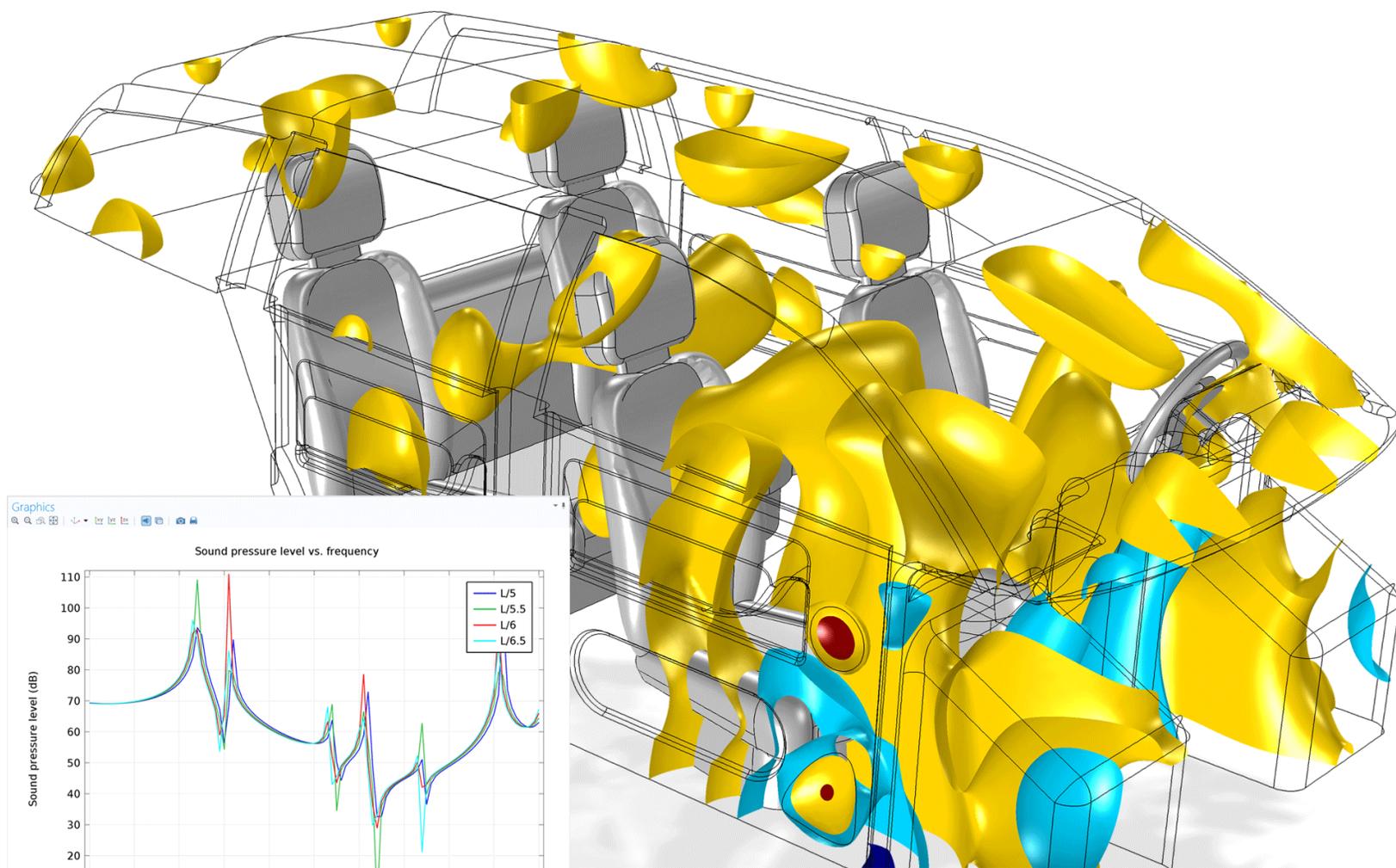
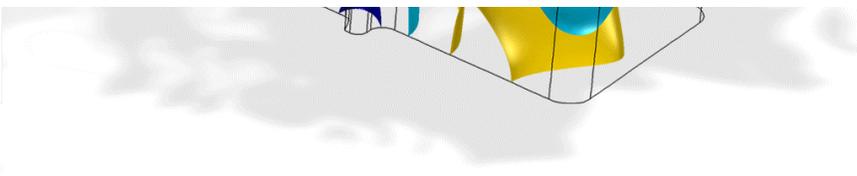
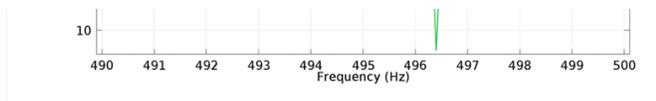


