

COMSOL NEWS

THE MULTIPHYSICS SIMULATION MAGAZINE

学生から起業家まで
University at Buffalo
PAGE 32

**ABB 社はシミュレーション
アプリで変圧器事業を強化**
PAGE 4

Rocket System

NASA は燃焼の
不安定性をモデル化
PAGE 8

創造、コミュニケーション、共同研究をカスタム・シミュレーション・アプリと共に：マルチフィジクスを全ての人へ

真のイノベーションによって、テクノロジーを全ての人々が使用できるようにすることが可能となりつつある中、今年度版の COMSOL News はシミュレーションの専門家を釘付けにする最前線の事例をレポートします。

数値シミュレーションによってもたらされる洞察力がしばしば、複数のチーム間のコミュニケーションを明確化するのに必要となります。それは丁度、組織内の共同研究の育成が、業務成功に非常に重要な事と同様です。COMSOL ソフトウェアのユーザーは COMSOL Multiphysics® が提供する強力な計算ツールを適用することによってノウハウを共有します。詳細な物理ベースモデルを創造し、直感的なユーザー・インターフェースで表現する、またはカスタム・シミュレーション・アプリとして表現できます。彼らはまた、COMSOL Server™によって、これらのアプリケーションを彼らの同僚や顧客が使用できるように、いかに貢献したかを議論しています。数値シミュレーションはかつてモデリング専門家だけの領域でしたが、シミュレーション・アプリによってマルチフィジクス解析の力を、全ての人にもたらしているのです。

NASA によるロケット推進装置の事例から、ABB 社の電力変換器、それにニューヨーク州立大学バッファロー校でのテクノロジー・アントレプレナーシップにいたるまで、最先端のモデル化、シミュレーション、それにアプリケーション設計を伴った、さまざまな製品開発それに研究プロジェクトを見出すでしょう。

専門性の共有に関する事例紹介を寄稿頂いた方々、また素晴らしい業績へ奮闘している事例紹介を寄稿頂いた全ての COMSOL ユーザーの皆様方へ、感謝の気持ちを述べさせていただきます。

それでは、COMSOL NEWS 2016-2017 をお楽しみください。



COMSOL, Inc.
テクニカル・マーケティングマネージャー
Valerio Marra

INTERACT WITH THE COMSOL COMMUNITY



COMSOL, Inc.



COMSOL Multiphysics



@COMSOL_Inc



google.com/+comsol

BLOG comsol.com/blogs

FORUM comsol.com/community/forums

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

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**
2016-2017 日本語版

© 2016 COMSOL. COMSOL, COMSOL Multiphysics, Capture the Concept, COMSOL Desktop, COMSOL Server, LiveLink, and Simulation for Everyone are either registered trademarks or trademarks of COMSOL AB. All other trademarks are the property of their respective owners, and COMSOL AB and its subsidiaries and products are not affiliated with, endorsed by, sponsored by, or supported by those trademark owners. For a list of such trademark owners, see www.comsol.com/trademarks.

The IN logo is a registered trademark or trademark of LinkedIn Corporation and its affiliates in the United States and/or other countries. The 'f' logo is a registered trademark of Facebook, Inc. The bird logo is a registered trademark of Twitter, Inc. The G+ logo is a trademark of Google, Inc.

CONTENTS

POWER TECHNOLOGY

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

ROCKET PROPULSION

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



PRODUCT SAFETY & QUALITY

- 12 | 家具検査への支援

ELECTRONICS COOLING

- 14 | コンピュータアプリケーションで生産性と収益を上げる

ENERGY TECHNOLOGIES

- 18 | 数値シミュレーションを使用してガスパイプラインのスクイズオフ（遮断）基準を改善



表紙写真

米国フロリダ州ケープカナベラル空軍基地の第41 発射台から離陸するアトラス V ロケット。
画像提供：NASA/Bill Ingalls

The National Aeronautics and Space Administration (NASA) does not endorse the COMSOL Multiphysics® software.

FEATURES

ENVIRONMENTAL ENGINEERING

- 21 | 疎水性メッシュを使用した流出石油の清掃

BUILDING PHYSICS

- 24 | 振動、騒音、そして轟音

SOFTWARE QUALITY ASSURANCE

- 26 | カスタムアプリケーションによる原子力安全関連ソフトウェア品質保証 (SQA) 手順の自動化

MAGNETIC FUSION ENERGY

- 29 | 人工の星一発電用高性能核融合装置の構造的完全性を評価する

TECHNOLOGY ENTREPRENEURSHIP

- 32 | カスタムアプリケーションによる工業イノベーションを促進



BUILDING PHYSICS

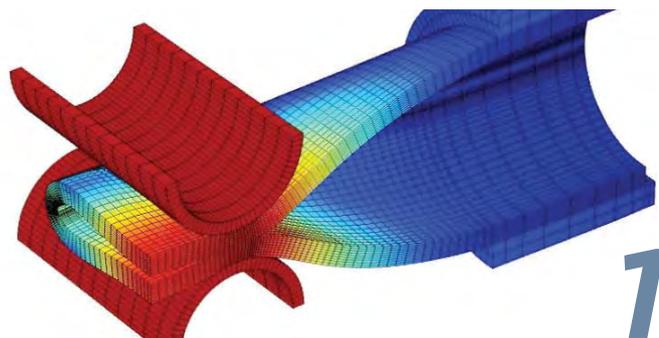
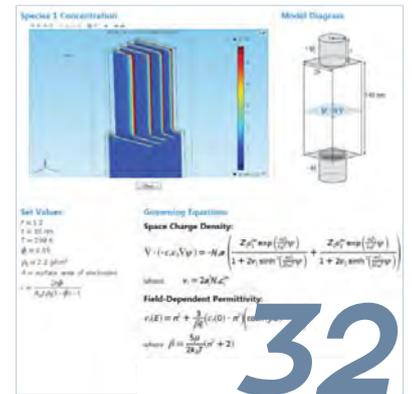
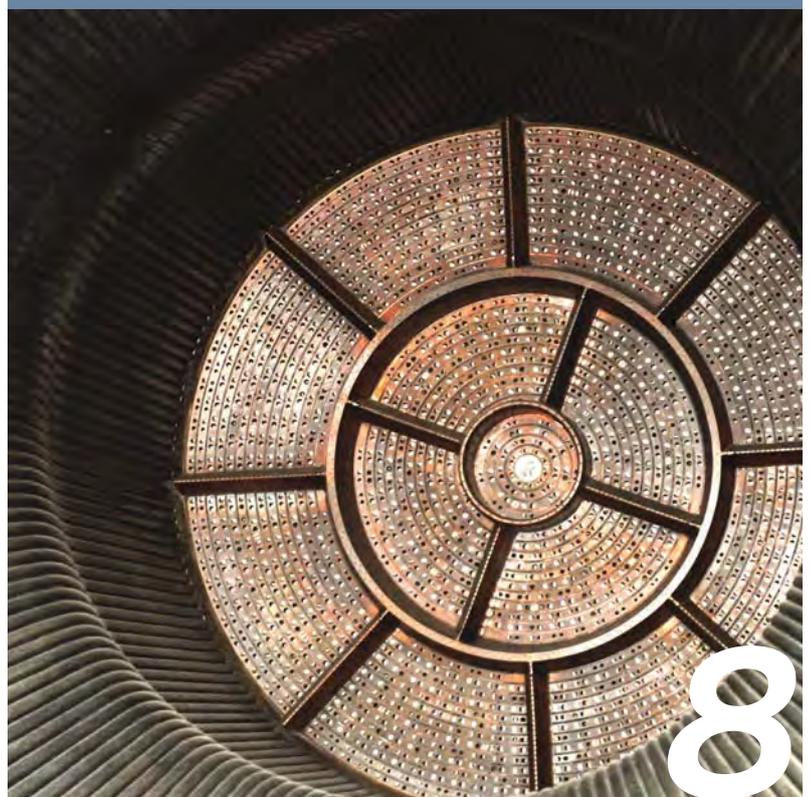
- 35 | マルチフィジックス解析で過去の遺産を保全

ELECTRONIC PACKAGING

- 38 | カスタム・アプリケーションによる電子装置の熱特性解析

GUEST EDITORIAL

- 40 | COMSOL Multiphysics® でアカデミアと産業界にイノベーションを



18



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

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

執筆者 **LEXI CARVER** 氏

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

これらの設備の間には、交流電流を送

る電線で電圧を増減するための変圧器があります(図1参照)。高電圧での送電は、電力損失が低くなるため、長距離の送電に向いています。しかし、こうした高電圧は電線の両端部で危害を及ぼすため、変圧器を使って、送電するポイントで電圧を上げ近隣地や建物の近くで電圧を下げています。

しかし変圧器はノイズを発生し、しばしば微かなハム音またはブーン音として感じられ、その近くを歩いている時でも聞こえ

ることがあります。これらのノイズを完全に静音させることは不可能ですが、規制により安全な騒音レベルの遵守が求められ、また良い製品設計を行うことによりこれらの音響効果を最小化することが可能です。

最大の変圧器製造メーカーの1つで、世界中でその変圧器が使用されている、ABB社(本社スイス、チューリッヒ)は、数値解析と計算アプリケーションを自社変圧器内の騒音レベルの予測と最小化の



図 1. 高圧送電線用変圧器設備の写真。

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

⇒ いくつかの発生源からの騒音の静音化

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

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

(図 2 上参照)。

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

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

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

ノイズの発生源や相互に関連した電磁効果、音響効果、機械的な要因に関して、変圧器のハム音を最小限に抑える最適な設計を行うため、スウェーデンのベステルオース本社研究センター (ABB CRC)

の技術者たちは変圧器の内部動作を理解する必要がありました。

⇒ 音響効果、機械的効果、電磁効果を相互完全連成

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

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

彼らの目的は、変圧器コアや巻線内に生成される磁束 (図 3 左参照)、巻線内のローレンツ力 (図 3 右参照)、磁気歪みによって生じる機械的変位、タンク中に伝播する音響波から生じる圧力レベル

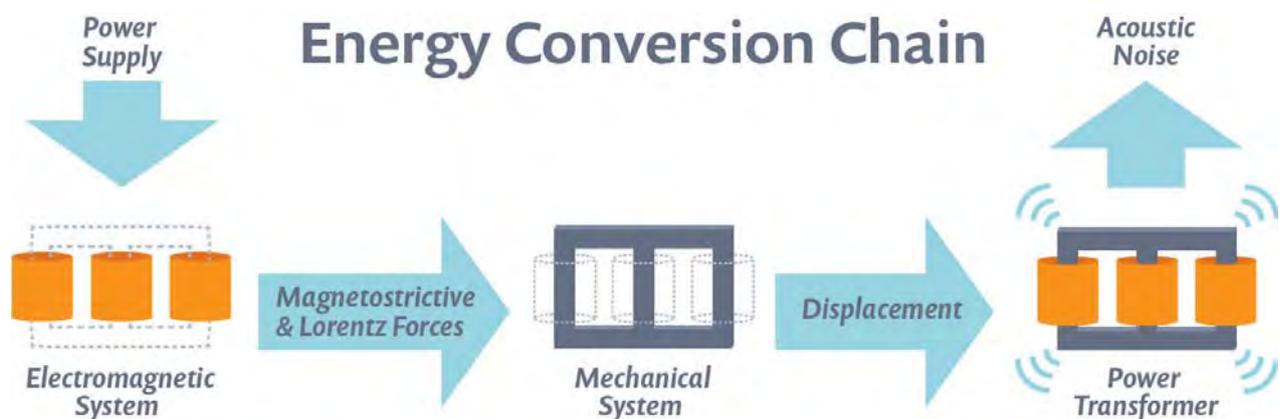
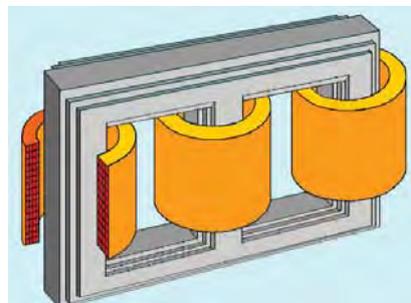


図 2. 左上：三相変圧器の能動部品 CAD モデル。コア周囲には巻線付き。右上：変圧器の能動部分。絶縁油で満たされたタンク中に設置されている。下：コアノイズと負荷ノイズ発生におけるエネルギー交換連鎖図 (コア内部に磁気歪み、巻線中にローレンツ力)

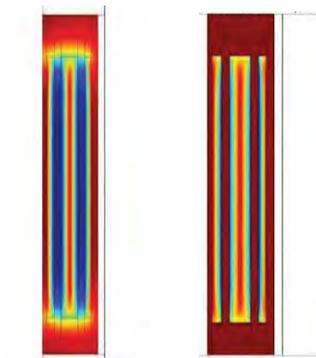


図 3. 変圧器のコイル巻線における磁束密度 (左) およびローレンツ力 (右) を示すシミュレーション結果

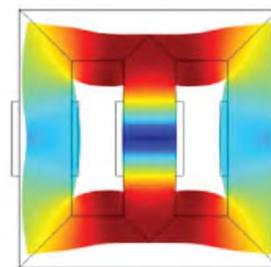
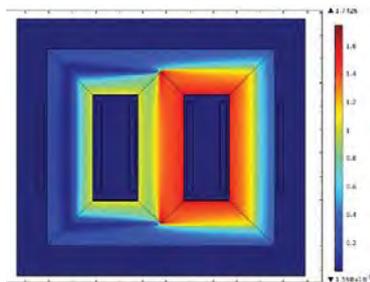


図 4. 左：スチール状の磁束レベルを示す COMSOL ソフトウェアでの結果。右：中心部の共振を示す結果。見やすくするためにデフォルメされている。

などを計算するためのシミュレーションや計算アプリを作成することでした。

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

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

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

その結果、彼らは、オイルを通過する音波を予測し、タンクに生じる振動を計算することができ、周囲の環境への音の

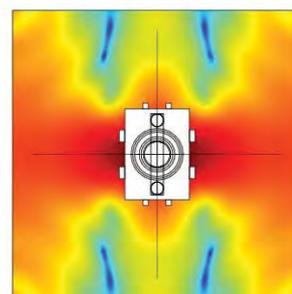
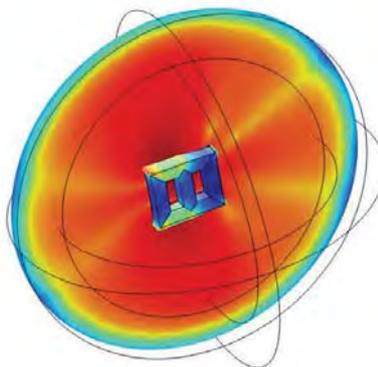


図 5. 中心部周辺 (左) と変圧器周辺の音圧領域を示す音響解析結果。

放射を示す事ができました (図 5 参照)。

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

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

⇒ ABB 全社に拡大するシミュレーション機能

CRC チームは、彼らの理解やモデル化を向上させるためだけでなく、得られ

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

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

またとあるアプリケーション (図 7 参照) では、変圧器コアの特定の固有周波数を算出し、それがノイズに関連する不具合を引き起こし、その結果周波数が可

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

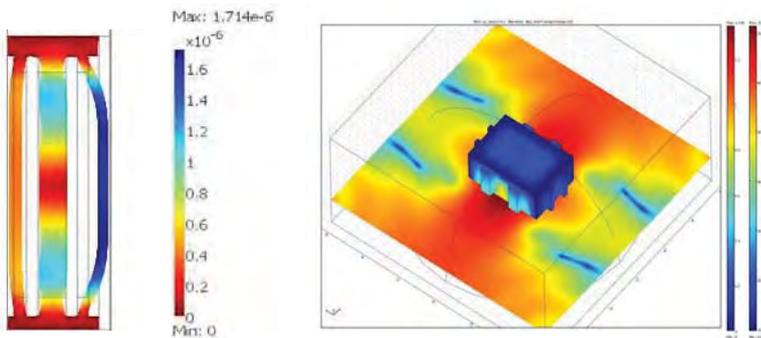


図 6. 左：巻線の変位を示すシミュレーション結果。見やすさのためにデフォルメされている。右：タンク外側の音圧レベルとタンク壁の変位を示す結果。

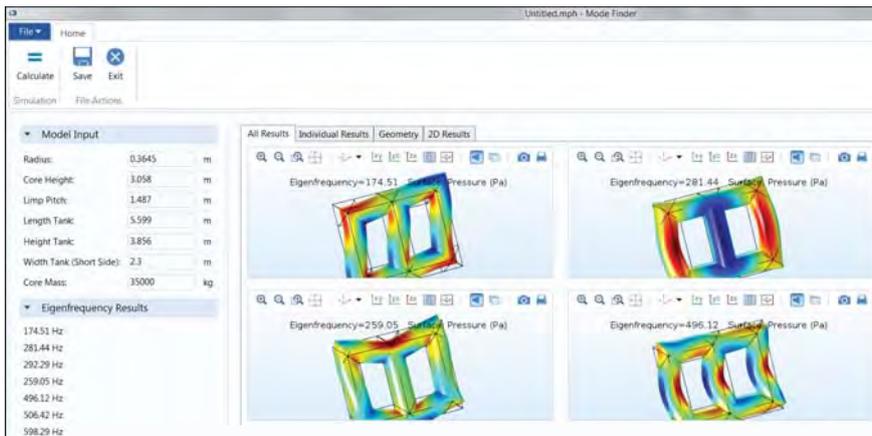


図 7. 変圧器の中心部の固有振動数を計算するために作成された最初のシミュレーション・アプリで得られた画面。左側では、このアプリのタブがモデル入力を示し、右側の結果は計算された固有振動数を示している。

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

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

「費用的なこの側面に加えて、時間的な側面もあります。この新しいアプリに

よって、設計者の業務はより簡略化され、より効率化されます。それは、精緻な有限要素解析コードが使用されているためです。」

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

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

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

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

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

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



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

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

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

執筆者 **SEAN R. FISCHBACH** 氏

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

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

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

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

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

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

最近、平均流量特性効果でノズル減衰

を解決するアプローチは、French^{※2}によって実践されました。この新しいアプローチは、Eulerの方程式^{※3}を変化させて公式化した音響速度ポテンシャル方程式（AVPE: Acoustic Velocity Potential Equation）を解くことによってSigmanとZinn^{※4}が考案した研究を拡大したものです。 ψ を複素音響ポテンシャル、 λ を複素固有値、 c を音速、 M をマッハベクトルとするAVPEの固有値を決定することは、

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

伝統的に活用されてきた圧力ベース波方程式よりもさらに複雑になり、

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

燃焼室の流動領域および固有値の近似値が必要となります。

⇒ 燃焼室の空気力学モデル

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

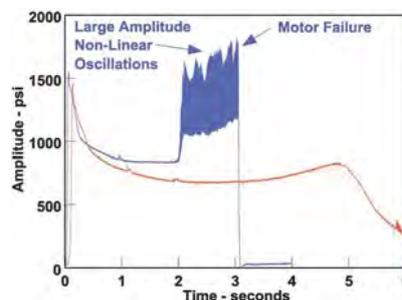


図1. 固体ロケットモーターの安定性（赤）と不安定性（青）の圧力波形^{※1}。

COMSOL Multiphysics[®] は、燃焼室の気体力学的特性と燃焼室内の音響特性の両方を簡単かつ正確にシミュレーションする数値計算プラットフォームを提供します。この有限要素法ソフトウェアパッ

ケージは、一般的な数学的インターフェースとともに多数の設定済みフィジックスを提供します。

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

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

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

⇒ 燃焼室内の音響特性のモデル

AVPEの複素固有値を決定するため、COMSOL Multiphysics[®]の係数型PDE（偏微分方程式）数学インターフェースが使われます。AVPEの平均流量条件は平均流量解析のソリューションから得られます。燃焼室内の空気力学的特性は、音響分析の境界条件を定義する際に重要な役

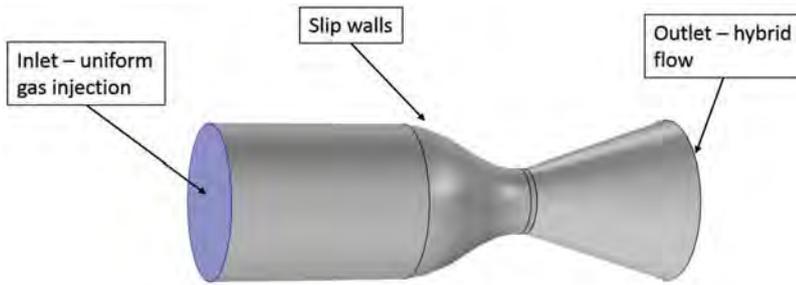


図 2. 境界条件のある液体エンジンジオメトリのシミュレーション。

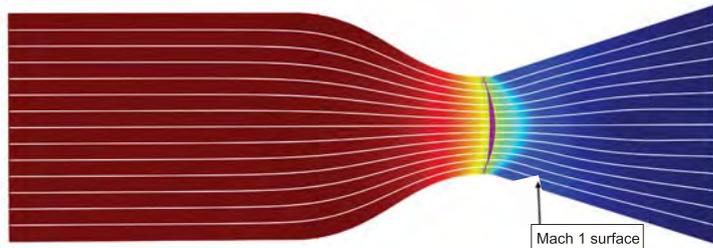


図 3. 燃焼室内圧力に関してプロットされた速度流線形。

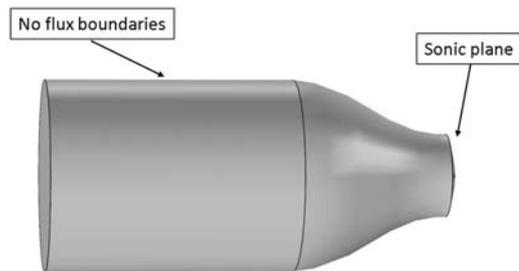


図 4. 境界条件のある音響解析図。

割を担います。ロケット・ノズルの集束および分流部分内で、音速面がマッハ 1 の場合、燃焼室の圧力、速度、密度の勾配は、理論的には無限に増加します。音速面の下流において、音響障害が音速よりも早い速度で平均流量を循環させます。

