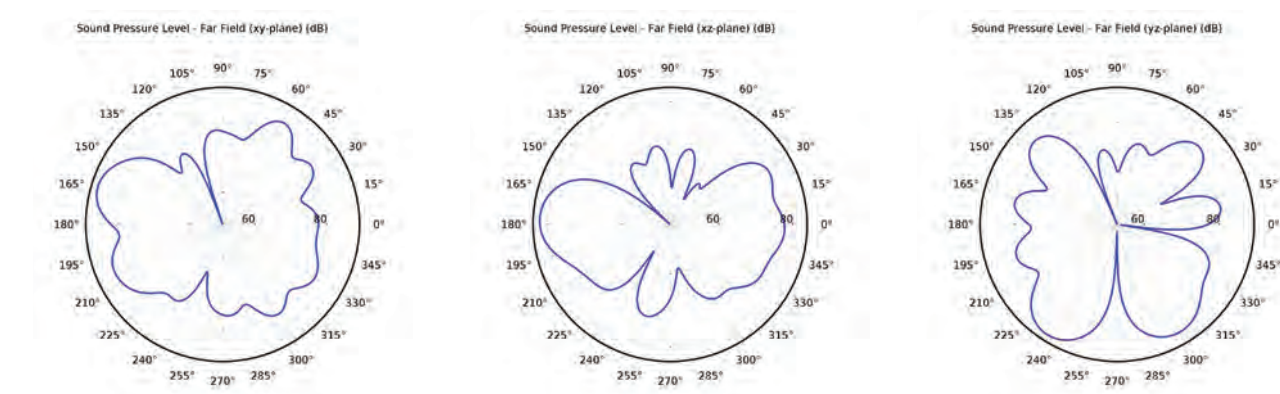


図 8. それぞれの遠距離場における距離 1m、1,500Hz での x-y、x-z、および y-z 平面の SPL（dB）。

音を操作し制御する：数学モデルによってサポートされる最先端の音響メタマテリアル研究

民生用オーディオから超音波画像診断にいたるまで、音響クロージングのメタマテリアル構造の研究は深遠で、驚きに満ちています。研究者は数学モデルを用いることにより、変換音響学と高異方性構造体を組み合わせて音響メタマテリアルを設計しています。

執筆者 **GEMMA CHURCH AND VALERIO MARRA** 氏

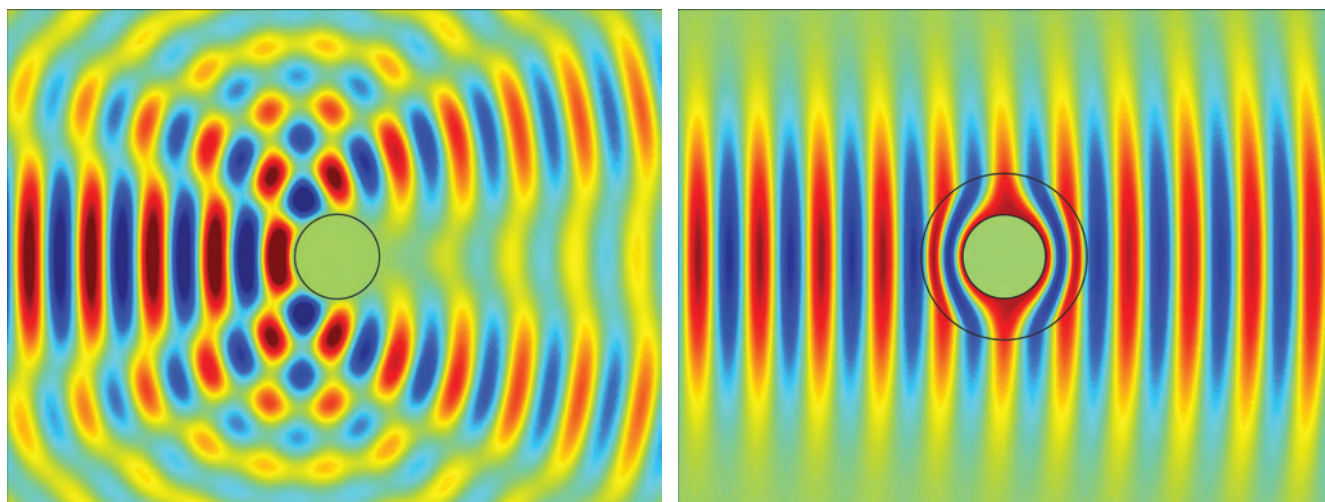


図 1. 物体からの散乱する音響波の制御。左：剛体の左側から物体にあたった波が散乱しているのは明白です。反射は準鏡面的で影は濃く、波の力の一部は全方向に拡散しています。右：同じ物体を理想的なクロージングシェルで囲んだ場合、反射も影も発生せず、波の力は仮想的に無損失でこのメタマテリアル物体の周りを素通りして伝達されています。

メタマテリアルとは、屈折率ゼロや場合によっては負の値の屈折率を持つなど、自然には未だかつて存在したことがない特性を特殊加工によって付与された人工材料を指します。その結果、スーパーレンズや吸音材など、最先端の設計や機能性が得られています。最新の研究では、メタマテリアル装置を用いて音波を自由に操作する技術に注目が集まっています。これには物体を音響的に不可視にする技術なども含まれます。

研究は今のところ成功を収めています。プラスチック製の穿孔シート数枚と、膨大な量の数学的モデリングならびに数値シミュレーションによって、Duke 大学の技術者は世界で初めて 3 次元音響クロージングが可能であることを実証しました。このデバイスは物体の周囲でなめらかに音波を湾曲させ、さらに影になる部分を埋めることにより、あたかも音波が周囲の空气中をまっすぐに通過したかのような印象を与えます。

音響的透明性は変換音響学の一つの側面に過ぎません。変換音響学では、材料を巧妙に設計することにより、音波をほぼ任意に変形させたり制御することが可能です。SF の世界から日常生活まで、この技術的ブレイクスルーには多くの応用の可能性が秘められています。

無音メタマテリアルの設計

Duke 大学は、MIT、California 大学 Berkeley 校、Rutgers 大学、Austin の Texas 大学と共同で、米海軍研究局が資金を拠出し、実社会で製造可能な効率的な材料パラメータを有する音響メタマテリアルの新コンセプトを開発することを目的とした 5 年研究プログラムに参画しています。Duke 大学で電気およびコンピューター技術部門の教授を務める Steve Cummer 氏は次のように言います。「数学モデルは開始点に過ぎません。音響メタマテリアルの設計は、数値シミュレーションを通じて最適化されたのち、現代の加工技術および試作試験に落とし

「COMSOL は、とても簡単な操作により、比較的単純に、材料特性およびその根底にある動力学方程式を操作できます。」

— DUKE 大学 電気・コンピュータ工学部 STEVE CUMMER

込まれます。

研究グループの現在の研究活動のフォーカスの一つは、人体を含め、水をベースにした環境で使用でき、向かってくる音波を任意に変換し、制御することができる音響メタマテリアル構造の開発です。変換音響学によって音波を任意に制御できることを実証する上で、音響クロージング構造(図1)が有用なテストベッドであることが実証されました。水性環境での設計は、クロージングおよび変換光学 (Transformation Optics) から進出し、空気中の 2D 構造の音響クロージン

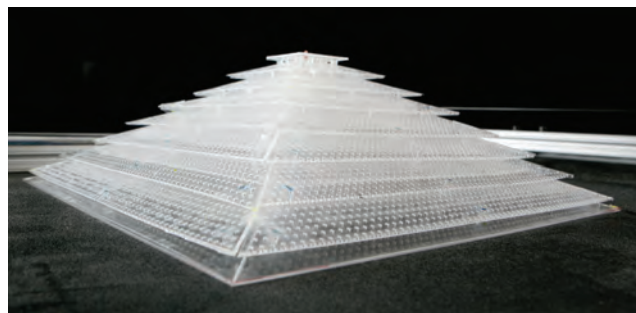
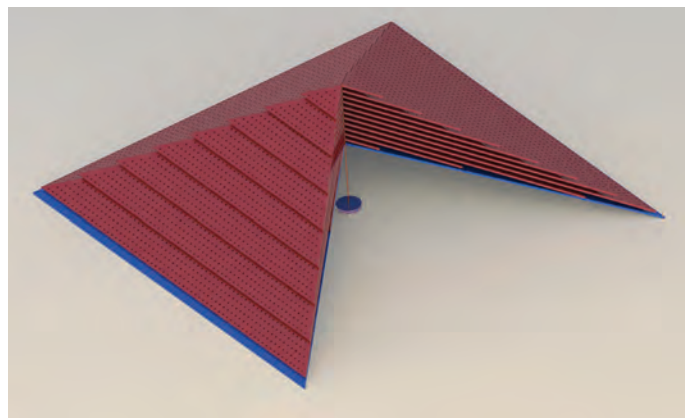


図 2. ピラミッド型 3D 音響クロウキングシェル設計（左）および構築されたバージョン（右）。

グおよび変換へ、さらに 3D 構造へと進化を続けるメタマテリアル研究の推移を象徴しています。

電磁クロウキング研究の極めて初期の段階まで遡って、COMSOL Multiphysics® ソフトウェアは研究のあらゆる段階で重要な役割を担ってきました。Cummer 氏は次のように言います。「我々の最初の論文では、実際の電磁材料のパラメータを用いて電磁気的なクロウキングのシミュレーションを行いました、その際に特に COMSOL® ソフトウェアを使用したのは、異方性電磁材料のパラメータを任意に設定できる当時としては数少ない電磁気学対応ソフトウェアツールの一つだったからです。」

音響の問題を取り扱うために、研究者は必要な材料の特性を計算するところから作業に着手しました。Cummer 氏は次のように説明します。「変換音響学を用いて音を任意に制御するには、まず特定の装置内でどのように音場を曲げたり、ねじったり、変形させたいのかを、座標変換を適用することによって記述する必要があります。この座標変換が定義されたのち、音場の特定の变形を作成するために必要となる効果的な材料パラメータを導くことができます。」