音響モジュール

音響と振動解析





セダンの内部の音響シミュレーションを示しています。スピーカー位置における音源も示されています。

音響と振動分析を新しいレベルへ

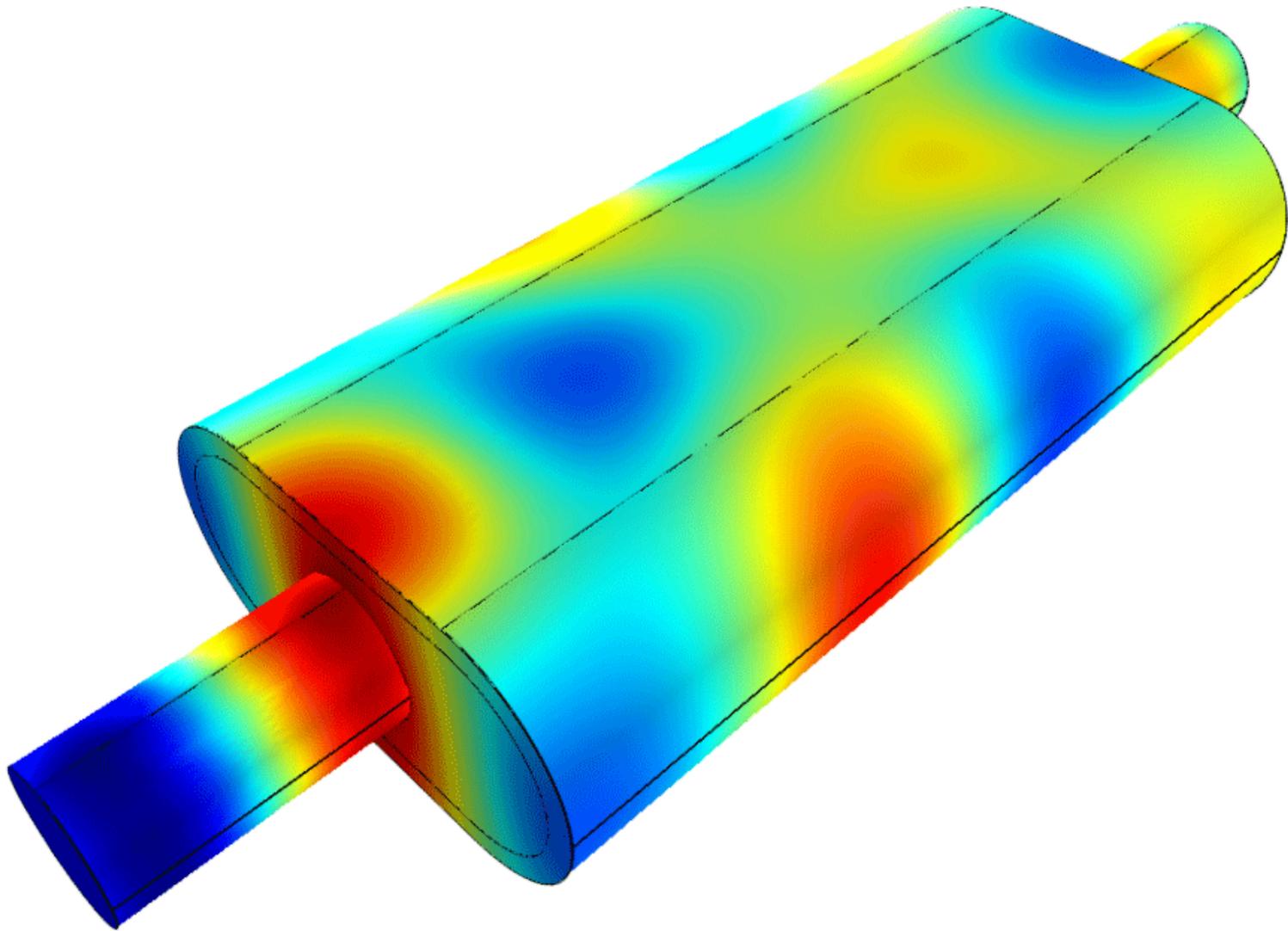
音響モジュールは、音響波を作成、計測、使用するデバイスの研究者向けに設計されています。アプリケーションはスピーカー、マイク、補聴器、ソナー装置などの分野を含みます。マフラー設計、防音壁、室内音響アプリケーションでは防音解析が取組まれます。

既存製品と新製品の洞察力アップへ

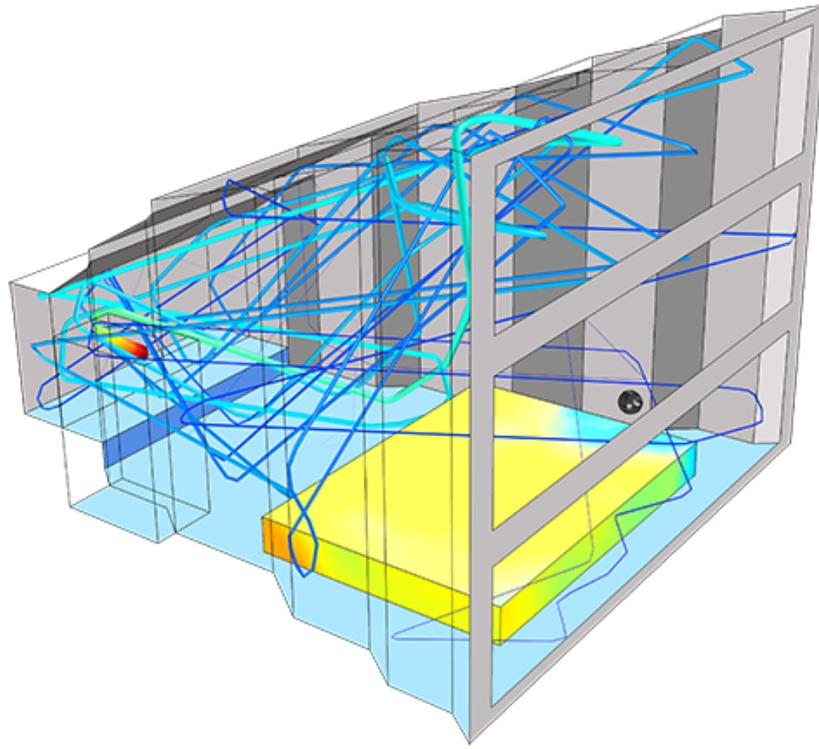
使いやすいユーザーインターフェースでは、空気、水や他の流体中の音圧波動伝播のモデリングツールを提供しています。熱音響専用モデリングツールにより、小型アンテナと携帯端末のマイクのシミュレーションは極めて正確に実装可能です。固体、圧電材料、多孔質弾性構造の振動や弾性波のモデリングも可能になります。音響-個体、音響-シェル、圧電-音響のマルチフィジックスインターフェースによって、音響シミュレーションの新たなレベルの予測力に達することが出来ます。