この状況は、音速レベルでの下流の攪乱が上流へ伝わることを抑える働きをします。ノズルの分流部分は、音響的には静かな部分で燃焼室内の音響には影響しません。このシミュレーションジオメトリは、ゼロフラックス境界条件が満足されるノズル音速線で切断されます (図 4 参照)。残りの境界が、全ての表面上でゼロ吸音と仮定して、ゼロフラックス境界条件でモデル化されます。

固有値解析は、それぞれの音響モード

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

古典的な Helmholtz 方程式を使って導き出された音響モード形状を、AVPE を使って導き出された音響モード形状と比較すると、正確に基礎物理特性を表す信頼性の高いモデルの効果が明らかになります (図 5 参照)。平均流量条件を AVPE に含めて、安定した気体流によって起きる位相シフトをモデル化します。燃焼の不安定性モデルは音響固有ベクトルの時間積分および空間積分を使用するので、位相は特に重要です。

ロケットガス動力および音響固有モードをシミュレーションするために COMSOL Multiphysics® を活用すれば、以前の技術を超える正確なモード形状を得ることができます。この信頼性の高い音響特性は、簡単に燃焼の不安定性モデルに組み込まれ、ロケット設計者や技術者に大きな予測能力を与えます。バッフルのよう

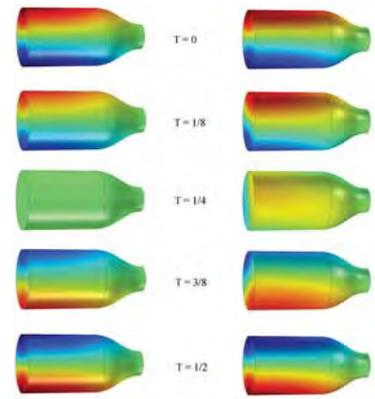


図 5. 振動の半周期 (T) について、標準的な Helmholtz 波動方程式 (左) と AVPE (右) を使って計算された最初の接線固有モードの比較。

な減衰装置あるいは稼働条件の変更を含めることにより、実験前に正確なモデルを得ることができます。

⇒ 今後の研究

燃焼の不安定性の完全な描写には、燃焼室内の音響特性と関連して、回転振動や熱振動があげられます。回転振動は、音響振動の直接の影響で起こり、音波変動がない場合でも、そこで温度波が現れます。COMSOL Multiphysics® を活用した今後の研究では、全ての音響振動にもなって起こる粘性回転波の問題解決に重点を置いた研究を行う予定です。❖

参考資料

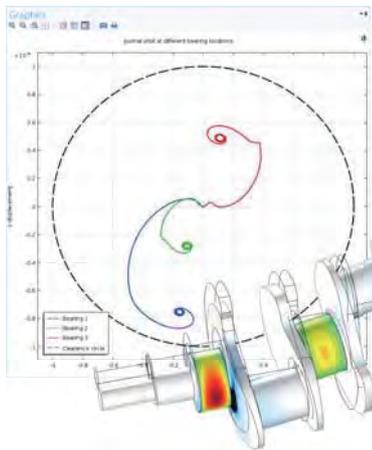
- ※1. F. S. Bloomshield, Lessons Learned in Solid Rocket Combustion instability, 43rd AIAA Joint Propulsion Conference, AIAA-2007-5803, Cincinnati, OH, July 2007
- ※2. J.C. French, Nozzle Acoustic Dynamics and Stability Modeling, Vol. 27 Journal of Propulsion and Power, 2011.
- ※3. L. M. B. C. Campos,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



新発売！ローターダイナミクスモジュール ～回転機械の力学をモデリングするアドオン～

COMSOL Multiphysics® バージョン 5.2a update2 で新たに登場したローターダイナミクスモジュールは、構造力学モジュールへのアドオンです。回転機械の横方向と捻り方向の振動効果を解析することができ、ローターの振動を調べ、それを設計限界に入れるようにすることができます。静止または運動中のディスク、ベアリング、ファンデーションなどのローター部品の様々な効果を考慮し、キャンベルダイアグラム、モード軌道、調和軌道、ウォーターフォールプロット、ワールプロットを表示することができます。

解析事例を3例で紹介します。

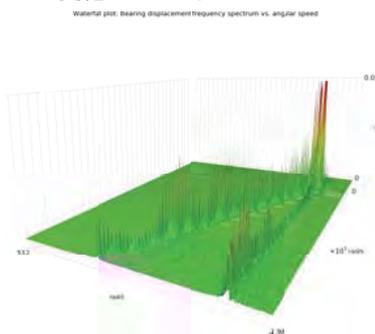


ベアリング中の潤滑油における圧力分布

この例は、レインボーカラープロットがベアリング中の潤滑油における圧力分布を示しており、ローターダイナミクス解析で計算された von Mises 応力が青色プロット、ベアリング変位が軌道プロットで示されています。

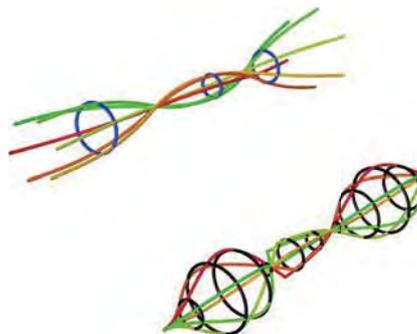
ウォーターフォールプロット

ローターの角速度の増加に伴う周波数スペクトルの変化をプロットします。



ワールプロット(モード型)

ローターの軸周りのモード型を離散回転数ごとにプロットします。



※ローターダイナミクスモジュールのご利用には、COMSOL Multiphysics® 本体および構造力学モジュールが必要です。

Product Suite

COMSOL Multiphysics®
COMSOL Server™

機械・構造系

構造力学モジュール
非線形構造材料モジュール
ジオメカニクスモジュール
疲労解析モジュール
マルチボディダイナミクスモジュール
ローターダイナミクスモジュール
音響モジュール

流体系

CFD モジュール
マイクロフルイデクスモジュール
ミキサーモジュール
伝熱モジュール など

電磁気・光学系

AC/DC モジュール
RF モジュール
波動光学モジュール
MEMS モジュール
プラズマモジュール など

化学・電気化学系

化学反応工学モジュール
腐食解析モジュール
バッテリー & 燃料電池モジュール など

汎用

最適化モジュール
粒子追跡モジュール など

インタフェース

CAD インポートモジュール
デザインモジュール
LiveLink™ for SolidWorks®
LiveLink™ for AutoCAD®
LiveLink™ for PTC® Creo™ Parametric
LiveLink™ for MATLAB®
LiveLink™ for Microsoft Excel® など
その他、各種 3D-CAD に対応

※モジュールは今後のバージョンアップに伴い追加される場合があります

COMSOL Multiphysics® の1000種を超えるユーザ事例をご覧ください。
計測エンジニアリングシステム株式会社 営業部、または下記 URL にご請求ください。

http://www.kesco.co.jp/comsol_req.html

家具検査への支援

家具業界では品質基準が全てです。物理的試験に合格した椅子のみが商品棚に並べられ、不合格となった試作品はそれをデザインしたエンジニアへ返却され、再度、製図版の上から始まります。

執筆者 **LEXI CARVER** 氏

市場をにぎわすあらゆるヒット商品の裏には何度も練りなおされたデザインや試作品そして繰り返し受けた検査が存在し、その商品を世に出すための準備を目標として研究者、設計者、そして専門家たち全ての人たちが努力を重ねています。メーカー側は、安全基準条件と品質基準を満たすため、お店でその商品は販売可能だという評価を実証しなければなりません。

商品棚に陳列する椅子には、使用する人の体重の耐久性、座った状態でも形状を維持すること、特定の状況でも壊れたりしない、ということが証明された厳格な工程が含まれています。椅子はその製品寿命中、数千サイクルの繰り返し負荷に耐えなければなりませんし、ひび割れ、崩壊、またはたわみが起きては行けません。

⇒ デザイナーの負担を軽減する検査会社

検査合格を勝ち取りたい顧客たちにとって、この検査プロセスは費用も時間もかかることがあります。ある独立した検査会社は椅子の製造に携わっている企業のこの重荷を軽減しようと努力し続けています。毎年何百という様々な種類の椅子を検査し、ヨーロッパやアメリカの品質水準 (EN, BS, ISO そして ANSI 標準) に合格することが出来なかった椅子の製作者たちは、その不合格という結果にがっかりし、デザイン変更の必要性和再検査に必要な費用に多額の投資を費やすことになります。

製造上の負担を軽減するため、検査会社は、数値シミュレーションアプリケーションの開発を支援する COMSOL Certified Consultant の Continuum Blue 社を利用することになりました。彼らのアプリケーションを利用すれば異なる複数の椅子を

検査する製作者に対して、仮想検査ツールを提供できます。それにより実際の物理的検査の前に、その椅子のデザインの可否を仮想検査により予測することが可能になります。

“私たちの顧客は、検査サービスにおいてシミュレーションアプリケーションの開発が可能かどうかを探求したいと思っています。”と Continuum Blue 社のディレクター Mark Yeoman 博士は説明します。“顧客たちはリモートでログインし、様々な椅子の設計をアップロードして、それぞれの椅子の仮想検査を行うことが出来るでしょう。いったん椅子が仮想検査をクリアし検査結果を確信すると実際に製造し、サンプルを検査会社へ送るのです。”

このような検査用アプリケーションは幅広い機能性がようになります。品質基準を含み、開発工程の全ての段階においてエンジニアや設計者達にとって直感的で使いやすく、様々なモデル、形そして素材に対して柔軟に対応可能でなくてはなりません。

⇒ より迅速な家具検査の道筋をシミュレーションとともに

Yeoman 博士は、標準負荷試験上での椅子の反応を予測するため COMSOL Multiphysics® を使用してある数値解析モデルを開発しました。彼のシミュレーションには、物理的検査の模擬テストのように椅子のジオメトリ、フロア、椅子の脚の固定位置、背もたれと台座の載荷版が含まれています (図 1 参照)。

最終的に、多種多様な椅子の設計に対してシミュレーションが解答すべき質問は、“要求された荷重に耐えられる椅子だろうか”ということです。

Yeoman 博士は“椅子は広範囲にわたる安全を確保しなくてはなりません。椅子



図 1. 椅子のテスト設定。Continuum Blue チェアモデルのオーバーレイ、ジオメトリ。

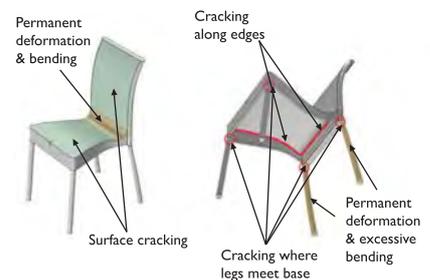


図 2. 不具合が頻繁に発生しやすい椅子の重要箇所を示す設計図

は壊れることなくその寿命を終えなければなりません。亀裂などが入ることもなく、そして脚も曲がったり、バラバラになったり、そしてねじれたり折れたりすることがあってもいけません。もし脚が地面との設置部の角で亀裂が入ったとしたら、その椅子は倒れてしまいます。”と述べています。

⇒ 検査基準に達する事

“検査の最初の部分は静荷重試験で、その椅子が最大限の荷重に耐えられるかどうかを検査するものです。”と Yeoman 博士は説明します。検査では 20 秒間椅子がその重みに耐えられるか、最初は台座、そして背もたれで検査をします。大柄の人が座り背もたれに体重をかけたことを想定して行います。

検査の 2 番目は疲労評価です。ここでは椅子の上の荷重を乗せたり、取り除いたりを 1,000 回以上繰り返し行います。これにより椅子が何年も使用された状態と同じ状態を再現します。

Yeoman 博士のモデルは人が座っている間のいすの歪み、機械的ストレス、最も早く、そして最も発生しやすい不具合について分析します (図 2 参照)。モデ

ルでは椅子、載荷板、床との接触圧も分析され、不具合が発生される反復数を予測します（図3）。

“モデルの設定は簡単です”と博士は説明します。“その構造力学、材料特性、荷重パラメータは比較的素早くCOMSOL®ソフトウェア上で実装すること出来ます。”多くの機械的係数は椅子のテストの合格、不合格に影響を及ぼしますが、接触の問題は難しい部分でもあります。それをYeoman博士は以下のように説明しています。

“接触解析は本質的に複雑です。接触表面の材料特性、係数の摩擦に大きく影響され、事実上、非線形になります。本質的に不安定で接触問題を引き起こす複数の接触ポイントがあります。椅子の4本脚と床との4か所の接触ポイント、椅子の台座と床の間にある荷重板、そして背もたれと背もたれの荷重板です”と彼は続けます。“接触パラメータを正確に定

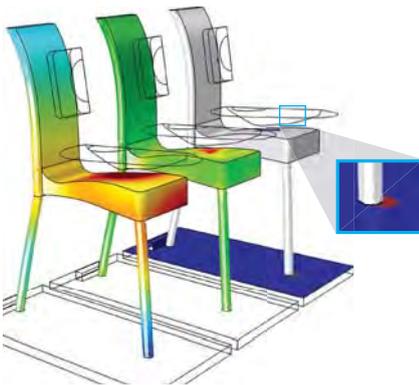


図3. 荷重テスト中 ゆがみがあるシミュレーション（左）、圧力がかかったシミュレーション（中央）、接触圧（右）

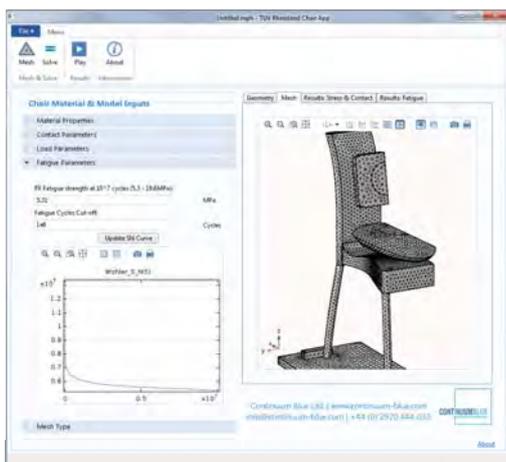


図4. Continuum Blue 社のアプリケーションは、デザインの必要性と要求に合わせたメッシュと入力フィールドを示しています。

義するため、私たちは材料の剛性、降伏応力、摩擦係数を使用します。”

⇒ 仮想テストを素早く簡単に

COMSOL モデルが完成し、使えるようになる、Continuum Blue 社のチームはカスタマイズされたユーザー・インターフェースもしくはアプリケーションを作成します。ジオメトリ、荷重状態や材料特性に関係するパラメータや特定の入力値を変更することにより、ユーザーはより早く椅子のデザインの仮想テストを行うことが出来ます。

“私たちは COMSOL Multiphysics® の Application Builder を使用しました”と Yeoman 博士はコメントします。アプリケーションデザイナーは、Application Builder を使用して、入力フィールド、結果テーブル、ボタン、ドロップダウンオプション、そしてグラフィックスを表示することが出来ます。

アプリケーションはフルシミュレーションを実装することが出来ます。しかしエンジニア、もしくはマルチフィジクスモデリング未経験のユーザー達がアクセス出来るのは、指定された入力値のみで、モデル、フィジクスや結果分析から読み取れる結果などにはアクセスすることが出来ません。

“顧客用に作成したテストアプリケーションでは、非線形の材料のような様々なオプションを定義することが出来るようにしたいと思っていました。全てが完全にリンクされるように全てのモデルの特徴をパラメータ化しました。これにより、もし誰かが1つのパラメータを変更した場合でもシミュレーションはそれに伴ってアップデートされます。”

“椅子に荷重がかかっている場合、材料のへこみ具合と抗張力に関するストレスレベルを評価します。もし塑性変形が見られる場合、椅子の関連

箇所がハイライトされ、椅子にくぼみが発生していることを知らせます。もし材料の抗張力以上の圧力がかかった場合、椅子の一部の材料において亀裂や割れ目のような壊滅的な損傷が見られます。”と Yeoman 博士は語ります。“この場合、アプリケーションにより、ストレスレベルが抗張力以上となり椅子に損傷が発生した旨を伝えるポップアップウィンドウが自動的に表示されます”と Yeoman 博士は続けます。

これはまさに検査会社が探し求めていたアプリケーションでした。椅子のメーカーと設計者たちは自分たちの椅子のジオメトリ、材料、定義した接触状態と荷重状態をインポートすることで、その設計の合否がすぐ確認でき、試験必要条件に対する確認とその結果を確認することが出来るのです。（図4参照）

「これにより試作品を作成する前に、実際に多数のデザインを評価することが可能になります」

—MARK YEOMAN 博士 (CONTINUUM BLUE 取締役)

COMSOL Server™を通じて、Yeoman 博士は異なるユーザーにアプリケーションを配布することが出来ました。それにより彼らはデータベースにログイン可能となり、特定のアプリケーションを開始することも可能となりました。検査会社は世界中にいる彼ら自身のクライアントたちとテストアプリケーションをシェアするため、将来的に、COMSOL Server™を使用する予定です。

“椅子のデザイナーやテストエンジニア達は、これらのアプリケーションを使用して、製造および物理的な検査の前段階で簡単な椅子の性能評価をよりシンプルに行うことが出来るようになるでしょう”と Yeoman 博士は語ります。“これにより試作品を作成する前に、実際に多数のデザインを評価することが可能になります。成功するだろうと思われるデザインを1つに絞り込み試作品や検査の対象の椅子として決定する前に、対象の椅子の評価を行うことが出来るため、試作品作成前にその椅子が品質基準の検査条件を満たすかどうかを確認することが出来ます。物理的にも、また実際に作品を作成する時間と費用の削減にもなるのです。” ❖



MARK YEOMAN 博士
CONTINUUM BLUE 社取締役

コンピュータアプリケーションで生産性と収益を上げる

高精度のマルチフィジックモデルに基づくコンピュータアプリケーションで、誰もが勝者に。生産コストを最小化しながらリスクの低いイノベーションが可能になる、あるいは、まったく新しい収益の流れを導入することで、アプリケーションの開発者、エンドユーザーのどちらもメリットを享受することができます。

執筆者 **Jennifer Segui** 氏

HeatSinkSim は、AltaSim Technologies 社のシミュレーション専門家たちが生み出した最先端のコンピュータツールであり、このようなアプリケーションは、つい最近まで現実的かつ競争優位性を保てる期間では開発不可能なものでした。このアプリケーションは使いやすいインターフェースを備えており、パワーエレクトロニクス用ヒートシンク的设计最適化に興味を持つ技術者なら誰もがマルチフィジックスモデリングやバーチャルプロトタイピングを使えるようになっています。

シミュレーションアプリケーションはあらゆる製品開発プロセスや設計業務と関連していることから、大企業ではワークフローのボトルネックを解消する手助けとなり、また、多くの場合シミュレーション専門スタッフを置くことが困難な中小企業またはスタートアップ企業ではカスタム設計能力を得る手助けとなります。

「大企業であってもスタートアップ企業であっても、未来を変え、市場を支配しようと思ったら、従来の設計ツールをこれまでとは異なる予測可能で実情が反映されたツールに替える必要があります。マルチフィジックスモデリングと、HeatSinkSim のようなシミュレーションアプリケーションが、エンジニアリングイノベーションを可能にし、その先導役となるでしょう。」と AltaSim 社の共同設立者であり Principal でもある Jeff Crompton 氏は話します。

本稿では、専門知識に基づいた所見と実例を用いて実践的な指針を提示するとともに、開発コストを抑え、市場に届けるまでの時間を短縮する、シミュレーション主導の製品設計ワークフローを活用して前進するためのアイデアをご紹介します。

⇒ 設計目標から革新的な製品まで

シミュレーションを製品開発のワークフローに統合するための道筋は、シミュレーションアプリケーションを使えば単純明快であり、これまで主要な設計手法であった非常にコストのかかる試行錯誤のプロトタイピングを過去のものにします。一つの例として、ヒートシンク的设计及びパワーエレクトロニクス向けの最適化における共通の目標と、それに続く HeatSinkSim アプリケーションの開発と活用によりこれらの目標を達成し、さらには超えることを考えてみましょう。ヒートシンク的设计に特に携わっていない方にとつ