ほとんどの場合これら一連の材料パラメータは異方性で、材料特性が方向によって異なる挙動を呈することになります。これを取り扱うために、研究者はシミュレーション対象の物理現象を表す方程式を変更できる必要があります。「COMSOL は、とても簡単な操作により、比較的に単純に、材料特性およびその根底にある動力学方程式を操作できます。このことは極めて重要でした。何故ならモデルにあとほんの一ひねり、すなわち異方性と

いう要素を追加できることで、変換音響学的手法の中で模索していた一部の設計についてもシミュレーションを行えるようになったからです。」Cummer 氏はこう付け加えました。

その成果から得られた現実世界の設計は大きな成功を収め、Cummer 氏によればその性能はシミュレーション結果に「驚異的によく」合致していました。「近年、メタマテリアル関連の出版物では、構造物が希望通りに機能し意図した通りの物理現象を再現してくれるかどうかを確認する方法の定番として、音響メタマテリアルによって生成される音場全体の測定を行い、測定結果をシミュレーションと比較する手法が紹介されています。」彼はこう付け加えました。

COMSOL Multiphysics® ソフトウェアは、ヒューマンエラーにより研究が脱線

しそうになったときでさえも、安定的に測定結果に一致する計算結果を出力し続けてくれます。ある初期段階のプロジェクトにおいて、2D 音響クロウキングシェルに多数の微細孔を開けたモデルを設計、構築したのですが、実験結果がシミュレーションと一致しませんでした。不一致の理由がどこにあるのかまったく分からず、研究チームは困惑しました。そこではたと気づきました。制作時のちょっとした混同が原因で、構造に間違ったサイズの孔を開けてしまっていたのです。

Cummer 氏は言います。「COMSOL の効率の良さは我々の作業においてかなり

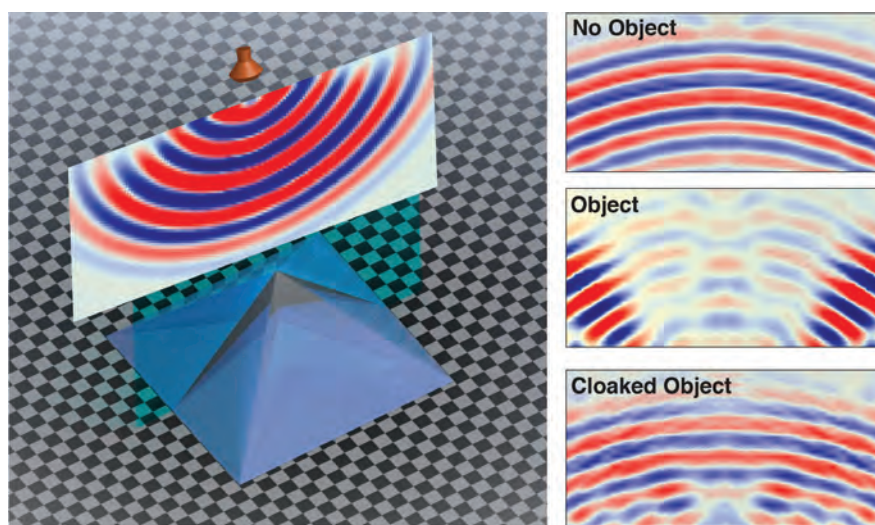


図 3. (左) メタマテリアルシェルのテストを行うため、個別の 3 つの構成でパルス音が打ち出され、走査マイクを用いて反射音が計測されました。(右) テスト用の物体で反射した音響パルスは、物体が置かれていない場合とは劇的に異なります。物体の上にクロウキングシェルを配置すると、反射されるパルス音は物体が無い場合とほとんど見分けがつかなくなり、音に対する不可聴性が示されます。

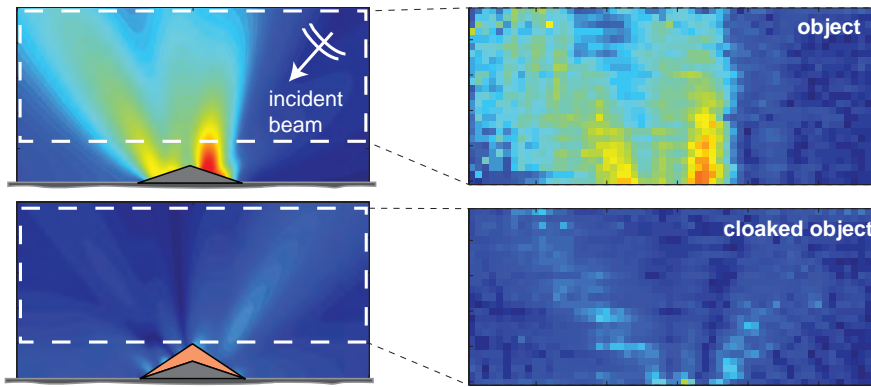


図 4. 散乱した音場は、シミュレーション（左）と測定値（右）で良好な一致を見せていますが、それらは物体の音響クロウキングの効果を示しているだけでなく、制作された装置の性能が COMSOL によって正確に予測されていることをここから確認できます。

重要な鍵を握っていました。何故なら、理想化したパラメータを設定した場合と、実際に構築する物理モデルと同じ完全な構造体のパラメータを用いた場合、両方の数値シミュレーションを行い、両者が同じ挙動を示すことを確認できたからです。」

音響メタマテリアルの加工およびテスト

3D 音響クロウキングシェルの設計では、同じ基礎的なピラミッド型の穿孔プレート構造が用いられ（図 2）、この下に物体を置いて音波から遮蔽することができました。一見すると、この構造は比較的単純な設計に見えますが、希望する音響変換が得られるよう孔の直径、プレートの間隔、プレートの角度など、数多くの因子のバランスが考慮されています。これらすべてのパラメータが組み合わされることにより、構造が機能するためにちょうど必要な量の音響異方性の実現されます。

このピラミッド型構造は世界初の 3D 音響クロウキングでした。音波の経路を変化させることにより、クロウキング自体も下にある任意の物体も、まるで存在しないかのような印象を与えることが、研究室における計測によって確認されました（図 3）。装置はどの方向に対しても機能し、どの方向から来る音に対しても、そして観測者がどこにいても関係なく威力を発揮しました。このように、将来的にソナー回避や、建築物の音響などに適用される潜在的な可能性があることが証明されました。

音響メタマテリアルシェルに必要となる

厚さを考えると、恐らく後者への応用の方が有望でしょう。このような音響クロウキング装置はコンサートホール内の音の最適化に用いたり、雑音の多いレストランなどの環境で消音に用いるなどの応用が考えられます。Cummer 氏は言います。「クロウキング材料は魔法のスプレー缶塗料ではありません。一般論として、このアイディアは、そんなに単純に現実世界に導入できるタイプのものではないのです。」

設計段階を終えたのち、このようなメタマテリアルシェルの定量的な性能を予測するため、2D クロウキングシェルの実装からの散逸の詳細な解析を含め、モデリングやシミュレーションが使用されました（図 4）。これは、シェルによってどれほどの散逸場が削減されるかを示すだけでなく、音響メタマテリアルの加工において設計上のトレードオフを行うことを前提に、COMSOL は散乱の減少量を正確に予測できることを示しています。

空気から水へ、異なる媒体、新たな挑戦

現在、水中や体内など水性環境で音響メタマテリアルを動作させる方向へ、研究者の関心は移行しています。第一の設計ツールとしてマルチフィジックスモデリングを用い、まず以前に設計した構造体をマッピングしてシミュレーションを実行し、それらが水中でどのような挙動を示すか確認を行います。空気中から水中への移行は、見た目ほど単純ではありません。

空気と水では力学特性が全く異なるという点が問題になります。Cummer 氏は次のように説明します。「だからこそ、空

気中ではプラスチック製の音響メタマテリアルを構築するだけで済んでいたのです。他に都合がよい固体材料がある場合はプラスチック以外でも構いませんでした。固体が必然的に完全な剛体構造として振る舞い、音場の流れを制御してくれるからです。何を材料に使うかは、さほど重要ではありません。」

しかし、水の質量密度および圧縮剛性は、固体材料とそう大きくは変わりません。「音波が水中の固体構造にぶつかる場合は、固体の力学特性が大きな意味を持ち始めます。希望する特性を維持するため、新たな手法を考案して、この音波のエネルギーが固体と相互作用するかを設計段階で制御する必要があります。」彼はこう付け加えました。

「特に水中の構造を扱う場合は、メタマテリアルの構築に用いる固体材料の力学的応答を無視できないため、音響学と構造的力学を簡単に融合させる能力が不可欠です。空気中の音響学では、固体を無限に剛性の高い材料として扱うことができたが、材料が水中にある場合は流体 - 構造間の相互作用を考慮することが不可欠です。COMSOL はこれを簡単に扱うことができます。」

研究段階から商業利用に耐えうる音響メタマテリアル構築物への移行は間違っても簡単とは言えず、構築物の製造に際し、信頼性、再現性が確保されている必要があります。Cummer 氏は次のように締めくくりました。「任意の音響メタマテリアルの作成を目指す道のりにおける次のステップは、特定の定量的指標に合致させることです。それは設計工程がより複雑になることを意味していますが、まさにそれこそが COMSOL の本来の役割です。最適化を上手に用いて設計に含まれる操作可能な自由度を理解し、それらについて特定の数値目標に到達するため、設計に対しはるかに多くの回数の変動を試す必要が生じます。これが、概念実証としてのデモンストレーションから実用的かつ現実世界に導入可能なものへと、これらのアイディアを移行させる上で、今後の鍵を握っていることは確実です。



振動、騒音、そして轟音

ノルウェーの研究者たちは、不快な振動緩和に役立つデザインの推奨を行うため、低周波音波が構造物内部をどのように移動しているのか、研究をすすめています。

執筆者 **JENNIFER HAND** 氏

空港の近隣に宿泊したことがある人は誰でもその驚きを経験したことがあるでしょう – 早朝に飛行機によって起こされる、それは単にエンジン音がうるさい、というだけではなく、まるで身の回りの物すべてが揺り動かされているかのような大きな振動により起こされる感覚です。同様に、風車、軍用施設、ヘリポートが設置されている病院の近隣住民たちはしばしば、外部で発生するノイズによるガタガタという窓揺れや、あらゆる物の騒音に毎日悩まされていることを訴えています。住民の方たちをさらに困らせていることは、音を認識できない時でさえもイライラする振動を感じてしまうということです。

