

COMSOL ニュース

スペシャルエディション 音響



計算音響学は設計プロセスにおける早期の洞察と予測能力を提供する

音響について議論するとき、最初に思い浮かぶイメージは高音量のサブウーファースや音響バッフルを備えたコンサートホールかもしれません。しかし、私たちが日常的に接する音響の用途はもっとたくさんあります。音響学は学際的な科学であり、エンジニアは多くの顧客の要求を満たす製品を作るために、あらゆる創意工夫と最も強力な数学的モデリングツールを駆使する必要があります。

今回の COMSOL ニュース特別版では、音響分野で活躍する設計者、エンジニア、研究者をご紹介します。彼らのストーリーを読めばお分かりの通り、共通しているのは、高忠実度の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を通じて同僚や顧客と仕事を共有する能力への情熱です。

バーチャルな製品開発からNVH性能、遮音、ハウリングの低減まで、計算音響学が実用的な問題の解決や革新的な製品の設計を促進する様々な方法についてお読みいただければ、きっとインスピレーションを感じていただけると思います。

ごゆっくりお読みください！

Valerio Marra
COMSOL, Inc.

COMSOL コミュニティとの交流

BLOG comsol.com/blogs

FORUM comsol.com/forum

LinkedIn™ linkedin.com/company/comsol-inc-

Facebook® facebook.com/multiphysics

X (旧 TWITTER®) twitter.com/@COMSOL_Inc

COMSOL News に関するご意見、ご感想は info@comsol.com までお寄せください。

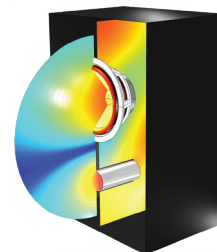
COMSOL NEWS

スペシャルエディショ
ン音響

© 2024 COMSOL. COMSOL, COMSOL Multiphysics, Capture the Concept, COMSOL Desktop, COMSOL Server, および LiveLink は、COMSOL AB の登録商標または商標です。COMSOL AB およびその子会社ならびに製品は、これらの商標権者と提携、支持、後援、またはサポート関係にあります。商標所有者の一覧は、www.comsol.com/trademarks を参照ください。

IN ロゴは LinkedIn Corporation およびその関連会社の米国およびその他の国における登録商標または商標です。f のロゴは Facebook, Inc. の登録商標です。鳥のロゴは Twitter, Inc. の登録商標です。G+ のロゴは Google, Inc. の商標です。

目次



音響シミュレーション

- 4 | 音響モデリングとシミュレーションアプリの事例を作成

バーチャル製品開発

- 6 | 車載オーディオシステムをバーチャルにチューニング

高精度マイク

- 9 | 精密なパフォーマンス: 完璧な測定の追求

12 | 燃焼の不安定性

ソフトウェアによるロケットシステム内の平均流増強音響モデル

NVHパフォーマンス

- 15 | Mahindra オートバイの騒音の背後にあるもの

変圧器のハム音

- 18 | スプレッドシートからマルチフィジックスアプリケーションまで、変圧器業界をパワーアップし続ける ABB

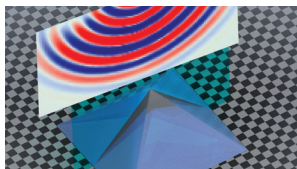


表紙画像

アドベンチャーツーリングオートバイ、Mahindra Mojo. 画像出典: Mahindra Two Wheelers Ltd.

特集

- 22 **マルチボディと音響の相互作用**
ギアボックスの振動と騒音のモデリング

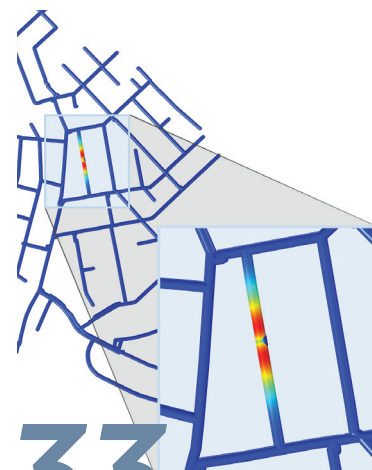
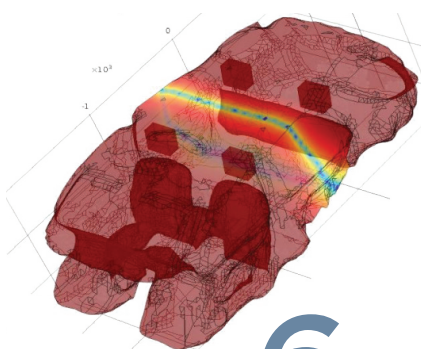


- 25 **音響クローキング**
音の操作と制御:
最先端の音響メタマテリアル
研究を支える数値モデリング

- 28 **超低周波振動**
ガタガタ, ガラガラ, ゴロゴロ

- 30 **フィードバック低減**
補聴器研究の最先端

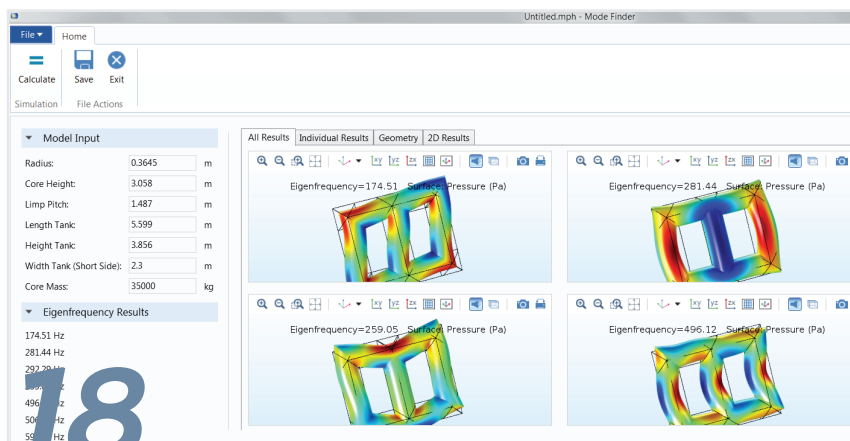
- 33 **非侵襲的音響技術**
水道管の漏水検知を強化する
マルチフィジックス解析



- 36 **高精度トランスデューサー**
あなたの耳に音楽を:
新しいトランスデューサーと
静電型ヘッドフォンの出会い

- 39 **マルチフィジックスモデリング**
マルチフィジックスを通して
世界をシミュレートする

- 40 **ゲスト論説**
計算音響学がマルチフィジ
ックスから受ける恩恵



音響モデリングとシミュレーションアプリの事例を構築する

音響現象は本質的にマルチフィジックスです。モデルを構築するとき、エンジニアはさまざまなスケールや周波数での物理の種類とそれらの結合を考慮する必要があります。

MADS J. HERRING JENSEN 著

システムが複雑化し、プロジェクトの納期が厳しくなる中、音響エンジニアは仕事をこなすために数値シミュレーションソフトウェアを利用しています。計算ツールを使用することで、設計作業を迅速化し、コストと時間のかかる物理的な試作品の必要性を減らすことができます。また、音響シミュレーションによって設計に対する理解が深まり、より良い情報に基づいた意思決定と高品質な製品につながります。

このようなメリットを享受するために、音響シミュレーションではどのような機能が重要なのでしょうか？多くの場合、様々な条件下での音響信号の再生、伝播、受信がアプリケーションに含まれます。これには、音信号と構造物、多孔質材料、流れとの相互作用だけでなく、音信号の発生と検出に関わるトランスデューサーのモデリングも含まれます。これらはすべて、音響学者が新製品や新技術の効率的な開発のために考慮しなければならない、本質的にマルチフィジックスな問題です。このため、完全なシステムに関連する物理学的効果を結合する能力という点で、モデリングするソフトウェアには重要な要件が課されます。

⇒ 音響学における現在の技術的課題

音質は多くの産業でトレンドとなっている話題です。例えば、自動車の車室内の音の再生（図1）や、排気やマフラーシステムからの出力に関するものです。その他の例としては、ヘッドフォンやラウドスピーカー、モバイル機器のスピーカーシステムの性能と最適化が挙げられます。これらすべてのケースにおいて、システムを最適化するためには、音の伝搬とトラン

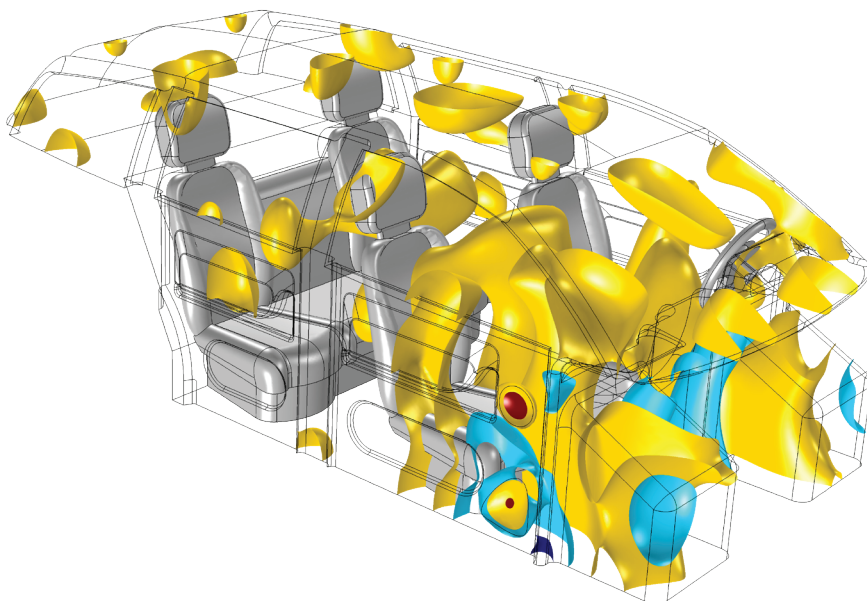


図 1. 典型的なラウドスピーカー位置における音源を含むセダン車内の音響シミュレーション。結果は車室内の全音圧場を示します。

スデューサーの挙動の両方を詳細に理解する必要があります。巧みなデジタル信号処理だけでは、システムの動作や"良い音"を作るにはもはや十分ではありません。例えば、適応型フィードバックキャンセリングを使用して補聴器の性能を向上させるためには、正確なシミュレーション結果を得るために、小型スピーカーの振動音響モデルと音響および固体力学有限要素 (FE) モデルの連成が必要です。

ラウドスピーカー業界では、標準的なドライバーの設計は、単純な試行錯誤のテストによって改善できる限界に達しています（図2）。

最適化には詳細な数値解析が必要です。小型ラウドスピーカーシステムは現在、非線形性による歪みや減衰が生じるほど高い音圧レベルで駆動されています。同じ非線形性は、航空宇宙用途のライナーでも重要な役割を果たしています。

静電気、構造膜、熱粘性音響といったマルチフィジックスカップリングを伴うもう一つの例は、コンデンサーマイクのモデリングです。これらのフィジックスは緊密に連成しており、マイクロフォンの感度を正しく予測するために必要なものばかりです。

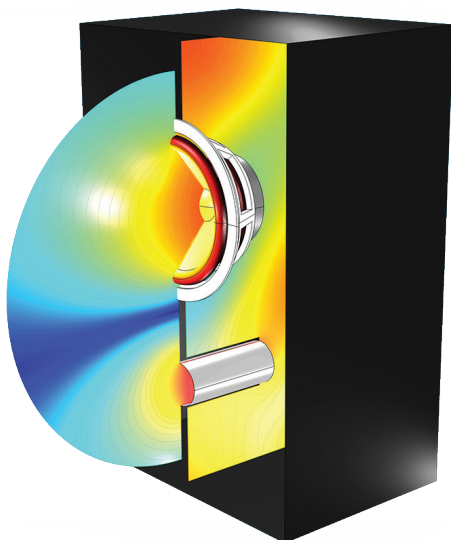


図 2. ラウドスピーカードライバーの筐体内の音圧分布を示すシミュレーション結果。

⇒ COMSOL MULTIPHYSICSと音響モジュール

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、低周波から超音波まで、音響に関連する数十種類の周波数のモデリングに最適です。また、熱粘性損失

メカニズムや航空音響学など、音響のマルチスケールな性質を扱う場合にも適しています。このソフトウェアの音響シミュレーション機能には、同じモデリング環境内でシームレスに設定できる、異なるフィジックス間の使いやすいマルチフィジックスカップリングが組み込まれており、音響モジュールには、音響学の支配方程式に関する多くの特殊な定式化が追加されています。

⇒ 音響シミュレーションアプリ

業界で多くの人が直面している音響の課題に取り組むために、シミュレーションソフトウェアの経験がないユーザーでも、事前に定義された入力と希望する出力で、ユーザーのニーズに応じて特別にカスタマイズされたアプリケーションを実行できます。これは、COMSOL Multiphysics のアプリケーションビルダーで作成したアプリを使用することで可能になります。シミュレーションアプリは、カスタムユーザーインターフェースに実装されたマルチフィジックスモデルです。このツールを使用することで、専門家は複雑なシミュレーションをパッケージ化し、ユーザーが業界標準や顧客要件に応じて設計パラメーターを変更したり、結果を自律的に解析したりすることができます。

COMSOL Server™ 製品をローカルにイン

ストールすることで、アプリを組織全体および世界中の同僚や顧客に簡単に配備することができます。ユーザーは COMSOL Client または主要なウェブブラウザから接続できます。シミュレーションの専門家にとって、音響デバイスを高い忠実度でモデリングし、その成果を同僚に提供することがかつてないほど容易になりました。❖

音響モジュールで使用可能なフィジックスインターフェース

音圧音響: 音場は、周囲の静圧を中心とした音響変動によって記述されます。多孔質材料、繊維状材料、狭い構造、バルク吸収挙動がモデル化されています。完全整合層 (PML) は、境界のない領域を切り取るために利用できます。

音響-構造相互作用: 流体の圧力が固体領域に負荷を与え、構造加速度が流体-固体境界を越えて流体領域に影響を与える現象をモデル化します。圧電材料、弾性波、多孔弾性波、パイプ音響が含まれます。

航空音響: 背景流体の流れと音場との一方方向の相互作用を解析します。

熱粘性音響: 音響を正確にモデル化します。壁付近の粘性境界層や熱境界層の影響が重要な、寸法が小さい形状における音響を正確にモデル化します。

超音波: 静止した背景流場において、多数の波長を含む大規模な過渡線形音響問題を解析します。

幾何音響学: 波長が特徴的な幾何学的特徴よりも著しく小さい高周波数境界における音響をモデル化します。

資料

- COMSOL ブログ
- COMSOL ビデオギャラリー
- COMSOL アプリケーションギャラリー

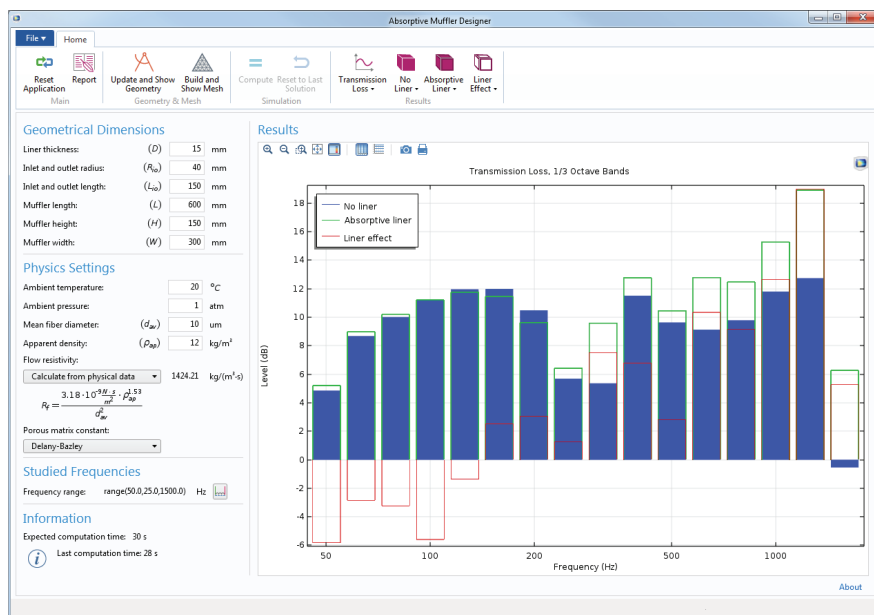


図 3. このサンプルアプリは、COMSOL MULTIPHYSICS® の吸収マフラーのモデルに基づいています。ユーザーは、結果として生じる音響挙動を評価するために、マフラーのジオメトリデザイン、周囲の温度と圧力、および材料特性を変更することができます。

車載オーディオシステムの仮想チューニング

HARMAN の専門家は、物理実験と数学的モデリングおよび数値シミュレーションを組み合わせ、最新の車載インフォテインメント技術の開発プロセスを改善しています。

JENNIFER HAND 著



図 1. 車室内でのスピーカーの配置

今日の自動車は、スマートフォンとの接続からインタラクティブなディスプレイやビデオスクリーンまで、エレクトロニックエンターテインメントの可能性に満ち溢れています。

HARMANは、このようなコネクテッドカー設定のマーケットリーダーであり、世界の高級車の80%以上にプレミアムオーディオシステムを搭載しています。

HARMANの音響およびシミュレーションスペシャリストチームは、車種ごとに異なる部品と車の音響特性を考慮した設計を行っています。スピーカーの理想的な配置や向き、スピーカーパッケージング、車のドアなどのドライバーエンクロージャーの形状などの詳細は、すべて音質に影響します。

このチームは、数値解析と物理的な実験を併用し、実際のプロトタイプを作る前にシステムをバーチャルに調整することで、製品開発を加速させています。これにより、物理的なテストにかかる時間を節約し、バーチャルテストをその場での試聴に置き換えることができるため、チームは最終的な車の設計が完了する前でも製品を設計することができます。

HARMANのVPD (Virtual Product Development and Tools) シニアマネージャーであるMichael Strauss氏は、次のように説明します。“私たちは、車両設計者がまだオーディオシステムに何を要求するかを決定していないような、自動車開発プロセスの非常に早い段階から

関与することがあります。あるいは、車室のサイズや容積といった基本的な詳細しかわかっていない場合もあります。しかし、多くの場合、数日以内にコンセプトを提示する必要があり、クライアントの要求を満たし、高品質のシステムを提供するための厄介な課題が生じます。”

⇒ シミュレーションと実験がチームを組んで顧客の満足度を向上

顧客に迅速かつ正確な対応を提供するために、HARMANのエンジニアはCOMSOL Multiphysics® ソフトウェアの数値モデリングを利用しています。

“私たちは、1つの統合環境で機械、音響、および電気のシミュレーションを実行する機能を必要としており、独自のツールの作成と更新に費やす時間と労力を解放するプログラムを望んでいました。”

“機械、音響、電気シミュレーションを1つの統合環境で行う機能が必要であり、独自のツールの作成と更新に費やしていた時間と労力を解放してくれるプログラムを求めていました、”とHARMANの主任音響エンジニアであるFrancois Malbos氏は述べます。

“マルチフィジックスアプローチは、バーチャル製品開発プロセスにおいて最も重要な部分の1つ

です、”と HARMAN のシミュレーションエンジニア兼プロジェクトリーダーのMichał Bogdanski氏は言います。“ラウドスピーカーの音響挙動が車両構造のあらゆる部分（例えばドアの剛性など）とどのように関連しているかを解析し、ドア設計のガイドラインを顧客に提供することができます。”

あるケースでは、数値モデルを検証し、後に音響機器の最適化に役立てるために、メルセデスベンツ ML (図1) の車室内でラウドスピーカーから発生する音圧レベルの測定とシミュレーションを行いました。“車室内のシミュレーションは、物理学のさまざまな領域をカバーするため、最も困難な作業のひとつです、”と Strauss氏は説明します。幸いなことに、COMSOL® ソフトウェアには、システム全体の音響的、機械的、電氣的効果を結合するオプションが用意されています。

全社的なエンジニアリング活動をサポートするため、Strauss氏のチームは、検証済みのモデルと既知の解のライブラリを確立し、多種多様なラウドスピーカー構成の性能予測を可能にしまし

た。“私たちは、ハイレベルな傾向解析から、サブシステムの性能を検討する詳細設計まで、あらゆるものを提供することができます、”と彼は続けます。“私たちは、1つの統合環境で機械的、音響的、および電氣的なシミュレーションを実行する機能を必要としており、独自のツールの作成と更新に費やす時間と労力を解放するプログラムを望んでいました。”

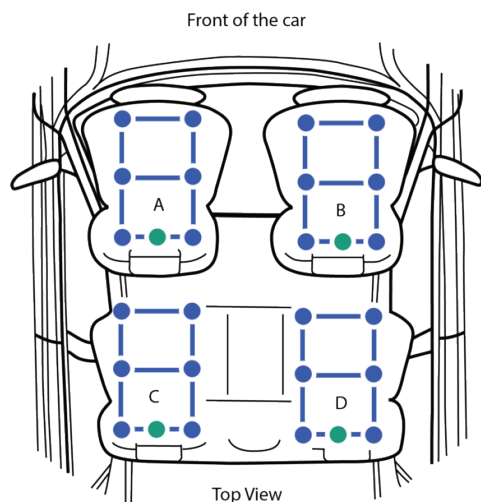


図2. 左は4箇所に配置されたマイクロフォンアレイの上面図。



図3. HARMAN社による車室の3Dスキャン。

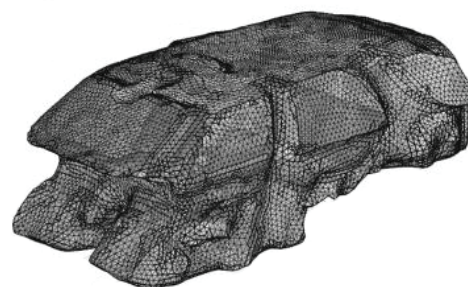


図4. 車室のサーフェスマッシュ。

⇒ 車両ラウドスピーカーの解析パフォーマンス

ある研究では、HARMAN社のエンジニアがCOMSOLを使って車内のサウンドシステムのシミュレーションを行い、スピーカーの音響、特に低周波音波の最適化を図りました。その後、モデルを検証するための一連のテストを設計しました。このモデルが検証されれば、HARMANのチームは特定の車種に最適なスピーカーの設定を推測できるようになります。

検証テストでは、ラウドスピーカーが車の運転席近くの剛性な筐体上に取り付けられました。車内には4組のマイクロフォンアレイが設置され、それぞれの場所の平均音圧レベルを測定しました（図2参照）。

1kHz以下の周波数については、ボイスコイル端子の電圧とサスペンションおよびスピーカーのメンブレイン表面の剛性を考慮した簡略化された集中パラメーターモデル（LPM）に結びついた剛体平面ピストンとしてラウドスピーカーを表現しました。ジオメトリは、手動の3Dスキャンから生成されました（図3参照）。研究チームは、MATLAB®ソフトウェアに実

装されているポスト処理アルゴリズムと、COMSOL®のアドオン製品であるLiveLink for MATLAB®を使用して、2つのプログラム間の双方向リンクを作成し、スキャンによって作成された点群を車室の表面メッシュに変換し（図4参照）、音圧波の研究用に最適化されたメッシュを作成しました。