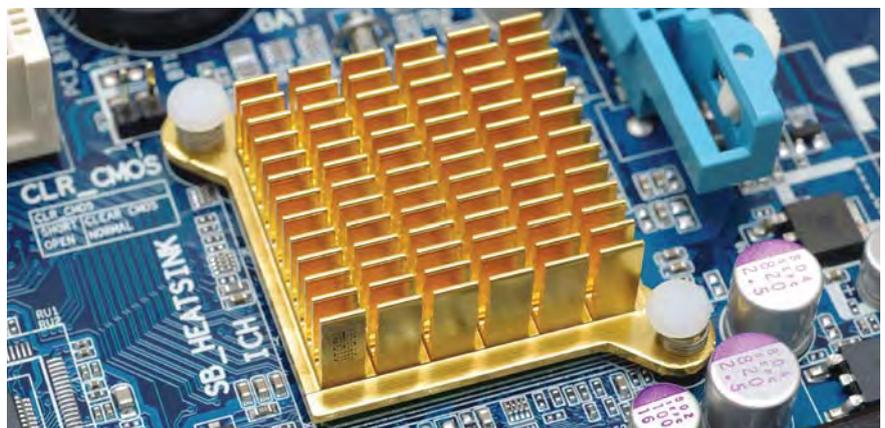


図 1. 垂直板のフィンを持つヒートシンク。重要な途切れない製造作業を支えるパワーエレクトロニクス部品と一体で PCB に装着されている。

「HeatSinkSim に代表されるマルチフィジックスモデリングとシミュレーションアプリケーションは、エンジニアリングイノベーションの先導役となるでしょう。」

— JEFF CROMPTON, PRINCIPAL AND COFOUNDER, ALTASIM TECHNOLOGIES

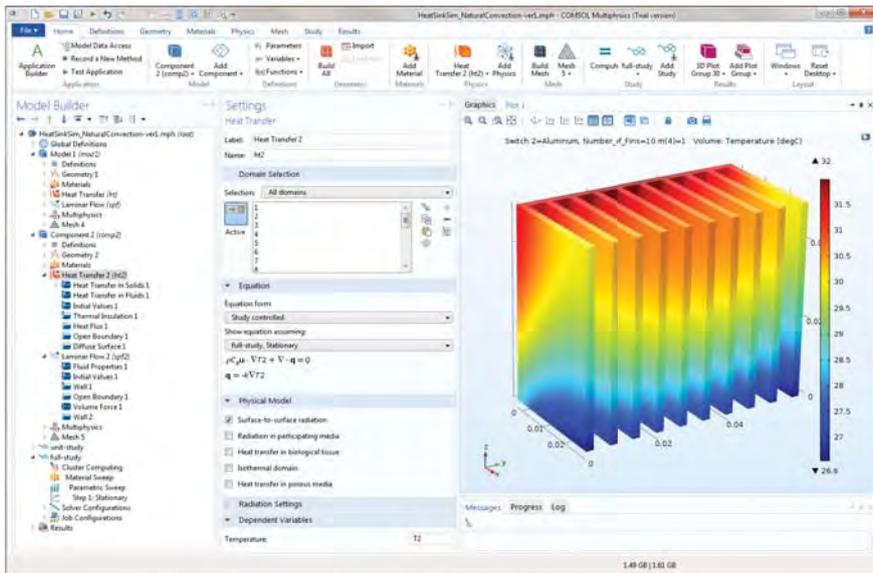


図 2. モデルのジオメトリ、材料、物理を定義する Model Builder を立ち上げた COMSOL Desktop の画面。この後にジオメトリのメッシュ化を実行し、求解し、結果の後処理を行う。

でも、これらの手法や以下で説明するワークフローは他の製品や製造工程にますます適用可能なものです。

パワーエレクトロニクスは、事実上あらゆる消費財の生産を担っている自動製造工程を動かすために使われており、この実例における大きな目的は、パワーエレクトロニクスを安定して長期にわたり稼働させることにより、質の高い製品やサービスをタイムリーに市場に提供することです。高い生産量が求められるなか、電子機器には高い性能と小型化が同時に要求され、その結果、高い電力密度と動作温度が長期にわたる稼働を困難にすることがあります。

高い動作温度により、製造工程をコントロールするシステムの信頼度が下がらないようにするためには、受動的な放熱と自然対流による電子部品の冷却が必要です。ヒートシンクはこのような目的で電子機器と一体化して PCB (printed circuit board、PCB) に装着されます (図 1)。図に示したヒートシンクは、フィンを並べる設計により熱を逃がすための表面積を広げています。フィンの数、大きさ、設置間隔、熱伝導率などはすべて、ある特定の電力下でのヒートシンクの性能に影響を与えます。突き詰めていくと、電子機器が動作温度上限よりもずっと低い温度に確実に保たれるよう、ヒートシンクの

設計を最適化するために考慮しなければならない変数は、数多くあることとなります。すべての関係する変数を考慮しながらヒートシンクの設計を最適化するための最適な方法とは何でしょうか？

高い品質を確保するための物理的なプロトタイピングは、これまでそして現在も製品設計サイクルの中で必要なものですが、マルチフィジクスなシミュレーションを用いたバーチャルプロトタイピング

は、必要な試作品の数を減らすこと、また、設計サイクルの早い段階で実行可能性の評価を可能にすることにより、このプロセスに要する時間とコストを大幅に削減します。

AltaSim 社では図 1 のヒートシンクのマルチフィジクスモデルを COMSOL Multiphysics® を用いて開発、検証しており、このソフトウェアが設計の最適化に欠かせないツールとなっています。モデル設定のプロセスが一目でわかる図 2 には、Model Builder ウィンドウのノード順の各ステップの概要を示しています。

AltaSim 社では検証後のヒートシンクのモデルから、COMSOL Multiphysics® のビルトイン機能である Application Builder (図 3) を用いてカスタムアプリケーションを開発しました。図 4 は AltaSim 社の製作したシミュレーションアプリケーション「HeatSinkSim」です。Application Builder を活用し、AltaSim 社は使いやすく、シミュレーションの専門家でなくともあらゆるユーザーが複雑なエンジニアリング解析を実行可能なインターフェースを生み出しました。Application Builder の中心をなす Form Editor と Method Editor を使えば、アプリケーションのユーザー・インターフェースに Form オブジェクトを手軽に追加し、ユーザー入力値に応じて実行される Java® コードを用いてカスタム

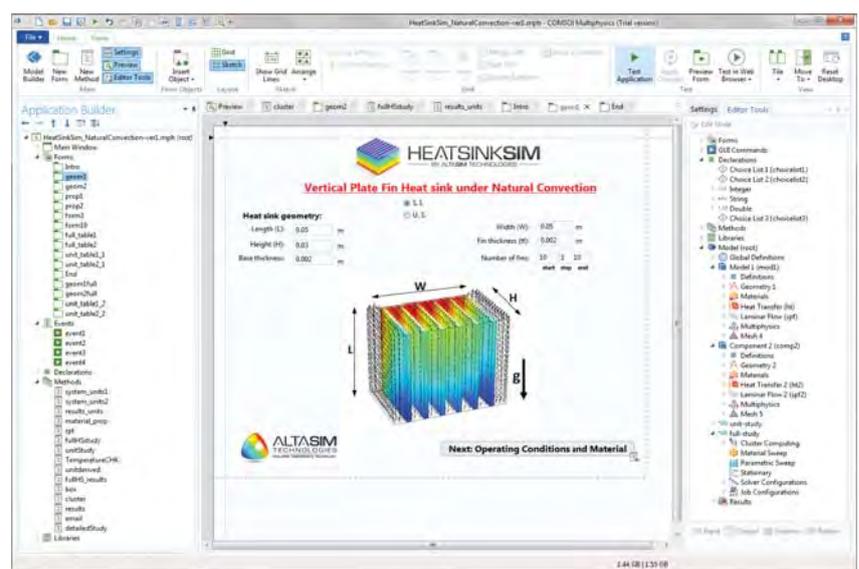


図 3. Application Builder を立ち上げた COMSOL Desktop の画面。Form Editor と Method Editor を使って、マルチフィジクスモデルに基づいたシミュレーションアプリケーションを設計する。

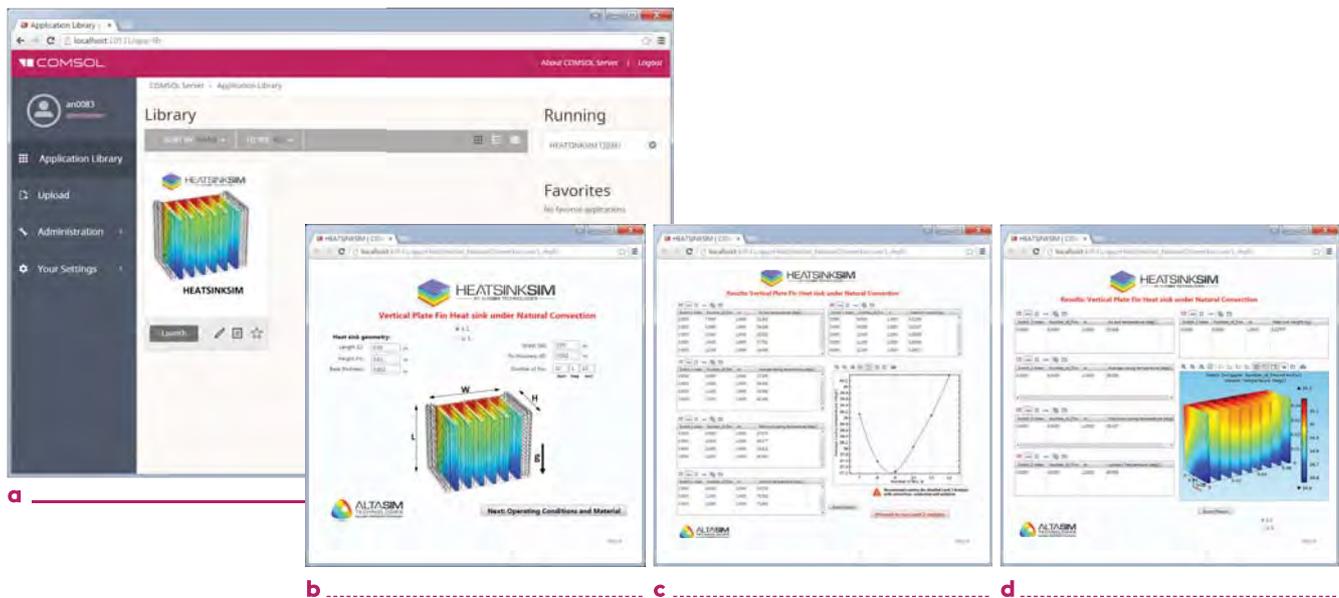


図 4. COMSOL Server™製品にはブラウザからログインする。別のタブ又はウィンドウで HeatSinkSim を立ち上げ (a)、シミュレーションアプリケーション (b) から、ジオメトリ、材料、動作条件を設定する。HeatSinkSim は 2 段階の解析を行い、レベル 1 の結果 (c) 次第でレベル 2 の解析が推奨され、レベル 2 ではフル 3D で共役熱伝導が解析される (d)。

機能を追加することができます。

HeatSinkSim アプリケーションによる解析結果 (図 4) には、2 つの異なるレベルでの解析が可能であることが示されています。レベル 1 の熱伝導解析は共役熱伝導を解き、これには伝導、対流、放射を伴う流体流れが含まれます。結果は、温度対デザインパラメータ (ヒートシンク内のフィンの数など) の 1 次元の線グラフで示されます。レベル 2 は、より精度の高い 3 次元のソリューションへと導くさらに詳細な熱伝導シミュレーション解析で、処理時間が長くなります。最初のレベル 1 の解析の段階で温度がユーザーの規定した動作限界をクリアすると、HeatSinkSim がレベル 2 の解析をユーザーに勧めます。

シミュレーション主導のワークフローを計画するときには、最初のマルチフィジックスモデルの立ち上げと検証、そのモデルに基づいたシミュレーションアプリケーションの設計、そして最終的にアプリケーションを使った設計の評価と最適化を誰が実施するのかというロジスティクスの検討が重要です。マルチフィジックスモデルをベースとしたアプリケーションの製作が可能になると、そのアプリケーションを通して多くの人々がシミュレーションを実行することができ、ワークフローの計画立案

が容易になり柔軟性を持たせることができます。

「実際の規模や動作特性を踏まえ、実際に即した状況を予測し提示するシミュレーションアプリケーションを開発可能であることを認識すると、そのアプリケーションを活用できるかもしれない数多くの潜在的なユーザーにも目を向けることができます」と Crompton 氏は話しています。「現在計算機支援工学 (computer-aided engineering, CAE) ツールを使用しているのはたった 75 万人ですが、コンピュータアプリケーションの潜在的なユーザーとなる科学者や技術者は世界中に 8 千万人いると推定されます。」

シミュレーションアプリケーションは、時にワークフローのネックとなる全解析の実行とは別のところ、つまり、専門知識を要する新しいツールや機能の開発にシミュレーション専門家たちが時間を割くための手助けとなります。シミュレーシ

ョンに特化したスタッフがいらない又は置かない場合でも、モデルやアプリケーションの開発を AltaSim 社のような COMSOL Certified Consultants に外注する、あるいは既存のシミュレーションアプリケーション (HeatSinkSim はほんの一例です) へのアクセス権を購入するという選択肢があります。

シミュレーションアプリケーションを同僚が使えるようになることで、製品やプロセスの現実世界での性能を高精度のマルチフィジックスモデルを頼りに予測することが可能になります。理解を深め、プロトタイプにかかる時間とコストを削減することで、革新的なソリューションをいち早く市場に投入することが可能となるのです。

パワーエレクトロニクス用ヒートシンクの設計最適化の例においては、HeatSinkSim の使用が、安全な動作温度を維持し、その結果として製造活動の継続を実現させるためのシミュレーション能

「現在、CAE ツールのユーザーは 75 万人ですが、そこから生まれるアプリケーションの潜在的な利用者には、世界中の推定 8000 万人の科学者やエンジニアが含まれるでしょう。」

力の活用となり、競争での強みを提供してくれま

⇒ 配布と収益

シミュレーションアプリケーションにアクセスし実行する方法を提供することは、設計目標達成のためにアプリケーションの開発者やユーザーを決定するのと同じくらい重要です。COMSOL Server™によって、あなたの同僚や顧客は COMCOL Client やウェブブラウザからシミュレーションアプリケーションにいつでもアクセスできます。図 4a のウェブブラウザ画面には、COMSOL Server™にインストール済みの Application Library が表示されており、ここから HeatSinkSim を立ち上げることができます。AltaSim 社では、アプリケーションへのアクセスと機能設定の管理にこのダッシュボードを使っています。

COMSOL Server™は、標準的なラップトップやデスクトップコンピュータから最新鋭のスーパーコンピュータクラスまで、あらゆるハードウェアで使用するために設計された製品です。個別のニーズに見合うハードウェアを選ぶ際には、コスト、可用性、モデルの複雑度、希望する処理

時間、これらすべての検討が必要です。できる限り早く結果を得たい、けれどハードウェアの管理やセキュリティ面での懸念を背負いたくない、という場合には、スーパーコンピューティングセンタが魅力的な選択肢となるかもしれません。

AltaSim 社では、HeatSinkSim へのアクセスを提供するため、AweSim と連携しています。AweSim は、中小製造業者へのシミュレーション主導の設計能力の提供を通して経済競争力の強化を目指す組織です。AweSim の母体である Ohio Supercomputing Center (OSC) は、3 つの主要なシステムを稼働させています。HeatSinkSim は Oakley クラスタノードで動いており、このクラスタは並列計算のために 8,300 コア以上を持つ HP Intel Xeon マシンです。AweSim に HeatSinkSim の使用届を提出するだけで OSC のアカウントが提供され、自分のパソコンのウェブブラウザからリモートログインし、スーパーコンピュータクラス上で HeatSinkSim を動かすことができます。

AweSim の提供する配布手法により、ユーザーは HeatSinkSim をまず試用し、その後使用した機能と時間に応じて支払

いを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を開発することで、精度の高いマルチフィジックスモデリング機能へのアクセスを拡大することが可能になるだけでなく、アプリケーションへのアクセスを従量課金制とすることで、あなたの組織に新たな収益の流れをもたらすことも可能になります。

⇒ より良く柔軟な製品設計ワークフロー

AltaSim 社の HeatSinkSim は、設計目標を達成する一つのソリューションであると同時に、それ自体が経験豊富なシミュレーション専門家によって開発され検証された製品です。製品開発サイクルを通して、COMSOL Multiphysics® と COMSOL Server™が提供するマルチフィジックスモデリング、アプリケーション設計、配布機能を活用することで、シミュレーションをあらゆる人に届けることや、品質を高め、リスクとコストを低減するための柔軟性をワークフローに取り入れることが可能となり、また最良の製品を競争力のある期間で市場に届けることができます。❖

エクゼクティブサマリー

HeatSinkSim: インタフェースの向こう側

AltaSim Technologies では、熱設計の技術者に精度の高いツールを提供することを目指して、詳細な物理に基づくシミュレーションから数値計算アプリケーション開発を行っています。アプリケーションはカスタムインターフェースを備えており、ユーザーは設計パラメータや動作条件などを変更してマルチフィジックスな解析を実施することができます。HeatSinkSim はヒートシンクの設計がパワーエレクトロニクス部品内での放熱に与える影響を調査するアプリケーションで、開発プロセスの後段階で改善策に費やす時間を場合によっては数ヶ月の単位で短縮することが可能です。

AltaSim ではアプリケーションを一般的な接続と使用方法によるオンプレミスのワークステーション又はクラスターで使用するだけでなく、セキュアな接続を通じてホスティングされたパラレルコンピューティングリソース上で使用することも可能にしています。ユーザーによるさらなるカスタマイズも可能です。

アプリケーションベースのバーチャルプロトタイピングの利点

- 全社での一元的なアプローチ
- 設計者や技術者がアクセス可能な、専門的な数学的モデリングの知識
- 物理特性に基づく解析に根差した意思決定
- 高い費用対効果

アプリケーションの管理、開発、使用

- 管理者は COMSOL Server™を使ってアプリケーションを配備、配布、管理可能
- ユーザーは COMSOL Server™に接続し、ブラウザ又は COMSOL Client からアプリケーションにアクセスしてマルチフィジックスな解析を実行
- アプリケーションはクラスターコンピューティングに対応
- 24 時間いつでも世界中からアクセス可能



AltaSim Technologies 社の Principal & Cofounder である Jeff Crompton 氏

AltaSim のスタッフは、マルチフィジックスな数値解析やシミュレーションの開発、応用、活用において、100 年以上にわたる経験を共有しています。COMSOL Certified Consultants プログラムの創設メンバーでもある AltaSim は、COMSOL Multiphysics® に関する専門知識と、物理学、メカニクス、コンピュータサイエンス、現実世界での製造工程に関する根源的な知識を活用してこのソフトウェアの機能性を拡大する能力とを兼ね備えています。

数値シミュレーションを使用して ガスパイプラインの スクイズオフ（遮断）基準を改善

日々のガスパイプラインの保守点検作業に関連する課題を減らすため、米国ガス技術研究所 (GTI: Gas Technology Institute) はシミュレーション主導のエンジニアリングを使用し、米国材料試験協会 (ASTM) のスクイズオフ基準の見直しを提案します

執筆者 **BRIANNE COSTA** 氏

天然ガスの定期保守作業では、主要な道路を掘って丹念に調べることが必要なため、その道路を使用した運転手たちに複雑な回り道もしくは裏道の使用などを強要することもしばしばあります。しかしもしガスパイプラインの修理や取替作業が、より効率的で上記のような強要が少ないプロセスが可能だとしたらどうでしょうか。米国ガス技術研究所 (GTI) の天然ガス研究・開発・訓練主任は、より便利なパイプを作る目的で、ガスパイプラインのスクイズオフ（遮断）に関する長さの業界基準の研究を行っています。

⇒どれくらい近くでスクイズオフ（遮断）が可能か

イリノイ州に拠点を置く GTI は、最先端エネルギーや天然ガス技術に取り組む研究・開発組織です。この研究機関の一つが、ポリエチレン (PE) 製ガスパイプラインのスクイズオフの距離の研究を行っています。スクイズオフは、ガスの流れを完全に遮断するためにパイプを圧縮する単純な作業のように見えます (図 1 参照)。この仕組みは、保守点検を行うために一般的に行われる方法であり、全システムを停止することなく、パイプの接合部分を交換することが出来ます。

スクイズオフの作業後、パイプはほぼ元の形に戻り、ガスの流れは復旧します。パイプラインの材料として使われるポリエチレンは、柔軟性があり変形や歪みに対して強く、腐食がない上、可溶性で均質な性質があり、厳しい環境条件に強いな

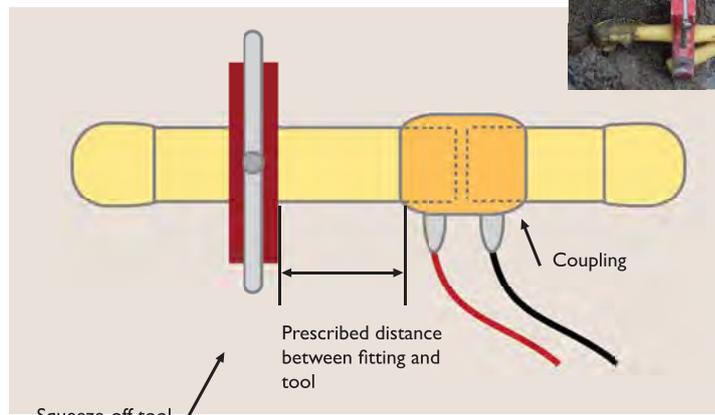


図 1. スクイズオフ作業を実行中のポリエチレン製ガスパイプライン

ど、その性質上利便性が高い素材です。

損傷や誤動作を避けるため、米国材料試験協会 (ASTM) などが定めた基準があり、スクイズオフ作業は、この基準を満たしていなければなりません。この基準の中には、パイプの継ぎ目とスクイズオフとの位置指定なども含まれています。スクイズオフは次のパイプの継ぎ目から

「(私たちは) 事前の実験によって証明された優れた結果を得るため、COMSOL ソフトウェアに実装されている有限要素法を信頼し使用しています。」

パイプ直径の 3 倍または 12 インチのどちらから大きいほうの距離を置かなければならないと、基準は定めています。

この規定は、パイプの歪みや破損を避けるために設定されたものでした。しかし、多くのガス会社は、この最小限必要とされる距離を短縮することに関心を

持っています。12 インチの距離というのは、多くのパイプラインに対して高い数値になっています (住居や商業施設で利用されるパイプのほとんどが直径 2.375 インチ以下です)。これは、直径の 3 倍は約 7 インチであるにもかかわらず、スクイズオフは 12 インチ以上の距離を置いて行われなければならないことを意味

しています。こうした小さい直径のパイプに対する長い距離の要求は、より深く掘ること、別の経路に変更することが必要となり

り、時間とコストがかかることになります。

天然ガス供給企業の開発パートナーである米国運用技術開発 (OTD: Operations Technology Development) から資金援助を受け、GTI の研究者の Oren Lever 氏と Ernest Lever 氏は、細いパイプでも本当に 12 インチの距離が必要なのかど