もし音響の反応が秒速 20 振動 (20 Hz) もしくはそれ以下であれば、それはインフラサウンドと表現され、通常人間の耳には音として認識されないに音なります。しかし、その影響は大変簡単に検知可能です。音波が窓に当たると床に伝搬し、内部の壁に作用し、そして簡単に気づくことが出来る室内の振動を誘発します。低周波音波は不快な障害を作り出す可能性があり、悪名高い存在です。

ビル内での低周波音波

騒音は現代生活では当たり前存在するものになっており、人に対する感度、侵入そして危険のレベルでの、高周波音波を認識するための音圧レベルを測定する正式な基準があります。Norwegian Geotechnical Institute (NGI) 社の Finn Løvholt 氏によると、インフラサウンドによるビルの振動は、まだ広範囲にわたって研究されていない分野の 1 つです。そのため、地球科学のコンサルティングおよび研究に携わる国際センターである NGI は、Norwegian Defence Estate Agency の代理としてここ数年間、調査を続けています。

“空気中では、高周波音よりも低周波音の吸収が少ないため、長距離を進むことができます。ビルの外部からビルの内部への音の伝搬はさらに顕著なものになります。私たちは、可聴値で一体何が起きているのか、大変興味を持ちました” と Løvholt 氏は説

“モデルと実際の検査結果とがここまでの高レベルで合致することは今まで経験したことがありませんでした。COMSOL Multiphysics® で様々な構成要素をどのようにモデリング出来たかが重要になっています。”

—NGI, FINN LØVHOLT 氏

明しました。“私たちは、外部からの音がどのようにビルに作用し、人々が感知する振動をどのように作り出すのかを理解したいと思います。それにより、私たちは振動を防ぐ対策の助言や、人々を不快にする要因を考慮する必要性を認識し標準的な値の策定を提案することができるかもしれません。”

音波の広がりシミュレーション

Løvholt 氏と彼の同僚たちはコンピュータモデルの作成を決めました。そして、低周波音波がビルに衝突し、浸透していくメカニズムを細かくひも解くことを実現しました。彼らは COMSOL Multiphysics® ソフトウェアを使用して、ラボの実験設定と厳密に酷似された、壁で分離された木造建造物の 2 つの部屋をシミュレーションしました (図 1 上 参照)。モデル内では大音量のスピーカーを 1 つの部屋に設置し、もう 1 つの部屋にはマイクを設置しました。そして音圧レベルと振動をモニターするために建造物の周りに様々なプローブを設置しました。鉄のフレーム、壁内の空気腔やスタッド、窓、合板シート、石膏ボードなどを含む全ての構成要素は注意深

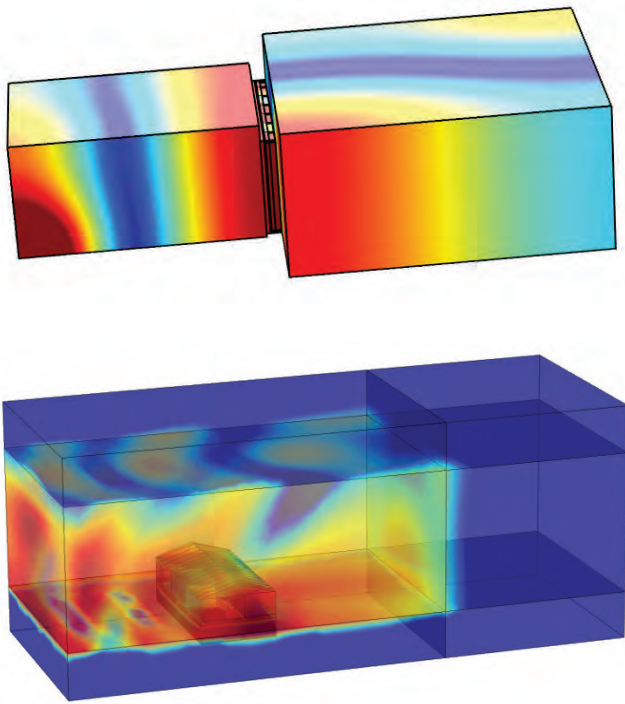


図 1. 上：音圧シミュレーションのため壁によって 2 部屋に分割された実験室。左の部屋に大音量スピーカーが設置されています。シミュレーションにより、各部屋の音響共振が遮音に影響を与えていることを示します。下：ビルの外部、四方の壁面、および内部から発生している低周波音のシミュレーション。両ケースとも、各色は壁腔と室内の音圧による変位量を示している。

くモデル化されました。“それぞれの要素は音波の波長と圧力分布に応じて共鳴します。例えば、スピーカーの部屋が高圧で、マイクの部屋が低圧の場合、壁の共鳴はその長さ、厚みそして硬さによって左右されます”と Løvholt 氏は説明します。

チームは、さらに、2 本の木材にねじを同時に締める時など、2 つの構成要素が重なったときに発生する共鳴の複合構成についても認識する必要がありました。“COMSOL Multiphysics® のメリットは、モニタが必要となる全てのパラメーターを入力可能にできることです。それによりフィジックスと連成することが出来、例えば屋外の音と室内の構造力学との相互関係から音響特性を分析することが出来ます。連成は双方向に機能し、それによりフィードバックを確認することが出来ます。音波により、幅広い音域と多様な共鳴が作り出されるため、連成は私たちの分析に必要不可欠なのです。モデルによりこれらの様々な事が明確になりました。”

NGI チームは、木造建造物の 2 つの部屋の低周波音の伝達のシミュレーションのデータをラボでの検査と検証しました。主に測定を実施した項目と量は定壁の動きと音圧レベルで、その結果は COMSOL Multiphysics® のモデルと大変近い値になりました（図 2

参照）”と Løvholt 氏は説明します。“本物の壁の反応は大変明確で、モデルはその値をほぼ完璧に表示していました。これは見事な結果です。”

また、ビル内の音の伝搬は、建築構成材、部屋の規模や建物外面から入ってくる空気の漏れなどの基本モードと低周波との相互作用により左右される、ということがモデリングにより明確になりました。室内の音圧により発生する床の振動と同様、天井と壁の振動は室内低周波音の主要源です。

物理的検査より早くそしてより低価格で

“現在は低周波音と振動を予測するツールがあります”と Løvholt 氏は語ります。“私たちはそのツールを使用して、窓のラミネート加工、壁硬化のような軽減対策を検査し、設計することが出来ます。もし壁や窓の動きが少なければ音の伝達もより少なくなります。さらに、モデルは細部がシステムに与える影響も示してくれます。例えば、実際に構造の剛性全般を削減したい時、スタッドと石こうボードの間のねじの結合部分により、その対策をさらに効果的にできるのか、ということも示してくれます。”

次のステップとして、チームが実践したのは、飛行機の騒音下に建っているノルウェー国内の実際の家での大規模なフィールド検査です。その一方で、チームは引き続きモデルの開発を続けていきます。“モデルと実際の検査結果とがここまでの高レベルで合致することは今まで経験したことがありませんでした。COMSOL Multiphysics® で様々な構成要素をどのようにモデリング出来たかが重要になっています。”と Løvholt 氏は締めくくりました。“私たちはモデル内で様々なことを決定し、対策を指示することができます。物理的検査を行うよりもはるかに経費を抑えて実現出来ます。さらには、このモデルにより、ビル全体の音響伝搬や振動のシミュレーションにまで拡大発展することができでしょう。”（図 1 下部参照）❖

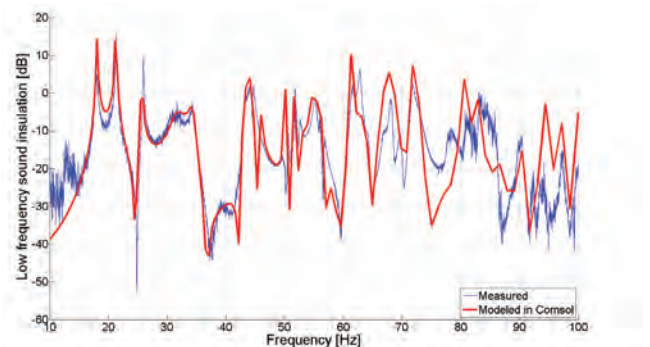


図 2. モデルでは、レベルおよび共鳴位置ともに、数デシベル以内で正確に示している。周波数の増加にともない、より小さな構造のモード数の動きが激しくなる。これは、測定値とモデル結果の差異の拡大傾向を示す。

補聴器研究の最先端

Knowles の技術者は、補聴器業界の全体を巻き込み、マルチフィジックスシミュレーションを駆使してフィードバックと戦っています。

執筆者 **GARY DAGASTINE** 氏

米国の人口の約 2 割が聴覚障害を訴えています。多くの人が耳の異常を認めながら現実を考慮すれば、実際数はさらに大きくなるでしょう。治療を受けたみなさんは、コンパクトで明瞭な補聴器のおかげで聴覚が向上し、ひいてはクオリティオブライフが改善しています。聴覚補助機器としてのプロトタイプ段階から市場に投入可能な補聴器まで開発を進めるには、研究開発への並々ならぬ努力が要求されます。

技術者は、補聴器の設計における技術的なチャレンジに日々直面しています。フィードバックは、「キーン」という高周波音または口笛のような甲高い音を発生させるメカニズムで、補聴器の増幅率を制限せざるを得なくなる非常に厄介な問題です。「通常、フィードバックは、外耳道に流された音または振動が意図せず外部に漏れ出し、補聴器のマイクがこれを拾い増幅アンプに再度送信し、好ましくない発振を起こしてしまうことによって発生します。」イリノイ州アイタスカに拠点を置く Knowles の上級電子音響技術者 Brenno Varanda 氏はこう説明します。

