

COMSOL NEWS

THE MULTIPHYSICS SIMULATION MAGAZINE

完璧なパフスナック
のエンジニアリング
Cornell University
PAGE 7

マヒンドラオートバイ：
爆音の舞台裏
PAGE 14

新型トランステューサーと
静電型ヘッドフォンの邂逅

Xi Engineering and WAT

PAGE 4

カスタムシミュレーションアプリで設計のチャレンジを乗り越える

設計者が直面する製品および他社との競争要件がますます複雑化する今日、最適な設計に到達するには全社的な協力体制が要求されます。

これは今年の COMSOL News の最重要トピックとして浮上してきた課題です。すなわち、組織内の他の部署に参加してもらうことによって、設計チームはより早く最適なソリューションに到達できているのです。しかし一体どうやって?

シミュレーション担当者は、COMSOL Multiphysics® ソフトウェアを用いてカスタムシミュレーションアプリケーションを開発し、COMSOL Server™ 製品を介してこれらを導入しています。製造および販売部門の技術者は、所属部門の個別ニーズを考慮して社内で開発されたアプリケーションライブラリを通じて、再現性の高いマルチフィジックスシミュレーションに簡単にアクセスすることができます。数学モデルの専門家でなくても、高度な計算ツールにアクセスできるのです。シミュレーションアプリケーションを利用するユーザーは、パラメータを変化させることによって、表や関数に影響を与えることができます。各自の専門スキルと顧客のフィードバックに基づいて、設計変更を提案することができます。

シミュレーションアプリが部署を横断して採用されたことにより、設計のワークフローがストリームライン化され、包括的になりました。過去で最大数のユーザーが、数式によるモデリングおよび数値シミュレーションにアクセスできるようになりました。組織全体の知識を総動員して、最高の製品を開発することが可能になりました。各トピックの詳細は、カスタム設計ハイファイトランスデューサについては Xi Engineering 社および WAT 社に、オートバイ開発については Mahindra Two Wheelers 社に、食品科学については Cornell 大学にお問い合わせください。COMSOL® ソフトウェアのユーザーに仲間入りしませんか?きっと過去最高の設計にたどり着くヒントが見つかるはずです。

それでは本編をお楽しみください。



Valerio Marra
Marketing Director
COMSOL, Inc.

INTERACT WITH THE COMSOL COMMUNITY



BLOG comsol.com/blogs

FORUM comsol.com/community/forums

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

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

COMSOL NEWS

2017-2018 日本語版

© 2017 COMSOL.COMSOL、COMSOL Multiphysics、Capture the Concept、COMSOL Desktop、COMSOL Server、および LiveLink は、COMSOL AB の商標または登録商標です。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おりますません。各商標の所有者について詳細は www.comsol.com/trn 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. の登録商標です。鳥のロゴマークは Twitter, Inc の登録商標です。G+ のロゴマークは Google, Inc. の登録商標です。

CONTENTS

HIGH-PRECISION TRANSDUCERS

- 4 | 音楽をあなたへ: 新型トランスマッサーと静電型ヘッドフォンの邂逅



FOOD PROCESSES

- 7 | 完璧なパフスナックのエンジニアリング

ELECTRICAL DEVICES

- 11 | シミュレーションアプリケーションで加速するカスタムコンデンサ設計

AUTOMOTIVE INDUSTRY

- 14 | マヒンドラオートバイ: 爆音の舞台裏

FLAT GLASS MANUFACTURING

- 17 | 製造工程におけるスクリーン保護の最適化

THERMAL MANAGEMENT

- 20 | シミュレーションアプリケーションの導入で販売を加速させ、強固なリレーションシップを構築



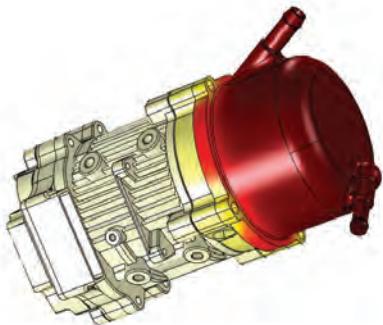
カバー写真

HPEL（高精度静電ラミネート）型超高性能ヘッドフォンおよび統合オーディオドライブシステム。
写真提供: Warwick Audio Technologies Ltd.

FEATURES

NONINVASIVE ACOUSTIC TECHNOLOGY

22 | 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



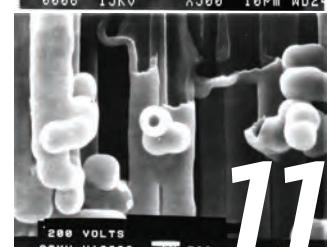
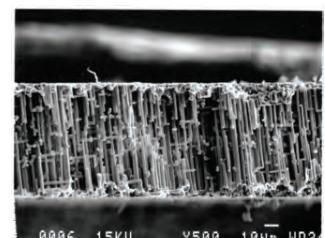
MULTIPHYSICS SIMULATION

25 | 仮想プロトタイプによって加速する
電子油圧パワーステアリング



14

28 | 温度上昇がセル内部に達する
速さを計る



22

30 | 補聴器研究の最先端
SPACECRAFT CHARGING

ADVANCED AUDIO COMPONENTS

30 | 補聴器研究の最先端

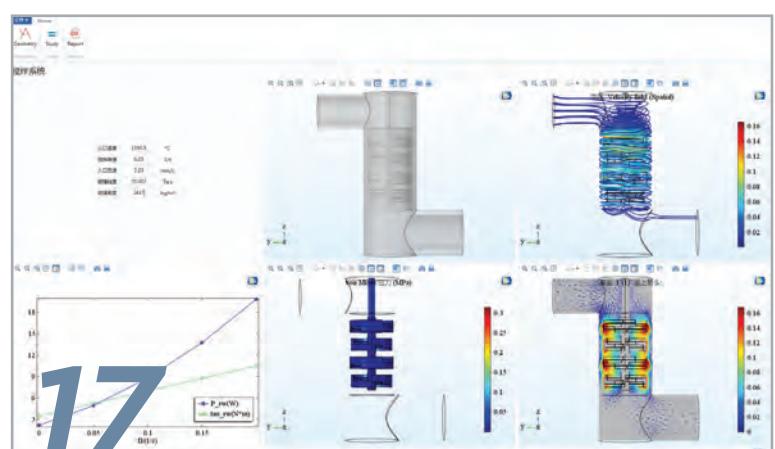
SPACECRAFT CHARGING

33 | 人工衛星システムにおける
電気アーク発生領域の予測

11

GUEST EDITORIAL

36 | シミュレーションで変貌する
医療機器業界



17

音楽をあなたへ： 新型トランステューサーと 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テューサを提供し、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奮しています。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を必要としていることを踏まえ、超薄型ダイヤ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)トランステ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 トランステューサは、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單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、トランステ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。

「以前は毎週いくつ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テ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

⇒ 音響プレイバックのシミュレーション

このようなトランステ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、トランステ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いかったことです」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有していませんでした。

同社は、HPEL トランステューサ設計

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しました。

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





図 1. WAT社のHPELトランステューサ(上から下へ順に): シングルラミネート、取付け後、完成品 HPELのトランステューサの立体構造。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、可能なかぎ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所以、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。」

トランステ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

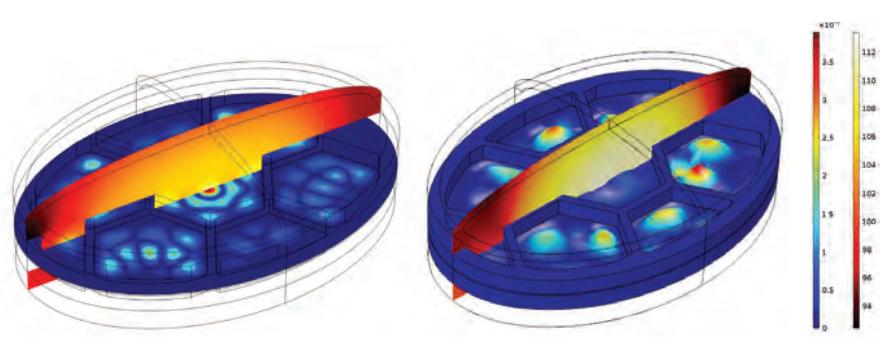


図 2. 完全な音響-MEMSカップリングを行ったモデルについて、周波数ドメインでシミュレーションを行った計算結果から得られた音圧レベル(単位dB、温度は色で示されています)および薄膜の変位(mm単位、虹色の面)のプロット。左: 5,000 Hzにおける計算結果。右: 5,250 Hzにおける計算結果。

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気的に相殺できるようになりました。

⇒ 理想の HPEL トランステ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、各部品の材料特性など、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、平面静電トランステ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ク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テ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ュアル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、スペーサー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フォン設計に最適な HPEL トランステ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

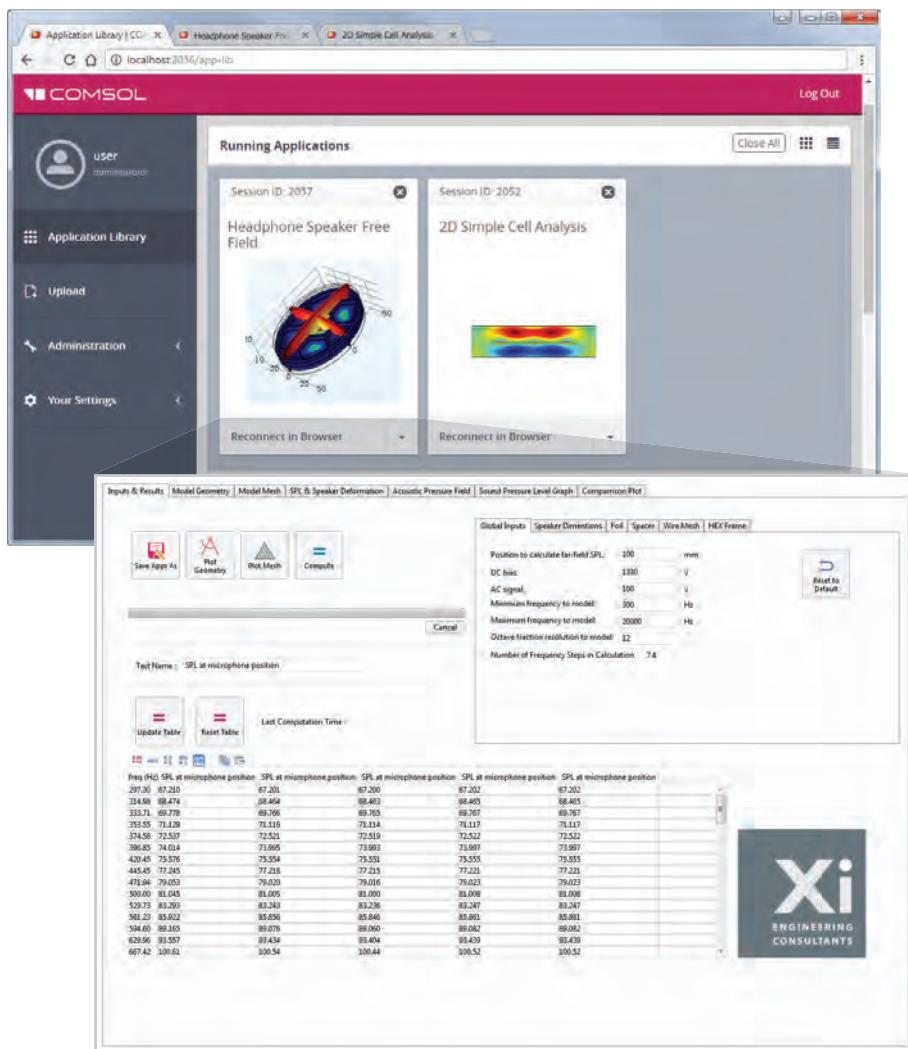


図 3. 前面: Xi Engineering 社が開発したアプリケーションでは、技術者は周波数、電気的入力、スピーカー寸法、そして薄膜、スペーサー、およびワイヤメッシュの特性に関連するパラメータを変化させることができます。シミュレーション結果として、ケースが異なる場合の音圧レベル、薄膜の変位、DC バイアスが異なる場合の周波数応答、およびシミュレーション設計と実験結果の比較を示しています。後面: シミュレーションアプリケーションは COMSOL Server™ 製品経由で共有され、Web ブラウザからアクセスできます。



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)

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。」♦

完璧なパフスナックのエンジニアリング

Cornell大学の研究チームが米粒の膨張（パフ）加工の数学モデルを通じて食品産業をサポート

執筆者 LEXI CARVER 氏

庶民の菓子としてアジア各地で何百年も前から食されてきたパフ加工穀物は、今日では大量生産されるシリアル／スナックの代表格として世界中の保存食料品店で売られています。サクサクした歯ごたえの米菓子、色とりどりのパフコーン、カリッという食感のチョコデザートなどは多くの人々にとって身近な大好物でしょう。

一方で、軟らかすぎたり、歯ごたえがありすぎたり、水気がなさ過ぎたり、開封したてなのに少し湿気ているなど、失敗品のお菓子に出くわしたときの残念な感覚も記憶があるでしょう。しかし、こうした「ハズレ」は一体何が原因で生じてしまうのでしょうか。たとえば、膨張中の米粒の内部ではどのような変化が起きているのでしょうか。漠然と観察していた人には、米粒が次第に加熱され、突然ポップコーンのように爆発的に変形するよう見えます（図1）。

しかし、パフ工程中の米粒の物理には、質量・慣性力・エネルギーの輸送、水分の急激な蒸発、材料の相転移、圧力の蓄積、塑性変形など極めて複雑な相互作用が関与しています。

食品企業各社は、パフ食品の水分と食感を適切に保ち、消費者の満足を維持す

るため多くの時間を費やしてきました。各社は、ゴム状の粒がごく希に含まれていたとしてもそれらはあくまでも例外で、ごく普通にそうした粒が含まれることがないようにするため、信頼できる加工条件を懸命に模索してきました。

食品会社は、パフ加工の製造工程を製造ライン規模にスケールアップする際、一定の食感、味、水分、そして場合によっては食品安全性を得るために、処理工程を最適化する必要があります。

⇒ 最適な製造条件の探求

Cornell大学は、米国農務省（USDA）の「農業および食料研究イニシアティブ（AFRI）」プログラムから研究助成金を得て、多孔質が変形し、かつその特性が相に依存する場合の輸送現象について、食品にフォーカスを置きながら研究を行いました。生物環境工学部 Ashim Datta 教授の研究チームは、膨張（パフ）工程におけるパーボイル米の動力学と材料の挙動についてモデリングを試みました。¹

最終的に最適な食感を得るため、研究対象はパフ工程中の相転移、エネルギー伝達、および力学的側面に加え、食塩による下味付け、温度、さらには初期の水分レベルにいたるまで広範囲に及びました。

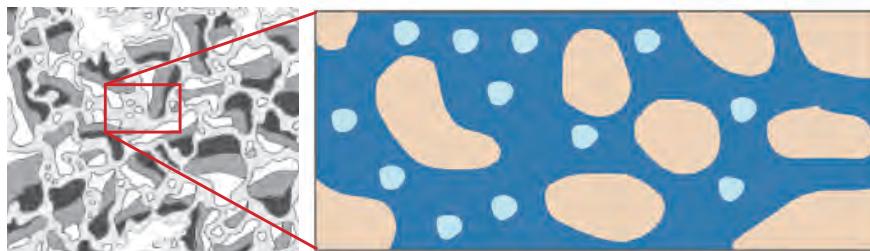


図2. 多孔質の弾塑性の固体として表現された米。穀物の粒には、毛細管現象による拡散、対流、および相転移にさらされる液体状態の水（濃紺色）、バレクフロー、二元拡散、および相転移の対象となる水蒸気および空気から構成される気体（薄い水色）、および大変形を起こす固体デンプンのスケルトン（ベージュ色）が含まれます。



図1. パーボイル米、パフ加工なし（上）およびパフ加工後（下）。

研究のコアコンセプトとして、幅広いシナリオに転用可能なモデリングの方法論にたどり着くことを目指しました。「食品加工の物理現象を研究するための一つのフレームワークを構築し、さまざまな課題に適用できるようにしました。たとえば油で揚げ物にする工程には特定の一式の物理現象が関与しており、一方で焼きの工程には、揚げ物と同じ枠組みの中ではありますが少し異なる一連の物理現象が関与しています。」Datta 教授はこう説明します。同教授は、いま食品産業のある関心事に心血を注いでいます。「消費者は揚げ物の食感は欲しい一方で、健康に悪影響がないことを求めます。同じ品質を求めていますが、同じ製法ではダメなのです。

したがって食品企業は揚げ物の代替として「焼き」や「パフ」に注目しています。製品や加工方法は日夜改良されています。そして何らかの変更を行う場合、新たな最適条件を設定しなければなりません。われわれが開発したフレームワークにより、加工法の変更が最終的な食品製品におよぼす影響について、より簡単に条件を入れ替えて試験を行うことができます。

「ある加工法に関して、温度や水分のさまざまな組み合わせが特定の力学的特性に到達することが分かれれば、別の加工法についても同じ品質の食品が得られるかどうか確認を行うことができます。異なる加工法が食感、水分または油分に与え

る影響を決定し、ひいてはこれらの健康上の影響についても知ることを目標にしました。」

研究チームが直面している最大のチャレンジの一つは、最終的な食品の状態に影響する因子が非常に多数に上ることでした。パーボイル米を 200°C まで加熱すると、液体の水は急激に蒸発し、米粒の中に大きな気体圧力の蓄積と相転移を発生させます。硬いガラス状の米粒から、軟らかく変形しやすい（ゴム状の）状態に急速に遷移し、最終的な形状まで風船のように膨張します。加熱時間および加熱開始時の水分食塩の含有量も決定的な役割を演じます。

⇒ 相互結合された物理現象のモデリング

これら諸因子の関連性を理解し、理想的な加工条件に迫るために、Tushar Gulati 氏（Datta 教授の当時の学生の一人）は米粒のパフ工程の謎を解明する研究に着手しました。

Tushar Gulati 氏は COMSOL Multiphysics® ソフトウェアを用いて、膨張過程のパーボイル米粒内部で機械的、熱力学的、材料的、流体的挙動が相互に関係し合う様子を解析しました。

「数値計算的に、この問題はとてもチャレンジしがいのある課題でした。」 Datta 教授はこう語ります。「研究チームは多孔質層内の流れ、複数相の輸送、固体力学、熱伝達の各侧面から解析を行ったほか、別の状況ではマイクロ波による加熱に関連して電磁的な挙動も組み込みました。」