このシミュレーションでは、スピーカーから発生する音波が、フロントガラス、フロア、シート、ヘッドレスト、ステアリングホイール、

ルーフ、ドア、インストールメントパネルなど、それぞれ吸収特性の異なるさまざまな素材と相互作用する様子を解析しました。

⇒ 音響モデルの最適化

チームは、さまざまな素材を考慮することに加えて、LiveLink™ for MATLAB®を使用して筐体の体積に基づいてスピーカーメンブレインの動きと加速度を定義し、前処理と後処理のアクティビティを簡素化する特別なMATLAB®スクリプトを開発しました。

“すべてが完全に最適化され自動化されているため、ケースごとに加速度を計算する必要はありません。1つのシミュレーションが終了すると、次のシミュレーションが起動します。”とMichal Bogdanski氏は説明します。“これにより、プロセス全体が簡単でエラーがなくなることが保証されます。単にスクリプトを実行させるだけです。”

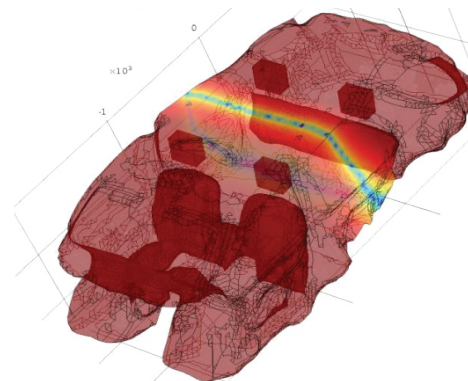
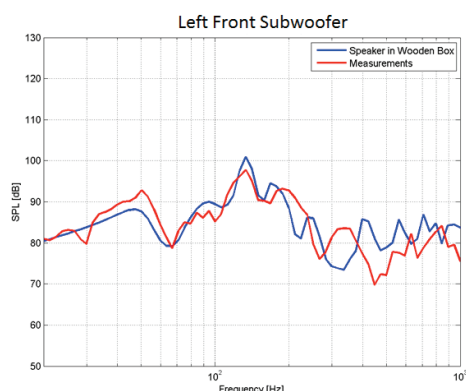


図5. 1つのマイクロフォンアレイ（左）と車内全体の音圧レベル（右）。

チームはまた、測定された音圧とシミュレートされた音圧の間の強い相関関係を達成するために必要な周波数依存の吸収係数を最適化しました。解析の結果、各マイクロフォンアレイから発せられる音圧レベルが得られました(図5参照)。

⇒ 運転席での客観的評価と主観的評価

検証されたシミュレーションを使用することで、HARMAN社は車両がまだ設計中であっても、サウンドシステムの開発に着手することができます。車室内の音圧場を正確に予測することで、オーデ

“シミュレーションを使用することで、HARMANのエンジニアは、提案されたサウンドシステムの性能を評価し、最適化し、予測し、主観的に評価することができます。”

ィオシステムの性能を最適化することができます。イコライザーや音響心理効果もチューニングアルゴリズムに含まれているため、物理的なプロトタイプを作ることなく設計を変更することができます。

聴覚化、つまり仮想的に計算された音響から音を作り出すことは、一流のサウンドシステムを追求する上で興味深いものです。HARMAN社のエンジニアは、サブウーファー、ミッドレンジ、トゥイーターで構成されるオーディオシステムの試聴、評価、比較を可能にする再生システムをハイエンドのヘッドフォンを使って開発しました。“すべてシミュレーション結

果と信号処理に基づいています”と Malbos 氏は言います。

HARMAN社のエンジニアは、バイノーラルインパルス応答(BRIR)、つまり耳がどのように音を受け取るかを予測する際に、人間の頭部、胴体、外耳道が音響に与える影響を考慮しました。完全な3Dサウンドを捉えるため、BRIRは方位角平面上の様々な頭部位置で計算されます。再生システムは、リスナーが体験するようなサウンド体験を完全に再現するために、例えば、運転席でヘッドポジショントラッカーを使用します。

図6は、BRIRの予測に使用されたCOMSOL®ソフトウェアを使用して作成されたメッシュを示しています。図7は、予測されたBRIRとシミュレーションされたBRIRの比較を示しています。

可聴化には課題がないわけではありません。本質的に主観的な尺度である可聴化の品質は、現実世界のリスニングと比較する必要があります。そのため、リスニング体験の品質を保証するために主観的な測定が行われます。

HARMAN社では、純粋にシミュレーションに基づいてオーディオシステムを評価できるため、製品の品質と製品開発のスピードが向上しました。また、顧客対応力も向上し、設計修正のコストも削減され、エンジニアの間で設計の自由度が高まりました。

“シミュレーションの利点は、システムエンジニアが机に座ってヘッドフォンを装着し、車を使わずにシステムの調整を開始できることです”とStrauss氏は言います。“シミュレーションを使用することで、HARMAN社のエンジニアは、提案されたサウンドシステムが実際にはまだ存在していなくても、そのパフォーマンスを評価、最適化、予測し、主観的に評価できるようになります。”❖

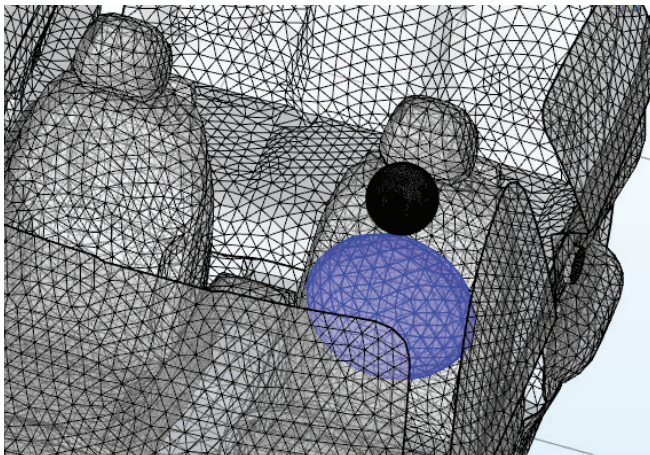


図6. 両耳インパルス応答(耳が音をどのように受け取るのか)の予測に使用したCOMSOL®で作成したメッシュ。

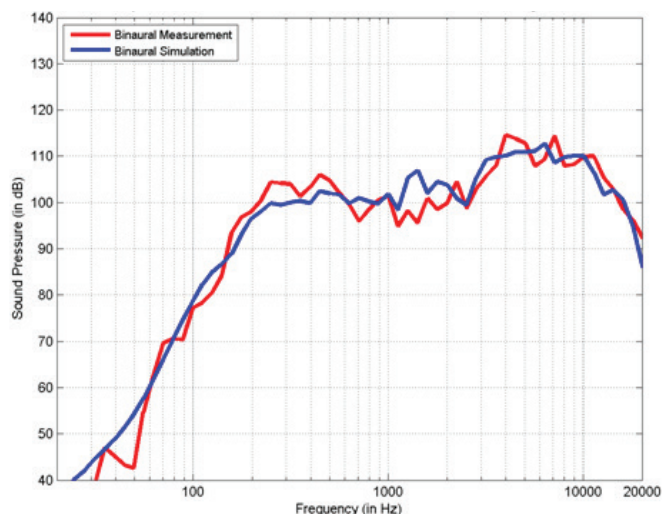


図7. 周波数領域におけるBRIRの測定値とシミュレーション値の比較。



HARMAN社VPDチームは、MARUTHI SRINIVASARAO REDDY氏、MICHAŁ BOGDANSKI氏、MICHAEL STRAUSS氏、NINRANJAN AMBATI氏、FRANCOIS MALBOS氏で構成されています。

精密性能: 完璧な測定の追求

Brüel & Kjær 社の研究者たちは、工業用および測定用のマイクロフォンやトランスデューサーの新しいレベルの精度と正確さを達成するためにシミュレーションを使用しています。

VALERIO MARRA 著

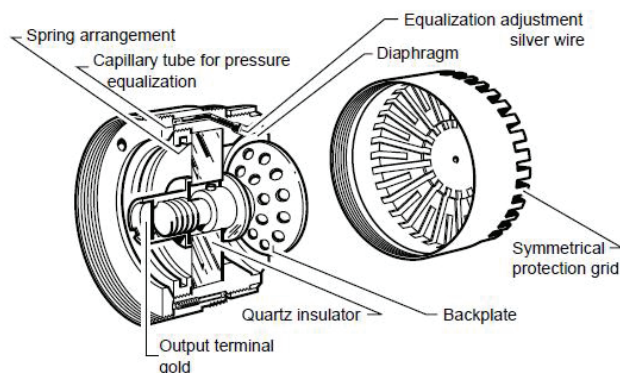


図 1. 左: 振動板の上に取り付けられた保護グリッドを含む4134マイクロフォンの写真. 右: 主要部材を示す典型的なマイクロフォンカートリッジの断面図.

完璧な測定や絶対的な測定器は存在しません。私たちは自分の測定値を暗黙のうちに信頼しているかもしれませんが、測定器が測定するものを定義しているわけではないので、測定値が完璧であることはありません。その代わりに、測定器は周囲の現象に反応し、絶対的な標準の不完全な表現に対してこのデータを解釈するのです。

そのため、すべての測定器には許容できる誤差の度合いがあります。つまり、測定の有用性を否定することなく、測定値が異なっても許容できる許容量があるのです。課題は、長期間にわたっても、既知で一貫性のある誤差範囲を持つ機器を設計することです。

Brüel & Kjær A/S 社は、40年以上にわたって音響振動の測定と解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 などがあります。

交通騒音、空港騒音、自動車エンジン振動、風力タービン騒音、製造品質管理など、業界の音と振動の課題は多岐にわたるため、Brüel

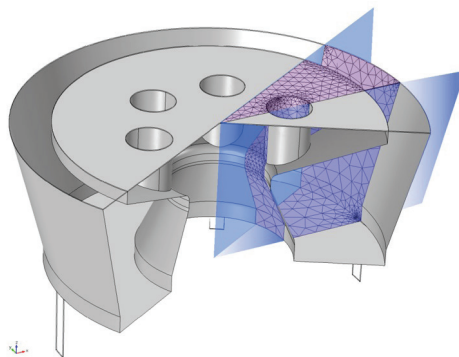


図 2. 4134 コンデンサーマイクの形状プロット。この図は、縮小セクタージオメトリで使用されるメッシュを示しており、ジオメトリ全体の 1/12 を表しています。

& Kjær 社は様々な測定基準を満たすマイクロフォンと加速度計を設計する必要があります。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、デバイスの精度と正確さを検証し、新しく革新的な設計をテストする方法としてシミュレーションが含まれています。

⇒ 正確なマイクの設計と製造

Brüel & Kjær社は、低周波から超音波まで、また聴力閾値以下から通常の大気条件下での

最高音圧までのレベルをカバーするコンデンサーマイクロフォンを開発、製造しています。この製品群には、作業用標準マイクロフォンや、ラボ用標準マイクロフォンのほか、特殊用途向けの専用マイクロフォンも含まれます。一貫性と信頼性は、Brüel & Kjær社の全てのマイクロフォンの開発において重要なパラメーターです。

“コンデンサーマイクロフォンの開発ではシミュレーションを使用し、関連する国際電

気委員会 (IEC) や国際標準化機構 (ISO) の規格に適合していることを確認しています。”と Brüel & Kjær 社のマイクロフォン研究開発部門で開発エンジニアを務める Erling Olsen 氏は述べます。“シミュレーションは、他のツールとともに研究開発プロセスの一部として使用されており、当社のマイクロフォンがさまざまな条件下で確実に動作することを確認しています。例えば、静圧、温度、湿度の影響や、その他の要因の影響を正確に把握しています。シミュレーションを使わなければ、測定が非常に困難であったパラメーターです。”

図1に示した Brüel & Kjær の4134型コンデンサーマイクロフォンは、長い間、多くの理論的、実用的な研究が行われてきた古いマイクロフォンです。したがって、4134マイクロフォンは、Brüel & Kjær 社製コンデンサーマイクロフォンのマルチフィジックスモデルを開発するためのプロトタイプとして使用されました。マイクロフォンの性能を解析するため、Olsen 氏のシミュレーションには、振動板の動き、電気信号発生に伴う振動膜の変形による電気機械的相互作用、共振周波数、およびマイクロフォンで発生する粘性音響損失と熱音響損失が含まれています。

⇒ マイクロフォンモデリング

マイクロフォンに音が入ると、音圧波が振動板に変形を引き起こし、それが電気信号として測定されます。これらの電気信号は、サウンドデシベルに変換されます。“マイクロフォンのモデリングには、動くメッシュと密接に結合した機械的、電気的、音響的な問題を解析する必要があります。これはマルチフィジックスなしてでは実行できませんでした。”と Olsen 氏 氏は言います。“ほとんどの場合、(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小さな寸法が、マイクロフォンの性能において熱損失と粘性損失が重要な役割を果たすため、モデルは非常に詳細である必要があります。”

このモデルは、バックプレートとダイアフラムの間に生じる相互作用の予測にも使用できます。とりわけ、これはマイクロフォンの指向特性に影響します。“シミュレーションを使って、ダイアフラムの曲げパターンを解析しました。”と Olsen 氏は言います。熱応力や共振周波数などのシミュレーションでは、モデルの対称性を利用して計算時間を短縮しました

(図2参照)。この縮小モデルは、マイクロフォンの振動板に垂直入射した音のマイクロフォン内の音圧レベルの解析にも使用されました (図3参照)。しかし、音がマイクロフォンに非正規入射で入射する場合、メンブレインは非対称な境界条件にさらされます。このため、メンブレインの曲げを正確に捉えるためには、形状全体を考慮したシミュレーションが必要になります (図4参照)。

シミュレーションは、低周波音を測定するためのマイクロフォンの通気口の影響を調べるためにも使われました。“通気口が外部の音場に露出している場合、音場の外にある場合 (露出していない場合)、通気口がない場合のマイクロフォンをモデル化しました。”と Olsen 氏は言います。“後者は実際には行われませんが、異なる低周波の挙動について、通気口の形状と入力抵抗の結果の相互作用を調べることができました。これはシミュレーションで最も重要なことのひとつです。モデルのパラメーターを変更することで、すでに製造されたデバイスから離れることができるため、他の設計をテストし、デバイスの限界を探ることができます (図5参照)。”

シミュレーションを研究開発プロセスの一部に組み込むことで、Olsen 氏と彼の同僚は Brüel & Kjær 社の主力製品の設計とテストを行えるだけでなく、特定の顧客の要求に基づいてデバイスを作成することもできます。

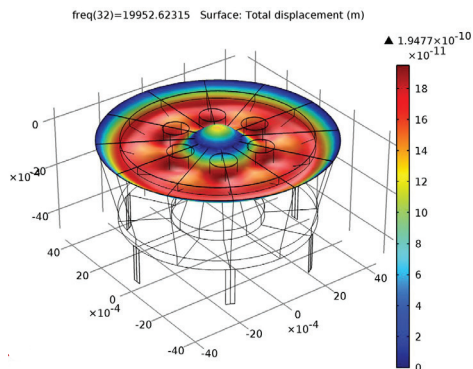


図3. セクター形状を使用して計算された、垂直入射の振動板の下に音圧レベルの表示。メンブレインの変形は $F = 20 \text{ KHz}$ で評価されます。

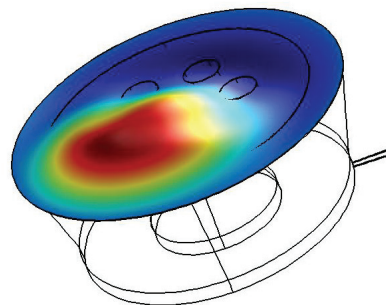


図4. 25 KHz での非垂直入射に対して計算されたメンブレインの変形を示すシミュレーション結果。変形は非対称であるため、フル 3D モデルを使用して計算されます。

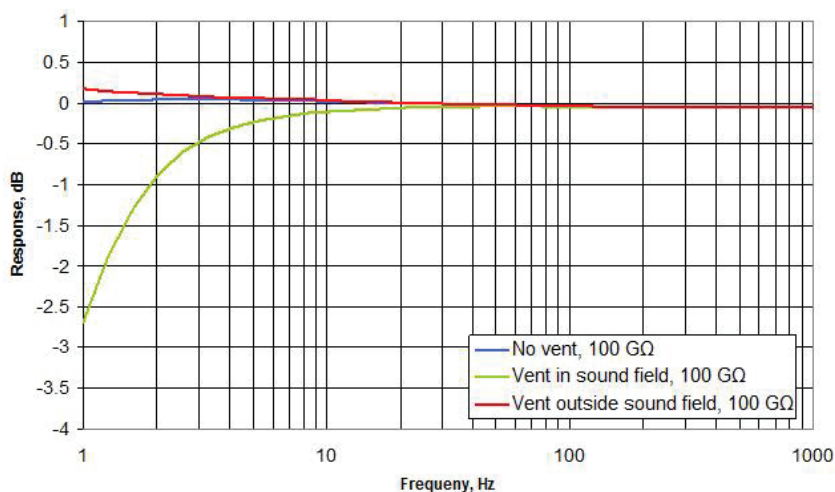


図5. 通気口のない構成では、非常に低い周波数で音場がマイクロフォン内で純粋に等温になるため、感度が向上します。音場構成の外側に通気口がある場合、最初は通気口なしの曲線に従いますが、通気口が振動板の裏側で圧力を解放するため、感度はさらに高まります。

“シミュレーションによって、顧客のニーズに基づいた具体的な改善アプローチをピンポイントで行うことができます。マイクロフォンの音響特性はテストだけでは測定が難しいのですが、ある構成について物理モデルとシミュレーションを照らし合わせて検証した後、シミュレーションを使って他の構成や環境を解析することができます。ケースバイケースです。”

⇒ 振動トランスデューサーのモデリング

Brüel & Kjær 社の開発エンジニアである Søren Andresen 氏も、シミュレーションを使用して振動トランスデューサーの設計とテストを行っています。

“振動解析用のトランスデューサーの設計における複雑さの 1 つは、これらのデバイスが耐えられる必要がある過酷な環境です。”と Andresen 氏は言います。“私たちの目標は、非常に過酷な環境に耐えられるほど多くの抵抗を内蔵したデバイスを設計することでした。”

ほとんどの機械システムは、共振周波数が比較的狭い範囲内に限定される傾向があります。通常は 10 ~ 1000 Hz です。トランスデューサー設計の最も重要な側面の 1 つは、デバイスが測定対象の振動と同じ周波数で共振しないことです。これは、測定結果に干渉するためです。図 6 は、吊り下げられた振動トランスデューサーの機械的変位と、デバイスの共振周波数のプロットを示しています。

“トランスデューサーにはフラットな応答を持たせ、測定する必要な振動範囲に対して共振周波数がないようにしたいと考えています。”と Andresen 氏は言います。“私たちは、COMSOL を使用してさまざまな設計を実験し、特定の設計で平坦なプロファイル（共振のない）を生み出す材料と形状の組み合わせを決定しました。これはトランスデューサーが使用される領域です。”

トランスデューサーを設計するとき、ローパスフィルターまたは機械フィルターを使用して、トランスデューサーの共振によって生じる

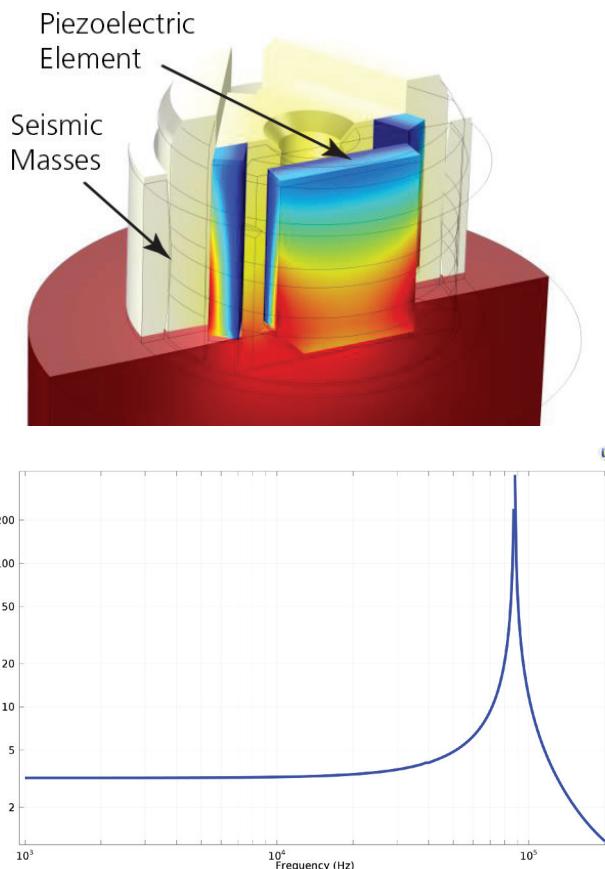


図 6. 吊り下げられた圧電振動トランスデューサーのシミュレーション結果。上: 機械圧電感知素子と振動質量の変形と電場。下: 90 KHz 付近でのトランスデューサーの最初の共振を示す周波数応答プロット。このデバイスは、90 KHz よりもはるかに低い周波数で物体を測定する場合にのみ使用します。

不要な信号があればそれを除去できます。これらのフィルターは、2つの取り付けディスクの間に接着された媒体（通常はゴム）で構成され、その後トランスデューサーと取り付け面の間に固定されます。

“経験則として、周波数の上限をトランスデューサーの共振周波数の 3 分の 1 に設定します。そのため、周波数の上限で測定された振動成分の誤差は 10 ~ 12% 以内であることがわかります。”と Andresen 氏は言います。

⇒ 可能な限り正確かつ精密に

完璧なトランスデューサーを設計し、確実な測定を行うことは不可能かもしれませんが、シミュレーションにより、研究チームと設計チームがこれまで以上に緊密になり、さまざまな動作シナリオに対する新しい設計ソリューションを迅速かつ効率的にテストできるようになります。

“競合他社に先んじるためには、独自の知識が必要です。”と Andresen 氏は言います。“シミュレーションによってこれが得られます。他の方法では実験的に決定できなかった調整や仮想測定を行うことができるため、革新的な新しい設計をテストして最適化することができます。”❖

“シミュレーションを使用すると、顧客のニーズに基づいて具体的な改善を行うためのアプローチを特定できます。”

— ERLING OLSEN, 開発エンジニア, BRÜEL & KJÆR

マルチフィジックスソフトウェア でロケットシステムにおける 平均流拡張音響をモデル化

固体ロケットモーターや液体エンジンにおける燃焼の不安定性は、設計者やエンジニアにとって常に課題となっている複雑な問題です。マルチフィジックス解析によってサポートされる、より忠実度の高いモデリングアプローチを採用することで、より優れた洞察力と予測能力が得られます。

SEAN R. FISCHBACH 著

多くのロケットシステムは、燃焼プロセスとガス力学の間の複雑な相互作用に起因する、圧力、速度、温度の激しい変動を経験します。燃焼不安定性が深刻な場合、変動振幅は平均チャンバー圧力以上の値に達する可能性があります。大きな振幅の振動は、インジェクターの損傷、ロケット性能の損失、ペイロードの損傷、そして場合によってはケースの破損やミッションの失敗につながります。

サターンVロケットに動力を供給したF1エンジンのインジェクターフェースプレート。

燃焼不安定性のモデリングと予測には歴史的な困難があったため、不安定性が発生したロケットシステムのほとんどは、試験を通じて費用のかかる修正を行うか(図1参照)、システム全体を廃棄するしかありませんでした。