「Knowles の顧客の多くにとって、新しい補聴器の設計は多大なコストと時間を要する作業で、完成までに 2 ～ 6 年を要するのが一般的です。」Varanda 氏は説明します。マイクにフィードバックされるスピーカーのエネルギー量を減らすために、設計者は適切にスピーカーを選択し、防振マウントを改良し、コンポーネントをパッケージングしますが、正確なモデリングはその一助となります。この工程を加速し、より効果的な選択肢を顧客に提供するために、補聴器業界は単純なトランスデューサのモデルを渴望しています。スピーカーおよびマイクの完全なモ

デルはかなり複雑になり、フィードバック制御には無関係の因子も数多く組み込まれることになります。「弊社トランスデューサの電磁気学、力学、および音響物理を理解することは、Knowles のトランスデューサ設計者には重要ですが、弊社顧客は必ずしもそれらをすべて理解しなければならないというわけではありません。」Varanda 氏は言います。

補聴器用トランスデューサ、インテリジェントオーディオ、および特殊音響コンポーネントのグローバルリーダーであると同時に市場供給者でもある Knowles は、同業他社を交えたイニシアティブをとり、実装が容易で、聴覚障害を抱える顧客にも使いやすいトランスデューサ振動音響モデルの開発に乗り出しました。モデルは、プロトタイプ段階から最終製品へ、正確性を犠牲にすることなく、かつ効率的に補聴器の設計を進化させることを目標にしています。

補聴器の設計とフィードバック

補聴器の設計に際して、技術者は相反する 2 つの要求を満足させなければなりません。すなわちコンパクトで邪魔にならず、それでいてユーザーの聴覚の低下を補うため強力な音響出力が可能であることです。補聴器は目立たず軽量な方が、ユーザーが利用してくれる可能性は格段に高まります。これは、フィードバック問題をより一層チャレンジングな課題にしています。「フィードバックの不安定を発生させずに、詰め込むことができる最小の空間に全ハードウェアコンポーネントを詰め込んでしまうことが、設計に共通するチャレンジです。」Varanda 氏はこう続けます。

典型的な耳かけ型 (BTE: Behind-The-Ear) 補聴器は、周囲の音を電気信号に変

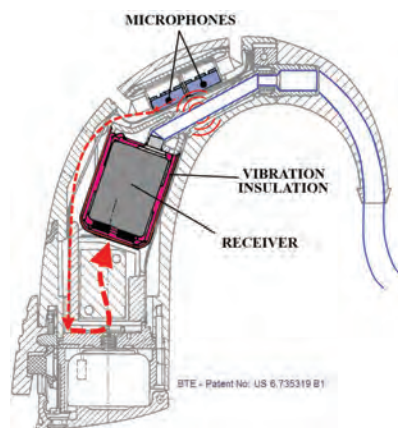


図 1. 典型的な耳かけ型 (BTE) 補聴器は、マイク、振動遮蔽部、レシーバ等によって構成されます。これらのコンポーネントが小さな空間に詰め込まれていることは、厄介な音響および機械的フィードバックを招きます。(写真提供: Knowles Corp.)

換するマイク、電気信号を処理して増幅するデジタル信号プロセッサおよびアンプ、および極小型スピーカー (別名レシーバ) から構成されます (図 1)。レシーバ (スピーカー) は増幅された電気信号を "受信" し、それらを音響エネルギーまたは音に変換して、チューブまたはイヤモールドを通して外耳道に流します。

レシーバにはリードと呼ばれる電磁制御レバーが内蔵されており、リードはダイヤフラムに接続され、ダイヤフラムはその振動動作によって音を発生させます。内部の電気機械的な力も反力を発生させますが、この振動が補聴器のパッケージを介して外部に伝わり音を発生させ、マイクによって拾われます。次にこの信号がアンプで増幅され、再度レシーバに戻され、フィードバックを発生させます。この道筋を図 1 に示します。

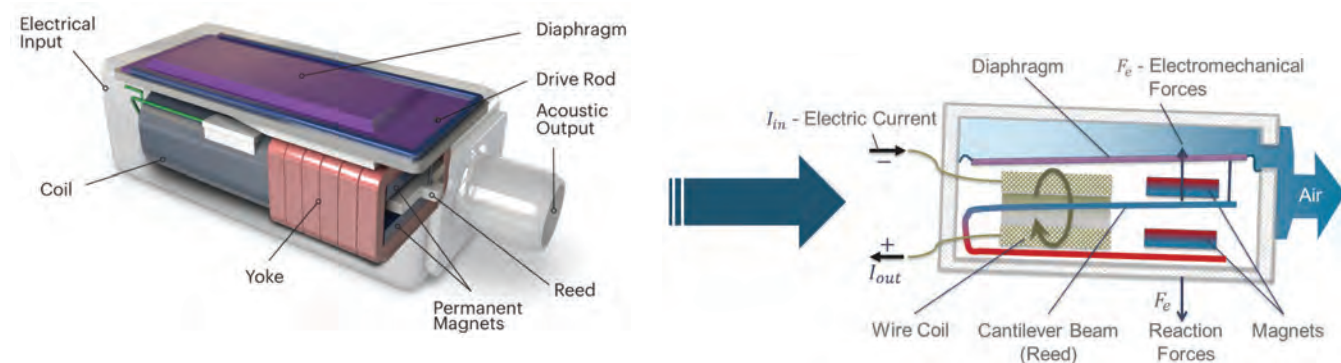


図 2. 補聴器の重要コンポーネントであるレシーバには、電磁的に制御され音を発生させるダイヤフラムが取り付けられた極小型スピーカーが内蔵されています。内部の電磁力は構造の振動を発生させ、これが機械的フィードバックにつながります。

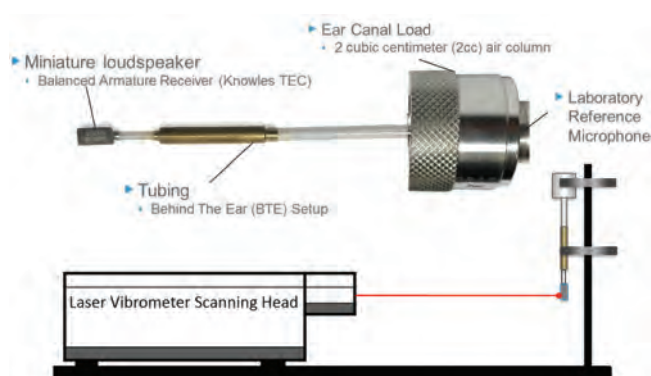


図 3. 実験に用いたハードウェアおよび概略図。

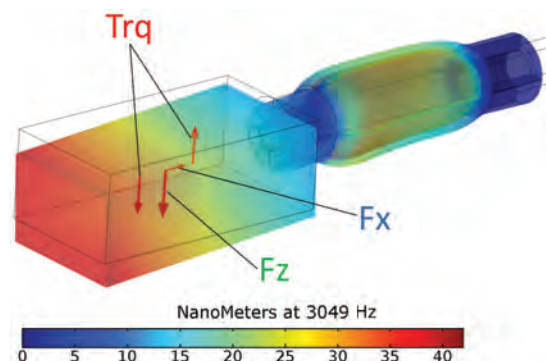


図 4. 3 kHz におけるレシーバおよびシリコンチューブアタッチメントの力および変位のシミュレーション結果。

"ブラックボックス" モデル

レシーバの唯一の機能は、アンプで増幅されたマイクからの電気信号を音に変換することです。構成は単純に見えますが、実際の処理はかなり複雑です（図 2）。電気的信号は、まず磁気的信号に変換され、次に機械的信号に変換され、最終的に音響信号に変換されます。これらの各ステップはそれぞれ独自の周波数依存特性を有します。これらの内部コンポーネントすべての複合的效果を理解することは、すべての補聴器プラットフォームに適したレシーバを効果的に設計する上で死活的に重要です。1960 年代以来、Knowles の技術者は社内の電気 - 磁気 - 機械音響的效果のモデリングのすべてを複雑な回路相当品で行ってきました。

複雑なレシーバのすべてを正確にモデリングするには、気が遠くなるほどに大規模かつ複雑なマルチフィジックス有限要素モデルが必要になり、素早く効果的に補聴器の設計を行うという目的を考えると現実的ではありません。この問題は、聴覚健康業界のレシーバおよびマイクの研究における専門家である Daniel

Warren 博士が 2013 年に導入した "ブラックボックス" モデルによって解決されました。この設計では、バランスのとれた電機子レシーバを達成するために、フィードバックの制御に重要ではない因子を除外し、電圧と出力音圧レベルの間の必要不可欠な電子音響的変換関数を捉えるために必要最小限の簡単な回路要素だけを使用します。

Warren 博士と Varanda 氏によって、モデルに最小限の複雑さを追加するだけで、単純化した電子音響回路を強力な振動音響モデルに変換することができることが示され、これがモデルの単純化の鍵を握る一歩となりました。「この変換は "ブラックボックス" 回路のセクションをプロービングすることによって実現され、ここで、インダクタ間の電圧は、構造的振動に関与する内部機械的力に正比例します。」 Warren 博士はこう説明します。

設計者は "ブラックボックス" および振動音響モデルを製品設計に使い始める前に、レシーバの現実的な音響的、機械的なアタッチメントとの比較テストを行って、妥当性を検証する必要がありました。

2014 年には、COMSOL Multiphysics® ソフトウェアおよび業界標準のテストを用いてモデルの妥当性を検証するため、Knowles と聴覚障害を抱える顧客との間に全世界的な連携が発足しました。

妥当性の検証で協力する

モデルの妥当性を検証するため、技術者は FEA で簡単にモデル化できる構造を用いて、音響出力および振動力を同時に測定する必要がありました。一般的な聴覚補助のテストと同様、このテストでは図 3 に示すとおり、レシーバを容積 2cc（立方センチメートル）の密閉された空洞に導かれたごく短い長さのチューブに接続しますが、これは外耳道への音響負荷として標準化されています。空洞内の音圧は研究室品質のマイクを用いて計測されます。

モデルの堅牢性を検証するため、レシーバに対して耳かけ型（BTE）補聴器に似た複雑なチューブ配管を用いた測定も行われました。この設計に採用された長いチューブ配管は、箇所によって管径が変化し、複数の音響的反響をサポートするのに十分な長さになっています。同