Gulati 氏は、質量および慣性力の変化、エネルギー輸送、および大規模の体積膨張について解析するため、複数相の多孔質層モデルを構築しました。このモデルでは、固体米の各状態、水（液体相および気体相）、水分の輸送モード（毛細管現象による流れ、バイナリ拡散、および圧力による流れ）について解析を行いま

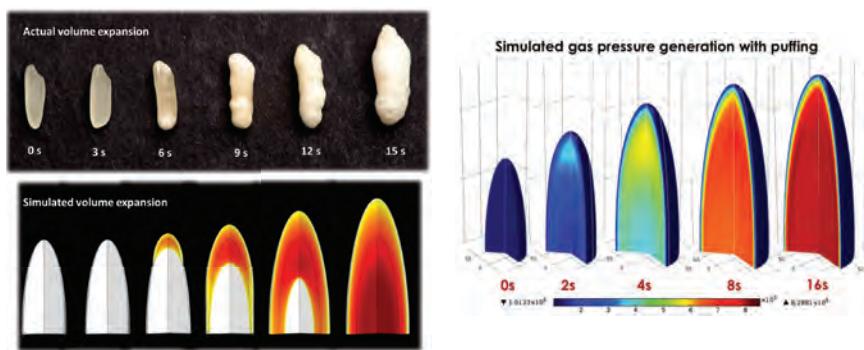


図 3. 左：15 秒間の膨張シーケンス中に実際に観測された体積膨張と、シミュレーションによる体積膨張。右：気体の圧力生成を示すシミュレーション。

した。彼は米を弾塑性の材料と仮定し、力学的な変位および膨張について計算を行いました。

シミュレーションの結果、膨張中の米粒の各時間における温度、水分、圧力、蒸発率、体積ひずみ、多孔質率、および応力レベルの空間的、時間的分布が判明しました（図 3 および図 4）。

研究チームは、微細構造の進展の可視化および膨張率の決定に用いたマイクロ CT 画像を再構築することを通じ、計算モデルの検証を行いました。また、Gulati 氏は、膨張率がモデル化された固体マトリックスの蒸発率および固有の浸透率に敏感に反応することを見ました。

研究の最終段階では、彼らは相転移を含め膨張中に発生する異なる挙動の間をリンクさせる完全なカップリングモデルに到達していました。Gulati 氏は輸送モデルを大変形とカッティングさせ、さらには食塩量が体積膨張、蒸発、および材料特性に及ぼす影響についてもテストを行いました。ガラス転移温度が食塩によって低下するため、米はより低い温度、より短い時間で膨らみます。

さらに Datta 教授は次のように付け加えました。「シミュレーション結果は、米粒内部の特性は加熱に伴い時間的に変化するだけでなく、加熱開始前にも米粒内部の特性が変化することを示してくれました。これを実験的に観測することは不可能でしょう。モデルは米粒が膨張、乾燥、

収縮する様子を示してくれました。」

また、多孔質の発展についても、多孔質の形成が米粒の先端から始まり、内部に進展する様子がモデルによって示され理解が深まりました（図 5）。研究チームはシミュレーションの結果に基づき、理想的なパフ加工米粒を得るために最適な食塩量、水分量、温度、および加熱時間を決定しました。さらに、膨張率を最大化するために必要な条件がシミュレーションによって示されました。

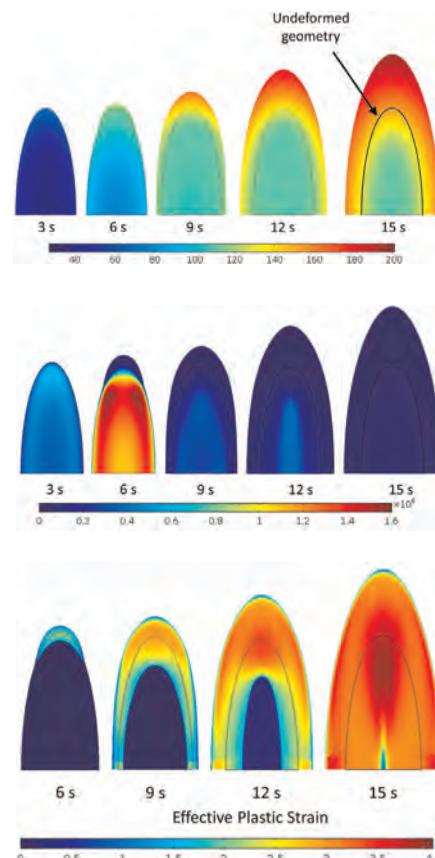


図 4. 膨張中の温度（図上、単位°C）、主軸方向の引張り応力（図中央、単位 PA）、および相当塑性ひずみ（図下）。

⇒ 食品工学の将来展望

Datta 教授の研究チームは今回のモデルの枠組みに加え、食品安全性の研究にもシミュレーションを活用しました。これは特定の食品の健康への利点を予測し、有効期限を把握し、採用した加工法の安全性を確保する必要がある食品企業で大きな意味を持ちます。

Datta 教授は、現在、米国農務省の国立食品・農業研究所(NIFA)の出資プロジェクトで主任研究員を務めており、彼の学生は COMSOL を用いてシミュレーションを構築するだけでなく、技術者以外にも解析能力を抜げるべく計算アプリケーションの作成も行っています。Cornell 大学では、アプリケーションは COMSOL Server™ を通じて大規模に導入されています。アプリケーションを使用するだけであれば、ソフトウェアやハードウェアについて直接に詳しく学ぶ必要がないため、学生・教員に大きなメリットがあります。

「シミュレーションアプリケーションによって教育に新たな可能性がもたらされています。」 Datta 教授はこう指摘します。「ある食品安全性の授業では、アプリケーションによって分野横断的カリキュラムを提供できるようになり、学生はいくつもの仮想シナリオについて現実的なシミュレーションを行えるようになりました。」 Cornell 大学で開発されたアプリケーションは、米国内の複数の大学で用いられています。

同教授のチームは食品科学者向けに缶詰を適用範囲に含むアプリケーションを提供しており、殺菌に必要な加熱時間が容器サイズによって変化する様子の解析に用いることができます（図 6）。アプリケーションのユーザーは、温度を設定するだけで、指定した缶の食品を安全な温度まで加熱するために必要な時間を計算することができます。また、最終製品が安全に消費できるものかどうかを確認するため、バクテリアの死滅率を調節することができます。

Datta 教授によれば研究を始めたきっかけはパフ加工米でしたが、研究成果のアプリケーションはトウモロコシなど他の農作物、さらには全く無関係の分野にも簡単に転用が可能とのことです。「ここで採用されている物理およびモデリングの知識は異分野の業界でも活用できます。

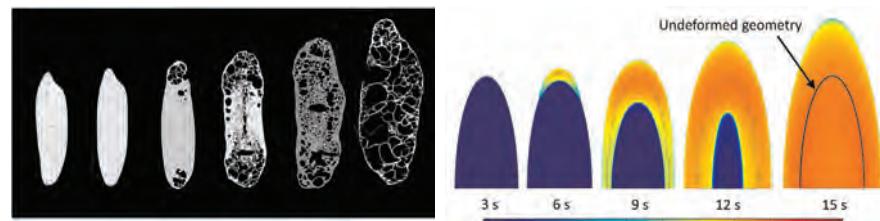


図 5. 左：米粒の膨張過程を異なる時点での CT スキャン。右：予測される多孔質のプロファイルのシミュレーション結果。

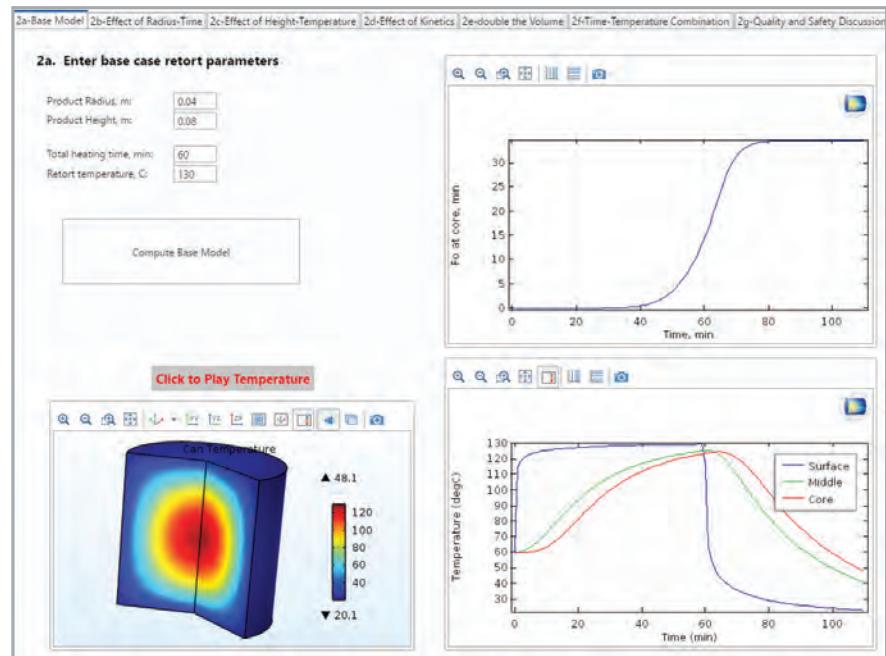


図 6. 缶詰食品の解析のため Datta 教授の学生が作成した計算アプリケーション。ユーザーは、缶の寸法や加熱時間などパラメータを変化させることができます。

たとえば私の学生の一人は、当研究室で開発した手法に似たシミュレーション技術を用いて、のちに自動車向け触媒コンバータのモールドのマイクロ波乾燥工程について勉強しています。」 Datta 教授はこう言います。彼は現在、次世代の技術者に物理モデリングの基礎を教えていますが、食品産業の次の進化についても大きな関心を寄せています。♦

参考文献

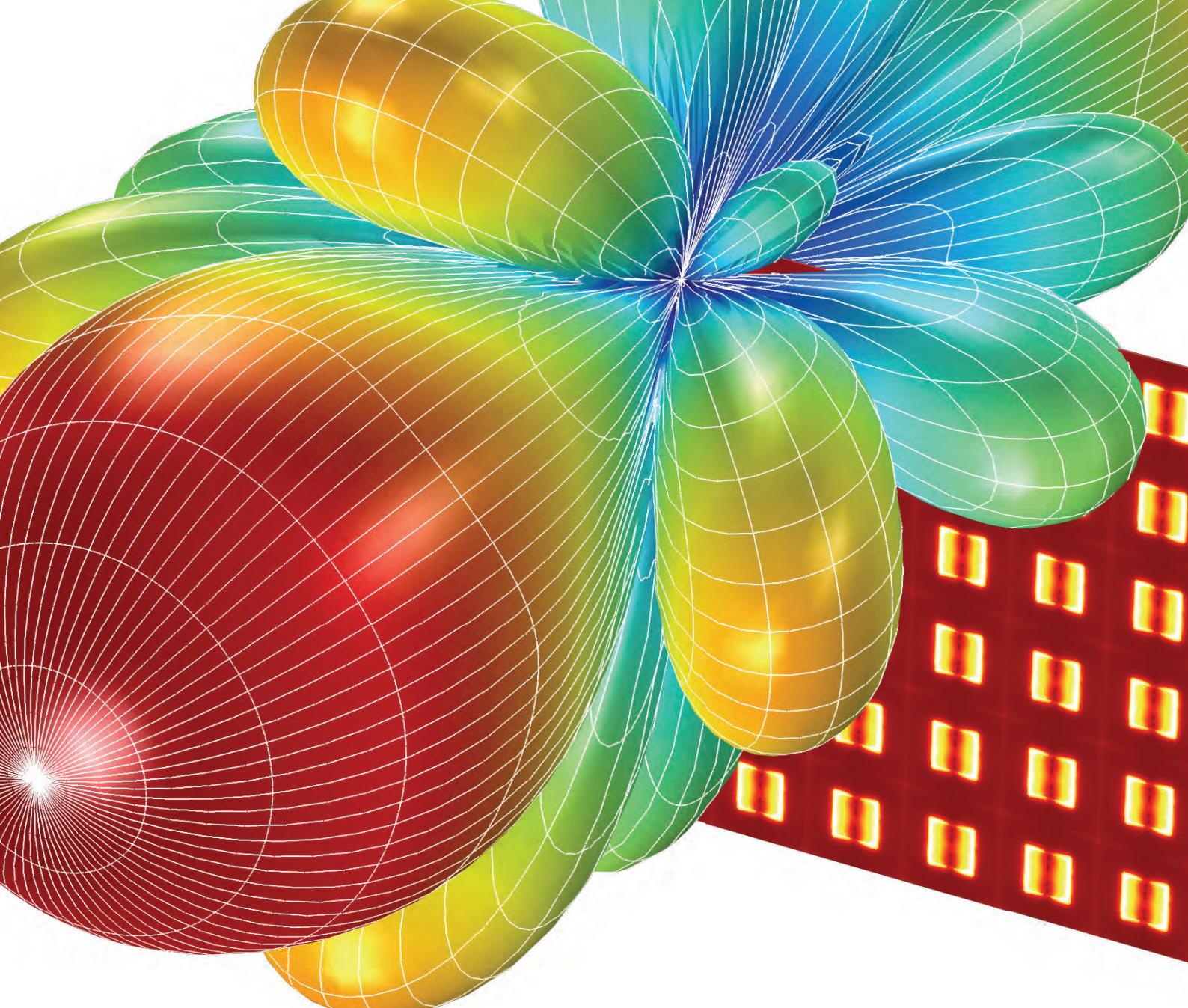
1. Gulati, Tushar and Datta, Ashim K. "Coupled multiphase transport, large deformation and phase transition during rice puffing," *Chemical Engineering Science* 139 (2016) 75–98.



Datta 教授が最も楽しんでいる仕事の一つが、COMSOL を用いて生体医学プロセスのモデリングを学生に紹介する Cornell 大学の授業です。COMSOL

ソフトウェアには米粒のパフ加工の工程に見られるような統合マルチフィジックス現象を完全にカップリングする能力があるため、Datta 教授は、生体医学科学分野における各種適用対象に関し、学生がシミュレーションおよび根底にある物理について学習する際に、COMSOL が強力なツールになり得ると考えています。

本年、Datta 教授は食品工学の仮想化に関する研究会から派生した短期の国際スクール The International School on Modeling and Simulation にてワークショップを担当する予定です。



デザインの 検証と 最適化

COMSOL Multiphysics®

物理現象数値シミュレーション
ツールの進化は、大きな
マイルストーンに達しました

COMSOL Multiphysics®を利用すると、
設計上の課題の解決が容易になります。
強力な数学的モデリングツールとソルバー
技術を使用して、正確かつ総合的なシミュ
レーション結果を提供します。

Application Builderを利用してカスタムア
プリケーションを開発し、それをCOMSOL
Server™を利用してネット配信すると、組
織内および世界中の顧客に展開できます。
最新のマルチフィジックスの力を活用しま
しょう。

comsol.jpでライブデモをリクエストしてく
ださい。

シミュレーションアプリケーションで 加速するカスタムコンデンサ設計

Cornell Dubilier Electronics 社の技術者は、シミュレーションアプリケーションを用いてカスタム設計コンデンサの評価および最適化を行っています。これらのアプリケーションにより、設計および製造部門の技術者はシミュレーションの根底にある複雑な計算モデルをバイパスして、さまざまな設定をオンラインで素早く試すことができます。

執筆者 SARAH FIELDS 氏

コンデンサは、今日の一般的な電子デバイスから極限状態の考慮が要求されるケースまで、あらゆる製品に採用されています。コンデンサに求められる要件は、用途ごとに大幅に異なります。消費電力に関して正確な仕様に従うことが要求されるケース、特定の温度範囲で機能することが要求されるケース、特定の材料で製造される必要があるケースなど、コンデンサには状況に応じてさまざまな要件が適用されます。

Cornell Dubilier 社はカスタムコンデンサの製造最大手の一角として、軍用および航空宇宙分野の中でも最も要求条件の厳しい戦闘機、レーダーシステムなどの分野から、風力発電や太陽光発電など民生用のコンデンサまで幅広く開発を行っています。Cornell Dubilier 社の技術者は、数学的モデリングおよびカスタムシミュレーションアプリケーションを駆使して、カスタムコンデンサのファインチューニングを行っています。

「COMSOL Multiphysics® および付属の Application Builder を用いて高品位マルチフィジックスモデルを作成し、さらにこ



図 1. アルミ電解コンデンサ。コイルは、アルミ箔とセルロース系セパレータから構成され、熱異方性を呈します。

れに基づいてアプリケーションを構築することによって、我が社の他部署のメンバーにもいろいろな設定を試しながら最適な設計を選択してもらえるようにすることができます。」Cornell Dubilier 社の研究部長 Sam Parler 氏はこう語ります。

⇒ 対象が「ヒートアップ」するとき

Cornell Dubilier 社のコンデンサは設計された目的に特化されており、たとえば電解コイルはアルミ箔とセルロース系セパレータ、オフセットされ金属蒸着された誘電フィルムで構成される静電コイル、金属箔と雲母などの誘電体プレートを交互に重ねたものなど、1つまたは複数の要素から構成されている可能性があります（図 1）

コンデンサの設計者がまず第一に検討するのが熱の問題です。設計において、コンデンサ内の熱プロファイルについて完全な理解を得るには、コイルのアルミ箔に電流を流したときに発生するジュール熱を考慮する必要があります。熱の蓄積はコンデンサの寿命を著しく縮めますが、具体的には温度が最大値より 6 ~ 10 度高くなる毎に、コンデンサの寿命は約半分になります。Cornell Dubilier 社の技術者はシミュレーションを用いて発熱を最小限に抑え、放熱を最適化しています。

熱の発生および放散を最適化するには、コンデンサの複雑な材料を正確に表現する必要があります。1 個のコンデンサには 6 種類に上る材料が用いられる場合が少なくなく、しかも異方性の特性を持つ材料が含まれる場合もあります。ある設計ではセルロース系セパレータとアルミ箔から構成されるコイルが採用され、軸方向に、半径方向を 2 桁上回る熱伝導性を持つ異方性を示します。