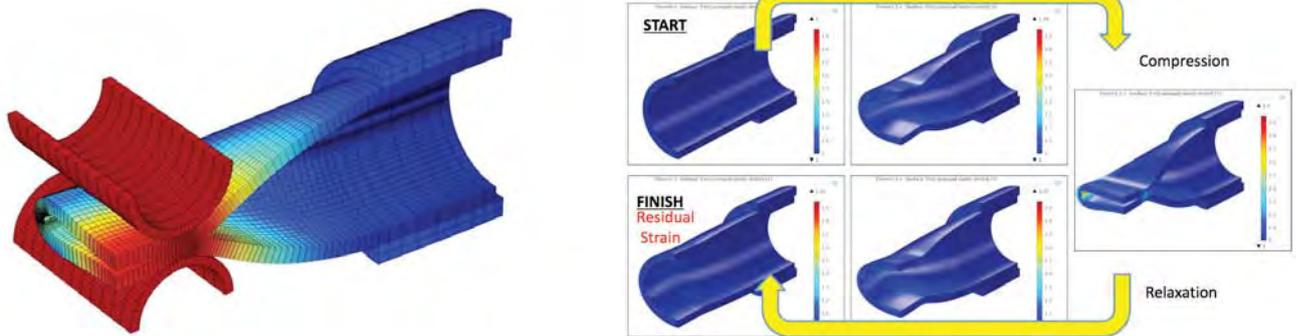


図2. パイプのスクイズオフの総変位（ミリ）を示すシミュレーション（左）およびスクイズオフ作業工程の全シミュレーション

うかを確認するためにより厳密な調査を行いました。彼らの目標は、歪みに関して業界水準のレベルを超えずに、また応力集中が増加せずに、パイプのスクイズオフ位置をどれだけ結合部分に近づけられるかを調べることでした。この解を得るために、このチームは、COMSOL Multiphysics® ソフトウェアの構造力学モデリング機能を活用しました。

⇒ ポリエステル製パイプの応力と歪み解析

GTI チームは、COMSOL の構造力学モジュールと非線形構造材料モジュールを使って、完全パラメータ化した時間依存モデルを作成しました。GTI の Oren Lever 氏が語るように、このチームは「事前の実験によって証明された優れた結果を得るため、COMSOL ソフトウェアに実装されている有限要素法を信頼し使用しています。」 彼らは、内部のパイプとパイプおよび外部のパイプとスクイズオフ装置のそれぞれの構造上の接点をモデル化するために、2通りの接触の機械的、数値的特性を定義しました。

彼らは、構造および非構造メッシュを統合し、ハイブリッドメッシュを生成するために、COMSOL ソフトウェアのメッシュ機能を利用しました。このソフトウェアに実装されているカスタム構成モデルとともに、このアプローチによりパイプの大きな変形を正確に分析することが可能となりました。図2で示すように、このシミュレーションでは、パイプの加圧、スクイズオフ、ホールド、リリース、復元などの

スクイズオフ作業の様々な段階が明確に示されています。

このシミュレーションでは、パイプが完全に絞込まれたときに現われる非常に大きな変形の分析を可能にするために、スクイズバー下のパイプメッシュには特別な注意を払う必要がありました（図3参照）。COMSOL のメッシュ機能やパラメトリック表現のおかげで、この特殊なメッシュをさまざまなパイプのサイズへも拡大することが出来ました。この部分の応力と歪みは、このプロジェクト内での重要課題ではありませんが、スクイズオフが、一般的なパイプの寿命年数に及ぼす影響という点で大変興味深いものです。COMSOL モデルにより、GTI チームは、さらなるスクイズオフの研究を行うことが可能になりました。

⇒ 高度非線形材料の共同研究

ポリエチレン特有の性質を把握するため、GTI は粘弾塑性モデルが必要でした。このため、彼らは、COMSOL Multiphysics® の選定材料モデルの実装サポートを COMSOL 認定コンサルタント Veryst Engineering 社に委託しました。Veryst Engineering 社の Nagi Elabbasi 氏の説明によると、彼らは、これを実行するため、最初にポリエチレンのような熱塑性として一般的に用いられている材料法則を測定するために必要な実験材料テストを選択し、次にこの材料パラメータをポリエチレンの応力および歪み反応に適合させ、最後に材料モデルのカスタム化に必要な常微分方程式 (ODEs) を COMSOL に実

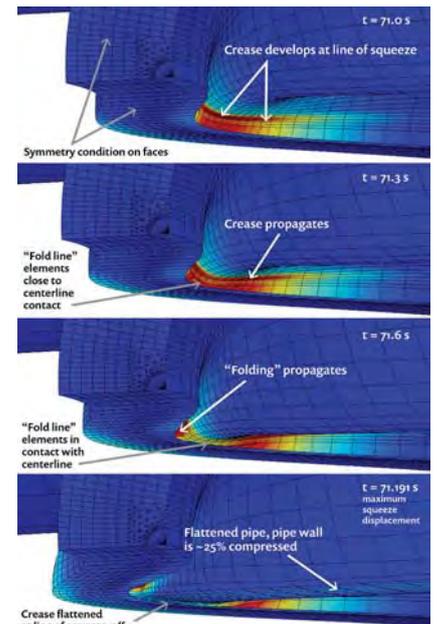


図3. 異なる時間ステップでのスクイズオフのライン上の変位を示す。最大スクイズ変位およびその直前でのスクイズ

装しました。

GTI により実施された材料試験では、中密度ポリエチレン (MDPE) パイプ材料が使用されました。この試験では、異なる温度、ひずみ速度、特に高い歪みなどの条件下での引張試験や圧力試験、負荷試験、除荷試験などを行いました（図4参照）。Veryst Engineering 社のチームはその中で、実験データと一致する材料パラメータの数値を発見しました。

校正を行うために Veryst Engineering 社は、彼らが開発した最適化ツール MCalibration を使用し、実験データとのベストな適合が得られるまでパラメータの変更を繰り返しました。COMSOL Multiphysics® に校正済みの材料則を導入し、検証するために、Veryst Engineering

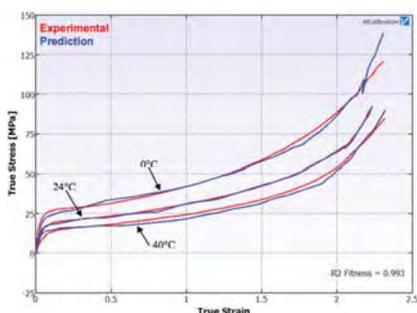
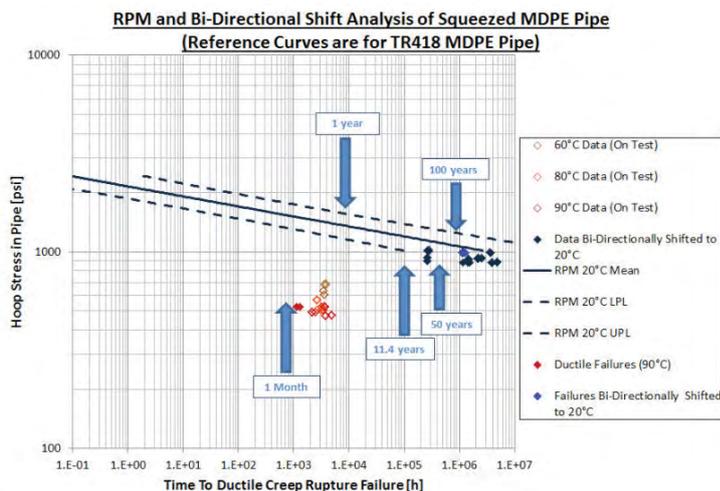


図 4. Veryst Engineering 社によって作成されたポリエチレン引張反応とモデル適合の例 (下) および米国ガス技術研究所 (GTI) によって実施されたポリエチレン製パイプのスクイズオフ加速寿命試験 (上)

社は、このソフトウェアの柔軟性を利用して、カスタム構造モデルを図示するために用いられる付加状態を示す常微分方程式 (ODEs) を加えました。

材料モデルが方程式で表示できない場合に有用なもう一つの選択肢が外部材料機能を活用することです。これは FORTRAN もしくは C 言語で記述された関数にアクセスし、共通ライブラリーにコンパイルします。この場合、外部材料は、応力と歪みの関係によって定義され、使用中の材料モデルで貢献している非弾性歪みを単純に戻すか、もしくは Veryst Engineering 社が提供する PolyUMod ライブラリーのような商用の外部材料ライブラリーに直接リンクします。

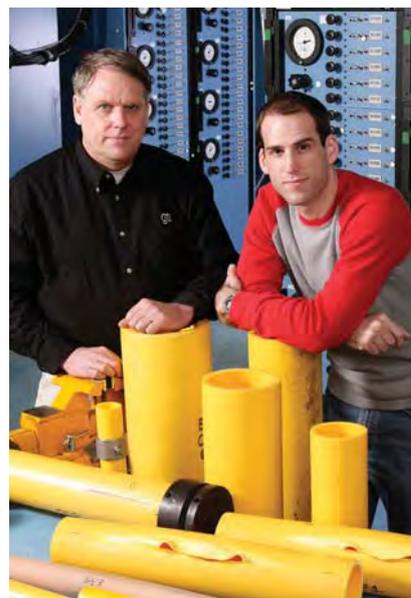
シミュレーションを利用して GTI は、直径の小さなパイプ (3.5 インチ以下) の場合、現在の業界認定の歪み基準以下となる、パイプの直径の 3 倍より近いスク

イズオフの距離でも歪みが生じないことを明らかにしました。

彼らは、これらの結果の正当性を立証するために、さらに加速寿命試験を利用しました (図 4 参照)。通常の稼働状態と比較してポリエチレン内部のクリープ速度を加速するのに十分な高温において、結合部カップリングから 2 インチおよび 4 インチの箇所でも試験を行いました。このプラスの追加試験を通じて GTI チームは、これらのパイプが平均 20°C の温度で稼働した場合、80 年の寿命を持つことを発見しました。この結果は、中密度ポリエチレン (MDPE) 製ガスパイプラインの 80 年寿命の業界標準と一致しています。

⇒GTI の将来の計画にとって効率性が重要

こうしたシミュレーションによる研究の結果、直径の小さな細いパイプのスクイズオフの位置は ASTM 基準で認められている現行の最短距離よりも、接続金具に近くても問題がないことを解析、確認できました。これが意味することは、住宅や商業用のガス設備で多く使用されている直径の小さなパイプについて、現在の最短 12 インチという距離の要求は再評価される可能性がある、ということです。彼らの研究の成果により、GTI は現在、ガスパイプライン保守点検作業をより低価格・より効率的・そしてパイプ損傷をおこすことなく実施可能な、新ガイド



R&D ディレクター Ernest Lever 氏 (左)、
主席エンジニア Oren Lever 氏 GTI にて

ラインを作成しています。

今後の研究計画に関しては、より正確に緩和効果を示すために、構造モデルを温度やクリープを含めた内容に拡張することを計画していると Lever 氏は語ります。その目標は、損傷拡大や破理解析を行い、強化締め具の導入など、さまざまな負荷状況によって生じるパイプへの影響を予測することです。

また GTI は、数値シミュレーションをあまり熟知していないエンジニアが、GTI の研究を利用できるようにするための研究も進めています。COMSOL ユーザーとして彼らは Application Builder を利用できます。このツールにより Lever 氏のようなシミュレーションの専門家はユーザーフレンドリーなインターフェース上で COMSOL モデルを完成させることが可能になります。これにより、この分野に関連するエンジニアや保守点検作業員たちが通常業務とは異なる状況下において自らの選択肢に疑問を持つ必要がないことを意味しています。その一方で、シミュレーションの専門家は、時間を節約し、新しいプロジェクトに専念できます。今のところ GTI は、天然ガスとエネルギー革新の研究開発に取り組んでいます。❖

疎水性メッシュを使用した流出石油の清掃

近年の流出石油の除去および封じ込め方法では、ほとんどの場合で費用がかかり、成功例も限られています。Amphos 21 のエンジニア達は、疎水性メッシュを使用した新たな清掃技術のテストを実践するために数値計算シミュレーションアプリケーションを考案しました。

執筆者 LEXI CARVER 氏

流 出石油は緊急事態であり予測不可能という点で大変悪名高く、水域環境と海洋生物に大きなダメージを与えることでも有名です。流出した油が長期的な災難を引き起こす前に早急に封じ込めなければなりません。流出した油の封じ込め及び回収技術としては、流出油の回収用ブームとスキマーが迅速に対応可能ですが、しかしこれだけでは、完全にその問題を解決することはできません。

ブームは広範囲に広がる石油の拡散を食い止める際に使用されます。そうすることで大きな影響を受けやすい海岸線にまで石油が到着することを未然に防ぐことが出来ます。ある設計では、油除去を目的として石油を吸収したり、その一方で、石油の清掃や除去時にすくい取るスキミングの技術も使用されました。他には、水面上での石油の焼き払いもありますが、これは新たに別の汚染を作り出してしまいます。もしくは化学的分散剤を海水に混ぜ、油成分の分解を加速させる方法もあります。

これらの方法は有益な一方で、除去中に回収可能な石油はそんなに大量ではありませんし、唯一、この除去方法に効果がある場合は、事故現場に速やかに到着し除去を開始した場合になります。そうしなければ、大抵の石油は海底に沈んで

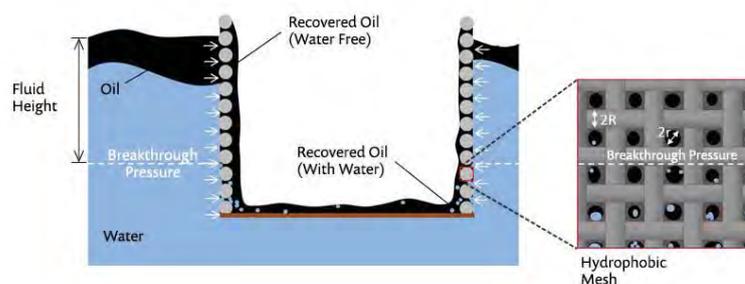


図 1. 疎水性メッシュ運用のコンセプト

まうからです。例えば、1989年にアラスカ沖で起こった Exxon Valdez の油の流出は、油のほとんどを回収することが出来ませんでした。

回収されたものはしばしば油と水が混ざっており回収後はその一部分しか活用できません。これは明らかに環境問題の1つであると共に、流出した全石油量を回収するためには、不要になった油を最初に回収した後に、もう一度ポンプでくみ上げる必要があります。

生態学的災害と浪費を避けるため、回収方法の見直しが必要だということを踏まえて、環境技術に特化しているコンサルタントグループである Amphos 21 は、疎水性メッシュを使用した数値解析モデルを開発しました。この方法は科学者と技術者により研究され続けている流出油回収のコンセプトです。彼らのゴールは、早くて使いやすく、そして環境にも優しい

ものを考え出すということです。

多孔質媒体として疎水性メッシュを概念化した後、彼らは数値計算シミュレーションとカスタムアプリケーションを開発し、商品開発、災害対応そして環境保護団体関連の人たちにこれを配布しました。シミュレーションアプリケーションを使用して、エンジニア、研究者そして回収担当者たちは、時間との戦いを含め流出油の拡散を回避するというシナリオでの適切な対応を追求し、性能の仮想試験を目指しています。

⇒ 新しい石油回収方法の可能性

Amphos 21 で研究されているメッシュは通常鉄もしくは銅で製造され、疎水性ポリマーでコーティングされており、水をはじく一方で油を吸着する仕組みになっています。それはフィルターのような仕組みになっており水は片方に残り、そして油

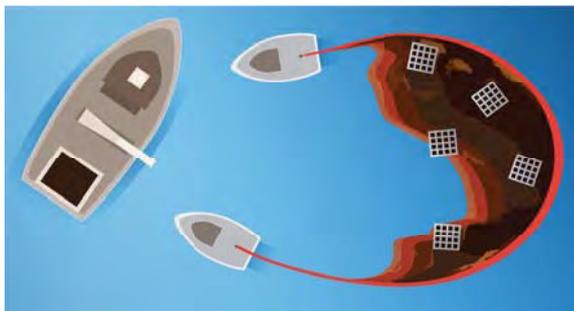


図 2. コンセプト：ボートによって引っ張られたブームが油を取り囲み、それと同時に疎水性メッシュが油を回収

は通り抜けるようになっていきます（図 1 参照）。メッシュ穴を通る油の流動率は水の深さ、油の性質（これは油がどこで回収されたかにより左右されます）、そして金属上のコーティングに関係しています。

“水と油の分離は、効率的な選択肢ということに加えて、回収処理で別費用がかかってしまう流出油のリサイクルプロセスを省略できる可能性があります” Amphos 21 のコンサルタント、Emilie Coene 氏は語ります。“連続運転で使用されるこれらのメッシュは、大変清潔で、素晴らしい潜在的な回収効率と処理能力を備えています。”

疎水性メッシュは、油の流出防止用としてデザインされた道具と並行して使用されます。例えば、流出油の周囲に設置したブーム、メッシュ、そして回収容器は直接流出油の中に設置され、油の回収を実施します（図 2 参照）。回収された油は一方の側面から他の側面に向け、メッシュの圧力を正確に調整しながら、一定間隔で容器からくみ上げられます。

“海中に設置され、油で満杯になると回収されて空になる大きなシリンダー型の容器（メッシュ）を想像してみてください

い。”とシニアコンサルタントでプロジェクトマネージャーの Orlando Silva 氏は語ります。“もしくは、継続的に油を回収することでできる抽出専用ポンプが備わった容器を設置することもできます。様々な稼働状況に合わせて行うことができます”と彼は続けました。“私たちは、流出油の回収装置のデザインを決定してい

る R&D のエンジニア達、研究を行っている環境関連企業、そして大規模な問題を迅速に解決しなくてはいけない石油会社に対して何かを提供したいと願っていました。”

疎水性メッシュの回収方法に関して 1 つの課題が浮上してきました。液体の高さです。ある程度の海の深さでは、静水圧は“突破口”レベルに達し、水がメッシュを貫入し、回収容器内に入り込んでしまいます。もし回収油の中の水がある一定量以上含まれていると、油を再度使用するための追加処理が必要となってしまいます。

メッシュの保存特性とは、油-水と水-空気の表面張力とメッシュ表面上の水と油の接触角の機能のことを指します。メッシュ表面のコーティングには撥水性素材が含まれていますが、ある水深に達するとそれが機能なくなってしまいます。メッシュを通る水と油の流れは、粘性、濃度、油の種類によって変化する表面張力などの液体特性、そしてメッシュの多孔性や浸透性などにより左右されます。

これらを考慮しつつ、Amphos 21 のチームはどのようにして、このような異な

る水質レベルと油タイプに対応するメッシュをデザインすればよいのでしょうか。

その答えは、あらゆる流出油の状況に対するメッシュの特性、その最適な組み合わせを探ることにあります。チームは最大限の油を回収可能な最良な設計を探すべく数多くのシミュレーションを実施しました。

⇒メッシュのデザインにより油の流動が受ける影響とは？

たとえば、ある程度おおまかなスタートラインが分かっていたとしても、今まで誰も到達したことがない問題の解決策を模索することは、まるで干し草の中の縫い針を探すようなものだ、と感じてしまいます。しかし数学的なモデリング技術は、そのプロセスを大いに単純化してくれます。

Amphos 21 社のパートナー及びモデリング・ソリューション・ディレクターである Coene 氏、Silva 氏、そして Jorge Molinero 氏は、COMSOL Multiphysics® ソフトウェアを使用し、疎水性メッシュのシミュレーションを実施しました。多種多様な設計メッシュが異なる水の深さでどのように機能するのかを分析し、メッシュの機能への影響要因を評価しました。

メッシュの機能性は、油の回収率および回収した油の純度により評価されます。

このチームのモデリング作業は、メッシュをコーティングしているポリマーの機能性と異なる水深でのメッシュの機能性をテストし、様々な油の種類におけるそれぞれの流量の分析を行いました。

それぞれのジオメトリが油の流動にどのように影響するかを解析するため、メッシュワイヤの半径、メッシュ穴のサイズそして間隔についてパラメータ化を実践し

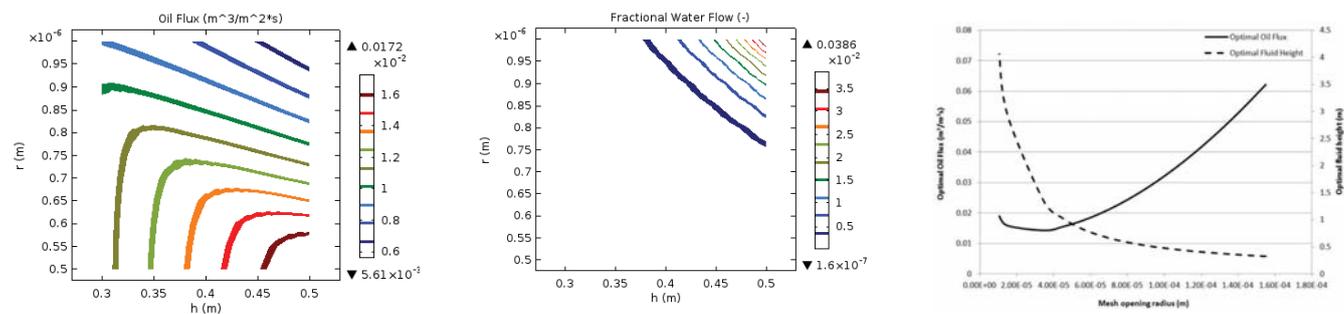


図 3. COMSOL® ソフトウェアの結果のグラフ。メッシュを通過した油の流動のようす（左）水のフラクショナルフロー（中央）これらの結果はワイヤの半径や水深により異なる数値を示す。水深、細孔の半径と油の流動との関係を示す細孔解析（右）