“燃焼不安定振動のより完全な描写は、グローバルなエネルギーベースの評価を使用した場合に達成されます。”

ロケット推進技術の初期開発中、科学者や技術者は、振動するテストスタンドの測定、変動する排気プルームの観察、そして最も注目すべきは不安定性に伴う可聴音を通じて、根底にある物理を手がかりにしました。これらの観察により、燃焼不安定性研究の先駆者たちは、燃焼室内の音波にモデリングの取り組みを集中させるようになりました。

測定された振動周波数が燃焼室の通常の音響モードとよく一致することを考えると、この音響への焦点は非常に論理的です。しかし、この狭い焦点では、音響波の直接の結果である、または音響波と密接に結合している回転波や熱波による寄与が見逃されます。グローバルなエネルギーベースの評価を使用すると、燃焼不安定性振動のより完全な描写が達成されます。

燃焼不安定性のエネルギーベースのモデリングにおける最近の進歩には、音響周波数とモード形状の正確な決定が必要です。特に興味深いのは、圧力、密度、速度の勾配が大きくなるロケットノズルの収束セクション内の音響平均流量の相互作用です。ロケットのノズルを通した非定常エネルギーの放出は、ほとんどのロケットシステムにとって音響減衰の主な原因であることが確認されています。

最近、平均流効果を伴うノズルの減衰に対処するアプローチが French²によって実装されました。この新しいアプローチは、Sigman と Zinn³によって開発された研究をオイラー方程式⁴を摂動させて定式化した音響速度ポテンシャル方程式 (AVPE) を解くことによって拡張したものです。

AVPE (ψ は複素音響ポテンシャル、 λ は複素固有値、 c は音速、 M はマッハベクトル)の固有値を決定する式

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

は、従来使用されてきた圧力ベースの波動方程式

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

よりもかなり複雑であり、チャンバー流れ場と固有値の数値近似を必要としています。

⇒ チャンバーガスダイナミクスのモデリング

高速流の振動擾乱に関する最新の理論モデルは、チャンバー音響固有モードの正確な決定を必要とします。しかし、その前に燃焼室の平均流動特性のシミュレーションを実行する必要があります。

COMSOL Multiphysics® ソフトウェアは、燃焼室のガスダイナミクスと内部音響の両方を簡便かつ正確にシミュレーションできる数値計算プラットフォームを提供します。この有限要素ソフトウェアパッケージは、一般化された数学インターフェースとともに、多くの定義済みフィジックスを提供します。

この研究では、COMSOL 有限要素フレームワークを使用し、理想気体に対する完全圧縮ナビエ・ストークス方程式とエネルギー保存式および質量保存式を用いた高マッハ数層流フィジックスインターフェースを用いて、

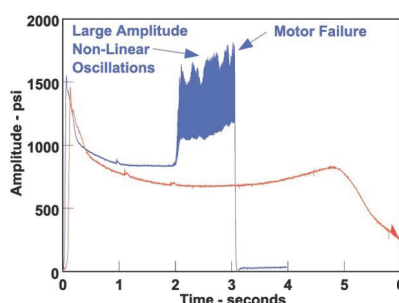


図1. 安定 (赤) と不安定 (青) の固体ロケットモーター¹の圧力トレース。

一般的な液体エンジンの定常流れ場のパラメーターをモデル化しました。

燃焼推進剤による高温ガスの噴射を考慮するため、インジェクターのフェースプレートは、燃焼推進剤ガスの均一な内向流でモデル化されています(図2参照)。他のすべての固体

境界はスリップ境界条件でモデル化され、出口面はハイブリッド流出条件でモデル化されます。つまり、亜音速流と超音速流の両方がサポートされます。

平均流量解析の結果が有効で収束した解であることを確認します。AVPEをモデル化するには、圧力、密度、速度、音速などの平均流量パラメーターが必要です。音速チョーク面近くのノズルの収束部分の平均流量の値は、非常に興味深いものです。マッハ数が1に等しい音速平面は、流れの中に音響障壁を作成します。音響解析用の正確なジオメトリを作成するために、音速平面(図3のマゼンタで示されている)が平均流量解析から抽出されます。

⇒ 室内音響モデリング

AVPEの複素固有値の決定には、COMSOL Multiphysicsの係数形式PDE(偏微分方程式)数学インターフェースを使用します。AVPEの平均流項は、平均流解析の解から供給されます。燃焼室内のガスダイナミクスは、音響解析の境界条件を定義する上で重要な役割を果たします。ロケットノズルの収束部および散逸部では、チャンバーの圧力、速度、密度の勾配は、マッハ数が1に等しいソニック面で理論的に無限大になります。音速面の下流では、音響擾乱は音速以上の速度で平均流と対流します。

この条件は、音速面の下流で発生した妨害が上流に逆伝播するのを防ぎます。ノズルの分岐部分は音響的に無音であり、チャンバーの音響に影響を与えません。シミュレーションのジオメトリはノズルのソニックラインで切り取られ、そこでは自動的に満たされるゼロ流束境界条件が適用されます(図4参照)。残りの境界は、すべての表面で音響吸収がゼロであると仮定して、ゼロ磁束境界条件でモデル化します。

固有値解析により、各音響モードとその複素共役を表す複素固有モードと固有値が生成されます。複素固有値の実部は音響モードの時間減衰を表し、虚部は振動数を定義します。複素固有ベクトルは、音響波の空間振幅と位相を表します。

古典的な均質波方程式(ヘルムホルツ方程式)を用いて導出された音響モード形状と、AVPEを用いて導出された音響モード形状を比較すると、基礎となる物理を正しく表現する、より忠実度の高いモデルの利点がわかり

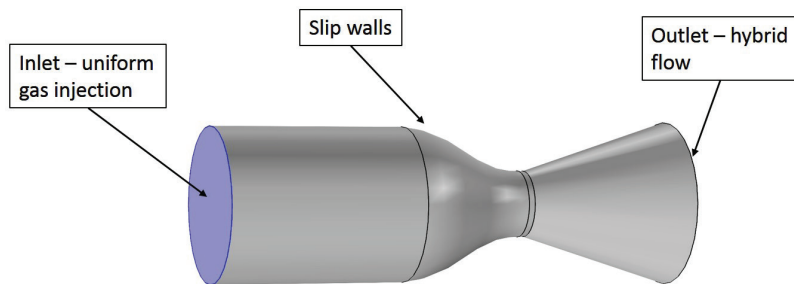


図2. 境界条件を使用してシミュレートされた液体エンジンの形状。

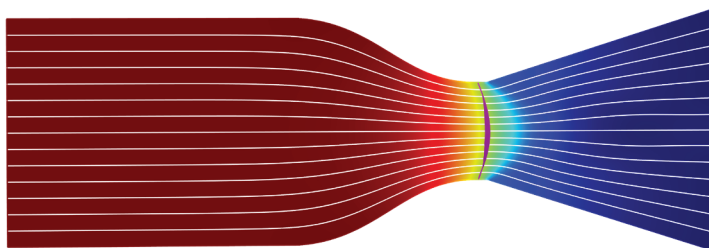


図3. チャンバー圧力に対してプロットされた速度流線。マッハ1の表面はマゼンタでプロットされています。

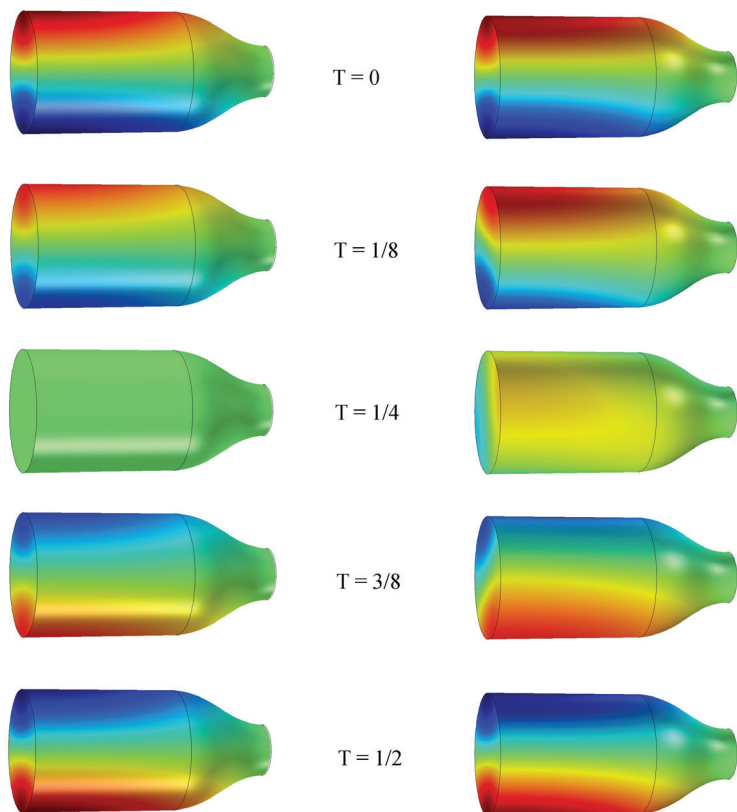


図5. 古典的な均一波動方程式を使用して計算された最初の接線固有モード (左) と、振動の半周期 (T) の AVPE (右) の比較。

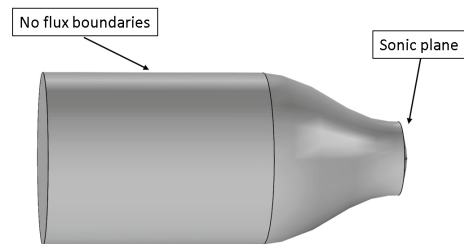


図4. 境界条件を備えた音響解析ジオメトリ。

ます (図5参照)。AVPEに平均流の項を含めることで、定常的なガス流による位相シフトを正確にモデル化することができます。燃焼不安定性モデルは音響固有ベクトルの時間的空間的統合を利用するため、位相は非常に重要です。

COMSOL Multiphysics を利用してロケットガスのダイナミクスと音響固有モードのシミュレーションを行うことで、従来の手法よりも正確なモード形状を得ることができました。

より忠実度の高い音響表現は、燃焼不安定性モデルに簡単に組み込むことができ、ロケットの設計者やエンジニアに高い予測能力を提供します。バッフルなどの減衰装置の組み込みや動作条件の変更も、試験前により正確にモデル化できるようになりました。

⇒ さらなる研究

燃焼の不安定性をより完璧に表現するには、回転振動と熱振動をチャンバー音響と組み合わせる必要があります。回転振動は音響振動の直接的な結果として発生し、熱振動は音響変動がない場合にも発生します。COMSOL Multiphysics を使用したさらなる研究では、すべての音響振動に付随する粘性回転波の解明に焦点を当てます。❖

この記事は、Sean R. Fischbach 氏 (Marshall Space Flight Center/Jacobs ESSA Group, MSFC, Huntsville, AL) により執筆されました。

参考文献

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. 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.
4. 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.



マヒンドラ オートバイの 騒音の背後にあるもの

Mahindra Two Wheelers 社では、マルチフィジックスシミュレーションを使用して、顧客満足度を維持しながら、高級オートバイのエンジン騒音規制要件を満たすことができました。

VALERIO MARRA 著

Mahindra Two Wheelers 社は、インド市場向けに幅広い種類のスクーターとオートバイを製造しています。開発サイクルの早い段階で数値シミュレーションツールを採用したおかげで、ドライバーと同乗者は、インドの厳しい道路でも優れた走行性能と燃費を楽しむことができます。Mahindra 社では、マルチフィジックスシミュレーションを使用して、オートバイのエンジン、吸気、排気システムの NVH（騒音、振動、ハッシュネス）性能を解析しました。

数値シミュレーション研究で得られた知識により、同社のエンジニアはオートバイのエンジンの構造設計を改善し、望ましい騒音レベルを達成することができました。“COMSOL ソフトウェアのおかげで、設計の反復回数を大幅に減らすことができ、時間を節約することができました。” Mahindra 社 R&D 副マネージャーの Niket Bhatia 氏は述べました。

⇒ 最適な騒音レベルの達成

エンジンには、吸気プロセス、燃焼プロセス、ピストン、ギア、バルブトレイン、排気システムなど、多くの騒音源があります。燃焼騒音は、シリンダー内の急激な圧力上昇による構造振動が原因です。これらの振動は、パ

ワートレインからベアリングを通してエンジンケーシングに伝わり、騒音を放射します。

物理試験のみによる音響解析は、高価で時間のかかるプロセスです。Mahindra社のチームは、物理試験を音響モデリングで補完し、エンジンの構造がどのように騒音放射を促進するかを解析することにしました。研究の目標は、エンジンの中で最も騒音を発生する部分を見つけ、それを低減できるような構造の変更を考え出すことでした。

研究者らは、COMSOL Multiphysics® ソフトウェアを使用して、燃焼負荷がかかった単気筒内燃 (IC) エンジンの音響放射解析を行いました。技術者たちは、完全整合層 (PML) で囲まれた計算領域でエンジン外皮を囲みました。PMLは出射波をほとんど反射させずに減衰させます (図1)。これにより、計算領域を縮小しながら正確な結果を得ることができます。

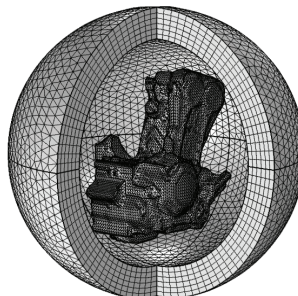
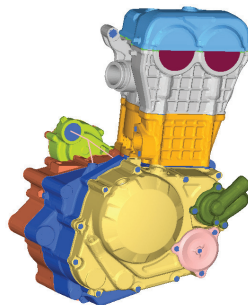


図1. 上: エンジンCAD形状. 下: 完全整合層 (PML) で囲まれたメッシュ化された3Dモデル。

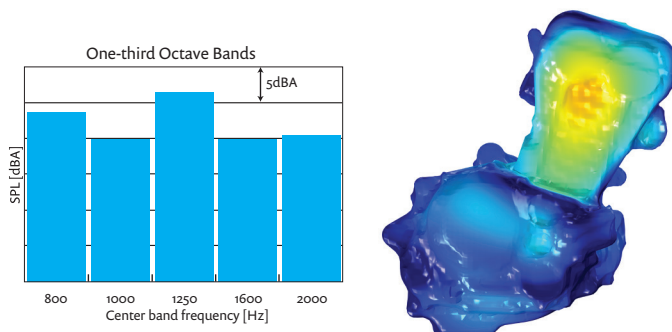


図2. 左: 1/3 オクターブバンドのプロット。右: 3D 表面プロット音圧レベル (SPL) のシミュレーション結果。

研究チームは、800 Hz～2000 Hzの周波数帯域に重点を置いて解析を行うことを決定しました。これは、燃焼負荷時のオートバイのエンジン音放射が、音響スペクトルのこの領域で支配的であることが物理実験で示されていたためです。この選択により、チームは計算リソースを節約し、どの領域が最も騒音を放射しているかをよりよく理解することができました。

この解析に基づき、音圧レベル (SPL) が調査され、シリンダーヘッドとブロックに、リップの高さと肉厚の増加、取り付け位置の強化などの修正が加えられました (図2)。これらのパラメーターを調整することで、目標とする周波数帯域でSPLの低減を達成しました。

⇒ 吸気構造ノイズの低減

吸気騒音と排気騒音の両方が通過騒音の主な原因となります。通常プラスチック製のエアフィルター構造から放射される騒音は、騒音の主な原因の1つです。プラスチック製エアフィルター壁の音響伝達関数 (ATF) 解析を実行しました。エアフィルターの構造を改良し、リップを設けてATFを向上させました (図3)。これは、エアフィルターの構造ノイズを低減するのに役立ちました (図4)。

⇒ 伝達損失を解析してマフラー音を改善

規制要件は、マフラーからのより大きな‘鳴り音’に対する顧客の要求と常に競合しています。これは、オートバイのパワーを示す重要な指標として認識されているためです。通過騒音の制約の中で、Mahindra社のエンジニアの課題は、低周波でのマフラーからの‘ブルブル’という音を増大させ、高周波の音レベルを下げることでした。

エンジンの排気騒音の減衰がマフラーの主な機能ですが、低い背圧を提供し、通過騒音規制を満たす能力などの要素も考慮する必要があります。自動車の排気システムにおけるマフラーの性能は、伝達損失、挿入損失、放射騒音レベルの3つのパラメーターによって特徴付けられます。伝達損失は最も重要なパラメーターと考えられており、圧力源とは関係なく、マフラーの設計によってのみ決定されます。Mahindra社のチームの課題は、オートバイのマフラーの伝達損失を予測し、特定の周波数範囲で損失を望ましいレベルに最適化することでした。

解析対象としたのは単気筒オートバイエンジンのマフラーです。マフラーの伝達損失解析はCOMSOL Multiphysicsを使用して実施さ

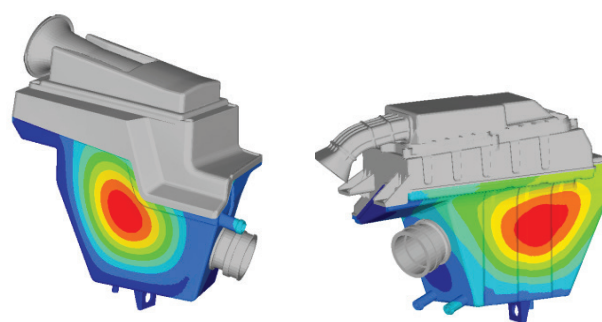


図3. エアフィルターの構造 左: オリジナルデザイン。右: ATFを向上させるためのリップを備えた変更されたデザイン。

れました。音響モジュールを使用すると、連続性や健全な硬い壁などの境界条件が適切な位置に適用されました。

パイプの穿孔は、内蔵の伝達インピーダンスモデルを使用して穿孔領域の気孔率の詳細を与えることによって定義されました。解析に必要な入力は、領域の気孔率、バッフルとパイプの厚さ、穴の直径でした。グラスウールなどの多孔質材料の場合、ソフトウェアで利用可能な多孔音響モデルを使用して流れ抵抗率が定義されました。単位圧力が入口での入力として与えられ、平面波放射条件が入口と出口の両方の境界に適用されました。

その結果を踏まえ、マフラー内部のパイプ長を長くするなど

マフラーの設計を変更しました。改良されたマフラーにより、チームは低周波数での伝達損失の低減を達成しました (図5)。その結果、低周波数でのノイズレベルの増加、つまり‘ブルブル’というノイズを得るという望ましい結果が達成されました。

⇒ 設計サイクルの早い段階での最適化はコストと時間の節約につながります

“個人的には、ソフトウェアの柔軟性と COMSOL API のような利用可能なツールがとても気に入りました。”と Mahindra 社の R&D マネージャー、Ulhas Mohite氏は述べました。“これにより、Java コードを使用してプロセス自動化を実行できるよう

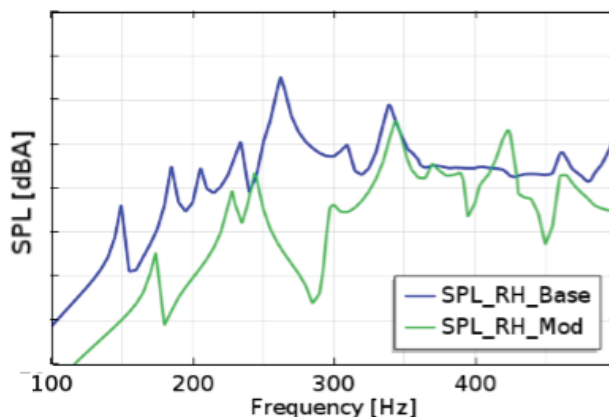


図4. シミュレーション結果は、修正されたエアフィルター設計により構造ノイズが減少することを示しています。

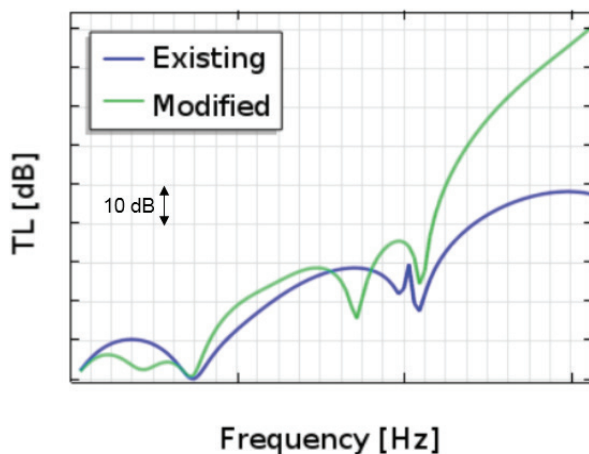


図5. 異なる設計間の伝送損失 (TL) の比較. 改良された設計は、低周波数での伝送損失が減少し、高周波数での伝送損失が増加することの特徴としています。改良された設計により、規制を満たしながら、求められていた「ブルブル」音を実現しました。

“アプリケーションビルダーを使用してシミュレーションアプリを作成し、解析出力ファイルを比較し、SPL データをプロットしました。これにより、時間を大幅に節約できました。”

— ULHAS MOHITE, R&D マネージャー, MAHINDRA

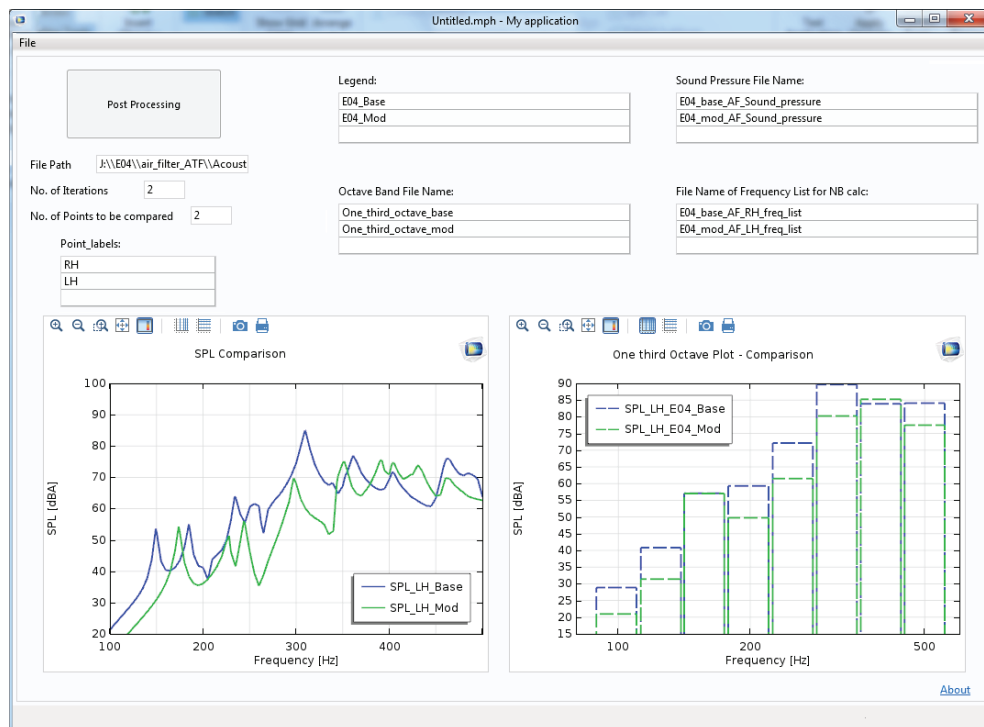


図6. MAHINDRA 社のエンジニアはアプリケーションビルダーを使用して、使用しやすいシミュレーションアプリを作成しました。解析ファイルを比較し、音圧レベル (SPL) データをプロットします。