熱伝導性テンソルを直接に入力すること

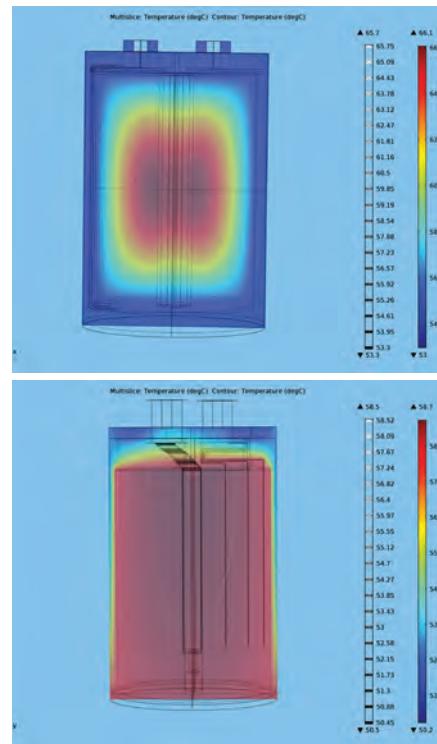


図 2. 金属蒸着ポリプロピレンフィルムコンデンサ（上）とアルミ電解コンデンサ（下）の熱的比較。いずれも寸法は約 76 × 120 mm、45°C の環境で 5W を発散します。

が可能な COMSOL Multiphysics® の柔軟性のおかげで、Parler 氏はコンデンサの熱プロファイルを正確に捉えることができています。たとえば、Z 軸に沿った円筒型電解質コイルの典型的な単純コンデンサテンソルは、対角方向の熱伝導率テンソルを {1,1,100} [W/m/K] とした直交異方性のテンソルで近似することができます。

ある事例では、Parler 氏はサイズおよび定格脈動電流が同程度でありながら、全く構造の異なる 2 個の電力コンデンサ、すなわち金属蒸着ポリプロピレン（プラスチック）フィルムコンデンサとアルミ電解コンデンサを検討しました（図 1 および図 2）。

プラスチックフィルムコンデンサ（上）は、アルミ電解コンデンサ（下）に比べて格

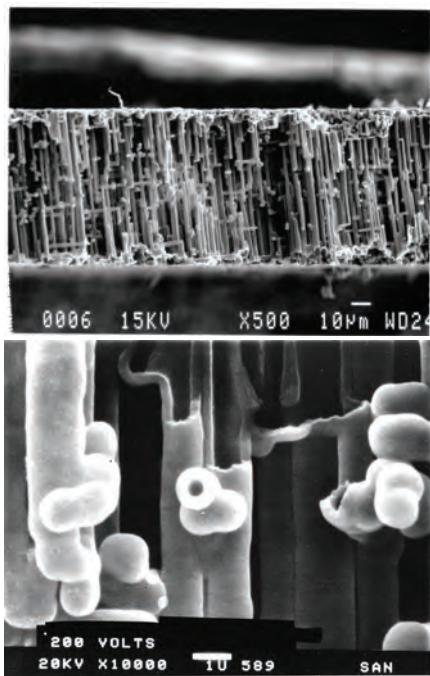


図3. 大型アルミ電解コンデンサの同軸微細構造。誘電体は、陽極処理槽の中で高度なエッチングが施されたアルミ箔の曲面上に成長させた酸化アルミニウム(AL2O3)です。写真では、アルミナ製の誘電チューブを覆っていたアルミニウムはすでに溶解、消滅しています。

段に低い熱伝導性を示します。Parler 氏はマルチフィジックスシミュレーションを用いることにより、発散される熱のワット数が与えられた場合に、アルミ電解コンデンサに比べてプラスチックフィルムコンデンサがどれだけ熱くなるかを定量化することができました。

⇒ 形状の最適化により微細構造の謎を解明する

Cornell Dubilier 社で開発されるコンデンサの多くが新開発技術であるため、最先端材料のインピーダンスを社内で調べなければならない場合があります。ある大型アルミ電解コンデンサを設計する過程で、Parler 氏は複雑な微細構造を持つ酸化アルミニウム(AL2O3)誘電体のインピーダンスを決定する必要がありました。この誘電体は陽極処理槽の中で、高度なエッチングが施されたアルミ箔の曲面上に製造されました(図3)。

COMSOL以外のソフトウェアでは、0次元の電気回路シミュレーションの場合は周波数応答を計算できましたが、遷移シミュレーションについてはソフトウェア内部のラプラス逆変換の制約により"原因不明"

エラーが発生してしまい、実行することができませんでした。

COMSOL ソフトウェアの形状最適化テクニックを用いることで、Parler 氏は顧客のために遷移問題の解を正確に計算することができました。同氏は電解質が充填された容量性多孔質の円筒形から着手して、開口部に既知の励起を適用し、COMSOL ソフトウェアに提供されるスパース非線形最適化ソルバー(SNOPT) Sparse Nonlinear Optimizer Solver を用いて非線形最適化問題の解を求め、計算結果が実験的に得られたインピーダンスのデータと一致するまで軸対象の多孔質壁を変化させて計算を繰り返しました。

結果として得られた形状(図4)は、実験で計測された時間依存パルス電流に対する応答をソフトウェアを用いて正確に再現することが可能であり、ここで有効化された数学モデルを出発点にしてさらなる設計作業を行えることが示されました。

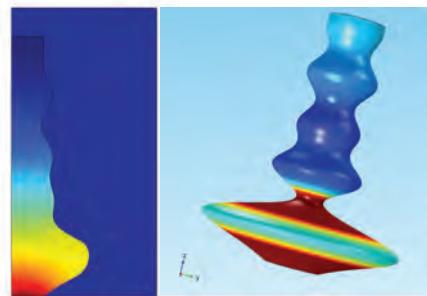


図4. 誘電体材料の同軸微細構造の電気的挙動を把握するもう一つのアプローチは、形状最適化テクニックを用いることです。最適化された微細構造を示します。

⇒ 電気的な最適化を実現する各種アプリケーション群

設計を解析するためのモデルを COMSOL を用いて制作したのち、Parler 氏と開発チームは設計技術者や製造現場にいつでも導入し、設計工程をアシストできる準備が整ったシミュレーションアプリケーションにモデルを変換します。

ある電力用フィルムコンデンサ向けシ

「COMSOL Multiphysics® および付属の Application Builder を用いて高品位マルチフィジックスモデルを作成し、さらにこれに基づいてアプリケーションを構築することによって、我が社の他部署のメンバーにもいろいろな設定を試しながら最適な設計を選択してもらえるようにすることができます。」

— SAM PARLER, RESEARCH DIRECTOR, CORNELL DUBILIER

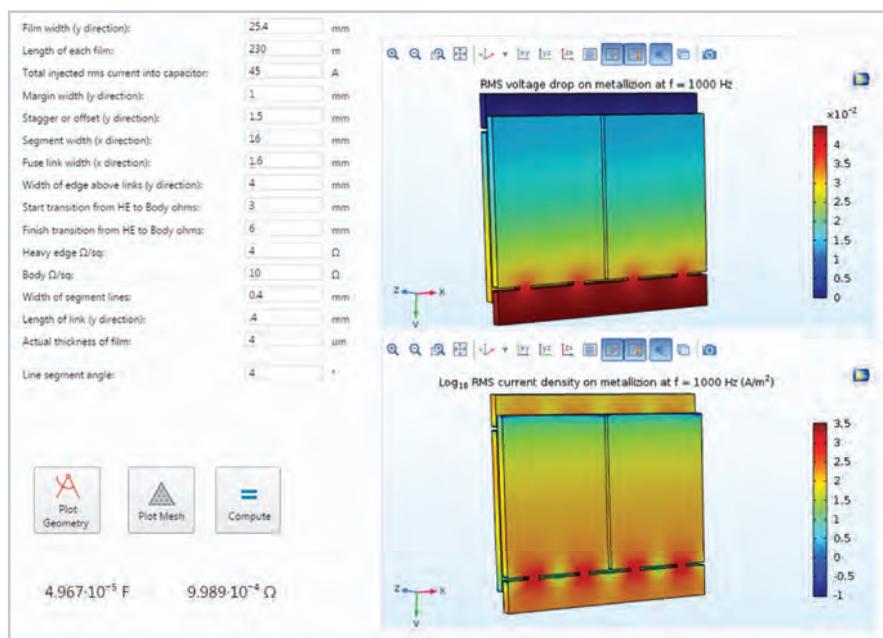


図5. 電源用フィルムコンデンサの設計アプリケーション。容量および抵抗の決定に用いられています。

ミュレーションアプリケーションでは、設計技術者はフィルム幅（一般的には数センチメートル）、フィルムの長さ、表面抵抗、遷移領域の位置をインターフェースに入力することにより、金属フィルム 1 セグメントあたりの容量および抵抗を計算することができます（図 5）。シミュレーションの結果はスケーリングされ、コイル全体の容量および抵抗を計算できるので、技術者は自分の設計について第一段階の検証を行うことができます。

また、別のアプリケーションは円筒型コンデンサの金属フィルムの電力密度を計算します。さらに、このアプリケーションではリップル電流、環境温度、空気の速度など顧客の運用条件を考慮に入れ、タブや端末などの条件もすべて含めてコアの温度分布を予測できます（図 6）。

3 つめのアプリケーションは、シングルタブ型フィルムコンデンサの有効直列インダクタンス (ESL) の計算に用いられます（図 7）。端末の直径、端末の高さ、端末の間隔、タブの幅、コイルの半径、コアの外径などの寸法パラメータは、すべてアプリケーションのユーザーが変更できます。アプリケーションのベースになったモデルでは、COMSOL の周波数領域の解析機能および電磁モデリング機能が活用されています。ESL はあらゆるコンデンサの設計において鍵を握る要素で、コンデンサの性能に直結します。

⇒ アプリケーションが導く未来の製造業の姿

マルチフィジックスシミュレーションによって、Parler 氏のチームは設計したコンデンサの性能を正確に予測することができるようになり、開発が加速され、製品の信頼性が確保されます。

設計チームのシミュレーション専門家以外のメンバーや製造現場の技術者は、COMSOL のモデルをベースにしたシミュレーションアプリケーションによって、単純化されたユーザーインターフェースでシミュレーションの主要パラメータを調整できるようになり、コンデンサの性能を確認したり、設計を修正した場合の影響を確認できるようになりました。これらはシミュレーションの強力な能力を設計・製造工程の全体に広げてくれます。

Parler 氏は次のように締めくくりました。

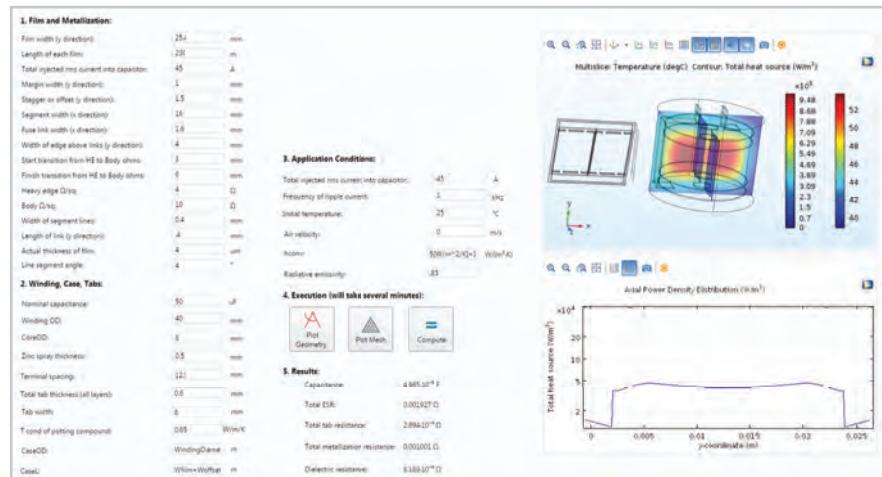


図 6. タブや端末が取り付けられた円筒型コンデンサのフィルムのコア温度の分布および電力密度を予測するシミュレーションアプリケーション。

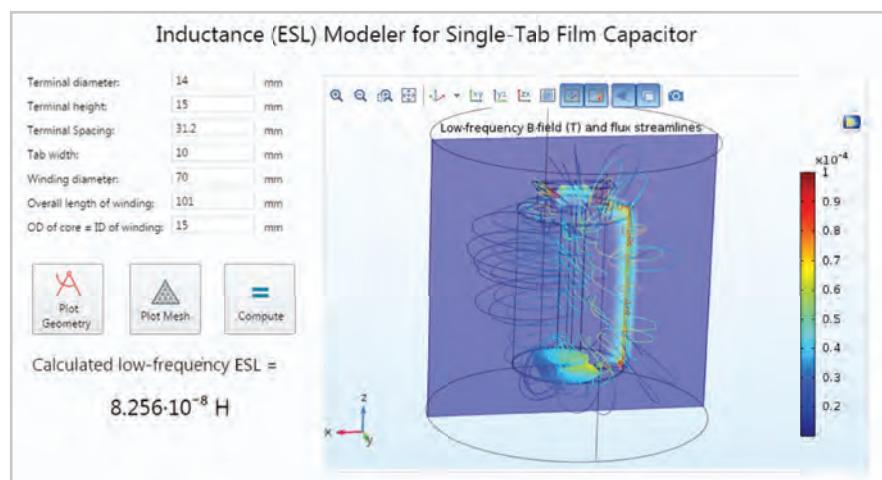
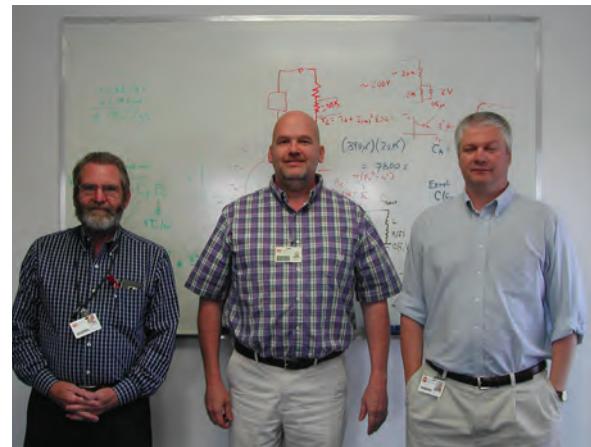


図 7. シングルタブ型フィルムコンデンサの有効直列インダクタンス (ESL) の計算に用いられるアプリケーション。

「マルチフィジックスモデルならびにシミュレーションアプリケーションを構築する能力はわれわれのコンデンサ設計工程をストリームライン化し、世界にひろがる弊社の顧客向けにカスタマイズされたコンデンサの開発を加速してくれました。」



左から右へ: Cornell Dubilier 社 David Leigh (研究員)、Sam Parler (研究部長)、Trent Bates (コンデンサ技術者)。



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、バルブトレーン、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、パワートレー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

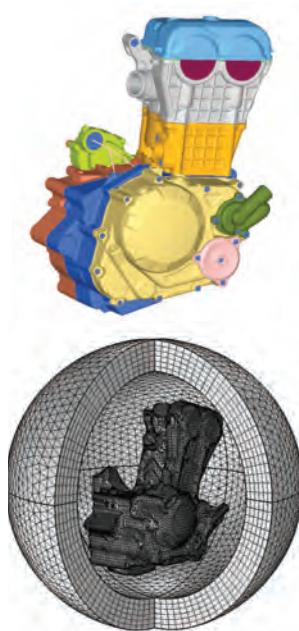


図 1. 上: エンジンのCAD形状。
下: メッシュが作成され、PMLに封入された3Dモデル。

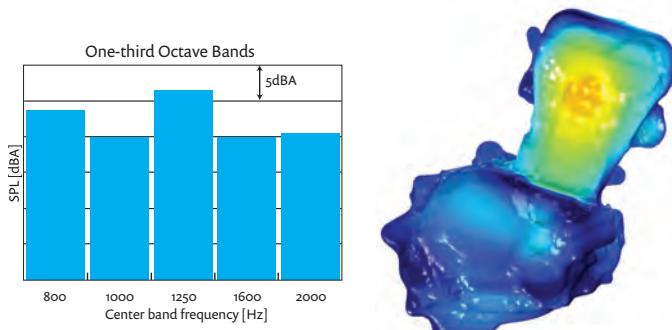


図 2. 左: 1/3オクターブ帯のプロット。右: 音圧レベル(SPL)シミュレーション結果の3D面プロット。

計算領域内にエンジンスキンを封入しました。PMLは、外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、シリンドラヘッドおよびシリンドラブロックに対して、リブ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ブ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など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

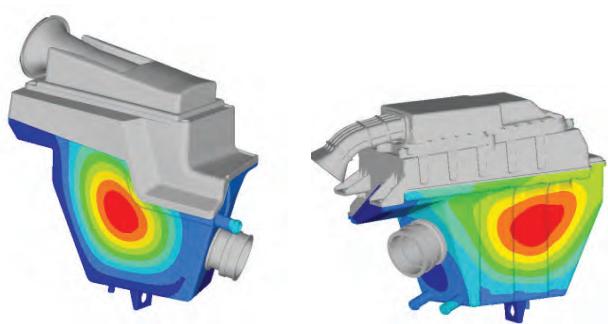


図 3. エアフィルタ構造。左: オリジナルの設計。右: 変更後の設計(ATF向上をもたらすリブが特徴的)。

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。

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。

排気管内のパフォーマンスは、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、パフォーマンス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。解析に必要な入力は、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。

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。

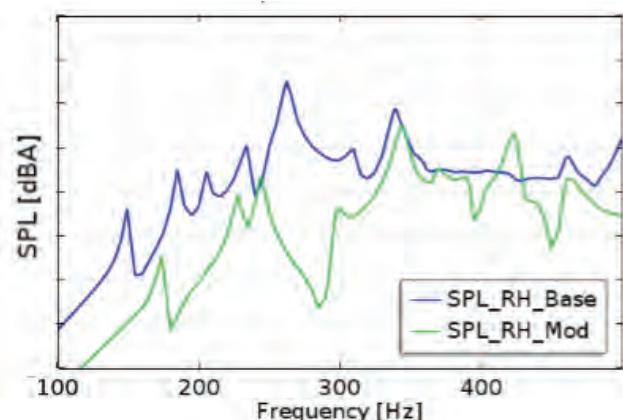


図 4. シミュレーション結果は、エアフィルタの設計に変更を加えたことにより構造ノイズが低減したこと示しています。

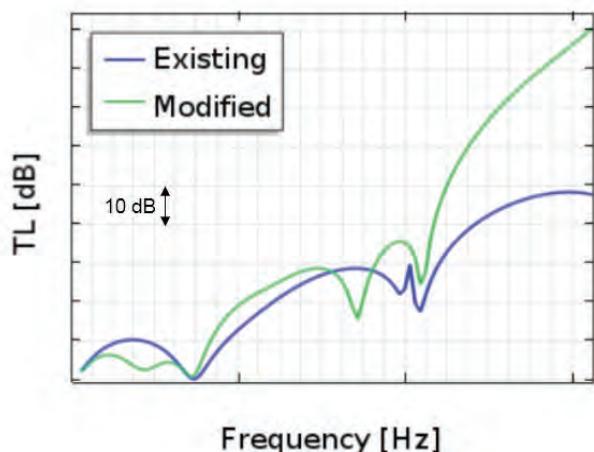


図5. 設計が異なる場合の変換損失 (TL) の比較。設計変更後の特徴として、低周波数域の変換損失が減少し、高周波数域の変換損失が増大しています。変更後の設計では、法規制に適合しながら、目標に掲げた「重厚な爆音」が達成されています。