ました。COMSOL®ソフトウェアを使用し、水と油の流れによって作られる二相流の連成多孔質媒体としてメッシュを概念化しました。その後 Coene 氏、Molinero 氏、そして Silva 氏は、油飽和率レベル、水と油それぞれの流動率、メッシュを通過した油と水の割合を算出することが出来ました。(図 3、左と中央参照) “これらの結果は、ある特定の奥行きで使用するメッシュの細孔の半径サイズを確定する際に大変重要となりました” と Molinero 氏はコメントします。

最適な油の流動と最適な水深の相互関係を研究した後、彼らは細孔解析を実践するため、最大の水の割合—油と水の混合水で油処理が不要となる最大水量—を基にそのモデリングを活用しました(図 3 右、参照)。

“そのモデル結果を用いて、細孔サイズが異なるそれぞれのメッシュについて、理想的な油の純度になるための油の流動と最大の水深データを得ることが出来ます” と Coene 氏は語ります。“例えば、少なくとも水深 50cm で最大 1% の水の混合率のメッシュにて作業希望と設定します。すると、そのためのメッシュの細孔半径サイズが表示されます。”

⇒ 設計機能を提供するシミュレーションアプリケーション

COMSOL ソフトウェアの 1 つの特徴は、モデル全体を共有することなくシミュレーション結果のみを配布可能だということです。“COMSOL Multiphysics® 内の Application Builder を使用して、モデル関連のカスタマイズされたユーザー・インターフェースを作成しました。” と Silva 氏は説明しました。“シミュレートアプリケーションを使用して、ユーザーのみな

「COMSOL モデリングとカスタマイズされた構築アプリケーションを使用し、私たちは流出油の新しい回収方法を見つけ進歩し続けています。」

—AMPHOS 21、パートナー&モデリングソリューションディレクター、JORGE MOLINERO 氏

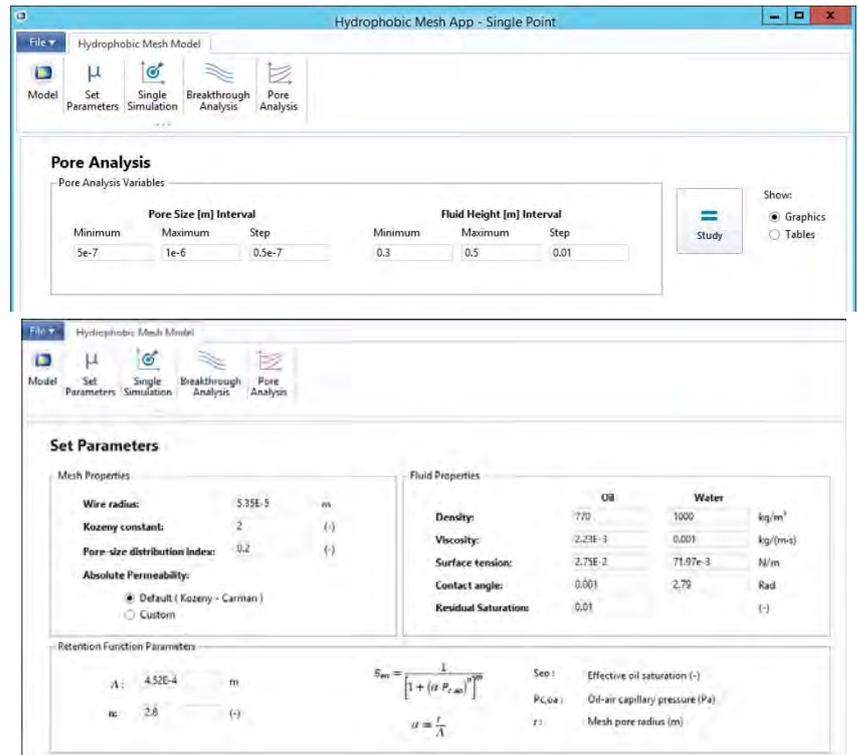


図 4. Amphos 21 の疎水性メッシュのアプリケーションの画面。細孔分析のインプットデータ(上)、メッシュおよび流量条件(下)を示す。

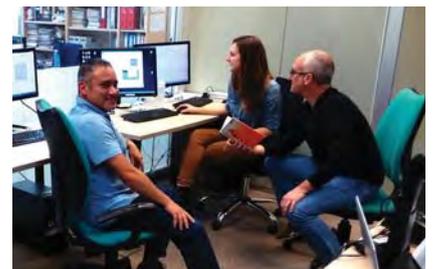
さんにシミュレーション結果を配布することは可能ですが、モデル全ての配布は行いません。企業側はこれらのアプリケーションを使用することで検査回数や検査費用を削減することが出来ます。メッシュの小断面をシミュレーションし、彼らが必要としている設計用にスケールを変更することも可能です。これにより、疎水性メッシュの設計は確実に改善、向上されることでしょう。”

ユーザーたちは、Amphos 21 のアプリケーション(図 4 参照)を使用し、メッシュや流動条件を変更することにより、メッシュの性能の予測や使用状況上での設計の質を素早くチェックすることが出来ます。ユーザーは、選択設定した最大の水の割合をベースにして、ある特定の水深で使用する最適なメッシュの細孔サイズや水深域をわずか 30 秒未満で解析することが出来ます。

アプリケーションでは異なるメッシュ条件を計算することが出来ます。例えば、絶対浸透率や破過圧力に関連する他の数値など、様々な状況下でのニーズに合致する理想的な設計選択をサポートしてくれます。

“研究開発部、環境グループ、そしてこの問題解決に取り組んでいる全ての人たちにとって、これは大変魅力的な事だと私たちは信じています” と Molinero 氏は語ります。“COMSOL モデリングとカスタマイズしたアプリケーションを使用し、私たちは流出油の新しい回収方法を見つけ進歩し続けています。”

今後は、特定の状況下で理想的なメッシュを設計するため、大規模な疎水性メッシュモデルを使用可能なエンジニア達にそのアプリケーションを配布していく予定です。そして究極的には、リアルタイムに業務に役立つ新しいツールを投入する予定です。❖



シミュレーションアプリケーションを使用中の Amphos 21 チーム。左から Orlando Silva 氏、Emilie Coene 氏、Jorge Molinero 氏

振動、騒音、そして轟音

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

執筆者 JENNIFER HAND 氏

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

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

⇒ ビル内での低周波音波

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

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

—NGI, FINN LØVHOLT 氏

“空気中では、高周波音よりも低周波音の吸収が少ないため、長距離を進むことができます。ビルの外部からビルの内部への音の伝搬はさらに顕著なものになります。私たちは、可聴値で一体何が起きているのか、大変興味を持ちました”と Løvholt 氏は説明しました。“私たちは、外部からの音がどのようにビルに作用し、人々が感知する振動をどのように作り出すのかを理解したいと思います。それにより、私たちは振動を防ぐ対策の助言や、人々を不快にする要因を考慮する必要性を認識し標準的な値の策定を提案することができるかもしれません。”

⇒ 音波の広がりをシミュレーション

Løvholt 氏と彼の同僚たちはコンピュータモデルの作成を決めました。そして、低周波音波がビルに衝突し、浸透していくメカニズムを細かくひも解くことを実現しました。彼らは COMSOL Multiphysics® ソフトウェアを使用して、ラボの実験設定と厳密に酷似された、壁で分離された木造建造物の 2 つの部屋をシミュレーションしました(図 1 上 参照)。モデル内では大音量のスピー

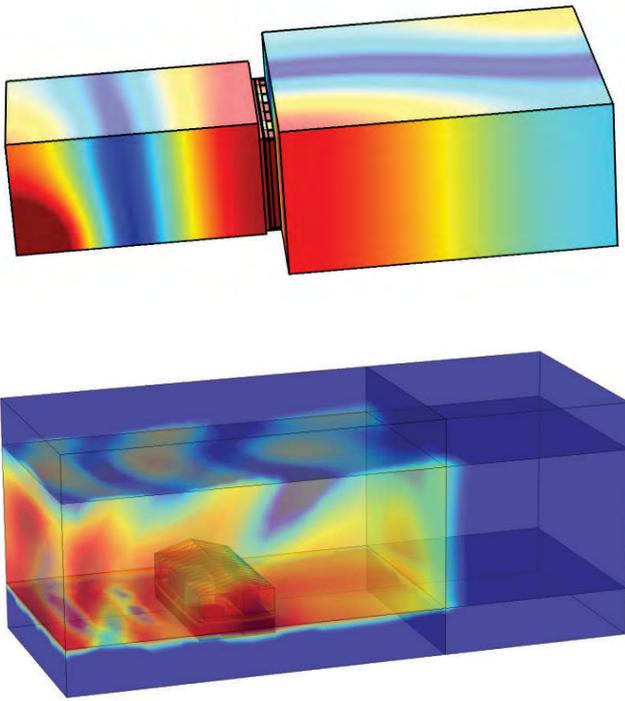


図 1. 上：音圧シミュレーションのため壁によって 2 部屋に分割された実験室。左の部屋に大音量スピーカーが設置されています。シミュレーションにより、各部屋の音響共振が遮音に影響を与えていることを示します。下：ビルの外部、四方の壁面、および内部から発生している低周波音のシミュレーション。両ケースとも、各色は壁と室内の音圧による変位量を示している。

カーを 1 つの部屋に設置し、もう 1 つの部屋にはマイクを設置しました。そして音圧レベルと振動をモニタするために建造物の周りに様々なプローブを設置しました。鉄のフレーム、壁内の空気腔やスタッド、窓、合板シート、石膏ボードなどを含む全ての構成要素は注意深くモデル化されました。“それぞれの要素は音波の波長と圧力分布に応じて共鳴します。例えば、スピーカーの部屋が高圧で、マイクの部屋が低圧の場合、壁の共鳴はその長さ、厚みそして硬さによって左右されます”と Løvholt 氏は説明します。

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

NGI チームは、木造建造物の 2 つの部屋の低周波音の伝達のシミュレーションのデータをラボでの検査と検証しました。主に

測定を実施した項目と量は定壁の動きと音圧レベルで、その結果は COMSOL Multiphysics® のモデルと大変近い値になりました (図 2 参照)”と Løvholt 氏は説明します。“本物の壁の反応は大変明確で、モデルはその値をほぼ完璧に表示していました。これは見事な結果です。”

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

⇒ 物理的検査より早くそしてより低価格で

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

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

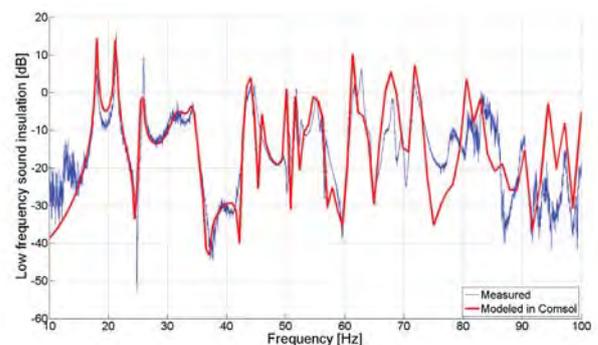


図 2. モデルでは、レベルおよび共鳴位置ともに、数デシベル以内で正確に示している。周波数の増加にともない、より小さな構造のモード数の動きが激しくなる。これは、測定値とモデル結果の差異の拡大傾向を示す。

カスタムアプリケーションによる原子力安全関連ソフトウェア品質保証 (SQA) 手順の自動化

原子力安全に関連する手順は適切な判断が求められる厳しいものです。小さな設計ミスが不測の事態に直結します。オークリッジ国立研究所 (ORNL) の研究者は、ソフトウェア品質保証 (SQA) 評価プロセスを自動化し、24 時間以内に結果を出すことのできるシミュレーションアプリを定義するために COMSOL を活用し研究を行っています。

執筆者 **NATALIA SWITALA** 氏

ソフトウェアの更新とは、あなたのもとに予告なしに訪れて驚かす古い友人のような感覚があります。あなたは興奮とともに取り乱すことになるでしょう。そしてこの更新に対して現在使用中のバージョンへの下位互換性、ソフトウェア品質保証 (SQA) を満たすことならびに全てがスムーズに進むことを要求するでしょう。もしこのソフトウェアが米国エネルギー省 (DOE) で運営される研究用原子炉のように高度に規制された環境下で使用されるソフトウェアの場合には、このシナリオはさらに重視されます。

⇒ SQA 手順は私たちの安全を守る

原子力エネルギーを採取する場合、原子炉設備に関連する原子力安全関連部品全てに適用される SQA 基準を含め、不具合や故障を防ぐために数多くの安全上の注意事項があります。

James D. (Jim) Freels 氏とオークリッジ国立研究所 (ORNL) の彼のチームが重点を置く研究課題は、高中性子束アイソトープ原子炉 (HFIR) 燃料を高濃縮ウラン (HEU) から低濃縮ウラン (LEU) へ転換することです (図 1 参照)。地球規模脅威削減イニシアチブ (Global Threat Reduction Initiative) に対応して、世界の多くの研究用原子炉が既に転換を終えています。HFIR の LEU 転換の設計上の主要な目標は、米国の凝縮物質研究用の高中性子束原子炉が最高速で存在し続けることで、それゆえに世界の中性子源市場で依然として競争力を維持し続けることができます。HFIR の独自の燃料、炉心設計、高出力密度は、燃料の転換にとっては複雑で困難な業務です。ORNL の研究者は、COMSOL Multiphysics® ソフトウェアを使って、燃料の変更が HFIR の性能および中性子散乱性にもたらす影響について研究しています。

DOE は SQA 標準の厳格な遵守を求めています。原子力安全関連業務を厳格に実施するため、ORNL により各手順が作成・運用されています。基準に従うために Jim 氏と ORNL チームは、彼らが利用している全てのソフトウェアに対して、最初の導入から最新の更新まで、プログラムの開発者の期待通りに作動しているかを検証しています。

⇒ 報告要件、安全第一

SQA 手順は、分析時に使用するソフトウェアが、意図した結果を出しているかどうかを確認する役割を担っています。「現場でのソフトウェアのインストールが開発者の意向どおりに行われている

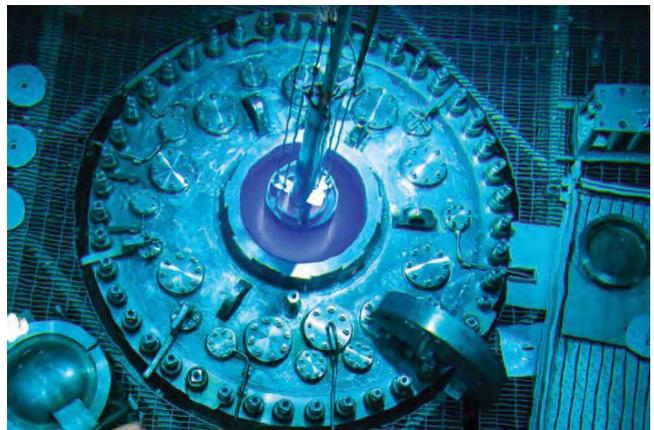
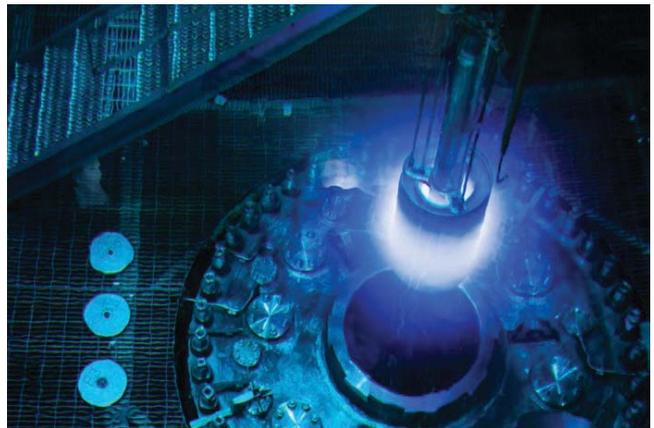


図 1. 燃料抜き取り作業進行中の HFIR の炉心

るかどうかを検証することは、とても時間のかかる作業ですが、原子力安全関連規則では必要不可欠なステップです」と ORNL 主任研究員の Jim 氏は説明します。ORNL は、SQA の取り組みを、検証 (Verification) と妥当性確認 (Validation) の 2 つのカテゴリーに分けています (V&V)。

妥当性確認 (Validation) 要件に関しては、対象となるプログラムの正確性を直接比較・評価するため、実験・検査・運用データを保有することが理想的状況として求められ、妥当性確認 (Validation) 要件は遵守が最も難しいと考えられています。複数のコードー特に原子力産業内における新しい COMSOL Multiphysics® のようなコードーにおいて、COMSOL

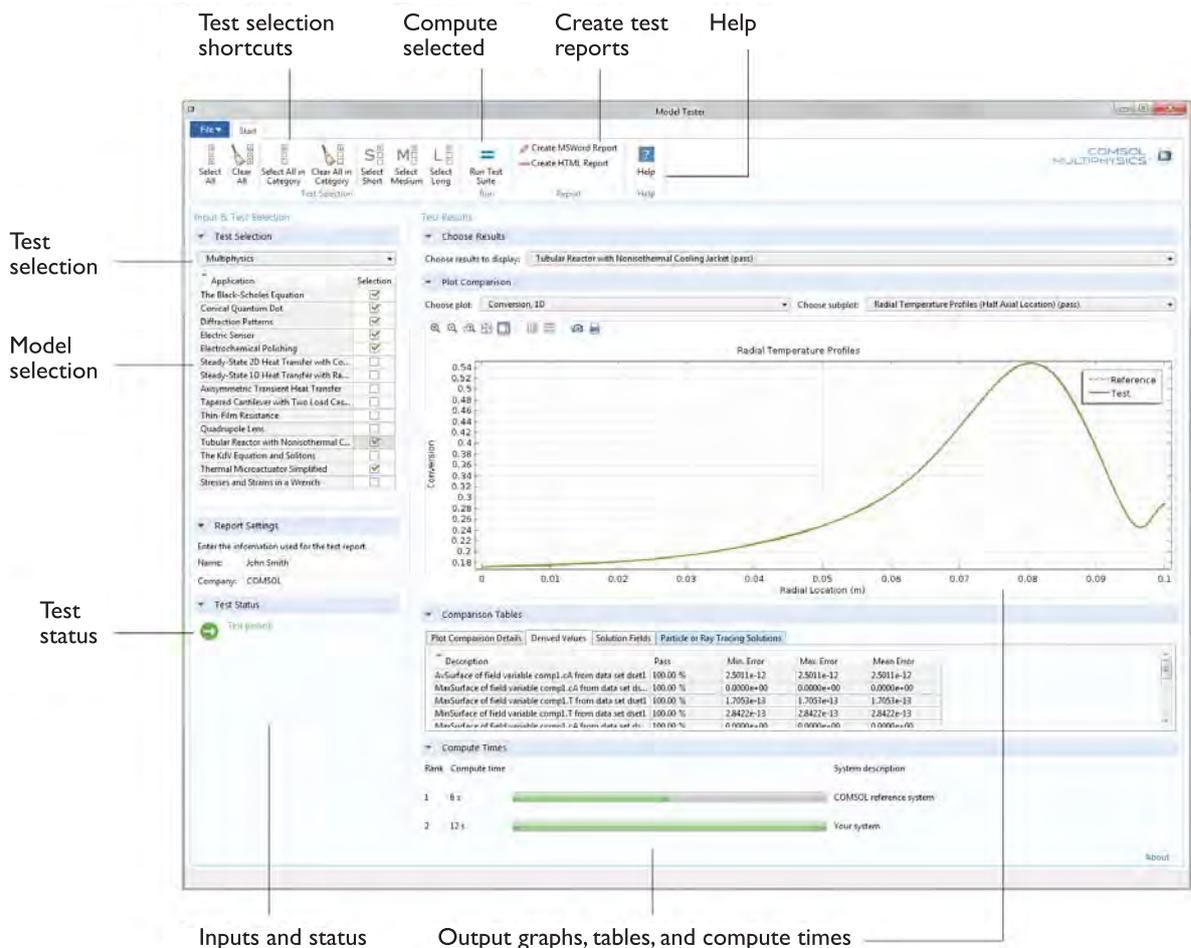


図 2. 一連のモデルを実行し、温度や電位などの結果を、製品ドキュメンテーション記載の数値と比較することができるモデルテストアプリケーションでは、一連のモデルを実装し、温度や電位などの結果を、製品説明書（および Application Library）に記載されている数値と比較。ユーザーは、テスト完了時、自動的に報告書を取得。

Multiphysics® を使用して ORNL チームが実践を試みる最良のアプローチとは、彼らの研究に直接関連する数多くのシミュレーションの解析結果が実証された単独の妥当性確認報告書を作成することです。また、この妥当性確認業務は、正式な原子力安全関連計算プロセスの一部にも含まれており、別の手順によって管理および規制されています。

検証（Verification）要件の遵守は、もう少し簡単ですが、適切なソフトウェアツールがないと非常に多くの時間がかかる恐れがあります。DOE はチームに対し、下記の 2 件を比較した報告書を作成するよう要求しています。1 つは ORNL により実装された COMSOL® ソフトウェアアプリケーションと COMSOL Multiphysics® の標準装備である Application Library を含む COMSOL® ソフトウェアアプリケーションとのワンセット、それと比較するものがソフトウェア資料内で提供されている結果になります。選択されたアプリケーション数は膨大であり、その結果の中に報告されたそれぞれの出力変数を実証することが求められており、この検証手続きを終えるためには膨大な人材と時間が必要になります。