になり、たとえば音響解析を処理しながら、異なる周波数ステップに異なるメッシュを使用して、シミュレーションの精度と計算時間の間の適切な妥協点を見つけることができました。また、シミュレーション実行の途中で、表面 SPL プロットや遠方場 SPL データなどの必要な出力を自動的にエクスポートできるようになりました。これにより、手動による後処理とデータのエクスポートにかかる時間を大幅に節約できました。”

Mohite 氏は、COMSOL で利用できるアプリケーションビルダーツールが非常に便利であることを見出しました。“アプリケーションビルダーを使用してシミュレーションアプリ (図6) を作成し、解析出力ファイルを比較し、SPL データをプロットしました。これにより、時間を大幅に節約できました。”

解析結果は物理実験データと非常に密接に相関していることが判明しました。Mahindra 社のエンジニアは、シミュレーションを使用して、設計段階の早い段階で解析結果に基づいて構造変更を実行することで修正措置を講じることができました。これにより、製品開発にかかる時間とコストの両方が削減されました。“実験に裏付けられたこれらのシミュレーションは、オートバイの騒音問題に対する効率的な解決策を見つける正しい方向に私たちを導きます。”とBhatia氏は締めくくりました。❖

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.
2. 音響モデリングによるオートバイのエンジン騒音の低減, COMSOL ブログ



スプレッドシートからマルチフィジックスアプリケーションまで, ABB は変圧器業界を強化し続けます

新しい改良された電源変圧器装置を開発する企業は, 変圧器のハムを低減するために試作とテストにコストがかかります。ABB 社では, エンジニアの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ム構築アプリケーションを開発し, 設計への洞察を提供します。

LEXI CARVER 著

料理から携帯電話の充電まで, 私たちは毎日, 家庭, 会社, 学校などの建物に電力を供給する送電網に依存しています。この複雑なネットワークには, 発電所, 長距離に電気を運ぶ高電圧送電線, 各家庭や近隣に電力を供給する配電線, 潮流制御と保護に使用される関連ハードウェアが含まれます。

この機器の中には, 交流を運ぶ電力線の電圧レベルを増減させるための電源変圧器

もあります (図 1 を参照)。より高い電圧での電力伝送は損失が少なくなるため, 電力を長距離伝送する場合により適しています。ただし, このような高電圧レベルは送電線の両端で安全上の問題を引き起こすため, 変圧器を使用して電力供給点の電圧レベルを上げ, 近隣や建物の近くで電圧レベルを下げます。

しかし, 変圧器にはノイズが伴い, 近くを歩いているときに聞こえるかすかなハム音やブ

ーンというノイズとして現れることがよくあります。それらを完全に消すことは不可能ですが, 規制により安全な音量レベルを遵守することが求められており, 優れた製品設計によりこれらの音響効果を最小限に抑えることができます。

世界中で使用されている変圧器の最大手メーカーの 1 つである ABB 社(本社はスイスのチューリッヒ) は, 数値解析と計算アプリケ



図 1. 高圧送電線の変圧設備の写真。

ーションを使用して、変圧器のノイズレベルを予測し、最小限に抑えています。COMSOL Multiphysics® シミュレーションソフトウェアとそのアプリケーションビルダーを通じて、仮想設計チェックを実行し、さまざまな構成をテストし、モデルを中心に構築され、カスタマイズされたユーザーインターフェースを通じてシミュレーション結果を展開しました。

⇒複数の発生源からの音を消す

変圧器のノイズは、変圧器コアの振動や冷却システムで使用される補助ファンやポンプなど、複数の発生源から発生することがよくあります。ノイズを低減するには、これらの発生源のそれぞれに別々に対処する必要があります。

ABB 社の変圧器は、さまざまなセクションに巻き付けられたワイヤーのコイルを備えた金属コア、これらの部品を保護する筐体またはタンク、およびタンク内の絶縁油で構成されています (図2の上を参照)。1つのコイルの巻

線に交流電流を流すと磁束が発生し、隣接するコイルに電流が誘導されます。電圧調整は、コイルの巻き数を変えることで実現されます。

コアは磁歪材料である鋼でできているため、これらの磁束は方向が交互になり、機械的歪みが発生します。これにより、金属の急速な成長と収縮によって振動が発生します。これらの振動は、オイルと内部コアを所定の位置に保持するクランプを通してタンク壁に伝わり、コアノイズとして知られる可聴ノイズを発生させます (図2の下を参照)。

コアノイズに加えて、コイル内の交流により個々の巻線にローレンツ力が発生し、タンクに伝達される機械エネルギーを増加させる負荷ノイズとして知られる振動を引き起こします。

スウェーデンの Västerås にある ABB コーポレートリサーチセンター (ABB CRC) のエンジニアは、このような複数のノイズ源と、相互に関連する電磁的、音響的、機械的要因が存在するため、変圧器のハムノイズを最小限に

抑えた設計を最適化するために、変圧器の内部構造を理解する必要がありました。

⇒音響効果、機械効果、電磁効果をオールインワンで達成

“COMSOL Multiphysics を利用することにしたのは、さまざまなフィジックスを簡単に組み合わせることができるからです。”と ABB CRC の科学者、Mustafa Kavasoglu 氏は述べていました。“このプロジェクトでは電磁気学、音響学、力学をモデル化する必要があったため、これら 3つのフィジックスを 1つの環境で求解するには COMSOL® ソフトウェアが最良の選択肢でした。”

Kavasoglu 氏、主席科学者の Anders Daneryd 博士、主席エンジニアの Romain Haettel 氏は、変圧器の音響を研究する ABB CRC チームを結成しました。彼らの目的は、変圧器のコアと巻線に発生する磁束 (図3、左参照)、巻線のローレンツ力 (図3、右参照)、磁歪

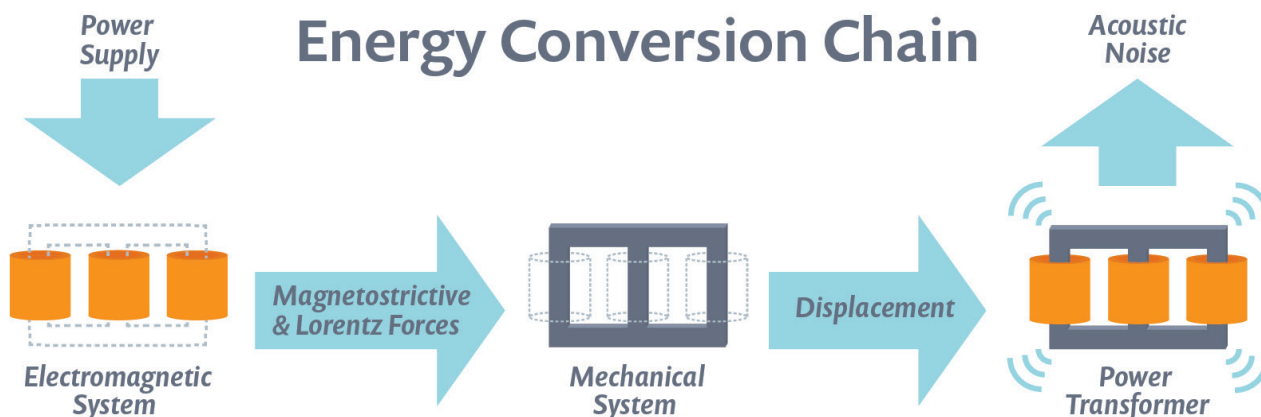
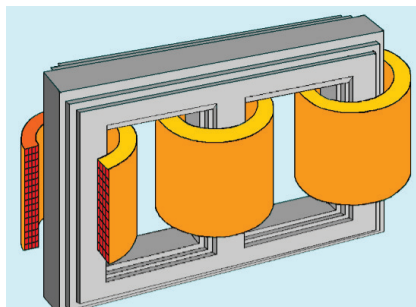


FIGURE 2. 左上: コアの周りに巻線が取り付けられた三相変圧器の能動部分の CAD モデル。右上: オイルが満たされたタンク内に置かれた電源変圧器のアクティブ部分。下: コアノイズと負荷ノイズ発生の原因となるエネルギー変換チェーン (コアの磁歪と巻線のローレンツ力)。

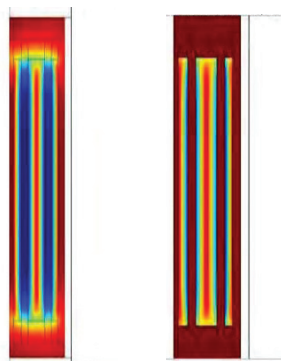


図 3. 変圧器コイル巻線の磁束密度 (左) とローレンツ力 (右) を示すシミュレーション結果。

ひずみによる機械的変位、タンク内を伝播する音響波の圧力レベルを計算するための一連のシミュレーションと計算アプリを作成することでした。

彼らは ABB 社、変圧器ビジネスユニットと密接に協力し、電力変圧器の分野で著名な専門家である Christoph Ploetner 博士の経験と専門知識に頼ることも多く、ビジネスニーズと要件を満たすようにしています。

あるシミュレーションでは、磁歪によってコアから発生するノイズをモデル化しています。チームはまず、交流電流によって誘起される磁場を予測する電磁モデルから始め、次に鋼材の磁歪を予測しました。

スチールコア、巻線、そしてタンクを表す外側の領域からなる形状を設定しました。モーダル解析を使用して、さまざまな周波数の共振から変位を取得しました”と Kavasoglu 氏は言いました (図 4 を参照)。“磁歪歪みによって共振が容易に励起され、これらの周波数で大きな振動増幅が引き起こされます。”

その後、油中を移動する音波を予測し、周囲環境への音響放射を示唆するタンクの振動を計算することができました (図 5 を参照)。

“また、COMSOL Server™ ライセンスを使用して、テストのためにアプリを他のオフィスに配布しているため、アプリを簡単に共有できます。この世界規模のライセンスは素晴らしいです。私たちはグローバルな組織と協力し、世界中の他の拠点のユーザーもこれらのアプリの恩恵を受けることを期待しています。”

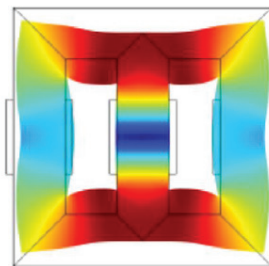
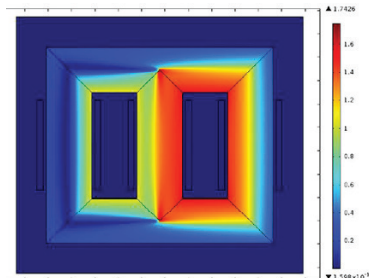


図 4. 左: 鋼鉄内の磁束のレベルを示す COMSOL® ソフトウェアの結果。右: コアの共振を示す結果。見やすくするために変形は誇張してあります。

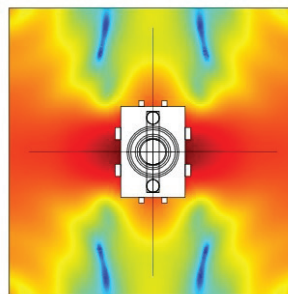
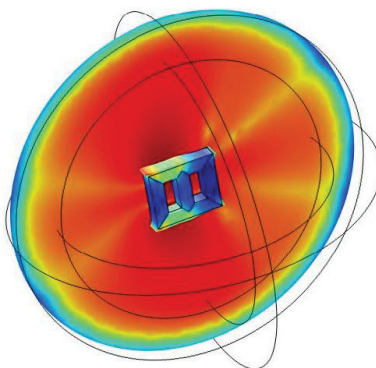


図 5. コア周囲 (左) と変圧器周囲 (右) の音圧場を示す音響解析の結果。

また、負荷ノイズの原因となるコイル巻線の変位をシミュレートし、結果として生じる音場によってタンク壁にかかる表面圧力を決定しました (図 6 を参照)。

設計パラメーター (タンクの厚さや材料特性など) と結果として生じる変圧器のハムの間の複雑な関係を示すパラメトリックスタディを含めることで、コア、巻線、タンクの形状と設定を調整してノイズを最小限に抑えることが可能になりました。

⇒ ABB 全体に広がるシミュレーション機能

CRC チームは COMSOL ソフトウェアを使用し続け、理解とモデルを向上させるだけでなく、ABB 社の残りの設計者やビジネスユニットに知識を広めます。COMSOL Multiphysics のアプリケーションビルダーを使用して、マルチフィジックスモデルからアプリの作成を開始しました。このアプリは、各部門のニーズに合わせ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により、設計者や研究開発エンジニアのテストと検証が簡素化されます。“設計者は、統計と経験的モデルに基づく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導入することでギャップを埋めています。アプリケーションビルダーのおかげで、有限要素理論を学ばなくても、ユーザーインターフェースを介して有限要素解析にアクセスできるようになりました。”と Haettel 氏は説明しました。

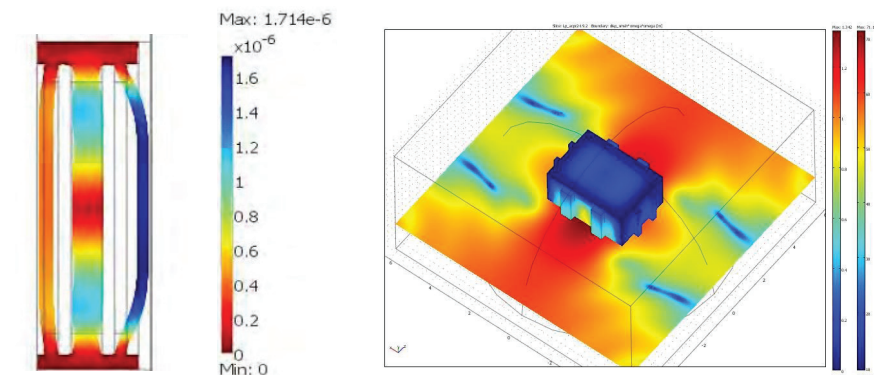


図 6. 左: 巻線の変位を示すシミュレーション結果。見やすくするために変形は誇張してあります。右: タンク外部の音圧レベルと壁の変位を示す結果。

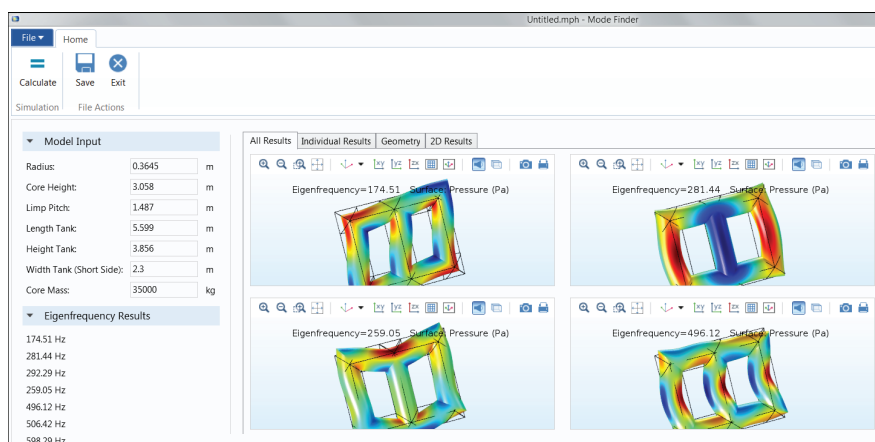


図 7. 変圧器コアの固有周波数を計算するために作成された最初のシミュレーションアプリのトリミングされたスクリーンショット。左側のアプリのタブにはモデルの入力が表示されます。右に、計算された固有周波数の結果が示されています。見やすくするために変形は誇張してあります。

1つのアプリケーション (図 7を参照) は、可聴範囲内の周波数によるノイズ関連の問題を示唆する可能性がある変圧器コアの固有周波数を計算します。このアプリには、COMSOL® ソフトウェアで開発された物理モデルと、アプリケーションビルダー内でプログラムされた 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。

“当社の設計者は、頻繁に構築する変圧器に適した標準スプレッドシートを使用しています。しかし、新しい設計や異なる寸法が導入された場合、このアプローチでは、ノイズレベルの精度が低いデータを示すエラー出力などの問題が発生する可能性があります。完成した変圧器にノイズを低減するための追加

の対策が必要な場合、これにはかなりのコストがかかる可能性があります。”と Haettel 氏は続けました。

“コスト面だけでなく、時間的な側面もあります。新しいアプリは、FEAコードの精度を利用することで、設計者の仕事をより簡単かつ効率的にします。”

このカスタムアプリケーションは、形状、材料特性、その他の設計パラメーターの特定の組み合わせが、結果として得られる変圧器のハムにどのような影響を与えるかをユーザーがチェックできるようにすることで、利便性を高めています。“どのパラメーターにアクセスできるようにするかは、最も重要なものに絞って慎重に選びました。”と Kavasoglu 氏は付

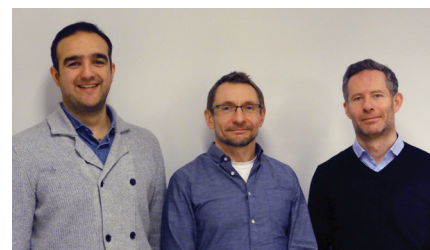
け加えました。

ABB 社が変圧器を設計する産業用途は多岐にわたるため、このような柔軟性は設計やバーチャルテストのプロセスで非常に役立っています。“ABB 社は、あらゆる産業ニーズに対応する変圧器を製造しています。現在、私たちは、都市全体に電力を送配電する電力会社で一般的に使用されている交流大型電源変圧器に注力しています。”と彼は説明しました。

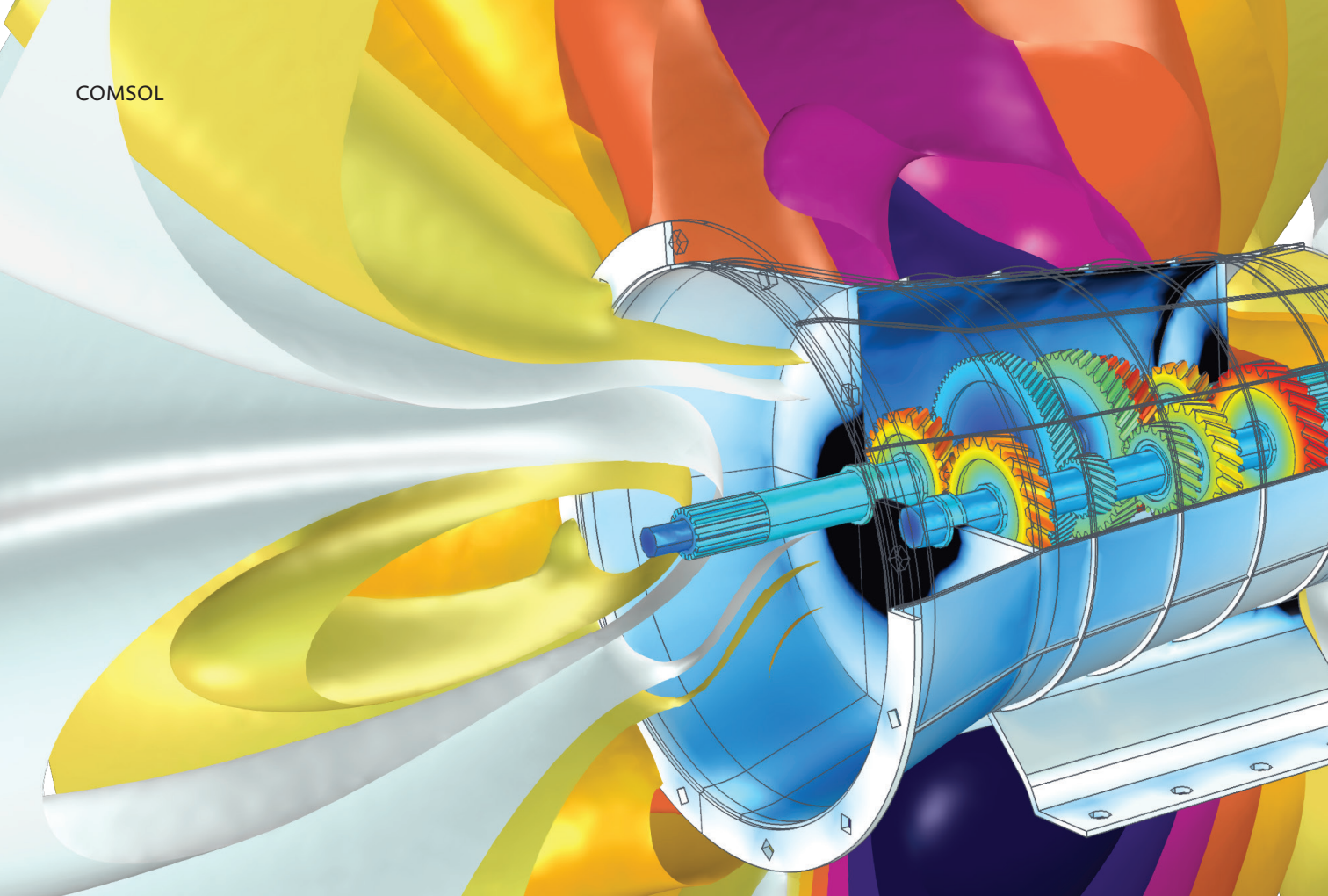
“しかし、私たちが行っている作業は、どのようなタイプの変圧器にも対応できます。もちろん、特定の要望があれば、アプリをそのニーズに合わせることもできます。アプリケーションビルダーのおかげで、知識と技術の移転が非常に簡単になりました。”

“また、COMSOL Server™ ライセンスを使用して、テストのためにアプリを他のオフィスに配布しており、これによりアプリの共有が容易になります。この世界規模のライセンスは素晴らしいです。グローバルな組織であるため、世界中の他の拠点にもユーザーがいることを期待しています。これらのアプリの恩恵を受けることができます。” COMSOL Server をローカルにインストールすると、シミュレーションスペシャリストはアプリを管理および展開し、クライアントまたはウェブブラウザからアクセスできるようになります。

チームは、負荷ノイズを計算する 2 番目のアプリケーションに焦点を当てています。このアプリケーションを事業部門に導入すると、面倒な計算の負担がさらに軽減され、設計者やセールスエンジニアは詳細なモデルを操作する必要なく、より多くの仮想テストを実行できるようになり、ABB 社は世界最高の変圧器をより迅速かつ簡単に製造できるようになります。❖



左から右へ: ABB CRC の MUSTAFA KAVASOGLU 氏, ROMAIN HAETTEL 氏, ANDERS DANERYD 氏。



ギアボックス内の振動と騒音のモデル化

ギアボックスなどの動的システムからのノイズ放射を予測することで、設計者は設計プロセスの早い段階で洞察を得ることができます。

PAWAN SOAMI 著

エンジンから車輪に動力を伝達するために使用されるギアボックスは、2つの理由から騒音を放射します。まず、あるシャフトから別のシャフトに動力を伝達するギアは、ベアリングとハウジングに望ましくない横方向の力と軸方向の力を及ぼします。第2に、ベアリングやハウジングなどのギアボックスのさまざまな部品の柔軟性により、振動が発生する可能性があります。

ギアボックスでは、ギアの噛み合いの剛性が増えると持続的な振動が発生し、その振動がハウジングに伝わり、ハウジングが振

動して周囲の流体（例えば、ギアボックスオイル）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ル化し、シミュレーションするには、接触解析、マルチボディダイナミクス解析、音響解析を実行する必要があります。