1D, 2D, 3Dの実際のシミュレーションを活用して、今までよりも短時間で、既存の製品を最適化し、新しい製品を設計可能です。以前の経験を基に対処することが難しい問題に直面している、設計者、研究者、エンジニアはシミュレーションを使用することで問題の洞察力を高めることができます。製品を製造する前に設計テストを行うことは、企業にとって時間と費用の削減につながります。

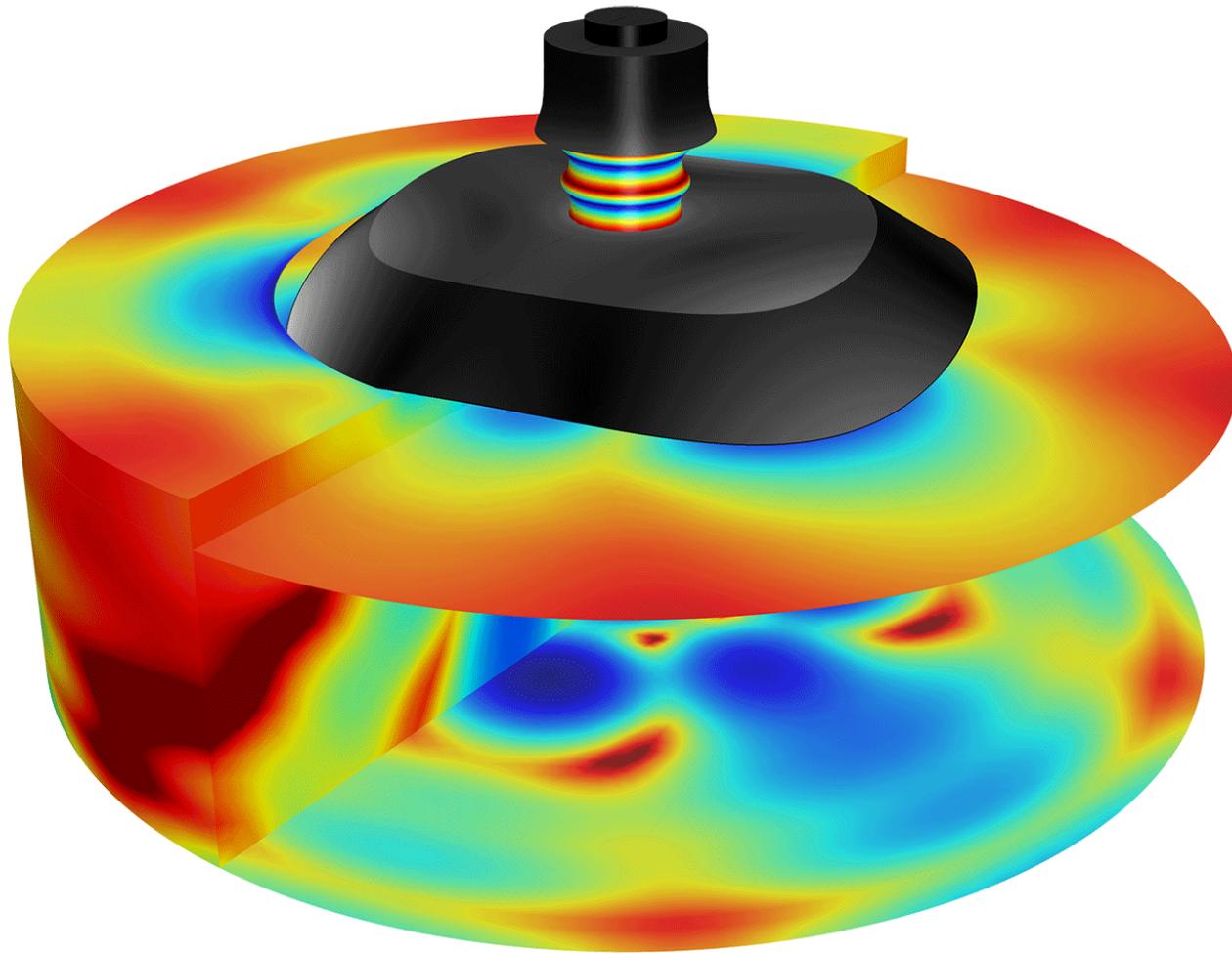
事例紹介



マフラシステムの音圧レベル分配

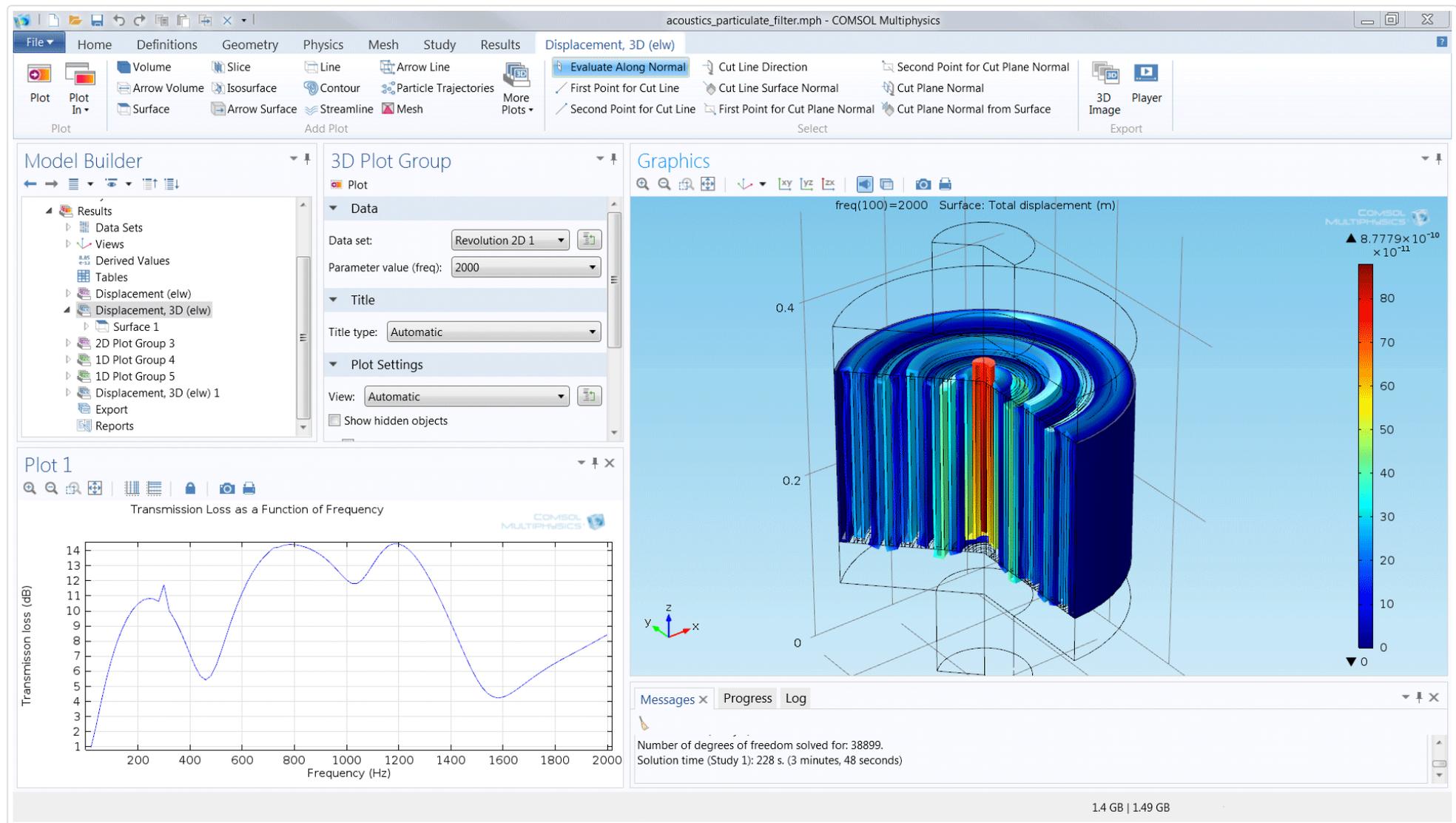