「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/>

製造工程におけるスクリーン保護の最適化

Kornerstone Materials Technology Co.,Ltd. (KMTC) はマルチフィジックスシミュレーション技術を用いてガラス製造工程を最適化し、シミュレーションアプリケーションによって社内各部署のコラボレーションを導いています。

執筆者 **VALERIO MARRA 氏**, **LEXI CARVER 氏**

スマートフォンやタブレットは職場、学校、レジャー、エンタテインメントなど、今日の私たちの日常生活と不可分になっています。モバイルデバイスの画面には、カバーガラスとして知られる最上部の保護層が取り付けられています。カバーガラスは画面の保護を主目的とし、透光性とエレガントな見栄えを提供します。

カバーガラスは、従来のソーダ石灰ガラスと比べ価格にして数十～数百倍にもなるハイエンド製品です。極めて難易度の高い製造工程が高価格につながっています。カバーガラスがさまざまな条件下で異なる挙動を示すことは、さらに問題を複雑化させています。こうした特徴のため、カバーガラスの製造には一企業の製品開発部門が総力を結集する必要があります。

Kornerstone Materials Technology Co., Ltd. (KMTC) は、ディスプレイ、タッチコンポーネント製品、ハイテク材料の開発および製造を専門にしています(図1)。KMTC社の研究開発部長 Frank Hong 氏はこう言います。「弊社は、スマートフォンやタブレットなど電子デバイスのカバーガラス製品に注力しています。ますます多様化する弊社顧客のニーズに応え、さらにタッチディスプレイ産業の機会とチャレンジに向き合うためにも、KMTC社はマルチフィジックスシミュレーションの利点を生かしてガラス製造工程の評価および最適化を行っています。

⇒ ガラス製造工程におけるマルチフィジックス

ディスプレイ用ガラス業界は、フロートガラス、スロットダウンドロー、オーバーフローダウンドローの主要な3つの製造方法に分類されます。これら3つの中で最も広く用いられている手法がオーバーフローダウンドロー法です。この製法で

は、両側からあふれ出した溶融ガラス領域が再合流する際に、極薄のガラスシートが空気中で自然に形成されます(図2左)。製造されるガラスは、平らな表面と埃のつかない切断面が得られます。ガラス表面の特性の違いを修正するために研削、研磨を行う必要がありません。

KMTC社は、高アルミナ含有カバーガラスのパイオニア企業として、オーバーフロー技術の適用を国内最大手のレベルまで拡大してきました。Hong氏は次のように言います。「われわれ独自の加工技術により、形成工程において一切シミや傷をつけることなくガラスを製造することができます。形成されたガラス板の表面は平滑、純粋、そして途切がなく、顧客である電子機器市場の要求に応えることができます。」

オーバーフローダウンドロー工程で、溶解炉から流れ出した高粘度・均質の溶融ガラス流はプラチナ製の流路を通り、耐火材製のオーバーフロー形成ブロックへと導かれます(図2左)。溶融ガラスは重力に従い、ブロックの両側を流れます(図2右)。ガラスはブロックの最下部で再度合流したのち、ガイドプレートに沿ってそのまま下へ向かい、空気中で冷却され極薄のガラスシートを形成します。

ガラスシートの厚さおよび生成量は、

入口における流れとガイドプレートによって制御されます。温度はガラスの粘度および流速に影響するため、常時監視が行われ、ゆがみが生じないよう慎重に制御する必要があります。完全なガラス製造工程は、流体・固体・熱電気のカップリングが関係するマルチフィジックス問題です。

KMTC社の技術者は、ガラス溶融システムにおける電気加熱の効率解析にマルチフィジックスモデルを用いています。さらに、そのモデルをベースにしてアプリケーションを構築し、製造工程のリアルタイムのシミュレーションを行っています。計算の結果として得られたデータは、製造部署が製造工程を採用する際にガイドラインに用いられます。

COMSOL Multiphysics® ソフトウェアで構築された彼らのモデルには、流体、構造、熱、電気現象のカップリングが含まれます。ガラスの形成工程において、流出したガラス表面が冷却し、応力が発生する前の厚さの分布を計算するために、シミュレーションチームは溶けたガラスの流体および伝熱シミュレーションを行っています(図3)。「COMSOLソフトウェアのおかげで、弊社独自の構成方程式を入力したり、入口における速度や形成ブロックの傾斜角などのパラメータを変更



図1. 3D カバーガラスにより、設計者はスマートフォンやタブレット向けに、より良いディスプレイを提供できます。

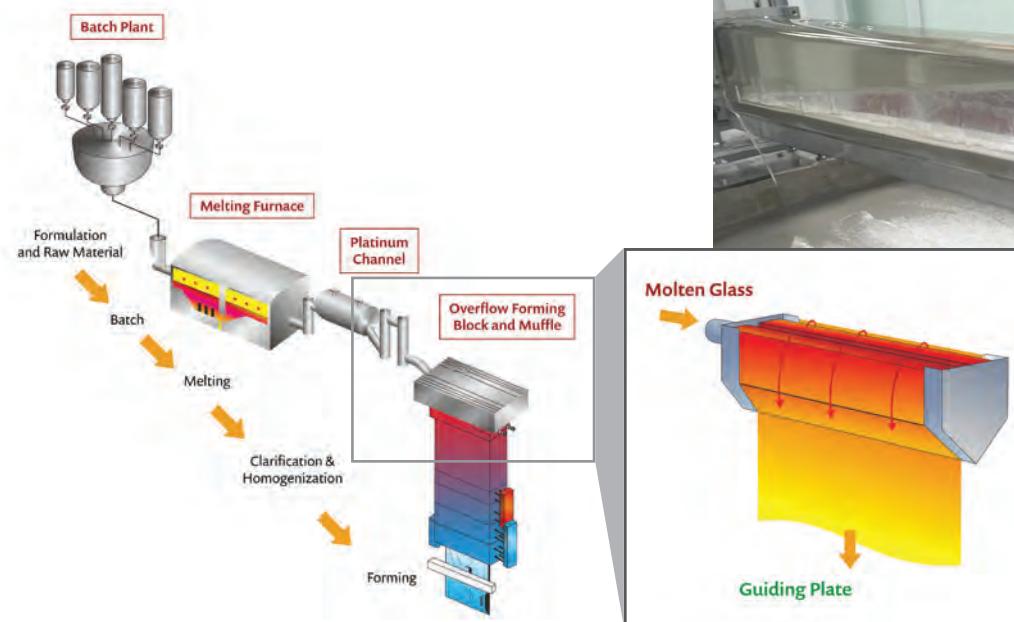


図2. オーバーフローダウンドロー工程: 概要図(左)、形成ブロックの詳細図(右)、溶融ガラスがオーバーフローする様子を写した写真。

するなど、大量生産に移行する前に製造の諸条件を最適化できるようになっています。」Hong 氏はこう説明します。

マルチフィジックスシミュレーションの結果は、厚さ、均一性、なめらかさ、最終的なシートの不良率などの因子に基づいて、ガラスシートの品質を予測したり装置や工程の条件を最適化するために使われています。「COMSOL によって、必要なレベルのカスタマイズを施したマルチフィジックス問題を解決することができます。」Hong 氏は言います。

⇒ 電気加熱システムのシミュレーション

溶融ガラスが形成ブロックの耐火材に接触すると、空気を含んで組成が変化し、気泡が生じたり最終的なガラスシートの重量が変化したりします。ガラスが形成ブロックに到達する手前にプラチナ製流路を配置することにより、精製、均一化、攪拌、温度調節といった前段階での調整が可能になり、上述の問題を補正してくれます。AC(交流)制御の加熱管によりリアルタイムで温度制御が可能なため、溶融ガラスが流路を通過する際の粘性率を各セクション毎にコントロールできます。

流路に設置されるAC加熱管の構造には、壁の厚さが均一でない直管を用いるタイプと、壁厚が均一なZ型管を用いるタイプの2種類があります(図4)。

「COMSOL Multiphysics® を用いることにより、両タイプの加熱管の構造について、管壁における現在の密度分布および加熱の効果を計算することができました。」Hong 氏は言います。

マルチフィジックスモデルには、電流と伝熱をカップリングさせたジュール加熱が含まれます。支配方程式は有限要素法での計算のために離散化され、周波数的に静的な解析として解かれます。計算結果は AC 加熱の効果および表面における電流密度の分布として与えられ、これは図4に示されています。計算結果から、Hong 氏のシミュレーションチームは2種類の管で加熱効果がどのように異なるかを知ることができました。また検証実験により、シミュレーション結果と実際の測定がよく一致することが示されました。

⇒ シミュレーションアプリケーションで拡がるコラボレーション

「このような特化されたモデルを構築するには、シミュレーションの専門知識に加え、シミュレーションの対象となるシステムの知識が要求されます。」Hong 氏はこう説明します。この知識を、専門知識を持たない社内メンバーと共有する最も効率的な方法は、COMSOL ソフトウェアに付属の Application Builder ツールを活用することです。シミュレーションの専門家は、作成したモデルをカスタマイズして、指定したパラメータだけをユーザーからアクセス可能にできます。モデルをベースにして個別にカスタマイズされたインターフェースを社内に配布することにより、社内の各人が複雑な解析を自分で行えるようになります。

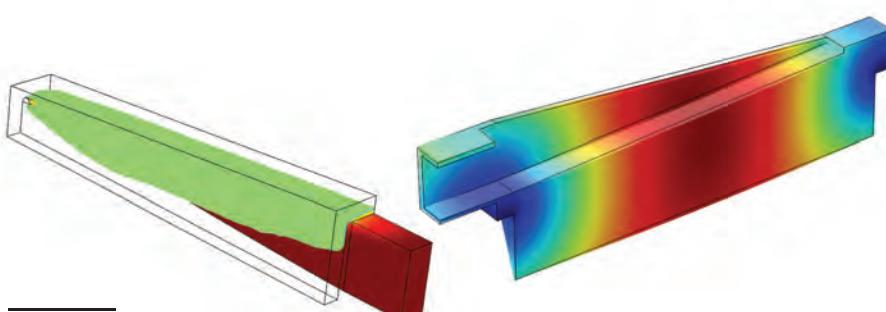


図3. COMSOL ソフトウェアによる溶融ガラスのオーバーフロー工程のシミュレーション。計算結果は、溶融ガラスの流れの領域(左側、緑色)および形成ブロック内のひずみ(右)を示します。

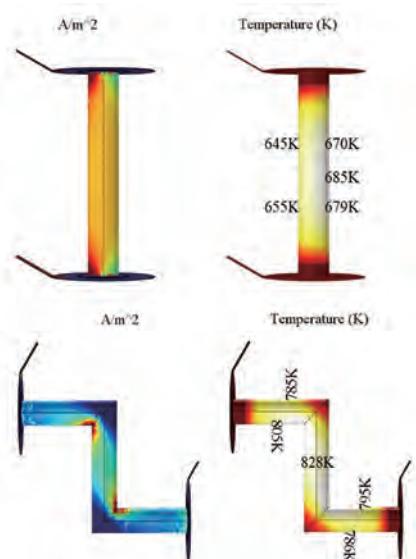


図4. 加熱管内のガラスの状態を予測するシミュレーション。

上: 壁の厚さが不均一な直管。

下: 壁の厚さが均一な壁を持つZ型管。左から右へ: 流れの密度および温度の分布を示すシミュレーション結果。

KMTC社のシミュレーションチームは研究開発部門の所属ですが、シミュレーションアプリケーションを通じて、同チームの成果はエンジニアリング部門でも活用されています。次のチャレンジは、顧客がシミュレーションに直接アクセスできるようにすることです。そうなれば、アプリケーションのベースになったマルチフィジックスモデルの専門知識が無くても、設計のニーズに従って顧客自身が具体的な調整を行うことができるようになります。

KMTC社のシミュレーションチームは、プラチナ製流路を解析するアプリケーションを構築しました。このアプリケーションは、製造中の流体の温度および速度の計算、ならびに過熱管内部の応力分布の計算を行い、応力レベルおよびガラスの最終状態を予測する目的に使用することができます(図5)。アプリケーションのユーザーが利用できる入力パラメータには、ガラスの温度、流路の入口における速度、および加熱電力が含まれます。定常解析では操業中の条件の評価・最適化を行うことができ、時間依存の解析ではリアルタイムの製造工程のシミュレーションを行えます。アプリケーションは、製造現場における指示を定義する上で必要なデータを提供します。

「技術者としては、アプリケーションのインターフェースを通じて入力パラメータ

を変更できることは、たとえば加熱管内のガラスの状態を予測するなどの目的には非常に便利です。」Hong氏はこのように言います。「設計者の仕事が簡潔になり、チームの効率も向上しました。」

このようにして、シミュレーションのワークフローが全体的にストリームライン化されました。シミュレーションの専門家はパラメータ化された数学モデルを作成し、後日のために各種の設計パラメータを追加した上で、そのモデルを他の技術者が利用できるようシミュレーションアプリケーションに変換して導入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に馴染みのない設計者も、シミュレーションアプリケーションによって実際の問題を柔軟かつ効率的に解くことができます。

シミュレーションチームは、クラスタコンピュータにインストールされたCOMSOL Server™ 製品にシミュレーションアプリケーションを導入し、研究開発および技術部門からの要求を支援することができます。アプリケーションのユーザーは、顧客の要求に基づいてアプリケーションを実行し、製造プロセスに関するアドバイスを即座に提供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では、コストと情報セキュリティの両方が考慮されているため、CAEシミュレーションチームの長期的な発展のためには素晴らしいツールです。」Hong氏は言います。◆

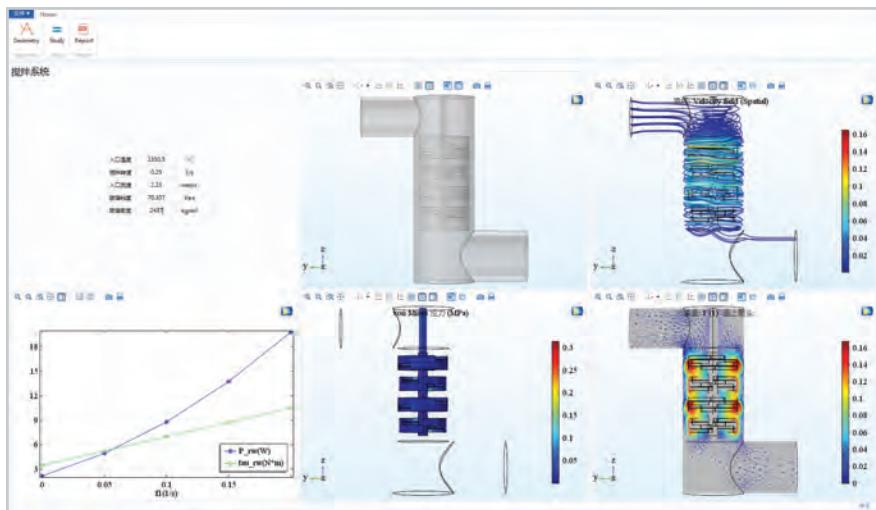


図5. 加熱管内のガラスの状態の予測に用いるアプリケーション。ユーザーは、ガラス温度、入口における速度、加熱電力などのパラメータをセクション毎に変更して、加熱管内の流体の温度、速度、および応力を探求することができます。



左から右へ: Zhenlong Yang、Jiming Yang、Liyao Tao、Lixin (Frank) Hong。Hong氏はKMTCの研究開発部長です。

シミュレーションアプリケーションの導入で販売を加速させ、強固なリレーションシップを構築

GrafTech 社のマルチフィジックスシミュレーション専門家は、社内そして社外までマルチフィジックスアプリケーションの導入を進めることにより、営業活動を支援しています。

執筆者 NATALIA SWITALA 氏

営業部門でシミュレーション専門家を営業サイクルのリソースの一つと捉える者は少数ですが、部門を横断して人々が連携すれば多くを達成することができます。Rick Beyerle 氏は、GrafTech 社の子会社 Advanced Energy Technologies 社 (AET) のイノベーション & テクノロジーグループ所属の研究主幹です。Rick Beyerle 氏は、同社のカーボンおよびグラファイト製品の営業プロセスにシミュレーションアプリケーションを導入するため各営業チームと協力してきました。

⇒ 信頼構築で顧客を勝ち取る

Rick とメンバーは、マルチフィジックスシミュレーションを用いてカーボンおよびグラファイトの電気的、構造的、熱伝導的性能を調べ、これらを応用した工業製品の設計および製造の最適化を行っています。営業チームとの協力を通じて、潜在的な顧客との間に信頼関係を構築することが、営業サイクルにおいて最も重要な要素の一つであることは明白でした。「数多くのケースで、潜在顧客に PoC (Proof of Concept、概念実証) を提供することが両社間に信頼関係を構築するための礎石となります。」 Rick はこのように説明します。

カスタマイズされたシミュレーションアプリケーションが利用可能になる以前は、Rick と彼のチームはこの PoC のために研究開発リソースを割き、すでに検証済みのモデルをそれぞれの顧客の特定の構成に合わせて変更して再度実行しなければなりませんでした。営業チームは数値計算のモデリングについて訓練を受けておらず、アプリケーション技術者は時間の

かかるシミュレーションよりも実験に重点を置くよう指示されていました。Rick は言います。「一部のモデルには、シミュレーションの結果に大きな影響を与える数百に上る数のパラメータや境界条件が定義されていましたが、訓練を受けていない者にはその重要性が理解できませんでした。」

⇒ コラボレーションのロードマップを提供するシミュレーションアプリケーション

Rick は洞察力に優れ、組織全体にメリットがある新たな方法でシミュレーションを活用することに力を注いでいるビジョナリーです。Rick とアプリケーション技術者のチームは、彼らが作成した標準のマルチフィジックスモデルをベースに、COMSOL Multiphysics® ソフトウェアに提供される Application Builder を用いてユーザーフレンドリーなインターフェースを構築しました。その結果生まれたのがアプリケーション "SpreaderCalc" で、これによりセールスエンジニアおよび製造現場の専門家は、コストがかさむ実際のプロトタイプを制作する前に、仮想プロトタイプによって性能を予測することができるようになりました（図 1）。