Jim 氏は次のように述べています。「報告要件に従い、COMSOL の新バージョンの認可を得るための報告書の完成には 1～3 か

月かかりました。なぜならば、私たちは COMSOL により提供されたドキュメントと複数のシミュレーション結果を手作業にて比較しなければならなかったからです。」

⇒ SQA 手順の簡素化

COMSOL が Application Builder を導入し、Michael W. Crowell (Mike) 氏が原子力安全実験アナリストとして ORNL チームに加わり、SQA 手順の一部を自動化する機会を見出した時、この時、全てが変わりました。COMSOL Multiphysics を活用しているシミュレーションの専門家たちが、物理学ベースの解析を行う際、Application Builder を使用することにより、モデル内にカスタムユーザー・インターフェースを作成することが可能になりました。これは、このチーム全員が COMSOL モデルにアクセスできるようになり、COMSOL の特別なコーディング経験がなくても、専門家が行った作業結果の恩恵を得られるようになったことを意味しています。簡単にカスタムインターフェースを構築することができることに加えて、シミュレーションの専門家たちは、Java コードで書かれたメソッドを追加してさらに拡張することができます。これによりカスタムコマンドの実践と従来のプログラムとリンクさせることが可能となります。これこそまさに ORNL チームが必要と

しているものです。

この検証手順が研究者たちに要求していることは、該当するコンピュータに当該ソフトウェアが正確にインストールされていること、COMSOL Multiphysics®の開発者が意図した結果を実証していることなどです。Mike氏は、このチームが、異なるコンピュータ上で異なるオペレーティングシステムや数学ライブラリーを使用しても同じシミュレーション結果を得るかどうかをテストできるようなソリューションを模索中です。

「マシンアーキテクチャーやライブラリーの違いとともにマシンの精密さの制限のため、私たちはインクルードされた結果や現場での結果が最終的に小数点まで一致することを期待はしていま

「報告書の自動作成機能により、私たちは新たな時間を得ることができ、それと同時に高い正確性と信頼性も得ることができました。」

ーオークリッジ国立研究所 (ORNL) 主任プレリサーチ職員、JIM FREELS 氏

せんが、期待するに十分な値を得ることが出来ると思っています」とMike氏は説明します。これらの差異の考えらえる理由としては、最終的な結果に影響を及ぼす可能性があるソルバやメッシュのアルゴリズムを現場でどのように作り、コンパイルしたか、ということが挙げられます。

COMSOLが開発したApplication Builder「Model Tester」のリリース以前にMike氏は、COMSOLに搭載されているApplication Libraryからサブセットを選択し、同様の方法で検証プロセスを自動化するカスタムMATLAB®ソフトウェアを開発し、そして現場にて実装、展開し、結果を比較しました。この開発はボストンで開催されたCOMSOLカンファレンス2015の論文に発表されました。Mike氏が開発したカスタムMATLAB®ソフトウェアプログラムは、COMSOLにより提供されたモデルとドキュメンテーションの結果と現場での実際の結果を比較し、その差異を報告するとともに、許容範囲を超えたケースがあることが報告されました。Mike氏のこの新しいアプローチを使用してORNLは、数か月かかる検証期間を数日に短縮することができました。

Jim氏はCOMSOL、そしてDOEプロジェクトに携わるほかの施設の人たちとこのMike氏の成果を共有することを熱望しました。この知識の共有は、COMSOLのCTO（最高技術責任者）であるEd Fontes氏との話し合いにまで発展しました。内容は、Application Libraryに含まれ、すべての顧客が容易にCOMSOL Multiphysics®のインストールを検証することができるアプリケーション開発についてです。このような検証テストはCOMSOL Multiphysics®の開発においては毎晩数百のモデルでテストされていると、Edは述べました。彼は喜んでこのプロジェクトの開始に合意し、次のように述べました。「このアプリによって、顧客は一連のモデルを実装し、温度や電位などいくつかの物理特性の結果を、製品説明書（およびApplication Library）に記載されている数値と比較し、テストが完了した時点で自動的に報告書を手に入れることができるようになるでしょう」（図2参照）。

⇒ 報告書の自動化による生産性の向上

カスタマは、Multiphysicsライセンスに従いApplication Library内のモデルを利用することができます。それとともに、カスタマ自身のインストールテストに含めたいと思うモデルを選択する柔軟性も備えています。COMSOLシミュレーションが実行されると、テストアプリはどのモデルが成功し、どのモデルが失敗したかを伝え、失敗した場合は、失敗が発生した場所の数値を含め、自動的に報告書をユーザーに提示します。成功/失敗の基準は規定値に設定されていますが、カスタマニーズに合わせて変更することも可能です。顧客たちは、数値解法に独自の基準値を入力することにより、カスタマ自身のモデルのテストを拡張することもできます。

「顧客はこのアプリを活用して、前回のインストール時と比較し、予定されている製品アップデートを実行した際に新たなインストール範囲内での影響を明確に理解することが出来ます。例えば、もしCOMSOLがメッシュ・アルゴリズムあるいは乱流モデルを変更した場合、あなた自身のモデルから得られる結果およびCOMSOLのApplication Libraryから得られる結果が、この更新によって、どのような影響を受けるのかをチェックできます」とEdは語ります。

テストアプリの予備バージョンをテストする際、「全ての検証作業を約24時間以内に完了させることができた!」とMike氏は叫びました。

さらに、「報告書の自動作成機能により、私たちは新たな時間を確保することができ、それと同時に高い正確性と信頼性も得ることができました。この結果、私たちはHFIR燃料を高性能HEUからLEUへ変換するために必要とされる研究に全力を傾けることができるようになりました」とJim氏は付け加えました。❖



上：ボストンオークリッジ国立研究所の高速アイソトープ原子炉サイト 下：ORNLの実験用原子炉部のCOMSOLグループの中心メンバー、左から右へ：Christopher J. Hurt氏、Franklin G. Curtis氏、Prashant, K. Jain氏、Michael W. Crowell氏、James D. Freels氏、and Emilian L. Popov氏

人工の星—発電用高性能核融合装置の構造的完全性を評価する

研究開発のテストベッドに最大限の原子炉出力を組み込むコンパクトな核融合装置「Advanced Divertor Experiment」を設計したマサチューセッツ工科大学 Plasma Science and Fusion Center の研究者たちは、考案した設計の評価と最適化に数値シミュレーションを活用しています。

執筆者 Jennifer Segui 氏

核融合は太陽の中心部では自然発生しており、複数の水素原子核が核融合によってより大きなヘリウムの原子となるときに質量が失われ、莫大な放射エネルギーが放出されます。平均で約 9300 万マイル離れた地球上で私たちが太陽光として観測しているのがこのエネルギーです。

水素融合が、環境に優しく安全、かつ事実上無尽蔵のエネルギー源として実用化可能なことを示すことを第一の目的とした研究が、50 年以上にわたり世界的に行われてきました。マサチューセッツ工科大学 (MIT) で行われてきた研究は、非常に高い磁場を用いた融合という概念が主眼となっています。MIT の Plasma Science and Fusion Center (PSFC) では、実験、最先端の理論、そして数値シミュレーションを組み合わせることで、核融合エネルギーの一日も早い実用化を可能とする科学や技術の特定及び理解に活用しています。

Advanced Divertor eXperiment (ADX) は、トカマクと呼ばれる核融合実験装置であり、核融合炉内で発生すると考えられる熱流束、密度、温度を、短時間のプラズマ放電で発生させる目的で PSFC の研究者が考案しました (図 1)。

トカマク装置内では温度が摂氏 1 億 5000 万℃超にも達するため、電子は原

子核から分離し、ガス状の水素燃料から完全にイオン化した過熱状態のプラズマが生成されます。炉心となるプラズマはトロイダルと呼ばれるドーナツ型の真空容器に閉じ込められ、プラズマを高密度にし核衝突の可能性を高くするため、高圧力下で維持されます。外部の磁場が、太陽の中心部における高次重力場と同様にプラズマを閉じ込めて制御することで、核融合が起こります。

「ここ最近の高温超電導体の進歩により、高い磁場で稼働するトカマクを設計することができるようになり、プラズマの性能を原子炉レベルにまで高めることができました」と、PSFC の mechanical engineer である Jeffrey Doody 氏は話しています。「研究の焦点も、プラズマの性能の改良から、トカマク装置のサポート機構に変わってきました」。

Doody 氏と同僚たちは、原子炉レベルの熱流束と磁場を維持する ADX の構造を数値シミュレーションを使って設計しているところで、次の段階の核融合装置の開発を支援するため、出力排出装置やプラズマ-材料相互作用の検討に適したテストベッドにしようとしています。

⇒ プラズマの拡散に耐える

考案された ADX 真空容器の設計は、

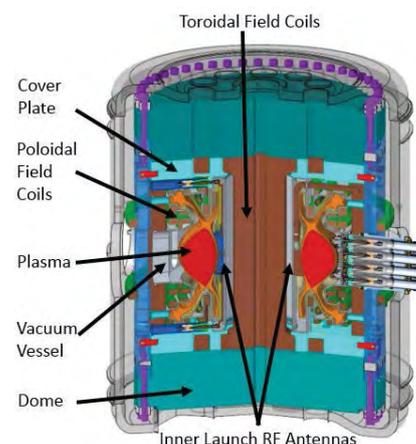


図 1. MIT PSFC で考案された ADX トカマクの概略図

1 つの円柱ではなく、5 つの独立した非対称形のシェルからなる点で革新的でした (図 2)。このモジュラーの設計により、磁場コイルを交換し、さまざまなダイバータの構成をテストすることが可能となります。ダイバータは、トカマク装置から核融合の灰を除去するための排出装置として稼働する部品です。プラズマを制御している磁場による閉じ込めをイオンがぐり抜けてしまったときには、ダイバータがこれらのイオンを集め容器外に導きます。

このモジュラー容器は、核融合の発生に必要な高度の熱流束と磁場だけでなく、プラズマ崩壊にも耐える必要があります。プラズマ崩壊は、プラズマが拡散

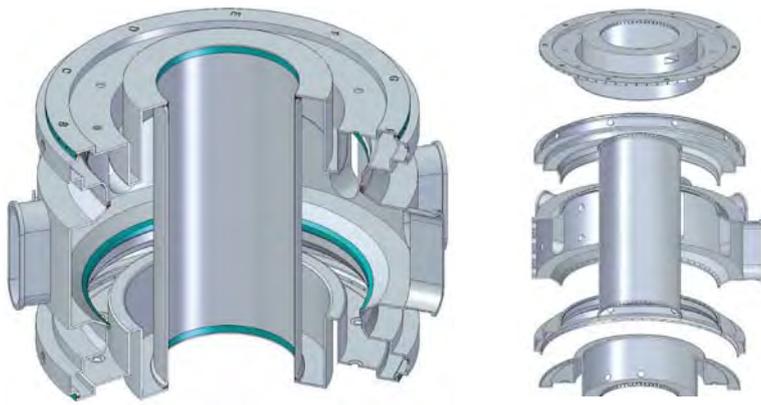


図 2. ADX の真空容器。ボルトで固定された 5 つの別々のシェルを持つ独特の設計が特徴。

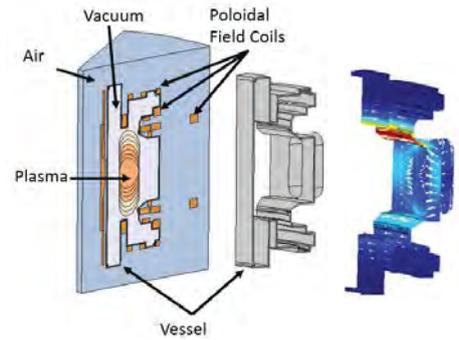


図 3. ADX の真空容器の壁における渦電流 (右) を説明するために使われたモデルのジオメトリ (左)

したときに生じ、真空容器のシェルにかかる負荷のもう一つの源となります。

「考案された ADX 容器の設計を評価するため、私たちは COMSOL Multiphysics® ソフトウェアを使って数値シミュレーションを実施し、プラズマ崩壊によって生じる磁場、渦電流、ローレンツ力の予測をしました」と Doody 氏。「その後、算出した負荷を、この容器のまた別の構造モデルに取り込んで、応力やたわみを予測し

ます。」図 3 は ADX の円環状対称性磁場モデルのジオメトリで、真空容器、プラズマ、そしてプラズマを平衡状態に保つために必要なポロイダル磁場コイルが示されています。

垂直方向プラズマ消滅 (vertical displacement event、VDE) と呼ばれるプラズマ崩壊の最悪のシナリオは、150 万アンペアの電流を帯びたプラズマが上方に向かって漂い、10 ミリ秒後に移動を

停止し、1 ミリ秒の間に全電流を失うというものです。崩壊するプラズマの周辺にある磁場が急激に変化することで、真空容器のシェル内に渦電流が発生します。渦電流が、ポロイダル磁場と、トカマク装置でプラズマを閉じ込めているより強力なトロイダル磁場とを横切るときに、容器に対してローレンツ力が働きます。

VDE においてはプラズマが容器の壁近くにまで接近するため渦電流の規模がより大きく、そのため VDE が ADX の計算モデルのテストケースとして選択されます。図 3 は数値モデルから算出された渦電流の分布を示しています。トカマクのトロイダル磁場によるローレンツ力を検討するために 2 つ目のモデルが開発されました。ADX の 1 つ目のモデルには、ポロイダル磁場のみが含まれていました。

⇒**ADX の真空容器を強化するために**

プラズマ崩壊により、ADX の壁、特に VDE の間は真空容器の上部及び下部のポケットの壁に対して、強力に働くローレンツ力が生成されます。図 4 に示した ADX 容器の構造モデルでは、最上部と最下部の境界が容器カバーと接しており、シミュレーションの間に移動させることができません。容器にかかる、ローレンツ力に応じた負荷は、関連した境界にかかります。このテストケースでは、150 万アンペアのプラズマ電流とトロイダル磁場の強度 6.5

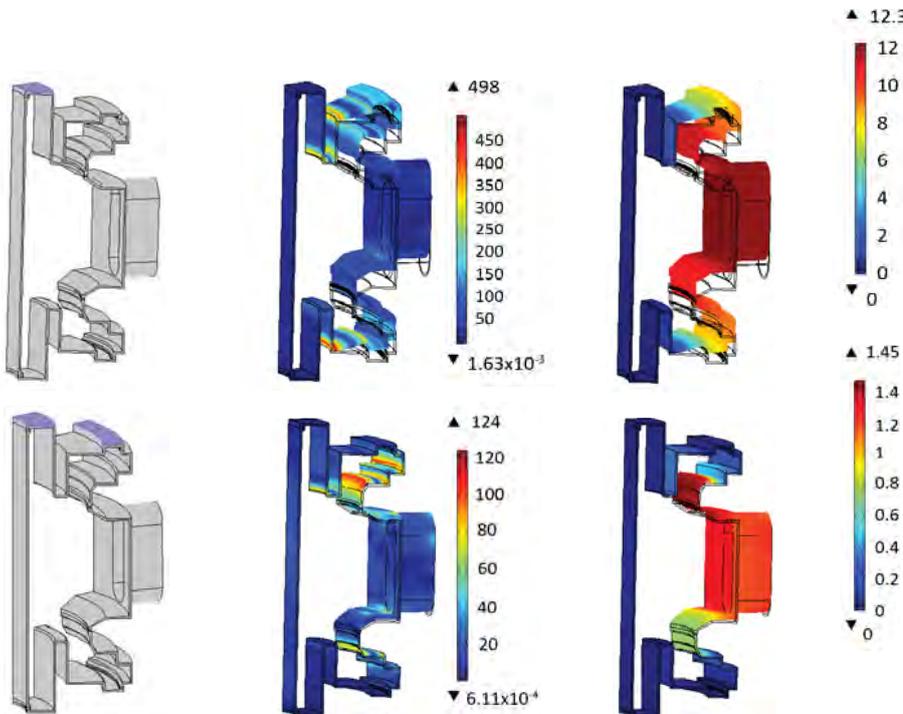


図 4. ADX の構造モデルのジオメトリ (上列)。紫色の境界は構造が固定されている箇所を示す。応力及びたわみのシミュレーションをした結果、この設計には構造の強化が必要であることが示された。下列のモデルジオメトリでは、ADX の設計に追加されたサポートブロックに応じて新たに固定された境界が示されている。

テスラという条件で稼働するトカマクでのローレンツ力を測定しました。

モジュラー容器の部品は Inconel 625 で作られています。Inconel 625 はニッケルをベースとした合金で、電流に対し高い耐性を持ち、渦電流を最小限に維持します。この素材の降伏応力は 460 MPa ですが、ADX の設計基準には、容器の壁には、降伏応力の 3 分の 2 の値である 306 MPa を超えるストレスがかかるべきではないと明示されています。

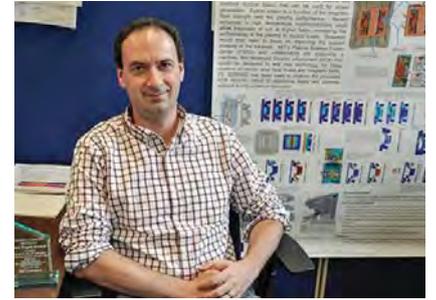
数値シミュレーションは、設計の修正なしでは VDE によるローレンツ力が降伏応力値に迫る大きな応力につながり、構造体に 1 センチメートルのたわみを生じさせることを示しました。真空容器の壁

を安定化させるため、図 4 の下の列に示した通り、もう一つ別の境界を固定させるサポートブロックが追加されました。サポートブロックを追加した設計をシミュレーションした結果、応力と壁のたわみが顕著に減少し、プラズマ崩壊を耐え抜く安定した真空装置が、ADX の稼働を支えることが示されました。

⇒ 核融合の次のステージ、そしてその先

シミュレーションに導かれた ADX の設計は、PSFC での安全で確実な稼働を確かなものにする手助けとなり、ADX は核融合炉に必要なダイバータの概念をテストするための研究開発プラットフォームと

して活用される核融合装置になることでしょう。❖



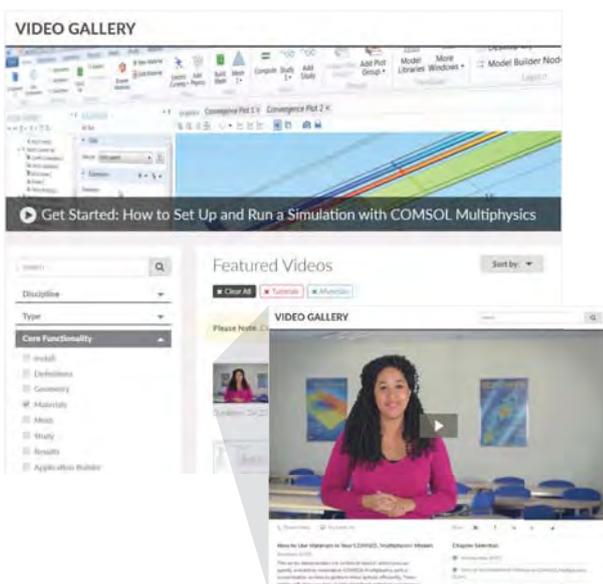
Jeffrey Doody 氏は MIT Plasma Science and Fusion Center の mechanical engineer。写真は、同氏がシミュレーションの業績に対して賞を授与された COMSOL Conference 2015 Boston より。

COMSOL ビデオギャラリー： インタラクティブ学習ツール

執筆者：**ANDREW GRIESMER**

チュートリアルシリーズ

チュートリアルビデオでは、ジオメトリの設定から結果の後処理まで、またその間にあるすべてのプロセスやソフトウェアのあらゆる使用方法について学ぶことが可能です。全くの初心者ユーザーが必要とする入門機能、シミュレーションスペシャリストにとって重要となる高度な上級技術など、あらゆる人たちのお役に立てるよう作成されています。各ビデオは COMSOL のテクニカルサポートチームの洞察を駆使して作成されています。



この COMSOL ビデオギャラリーには、200 本を超えるビデオに加え、毎週新しいビデオが追加されます。COMSOL Multiphysics® と COMSOL Server™ 製品のユーザーへのサポートに重点をおいていることはもちろんのこと、ユーザーの皆様の数値シミュレーションを最大限に生かせるようお手伝いいたします。

モデルデモンストレーション

皆さんは、モデリング内の物理現象について詳細を知りたいと興味を持ったことはありませんか？モデルデモンストレーションでは、シミュレーションに必要なすべてのステップをご紹介します。その中には、電磁気、構造力学、非等温流、音響、化学反応、MEMS、マイクロ流体、その他、幅広い分野をご紹介します。これらのビデオでは、COMSOL Multiphysics® 上でのモデルの作成方法の紹介、またそれを、COMSOL Server™ 製品との接続によりつながっているあらゆる人たちに対して、どのようにして使い勝手の良いインターフェース機能を備えたカスタムアプリケーションにすることができるのかをご紹介します。

キーノート

是非、多くのエンジニアやサイエンティストたちが、自分たちの産業においてどのようにして数値シミュレーションを活用しているのかを参考してみてください。COMSOL ユーザーは、毎年、世界中で開催される国際的なイベントにおいて、彼らの業務や COMSOL を使用した成功事例、革新的なデザインを展示しています。是非、みなさんの快適なデスク上でこの素晴らしいプレゼンテーションの数々をご覧ください。

COMSOL ビデオオンライン

是非、一度 COMSOL ビデオギャラリー comsol.com/videos にお越しいただき、ご覧ください。

カスタマイズした シミュレーションアプリケーションで、 産業界での革新を促す

University of Buffalo の研究グループは、カスタマイズしたシミュレーションアプリケーションを通してシミュレーションの専門知識を多くの業界に提供しています。エンドユーザーはこれらのアプリケーションを使うことで、基盤となる計算モデルの開発に必要な理解や専門知識がなくとも必要な解析を実施することができます。