This simulation of a concert hall uses ray acoustics to determine the sound pressure around the stage and seating area.

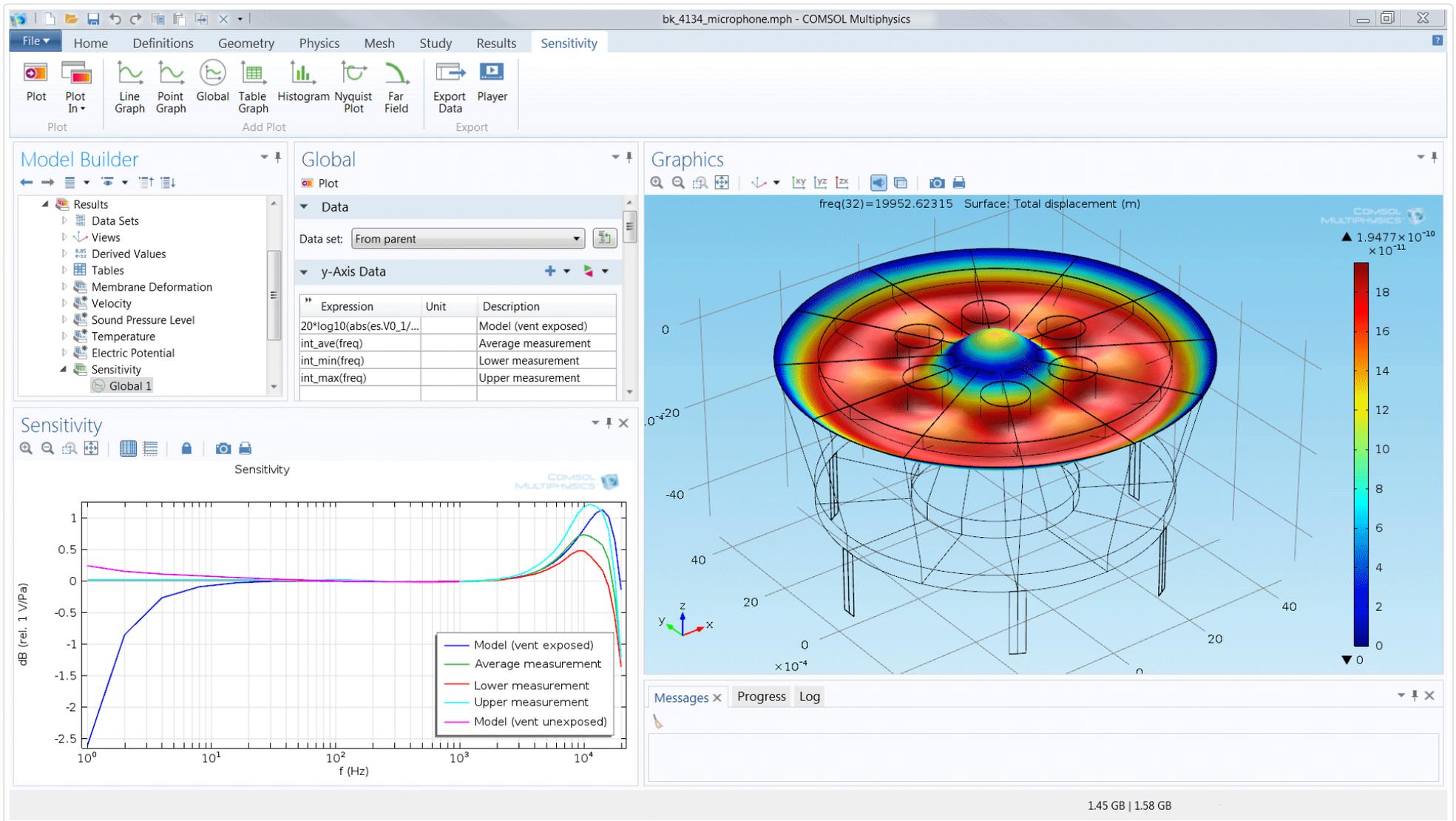


tonpilz圧電トランスデューサ（音声きのこと）は、比較的、低い周波数で高出力の音響トランスデューサです。トランスデューサは、頭部と底部の質量の大きい材料の間にスタックされ、中央のボルトにより与圧を受けている圧電セラミックリングから成り立っています。頭部と底部に結合されている質量によ