この解析で考慮したギアボックスには、カウンターシャフトに接続されたドライブシャフトと5対のヘリカルギアが備えられています（図1）。歯車のサイズは異なりますが、同じ材料である構造用鋼で作られています。

⇒ ギアメッシュの接触解析

弾性的であると仮定される歯車の噛み合いは、持続的な振動の発生源となります。そのため、ギアの剛性を異なる位置で評価する必要があります。ギアの歯は運転中に変形するため、ギアの噛み合いサイクルにおける剛性変化を決定するために定常パラメトリック解析が実行されます。ペナルティ接触法を用い、接触力につながる歯車のねじれを考慮した制約を与えます。

歯車対のフォン・ミーゼス応力分布を示すシミュレーション結果は、接触点および歯の根元で高い応力値を示しています（図2）。シミュレーションを使用すると、図2に示すように、シャフトの回転に伴うギアの噛み合い剛性の変化を見ることができます。

⇒ シャフト、ギア、ハウジングのマルチボディ解析

マルチボディ解析は接触解析によって予測されたギア噛み合いの剛性を使用して、ドライブシャフトの1回転分の時間領域で実行されます。

この解析はギアのダイナミクスとその結果生じるハウジングの振動を計算するために必要です。この場合、エンジン回転数 5000 rpm、出力トルク 2000 N・m で解析を行っています。シャフトとギアは、ギア噛み合いを除いて剛体と仮定し、その剛性は前回の接触解析から取得します。ハウジングは鋼で構成され、弾性とみなされます。

ドライブシャフトとカウンター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・ミーゼス応力分布を図3に見ることができます。騒音放射の原因となる振動ハウジングの法線加速度も図3に示されています。

図4は、ハウジング上部の法線加速度の時刻歴と周波数スペクトルを示しています。ハウジングが振動している主な周波数は1500Hzから2000Hzの間です。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騒音の音響分析

ハウジングが経験し、マルチボディー解析によって予測された法線加速度は、音響解析における騒音源として使用されます。このシミュレーションは周波数領域で実行され、ギアボックス外部の音圧レベルを予測します。通常の加速度値は時間領域であるため、前方FFT（高速フーリエ変換）を用いて周波数領域に変換します。ギアボックスを囲む空気領域では、音圧が計算されます（図6）。計算結果の精度に影響を与えずに計算領域のサイズを小さくするため、空気領域の外側の境界には球面波放射条件を適用し、出射する音響波が最小限の反射で

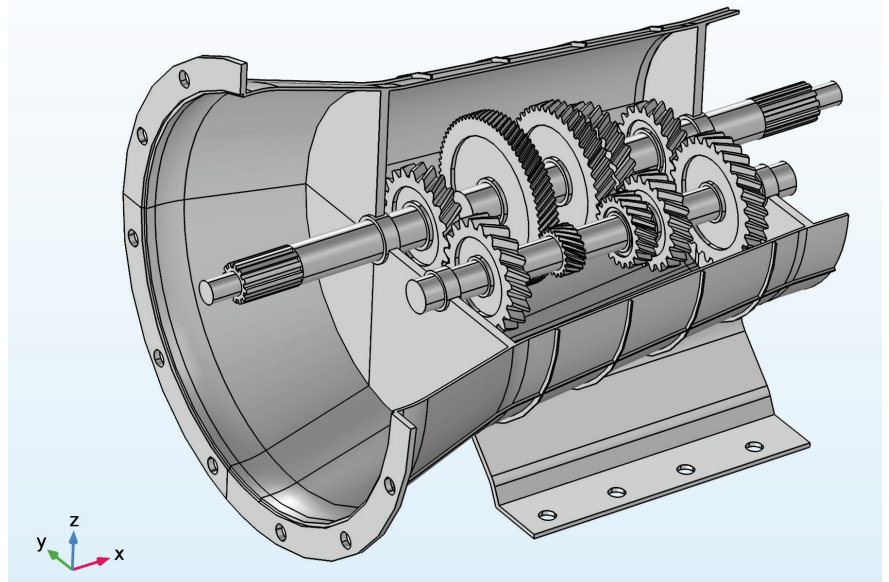


図 1. マニュアル変圧器ミッション車用5速シンクロメッシュギアボックスのモデル形状。マルチボディー解析で考慮されたギアボックスの選択された部分のみが描かれています。

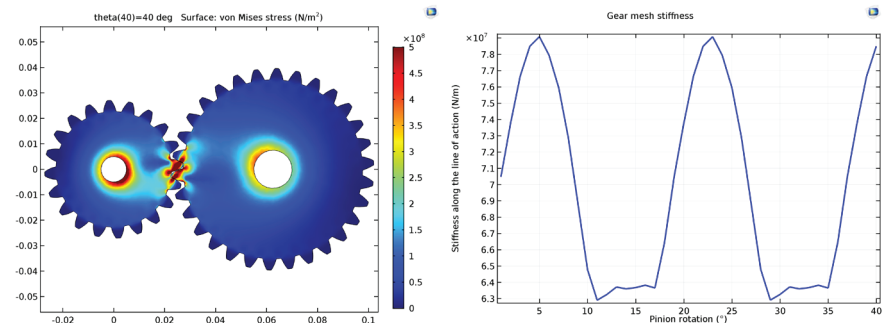


図 2. 左: ギアペアにおけるフォン・ミーゼス応力分布。右: シャフトの回転に伴うギア噛み合い剛性の変化。

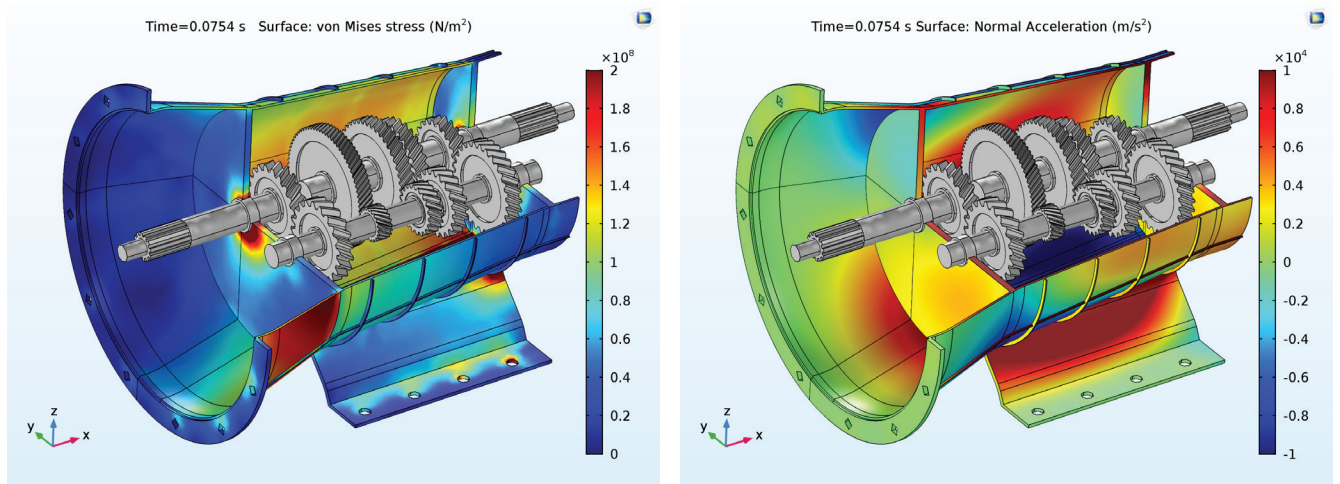


図 3. 左: ハウジング内のフォン・ミーゼス応力分布。右: ハウジングの法線加速度。

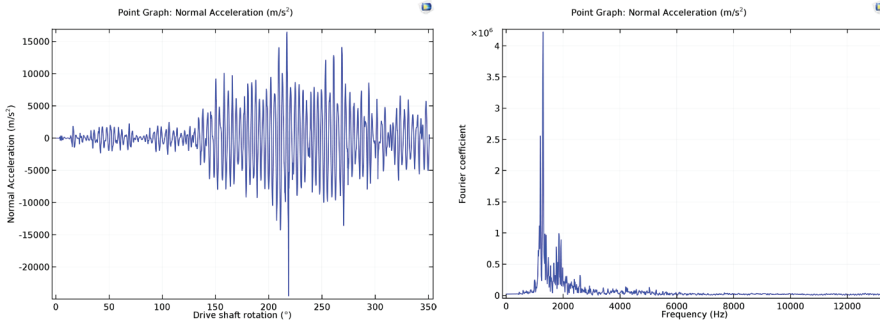


図 4. ハウジング上部の通常加速度。左: 時刻歴。右: 周波数スペクトル。

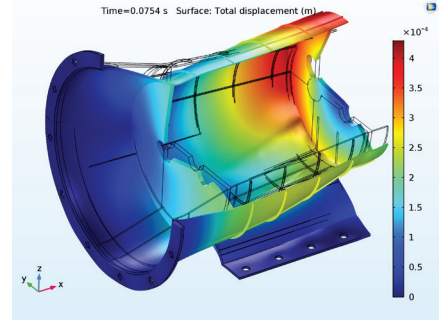


図 5. 200倍に拡大されたハウジングの変形。

モデリング領域から出るようにしています。

ハウジング表面と近接場での音圧レベル (SPL) を図7に示します。図8に示すように, SPL は遠方場でもプロットできます。異なる平面と 1mの距離における遠方場プロットは, 選択された周波数における騒音放射の支配的な方向を示します。

⇒ まとめ

発生する振動と騒音をシミュレーションするために, マルチボディー音響相互作用モデリングアプローチが採用されています。この手法は, ギアボックスの設計プロセスの初期段階で使用することができ, これにより, さまざまな運転条件に対して騒音の放射を最小限に抑えるように設計を改善することができます。❖

参考資料

- ソフトウェアによるギアボックスの騒音予測, Auto Tech Review, 2017年6月
- COMSOL Multiphysics®でギアボックスの振動と騒音をモデル化する方法, COMSOL ブログ
- ギアボックスの振動と騒音のモデリング, COMSOL アプリケーションギャラリー

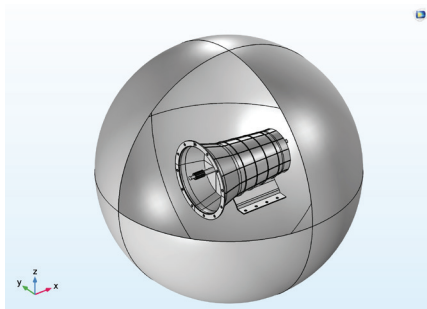


図 6. 音響解析に使用したギアボックスを囲む空気領域。

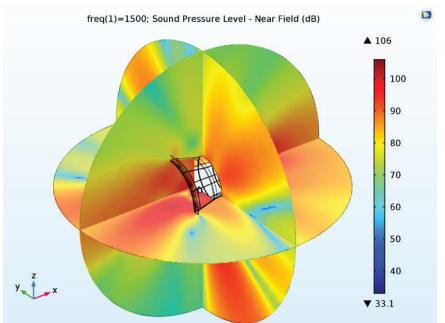
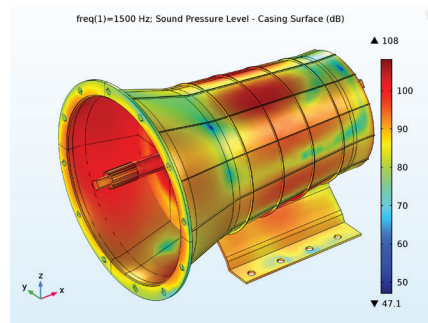


図 7. 1500 HZにおける音圧レベル。左: ハウジング表面。右: 近接場領域。

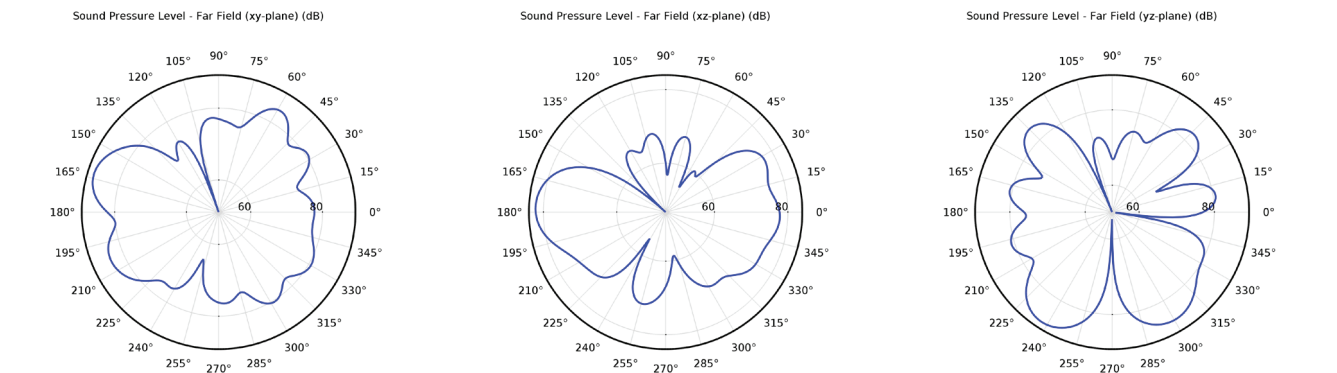


図 8. 1500HZにおける1Mの距離でのX-Y, X-Z, Y-Z平面それぞれの遠方場音圧レベル (DB).

音を操作し、制御する：最先端の音響メタマテリアル研究を支える数理モデリング

民生用オーディオから超音波イメージングに至るまで、音響遮蔽のためのメタマテリアル構造に関する研究の影響は広範囲に及び、魅力的です。研究者たちは数学的モデリングを用いて、変換音響と高度に異方的な構造を組み合わせた音響メタマテリアルを設計しています。

GEMMA CHURCH AND VALERIO MARRA 著

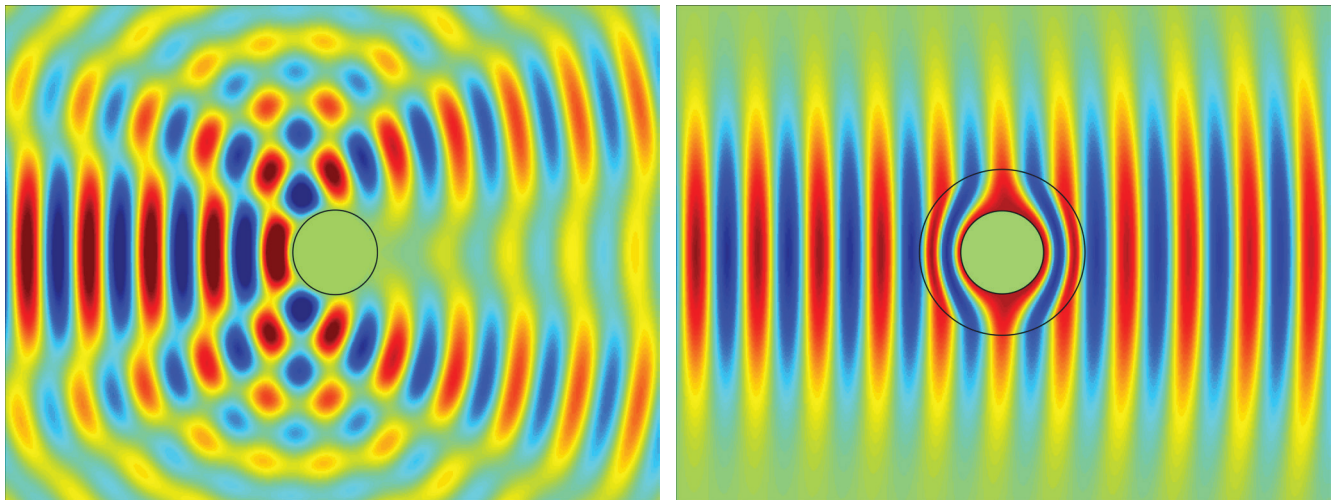


図 1. 物体からの音響波の散乱の制御。左：硬い物体から左から入射した波の散乱は明らかです：反射は準特異的で、影は深く、波のパワーの一部は全方向に広がっています。右：同じ物体を理想的な遮蔽シェルで囲むと、反射も影もなく、パワーはメタマテリアル物体の周りをほぼ損失なく伝わります。

メタマテリアルとは、屈折率がゼロ、あるいは負であるなど、自然界にはない特性を持つ人工の特殊加工材料のことです。その結果、スーパーレンズや吸音材など、最先端のデザインや機能性が生み出されます。最近の研究努力は、物体を音響的に見えなくするなど、メタマテリアルデバイスを使って音波を任意に操作することに向けられています。

この研究は成功を収めています。数枚の穴のあいたプラスチックシートと、驚異的な量の数学的モデリングと数値シミュレーションを駆使して、Duke 大学のエンジニアたちは世界初の3D音響クロークを実証しました。この装置は、音波を物体の周囲で滑らかに曲げ、影を埋め、音波が周囲の空気をまっすぐ通過したかのように見せてくれます。

音響的不可視性は、注意深く設計された材料がほとんど任意の方法で音波を変形させたり制御したりすることができる、変形音響学という広範な概念の一側面にすぎませ

ん。SF 的なものから日常的なものまで、この技術的ブレークスルーの応用の可能性はたくさんあります。

⇒ サイレントメタマテリアルの設計

Duke 大学は、MIT, California 大学 Berkeley 校, Rutgers 大学, Texas 大学 Austin 校とともに、米国海軍研究局主催の5年間の研究プログラムの一環として、実世界で製造可能な効果的な材料パラメーターを持つ音響メタマテリアルの新しいコンセプトを開発しています。Duke 大学の Steve Cummer 教授（電気コンピューター工学）は、次のように語りました：“数学モデルが出発点です。音響メタマテリアルの設計は数値シミュレーションによって最適化され、私たちはそれを最新の製造技術に変換し、実験的にテストします。”

同グループの現在の研究努力の焦点のひとつは、人体を含む水中環境で、到来する音波を任意に変換・制御するために使用できる

音響メタマテリアル構造の開発です。音響クローク（図1）は、変換音響によって可能になる任意の制御を実証するための有用な実験台であることが証明されています。水環境での設計は、電磁クロークと変換光学から、音響クロークと2D、そして空気中の3D構造における変換へと発展してきたメタマテリアル研究の転換を意味します。

“アプリケーションビルダーを使用してシミュレーションアプリを作成し、解析出力ファイルを比較し、SPL データをプロットしました。これにより、時間を大幅に節約できました。”

— STEVE CUMMER, DUKE大学, 電気コンピューター工学科

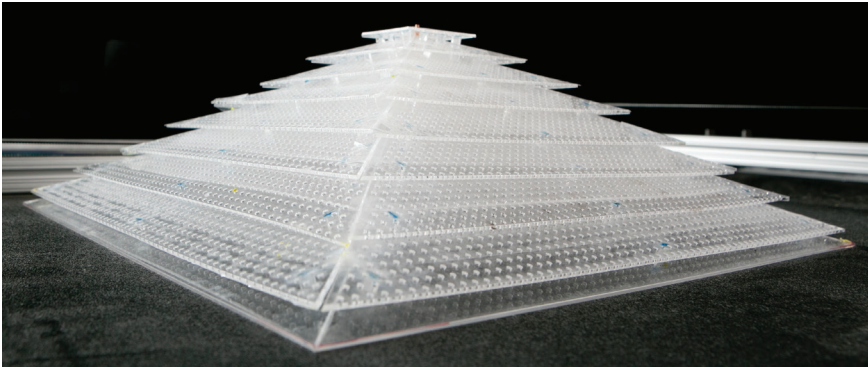
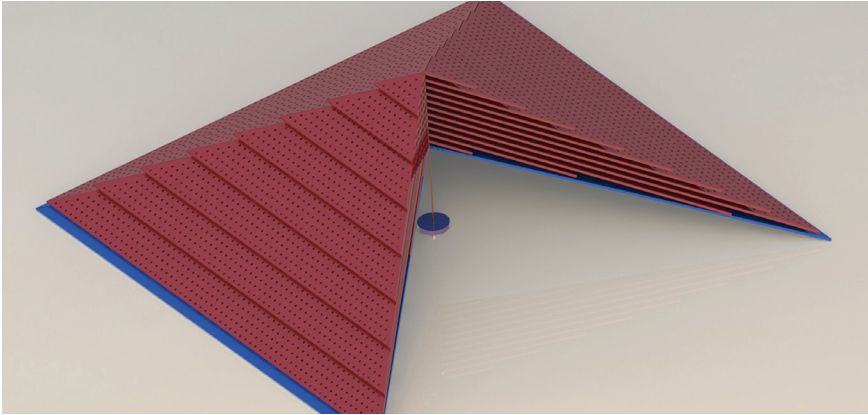


図 2. ピラミッド型3D音響遮蔽シェル設計図(左)と製作図(右).