執筆者 BRIDGET CUNNINGHAM 氏

今 日の産業界を見渡すと、自動車のデザインから家電までどこを見てもさまざまな業界を結びつける共通点があることに気付くことでしよう。それは、より革新的な技術の需要です。最新で最も優れた技術は、さらに進んだ特徴や機能を提供する、より複雑で難解な機器に次々と凌駕されています。

数値シミュレーションツールは、より精巧なデバイスの短期間での創出という挑戦において有効なソリューションであり、設計変更のたびに試作品を作成する必要がなく、現実に即した正確な結果が得られます。しかし、モデルの作成や修正をサポートするシミュレーション専門家のリソースがない組織もあります。このような時に役立つのがシミュレーションアプリケーションです。シミュレーションアプリケーションのカスタマイズされたユーザー・インターフェースは、物理ベースのシステムの数値シミュレーションを中核として構築されており、エンドユーザーは、シミュレーション専門家がエンドユーザー向けに設定した複数のフィジックスで連成解析を実施することができます。

Edward Furlani 氏は、The State University of New York, University at Buffalo (UB) の School of Engineering and Applied Sciences 及び Departments of Chemical and Biological Engineering and Electrical Engineering の教授であり、産業界での30年以上にわたるモデリングの経験から、数値シミュレーションをより多くの組織で活用してもらう可能性について予見していました。Furlani 氏が考えたのは、産業用の材料や装置を分析し設計する数

値モデルを共同で開発する大学のグループを組織するというものでした。現在では、カスタマイズしたシミュレーションアプリケーションを COMSOL Multiphysics® を使って創り出すことが可能になり、チームの専門知識を幅広い産業分野にまで広げる可能性が広がっています。

⇒ モデリングの専門知識を多くの産業に届ける

Furlani 氏にとって、マルチフィジックスモデリングは日々の業務の中で常に重要な要素でした。Eastman Kodak 社の研究者であった頃、Furlani 氏は、インクジェットシステムや多種多様なデジタルイメージング技術といった製品のために材料や装置の開発を支えるモデリングに従事していました。また、フォトニクスやマイクロ流体工学から、応用磁気学、マイクロシステム技術まで、産業界での幅広いニーズに応えるモデルの開発も行ってきました。現在教授として教鞭を執る UB では、Furlani 氏はマルチフィジックスソフトウェアを授業に取り入れ、コンピュータツールを用いたインタラクティブなやり取りの中で学生たちが技能を学び伸ばす手助けをしています。

Furlani 氏の UB のグループが扱う対象は数多くの学問領域にまたがり、産業界及び学術界での研究が反映されています。同氏に学ぶ大学院生たちは、極微少なものから大規模なものまでさまざまな機能を持つ製品の開発に活用できるマルチフィジックスの数値モデルを開発しています。Furlani 氏のグループは、産業界での革新と成長していく事への寄与を目標

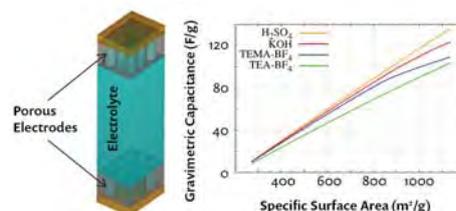


図 1. EDLC のジオメトリと静電容量予測のグラフ

に、COMSOL® ソフトウェアのモデルを数多く創り出してきました。

例えば、エネルギー貯蔵の分野では、電気二重層コンデンサ (electric double-layer capacitor, EDLC) のような電気化学ベースの装置がますます一般的になってきています。EDLC は静電容量が従来のコンデンサよりも顕著に大きいという利点を持ち、高速で複数回の充電/放電サイクルを必要とする新たな用途での使用可能性をもたらします。コンデンサ内部では、印加電圧に応じてイオンが遊離し反対に帯電した電極の表面に集まります。Furlani 氏のグループでは、UB の Gang Wu 教授と共同でモデルを開発し、EDLC 内部でのイオン輸送及びバランスのよい電荷蓄積、その際の静電容量の予測を可能とし、装置の挙動のより深い理解と設計の最適化を促進しました (図 1)。

この他、産業界では膜の技術に関心が高まっており、海水の脱塩から天然ガスの二酸化炭素除去まで幅広い分野で活用されています。高い選択性を持つ複合薄膜 (thin-film composite, TFC) の設計は、コストや全体的な設置面積を最小限に抑え、膜システムの用途拡大の鍵となります。UB のチームでは、膜の厚さ、選択性、有孔性が膜の性能に与える影響を確かめることのできる 3D モデルを開発しました。



図 2. EDLC の解析に用いたアプリケーションの一部を示すスクリーンショット

モデルは UB の Haiqing Lin 教授の実験により検証され、エネルギー効率の良いこれらのシステムのさらなる最適化を進め、新たな用途への道を切り開くためのより深い知見を与えてくれます。

Furlani 氏は、このような複雑なモデルを図 2 のような使いやすいアプリケーションにする取り組みを始めました。COMSOL Multiphysics® が備えた Application Builder を使うことで、Furlani 氏と学生たちは、企業ごとに異なるニーズに対応するためにカスタマイズしたシンプルなインターフェースを一つ一つのモデルについて構築し、より多くの関係者がシミュレーションテストを自ら実施することを可能にしました。「カスタマイズしたアプリケーションを使えば、基盤となるモデルを開発するための専門知識なしでも、COMSOL Multiphysics® の持つ能力をすべて自分の好きなように使うことができます」と Furlani 氏は話します。「測定が困難な詳細について検討することが可能となり、コストも時間もかかる試行錯誤の作業を削減することで、製品の開発ライフサイクルを大幅に促進できるのです。」

数値モデリングを通して経済の発展をさらに促進するため、チームでは COMSOL Server™ 製品を UB の Center for Computational Research (CCR) ~同大学の科学演算、ソフトウェア工学、並列コンピューティングを支えるスーパーコンピュータ施設~のコンピューティングクラス上で提供しています。これにより、アプリケーションを使うための高性能、高出力のコンピューティング環境が生み出

され、エンドユーザーはこの環境を介してクライアントまたはウェブブラウザから COMSOL Server™ に接続することができます。舞台裏にいるシミュレーションの専門家は、COMSOL Server™ を通してアプリケーションを簡単に管理・配信し、迅速にアップデートを行うことができます。

⇒ **カスタマイズしたシミュレーションアプリケーションの構築というビジネス**

Furlani 氏のグループは、新興企業の世界におけるシミュレーションの取組みにも携わっています。米国ニューヨーク州 Buffalo の新興企業 Vader Systems 社では、創立者の Zachary Vader 氏と Scott Vader 氏が液化金属ジェット印刷 (liquid metal jet printing, LMJP) と呼ばれる革新的なプロセスを開発しました。インクジェット印刷を模して設計されたこの技術は磁気流体力学に基づいており、固形金属フィードを液化し、溶けた金属の滴をパルス状の電磁場によって噴出させます。この技術は非常に複雑な 3D の金属体の製作を可能にします。同社が LMJP をベースとしたプリンターを商品化するにあたり、Furlani 氏のグループでは印刷の過程の理解をより深め、機能を向上させるための COMSOL アプリケーションを開発しました。

この他にも、Furlani 氏のグループが貢献した重要なプロジェクトには、Dr. Peter Paul が率いる Xerox 社の科学者たちとの

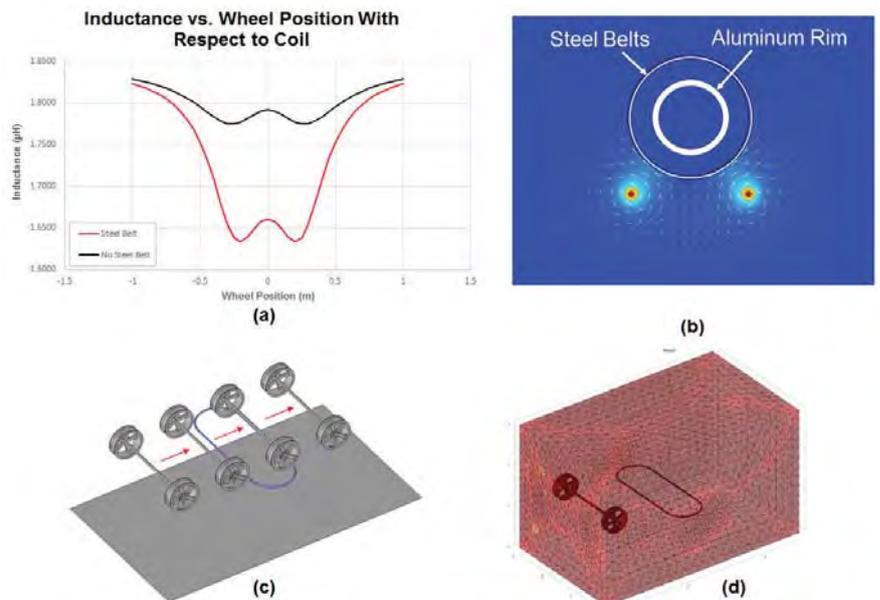


図 3. 移動中の自動車における誘導コイル結合のシミュレーション。この解析では、(a) 動いているタイヤの内蔵する鉄製ベルトがコイルのインダクタンスに与える影響、(b) タイヤが誘導コイル上を移動した時の磁場分布の検討、(c) は車軸の動き、(d) は車軸の検出のシミュレーションに用いた 3D の計算領域を示す。

共同で開発した、自動車交通事業で活用できる斬新な誘導ループ検出システムがあります。この遠隔検出技術により、道路交通の監視と管理に加え、道路交通データ収集のための新しい手法が考え出されました。

このシステムの性能を最大限まで引き出すには、車道に埋め込まれた検出コイルと、自動車の鉄や金属の部品（ホイールや車軸など）との間に発生する電磁結合の理解が必要です。チームでは、アルミニウム製ホイールと鉄製ベルト内蔵タイヤの位置・動きの作用として、コイルのインダクタンスがどのように変化する

「シミュレーションアプリケーションでは、ユーザー・インターフェースを簡単にカスタマイズでき、個々の企業が関心を持つさまざまなパラメータを含めることが可能になります。これは非常に有用な機能です」

—Edward Furlani 氏 University of Buffalo, Engineering School 教授

のかのシミュレーション研究を COMSOL Multiphysics® を使って実施しました(図3)。

このようなプロジェクトに取り組むうちに、いずれのプロジェクトでもより多くの人々に設計のワークフローに入ってもらふ必要性のあることがすぐに明らかになりました。基盤となるモデルは確立されており、チームでは、より多くの関係者が使用可能で、かつ個々のニーズを満たすインタラクティブツールを創ることを目指しました。ここでも、カスタマイズされたアプリケーションの作成が答えとなりました。「シミュレーションアプリケーションでは、ユーザー・インターフェースを簡単にカスタマイズでき、個々の企業が関心を持つさまざまなパラメータを含めることが可能になります。これは非常に有用な機能です」と Furlani 氏は話しています。

このようなカスタマイズ性と柔軟性が、組織における対外的・対内的なコミュニケーションのこれまでにない手軽さで

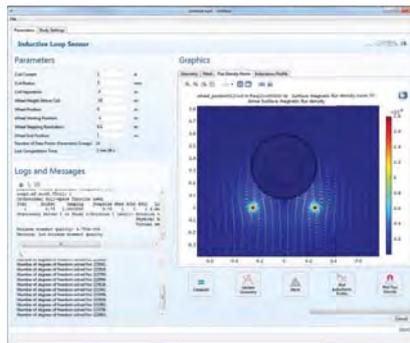


図 4. 基となる誘導コイル検出モデルをベースに、Xerox 社と共同開発したアプリケーションのスクリーンショット。

す。COMSOL Server™ をインストールすればアプリケーションへのアクセス権が提供され、エンドユーザーが COMSOL Multiphysics® を使う必要は実質的になくなります。シミュレーション能力を組織内のより多くの関係者が手にすることで、設計変更をより効率良く進め、また正確を期すことが可能となります。Vader Systems 社及び Xerox 社 (図 4 にアプリケーションを掲載) のチームは、より協同的で効率のよい製品開発サイクルの創造など、アプリケーションを使うメリットをすでに享受しています。

⇒ 学生から起業家まで

シミュレーションツールは、学生の技能向上に役立つ魅力的な手段でもありま

す。アプリケーションは基となるモデルの複雑さを見せない設計になっており、シミュレーションや COMSOL ソフトウェア初心者の学生にとって有用な手引きになります。学生は、個々の特徴や機能に慣れたところで、さらに深く掘り下げて新しいツールをどう使うのかを学ぶことができます。

アプリケーションは COMSOL ソフトウェアの入門編として役立つだけでなく、学生がアプリケーション作成のビジネス面に携わる機会をも提供します。Furlani 氏によれば、アプリケーションの設計はワンステップで完了するものではありません。「維持のための作業も必要です」と同氏は話しています。「重要なのは、顧客の側に立ってサポートを行い、彼らが必要とするときに支援を提供し関わることで」

この意味で、アプリケーション構築の技術と科学は、学生たちが顧客の質問や要望に適切なタイミングで応えることを学ぶことにより、ビジネススキルの養成にもつながっています。また、独自のアプリケーションを作成することで、学生たちはシミュレーションが牽引する設計という新しい波に順応し、より多くの自由、柔軟性、そして起業家精神への扉を開くことができるのです。❖

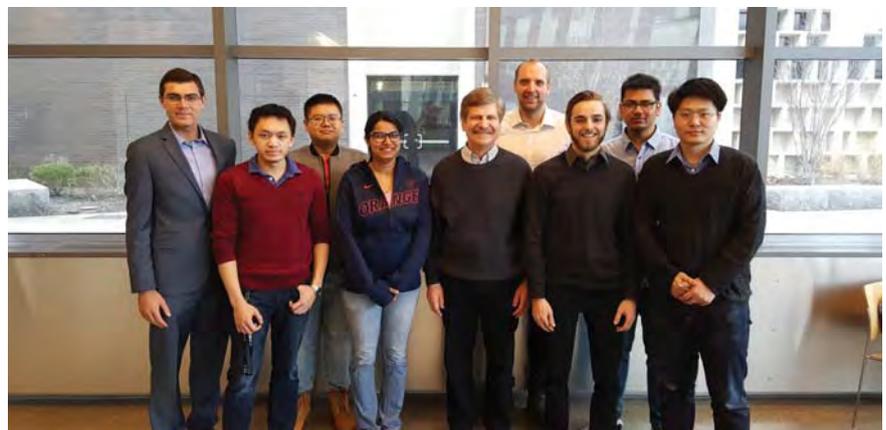


図 5. Furlani 氏のグループのメンバー。左から、Dante Iozzo 氏、Mike Tong 氏、Xiaozheng Xue 氏、Aditi Verma 氏、Edward P. Furlani 氏、Ioannis Karampelas 氏、Viktor Sukhotskiy 氏、Gouray Garg 氏、Kai Liu 氏。

マルチフィジックス解析で過去の遺産を保全

大学生とコンサルタントたちは、シミュレーション・アプリを利用して、構築環境を改善し、歴史的建造物や芸術品を保存するための共同研究を行っています。

執筆者 **GARY DAGSTINE** 氏



図 1. 左から右へ この画像は、広範囲にわたる地域から窓に使われる材料に至るまで、構築環境として重視すべきさまざまな規模の構造物を示す。

私 たち人類が創造したものには常に改善の余地があります。そのことが最も良く当てはまるものは構築環境であり、これは私たちの生活・仕事・遊びなど、人間が作り出した物理的な環境を表す言葉です。

この構築環境とは、私たちの生活に影響を及ぼし関わりを持つ巨大な都市空間から個々の建築物、公園、道路、社会生活基盤など全てを包括するものことです。それは必ずしも物理的な作用が働いているようには見えませんが、さまざまな規模で生じる熱伝導、気流、水分移動などの多種多様な物理法則に基づく作用の影響を常に受けています (図 1 参照)。

これらの作用の正確なモデル化やシミュレーション機能は、エネルギー効率、健康と安全、運用コスト、耐久性、特に歴史的遺産の保存などの多くの重要な分野で大きな改善につながります。

この業務に深くかかわっているのが、オランダに拠点を置くコンサルタント会社 CompuToolAble 社の設立者でありアイントホーフェン工科大学の准教授の Jos Van Schijndel 氏です。彼は、この大学で構築物理学の数学的モデリングを専門に研究しています。

「私に喜びとエネルギーを与えてくれるのは、最先端の研究を行うだけでなく、社会的な役割を担い、私の学生たちに刺激を与えてくれるプロジェクトに携わることです。私は、高度な数学

計算ツールの専門性や複雑な数値実験機能を顧客に提供し、革新的な設計を生み出し、その成果の最適化を実現するために、CompuToolAble 社を設立しました」と Van Schijndel 氏は述べています。

Van Schijndel 氏はコンサルタントおよび教授として、シミュレーションの専門家ではない顧客やまだモデリングやシミュレーションを習得最中の学生たちに対して、複雑な理論を活用しやすいものにする方法を考える必要がありました。COMSOL Multiphysics® ソフトウェアのユーザーとして彼は、COMSOL ソフトウェアモデル上で動き、簡単に理解ができるユーザー・インターフェース構築が可能な Application Builder のメリットを活用しました。この結果、彼は、シミュレーションの専門家として、他の企業顧客や他の部署の同僚と効率的に共同研究を行えるようになりました。

⇒ アプリは数値シミュレーションの活用を促進

Van Schijndel 氏は、彼の法人顧客に対して、COMSOL モデルから作成した特注のユーザー・インターフェースおよびアプリケーションを活用して、数値解析や解析性能を提供しています。これらのアプリを使用することで、シミュレーションソフトウェアをこれまで使ったことがないエンドユーザーあるいはモデル作成の技術的経験を持たないエンドユーザーたちも、彼らの特別なニーズに基づいた様々な設計変更の仮想テストを簡単に実行することが可能です。

大学でも、彼は同じソフトウェアを使い、学生たちにマルチフィジックスシミュレーションやアプリケーションの設計を教えています。

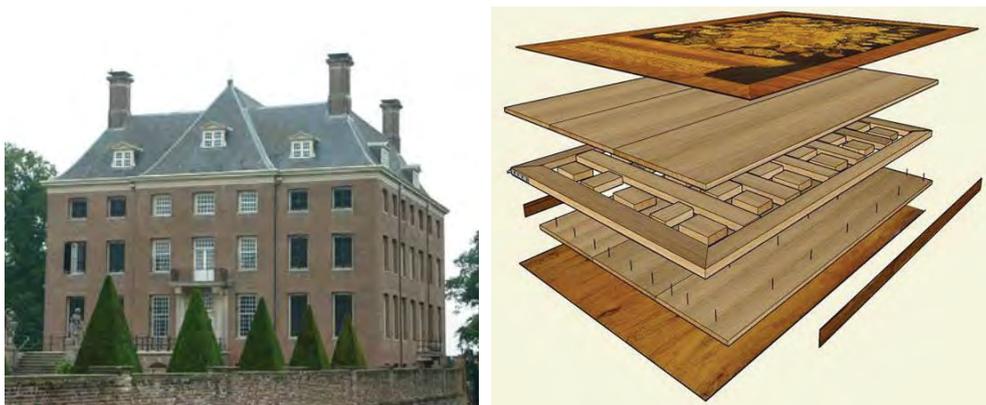


図 2. 左側のアメルンゲン城 (Amerongen Castle) は、時間とともに、熱と水分による応力と歪みの潜在的な損傷の影響にさらされる歴史的建造物の 1 つの事例。これは、建物自体と城に含まれる右側のキャビネットドアなどの貴重品が対象 (出典: アムステルダム国立美術館)。

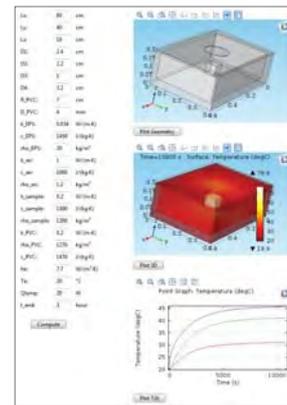


図 3. アプリのユーザーは、例えば異なるジオメトリパラメーターや材料特性など、さまざまな設計や動作シナリオを研究可能。

す。学生たちには、自分たちのモデルをゼロから作成する前に、COMSOL アプリを使って数値解析や物理特性システムの初歩を教えています。彼らがコンセプトやモデリング技術に十分慣れると、Application Builder を使用して彼ら自身のアプリを作成し、その知識や収集分析能力の研究を高めることができます。

「Application Builder は、私にとって、2 つの異なる側面できわめて重要です。大学での現在の課題は、学生たちが数学的モデリングに深く入り込む前に、彼らの創造性とアイデアを生かすように刺激を与えることです。しかし、今、私は、学生たちに探究させたいと考えている物理特性だけで、魅力的なシミュレーション・アプリを簡単に構築することができます。その結果、学生たちは、このアプリを利用する機会を得て、関連する物理特性を分析し、さまざまな変化が生じたときの効果を理解した後に、初めてより細かい研究に入ることができます。

「一方法人側には、物理特性の作用が製品に及ぼす影響を確認理解するために、数値シミュレーションの使用が必要な人たちがいますが、モデルを構築するための経験や知識は十分でないか自身でのモデル構築に興味ありません。そこで、私は Application Builder を使用して、最先端の数値モデルに基づいた特別なユーザー・インターフェースを作り、彼らが必要としているパラメーターのみを提供することができます。これによりエラー・ゼロも保証されます。それは、私たちは同じ基準点から作業を進めているからです」と Van Schijndel 氏は続けました。このアプリは、ウェブブラウザもしくは、ダウンロードが可能なカスタマはダウンロードのいずれかの方法から取得可能となり、そして COMSOL Server™製品に接続が可能となります (図 3 のアプリのトリミングされた画像例で示すように)。つまりこのアプリを利用したい人の誰もが使用できるように提供されています。