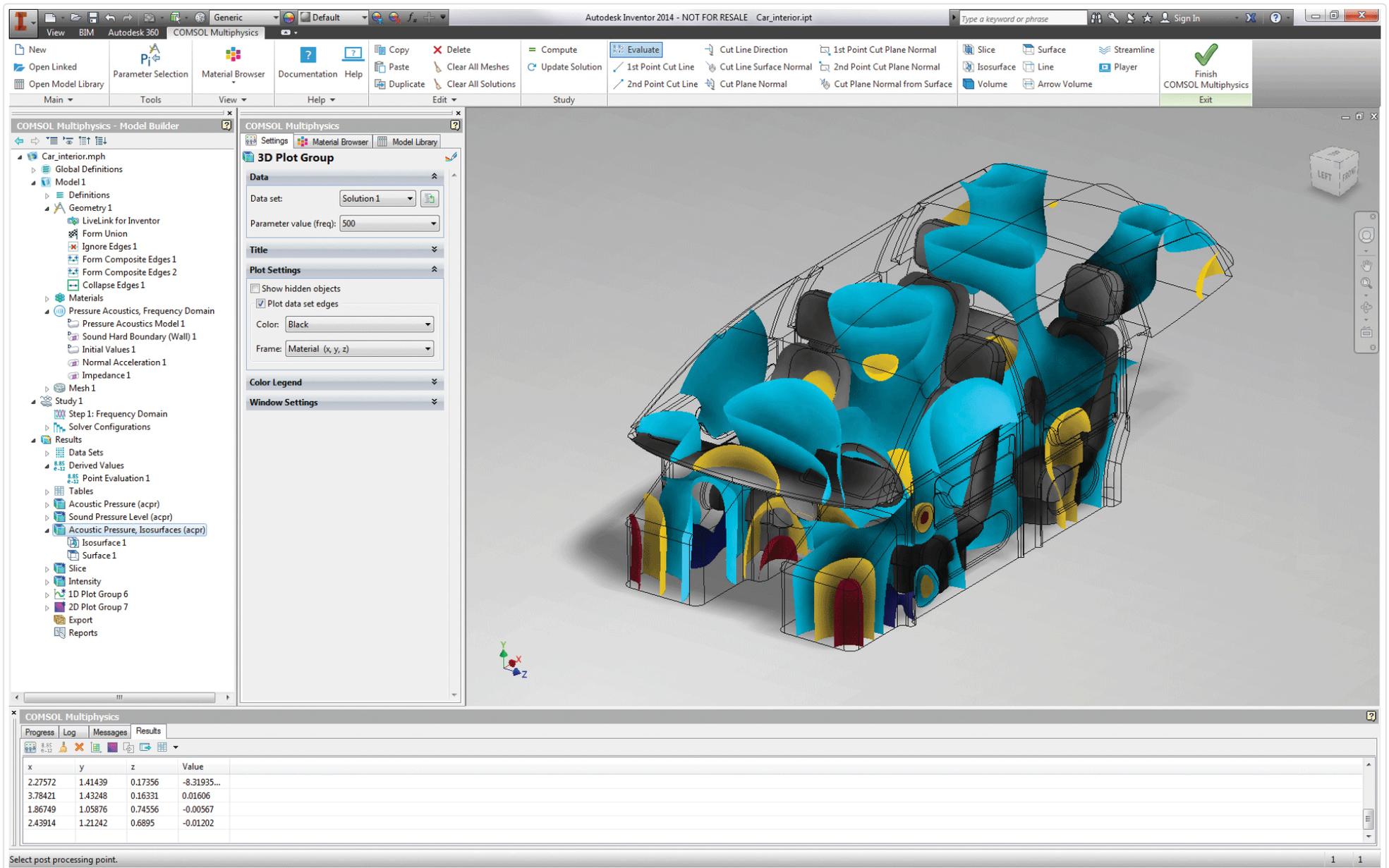
り、デバイスの共振周波数が低くなります。



粒子フィルターシステム内の多孔質弾性波と音響。ディーゼル粒子フィルター(DPSs)は、ディーゼルエンジン車両の排気管から煤煙(ディーゼル粒子)を除去あるいはフィルタをかけるように設計されています。粒子フィルターの主な機能は、排気をフィルターにかけることですが、マフラシステムに関連している音響減衰にも関わっています。



Brüel & Kjaer 4134コンデンサーマイクロフォンのモデリングです。ジオメトリと材料パラメータは、実際のマイクロフォンのパラメータです。モデリングされた感度レベルは、実際のマイク上でのパフォーマンス解析と比較され、それはよい一致を示します。膜変形、圧力、速度そして電界もまた決められます。モデリングは、高品質なBrüel & Kjaer Sound & Vibration Measurement, Nærum, Denmarkを提供しました。



車内の音圧の等密度面が可視化されます。ユーザは、音響モジュールに含まれる Inventor® ユーザインターフェースから、LiveLink™ for Inventor® を使用して、COMSOL 機能に直接アクセスすることができます。

多種多様な音響アプリケーションのモデリング

音響モジュールは、一連のフィジックスイターフェース、つまり、関連するモデリングとシミュレーションツールを含むユーザインターフェース、から成り立っており、流体と固体における音の伝播をシミュレートします。音響モジュール内ではそれらは圧力音響、音響-構造相互作用、空力音響、熱音響、熱粘性音響、超音波、幾何音響に分けられています。