技術的、営業的に素晴らしい結果が得られた背景には全社的な協力がありました。Rick が営業部門のメンバーにソフトウェアツールを提供し、彼らと協力して潜在的な顧客にリアルタイムで回答できるようにすることに熱心した理由はここにあります。「お薦めの熱マネジメント手法について、潜在的顧客からアドバイスを求められることがよくありますが、多くの場合、

彼らの質問の本当の目的は、安全性や信頼性の要件を満たすためというよりも、特に空間や形状に拘束条件がある場合などに温度面での制約を取り除くことによって、ユーザー体験を最大化したいというのが本音のようです。」 営業部長 Pierre Hatte 氏はこのようにコメントしています。「イノベーション & テクノロジーグループのメンバーが開発してくれた新しいツールは、大きなセールス案件で顧客から 2 度目のアポを取りつける上で、私たち営業チームの力になってくれています。そして、2 度目のアポではじめて契約への本当の可能性が開けてくるということは、営業部門で働く者なら誰でも知っていることです。」

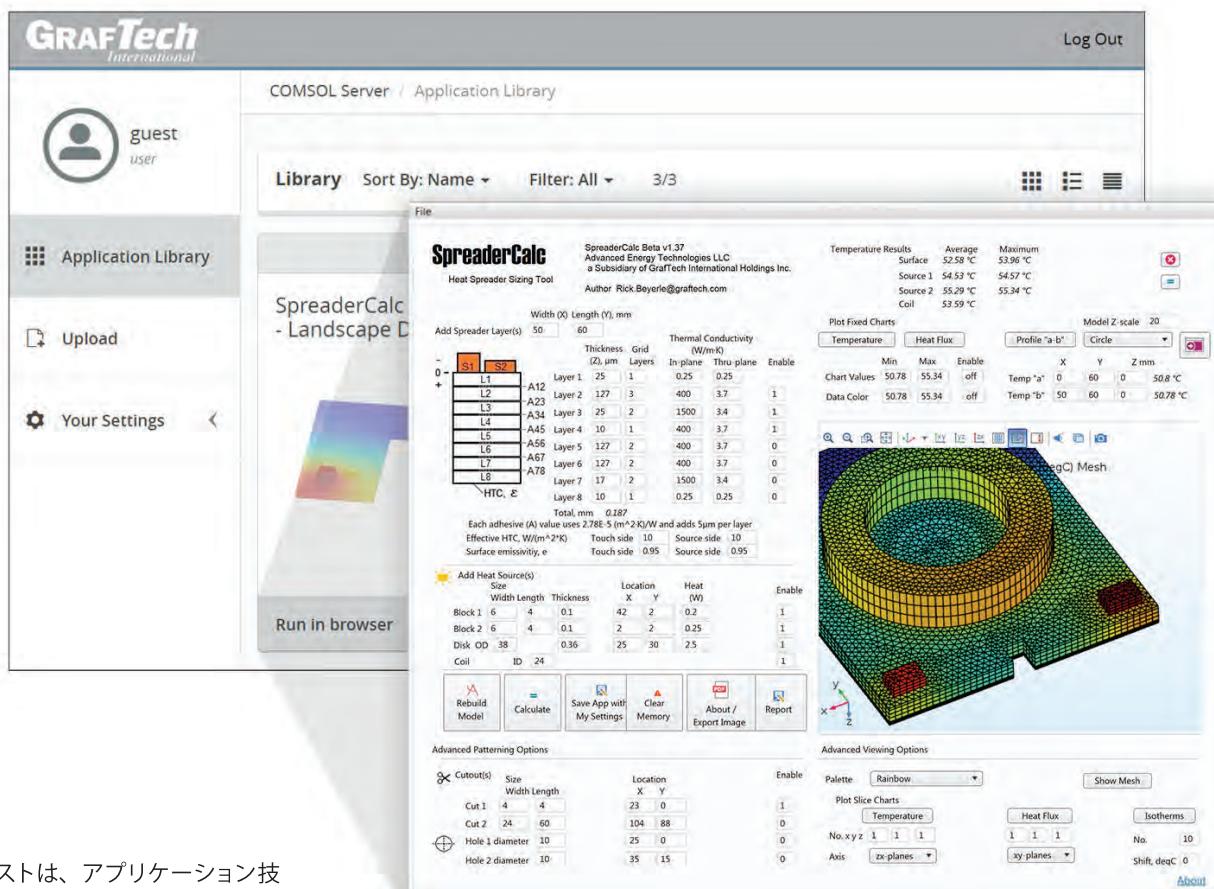
⇒ アプリケーションを顧客の手に

営業用シミュレーションアプリケーションの準備が整ったのち、セキュアな Web 接続を介してアクセス可能にする COMSOL Server™ 製品によってアプリケーションをサーバーにホスティングして導入することができます。Rick はこう言います。「シミュレーションアプリケーションでは、高品位マルチフィジックスシミュレーションの計算結果にアクセスするのに専門家になる必要はありません。シミュレーションアプリケーションの採用により、ワークフローがストリームライン化され包括的になります。」

「潜在顧客に対し、アプリケーションを用いてさまざまな構成での熱伝達を披露できるのは、あたかもスーツを試着してから購入できるような感覚があります。顧客は、製品が自社のニーズに合った結果が得られるようオーダーメイドでしつらえられているという確信を持てるのです。」

— PIERRE HATTE, GRAFTECH 営業部長

営業部門にアプリケーションが浸透し、営業サイクルで持ち上がる可能性があるさまざまなシナリオのテストが済んだら、COMSOL Server™ を用いてアプリケーションを顧客に手渡すことができます。Rick はさらに続けます。「これまで、顧客がモデルの仕様を決める場合に受けられるのは一顧客あたり年に 1 件が限度でした。この方針を設けていたのは、弊社のほとんどの顧客では、高価すぎてシミュレーションを行うことができなかつたためです。今日では、モデルの DoE (Design of Experiments: 実験計画) を実行するコ



ストは、アプリケーション技術者の1時間分の給与で済むので、一週間に山ほどの数の試験を実行する必要がなくなりました。」Pierreは次のように言っています。「アプリケーションのおかげで、顧客がわれわれの製品に対しある種の信頼を深めてくれています。アプリケーションは直観的で簡単に扱える上に、弊社の専門家が構築したマルチフィジックスモデルに基づいているので非常に強力です。潜在顧客に対し、アプリケーションを用いてさまざまな構成での熱伝達を披露できるのは、あたかもスーツを試着してから購入できるような感覚があります。顧客は、製品が自社のニーズに合った結果が得られるようオーダーメイドでしつらえられているという確信を持てるのです。」

「将来はアプリケーションによって、顧客が充分な情報を得たうえで、より一層の確信をもって弊社に発注できるようになると予見しています。一部の調達部門では、コスト削減の圧力に押され技術仕様をないがしろにする傾向があります。ものの値段だけが価値基準という集団の中にいれば、外部から技術的な助言がなければ、高性能の材料を購入することに正当性を見いだすことは困難でしょう。」Rickはこう言います。

「直交異方性率の高さのため、グラファイトのシミュレーションは非常にチャレンジングです。『精度の低い解析』でさえ

図1. ローカルインストールされた COMSOL Server™ 製品を用いて、GrafTech AET 社は同社のインターネット経由で世界中の拠点にアプリケーションへのアクセスを提供しています。Spreadercalc アプリケーションは、民生電子機器において熱を放散するグラファイト箔の伝熱を比較します。

以前は不可能でした。しかし今日では、技術者が机を離れることなく「高精度の予測」を得ることが可能になりました。私にはこれが決め手でした。COMSOL ソフトウェアは他の手段では決して達成することができない、何か特別なものを可能にしてくれるのです。」

また、シミュレーションアプリケーションはコラボレーションと透明性を促進してくれます。たとえば、アプリケーションを用いることにより、顧客は購入を選択した製品について社内向けの説明を行いやすくなります。顧客は、ログイン情報さえあれば COMSOL Server™ でアプリケーションを実行し、結果をダウンロードすることができます。この方法により、よりよく全員が納得した上で発注を承認することができるようになります。Spreadercalc の成功を受け、GrafTech AET 社は既存のソフトウェアインフラストラクチャを拡張する形で、熱インターフェース材料、EMI/RFI シールド、高速加熱工程などニッチ市場向け支援のため各種の派生アプリケーションの作成にすでに着手しています。❖

詳しくは

熱マネジメント手法におけるカーボンおよびグラファイトの工業的応用にご関心をお持ちの方は、Multiphysics Simulation 2016 [www.comsol.com/offers/mphsim16] の3ページをご覧ください。



左:PIERRE HATTE (GrafTech 社営業部長)
右:Rick Beyerle (GrafTech 社研究主)

マルチフィジックス解析で進化する 上水管の漏水検知

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

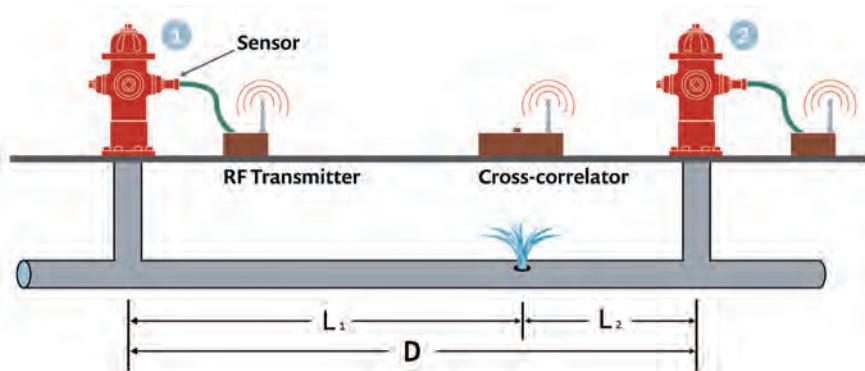


図 1. 左: 調査中の漏洩の可能性がある水道管。右: 漏水検出のための構成の概略図。漏洩箇所は、間隔 D をおいて設置された 2 個のセンサーの間にあります。漏水音は両方向に伝播し、コリレータは各センサーに到達するまでの所要時間を計測します。管内の音速に基づいて、正確な水漏れ位置を発見することができます。

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 Tronto 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 Sébastien 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マッタ、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漏水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ます。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

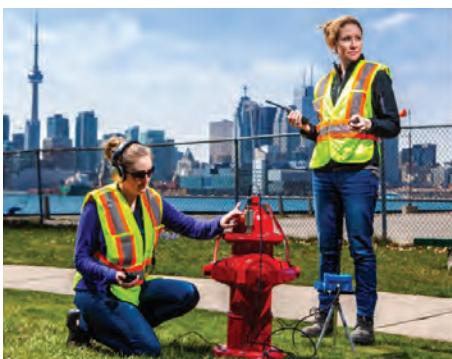


図 2. LeakFinderST™コリレータはコンパクトかつ直覚的な漏水音コリレータです。



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ましたら、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ます、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ことができます。

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、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。

「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。」

— SEBASTIEN PERRIER, R&D
ACOUSTICAL SCIENTIST,
ECHOLOGICS

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、

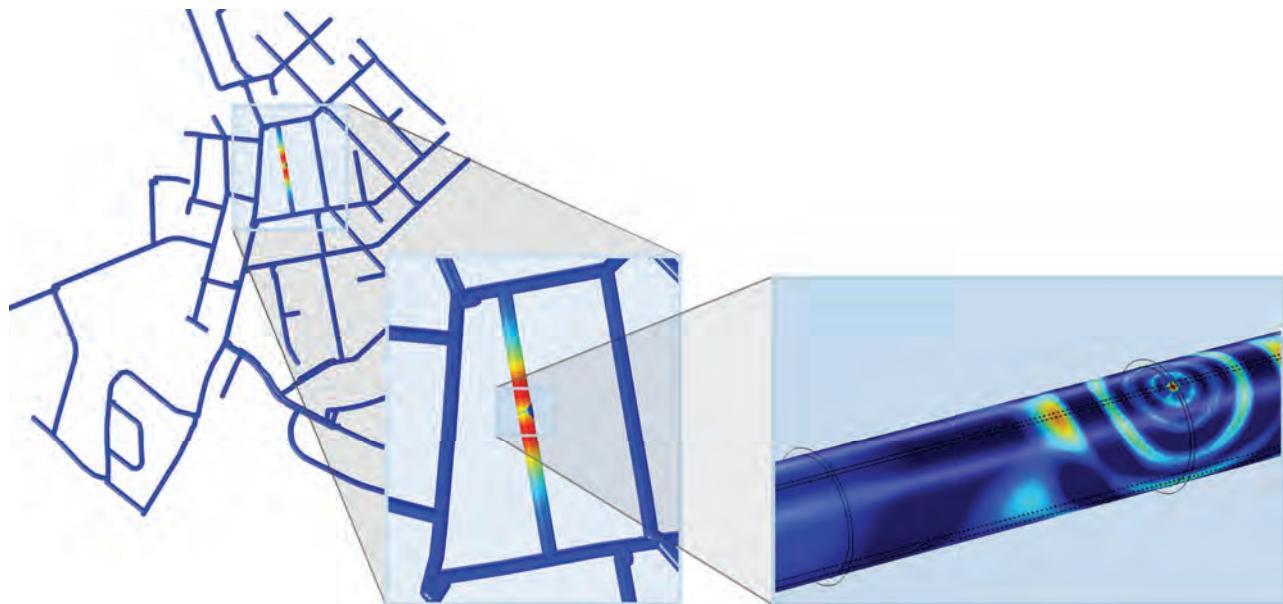


図 4. 上水道網内の漏水音の伝播解析。プロットは、漏水箇所の周囲の音圧を示します。

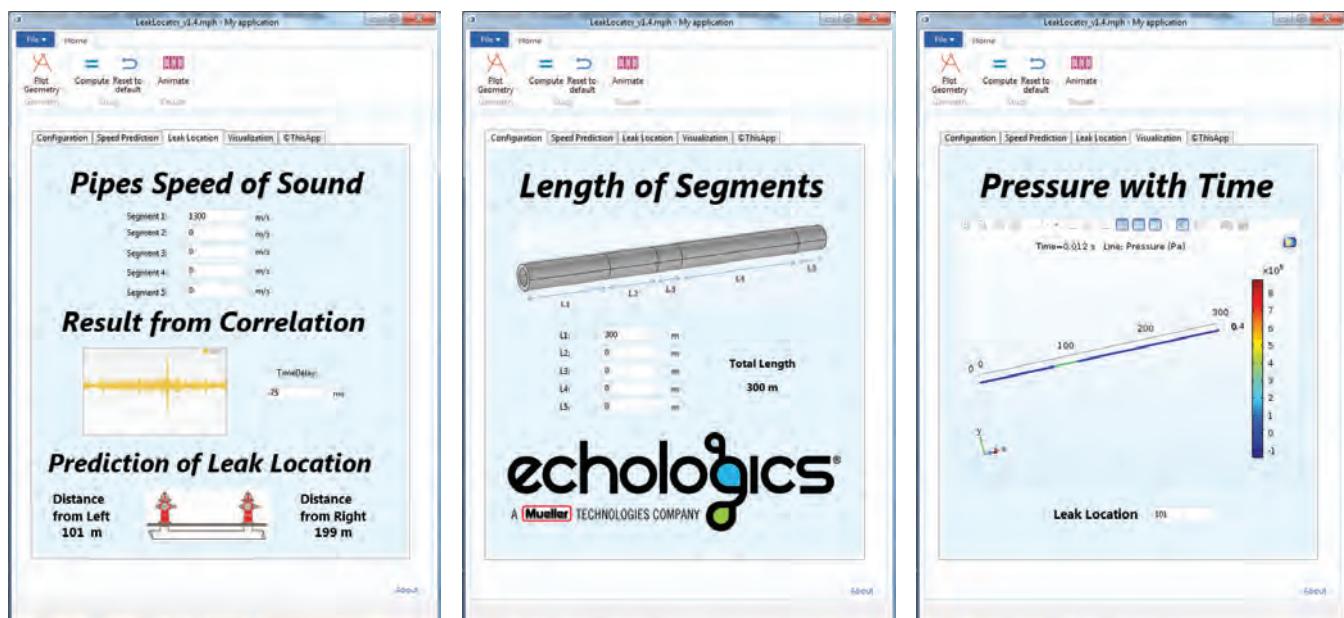


図 5. 形状およびパイプの特性を定義することにより、漏水箇所の正確な予測にユーザーを導く使いやすいインターフェース。ユーザーは、本アプリケーションを用いることにより、音響構造の相互作用、漏水位置の予測といった複雑な計算について意識することなく水道管内のパイプ内の音速を計算し、漏水箇所から音が伝わる様子をアニメーション付きで可視化することができます。

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ことです。Perrier 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。◆



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

仮想プロトタイプによって加速する電子油圧パワーステアリング

FZB Technology は、電子油圧パワーステアリングシステムの設計の向上にマルチフィジックスシミュレーションを使用しています。

執筆者 **LEXI CARVER 氏**

パワーステアリングが装備されていない自動車を運転した経験がある人なら、ハンドルを回すのにも大きな力が必要だったのを思い出せるでしょう。ありがたいことに、そうした日々は過去のものです。パワーステアリングシステムは、操舵ギア系を通じてアシストしてドライビングをはるかに快適にしてくれますが、長年の間に多くの変更が加えられ、設計の改善を通じてさらに進化を続けています。

1990 年代までは、油圧と電気回路を組み合わせたタイプが主流でした。しかし、これらは燃費効率に優れた電子油圧式パワーステアリング (EHPS: Electrohydraulic Power Steering) システムの誕生によって置き換えてゆきました。EHPS は従来通り油圧メカニズムによって構築されていますが、油圧ポンプの駆動には車両のエンジンではなく、電気モーターが用いられています（図 1）。ハンドルの舵角および車速に応じてモーター出力が調節されるため、動力の無駄を減らせます。

ポンプはレザボアから操舵ギア系に流体を送り、ドライバーがハンドルを回すと、タイヤの角度を変えるため補助的にトルクを適用します。このほか、パワーステアリングシステムには電子制御ユニット (ECU)、トルクセンサー、流体の圧力制御バルブ、配管系が含まれます。

⇒ EHPS が抱える困難な課題

これほど数多くのコンポーネントが相互に関与しあうシステムでは、1 つの部品からの応答が他の部品に影響する場合も少なくなく、その設計は容易ではありません。一見すると小さな調整に思えることが、次のステップにおける機能、効率、そして信頼性に大きな影響を与える可能性があります。

「マルチフィジックスシミュレーションは、設計の改良工程を加速してくれる貴重なツールです。」ミシガン州 Plymouth に本拠を置く FZB Technology の上級機械技術士 Feng Qi 氏はこう説明します。FZB は自動車産業向けに、モーター、センサー、RFID によるキーレス点火システム、EHPS などの研究開発サービスを提供します。