COMSOL Multiphysics® ソフトウェアは、電磁クロッキングのごく初期にさかのぼり、研究のあらゆる段階で不可欠な製品でした。Cummer 氏は次のように述べました。“実際の電磁材料パラメーターを用いた電磁遮蔽のシミュレーションを示した最初の論文で、COMSOL® ソフトウェアを使用したのは、特に、任意に異方性の電磁材料パラメーターに対応できる唯一の電磁ソフトウェアツールの一つだったからです。”

音響の問題を解くために、研究者たちは必要な材料特性を導き出すことから始めました。Cummer 氏は次のように説明しました：“変換音響学を使って音を任意に制御するには、まず座標変換を適用して、特定の装置で音場をどのように曲げたり、ねじったり、変形させたいかを記述します。座標変換を定義したら、音場の特定の変形を作り出すために必要な効果的な材料パラメーターを導き出すことができます。”

結果として得られる材料パラメーターは、ほとんどの場合、異方性、つまり材料特性が方

向によって異なる挙動を示します。これを処理するために、研究者はシミュレーション対象の物理を表す方程式を変更できる必要がありました。“COMSOL は、材料特性とその基礎となる力学方程式を簡単かつ比較的容易に操作できます。これは本当に重要なことでした。というのも、モデルに異方性という一ひねりを加えることで、変形音響学的アプローチで探求していたいくつかの設計のシミュレーションを開始することができたからです。”と Cummer 氏は付け加えました。

その結果、実際の設計は大成功を収め、Cummer 氏によると、その性能はシミュレーションと“驚くほどよく”一致しました。“最近のメタ材料の論文では、構造体がそのとおりに機能するかどうかを示すために、音響メタ材料によって生成された完全な音場を測定し、それをシミュレーションと比較することが金字塔となっています。”と彼は付け加えました。

COMSOL Multiphysics® ソフトウェアは、人為的なミスによって研究が頓挫しそうになった場合でも、一貫してこのような一致を達成することができます。以前のプロジェクトでは、小さな穴の連なりを特徴とする2次元音響遮蔽シェルが設計・製作されましたが、実

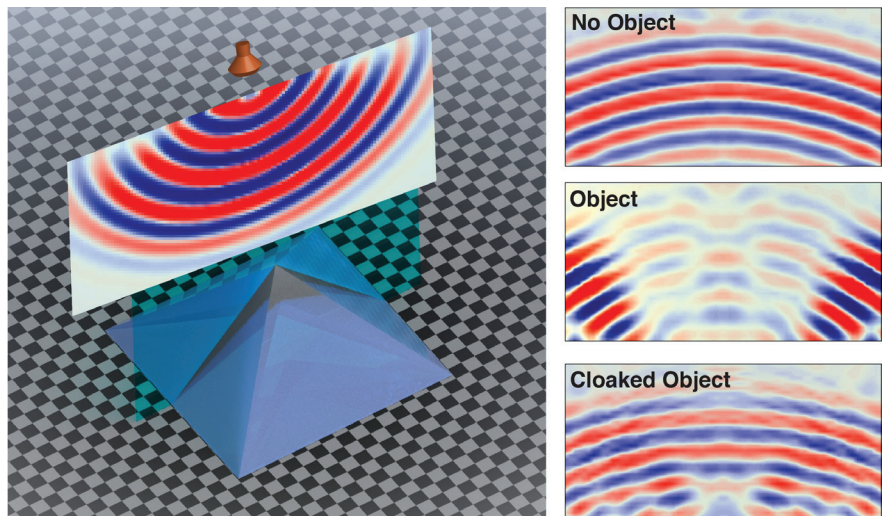


図 3. (左) メタ材料シェルをテストするため、3つの異なる構成で音響パルスを発射し、反射された音響パルスをスキャンマイクrophonで測定。(右) テスト対象物からの反射音パルスは、対象物がない場合とは劇的に異なります。遮蔽シェルが物体の上に置かれると、反射された音響パルスは、物体がない場合とは大きく異なります。

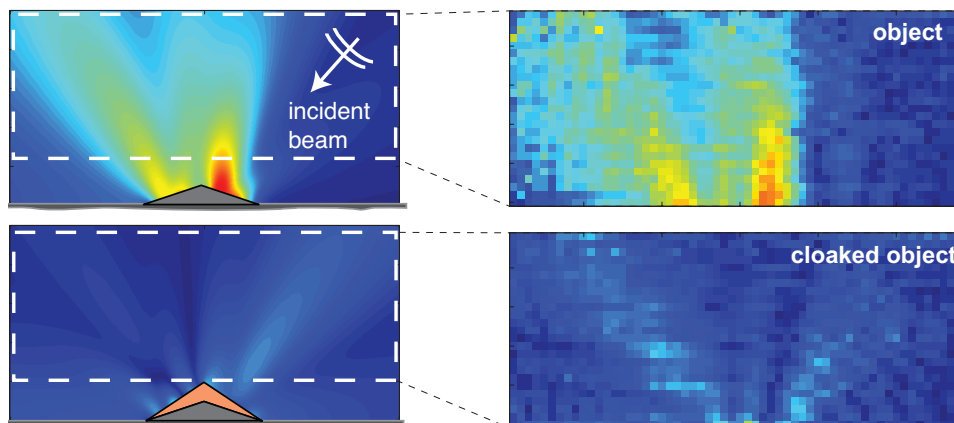


図 4. 散乱音場のシミュレーション (左) と測定 (右) がよく一致していることは、物体の音響遮蔽の程度を示すだけでなく、COMSOL が製造されたデバイスの性能を正確に予測していることを裏付けています。

験はシミュレーションと一致しませんでした。彼らは突然、構造体の穴の大きさが間違っていることに気づきました。

Cummer 氏は次のように述べました：“COMSOL の効率性は、私たちの仕事において非常に重要です。なぜなら、理想化されたパラメーターと、実際に構築する完全な構造の両方の数値シミュレーションを行い、それらが同じように動作することを確認できるからです。”

⇒ 音響メタ材料の製造とテスト

3D 音響クロッキングシェルの設計では、同じ基本的な多孔板構造をピラミッド型の形状に採用し (図 2)、その下に物体を音波から隠すことができます。この構造は、一見すると比較的単純な設計に見えるかもしれませんが、穴の直径、プレート間の間隔、プレートの角度など、望ましい音響変換を達成するために多くの要素のバランスがとれています。これらすべてのパラメーターが組み合わされて、構造を機能させるのに適切な量の音響異方性が与えられます。

このピラミッド構造は世界初の 3D 音響マントであり、実験室での測定により、音波の経路を変更して、マントとその下にあるものが存在しないかのような印象を作り出すことができることが確認されました (図 3)。このデバイスは、音がどの方向から来ているか、観察者がどこにいるかに関係なく、3 次元すべてで動作し、ソナー回避や建築音響などの将来

のアプリケーションの可能性を秘めています。

音響メタ材料シェルの必要な厚みを考えると、後者の方がより妥当な選択肢で、このような音響遮蔽装置は、例えばコンサートホールでの音響を最適化したり、騒がしいレストラン環境での音響を減衰させたりするために使用できます。Cummer 氏は次のように語りました：“遮蔽材料は、何かにスプレーできる魔法の塗料ではありません。一般的に言って、このようなアイデアを実際に展開することはできません。”

設計段階を超えて、モデリングとシミュレーションは、2D クロッキングシェルの実施 (図 4) の詳細解析を含めて、このようなメタ材料シェルの定量的性能を予測するために使用されています。これは、シェルによって散乱場がどの程度減少するかを示すだけでなく、音響メタ材料の製造における設計上のトレードオフを考慮した場合の散乱減少量を COMSOL で正確に予測します。

⇒ 空気から水へ、さまざまな媒体、新たな挑戦

現在、水中や人体内などの水性環境で音響メタ材料を機能させることに注目が移っています。マルチフィジックス モデリングは、最初に以前に設計された構造をマッピングし、水中でどのように機能するかをテストするためにシミュレーションを実行するための主要な設計ツールとして使用されます。空気か

ら水への移動は思っているよりも難しいです。

問題は、空気の機械的特性が水の機械的特性と大きく異なることです。Cummer 氏は説明しました：“だからこそ、空気中ではプラスチックや便利な固体で音響メタ材料を構築する必要がなくなります。固体は基本的に完全に硬い構造として機能し、音場の流れを制御できるからです。それが何でできているかは実際には問題ではありません。”

しかし、水の質量密度と圧縮剛性は、固体材料とそれほど変わりません。“音波が水中の固体構造にぶつかったと、その固体の機械的特性が大きく影響し始めます。私たちは設計段階で、音波エネルギーが固体とどのように相互作用するかを制御し、私たちが望む特性を維持できるようにするための新しい技術を考え出す必要があります。”と彼は付け加えました。

“音響学と構造力学を簡単に融合させる能力は不可欠であり、特に、メタ材料を構築するために使用している固体材料の力学的応答を無視できない水中の構造物を扱う場合には、不可欠です。空気音響学では、固体を無限に剛性のある材料として扱うことができます。これは簡単で計算効率も良いですが、水ベースの材料の場合、流体と構造の相互作用を考慮することが不可欠です。これは COMSOL では簡単なことです。”

研究から商業的に利用可能な音響メタ材料構造への飛躍は、単純なものではなく、そのような構造を確実かつ繰り返し作製できなければならないことを意味します。Cummer 氏は次のように締めくくりました：“音響メタ材料を作るための次のステップは、それが特定の定量的指標を達成できることです。つまり、より複雑な設計プロセスが必要になるわけですが、それこそが COMSOL の目的なのです。COMSOL は、より多くの設計反復と、特定の数値目標を達成するために操作できる設計の自由度を特定するための最適化の巧みな使用を可能にします。このようなアイデアを、概念実証のデモンストレーションから、実際に実用的で実世界で展開可能なものへと移行させる上で、今後重要な鍵となることは間違いありません。” ❖

ブルブル、ガタガタ、ゴロゴロ

ノルウェーの研究者は、不快な振動を軽減するための設計調整を推奨できるよう、低周波音波が建物内でどのように伝わるかを追跡しています。

JENNIFER HAND 著

空港の近くで寝たことがある人なら誰でも、その感覚を知っているでしょう。早朝のフライトでは、エンジンがうるさいだけでなく、周囲のすべてがブルブルと揺れているように見えるため、眠りから目が覚めます。同様に、風力タービン、軍事施設、またはヘリコプターの着陸パッドのある病院の近くに住んでいる人々は、外部の騒音があると窓がガタガタしたり、日用品がブンブンと鳴ったりすると苦情を言うことがよくあります。彼らにとってさらに不可解なのは、音を認識できない場合でも、不快な振動に気づく場合があるという事実です。

音の応答が 1 秒あたり 20 振動 (20 Hz) 以下の場合、超低周波音と呼ばれます。これは、元の音は通常人間の耳には聞こえないことを意味します。ただし、その影響は非常に簡単に検出できます。波が窓に当たり、床に広がり、内壁に影響を与えると、顕著な室内振動が引き起こされます。低周波音波は、迷惑な妨害を引き起こす可能性があることで知られています。

⇒ 建物内の低周波音波

騒音は現代生活の一部であり、音圧レベルの測定を使用して、人間に対する感度、侵入、危険のレベルで高周波音波を認識する正式な基準があります。Norwegian Geotechnical Institute (NGI) の Finn Løvholt 氏によると、超低周波音による建物振動の発生は、これまで広く調査されていない研究分野です。このため、地球科学分野の研究およびコンサルティングの国際センターである NGI は、ノルウェー国防施設局に代わって数年間調査プログラムを実行してきました。

“低周波音は、高周波音に比べて空気中を伝わる際の吸収が少ないため、より長い距離まで持続します。建物の外部から内部に伝わる音の量が大きくなります。私たちは聴覚の閾値で何が起こるかに興

“これまで実際のテストでこのレベルの一致を達成したことはありませんでした。それはすべて、COMSOL Multiphysics でさまざまな構造要素をどのようにモデル化できたかにかかっています。”

— FINN LØVHOLT, NGI

味があります。”と Løvholt 氏は説明します。“私たちは、外部音源からの音が建物とどのように相互作用し、人々に知覚される振動を生成するかを理解したいと考えています。その後、振動を防ぐための対策を推奨し、‘不快な’要素を考慮する必要性を認識した標準ユニットを提案できる可能性があります。”

⇒ 音波の広がりシミュレートする

Løvholt 氏と彼の同僚は、低周波音波が建物に衝突して浸透するメカニズムを解明できるコンピューターモデルを作成することにしました。彼らは COMSOL Multiphysics® ソフトウェアを使用して、壁で区切られた 2 つの部屋を持つ木造構造物をシミュレートし (図 1 上部を参照)、実験室の実験設定を厳密に模倣しました。モデル内では、一方の部屋にスピーカーを割り当て、もう一方の部屋にマイクを割り当て、音圧レベルと振動を監視するために構造物の周囲にさまざまなプローブを配置しました。鉄骨フレーム、壁の空洞と間柱、窓、合板

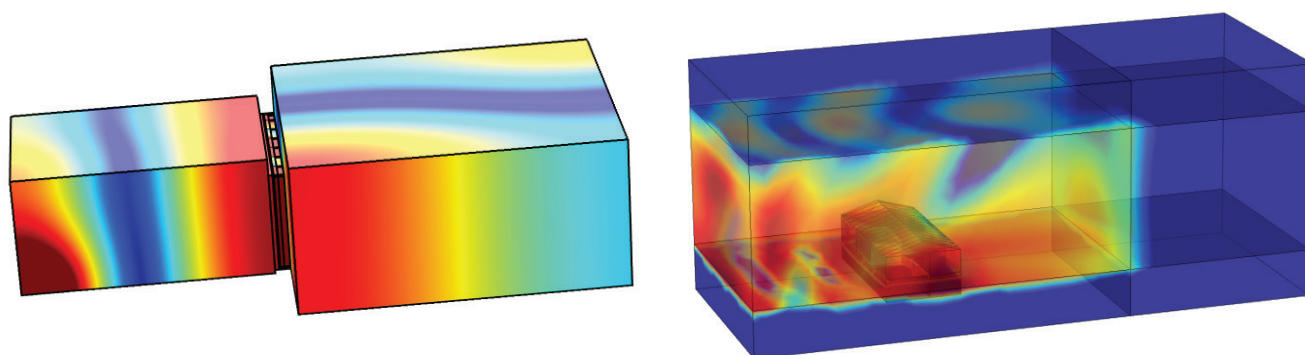


図 1. 左: 壁で区切られた 2 つの部屋を持つ実験室の音圧をシミュレートした結果。左側の部屋にスピーカーが設置されています。シミュレーションは、各部屋内の音響共鳴が遮音性に影響を与えることを示しています。右: 建物の外部、周囲、内部から発生するシミュレートされた低周波音。どちらの場合も、色は部屋と壁の空洞内の音圧の変化を示します。

シート、石膏ボードなど、すべての部材が慎重にモデル化されました。“各要素は音波の波長と圧力分布に応じて共鳴します。たとえば、スピーカールームには高い圧力があり、マイクルームには低い圧力があり、壁の共鳴はその長さ、厚さ、剛性によって決まります。”と Løvholt 氏は語ります。

チームはまた、ねじ止めされた 2 つの木材など、2 つの部材が結合されたときに生成される複合共鳴を認識する必要もありました。“COMSOL Multiphysics の利点は、監視する必要があるすべてのパラメーターを入力できることです。特に、フィジックスを組み合わせることができるため、たとえば、屋内の構造力学と相互作用する屋外の音の音響を調べることができます。カップリングは双方向に機能するため、フィードバックを特定できます。音波は広範囲にわたるさまざまな共鳴を生成する可能性があるため、このカップリングは解析にとって非常に重要です。このモデルを使用すると、実際にこれらを確認できるようになります。”

次に、NGI チームは、2 つの部屋がある木造建築物を通して伝わる低周波音の実験室テストでシミュレーションを検証しました。Løvholt 氏は、壁の動きと音圧レベルが主に測定される量であり、結果は COMSOL Multiphysics モデルと非常に密接な相関関係を示していると説明しています (図 2 参照)。“実際の壁の反応は非常に明瞭で、モデルはそれをほぼ完璧に模倣しています。これが最も壮観な側面です。”

このモデルは、建物内の音の伝達が、低周波が建物の部材の基本モード、部屋の寸法、建物外壁からの空気の漏れ方と相互作用する方法によって支配されることを示しています。天井や壁の振動が室内の低周波音の主な発生源であるようで、床の振動は室内の音圧によって引き起こされます。

⇒ 物理試験よりも安くて早い

“私たちは現在、低周波の音と振動を予測するツールを持ってい

ます。”と Løvholt 氏は言います。“これを使用して、窓の積層や壁の強化などの緩和策を設計およびテストできます。壁や窓の動きが少なくなると、音の伝わりも少なくなります。さらに、このモデルは、細部がシステムに与える影響を示します。たとえば、スタッドと石膏ボードの間のネジ接続が実際に構造全体の剛性を低下させるため、対策の効果がどのように低下するかなどです。”

チームの次の段階は、航空機騒音にさらされているノルウェーの地域にある実際の住宅での本格的なフィールドテストです。その間、チームはモデルの使用と開発を継続します。“これまで実際のテストでこのレベルの一致を達成したことはありません。それはすべて、COMSOL Multiphysics でさまざまな構造要素をどのようにモデル化できたかにかかっています。”と Løvholt 氏は結論づけます。“このモデルにより、意思決定を行い、対策を割り当てることができます。”

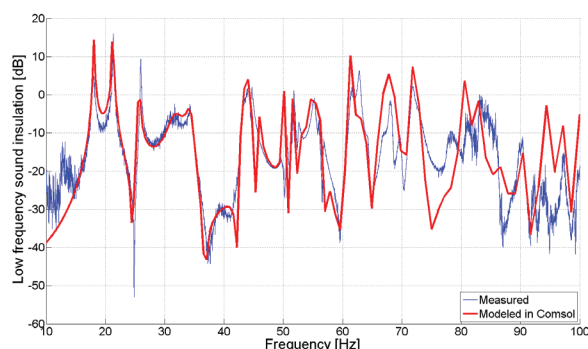


図 2. このモデルは、共鳴の位置とレベルを数デシベル以内で正確に捕捉します。周波数が増加するにつれて、ますます小さな構造内のより多くのモードが励起されます。これは、測定値とモデルの結果の差が増大していることを示しています。

補聴器研究の最先端

KNOWLES のエンジニアは、マルチフィジックスシミュレーションを使用してフィードバックと戦うために補聴器業界を結集しています。

GARY DAGASTINE 著

米国では人口の20%近くが聴覚障害を持っていると報告されています。ただし、多くの人が聴覚障害があることを認めたがらないため、この数字はさらに高くなる可能性があります。治療を受ける人は、聴力を改善し、ひいては生活の質を向上させるために、小型で目立たない補聴器に依存しています。補聴器をプロトタイプ段階から市場で売れる製品に仕上げるには、多大な研究開発努力が必要です。

エンジニアは補聴器の設計において日々技術的な課題に直面しています。フィードバックは大きな問題であり、甲高いキーキー音や口笛のような音を引き起こし、補助具が提供できるゲインの量が制限されます。“フィードバックは通常、補聴器のマイクが音を拾ったときに発生します。音や振動が外耳道に伝わる音から誤ってそらされ、アンプを通して送り返され、望ましくない振動を引き起こします。”と、イリノイ州 Itasca にある Knowles Corp. の上級電気音響エンジニアである Brenno Varanda 氏は説明します。

“Knowles の顧客の多くにとって、新しい補聴器の設計は費用と時間のかかるプロセスであり、完了までに2年から6年かかる場合もあります。”と Varanda 氏は説明します。正確なモデリングは、設計者がスピーカーを選択し、防振マウントを改良し、部品をパッケージ化して、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削減するのに役立ちます。業界は、そのプロセスを迅速化し、より効果的なオプションを消費者に提供するシンプルなトランスデューサーモデルを切実に必要としています。スピーカーとマイクの完全なモデルは非常に複雑で、フィードバック制御には必要のない多くの要素が組み込まれています。“Knowles のトランスデューサー設計者にとつ

て、トランスデューサーの電磁物理、機械物理、および音響物理を理解することは重要ですが、その複雑さのすべてが必ずしもお客様にとって役立つとは限りません。”と Varanda 氏は語ります。

Knowles 社は、補聴器トランスデューサー、インテリジェントオーディオ、および特殊音響部品の世界的リーダーおよび市場サプライヤーとして、実装が容易で聴覚健康の顧客と互換性のあるトランスデューサーの振動音響モデルを開発するために多角的な取り組みを行っています。これらのモデルは、精度を犠牲にすることなく、より効率的な方法で補聴器の設計がプロトタイプ段階から最終製品へと段階的に移行できるようにすることを目的としています。

⇒ 補聴器の設計とフィードバック

補聴器を設計する場合、エンジニアは相反する2つの主要な要件を考慮する必要があります。コンパクトで目立たなくても、ユーザーの難聴を克服する強力な音声出力を提供できなければなりません。補聴器が目立たず軽量である場合、ユーザーは補聴器を着用する可能性はるかに高くなります。これにより、フィードバックの問題の解決がより困難になります。“一般的な設計上の課題は、フィードバックの不安定性を引き起こすことなく、すべてのハードウェア部品を可能な限り最小のスペースに詰め込むことです。”と Varanda 氏は続けます。

一般的な小型耳かけ型 (BTE) 補聴器は、周囲の音を電気信号に変換するマイク、電気信号を処理して増幅するデジタル信号プロセッサとアンプ、および受信機としても知られる小型のスピーカーで構成されています (図1)。受信機またはスピーカーは、増幅された電

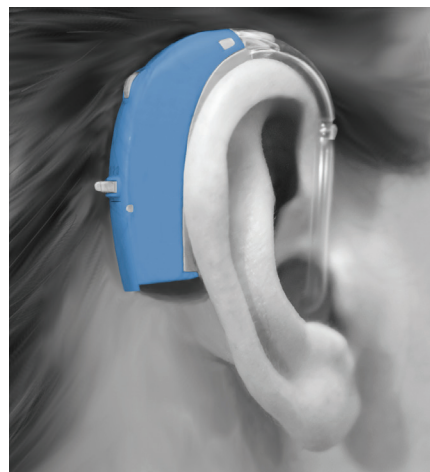
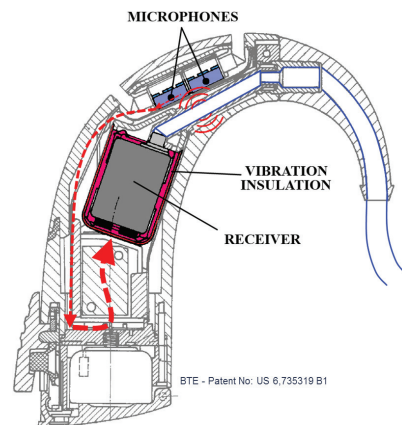


図1. 一般的な BTE 補聴器には、他の部品の中でも特に、マイク、防振材、受信機が含まれています。これらの部品の間隔が狭いため、厄介な音響的および機械的フィードバックが発生します。(画像提供: KNOWLES CORP.)