圧力音響のフィジックスインターフェースを含む音響シミュレーションでは、音の散乱、回折、放出、放射、伝達のような古典的な問題をモデル化することができます。これらの古典的問題は、マフラーの設計、ラウドスピーカーの設計、アブソーバーとディフューザーの遮音、音響指向性パターン評価、騒音放射問題などと関連しています。音響-構造相互作用のためのフィジックスインターフェースでは、構造弾性波と流体で伝わる音との間の相互作用を含む問題を解くことができます。例えば、音響-構造相互作用は、マフラー設計、超音波圧電素子、ソナー技術、そして機械のノイズと振動の解析などに使用されます。COMSOL Multiphysics を使って、ラウドスピーカー、センサー、マイクロフォン、レシーバーなどの電気音響トランスデューサーの解析、設計が可能です。

空力音響用のフィジックスインターフェースは、外部流と音響場、つまり流体で生じるノイズ、との一方向の相互作用をモデル化するために使います。ジェットエンジンノイズ解析から風速計シミュレーションまでの範囲がアプリケーションとしてカバーされています。幾何音響のフィジックスインターフェースには音線追跡と音響拡散方程式インターフェースが含まれています。どちらのインターフェースも部屋における音響とビルにおける音響をモデル化することができます。音線追跡は海洋音響と大気音響にも使用することができます。熱音響、熱粘性音響のアプリケーションは正しいフィジックスインターフェースを用いて正確にモデル化することができます。アプリケーションとしては、携帯電話や補聴器、MEMSアプリケーション、トランスデューサーなど、小さなサイズで、熱や粘性の影響を考慮する必要があるものを含みます。

マルチフィジックス連成

COMSOL Multiphysics® 環境に完全にインテグレートされている音響モジュールは他の広範囲のマルチフィジックスシミュレーション用モジュールとの連成が可能です。例えば、音響-シェル相互作用と熱粘性音響-シェル相互作用のためのマルチフィジックスインターフェースで、それらは音響モジュールと[構造力学モジュール](#)を組み合わせることで使用可能になります。同様にパイプ音響のためのフィジックスインターフェースは音響モジュールと[パイプ流れモジュール](#)を組み合わせると可能になります。

マルチフィジックス連成と定義済みマルチフィジックスインターフェースは COMSOL Multiphysics の中で COMSOL Multiphysics ノードを追加するにより設定できます。例えば、流体ドメイン内での圧力音響を記述するフィジックスを周囲の固体における構造力学を記述するフィジックスを連成させる場合、COMSOL Multiphysics を音響インターフェースに追加し、固体力学インターフェースを別に加え、そして、それらをマルチフィジックスノードの下で関連するカップリングを用いて連成します。この機能は連成を外したり、二つのフィジックスの寄与を一方向にしたりすることもできます。また、音響と構造力学インターフェースの全ての機能を完全に制御するのも使うことができます。

多くのマルチフィジックス連成の中で、音響-構造境界、空力-構造境界、熱粘性音響-構造境界マルチフィジックスインターフェースがあります。これら全てのインターフェースは流体ドメインと、固体および外部または内部シェルを含む構造、もしくはメンブレインとを連成します。また、音響-熱粘性音響境界、音響-多孔質境界、多孔質-構造境界マルチフィジックスインターフェースがあります。圧電効果マルチフィジックスインターフェースは固体力学インターフェースと静電気インターフェースを連成させて圧電材料をモデル化します。全てのマルチフィジックスモデルはデフォルトで完全連成ですが、マルチフィジックスノードの操作により、一方向連成や連成解除も可能です。

コンシステントなワークフロー

音響モジュールは、COMSOL® 製品群中の他のアドオンモジュールと同じワークフローで実行されます。全てのモデリングステップは、COMSOL Desktop® からアクセスし、ジオメトリの定義、材料の選定、適切なフィジックスインターフェースの選択、境界の定義、そして条件の初期化を行うと、自動的に有限要素メッシュを作成、解析が行われ、結果が可視化されます。音響シミュレーションは他の COMSOL Multiphysics® アドオン製品と連成可能で

す。例えば、音響-シェル相互作用のための[構造力学モジュール](#)のような定義済みマルチフィジックス連成や、ユーザ定義の連成を使った連成が可能です。音響モジュールを[最適化モジュール](#)と組み合わせることで、ジオメトリサイズや音響伝達の最適化など、いろいろな最適化が可能です。

CAD、MATLAB®、および Excel® と音響モジュールの連成

繰返しの多いモデリングには、[LiveLink™ for MATLAB®](#)においてMATLAB®スクリプトまたは関数を使ってCOMSOL®シミュレーションを実行することができます。COMSOL Desktop®上で使用可能ないかなる操作もMATLAB®コマンドを介してアクセスが可能になります。COMSOL®コマンドをMATLAB®環境で、既存のMATLAB®コードと共に使用することもできます。スプレッドシートから音響シミュレーションを実行する場合、[LiveLink™ for Excel®](#)を使用すると、COMSOL Desktop®からモデリングするのとは違う便利な環境が提供されます。COMSOL®環境下で定義されたパラメータとスプレッドシートデータの同期化が行われます。[CADインポートモジュール](#)とLiveLink™製品はCADシステムをリードし、CADモデルを使用した音響シミュレーションを容易にします。LiveLink™製品により、パラメトリックなCADモデルをネイティブな環境にあるときのままに維持しながら、COMSOL Multiphysics®内からのジオメトリサイズの制御が可能です。音響モデルとCAD製品をつなげることにより、複数のモデルパラメータのパラメータスイープを同時実行することができます。

[イメージを見る》](#)