FZB の技術者は、同社の EHPS 設計のコンポーネントをモデリングする際に、頻繁に CAD および COMSOL Multiphysics® ソフトウェアを活用しています（図 2）。これはシステムの内部構造の理解に役立つとともに、仮想プロトタイプから物理試験へ移行する

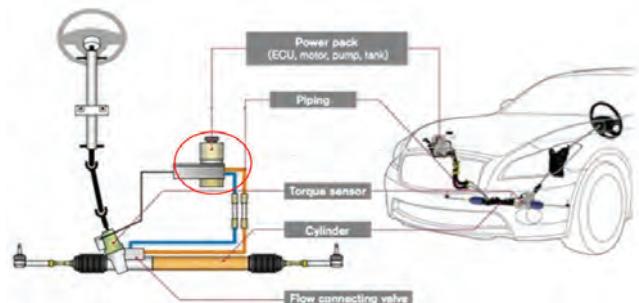


図 1. 電子油圧パワーステアリング (EHPS) システムの概略図。

前に、できるだけ最終設計に近づけておくことを目的にしています。

「シミュレーションの支援により、われわれは問題を明快に理解し、物理的なモデルの製作に移行する前に実車の要求条件を満たせるよう努力しています。」Qi 氏はこうコメントしました。「われわれは、力学、熱、流体、音響、電磁気学など多くの側面からシステムのパフォーマンスを把握する必要があるのです。」

同氏は、妥当性の検証や物理試験は高価で、しかも場合によつては 6 ヶ月を要することもある時間のかかる作業であり、テスト終了後も、良好なプロトタイプに到達するまでにさらに最適化を行う必要があると説明します。

「これでは設計サイクルとしては遅すぎるので、シミュレーションを使って工程を加速しています。」設計を向上させるため、物理的な検証試験に着手する前に、われわれは定期的に

例えばクライスラー社に出向き、同社の技術者と COMSOL ソフトウェアのモデルに基づいて話し合いを行っています。でなければ、要件に適合させることは不可能でしょう。」

FZB の Qi 氏のチームは機構内部の動作について理解を深めるため、最新設計の EHPS の主要コンポーネント (ECU、孤立したマウント用ブラケット、永久磁石モーター、流体レザボア、およびヘリカルギヤポンプ) のモデル化を行いました。彼らは、各部品について個別にシミュレーションを実行しただけでなく、複雑で車種ごとに異なる全体のアセンブリについてもマルチフィジックス解析を実行しました。

熱、力学、流体、および電磁気学的な現象の解析は、熱パフォーマンス、動力学的運動制御、ポンプ内における流体の供給、騒音・振動・静音性 (NVH) にまつわる諸問題などをより素早く解決する上で大きくチームに貢献しました（図 3）。

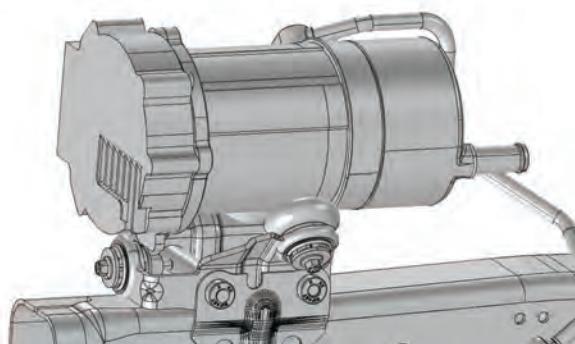


図 2 EHPS 設計のマルチフィジックス解析に使用した形状。この設計には、周囲の空気への熱伝達のための冷却フィン、マウント部、および流体ポートが含まれています。

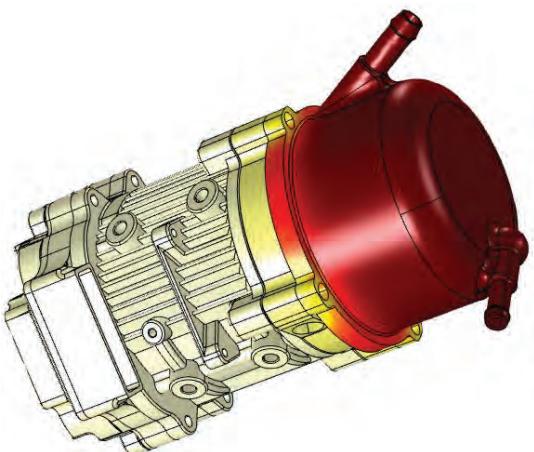


図3. 車両にさまざまな負荷がかかった状態でポンプを作動させた場合の各部品内の温度分布を得るために、定常状態および過渡のシミュレーションが実行されました。シミュレーションの結果、各部品の寸法、モーターの各種設計パラメータ、ECUにおけるバイアスのサイズおよびその数など、熱伝導が関係する因子について理想的な範囲が示唆されました。

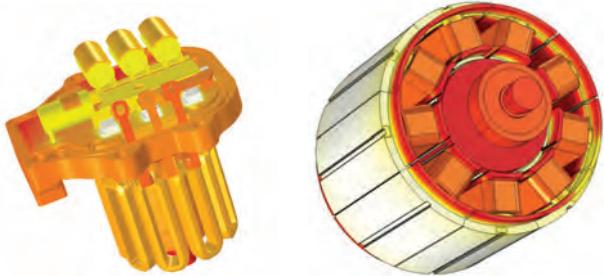


図4. ECUとローターのアセンブリ全体の温度分布（左）、ステータおよびローターのアセンブリ全体の温度分布（右）。このモデルは、製品が車両に搭載された状態でのシステムの熱パフォーマンスを予測しています。

⇒ ヒートアップするポンネット裏

システムパフォーマンスの主要ファクターの一つとして、安全な温度領域で動作できることを挙げることができます。Qi 氏は、ポンプ内の熱伝達および操舵系のギアを潤滑する流体における熱生成をシミュレーションするモデルを作成しました。流体の温度を可変境界条件として用いることにより、彼のチームは各種動作シナリオについて、システム全体の温度分布を予測することができました。

Qi 氏は、ポンプの加重が最大になるのはタイヤが縁石で固定された状態でドライバーがハンドルを回そうとした場合であると説明します。現実世界でこの状況が発生すると、タイヤが縁石にスタッフしているにもかかわらず自動車のバッテリーはポンプに動力を送り続けるため、ECU およびモーターの磁石に熱が生成します。

自動車メーカーが提供する動作条件に基づいて、彼のチームはこのようなシナリオ下におけるパワステオイルの挙動をモデリングすることができました。さらに ECU の部品のうち、車両タイヤがロックされている時に発生する熱による温度上昇の影響を受けることが予想される MOSFET やワイヤハーネスといった部品について

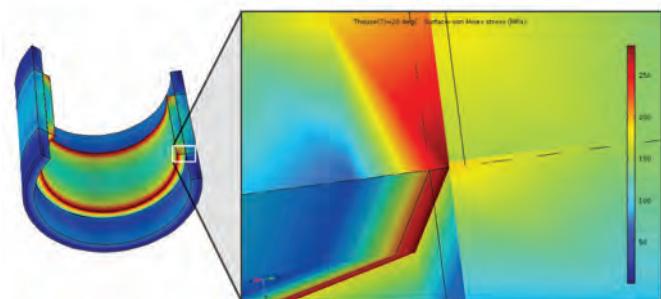


図5. ハウジングおよびステータの締まりばめのシミュレーション解析における応力レベル。

も、解析が行なわれました。彼らは個々の部品のシミュレーションから着手し、計算結果をシステムレベルで統合したのち、物理的なテストデータと計算結果を突き合わせて調整する「マルチスケールモデリング」の手法を用いました。チームは、この解析において境界条件および材料の特性を微調整することを通じて、さまざまな構成について理解を深めることができました。

温度分布は、ハウジング、ステータ、ローター、ロッドなど、モーター内の構造コンポーネントにも影響を与えます（図4）。金属の熱膨張はモーターの効率にも影響を与え、ポンプに目標の出力を供給するために、より大きなトルクと回転数が必要になります。動粘度や密度など流体の物性もまた、温度に依存して変化するため、なめらかで安定したハンドリングを維持するにはギヤ系を調整する必要があります。

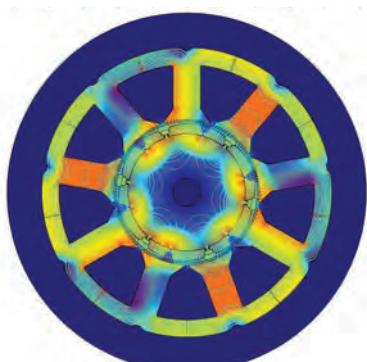
Qi 氏は言います。「車両が停止していて、ポンプがはるかに多くの仕事をしなければならないこのような状況は最も大きな挑戦です。部品が故障しない温度領域を維持する必要があるので、極限状態のセットアップをモデル化して、システムが悪状況に耐え、通常通り良好に動作することを確認しました。」

Qi 氏は熱膨張によるモーター、ステータ、およびポンプの壁厚の変化をモデリングし、応力水準が降伏応力を超過するような部品がないか確認を行いました（図5）。その結果、熱膨張によってモーターのステータが破損する場合があることが分かり、開発チームにとって独自の課題となりました。COMSOL のシミュレーション結果のおかげで初期段階で問題の存在が判明していたので、チームは部品にくぼみを追加して、変形がトラブル原因にならないようにすることができます。

この形状因子は、締まりばめ、ハウジングの量、およびステータの量を検討する際に非常に重要になりました。ハウジングとステータでは熱膨張係数 (CTE) が異なるため、接触面の量および形状厚みを慎重に選び、作動温度域内で故障する部品がないようになります。

「コンセプトから市場投入まで、一台のクルマを開発するには多くの要因が関係しています・・・われわれは、こうした組織横断的なチームワークに役立つ真のマルチフィジックスツールを必要としています。」

— STEVEN QI, MANAGER,
FZB



⇒ 流体、騒音、エレクトロニクス — すべてが役割を演じます

また、チームは電磁気学モデルを構築して、ヘリカル磁石およびヘリカルギヤポンプの性能をポンプ動作の各時間ステップ毎に解析しました（図6）。これによって、コイルおよび鉄製部分における熱損失の正確な予測を含め、モーターの長期的な性能維持について理解を深めることができました。これは形状変更につながり、コンポーネントや部品間でより均一に温度を分布させることができます。

流体の供給およびポンプの効率に与える影響について理解するため、彼らは電磁気学シミュレーションをCFD解析とカップリングさせました。ポンプのモデリングのために特別に設計されたPumpLinx®ソフトウェアを用いて、流体の効率、

図6. EHPSのモーターの挙動に関する時間依存解析における磁束密度および磁場のベクトルポテンシャルの分布を示すシミュレーション。

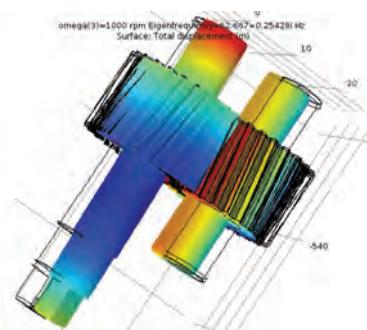


図7 PumpLinx®ソフトウェアによる流体解析で得られたデータをCOMSOLにインポートして得られたヘリカルギヤの変位のシミュレーション結果（回転数1,000 RPM、固有周波数2718.2 Hz）。

流速、および圧力の拍動を計算しました。

Qi 氏は、独自に作成した COMSOL Multiphysics® のモデルに流体のデータを転送し、SOLIDWORKS® ソフトウェアによって形状の更新を行ったのちに、音響シミュレーションを作成して振動の解析を行いました（図7および図8）。追加で行ったローター動力学シミュレーションは、振動が劇的に増大してギヤ系の破損の原因となる臨界速度を算出するための手がかりとなりました。これは異音を発生させ、効率を低下させます。

「われわれはシステムの騒音レベルを知る必要があつただけでなく、それが電磁気的、流体的な挙動に与える影響についても理解する必要がありました。」Qi 氏はこのように言います。「すべてが相互に関係しているのです。流体の圧力拍動をモデリングし、この拍動が大気中を伝わる騒音にどのような影響を与えるか、COMSOLで解析を行いました。解析の結果に基づき、ペアリング、シャフト、ヘリカルギヤの形状、およびヘリカルギヤポンプのブッシュの流体圧力解放用の溝の形状を最適化することができました。」

⇒ EHPS の進歩の先駆けとして

最後に、FZB のチームは COMSOL の解析結果に基づいて、ポンプ形状に大幅な設計改善を施しました。さらにシミュレーションに基づいて、実車の要件に適合するための設計技術者向けガイドラ

インとして、消費電力の上限に関するレポートを作成しました。境界条件の違いによってエネルギー消費量およびポンプ出力にどのような影響が生じるかを解析し、異なるシナリオでのシミュレーションの結果を実際の走行実験で得られたデータと比較しました。

「COMSOLを選択したのは、すべての物理をカップリングさせて挙動を解析したかったからです。」Qi 氏はこう締めくくっています。「コンセプトから市場投入まで、一台のクルマを首尾よく開発するには多くの要因が関係しており、設計サイクルは時間的に非常にタイトになりました。われわれは、こうした組

参考文献

1. Qi, F., Dhar, S., Nichani, V., Srinivasan, C. et al, "A CFD study of an Electronic Hydraulic Power Steering Helical External Gear Pump: Model Development, Validation and Application," *SAE Int. J. Passeng. Cars - Mech. Syst.*

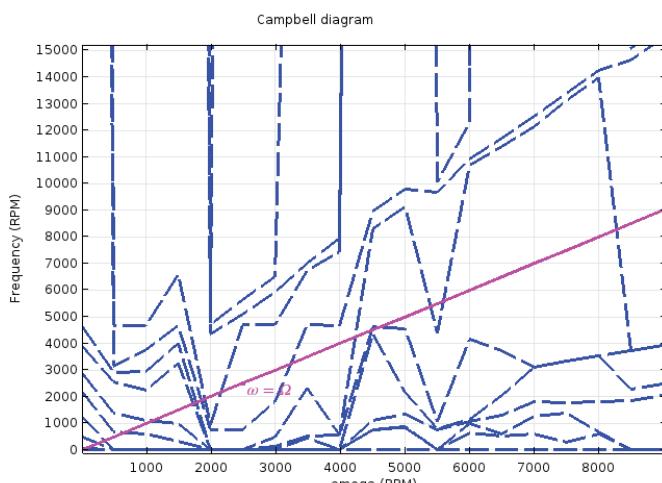


図8. COMSOLで生成したヘリカルギヤの角速度と固有周波数の関係を示すCampbell図。



上段: Jinming (Jim) Yang (FZB CEO)、Zhonghui (Max) Bing (取締役)、Steven Qi (部長)。

下段: Liang (Leon) Yang (FZB 取締役)、Dahong Yu (Fuxin Dare Automotive Parts Co., Ltd., China 専務取締役)、Ying Xie (Fuxin Dare Automotive Parts 部長)。

温度上昇がセル内部に達する速さを計る

ハイエンドバッテリーシステムの製造におけるリチウムイオンセルのスタッキングについて詳しく知るため、数値シミュレーションを活用しました。

執筆者 **JENNIFER HAND** 氏

リチウムイオン（Li-ion）電池の性能および耐久性は、動作温度に著しく影響されます。低温では性能が低下する一方、高温では急速に劣化が進みます。これは全般的に信頼性が失われ、安全面の問題が発生する潜在的 possibility があることを意味します。

稼働中の電池については、業界内における研究の成果として、温度変動に対する電池の耐性についてこれを規定する基準が制定されています。これとは対照的に、プラズマ前処理、UV 硬化、レーザー溶接、超音波接合、ホットスタッフ、および熱接着などを含め、製造工程で電池がさらされる温度変化についてはあまり関心が持たれていません。リチウムイオン電池には、場合によっては数千にも上る数の個別セルが内蔵されており、さらにこれらのセルは互いの上に積層されています。一般にこれは各種熱処理が関わる組立て工程によって実現されますが、処理工程の一部は極めて高負荷になる場合があり、ケースまたはその他の部品が短時間とはいへ高温にさらされる場合があります。

University of Oldenburg (ドイツ) の NEXT ENERGY EWE Research Centre for Energy Technology に所属する Gerd Liebig 氏は次のように説明します。「溶接など特定の処理が、電池内の温度を大幅に上昇させることはすでに広く知られています。しかし、こうした温度上昇が電池内部でどのように拡散し、セルにダメージを与える可能性があるかについてはまだ解明されていません。」

University of Oldenburg の Pamina Bohn 氏は、NEXT ENERGY の研究員たちとの密接な協力の下、製造時の処理によって電気化学的分解プロセスが開始し、電池の安定性および容量に不可逆的なダメージを与えてしまう可能性について調査を行いました。実験は長時間を要し、かつコストがかさみ数多くの安全上の注意を要するので、まず数学的モデルで検証を行う戦略が採用されました。研究チームは、さまざまな動作シナリオについて数値シミュレーションを用いて調査を行い、モデル内の任意の場所にプローブを配置して結果を精査ましたが、現実の実験の最中にこのようなことを行うことは非現実的または不可能です。

⇒ 热応力の実験を設計する

最初のステップとして、物理的な実験が設定され、プリズム型のリチウムのダミーセルが短時間、熱応力にさらされた場合にセル各所が到達する温度が測定されました。実験の目的は、数学的モデルの妥当性を検証するために用いることができるデータを収集し、セルの製造の過程におけるさまざまな処理の影響について

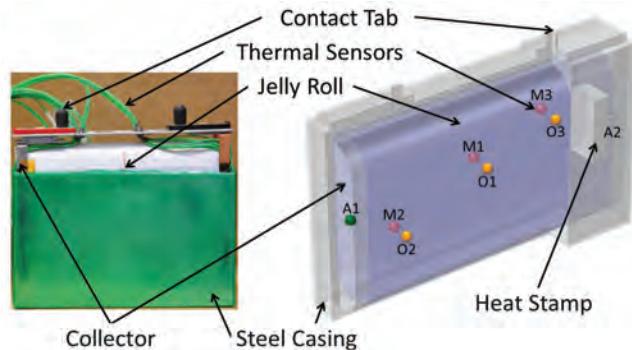


図 1. 左：プリズム型リチウムイオンダミーセル。右：セルのモデリングに用いられた CAD 形状。セルには 8 つの温度センサーが取り付けられています。O1、O2、O3 はジェリーロール表面に取り付けられ、M1、M2、M3 はジェリーロール内部に取り付けられ、A1 および A2 は通電用の導体に取り付けられています。COMSOL® のモデルでも、同じ位置にプローブが取り付けられています。