時に、音響出力が測定され、レシーバの構造的な動きがレーザー振動計を用いて捉えられました。レシーバのハウジング表面の複数の点で動きを観察することにより、並進移動と回転運動の両方が計測されました。

上述の計測を行うため、Warren 博士と Varanda 氏は Knowles の顧客数人に協力を求めました。COMSOL Multiphysics の助けを得て、彼らは単純化された振動音響回路のモデルを、上述のテスト構成のシミュレーションによる複製に実装することができました。このシミュレーションでは、"ブラックボックス" レシーバモデルにおけるレシーバの動きとシリコン製チューブアタッチメントの間の力学的な相互作用、さまざまなチューブ断面形状における熱粘性損失、内部的な電磁音響の効果を考慮した空洞およびチューブ内における音圧の負荷がカップリングされています。

COMSOL のモデルによって、出力される圧力および機械力の印加電圧、周波数、および材料特性に対する依存性が判明しました。図 4 は、シミュレーションで得られた 3 kHz における変位の分布およびレシーバにカップリングされた反力を示します。

Varanda 氏がシミュレーションの結果と物理的な計測結果を比較したところ、両者は極めて良好な一致を示しました（図 5）。ダイヤフラムおよびリードに作用する力は、出力される音圧に音響的に依存しています。ただし、構造的な反力によってダイヤフラムに働く力のカップリングは、期待通り正比例していました。

知識を拓める

Knowles は聴覚障害の問題に携わる技術者の力となり、彼らの自社システムのフィードバック関連トラブルの解決に役立つよう自社制作のモデルを共有しています。ハードウェア内での音響、機械的、電磁気的な挙動が完全に表現されているので、設計者が製品を仮想的に最適化するための準備が整っています。

「COMSOL は、集中的に "ブラックボックス" 化されたレシーバの回路に簡単に音響および固体力学をカップリングできる数少ないモデリングおよびシミュレーションツールの一つです。」Varanda 氏は言います。「これまで、補聴器の設計の検証および最適化は科学というより芸術でした。こうしたモデルのメリットを生かして、新型の補聴器が生まれてくるのを見るのがとても楽しみです。」

各社が力を結集した企業横断的努力により、聴覚健康業界の皆がメリットを享

受しています。彼は次のようにつけ加えています。「補聴器の設計者は、究極的には複雑なトランスデューサモデルの設計や、長時間を要するシミュレーションから解放されることになるでしょう。既製のトランスデューサを色々に交換し、全体が良好に動作するか確認するだけで済むようになり、設計者は自分の設計作業に専念することができるようになるでしょう。COMSOL モデルによってこれが可能になるのです。1 つの補聴器パッケージのために、何百個ものトランスデューサを簡単に比較することができるのです。」

補聴器の設計者は、従来品に比べてフィードバックを低減させ、全体的な性能向上、高速化、低価格化をもたらす能力を手に入れましたが、これにより聴力障害に悩む人々の選択肢も拡大するでしょう。❖



Brenno Varanda (Knowles 上級電子音響技術者)。

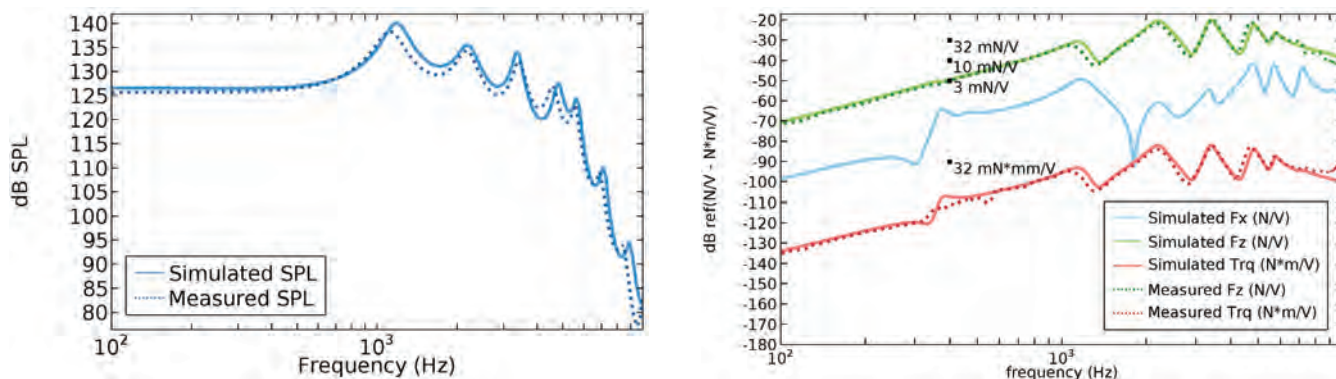


図 5. 左: 容量 2cc のカップラー内における音圧レベル — 測定値 (点線) およびシミュレーション結果 (実線)。右: レシーバに働く力とトルク — 測定値 (点線) およびシミュレーション結果 (実線)。

マルチフィジックス解析で進化する 上水道管の漏水検知

音速を予測することは、地中に埋設された水道管などの管の漏れの位置を正確に特定する上で重要です。Echologics Engineering の技術者は、管内の音響的挙動をモデリングし、状況によって異なる音速の値について予測を立てるために有限要素シミュレーションフレームワークを導入しました。

執筆者 **VALERIO MARRA** 氏

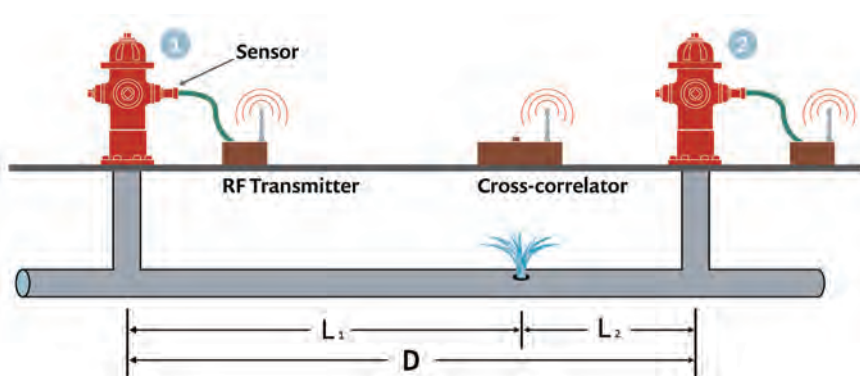


図 1. 左：調査中の漏洩の可能性がある水道管。右：漏水検出のための構成の概略図。漏洩箇所は、間隔 D をおいて設置された 2 個のセンサーの間にあります。漏水音は両方向に伝播し、コリレータは各センサーに到達するまでの所要時間を計測します。管内の音速に基づいて、正確な水漏れ位置を発見することができます。

新鮮で清潔な水道水は、自治体にとって貴重な日常品であり、地下の水道管の漏水で無駄にすることはできません。水道管インフラの老朽化に伴い、漏水の発見はさらに困難になります。水の価値が高まるにつれ、漏水の発見はさらに重要度を増します。

ここで登場するのが、Mueller Canada, Ltd. の一部門として Toronto に本拠を置き、非浸潤漏水検出の分野で独自の音響テクノロジーを誇る Echologics です。「水漏れは雑音を発生させます。」Echologics の研究開発音響研究員 Sebastien Perrier 氏は言います。Perrier 氏は音響と振動、構造のカップリング、および信号処理を専門にする機械技術者です。彼はこう言いました。「水道管は語りかけてくれます。どこに漏水が潜んでいるか、耳を澄ませば教えてくれます。」

Echologics は、水道管または消火栓に取り付けられた音響センサーと相関関数を用いて、センサーまでの音の伝達時間

を測定します。設置された 2 個のセンサーの間のどこかで漏水が発生すると、その漏水は検出され、漏水音が各センサーに到達するまでの所用時間の差を決定するために相関関数の結果が用いられます。これにより、調査対象の水道管内の音速が分かれば、漏水箇所から各センサーまでの距離が計算できます（図 1）。

水道インフラ向け音響システムの革新的リーダーとして、Echologics はこの相関関係を活用して漏水を発見し、水道管に漏水が発生しないか常時監視する技術を設計しています。Echologics の製品には、コリレータ（漏水音相関器）LeakFinderST™（図 2）、水道管監視システム EchoShore®-DX（図 3）などが含まれます。Echologics のコリレータによって、現場の専門家はトランスミッター、センサー、そしてごく一般的なノート PC 上にセットアップ可能なユーザーインターフェースを用いて、さまざまな水道管の水漏れを調査することができます。この

音響技術により、非常に小さな水漏れを形成の初期段階で検出することが可能で、漏水の成長を監視して素早く対策を採ることができるため、自治体は予算を節約し、水道管を損傷から守ることができます。

Echologics の製品を支える技術では、水道管の種類によって異なる音速について正確に理解していることが要求されます。水道管内の音速は、材料に依存し、管の剛性に比例し、管の形状に影響されます。「鍵になったのは、ポリ塩化ビニル (PVC) 製の水道管の漏れも検知可能な、高感度の技術を開発することでした。」Perrier はこう説明します。プラスチックは金属と比較して抵抗値および水分含有量が高くなります。さらに面倒なことに、古い上水道は当初は鋳鉄製の管で構築され、その後一部区間がプラスチック管で改修される場合があります。

複雑な音響相関化アルゴリズムを最新かつ正確な状態に維持することは Perrier



図 2. LeakFinderST™ コリレータはコンパクトかつ直観的な漏水音コリレータです。



図 3. EchoShore® の導入により、既存の消火栓をスマート漏水検知器に転用できます。

の管轄業務の一つでした。埋設された上水道インフラの次世代ソリューションを開発・最適化するには、関連の物理について基礎から理解している必要があります。Perrier は、設計工程を加速化し、成果を他部署と共有するために、計算的な音響モデルを作成し、これらをベースにしてシミュレーションアプリケーションを作成しています。

破損前に漏洩を検知

数値シミュレーションは、管内での音波伝搬の予測にどのように役立つのでしょうか。上水道網の解析は複雑で多くの時間を費やします。一本の水道管の観点から、または上水道ネットワーク全体の観点から、音および振動応答を理解したい場合があります。したがって、モデルの複雑さおよび計算の実行にかかる時間は、モデルに関係する物理が正確であるためにどの程度のディテールが要求されるかによって大幅に変動します。