柔軟でロバストな音響モデリング

音響モジュールの方程式は、最先端ソルバーと結合した高次要素離散化を含んだ有限要素法を使用して解析されます。異なる定式化では、周波数領域と時間領域シミュレーションの両方をカバーします。その結果は、音響場、変位場、音圧レベル、応力と歪みのプリセットプロットなどを通してグラフィックウィンドウにて表示されます。表形式他の形で自由に定義した物理量も表示できます。

音響損失を含むシミュレーション

音響モジュールには、防音裏張りから、ラウドスピーカー、マイクロフォン、そしてマフラーにいたるまでのアプリケーション例を多数含んだモデル数豊富なライブラリが搭載されています。これらの例の多くが音響損失のシミュレーションを含んでいます。音響モジュールにおける損失のモデルは、多孔質弾性波インターフェース中のビオ理論を解く、経験的な繊維性材料の等価流体モデルから、熱音響、熱粘性音響インターフェースを使用した本格的な熱と粘性損失モデルまで様々です。

使いやすい音響解析用フィジックスインターフェース

圧力音響

圧力音響のフィジックスインターフェースは、スカラー音圧場を通じて音響場を記述し求解します。その音圧場は、定常な雰囲気圧に対しての音響変化（もしくは過剰圧力）を表します。周波数領域のヘルムホルツ方程式、もしくは古典的なスカラー波方程式の時間発展系を解くことができます。音響境界モード用の特別なフィジックスインターフェースは、ある波形、つまりあるモードのみが長距離を伝播可能だという事象に基づき、導波管内やダクト内の伝播モード解析に使用されます。

ハードウォール、インピーダンス条件、放射、対称性および、開境界モデリングのための周期条件、そして、音源を与える条件など、広範囲な境界条件が用意されています。インタフェースはいくつかの等価流体モデルを含み、より複雑な媒質での音の伝播挙動を近似します。いくつかの多孔性流体モデルでは多孔質や繊維質材料での損失を事前に定義しています。狭領域音響モデルでは狭領域におけるハード境界に起因する熱粘性損失がモデル化されます。ユーザー定義関係式として減衰を追加して粘性、伝熱性流体の解析を行います。完全整合層（PML）は、外に出て行く音響波の吸収により 無限の計算領域を有限に切取ることが可能で、それにより、広範囲に拡張されたドメインを模擬したことになります。計算領域外で任意の距離における圧力と位相情報を求める際には、遠方場機能を使用します。専用の解析機能により、2Dおよび3Dでの極プロットによる遠方場の可視化が可能です。

[イメージを見る»](#)

音響－構造連成

流体と構造領域は音響モジュールにおける定義済みのマルチフィジックスインターフェースによって、自動で連成されます。流体－固体の境界の一方の面からは、音響－構造インターフェースは固体ドメインに作用する流体圧力を計算し、別の面からは、液体ドメインに作用する構造の加速された変位を計算します。マルチフィジックス連成は音響－固体、音響－シェル、音響－圧電における相互作用を含むアプリケーションをカバーします。それら全てが周波数領域、時間領域、そして3D、2D、2D軸対称ジオメトリモデルで解かれます。構造シェルを含む連成は音響モジュールと音響モジュールと[構造力学モジュール](#)を組合わせたときに可能で、より高度な構造モデリングへのアクセスが可能になります。弾性波は重要な音響アプリケーションの一つです。音響モジュールと構造力学インターフェースを使って、完全な構造力学フォーミュレーションを得ることができ、固体中のせん断波、圧力波の効果を扱うことができます。音響－圧電相互作用マルチフィジックスインターフェースは、精度の高い音響－構造相互作用だけでなく、圧電材料中の電場をモデリングし解析することができます。[AC/DCモジュール](#)、もしくは[MEMSモジュール](#)と連成すればSPICE電気回路を含む圧電シミュレーションも可能になります。例えば、トランスデューサのいくつかの電氣的挙動は集中モデルを使って記述する一方、他のフィジックスの記述には完全な有限要素法を適用する場合に素晴らしい機能性を発揮します。

[イメージを見る»](#)

パイプ音響インターフェース ([パイプ流れモジュール](#)と共に提供可能) は、フレキシブルなパイプシステム内の音波伝播の1Dモデリングに使用します。方程式は、定常バックグラウンド流を扱える追加されたパイプ壁コンプライアンスの影響を含む一般的な方法で定式化されます。弾性波インターフェースは、せん断波や圧力波の影響全てを含む完全な構造力学方程式を搭載しています。多孔質弾性波インターフェースでは、多孔質材料内の音響伝播を正確にモデリングすることが可能です。これには、Biotの法則を使用し、固体母材の変形と飽和液体内の圧力波の間での双方向の連成も含まれます。

[イメージを見る»](#)

幾何音響

幾何音響ブランチは音線音響と音響拡散方程式のフィジックスインターフェースを含みます。これら両方のインターフェースは音の波長が幾何学的特性長よりも小さいような高周波上限で有効となります。室内ではシュレーダー周波数を超える周波数がそれに相当します。両インターフェースは室内やコンサートホールのようなビルディングでの音響をモデル化するのに適しています。音響拡散方程式が室内アプリケーションに限定されているのに対して、音線音響インターフェースは、例えば、海洋音響や大気音響などに使うことができます。境界での音響特性は異なる吸収モデルを通して含まれています。

音線音響フィジックスインターフェースは音線の軌跡、位相、強度を計算するのに使用されます。音線音響は音の波長が幾何学的特性長よりも小さいような、高周波数上限において有効です。このインターフェースでは室内やコンサートホール、学校、オフィスビルディング、多くのアウトドア環境での音響をモデル化できます。音線が伝播する媒質の特性はドメイン内を連続的に変わってもよく（勾配媒質）、または境界で不連続になっても構いません。外部

境界では、鏡面反射、拡散反射、その組み合わせを含む種々の壁条件を適用することができます。インピーダンスと吸収境界条件は入射音線の周波数、強度、方向に依存することができます。透過率と反射率を媒質界面でモデル化することもできます。どのような媒質に対しても背景速度を割り付けることができます。