調査することでした。セルは、二重被覆の正極と二重被覆の負極がポリオレフィンのセパレータで囲まれ、一つに巻きつけられた形状になっています。この巻きつけ型の構造はジェリーロールと呼ばれ、電池の电解質に見立てた有機溶媒に浸されました。セルには、ジェリーロールの内部に 3 個、セルのコイル表面に 3 個、正極および負極に対応し別名アレスタと呼ばれる銅製およびアルミ製の電流コレクタのそれぞれに各 1 個の、合計 8 個の温度センサーが配置されました（図 1）。

⇒ 热的挙動のモデリング

開発チームは、Autodesk® Inventor® で市販用のプリズム型リチウムセルの 3 次元の複製を作成し、これを COMSOL Multiphysics® ソフトウェアにインポートしました。熱伝達のモデリングについては、製造の各工程における加熱に対応するものとしてはセル表面の複数箇所に配置した外部熱源からの熱伝導でこれらを表し、またセル表面のその他の領域では自然対流による冷却が設定されました。

各材料の物理的および熱的特性は実験によって定義されたのち、数学的に同次化され、プリズム型金属ハウジングに収納されたジェリーロール領域に適用されました。「セルのコンポーネントの特性は異方性を有するため、モデルでは熱関連のパラメータの異方性を考慮する必要がありました。」 Liebig 氏はこうコメントしています。

物理実験の際と同様に、シミュレーションでも長方形型の熱スタンプが配置されました。図 2 は、熱スタンプがセルの表面にセットされてから 60 秒後の温度分布を示しています。温度勾配が大きくなる領域をより細かく離散化して高精度の結果を得るために、アダプティブメッシュによるメッシュの改善を行いました。

⇒ 破損の兆候を探す

マルチフィジックスモデルは、ダミーセルの挙動をほぼ再現できるところまで実験に肉薄しました。モデルの妥当性が確認された後、チームメンバーはさまざまな製造工程におけるセル内部における温度伝播のシミュレーションを行う段階に移行しました。

図 3 は、典型的な溶接時における 1100°C の温度負荷が 4 秒間にわたって適用された場合のセルのタブにおける温度分布を示

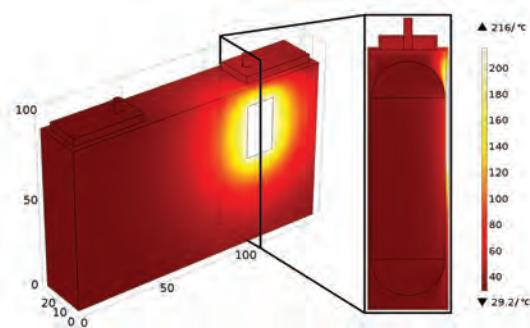


図2. 数値計算の結果は、セルのハウジングの表面に 50 W の熱スランプが適用されてから 60 秒後の温度分布を示しています。

します。熱はセル内部に拡散し、その温度は 100°C 超まで上昇します。外部熱源が取り除かれた後もセル内部の温度は上昇を続け、外部の加熱が終わった 4 秒後にはジェリーロール内で 138°C に達しました。

Bohn 氏は次のように指摘します。「この温度水準では、温度に繊細な電解質の分解や、固体 - 電解質の相間の特性の変更など、不可逆的なダメージを引き起こします。こうした効果は局所的な材料の損傷を発生させるだけでなく、全体的な容量低下およびセルの抵抗値増加を招きます。」

⇒ ダメージを生じさせずにパワーを供給

レーザー光線は高い電力密度を有しますが、それが電池セルへの熱の侵入を抑制しつつ、高速な溶接を可能にしてくれることを確認したいと研究者たちは望んでいました。ビームが高出力密度であるため、この技法は極めて高速で幅広い金属に適用できます。

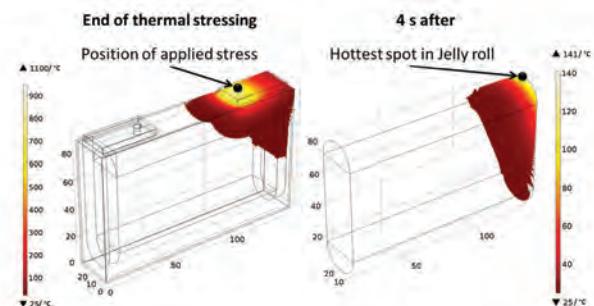
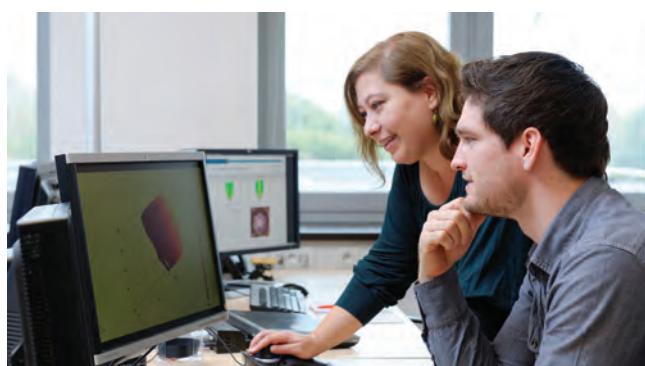


図3. タブを 1100°C で溶接した後の温度分布のシミュレーション。熱応力が印加されてから 4 秒後（左）および熱応力が取り除かれてから 4 秒後（右）の温度分布を示しています。



Gerd Liebig と Lidiya Komisyska (NEXT ENERGY)。

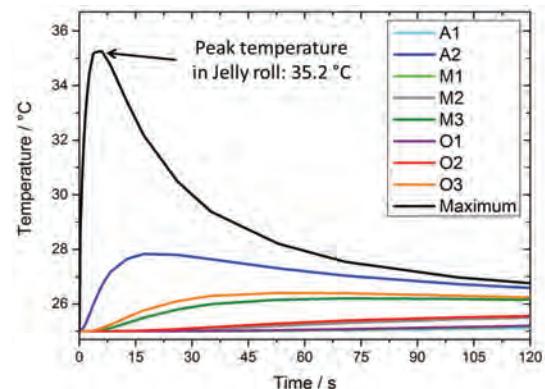


図4. 1100°Cの熱応力を印加した 4 秒後の各温度プローブにおける温度分布。

レーザー溶接をシミュレーションするために、1100°Cの温度が 0.2 秒間、セルのタブに適用されました（図4）。セルのハウジングに沿って伝播する熱は、36°C未満という穏やかな温度上昇しか発生させず、したがって、開発チームは電池のコンポーネントに悪影響を与えるようなものではないと判断しました。シミュレーションによるジェリーロール内部の温度分布は、26650 リチウムイオンセル上でレーザー溶接を行った数秒後に撮影されたサーモグラフィー画像と良好な一致を見せています。

⇒ 未来への礎

Liebig 氏は言います。「いまや私たちは、信頼に値するシミュレーションツールを手にしています。COMSOL Multiphysics は直観的に使用でき、便利な各種ツールも提供されています。材料から境界条件まで、私たちのニーズに簡単に対応させることができます。さまざまな物理インターフェース、形状ツール、およびソフトウェアの柔軟性のおかげで膨大な時間を節約することができます。」

同氏のチームは次のように締めくっています。「さまざまな適用範囲、そしてあまりにも多種類の電池が存在するため、完璧な材料、サイズ、または形状にたどり着くことは不可能です。そうした中、われわれのモデルは将来の研究に非常に大きな展望を提供してくれます。形状、応用範囲、および材料を変化させることができます。数値シミュレーションのおかげで、今後も自信を持ってリチウム電池の研究を続けて行くことができます。」◆

参考文献

1. G. Liebig, P. Bohn, Temperature Propagation and Effects by Short-Term Thermal Stressing of Lithium-Ion Cells, *Battery Safety Conf.* 2015.
2. P. Bohn, S. A. Garnica Barragan, L. Komsytska, G. Wittstock, Performance and the characteristics of thermally stressed anodes in lithium ion cells, *Journal of The Electrochemical Society*, 162 (2) (2015).
3. P. Bohn, G. Liebig, L. Komsytska, G. Wittstock, Temperature propagation in prismatic lithium-ion-cells after short term thermal stress, *Journal of Power Sources*, Volume 313, 1 May 2016.
4. M.J. Brand, P.A. Schmidt, M.F. Zaeh, A. Jossen, Welding techniques for battery cells and resulting electrical contact resistances, *J. Energy Storage* 1 (2015).

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が、多くの人が耳の異常を認めたがらない現実を考慮すれば、実際の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の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テ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。「弊社トランステューサの電磁気学、力学、および音響物理を理解することは、Knowlesのトランステ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。

補聴器用トランステューサ、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テ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換するマイク、電気信号を処理して増幅

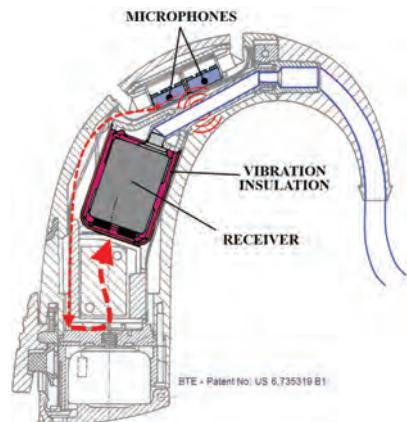


図1. 典型的な耳かけ型（BTE）補聴器は、マイク、振動遮蔽部、レシーバ等によって構成されます。これらのコンポーネントが小さな空間に詰め込まれていることは、厄介な音響および機械的フィードバックを招きます。（写真提供：Knowles Corp.）

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。

⇒ "ブラックボックス" モデル

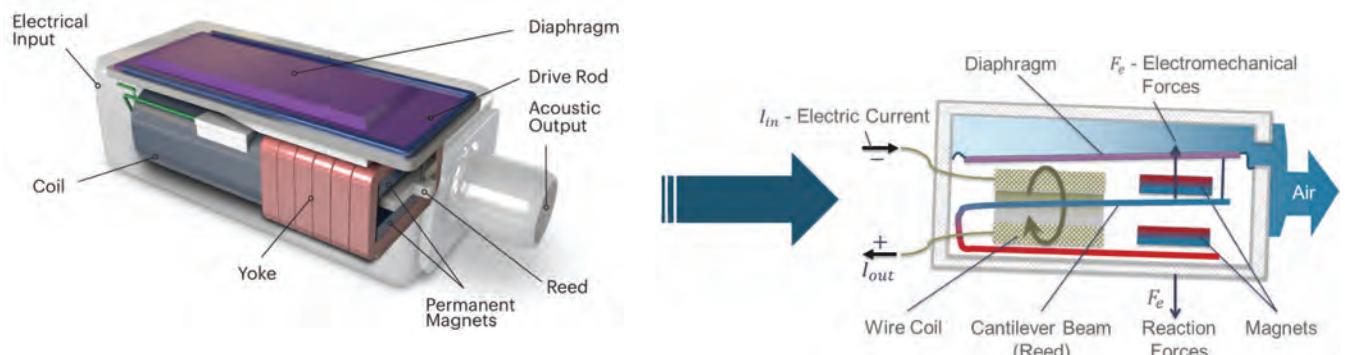


図 2. 補聴器の重要なコンポーネントであるレシーバには、電磁的に制御されるダイヤフラムが取り付けられた極小型スピーカーが内蔵されています。内部の電磁力は構造の振動を発生させ、これが機械的フィードバックにつながります。



図 3. 実験に用いたハードウェアおよび概略図。

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効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 - 機械音響的効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ルリングするには、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事が示され、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®

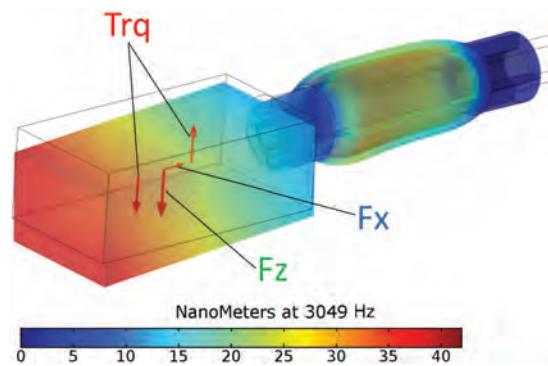


図 4. 3 kHz におけるレシーバおよびシリコンチューブアタッチメントの力および変位のシミュレーション結果。

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充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、内部的な電磁音響的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。

⇒ 知識を拡める

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テ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。既製のトランステ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テ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)。

66 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。 99

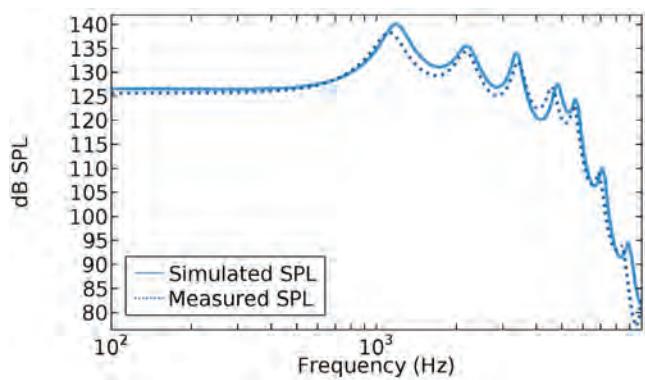
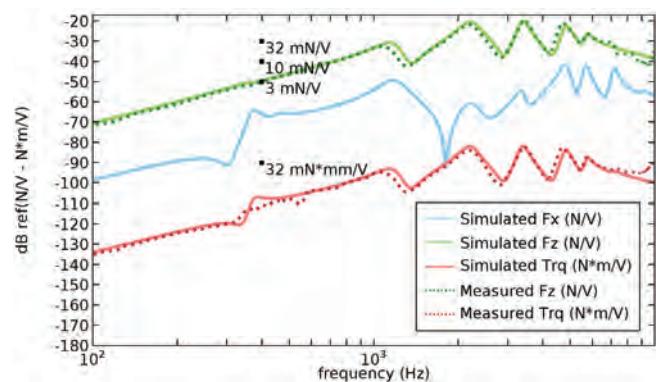


図 5. 左：容量 2cc のカップラー内における音圧レベル—測定値（点線）およびシミュレーション結果（実線）。右：レシーバに働く力とトルク—測定値（点線）およびシミュレーション結果（実線）。



人工衛星システムにおける電気アーク発生領域の予測

軌道を周回する人工衛星における電気アークはシステムの故障につながりますが、その予測は困難です。ロシアの Institute of High Current Electronics の技術者は、故障が発生する危険領域を特定し、船内の装置を保護するためにマルチフィジックスソフトウェアを採用しました。

執筆者 GEMMA CHURCH 氏

Boeing Satellite Systems は 1995 年、動力、制御、および推進系を備えた通信衛星向けバスの新製品ラインナップを発表しました。同製品では、標準の 27 V 電源ではなく、100 V の安定化電源に接続された高電圧バスが採用されていました。これによって動作電圧が高くなり、動作電流が低下した結果、導体における抵抗損失も減少しました。しかし同時に、電気アークという衛星の電子系に壊滅的な故障をもたらす可能性がある問題も呼び込んでしまいました（図 1）。

ロシアの Tomsk に拠点を置く Institute of High Current Electronics の研究員、Vasily Kozhevnikov 氏は次のように説明します。「新規格の動作電圧への移行に伴い、電子回路基板の部品間にアーク放電の問題が発生しました。衛星の質量を可能な限り小さく抑えるために、回路ハウジング内の空間は絶縁体で充填されておらず、真空を保つようにも設計されていません。しかし、そのためにアーク放電やカスケードアーク放電が発生し、衛星搭載の装置間に大規模に拡がる潜在的な可能性があります。

「衛星の船内システムで電気アーク放電が発生すると、それは必ず衛星システム

の部分的または完全な故障につながります。それは多くの場合、衛星の利用停止に至ります。」彼はこう付け加えました。

本研究は、極限条件下での気体放出の物理に密接に関係していますが、そのような状況下では、電気装置は必ずしも通常の物理法則が支配する世界と同様に振る舞うとは限りません。たとえば、通常であれば放電または電気アークを開始するのに充分な電圧に満たない状況、すなわち Paschen の最小値として知られる閾値未満であっても、電極間に放電が発生する場合があります。

「また、この研究は潜在的に、圧力、イオン化のレベルなど幅広い範囲の外部パラメータの影響下で運用される電子回

路の診断にも活用できる可能性があると考えています。宇宙産業および宇宙科学の範疇を越えて幅広く適用可能な技術です。」Kozhevnikov 氏は言います。

今日、電子システムの運用環境が過酷化の一途を辿る中、電気アークの問題はもはや民間宇宙産業だけが直面する問題ではなくなりつつあります。長期の自動運用を前提とし、厳しい耐障害性が要求される全てのエレクトロニクス分野に影響します。われわれの研究課題に解決法が見いだされれば、その知識は人工衛星の分野にとどまらず、地上運用のシステムから海中設置型の装置に至るまで幅広い分野で役に立ちます。

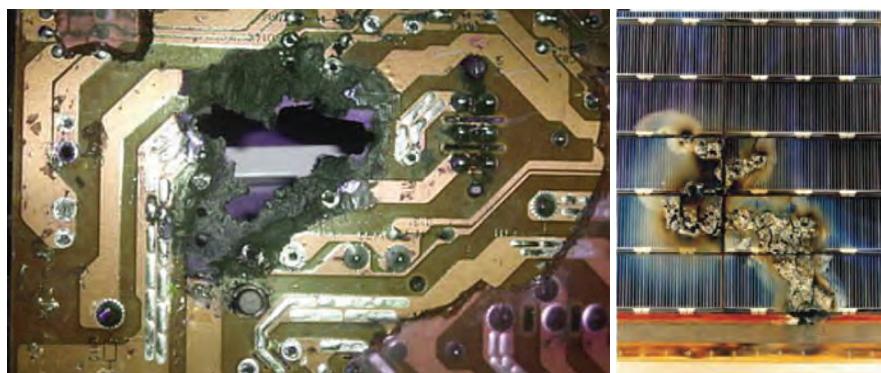


図 1. 100 V で稼働する電源内で生じた一次アークに起因する典型的な損傷。

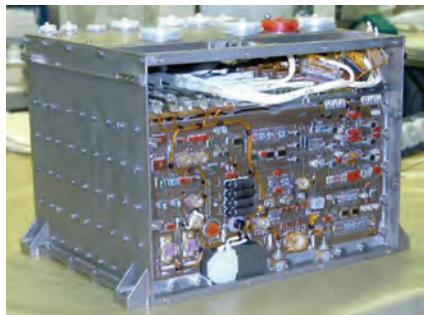
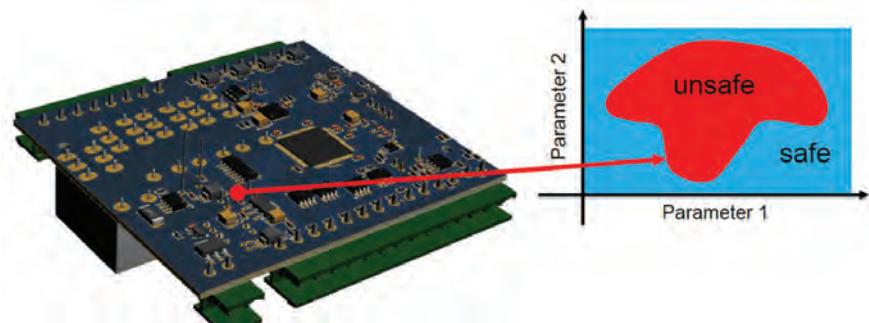