設計作業の初期段階で Perrier が解決した核心的課題は、パイプの各セグメントについて音の伝搬速度が正確であるこ

とを確認することでした。次に彼は、マルチフィジックスシミュレーションを採用して、作業に必要な各数値により素早くアクセスできるようにしました。上水道網の解析では、音響、流体、および構造力学のマルチフィジックスカップリングが必要になります。

Perrier が構築したシミュレーションでは複数の用途が想定されています。たとえば、多少の誤差範囲がある場合に、これを理解して技術を微調整することなどが含まれます。音響シミュレーションを用いて水道管網の材料や形状のパラメータを模索する過程で、さまざまなシナリオに対する予測が明らかになります。音響シミュレーションは、2つのセンサーまでの距離が異なっていたり、テスト段階では含まれていなかったプラスチックによる修理が施されていたりすると、信号ノイズが発生することを示してくれます。また、Perrier のシミュレーションでは、音波がセンサーに到達するまでの上水道ネットワーク内部の圧力や、異なる材料が用いられた各セクションにおける力学的な減

衰なども予測可能で、問題可視化の糸口を与えてくれます（図 4）。

ルーチン活用とシミュレーションアプリケーション

Perrier は、コンピューターモデルを日常的に活用するにはカスタムシミュレーションアプリケーションを構築するのが有利であると判断しました。COMSOL Multiphysics® による解析をベースにして、ソフトウェアに組み込みのツール群を用いることにより、Perrier は音響 - 構造の相互作用、パイプの音響、時間依存解析、および周波数解析を組み合わせた独自のアプリケーションを作成しました（図 5）。このアプリケーションにより、ユーザーは形状や材料特性を変えて何回でもシミュレーションを実行させることができ、1 セグメントの水道管または上水道網全体の解析を行う事ができます。

アプリケーションを用いることにより、ユーザーはセグメントの長さ、セグメントの数、およびパイプの特性を指定して、上水道ネットワークを定義することができます。音速は、鋳鉄、プラスチックなど材料の特性を既定義のリストから選択することによって計算されます。次に、相関関係に基づきユーザーが手動で入力する形で現地での測定結果がシミュレーションに組み込まれ、漏水位置の予測が行われます。

マルチフィジックスモデルをシミュレーションアプリケーションに変換すること

「シミュレーションアプリケーションを構築することにより、複雑なモデルを同僚と共有し、どこからでもアクセスすることができるようになります。」

—SEBASTIENPERRIER,R&DACOUSTICAL SCIENTIST, ECHOLOGICS

によって、社内の他部署との情報交換が楽になります。Perrier はこのように言います。シミュレーションアプリケーションはパスワードで保護することができ、ローカル PC 環境にインストールされた COMSOL Server™ 製品で運用できるので、アクセスの更新を素早く反映させ、秘匿性を維持できます。業務の大部分が社外秘である Perrier にとって、これは重

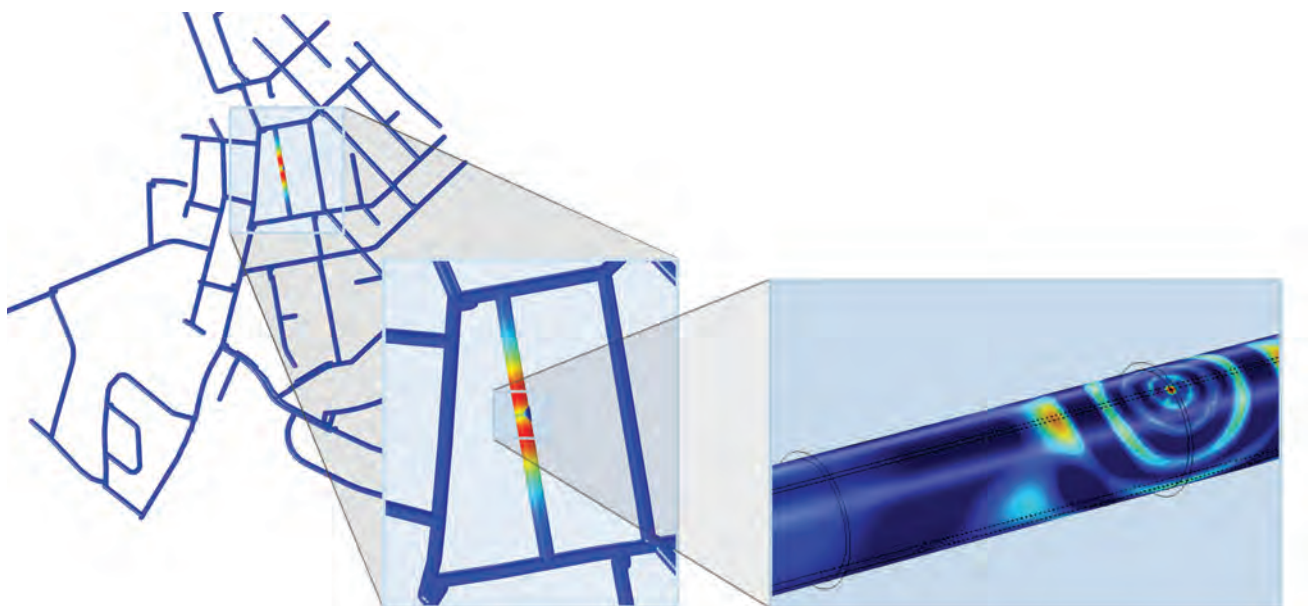


図 4. 上水道網内の漏水音の伝播解析。プロットは、漏水箇所周囲の音圧を示します。

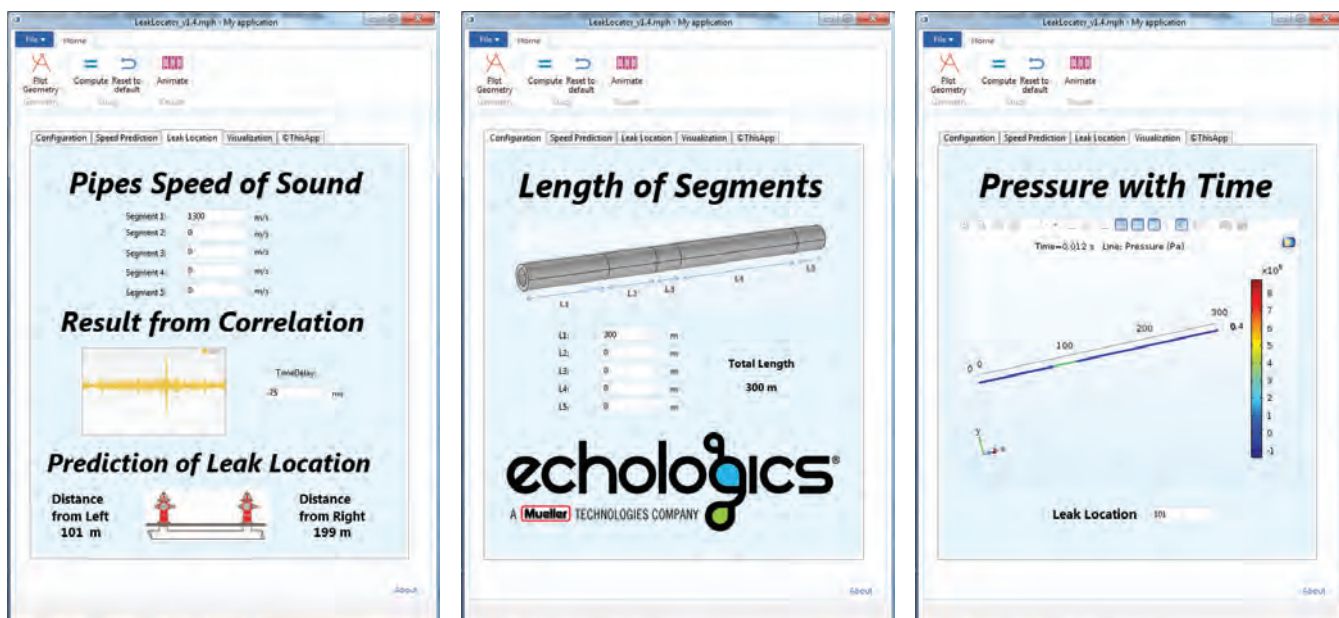


図 5. 形状およびパイプの特性を定義することにより、漏水箇所の正確な予測にユーザーを導く使いやすいインターフェース。ユーザーは、本アプリケーションを用いることにより、音響構造の相互作用、漏水位置の予測といった複雑な計算について意識することなく水道管内のパイプ内の音速を計算し、漏水箇所から音が伝わる様子をアニメーション付きで可視化することができます。

要なポイントでした。アプリケーションの作成にあたり、彼は現場の技術者が現地でアプリケーションを実行できるようにしました。

彼はアプリケーションが Echologics 社内に広く浸透し、活用されるようになるかと予測しています。ポイントは、シミュレーションの背景にあるメカニズムや数学について詳しい知識が無くても、Echologics の現場技術者が素早く正確

に漏水を発見できるようにすることです。Perrie r の構想では、音の伝搬がシミュレーションによって可視化され、形状や材料特性の変化によって音速が増減する様子をユーザーがビジュアルに確認することができれば、これは強力なツールになるはずです。❖



Sebastien Perrier
(Echologics
研究開発部音
響研究員)

音楽をあなたへ： 新型トランスデューサーと 静電型ヘッドフォンの邂逅

オーディオ技術のスタートアップは、ハイエンドの静電型ヘッドフォンのための新しい製造可能なトランスデューサを提供し、低音域のロールオフを低減します。



執筆者 **JENNIFER HAND** 氏

コアなハイファイオーディオ愛好家は、静電型ヘッドフォンが提供する音楽体験に興味しています。自然でエアリーなサウンドを作り出し、高解像度のオーディオソースが関与する場面では、他方式のヘッドフォンに比べて、より明瞭で、歪みが少なく、帯域幅が広がります。