[イメージを見る»](#)

音響拡散方程式インターフェースは音響エネルギー密度の拡散方程式を解きます。それは音響場が拡散性であるような高周波音響で有効です。拡散特性は室内ジオメトリと壁の吸収特性の両方、室内フィッティング（平均断面積と減衰に基づいた平均体積吸収率を使用）、粘性および熱的体積減衰（大容量においてのみ）に依存します。このインターフェースはビルディングの中や他の大きな構造体での音圧レベル分布をすばやく調べるのに適しています。

音響拡散方程式インターフェースは異なる場所における反響を求めるのに用いることができます。それには、時間発展解析を行ってエネルギー減衰曲線を見るか、固有値解析を行います。音源、吸収パラメーター、透過損失の全ての入力をモジュールが供給する音響帯域のうちの一つを使って決めることができます。これらの入力タイプを用いて、調べたいバンドに関してパラメトリックスイープすると、そのバンドでの結果をプロットして解析することができます。

[イメージを見る»](#)

空力音響

理想的には計算空力学（CAA）シミュレーションは完全圧縮性ナビエ・ストークス方程式を時間領域で解くのが普通でしょう。ここでは音響圧力波は流体解の一部となるでしょう。しかし、このアプローチはしばしば現実世界においては非現実的です。それは必要な計算精度のために計算時間やメモリが膨大になるからです。多くの現実的な工学問題を解くために、分離した解法が代わりに使われます。まず、背景平均流体流れを解きます。そして、その流れの音響摂動を調べます。この重要な一方向相互作用は流体由来のノイズ・音場現象として知られています。

流体由来の音波のための音響モジュールにおける主なツールは、線形化オイラーと線形化ナビエ・ストークスフィジックスインターフェースです。線形化ポテンシャル流インターフェースはもっと簡単なアプローチを提供します。線形化オイラーインターフェースはある背景平均流れに関する圧力、速度、密度に対する音響変化を計算するのに使われます。それは背景流れが理想ガス（もしくは理想ガスでよく近似できる）であり、熱や粘性による損質がないと仮定できるときにエネルギー方程式を含むオイラー方程式を解きます。線形化オイラーフィジックスインターフェースは、時間領域、周波数領域、固有周波数の解析に利用できます。線形化オイラー方程式を使用した空力音響学の適用例としては、ジェットエンジン騒音の伝搬の解析、非等温流が存在するマフラーの減衰特性のモデル化、気体流量計の調査があります。これらはすべて、気体バックグラウンド流によって流体中の音波の伝搬に影響が生じる場合です。

簡単な単方向相互作用には線形化ポテンシャル流インターフェースが周波数領域、過渡領域の両方で使用でき、流れポテンシャルに基づいた定式化を使います。さらに圧縮性ポテンシャル流インターフェースは、そもそも非回転性のため渦度がない非粘性の圧縮性流体の背景平均流のモデル化に使用します。線形化ポテンシャル流、境界モードインターフェースは、背景流れ場の境界モード音響問題の解析に使われ、通常、入口の音響源を指定するのに利用します。

熱音響

音響モジュールでは、熱音響、熱粘性音響用の最先端モデリング機能（粘性熱もしくは、熱粘性音響として知られている）を提供します。小規模なジオメトリ音響の正確なシミュレーションには大変重要になります。著しい損失が生じる粘性-熱的境界層を作成するため、壁の近辺、粘性、伝熱は重要になります。そのため、熱伝導の影響と粘性損失を支配方程式の中に陽に含めることが必要です。熱音響、熱粘性音響のためのこのフィジックスインターフェース

は、背景流なしの線形化圧縮流方程式、すなわち、線形化ナビエ・ストークス方程式である、連続の式、エネルギー方程式を全て一緒に解きます。熱音響、粘性音響のモデリングには詳細な記述が必要になるため、全てのフィジックスインターフェースは音圧、粒子速度ベクトル、そして音響熱変動を同時に解きます。

熱音響、熱粘性インターフェースにおいて支配方程式は、時間調和を仮定して周波数領域で求解されます。力学境界と熱的境界の両方が使用可能です。熱音響、熱粘性ドメインと音圧ドメインの連成では、定義済み境界条件を容易に使用することが可能です。熱音響-構造、熱粘性-構造境界連成が可能で、振動音響連成の解析も容易に行うことができます。例えば、これを使用して、小規模の電気音響トランスデューサーやMEMS装置における減衰をモデリング可能です。また、小規模サイズのシェル間の相互作用と音響をモデリングすることができ、例えば、補聴器内のシェルの減衰振動の解析を行ってフィードバック問題を回避することに活用することができます。

[イメージを見る»](#)

超音波 超音波インターフェースは波長に比べて大きな距離での音響波の過渡伝播を計算するのに使われます。人間には聞こえない周波数による音響攪乱は超音波に分類されます。これは超音波が短い波長をもつことを意味します。しかし、この超音波ブランチに属するインターフェースは高周波伝播だけを扱うというわけではなく、一般にどのような音響的に大きな問題でも扱うことができます。対流波動方程式、時間陽的インターフェースは、定常背景流中の多数の波長を含む大きな過渡線形音響問題を解きます。任意の時間依存のソースと場をもつ時間依存のシミュレーションに向いています。一般的に、このインターフェースは波長と比較して相対的に大きな距離を伝播する音響信号のモデリングに適しています。例えば、線形超音波問題です。このインターフェースには無反射境界条件のように設定できる吸収層を含みます。不連続ガラキン法による陽的時間発展ソルバーは大きなメモリを必要としません。超音波フローメーター、超音波センサーは飛行時間が重要なパラメーターとなるアプリケーションです。その他、音響室や車内における音声パルスの過渡伝播など、超音波に限定されないアプリケーションがあります。