図 2. 衛星用装置の回路基板例。危険領域は幅 5 mm 未満です。IHCE の技術者は、人工衛星に長期搭載しても損傷することのないシステムを設計するため、安全でない運用条件および特性の範囲を決定する必要があります。



⇒ 危険領域の特定

突発的な電気アークによる衛星搭載エレクトロニクスの破壊を防止するには、自律的な放電発火が発生する領域として、いわゆる「危険領域」を識別する必要があります。この潜在的に領域を抱えた領域が識別されると、次に、技術者は何が電気アーク放電のトリガーになり得るかについて、さらに詳しく調査する必要があります。

衛星軌道上における運用パラメータの全てを実験室で再現することは不可能なため、こうした電子的ホットスポットの実験的手法による特定には限界があります。

「COMSOLのおかげで、自分で計算プログラムを作成しなくても研究を進められるようになりました。将来の研究に向けて、COMSOLに大きな期待をかけています。」

— VASILY YU. KOZHEVNIKOV,
RESEARCH ASSOCIATE, IHCE

ホットスポットの特定のため唯一残された選択肢はシミュレーションですが、これも記録的な挑戦の数々に見舞われました。その一つとして、典型的な衛星搭載電子デバイスでは、金属製ケースの中の広い領域に分散して複数のプリント基板が配置されています（図2）。Kozhevnikov 氏は次のように説明しました。

「自律的なアーク放電領域が発生する可能性がある領域を識別する唯一の方法は放電の数値シミュレーションですが、計算コストを考慮すると、このような大規模な問題の計算は現実的には不可能

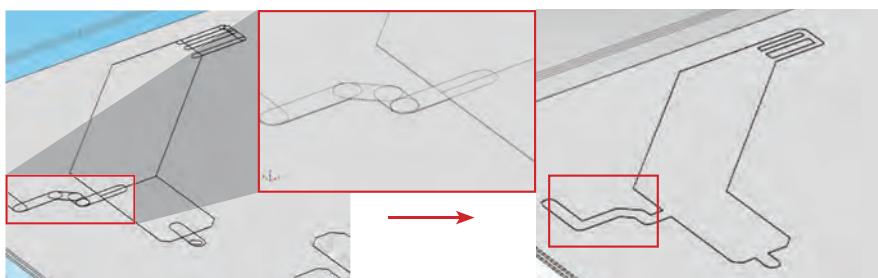


図3. COMSOLにおける形状の修正。

です。アーク放電はマルチフィジックス、かつマルチスケールの問題なのです。」

⇒ 形状の不正確性の捕捉

Tomskに拠を置く研究チームは、正確でかつ実用的な計算的なアプローチを模索すべく心血を注いでいました。問題解決の糸口として、研究者たちは計算ツールを用いた「分解的」アプローチを提案しました。電子デバイスの全体について、計算による完全な放電シミュレーションを直接に行うのではなく、カスタマイズされたシミュレーションアプリケーションを作成することでデバイスを自動的に小区間に分割して解析し、その中から最も危険な領域を発見するアプローチが採用されました。この目的のために、チームは COMSOL Multiphysics® ソフトウェアおよび付属の Application Builder ツールを使用して、シミュレーション工程の全体をサポートするマルチフィジックスモデルを作成しました。

前処理はモデル作成における重要なステップで、この工程で適切な境界条件が適用され、実際の衛星搭載電子システムの詳細な形状がインポートされました。

前処理のために、研究チームは Application Builder で 3D マクロモデル法をカスタマイズして用いました。さら

に、彼らはオブジェクト境界の自動修正機能を持つ独自のインポートエンジンを実装しました。「この手法は、インポート機能とオブジェクトの境界の自動修正機能の両方によって構成されています。」 Kozhevnikov 氏はこう説明しました（図3）。「この時点で修正を怠っていたら、こうした誤差がシミュレーション実行時に深刻な障害となつたでしょう。」

⇒ プラズマ物理の問題を解剖する

前処理に続くモデリングの方法論は以下の3つの段階から構成されます。1. 潜在的な危険領域に関する 3D モデルを用いた事前の静電解析。2. 関連する 2D モデルを用いた、電場増強領域の抽出および危険領域の定義。3. 関心があるパラメータをさらに詳しく調査するための、危険領域の DC 放電シミュレーション。

当初、同チームが COMSOL Multiphysics を採用したのは、直流放電の 2 モーメント理論モデルの特徴をすべて実装でき、かつ必要なパラメータを変更できるという同ソフトウェアのユニークな能力のためでした。シミュレーションでは、電子密度の分布を計算して危険領域を識別しました（図4）。Kozhevnikov 氏は次のように説明しました。「COMSOL Multiphysicsは我々のプロジェクトの二

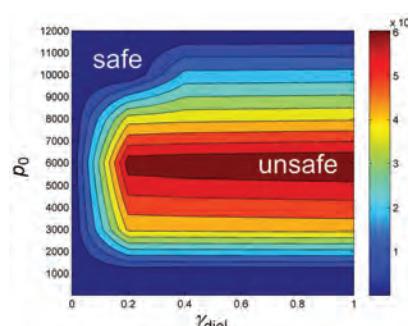
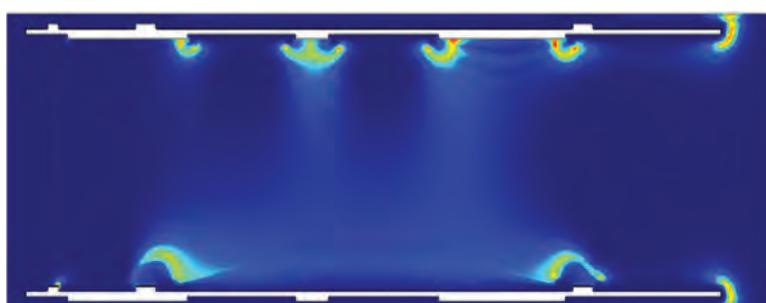


図4. 左：自律的な放電フェーズにおける電子密度の分布。この2Dモデルは、人工衛星の電源の3Dモデルに基づいて定義された危険領域から導出されています。右：臨界パラメータ図の例。危険領域における圧力 - 放出の関係が示されています。カラーマップは、放電される電流密度のレベルを表しています。

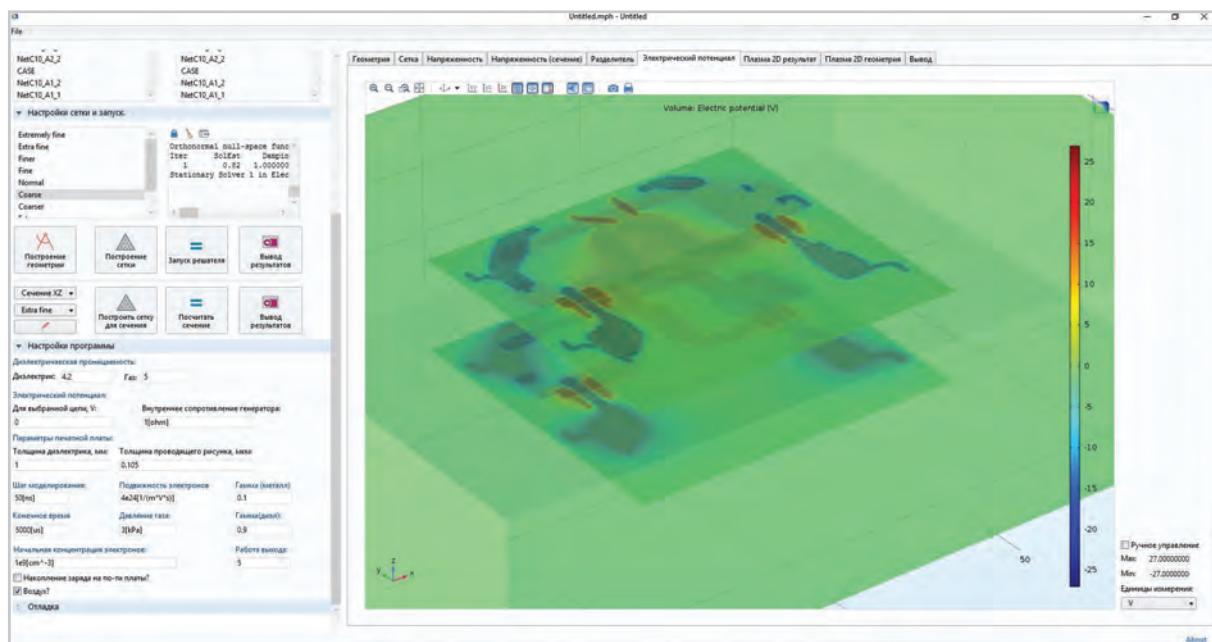


図 5.Kozhevnikov 氏が開発したマルチフィジックスアプリケーションにより、圧力や電子放出量といったパラメータを変化させて、自律的な放電が発生する可能性が最も高くなる領域を探すことができます。このアプリケーションでは、全面的な DC 放電シミュレーションは行わず、放電発生メカニズムのある特定の側面についてアーケの位置を固定して解析を行うことにより、回路システム全体の電子ポテンシャルなどの値を与えます。

ズ、すなわち具体的には運用圧力領域の解析が可能というニーズを素晴らしい満たしてくれます。中圧～高圧域に適した Particle-in-Cell (PIC) 法によるシミュレーションと比べて、はるかに高速でしかも便利です。」

「今回のような問題の解法としては、PIC シミュレーションは単純に計算コストが高すぎて候補にならないのです。単純化された構成 (e.g. 気体ダイオード) などのシミュレーションは可能ですが、中程度の圧力領域では、問題にもよりますが COMSOL によるシミュレーションに比べて 5 ~ 20 倍もの計算時間を要するのです。今回の構成の場合、COMSOL での平均的な計算時間は 2 時間未満です。」

同チームが構築し、モデルのセットアップに関係する複雑な物理をユーザーの目に触れないように隠したカスタムアプリケーションを図 5 に示します。このアプリケーションでは、実行中の解析に関するパラメータ以外はユーザーには表示されず、しかもカスタムコマンドやアルゴリズムを組み込むことが可能です。

Kozhevnikov 氏は言います。「厳密に言えば、数値計算のため我々が独自にプログラムを作成した場合、問題の内容を考えると極めて複雑になることが予想されますが、COMSOL のおかげでコーディングを行うことなく研究を進め

ることができました。私たちが将来に計画している気体の放出に関する研究において、COMSOL ソフトウェアが大いに実力を発揮してくれるものと信じています。COMSOL を選択したもう一つの理由は、CAD のインポート機能や Application Builder など前処理／後処理のツール群が充実していることです。

⇒ ソフトウェアの影響は衛星軌道から部署間まで

Kozhevnikov 氏は、こうしたシミュレーション結果と実験結果を将来的に統合する計画があることを明かしてくれました。「将来的に、完全に非破壊的なテストを行えるようになれば、COMSOL シミュレーションによって必要不可欠ではない部分を除外することにより、実験によるテストの対象になる領域を絞り込むことができるようになるでしょう。非破壊検査の開発に向けた取り組みが Institute of High Current Electronics の Laboratory of Vacuum Electronics に所属する我々の同僚研究員によって行われており、我々もそのプロジェクトの枠組みの中で協力を行っています。」

「自動化が進んだ本ソフトウェアシステムの高い適応力のため、宇宙機業界では今後も COMSOL

の採用が続くことでしょう。」彼はこう続けました。「宇宙船産業では、数々の基準が時と共に変更されてきました。したがって、そうした変更の影響をすべて考慮に入れるのは困難です。アーケ放電の診断の問題については解決を得ることができましたが、船内的一部の電子回路については、電圧の増加に伴い新たな運用条件に合わせて大々的な再設計を行う必要があるものと予測しています。端的に言えば、一部の装置の運用環境が「通常の状況」と著しく異なる場合、特定の方向でアーキテクチャを再構築する必要があるのです。われわれのアプリケーションは、プリント回路基板の再設計に関してアーケ耐性を高める推奨案を提供しますが、故障に強い電子システムを設計するという目的にも有用です。」◆



Vasily Yu. Kozhevnikov は、ロシア Tomsk の Tomsk State University から 2008 年に博士号 (理論物理学) を授与されました。同氏は 2008 年から研究員として Institute of High Current Electronics SB RAS (Tomsk) の Laboratory of Theoretical Physics に在籍しています。Kozhevnikov 博士は 2012 年以降、積極的に COMSOL を使用しています。

シミュレーションで変貌する医療機器業界

執筆者 FREDDY HANSEN 氏 (ABBOTT LABORATORIES)

われわれ医療装置業界に籍を置く者は、痛みを緩和し、健康を回復し、寿命を延長すべく技術の限界に挑戦しています。筆者は5年前、国立研究所から医療機器分野に移籍しました。当時、シミュレーションが行われていた唯一の分野は計算流体力学(CFD)でした。医療インプラントのシミュレーションは特に大きなチャレンジです。何故なら、人体という生態システムは驚異的に複雑で、我々はまだほとんどこれを理解していないと言っても過言ではないからです。

「最近、インプラント装置の性能予測に関し、シミュレーションと比べて、確立済みのベンチテストの方がかなり不正確だったという事例にいくつも遭遇しています。ならば、そうした場合はシミュレーションで良いではありませんか。」

この分野の数値モデルに対し、境界条件を定義することは恐ろしく困難であることが明確になりました。たとえば、通常であれば単純だろうと我々の多くが想像する熱モデルの構築でさえ、熱が灌流組織の中を輸送されるメカニズムのため、インプラントに関してはかなり厄介になる可能性があります。もう一つのハードルは、材料特性を正しく指定することです。筋肉、脂肪、その他の体内の組織は、時として目を見張るような奇妙な特性を呈し、しかも装置自体が過酷な環境にさらされるため、その材料は時間経過と共に変化します。金属部分は腐食し、非金属部分は流体を吸収し、さらにその液体およびそのイオンを外部に拡散させます。

それほどまでに困難ならば、何故シミュレーションを選択するのでしょうか。幸運なことに、コンピュータシミュレーションには絶大なるメリットがあります。複数のプロトタイプの制作、テストを省略できることによる時間短縮およびコスト削減、そしてシミュレーションのもう一つのメリットは、任意の値を任意の場所で「計測」できることです。

医療インプラントに関して具体例を一つ挙げると、設計サイクルの中で非常にコスト高になるのが医療装置のテスト工程です。無論、こうした研究において測定を行う事は可能ですが、流量計プローブや、熱電対、その他のセンサーを自分の希望する特定の場所に正確に配置することはできない場合が少なくありません。シミュレーションはこうした実験を計画したり、準備を行うのに役立ちます。この技術により、実験で得られたデータ各点の間の値を補間によって求めることができます。さらに複雑な解析を行えるようになりました。その結果、最終的に実験の回数を減らすことができました。一部、状況によってはシミュレーションを信頼して、完全に実験を省略することさえ可能でした。

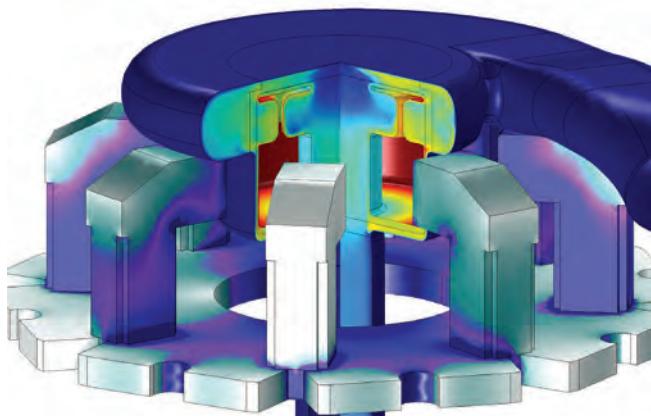
近年の法的承認プロセスの潮流として、より多くの場面で物理的実験の代替としてシミュレーションの使用を認める方向で、世界

各国の規制当局が手段を講じてくれているのは心強いかぎりです。

比較的安価なベンチテストについても、多くの場合シミュレーションで代替することが可能です。最近、インプラント装置の性能予測に関し、シミュレーションと比べて、確立済みのベンチテストの方がかなり不正確だったという事例にいくつも遭遇しています。ならば、そうした場合はシミュレーションで良いではありませんか。

歳月を経て、シミュレーションソフトウェアは進化を遂げています。特に COMSOL を好む理由は、他の追従を許さないマルチフィジックス能力があるからです。物理カップリングを用いない場合でも、熱伝導、電磁気学、構造力学、CFDなどをモデリングする際に同一のインターフェースを使用できるのでワークフローが加速し、ミスを犯す確率を下げることができています。さらに、複雑な任意の材料特性を入力したり、または必要に応じて独自のODEおよびPDEを入力でき、必要に応じてこれらを内蔵のフィジックスにシームレスにカップリングする能力が、いまではごく当たり前の機能と思えるようになってしまいました。

医療機器分野にはコンピュータシミュレーションの活躍の場が豊富にあり、我が社でも業界全体としても過去数年間コンピュータシミュレーションへの需要が順調に伸び、これを歓迎する雰囲気が高まっていることは個人的に嬉しい限りです。



COMSOL Multiphysics® ソフトウェアでシミュレーションされた左心補助循環装置 (LVAD)。



著者について

Freddy Hansen 氏は、Caltech から物理学の博士号を授与されています。サンフランシスコのベイエリアに居住する同氏は Abbott Laboratories に勤務し、電磁気学および流体力学の専門性を生かし人工心臓の設計に従事しています。同氏は 40 件を超える論文を執筆し、出願中のものを含め 5 件以上の特許を所有するほか、広く採用されている物理教科書の共著者でもあります。