気信号を“受信”し、それを音響エネルギーまたは音に変換し、チューブまたは耳型を通して外耳道に伝えます。

受信機には、振動板に接続されたリードとして知られる電磁的に制御されるレバーが含まれており、その振動運動によって音を生成します。内部の電気機械力も反力を生成し、その反力が補聴器パッケージを通じて振動を伝達し、マイクで拾われる音を生成します。この信号はアンプによって増幅され、再び受信機に戻され、フィードバックが発生します。この経路を図1に示します。

⇒ “ブラックボックス” モデル

受信機の唯一の機能は、マイクからの増幅された電圧信号を音に変換することです。構造は単

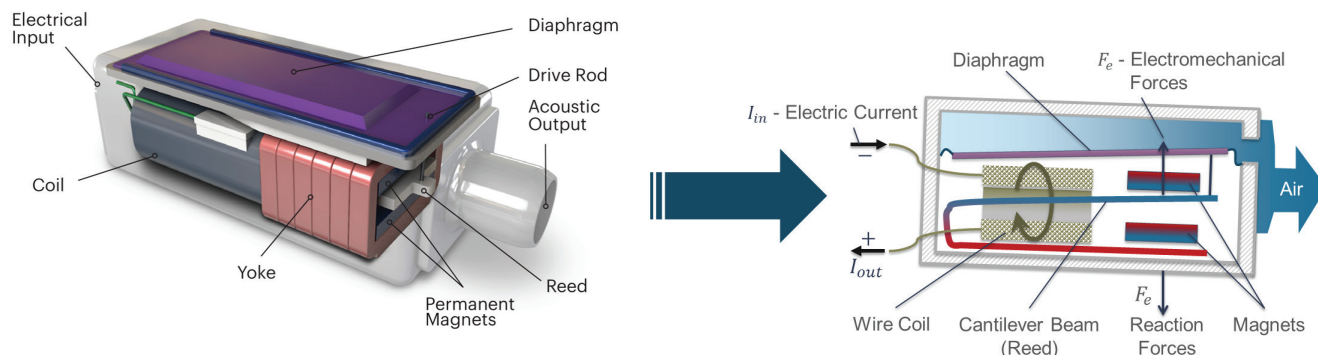


図 2. 補聴器の重要な部品である受信機には、音を生成する電磁的に制御されるダイアフラムを備えた小さなスピーカーが含まれています。内部電磁力が構造振動を引き起こし、その結果機械的フィードバックが発生します。

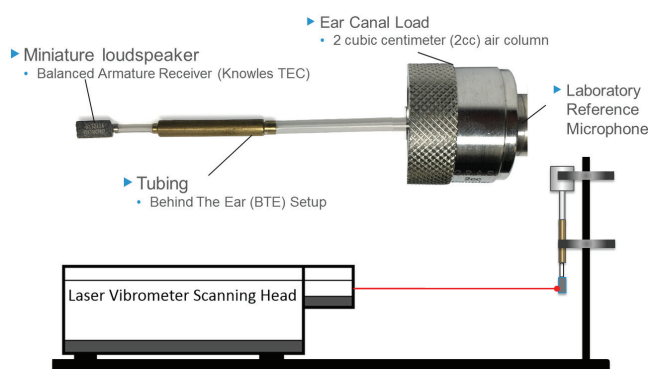


図 3. ハードウェアと実験設定を説明する模式図。

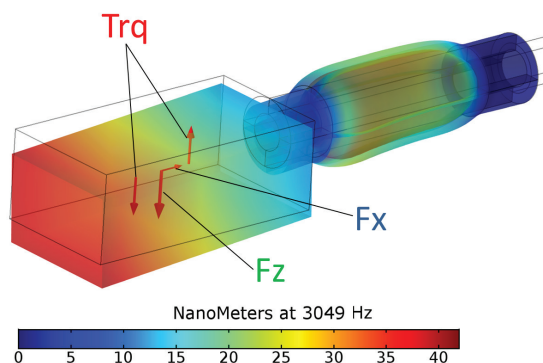


図 4. 受信機とシリコンチューブの装着が3 KHz の場合のシミュレーションの力と変位。

純に見えますが、プロセスはかなり複雑です (図 2)。電気信号はまず磁気信号に変換され、次に機械信号に変換され、最後に音響信号に変換されます。これらの各ステップには、独自の周波数依存特性があります。すべての内部部品の複合効果を理解することは、あらゆる異なる補聴器プラットフォーム向けの受信機を効果的に設計する能力にとって不可欠です。Knowles 社のエンジニアは、1960 年代以来、複雑な回路に相当するものを使用して、内部の電気、磁気、機械音響効果をすべてモデル化してきました。

受信機の複雑さをすべて正確にモデル化するには、気が遠くなるような大規模で複雑なマルチフィジックス有限要素モデルが必要であり、高速かつ効率的な補聴器設計には非現実的です。この問題は、受信機とマイクの研究における聴覚健康業界の専門家である Daniel Warren 博士が 2013 年に“ブラックボックス”モデルを導入したときに克服され

ました。この設計では、最小限のシンプルな回路要素を使用して、バランスドアーマチュア受信機の電圧と出力音圧レベルの間の重要な電気音響伝達関数を捕捉し、フィードバック制御にとって重要ではない要素を排除しています。

モデルを単純化するための重要なステップは、Warren 氏とVaranda 氏が、モデルにほとんど複雑さを加えずに、単純化された電気音響回路を強力な振動音響モデルに変換できることを実証したことです。“この変換は、インダクター両端の電圧が構造振動の原因となる内部機械力に正比例する‘ブラックボックス’回路のセクションを解析することによって実現されます。”と Warren 氏は説明します。

“ブラックボックス”と振動音響モデルはテストする必要があり、設計者が製品設計に使用し始める前に、受信機への現実的な音響のおよび機械的な取り付けに対して検証されます。Knowles と聴覚医療の顧客との世

界的な協業は 2014 年に開始され、COMSOL Multiphysics® ソフトウェアと業界標準テストを使用してモデルを検証しました。

⇒ 検証への協力

モデルを検証するために、エンジニアは、FEA で簡単にモデル化できる構造を使用して、音響出力と振動力を同時に測定する必要がありました。一般的な補聴器テストと同様に、このテストでは、容積 2 立方センチメートル (2 cc) の密閉空間につながるチューブの短い部分に受信機を接続する必要がありました。これは、図 3 に示す標準化された外耳道の音響負荷です。キャビティ内の圧力は実験室グレードのマイクで測定されます。モデルの堅牢性を検証するために、BTE 補聴器に似た複雑なチューブアセンブリを使用して受信機も測定されました。この設計の長いチューブは直径が異なり、複数の音響共鳴をサポートするのに十分な長さです。音響出力の測定と同時

に、受信機の構造的な動きがレーザー振動計によって捕捉されました。並進運動と回転運動の両方は、受信機ハウジングの表面上の複数の点での運動を観察することによって測定されました。

Warren 氏とVaranda 氏は、Knowles 社の顧客数社と協力して、上記の測定を実行しました。COMSOL Multiphysics の助けを借りて、簡略化された振動音響回路モデルを、上記のテスト設定のシミュレートされたレプリカ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、受信機の動きとシリコンチューブアタッチメントの間の機械的相互作用、さまざまなチューブ断面内の熱粘性損失、キャピティとチューブ内の音圧負荷を“ブラックボックス”受信機モデル内の内部電磁音響効果と結び付けます。

マルチフィジックスシミュレーションにより、補聴器設計者はフィードバックを低減することができるようになり、全体的なパフォーマンスを以前よりもより良く、より速く、より経済的に向上させることができるようになります。聴覚障害のある人々にとってより良い選択肢が得られるようになります。

COMSOL モデルは、出力圧力と機械的力が、印加電圧、周波数、および材料特性に依存することを明らかにしました。図 4 は、3 kHz でのシミュレーションからの変位結果と受信機に結合される反力を示しています。Varanda 氏がシミュレーションの結果を物理的な結果と比較すると、測定と優れた一致が示されました（図 5）。振動板とリードに作用する力は、出力音圧に音響的に依存します。しかし、ダイヤフラムに作用する力と構造反力との関係は、予想どおり正比例することがわかりました。

⇒知識を広める

Knowles 社は、他の補聴器会社のエンジニアが自社のシステムフィードバックの問題を解決できるようにモデルを共有しています。ハードウェア内部の音響、機械、電磁気の動作を完全に表現することで、設計者は製品を仮想的に最適化する準備が整います。

“COMSOL は、集中‘ブラックボックス’受信回路を音響学および固体力学と簡単に結合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 1 つです。”と Varanda 氏言います。“これまで、補聴器の設計の検証と最適化は、科学であると同時に芸術でもありました。これらのモデルの恩恵を受けた新しい補聴器のデザインを目にすることを非常に嬉しく思います。”

企業間の取り組みにより、力を合わせることで、聴覚医療業界の全員が取り組みやすくなりました。“最終的には、補聴器の設計者は、複雑なトランスデューサーモデルや時間

のかかるシミュレーションに行き詰まりたくはありません。彼らは単に自分たちの設計に集中し、トランスデューサーを交換したりして、全てがどのように連携するかを確認したいだけです。”と彼は付け加えます。“この COMSOL モデルにより、これが可能になります。1 つの補聴器パッケージについて、数百のトランスデューサーの動作を簡単に比較できます。”

補聴器の設計者は、フィードバックを軽減し、全体的なパフォーマンスを以前よりもより良く、より早く、より経済的に向上させることができるようになります。これが聴覚障害のある人々のための選択肢につながります。❖



BRENNO VARANDA 氏, シニア電気音響エンジニア, KNOWLES CORP.

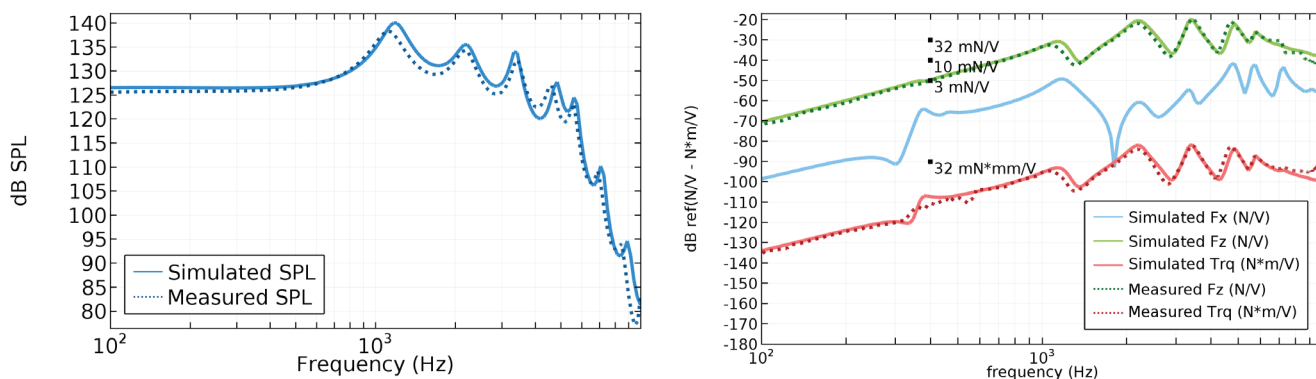


図 5. 左: 2 CC カップラー内の測定された音圧レベル (点線) とシミュレートされた音圧レベル (実線). 右: 受信機に作用する力とトルクの測定値 (点線) とシミュレートされた力とトルク (実線).

マルチフィジックス解析による漏水検知の進歩

音速の予測は、水道管などの埋設パイプの漏れ箇所を正確に特定するために重要です。ECHOLOGICS ENGINEERING は、パイプ内の音響挙動をモデル化し、音速の変動を推定するために、有限要素シミュレーションフレームワークを実装しました。

VALERIO MARRA 著

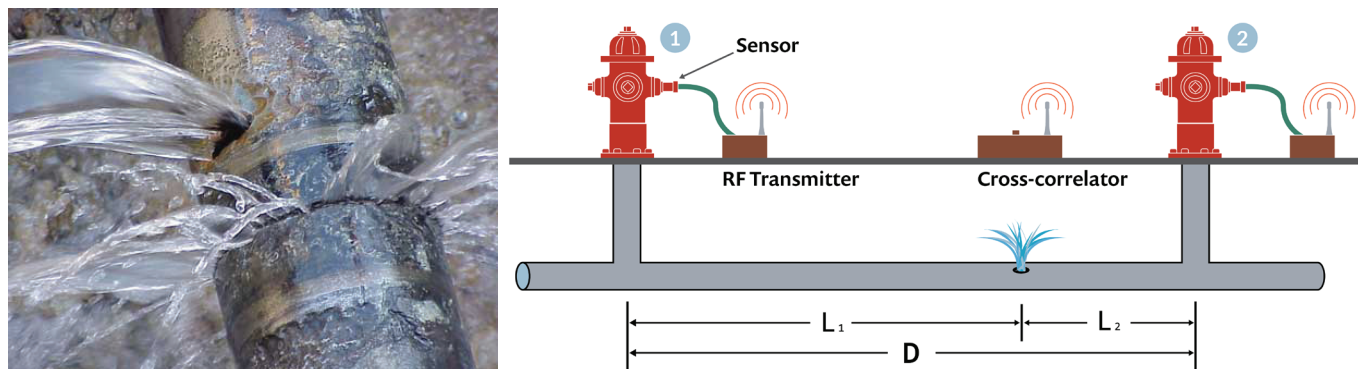


図 1. 左: 調査中の漏れのあるパイプ。右: 漏れ検出設定の概略図。漏れは、距離 D の 2 つのセンサーによって囲まれています。漏れ音は両方向に伝播し、相関器が各センサーに到達するまでにかかる時間を測定します。パイプ内の音速に基づいて、正確な漏れ位置を見つけることができます。

新鮮できれいな水は貴重品であり、地方自治体は地下パイプの漏れによって無駄にするわけにはいきません。パイプインフラが老朽化するにつれて、漏れを発見することがより困難になります。水の価値が高まるにつれて、漏水箇所の発見はより重要になります。

そこで登場するのが、非侵襲的な漏れ検出のための独自の音響技術を持つ、Mueller Canada, Ltd. の一部門であるトロントに本拠を置く企業 Echologics 社です。“水が漏れると異音が発生するのです。”と、Echologics 社音響科学者の Sebastien Perrier 氏は説明しました。Perrier 氏は、音響と振動、構造の結合、および信号処理を専門とする機械エンジニアです。“パイプはしゃべるので、耳を傾ければ、漏れの場所を教えてください。”と彼は言いました。

Echologics 社は、相関関数とパイプまたは消火栓に設置された音響センサーを使用し

て音の飛行時間を測定します。2 つのセンサー間のどこかで漏れが発生した場合、その漏れが検出され、相関結果を使用して漏れノイズが各センサーに到達するまでの時間差が決定されます。調査対象のパイプ内の音速が判明すると、これにより漏れ箇所から各センサーまでの距離がわかります (図 1)。

水道インフラ用の音響システムの革新的リーダーである Echologics 社は、この相関関係を利用して漏れを発見し、パイプの漏れを継続的に監視する技術を開発しています。Echologics 社製品の例には、LeakFinderST™ リークノイズ相関器 (図 2) や EchoShore®-DX パイプライン監視システム (図 3) などがあります。Echologics 社の相関器を使用すると、現場の専門家は、送信機、センサー、標準的なラップトップに設定できるユーザーインターフェースを使用して、さまざまなパイプの漏れを調査できます。この音響技術は、発生

の初期段階で非常に小さな漏れさえも検出できるため、自治体は漏れが拡大するにつれて漏れを監視し、迅速に対応できるため、自治体の費用と配管の損傷を節約できます。

Echologics 社の製品を支える技術には、さまざまなタイプのパイプの音速を正確に理解する必要があります。これは材料に依存し、パイプの剛性に比例し、パイプの形状の影響を受けます。“鍵となったのは、PVC パイプの漏れ検出を可能にするのに十分な高感度技術を開発することでした。”と Perrier 氏は説明しました。プラスチックは金属と比較して高い減衰を持っています。さらに厄介なのは、もともと鋳鉄で作られた古い水道システムはプラスチックで修復されている、という事実です。

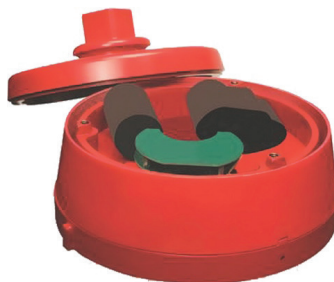
洗練された音響相関アルゴリズムを最新かつ正確に保つことは、Perrier 氏の責任の 1 つです。埋設パイプインフラストラクチャーの次世代ソリューションを最適化および開発す



図 2. LEAKFINDERST™ 相関器は、コンパクトで直感的なリークノイズ相関器です。



図 3. ECHOSHORE®-DX システムは、既存の消火栓をスマートな漏水検出技術に変えます。



るには、基礎的なレベルで関係する物理学を理解する必要があります。設計プロセスをスピードアップし、その結果を他の部門と共有するために、Perrier 氏は計算音響モデルを作成し、それに基づいてシミュレーションアプリを構築しています。

⇒ 破綻を引き起こす前に漏れを発見

数値シミュレーションはパイプ内の音波伝播を予測するのにどのように役立つのでしょうか？パイプネットワーク解析は複雑で時間がかかる場合があります。単一のパイプの観点から、またはネットワーク全体から音の伝播と振動応答を理解したい場合があります。したがって、モデルの複雑さと解析の実行にかかる時間は、モデルに含まれる物理現象を正確にするために必要な詳細レベルに応じて大幅に変化する可能性があります。

各パイプセグメントの音の伝播速度が正確であることを確認することが、Perrier 氏が設計

プロセスの初期段階で解決した問題の核心です。次に、マルチフィジックスシミュレーションを採用して、自分の仕事に関連する値に迅速にアクセスできるようにしました。パイプネットワーク解析では、音響、流れ、構造力学の間のマルチフィジックスカップリングが必要です。

Perrier 氏の仕事では、シミュレーションが複数の用途で使用されています。例えば、わずかな誤差を理解して技術的な微調整する場合などです。音響シミュレーションを通じてパイプネットワークの材料と形状のパラメーターを解析すると、さまざまなシナリオの予測が明らかになります。

音響シミュレーションでは、センサーの距離が変化したときの信号ノイズの存在が示されるか、テストには含まれていないプラスチック修復が発生したに違いないことが示されます。Perrier 氏のシミュレーションでは、音波がセンサーに伝わる時のパイプネットワーク内の圧力や、さまざまな材料のセクションを考慮

した機械的減衰も予測し、問題を可視化する方法を提供します (図 4)。

⇒ 日常使用およびシミュレーションアプリ

Perrier 氏は、計算モデルを日常的に使用することで、カスタムシミュレーションアプリを構築する利点を認識しました。COMSOL Multiphysics® ソフトウェア解析に基づいて、ソフトウェアの組み込みツールを使用して、音響構造の相互作用、パイプ音響、時間依存および周波数の研究を組み合わせた独自のアプリを作成しました (図 5)。このアプリを使用すると、ユーザーは複数回の実行で、形状と材料特性を変更し、パイプセグメントまたはパイプ全体を分析できます。

このアプリを使用すると、ユーザーはセグメントの長さ、セグメントの数、パイプの特性を指定して水道管ネットワークを定義できます。音速は、鋳鉄やプラスチックなどの材料特性を所定のリストから選択することによって計算されます。次に、シミュレーションには現場での測定結果が組み込まれます。ユーザーはこの結果を相関関係に基づいて手動で入力し、漏れの位置を予測します。

マルチフィジックスモデルをシミュレーションアプリに変換すると、社内の他のユーザーとやり取りするのに便利です。“シミュレーションアプリを構築すると、複雑なモデルを同僚と共有し、どこからでもアクセスできるようになります。” Perrier 氏は語ります。シミ

“シミュレーションアプリを構築すると、複雑なモデルを同僚と共有し、どこからでもアクセスできるようになります。”

— SEBASTIEN PERRIER, R&D 音響科学者, ECHOLOGICS

ュレーションアプリはパスワードで保護し、COMSOL Server™ 製品のローカルインストールで展開できるため、アプリを迅速に更新して機密性を維持できます。これは彼にとって重要な特質であり、彼の活動の多くは機密事項であることに注意しました。彼は、現場

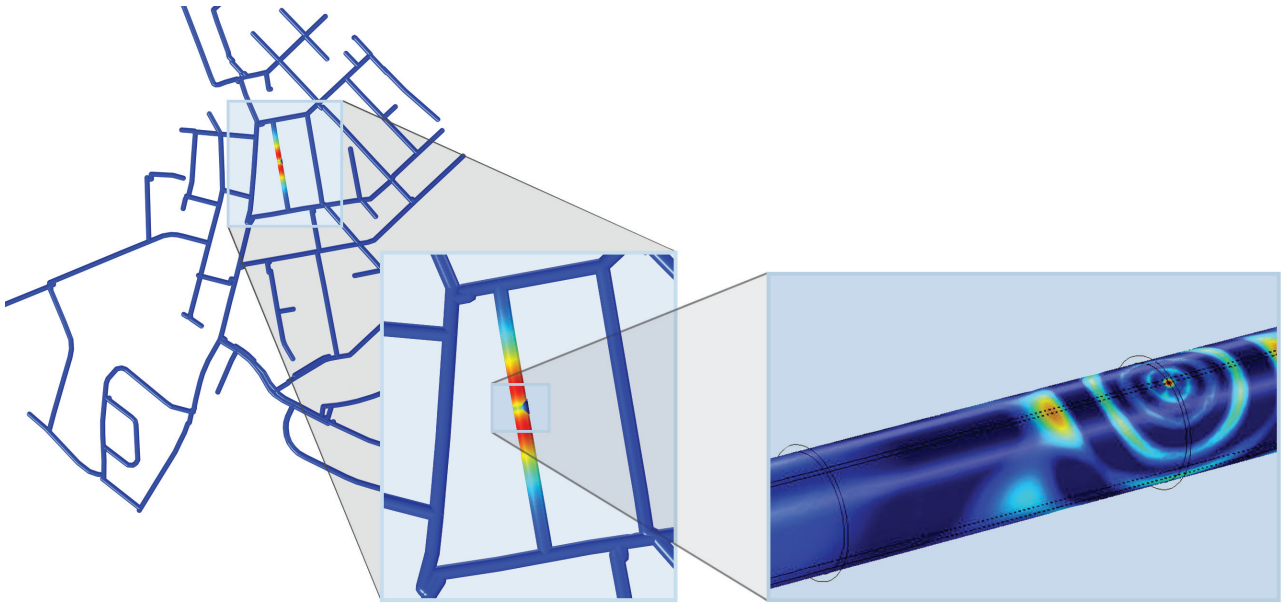


図 4. パイプネットワーク内の漏れ音の音響伝播解析. プロットは、漏れの周囲の領域の音圧を示します。

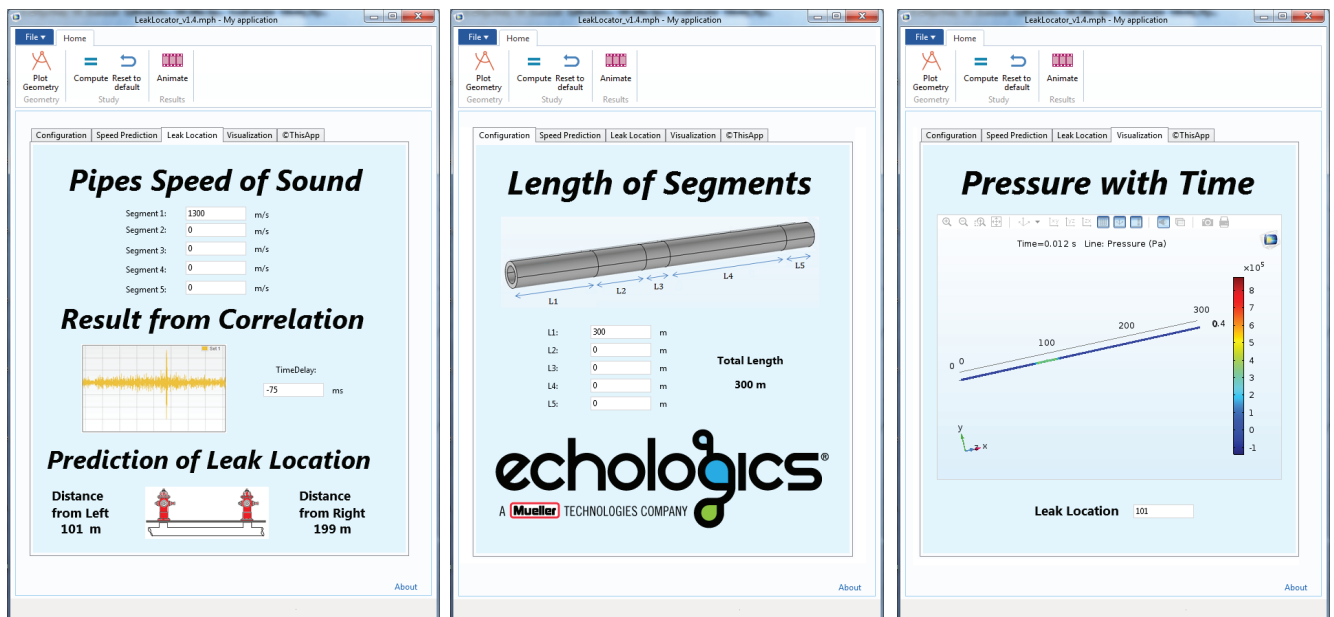


図 5. 使いやすいインターフェースにより、ユーザーは形状とパイプの特性を定義することで正確な漏れ位置を予測できます。このアプリはパイプ内の音の速度を計算し、音響構造の相互作用や位置予測のための複雑な計算を非表示にしながら、ユーザーが漏れ箇所からの音の伝播をアニメーションで可視化できるようにします。

のフィールドエンジニアが実行できるようにアプリを作成しました。

同氏は、このアプリがEchologics社内で広く使用されることを期待しています。Echologics社のフィールドエンジニアが、シミュレーションの背後にある機構や数学を詳細に理解してい

なくても、漏れを迅速かつ正確に発見できることが重要です。Perrier 氏のビジョンでは、強力なツールは、音の伝播を可視化し、形状や材料特性が変化したときに音速が減少するか増加するかをユーザーが確認できるシミュレーションです。❖



SEBASTIEN
PERRIER 氏,
R&D 音響
科学者,
ECHOLOGICS.