ほとんどの静電型スピーカーは、2枚の導電板の間に位置する薄い弾性膜に電荷を印加します。荷電した薄膜は電気入力に直接反応し、耳と脳が音楽として解釈し、私たちを喜びと涙に動かす音波を生成します。高品質で正確なオーディオ再生にもかかわらず、静電型スピーカーは非常に高価で壊れやすく、最近まで、機械的精度のため手作りで作られていました。Warwick Audio Technologies Limited (WAT) は、手頃な価格で高品質のヘッドホンが必要としていることを踏まえ、超薄型ダイアフラムと単一導電板(2枚ではなく)をベースにした特許技術である高精度静電ラミネート (HPEL) トランスデューサを設計しました。英国 Warwick 大学発祥の WAT 社は、すでに厚さ 0.7mm の軽量ラミネートフィルムを開発しており、静電型ヘッドフォンに最適だったのです。

新開発の HPEL は、連続圧延によって製造された軽量薄膜構造です。WAT 社 CEO である Martin Roberts 氏は次のように述べています。「我々が開発したテクノロジーは独自のものです。HPEL トランスデューサは、金属化ポリプロピレンフィルム、六角形のセルを備えたポリマースペーサ、および導電性メッシュで構成されています」(図 1)。

一般的な内部構造では、直流 (DC) が弾性膜に印加され、交流 (AC) が周

囲のプレートに印加されるのですが、彼らの片側スピーカーでは直流 (DC) が弾性膜に印加され、交流 (AC) 信号が弾性膜の反対側に設置した単一ワイヤメッシュに印加される仕組みとなっています。

この製造方法によって、トランスデューサを従来の静電型スピーカーと比較して、圧倒的に低価格で製造することが可能になります。これは、初めて静電容量が広範な種類のデバイスおよび市場セグメントにわたって商業的に実行可能な高解像度オーディオの選択肢と考えられることを意味します。

音響ブレイバックのシミュレーション

このようなトランスデューサを開発するためには、音質を損なうことなく容易に製造でき、安価であることが求められます。WAT 社のチームは、最終版に着手する前に多くの設計要素の影響を徹底的に調査しました。「われわれは明確に動作するような膨大な数のプロトタイプを開発しました。大きな問題は、トランスデューサの性能に個々の材料や設計パラメータがどのように変化するかについて完全にはわかっていなかったことです」と Roberts 氏は言います。

HPEL のダイナミクスは、膜張力、AC 信号レベル、スピーカー形状、弾性および誘電材料特性、熱音響損失、および膜の開放側の空気の付加質量効果の間の

極めて複雑な相互作用に依存します。設計者は、低音域ロールオフを低減し、歪みを最小限に抑え、特定の電気入力の音圧レベルを最大化することによって低音性能を向上させることを望んでいました。

しかし、どのコンポーネントの小さな変更も音響出力に大きく影響することが分かりました。

WAT 社は、機械、電気、音響分野では豊富な専門経験がありましたが、上述のような相互作用を理解する一助となるシミュレーション能力を社内には有していませんでした。

同社は、HPEL トランスデューサ設計の仮想最適化を行うため、COMSOL の認証コンサルタントであり、計算モデリング、設計アドバイス、機械におけるノイズと振動の問題などを専門とする Xi Engineering 社に支援を要請しました。

HPEL の挙動解析に用いた COMSOL Multiphysics® ソフトウェアモデルの開発は、Xi Engineering 社のテクニカル・ディレクター、Brett Marmo 博士が監督しました。COMSOL® ソフトウェアによって、Xi Engineering 社は HPEL の非対称設計に修正を加えた際に生じる可能性がある非線形効果をモデリングすることができるようになりました。

Marmo 博士は、同社が行った予備段階のテストについて次のように語っています。「初期の段階では、音質に特に影響を与えると考えられる要因にフォーカ

「以前は毎週いくつものプロトタイプを手作業で作成していましたが、いまはソフトウェア上で設定を変えるだけで新たなプロトタイプを作成できるようになりました。最終設計に到達できたことに加え、顧客のニーズに合わせて簡単にトランスデューサをカスタマイズできるようになったことにも大変満足しています。」

— MARTIN ROBERTS, CEO, WAT



図 1. WAT 社の HPEL トランスデューサ（上から下へ順に）：シングラムミネート、取付け後、完成品 HPEL のトランスデューサの立体構造。ラミネートはすべて英国製です。

スを絞り、単純なモデルにとどめました。たとえば、音響 - 構造間の相互作用や HPEL の低域性能の理解を深めるため、可能な限り第一倍音を低く抑えました。われわれが作成したモデルは、印加した電圧が信号レベルに与える影響を示してくれるので、初期段階モデルにおける音のひずみを理解する上で役に立ちました。」

トランスデューサが片面構成であるため、振動する薄膜上の静電力の分布は一定ではなく、メッシュと薄膜の距離の二乗に比例して減少します。これが原因で発生する非線形ひずみについて理解が進

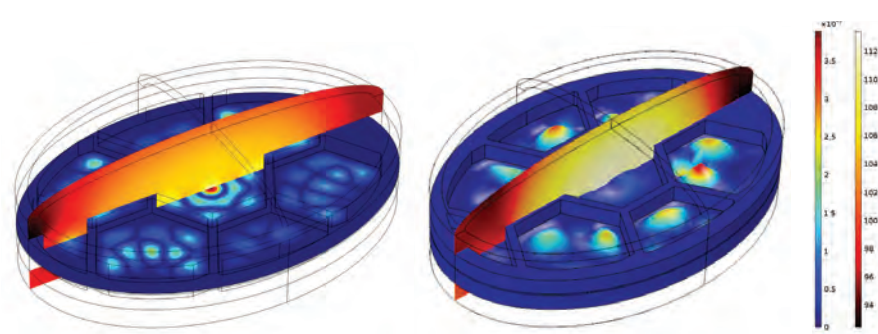


図 2. 完全な音響 - MEMS カップリングを行ったモデルについて、周波数ドメインでシミュレーションを行った計算結果から得られた音圧レベル（単位 dB、温度は色で示されています）および薄膜の変位（mm 単位、虹色の面）のプロット。左：5,000 Hz における計算結果。右：5,250 Hz における計算結果。

み、影響を予測できるようになったため、WAT 社の技術者はこれに伴うひずみを電氣的に相殺できるようになりました。

理想の HPEL トランスデューサ設計を得るために

構造 - MEMS - 音響カップリングを考慮した、より詳細なシミュレーションでは、ワイヤメッシュの 6 角形セルのサイズ、ワイヤ径、薄膜の張力、薄膜メッシュ間の距離、各部品材料特性など、パラメータを変化させた場合の影響について調査を行いました。Marmo 博士ならびにグループの研究者は、低域においてひずみの原因となることが多い DC バイアスを変更した場合の影響についても研究を行い、プレートに沿った電導率を調べ、電圧分布に偏在がないか確認を行っています。その後、COMSOL を用いて熱音響損失について調査を行い、異なる周波数における薄膜の変位をモデリングしました（図 2）。

Marmo 博士はさらに次のように続けました。「われわれは、平面静電トランスデューサを真にモデリングするには、このタイプのシミュレーションを行うことが唯一の正確な方法であるという結論に達しました。このケースでは集中定数モデリングによって、低域における振幅応答などパフォーマンスの一部の側面を特徴付けることができます。ある特定の完璧と思えるパラメータが見つかったとしても、それが原因で別の箇所に大きなひずみが生じる可能性があります。マルチフィジックスモデリングでは、時間領域の応答や非線形ひずみなど、私たちが音に影響があったと知覚する可能性がある、あらゆる要因が考慮されています。」

シミュレーションの導入により、WAT 社の技術者は設計パラメータを微調整し、全体のパフォーマンスを最適化できるようになりました。最終的には、周波数応答にスパイクを生じさせている原因を予測できる段階に到達し、信号を平準化させハイファイオリティを向上させることに成功しました。

Roberts 氏は言います。「これは我が社にとって大幅な時間とコストの削減につながりました。「以前は毎週いくつものプロトタイプを手作業で作成していましたが、いまはソフトウェア上で設定を変えるだけで新たなプロトタイプを作成できるようになりました。最終設計に到達できたことに加え、顧客のニーズに合わせて簡単にトランスデューサをカスタマイズできるようになったことにも大変満足しています。」

Marmo 博士のチームは、各モデルを WAT 社の設計チームから提供された物理的な測定結果と比較しました。「シミュレーションの結果は、驚くほど現実の測定結果に近い値を示していました。」WAT 社の CTO、Dan Anagnos 氏はこう言います。「おそらくこれが最も興奮した点です。シミュレーションに命が吹き込まれ、現実のスピーカーの動作について正確なビジョンを示してくれていると実感できたのです。」

自由度と柔軟性を提供するシミュレーションアプリケーション

シミュレーション結果が正確であることが検証され、WAT 社は設計に満足しました。次のステップは、今後のモデリング作業の管理を Xi Engineering 社から WAT 社に移管することです。COMSOL

ソフトウェアで利用可能な Application Builder を用いることにより、Marmo 博士のチームはシミュレーションに基づいてアプリケーションを作成し、ネットワーク上にホスティングすることができました。

ユーザーは、アプリケーションのインターフェースで特定の入力を変更することにより、DC バイアス、AC 信号レベル、周波数の帯域および解像度、材料特性、スピーカーのサイズ、ワイヤメッシュの形状およびサイズ、スペーサの配置など各種パラメータを変更し、その影響をテストすることができます（図 3）。元になったオリジナルのモデルの設定にアプリケーションから直接アクセスすることはできませんが、ユーザーはシミュレーションソフトウェアに関する知識が無くてもアプリケーションを用いてテストを続行することができます。

Marmo 博士はこう言います。「WAT 社にシミュレーションアプリケーションを供給することにより、同社がソフトウェア自体を購入したり、経験豊富なユーザーを社内に育成する必要がなくなります。シミュレーションアプリケーションによって、小さな変更を行うだけのために逐一弊社に連絡を取らなくても、顧客自身が状況を掌握し、希望の条件でシミュレーションを行うことができるようになります。弊社としても、同じ課題のバリエーションにいつまでも拘束され続けることがなくなり、新たな課題にチャレンジできるようになります。」Xi Engineering 社では、今後は他の顧客でも計算アプリケーションを使用するケースが圧倒的に増えるだろうと予測しています。