耳に音楽を: 新しい変圧器デューサーと静電ヘッドフォンとの出会い

オーディオ技術の新興企業は、ハイエンドの静電型ヘッドフォン用に新しい製造可能な変圧器デューサーを提供し、ローエンドのロールオフを低減します。

JENNIFER HAND 著



本格的な Hi-Fi 愛好家は、静電型ヘッドフォンによってもたらされる音楽体験に興奮しています。自然で風通しの良いサウンドを生成し、ハイレゾ音源を使用する他のタイプのヘッドフォンと比較して、より明瞭で歪みが少なく、帯域幅が拡張されています。

ほとんどの静電型スピーカーは、2つの導電板の間にある薄い弾性膜に電荷を加えます。帯電した膜は電気入力に直接反応して動き、音波を生成し、それが私たちの耳と脳によって音楽として解釈され、私たちに喜びと涙をもたらします。

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、壊れやすい場合があり、機械的な精度が要求されるため、最近まで手作りされていました。より簡単に製造できる手頃な価格の高品質ヘッドフォンのニーズを見て、Warwick Audio Technologies Limited (WAT) は、極薄のダイアフラムと、対ではない、単一の導電プレートをベースにした特許技術である高精度静電積層 (HPEL) トランスデューサーを設計しました。英国のWarwick 大学を起源とする WAT は、静電型ヘッドフォンに最適な厚さわずか 0.7 mm の軽量ラミネート膜を開発しました。

新しい HPEL は、連続ロールプロセスを通じて製造された軽量の薄膜構造です。“私たちが開発した技術はユニークです。” WAT 社の CEO である Martin Roberts 氏は説明します。“HPEL トランスデューサーは、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ー、および導電性メッシュで構成されています。” (図 1)。

一般的な設定では、直流 (DC) バイアス電圧が弾性膜に印加され、交流 (AC) 駆動信号が周囲のプレートに印加されます。

WAT 社の片面スピーカーには、DC バイアスと AC 駆動信号の両方が、グランドプレーンとして膜の反対側に配置されたワイヤーメッシュ (プレート) とともに、弾性膜に適用されます。

この製造方法により、従来の静電型スピーカーよりも大幅に低コストでトランスデューサーを再現することが可能になります。これは、静電気が、幅広い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ハイレゾオーディオオプションとして初めて考慮される可能性があることを意味します。

⇒ 音響再生のシミュレーション

音質を損なうことなく簡単に製造でき、安価に製造できるこのようなトランスデューサーを開発するために、WAT 社のチームは最終バージョンに落ち着くまでに、事前に多くの設計要素の影響を徹底的に調査しました。“私たちは、明らかに機能するプロトタイプを多数開発しました。大きな問題は、個々の材料や設計パ

ラメータの変化がトランスデューサーの性能にどのような影響を与えるか完全には分からないことでした。” と Roberts 氏は言います。

HPEL のダイナミクスは、膜の張力、AC 信号レベル、スピーカーの形状、弾性材料と誘電材料の特性、熱音響損失、膜の開放側に隣接する空気追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、ローエンドのロールオフを減らし、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で、低音のパフォーマンスを向上させたいと考えていました。しかし、部品への小さな変更が音響出力に大きな影響を与えることを発見しました。

WAT 社は機械、電気、音響に関する重要な専門知識を持っていましたが、この相互作用を理解するのに役立つ社内シミュレーション機能は持ちませ

“私たちは毎週複数のプロトタイプを手作業で作成していましたが、ソフトウェアで単に新しいプロトタイプをダイヤルアップするだけになりました。非常に満足 of いく最終設計に決まるだけでなく、クライアントのカスタム要件に合わせてトランスデューサーをカスタマイズすることも簡単になりました。”

— MARTIN ROBERTS, CEO, WAT

んでした。HPEL 変圧器デューサー設計の仮想最適化を実行するために、Xi Engineering 社の協力を得ました。Xi Engineering 社は、計算モデリング、設計の推奨事項、および機械やその他の技術における騒音と振動の問題の解決を専門とする COMSOL 認定コンサルタントです。



図1. 上から下へ: WAT社のHPELトランスデューサー. 完成したHPELトランスデューサーの単一ラミネート, 組み立て, および分解図. すべてのラミネートは英国で製造されています.

Xi Engineering社のテクニカルディレクターであるBrett Marmo博士は、HPELの動作を分析するために使用したCOMSOL Multiphysics®ソフトウェアモデルの開発を監督しました。このソフトウェアにより、Xi Engineering社は、HPELの非対称設計の修正によって生じる非線形効果をモデル化することができました。

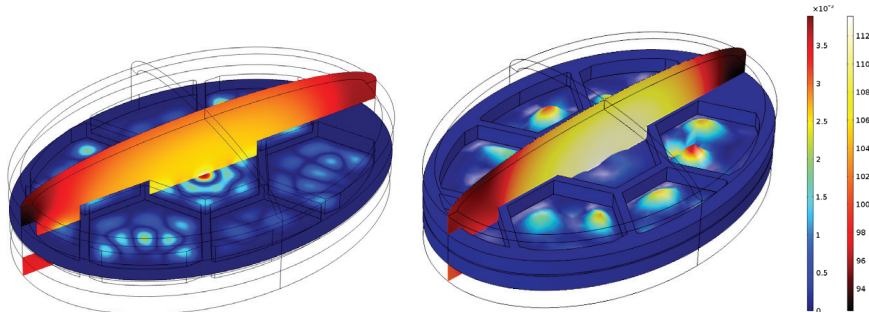


図2. 周波数領域で解析された完全結合音響MEMSモデルからの音圧レベル(熱色面)をDB単位で、膜の変位(レインボーカラー面)をmm単位で示すシミュレーションプロット. 左: 5000 HZの解. 右: 5250 HZでの解.

“私たちは初期のモデルをシンプルに保ち、音質に影響を与える詳細に焦点を当てました。たとえば、音響構造の相互作用や低周波数でのHPELのパフォーマンスを理解するために、一次高調波をできるだけ低く保つなどです。”と、Marmo氏は初期のテストのことを説明します。“私たちのモデルは、印加電圧が信号レベルにどのような影響を与えるかを示しており、これは初期の場合の音の歪みを理解するのに役立ちました。”

トランスデューサーは片面であるため、静電力は振動膜の位置によって変化し、メンブレインとメッシュの間の距離の二乗に応じて減少します。WAT社のエンジニアは、結果として生じる非線形歪みを理解し、その影響を予測できるようになると、関連する歪みを電気的にキャンセルできるようになりました。

⇒ HPEL トランスデューサー設計の完成

構造-MEMS-音響連成を含むより広範なシミュレーションで、彼はワイヤーメッシュの六角形セルのサイズ、ワイヤーの厚さ、膜の張力、膜とメッシュの間隔、各部品材料特性などのパラメーターを調整した場合の影響を調べました。Marmo氏と彼の同僚はまた、低周波数での歪みの原因となることが多いさまざまなDCバイアスの影響を解析し、プレートに沿った導電率を調べて、ある領域で電圧が別の領域よりも高いかどうかを識別しました。次に、COMSOLを使用して熱音響損失を研究し、さまざまな周波数での膜の変位をモデル化しました(図2)。

“このタイプのシミュレーションが、平面静電トランスデューサーを真にモデル化する唯

一の正確な方法であることがわかりました。”と、Marmo氏は続けます。“この場合、集中パラメーターモデリングは、低周波振幅応答などの性能の限られた側面を特徴付けることができます。1つのパラメーターが優れている場合でも、他の場所で重大な歪みが発生する可能性があります。マルチフィジックスモデリングは、時間領域の応答や非線形歪みなど、音の知覚に影響を与えるすべての側面を網羅します。”

シミュレーションにより、WAT社のエンジニアは全体的なパフォーマンスを最適化するために設計パラメーターを微調整することが可能になりました。最終的に、周波数応答のスパイクの原因を予測し、信号を平滑化して忠実度を向上させることができました。

“これは私たちにとってコストと時間の大きなメリットとなりました。”とRoberts氏は言います。“私たちは毎週複数のプロトタイプを手作業で作成していましたが、ソフトウェアで新しいプロトタイプをダイヤルアップするだけになりました。非常に満足のいく最終設計に決まるだけでなく、クライアントの個別の要件に合わせてトランスデューサーをカスタマイズすることも簡単になりました。”

Marmo氏のチームは、WAT社設計チームが提供した物理測定値と各モデルを比較しました。“シミュレーション結果は物理測定値に驚くほど近かったです。”とWAT社のCTOであるDan Anagnos氏はコメントします。“恐らくそれが最もエキサイティングな側面でした。シミュレーションが現実のものとなるのを見て、スピーカーがどのようにパフォーマンスするかを正確に把握できることを知りました。”

⇒ シミュレーションアプリによる自由と柔軟性

シミュレーション結果が検証および検証され、WAT 社が満足した今、彼らの設計の次のステップは、Xi Engineering 社がさらなるモデリングを WAT 社に制御させることでした。COMSOL ソフトウェアで利用可能なアプリケーションビルダーを使用すると、Marmo 氏のチームはシミュレーションからアプリを構築し、オンラインでホストすることができました。

アプリのインターフェースを使用すると、ユーザーは特定の入力を変更して、DC バイアス、AC 信号レベル、周波数範囲と解像度、材料特性、スピーカーサイズ、ワイヤーメッシュの形状とサイズ、スペーサーの配置などの多数のパラメーターの変更をテストできます (図 3)。元のモデル設定にはアプリからアクセスできません。代わりに、ユーザーはソフトウェアを学習する必要なく、さらなるテストを実行できるようになります。

“WAT にシミュレーションアプリを提供することで、ソフトウェアを購入したり、経験豊富なユーザーを任命したりする必要がなくなりました。”と Marmo 氏は言います。“シミュレーションアプリを使用すると、お客様が主導権を握ることができるため、お客様は小さな変更のために私たちに再度連絡する必要がなく、必要なものを正確にテストできます。また、同じ問題のバリエーションに取り組むのではなく、新しい課題を探索する自由も得られます。”Xi Engineering 社は、他の顧客のための対応の過程で計算アプリの使用が今後ますます増えると予想しています。

WAT 社も同様の取り組みを行っており、自社の顧客 (特定のヘッドフォン設計に最適な HPEL トランスデューサーを探している企業) とアプリを共有しています。“Xi Engineering のチームは素晴らしいです。彼らは深い専門知識を持っており、当社の製品の複雑さを説明するのに役立ちました。”と Roberts 氏は加えます。“Xi が私たちのために開発した直感的なアプリは追加のボーナスです。知的財産を一切明らかにすることなく、クライアントがアプリを通じて当社のデザインにアクセスできるようにすることで、クライアントはそのテクノロジーをテストして自社のハイエンドヘッドフォンに組み込むことができます。”❖

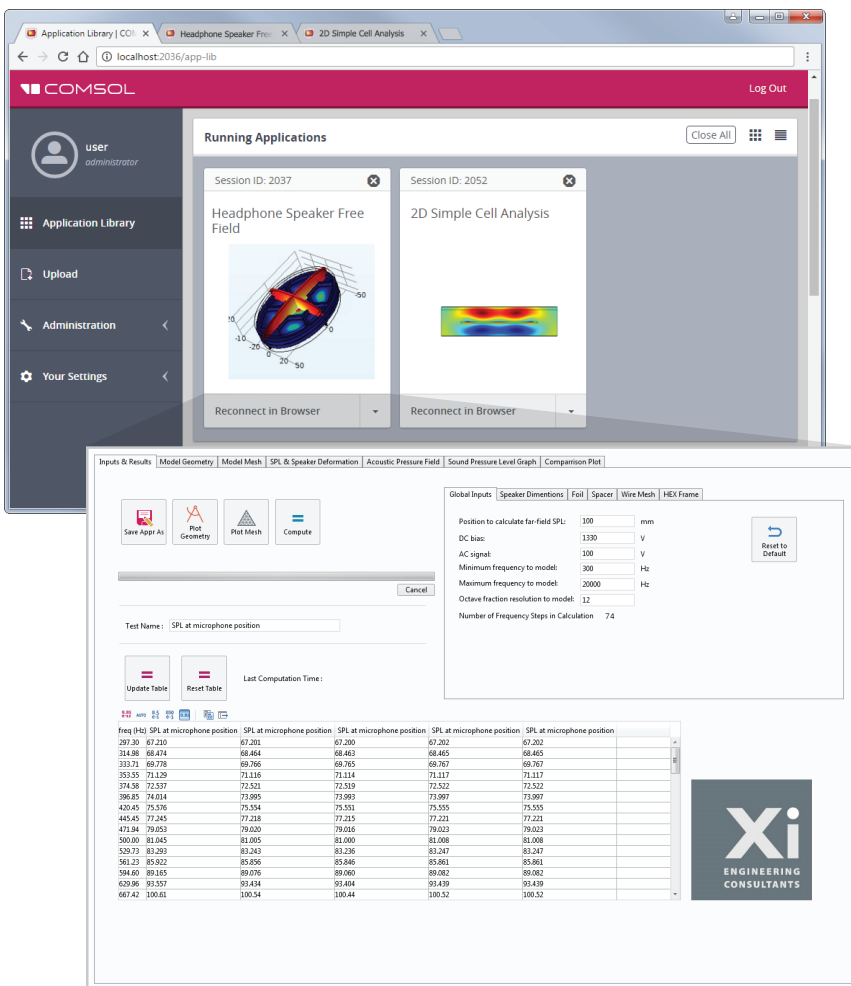


図 3. 手前: XI ENGINEERING 社が開発したアプリを使用すると、エンジニアは周波数、電気入力、スピーカーの寸法、膜、スペーサー、ワイヤーメッシュの特性に関連するパラメーターを変更できます。結果は、さまざまな場合の音圧レベル、膜の変位、さまざまな DC バイアスに対する周波数応答、およびシミュレーションされた設計と実験結果の比較を示します。奥: アプリは COMSOL SERVER™ 製品を通じて共有され、ウェブブラウザまたは WINDOWS® オペレーティングシステムの COMSOL クライアントからアクセスできます。



左: BRETT MARMO 氏, テクニカルディレクター, XI ENGINEERING.
中央: MARTIN ROBERTS 氏, CEO, WARWICK オーディオテクノロジー.
右: DAN ANAGNOS 氏, CTO, WARWICK オーディオテクノロジー.

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

現実世界のアプリケーションは本質的にマルチフィジックスであるため、そのように扱う必要があります。

ED FONTES 著

COMSOL® ソフトウェアの特徴は、ソフトウェアがユーザー入力を受け取り、物理現象を記述するための微分方程式からなる数学モデルを生成する方法です。現在の CAE ソフトウェアは、微分方程式の近似である事前定義された数値モデルに基づいています。ほとんどの場合、関連するものとして、これらの近似が必要です。微分方程式は解析的に解くことができません。つまり、正確な解を決定することはできません。代わりに、有限差分法、有限体積分法、有限要素法などのさまざまなタイプの離散化が、関連する微分方程式を近似するために使用されます。最初から微分方程式で考慮されていない場合、変数やマルチフィジックス連成の現象や記述を数値モデルに追加することとは困難です。

COMSOL は、ユーザーが計算ボタンをクリックしたときに離散化が作成される前に、ユーザー入力に基づいて完全な数学モデルが即座に生成されるという点で他のソフトウェアと異なります。このコアテクノロジーを使用すると、ユーザーは変数と座標の名前を使用し、ユーザーインターフェースに数式を直接入力することによって、独自の式とマルチフィジックスカップリングを作成できます。従来のソフトウェアでは、組み込みではない記述は数値レベルで、離散化が行われた後にユーザー定義のサブルーチンを使用して実行する必要がありますが、こ

れは不正確であったり、作成が困難であったりする可能性があります。COMSOL には、材料特性、荷重、ソース、シンク、およびマルチフィジックスカップリングを記述する任意の数式をユーザーが入力できる直感的なインターフェースがあります。数学は通常難しいものとして認識されているため、これは一種の逆説ですが、このソフトウェアを使用すると、非常に複雑な数学モデルを迅速に構築することができます。COMSOL の数学的モデリング機能は透明であり、使いやすく、ユーザーの特定のニーズにも柔軟に対応します。

研究者や科学者は、専門分野のプロセスや現象について深い理解と直観を持っている場合があります。ほとんどの場合、数学的モデリングの専門家ではありません。この理解と直観は、モデルを構築してシミュレーションを実行するときにも利用することが重要です。これにより、より正確なモデルとより優れた設計が得られます。このため、COMSOL では、特定の目的に合わせてカスタムメイドのユーザーインターフェースを備えたアプリを作成するためのアプリケーションビルダーを提供しています。このアプリを使用すると、数学的モデリングの専門家と非専門家の両方がモデルを検証できるようになり、新しいプロセスや設計を最適化および開発する際にもその恩恵を受けることができます。

この一例は、Mahindra Two Wheelers 社のものです (15 ページで紹介)。彼らはシミュレーションを使用して、オートバイのエンジン、吸気、排気システムの騒音と振動の性能を研究しています。Mahindra 社の研究開発マネージャーである Ulhas Mohite 氏は「彼らは COMSOL Multiphysics® ソフトウェアのアプリケーションビルダーを使用してシミュレーションアプリを作成し、解析出力ファイルを比較し、音圧レベル データをプロットしました。これにより、時間を大幅に節約できました。」と教えてくれました。このケースでは、音響の問題を解くと同時に、アプリを使用してシミュレーションデータを比較および解析しました。

ユーザーは、私たちが予測できなかった創造的なデザインやアプリの使い方私たちが驚かせています。— 彼らの仕事を研究し、フィードバックを分析することは、多くの新しいソフトウェア機能を立ち上げる上で非常に重要でした。私たちがこれまで行ってきた、そしてこれから行うすべての開発は、このソフトウェアが、物理現象を理解し、設計をより適切かつ迅速に最適化するために、初期段階で正確な数値シミュレーションの導入を促進することを目的としています。当社のソフトウェアの中核となる設計は、マルチフィジックスモデルとシミュレーションの高忠実度のレンズを通して現実世界の現象を研究するという当社の哲学を反映しています。❖

計算音響学が受ける マルチフィジックスのメリット

NAGI ELABBASI, VERYST ENGINEERING 著

音響分野は非常に多様であるため、それをサポートする計算ツールの必要性も同様です。音響シミュレーションは、自動車の騒音制御、室内音響、ラウドスピーカー、小型スピーカー、楽器、音響センサーとアクチュエーター、非破壊検査などのアプリケーションで非常に一般的です。これは、エンジニアに、製品の最適化や新しい設計コンセプトの評価に役立つ貴重でタイムリーな設計の洞察を提供します。Veryst Engineering では、音響シミュレーション、特に医療機器や MEMS センサーを含むアプリケーションへの関心が高まっています。

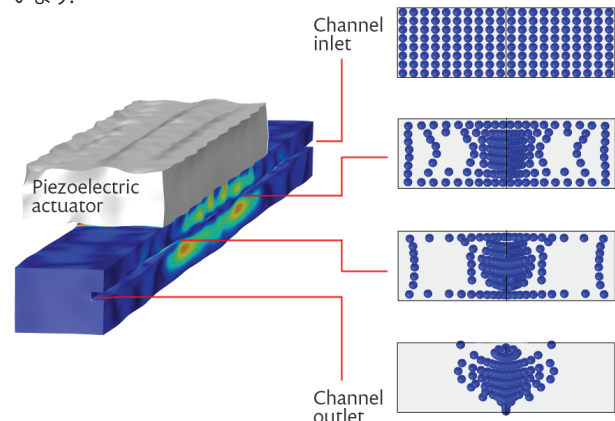
計算音響に適した定式化は、上に挙げたアプリケーションの一部によって大きく異なります。多くの場合、音響の問題は他のフィジックスから切り離して求解することはできません。主に構造媒体、流体媒体、電気媒体、熱伝達媒体、多孔質媒体などです。音響と他の現象との間のこのマルチフィジックスカップリングは、通常、デバイスが小さくなるほど重要になります。

私がこの分野で現在興味深いと感じているのは、特に医療機器とウェアラブル技術という 2 つの影響力のある分野で、音響アプリケーションの数が増えていることです。

私たちは最近、医療機器業界におけるマルチフィジックス音響シミュレーションの問題、つまり音響泳動を使用して体液を集中させるためのラボオンチップデバイスに取り組みました。この方法には、振動音場から生じる粒子の動きが含まれており、流体洗浄、流体分離、音響浮遊などの用途に使用されます。この特定のモデルには、圧力音響学、固体力学、電場、流体の流れ、および粒子追跡が含まれます。このモデル例で使用されているジオメトリと粒子の特性は、入手可能な文献から引用されています。この図は、流路全体にわたる粒子の分布を示しており、流路の中心に向かって効果的に粒子が集束していることを示しています。計算モデルは、設計者がデバイスの寸法、材料、動作周波数、流量を選択するのに役立ちます。

解析には十分ではありません。より多くの材料テストとデバイスレベルのテストが必要になることがよくあります。

これらの課題などを克服するために、私たちはクライアント向けにさらに多くのシミュレーション アプリの開発を開始しています。COMSOL Multiphysics® ソフトウェアで利用可能なビルダーを使用すると、各クライアントのニーズに基づいて完全にカスタマイズ可能な直感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できます。私たちは、これらのアプリによって、分析者以外の人でも、シンプルなユーザーインターフェースを通じて計算音響学の利点に直接アクセスできるようになることを願っています。お客様は、パラメーターを試したり、特定のスキルセットに基づいて設計の反復を提案したりできます。音響分野はマルチフィジックスシミュレーションの力のおかげで大きく進化しており、シミュレーションアプリの展開を通じてこの分野が拡大することを楽しみにしています。



COMSOL Multiphysics® ソフトウェアを使用してシミュレートされた、マイクロ流路内で集束する音響泳動粒子。変形とフォン・ミーゼス応力も表示されます。

“私が現在興味深いと感じているのは、特に医療機器とウェアラブル技術という 2 つの影響力のある分野における音響アプリケーションの数が増えていることです。”

音響シミュレーションでよく直面する 2 つの課題は、他のフィジックスでも同じですが、正確な材料特性の取得とモデルの検証です。私の経験では、減衰は音響問題において正確に評価することが最も難しい特性の 1 つです。音響アクチュエーターが共振周波数の近くで動作し、頻繁に動作する場合、結果に対するダンピングの影響が大きくなります。デバイスにポリマー部品が含まれている場合（これは頻繁に行われます）、その減衰は周波数に依存する可能性が高くなります。メーカーが提供する Q 係数や損失係数などの単一の減衰測定だけでは、正確な

著者紹介



Nagi Elabbasi 博士は Veryst Engineering, LLC の主任エンジニアであり、彼の主な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。彼は、構造力学、CFD、熱伝達、音響、結合システムのシミュレーション、および有限要素ソフトウェア開発において豊富な経験を持っています。彼はトロント大学で機械工学の博士号を取得しています。Veryst で提供されるコンサルティング、テスト、トレーニング サービスの詳細については、veryst.com/mechanical-engineering-services をご覧ください。