WAT 社も同様で、顧客企業が特定のヘッドホン設計に最適な HPEL トランスデューサを模索している場合に、自社の顧客との間でアプリケーションを共有することを検討しています。「Xi Engineering 社から派遣されたチームは素晴らしい集団でした。彼らは深い専門知識を有しており、おかげで複雑な弊社製品を整理して理解することができました。」Roberts 氏はこう付け加えます。「Xi Engineering 社が我が社のために開発してくれた直観的アプリケーションは、さらなるボーナスポイントです。顧客には一切、知的財産を開示することなく、アプリケーションを

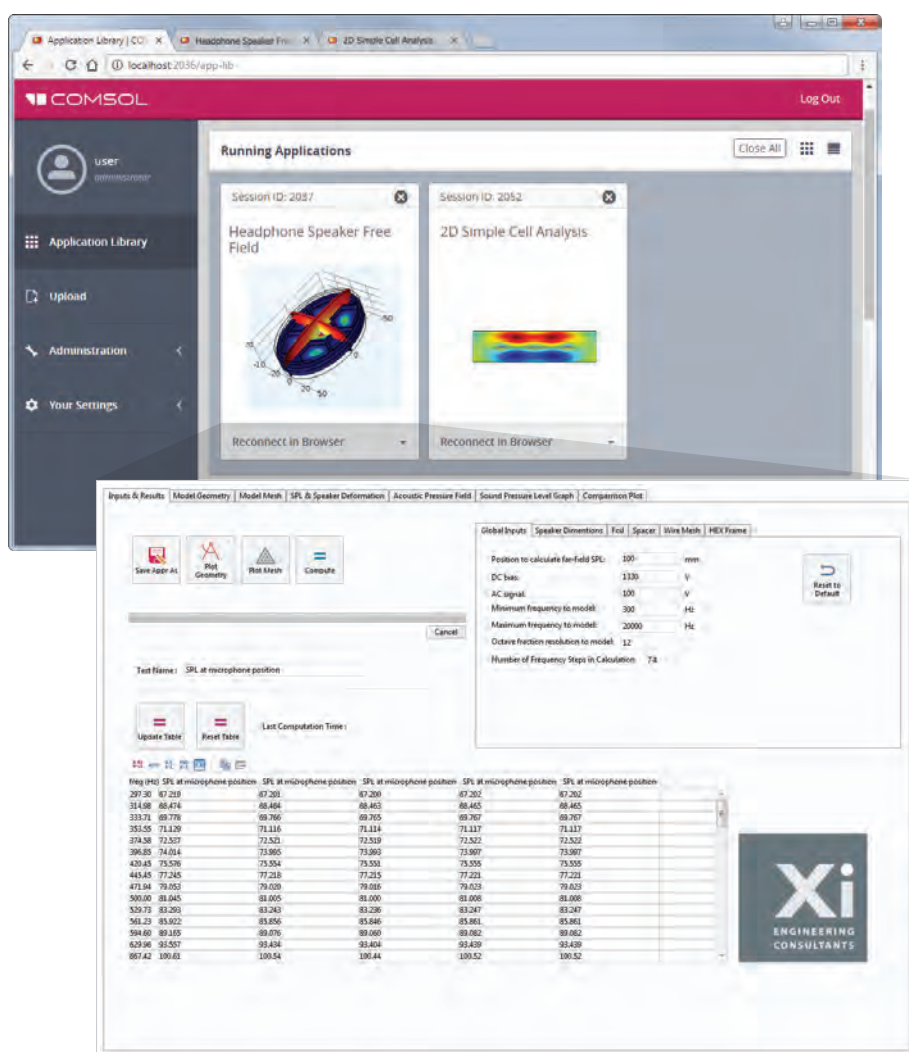


図 3. 前面: Xi Engineering 社が開発したアプリケーションでは、技術者は周波数、電気的入力、スピーカー寸法、そして薄膜、スペーサー、およびワイヤメッシュの特性に関連するパラメータを変化させることができます。シミュレーション結果として、ケースが異なる場合の音圧レベル、薄膜の変位、DC バイアスが異なる場合の周波数応答、およびシミュレーション設計と実験結果の比較を示しています。

後面: シミュレーションアプリケーションは COMSOL Server™ 製品経由で共有され、Web ブラウザからアクセスできます。



左: Brett Marmo (Xi Engineering 社テクニカル・ディレクター)
中央: Martin Roberts (Warwick Audio Technologies Limited CEO)
右: Dan Anagnos (Warwick Audio Technologies Limited CTO)

介して弊社の設計にアクセスしてもらうことができるため、顧客は弊社のテクノロジーを試験したり、顧客独自のハイエン

ドヘッドフォンに組み込むことができます。」❖

マルチフィジックスが計算音響学にもたらすメリット

執筆者 **VERYST ENGINEERING 社 NAGI ELABBASI 氏**

音響の分野はかなり広範で、研究を支援する計算ツールが必要とされています。音響シミュレーションは、自動車の騒音制御、室内音響、スピーカー、ミニチュアスピーカー、楽器、音響センサー、アクチュエーター、非破壊検査などの分野では日常的に用いられています。技術者に設計上の貴重な洞察力を適時に提供してくれるため、製品を最適化し、新たな設計コンセプトを生むきっかけとなります。Veryst Engineering 社では、音響シミュレーションへの関心が高まっており、特に医療装置や MEMS センサー関連のアプリケーションが注目されています。

上述した適用例の中には、計算音響学に適した数式化が他と著しく異なるものがあります。多くの場合、音響問題を他の物理現象（主に構造力学、流体力学、電気、伝熱、多孔質など）から切り離して計算することは困難です。一般に、装置が小さくなるにつれて、音響学とその他の物理との間のマルチフィジックスカップリングはより一層重要度を増す傾向があります。

現在、この分野で私が注目しているのは、特に医療機器、ウェアラブルの 2 分野で音響アプリケーションを目にする機会が非常に増えていることです。

最近、弊社で医療機器業界のマルチフィジックス音響シミュレーションの問題を取り扱う機会がありました。これは音響泳動 (acoustophoresis) の使用に焦点を当てた、体液のための LoC

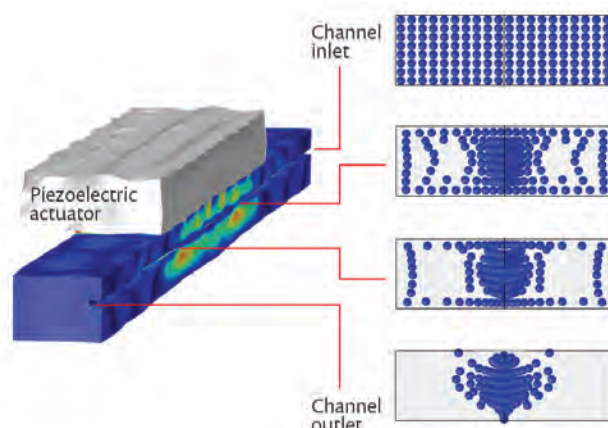
「現在、私が注目しているのは、特に医療機器、ウェアラブルの 2 分野で音響アプリケーションが非常に増えていることです。」

(Lab-on-a-Chip) 装置に関するものでした。この手法は、振動する音場から影響を受ける粒子の運動に関係し、流体による洗浄、流体の分離、音場浮遊などの応用分野に用いられます。この特定のモデルには圧力音響、固体力学、電場、流体の流れ、および粒子トレーシングが関与しています。この例題モデルに用いられている形状および粒子の特性は、各文献から取得しました。図は流路全体の粒子の分布を示しており、粒子が全体として流路の中央に集まってくる傾向があることが示されています。計算モデルは、装置の寸法、材料、動作周波数、および流速を選択する際に技術者を支援してくれます。

これは他の物理の場合と大きくかけ離れているわけではありませんが、音響シミュレーションに際し我々が直面する難関は、材料に関する正確な特性の入手とモデルの検証です。個人的な経験から、音響の問題で正確に算出するのが最も困難な特性の一つとして減衰係数が挙げられます。実際によくあることですが、共鳴周波数の近傍で音響アクチュエーターを動作させる場合、減衰効果が計算結果に及ぼす影響は顕著です。これもよくあることですが、装置に高分子コンポーネントが含まれている場合、減衰効果は周波数に依存します。Q 因子や損失係数など、製造元から 1

つだけ減衰手段が提供されている場合がありますが、正確に解析を行うにはそれだけでは不十分なのです。より多くの材料試験や、装置レベルの試験を頻繁に行う必要があります。

こうした数々の難関を克服し、それ以上を成し遂げるため、我々はより多くの顧客向けシミュレーションアプリケーションの開発に着手しています。COMSOL Multiphysics® ソフトウェアに提供される Application Builder を用いることにより、顧客のニーズに基づいて完全にカスタマイズ可能、かつ直観的なユーザーインターフェースを備えたアプリケーションを構築することができます。これらのアプリケーションによって、メリットの多い計算音響解析に、数値計算の専門家以外が簡素なインターフェースを通じて直接にアクセスできるようになれば期待しています。顧客は色々にパラメータを変化させてみたり、彼らの専門分野の知識や技能に基づいて設計の微調整を提案することができます。マルチフィジックスシミュレーションのおかげで、音響の分野は大幅に進化しました。シミュレーションアプリケーションの開発を通じて、さらにこの分野が発展することに期待しています。



COMSOL Multiphysics® ソフトウェアを用いたシミュレーションによる微小流路内の音響泳動 (Acoustophoretic) 粒子の挙動。左図に、変形およびフォノミーゼス応力を示します。



著者について

Nagi Elabbasi 博士は Veryst Engineering, LLC の主席技術者で、専門分野はマルチフィジックスシステムのモデリングです。同氏は、構造力学のシミュレーション、計算流体力学 (CFD)、伝熱、音響学、連成システム、および有限要素法ソフトウェアの開発の各分野に幅広い経験があります。同氏は Toronto 大学にて、機械工学の博士号を取得しました。Veryst 社が提供するコンサルティング、各種試験、およびトレーニングサービスの詳細については veryst.com/mechanical-engineering-services を参照してください。