⇒ **マルチフィジックス解析は歴史的遺産の保存に寄与**

歴史的構築物およびそこに含まれる芸術品 (図 2 参照) の保存が必要になる場合、熱伝導、気流、水分移動の有害効果を抑制するために、それらの複合的影響を分析することが必要不可欠

です。温度や湿度の変動レベルは歴史的構築物や付属物に応力や歪みを拡大し、それは、反り、亀裂、寸法の変化などの損傷の形になって現れます。こうした損傷のプロセスの力学を理解し、このような損傷がどうして生じるのかをより良く理解することは、より効果的な保存方法につながります。

Van Schijndel 氏は、彼の同僚であり、モニュメントに関する物理学の准教授 Henk Schellen 氏と共同で歴史的構築物などの保存に関連した多くの COMSOL モデルを作成するとともに、その監視を行ってきました。例えば、博士課程の学生の 1 人である Zara Huijbregts 氏は、1 日の様々な時間帯において、窓から差し込む太陽光がどのように室内の床や壁を暖めるかをモデル化するために、COMSOL Multiphysics® のアドオンモジュールである伝熱モジュールを利用しました (図 4 参照)。

このシミュレーションは、建物の外壁を通過する伝導性熱伝達、対

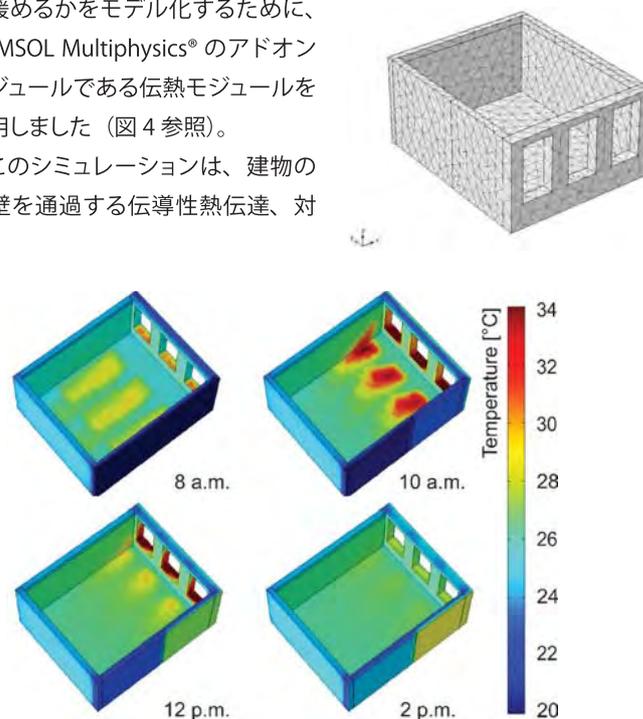


図 4. COMSOL ソフトウェアによる数値シミュレーション。異なる時間帯での部屋の床や壁の温度分布を示す。熱は、太陽が部屋を横切るときに、窓から差し込む太陽光から発生する。

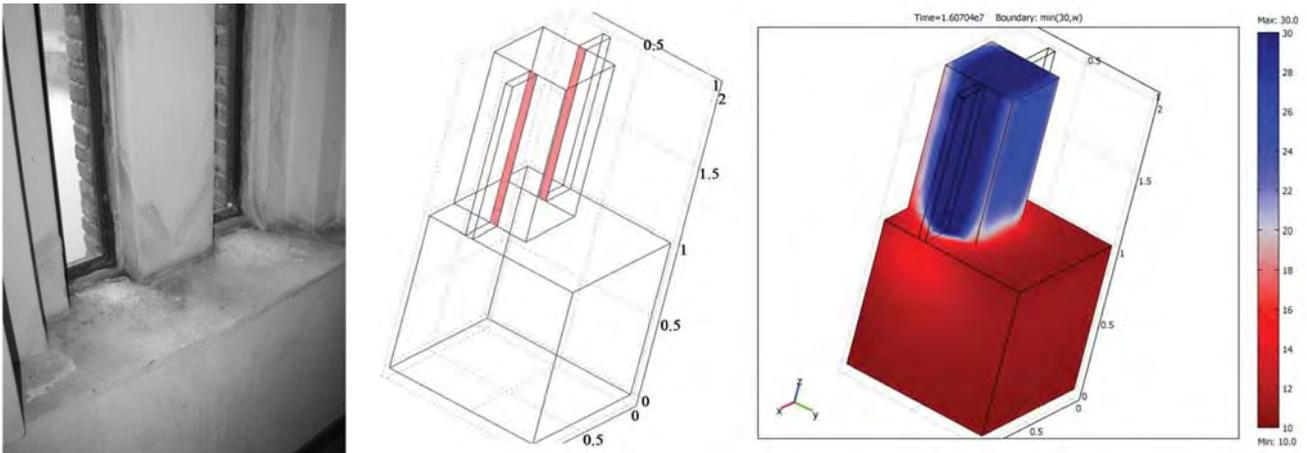


図 5. 上記 (左) に描かれたような損傷の原因となる水分移動を理解するため、Van Schijndel 氏は、壁を通過する熱と水分移動を正確に組み合わせた COMSOL モデル (右) を作成。

流熱伝達および室内空気の測定、輻射伝熱を兼ね備えたものです。このモデルには、室内の様々な表面や建物の外観（ファサード）が含まれており、室外シェードの日影による冷却効果も説明されています。

この結果では、さまざまな時間帯で、それぞれの壁の表面温度を予測し、傷つきやすい対象物を太陽光や熱による損傷から守るために、最適な設置位置を示しました。「このように正確な温度分布を知ることは極めて重要であり、それゆえに、例えば絵画などは、太陽光の熱の影響を受けないような場所にかけることができます」と Van Schijndel 氏は述べます。

水分による損傷は、壁、構築物、屋根、部屋の内装品などに損傷を及ぼすもうひとつの重要な問題です。歴史的建造物は時として、水分がどのようなルートで建物や部屋に入ってくるのか明確ではないため、Van Schijndel 氏は、COMSOL Multiphysics® を調査ツールとして使うことがあります。

「この研究では、様々な場所で相対湿度を測定し、マルチフィジックスシミュレーションを実装することにより、どのように水分が入ってくるかを推定することができます。高い相対湿度を示す場所は、どのように水分の物質移動が起きているのかを知る手掛かりになります。そして、熱は水分分布を促進するため、私たちはこの情報を熱伝導シミュレーションと連成しました」と彼は述べました。

Van Schijndel 氏は、窓際に明らかに可視される水漏れの損傷がある壁の水分移動に関する COMSOL モデルを開発しました。彼のモデルにより、水分がどこから発生しているのかを推測することが可能になりました (図 5 参照)。彼と学生たちは、さまざまな材料を使用して熱の逃げ道をモデル化し、どのように断熱の位置が建物の内側から外側まで熱伝導に影響しているかを分析し、どのように水分がコンクリートや石材、断熱材などの建物の材料を通過するのかを理解するために、この技術を活用しました (図 5 参照)。

温度と湿度が、歴史的な絵画などの貴重な物の応力や歪みの主なけん引役だということを考えると、これらをモデルで正確に

連成することができれば、潜在的な損傷の予測が可能となります。Van Schijndel 氏のモデルでは、湿度の相対変化だけでなく、壁や絵画のあらゆる場所の温度分布を計算することができます (図 6 参照)。

「歴史的建造物は、気候変動や都市化の進行などの要因により、これらの保全に対し前例のない脅威に直面しています。また、過去の遺産を保存することは社会的利益であっても歴史的建造物の保護に関する規則は厳しくはありませんでした。COMSOL のような高度なモデリングツールやシミュレーションツールを活用することができれば、こうした要請に役立つ重要なツールキットになります」と Van Schijndel 氏は述べました。❖

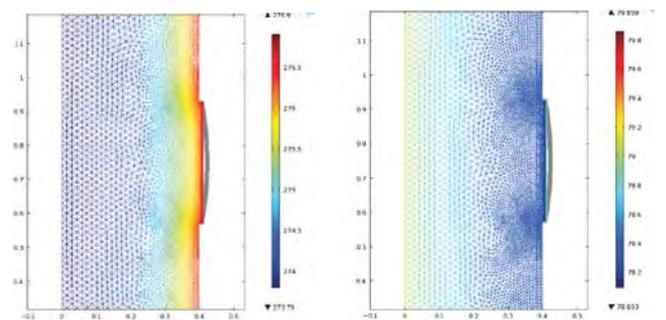


図 6. 両方の画像は、絵画がかけられている壁の横断面の COMSOL シミュレーションを示す。左の画像は、任意の時点での壁と絵画内の温度分布を示し、右側の画像は、同じ時点での壁と絵画の中の相対湿度の変化率を示す。このモデルは、歴史的建物や芸術品に影響を及ぼす応力や歪みを予測することに役立ち、適切な損傷軽減措置を施す際に必要な情報を提供する。



左から右へ：Henk Schellen 氏、Zara Huijbregts 氏、Jos Van Schijndel 氏

カスタム・アプリケーションによる 電子装置の熱特性解析

ハイファイマルチフィジックスモデルをカスタム・シミュレーション・アプリとして提供することによって、BE CAE & Test 社のエンジニアは、その専門性にレバレッジをかけ、コンサルティング業務を効率化します。

執筆者 GIUSEPPE PETRONE 氏

シミュレーション・コンサルタントは、顧客にシミュレーション結果を効果的に伝えるため、カスタム・アプリケーションを活用しています。静的な報告書を送付する代わりに、分かりやすく使い勝手の良いアプリケーションとともに、完全な数学的モデルの複雑な細部も含まれた製品の提供が可能になりました。また、このアプリケーションを使用して、顧客自身がシミュレーションすることもできるようになりました。BE CAE & Test 社は、表面実装デバイス (SMD) をシミュレーションするアプリケーションを開発しています。

⇒ エンジニアリング・コミュニケーションを向上させるシミュレーション用アプリケーション

シミュレーション・コンサルティングでは、アプリケーションを利用して、次のステップであるエンジニアリング・コミュニケーションを実現します。カスタム・アプリケーションを使えば、顧客とのやり取りや作業を簡素化することができます。顧客は、使い勝手の良いインターフェースを通じて、完全なシミュレーションにアクセスできます。これは、シミュレーションの専門家と顧客の双方に都合のよいアプリケーションです。顧客は、この簡単に操作できるツールを手に入れば、自分たちのシステムを独自で調査することができます。数値解析の専門家は顧客のために計算を実行するのではなく、シミュレーションの細かい部分にまで注力することができます。

SMD の特性解析の事例では、顧客は、このアプリケーションを使って数値モデルにアクセスし、いくつかのパラメータと

材料の選択を修正することができます。

⇒ 表面実装デバイスの熱特性解析

機器や装置は、それ自身がエネルギーを消費するか、変換するかにかかわらず、所定の温度範囲で稼働し続けられるように、熱を適切に管理しなくてはなりません。クライアントが私たちにモデルの作成を依頼してくる電子回路システムの 1 つに SMD があります。広範囲な物理特性を考慮可能で、尚かつ、簡単に連成可能なため、電子回路システムの解析に COMSOL Multiphysics® ソフトウェアを活用しています。

私たちの SMD モデルで特に重要視している部品は、銅フレーム、無鉛はんだ層、シリコンダイです (図 1 参照)。

はんだ層とシリコンダイの材料、はんだ層の厚みや散逸熱量には、接合部の最高温度および接合部~ケース間熱抵抗に影響をおよぼす可能性が生じます。私たちのモデルにおいて、私たちはこれらのパラメータ変化の熱分布における影響を調査しました、というのもそれが SMD の正常な機能に非常に大きな影響を及ぼすからです。私たちのテスト・シミュレーション

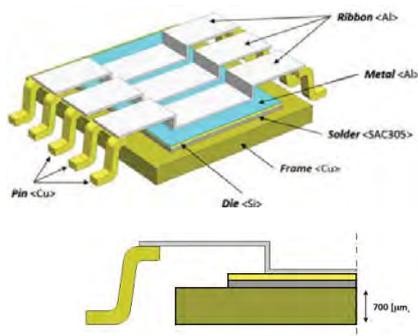


図 1. 上：SMD の詳細ジオメトリと材料
下図：フレーム、ダイス、はんだ、ピン、リボンの側面図

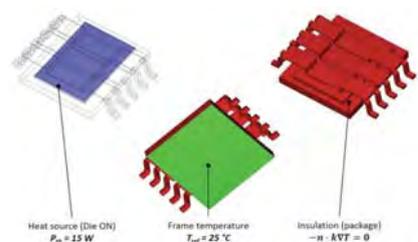


図 2. マルチフィジックスモデルで用いられる境界条件を示す SMD の強調された領域

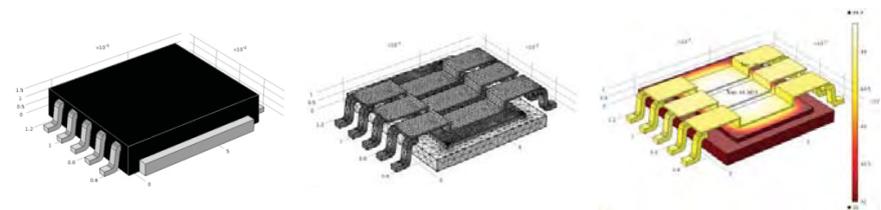


図 3. 左から右へ 3D ジオメトリ、メッシュ、COMSOL Multiphysics® ソフトウェアのシミュレーション結果

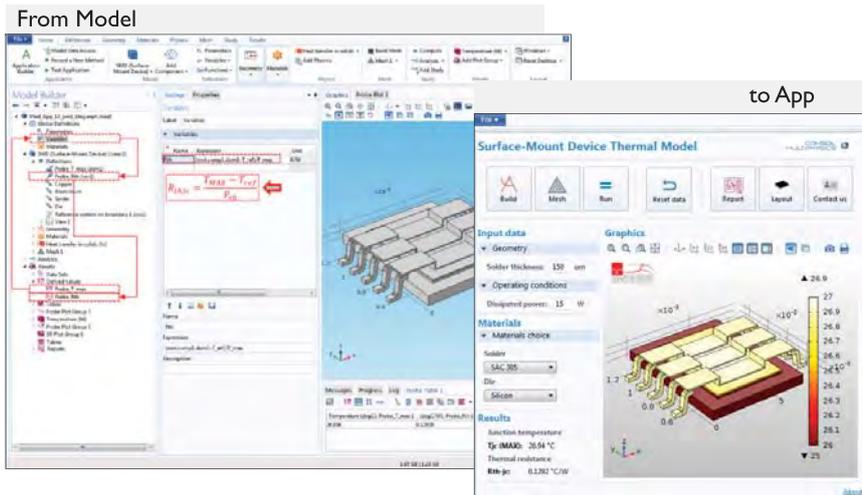


図 4. COMSOL Multiphysics® ソフトウェアの Application Builder で作られた表面実装デバイス (SMD) の熱モデルアプリ。ユーザーは SMD のデザインの熱的ふるまいを解析するため、はんだの厚みや、稼働条件、材料などの要因を変更できる。

ンでは、熱源 15W・初期フレーム温度 25 度に設定し、残りの部品は断熱に設定しました。

COMSOL Multiphysics® を使うと、同じ環境下ですべてのモデリングのステップが実行されるため、装置を通過する熱伝導を簡単にモデル化できます。ジオメトリを素早く作成し、材料を追加し、境界条件を設定するために伝熱 (固体) (the Heat Transfer in Solids) 物理インターフェースやメッシュ機能、ソルバを使用、そして、接合部〜ケース間熱抵抗のように、私たちが定義した式で結果をポスト処理することができます。

⇒ 数値モデルからカスタム・シミュレーション・アプリケーションプログラム構築

COMSOL Multiphysics® モデルがいったん完成すれば (図 2 および図 3 参照)、Application Builder ツールで使い勝手の良いインターフェース環境で利用することができます。身近で携わっている物理学の専門家として私たちは、アプリケーションユーザーが許容される範囲でアクセスや修正できるパラメーターを選択するために、私たちの数式モデルと顧客の仕様書の両方を考慮に入れています (図 4 参照)。

アプリケーションユーザーは、SMD のジオメトリを見て、はんだの厚さを調整し、メッシュを生成し、シミュレーションを行い、規定値の設定に戻り、レポートを作成することができます。これらの特性は COMSOL Application Builder の機能で簡

単に生成できます。

アプリケーションユーザーがシミュレーションの各ステップを進めるごとにグラフィック結果が表示されます。最初は SMD のジオメトリ、それからメッシュ、最後に計算された温度分布が表示されます。このようにして、このモデルのインタラクティブでダイナミックな特徴がアプリに生かされます。アプリケーションユーザーがパラメーターを修正すれば、すべてのビジュアル画面が簡単に再生成されます。

最終的な成果は、確実に簡単に使えるアプリケーションであり、シミュレーションの専門家によって定義された数学的モデルの正確性および予測力により左右さ

「シミュレーション・コンサルティングでは、アプリケーションを利用して、次のステップであるエンジニアリング・コミュニケーションを実現します。カスタム・アプリケーションを使えば、顧客とのやり取りや作業を簡素化することができます。」

れますが、ユーザーを困らせるものであってはなりません。ここで定義されていますアプリケーションを使用し、コンポーネント・はんだ層の厚さ・散逸熱量の材料の関数として、ユーザーは接合部の最高温度と接合部〜ケース間熱抵抗を解析することができます。アプリケーションユーザーはパラメーターを変更し出力を素早く見て、予測を確認または否認し、十分に情報を得た上で設計を決定できます。

⇒ エンジニアリング・コミュニケーションの改善

シミュレーション・アプリを開発した私たちの経験では、顧客は自分たちのシステムを調査できるインタラクティブなツールの提供に大変喜んでいます。

以前は、顧客にシミュレーション結果を提供した後、異なるパラメーターでさらに計算モデルの作成を要求されていました。現在は、シミュレーションの専門家がカスタム・アプリケーションを作成し、顧客はこれを使って、未解決の物理特性のすべてを調査できるようになっています。これは、顧客にとってもシミュレーションの専門家にとっても最善策です。すなわち、シミュレーションやアプリケーションを複雑化するよりも、さまざまなパラメーターで繰り返しシミュレーションを実行する方がより有意義だということです。

私たちに、今、シミュレーション・アプリがあるので、パラメトリック・シミュレーションの要求を受けても、「あなたに COMSOL カスタム・アプリケーションを提供しましょう。そうすれば、あなたは自分の製品を自分で検査することができます」と伝えることができるのです。❖



著者紹介

Giuseppe Petrone 氏は、BE CAE & Test の共同創業者で唯一の役員であり、COMSOL 認定コンサルタントです。彼は、イタリアのカタニア大学で機械工学の修士号を取得し、その後、フランスのパリ・エスト大学でエネルギー工学およびプロセス工学の博士号を取得しました。Petrone 氏は、BE CAE & Test 社を創業する以前、流体力学と熱解析の数学的手法の開発などの学術研究ベンチャーで働いていました。2005 年から COMSOL Multiphysics® ソフトウェアのユーザーとなっています。

COMSOL Multiphysics® でアカデミアと 産業界にイノベーションを

執筆者 **CARL D. MEINHART** 博士

学際的かつ複雑な課題を解決すべく、私は、学際的および産業の両方の環境で COMSOL Multiphysics® を活用しています。その理由はシンプルです。高度なマルチフィジクスアプリケーションから最適化解析まで、かつては数値アルゴリズムのカスタマイズを必要とされていた課題を COMSOL® ソフトウェアで簡単に解決することができるからです。

サンタバーバラのカリフォルニア大学の学部および大学院の授業では、COMSOL を取り入れた講義を行っています。例えば、マルチフィジクスシミュレーションの入門クラスでは、主に

「実際にハードウェアでの製造に取り組む前に、COMSOL を使用することで、迅速なシミュレーション、数多くのデザインコンセプトの分析、そしてデザインの最適化を実装することが可能です」

機械工学 4 年生と大学院生が受講しています。年間で一番重要となるプロジェクトの設計およびその最適化の実装に必要な COMSOL を使用するうえで必要不可欠なスキルを、このクラスでは提供します。

これにより、学生たちが実際にハードウェア製作を行う前となる 4 年生の秋学期中に、様々なデザインアイデアを繰り返し設計することができます。また、このプロセスにより、学生たちの貴重な時間とエネルギーを削減することができるとともに、彼らに近代的かつ実践的な産業デザインを教えることができました。

私たちは、Application Builder を使用して作成したカスタムアプリケーションを活用する計画を立てました。多くの場合、アプリケーションは、最初に学部のラボクラスの講義にて活用されます。物理的実験をシミュレーションするため、また実際の実験をラボで実施する前に期待された結果を予測するために、学生たちはあらかじめ作成されたアプリケーションを使用します。物理・実験誤差・数値誤差を理解するため、学生たちは、解析の段階でシミュレーションと実験結果を比較します。

多くのプロジェクトは本質的に、工学、化学、物理、そして生物などの幅広い分野にまたがり大変学際的です。COMSOL のユニークなメリットは、異なる物理でも容易に連成し研究課題を解決可能なこと、また現在開発中で特化した数値的アルゴリズムを使用し、解決するまでに長期間を有するような科学的問題も解決可能だということです。このフレキシビリティにより、研究者たちは、より多くの時間を物理的思考に費やすことができ、そして数値的な課題を可能な限り削減することができます。

一例として、マイクロ流体工学分野では、不均一化学反応を引き起こすため、AC 電熱流動が使用されます。これらのモデルでは、静電気、電熱、流量、化学反応を熟考する必要があります。数値的シミュレーションの高忠実度をさらに増加させるため、私たちの数値モデルでは、材料プロパティの温度依存性を考慮しています。そのモデル内では物理は完全連成で、その物理が現実

世界で実際に実施されるように厳密に相互作用します。

2012 年に、私が設立した Numerical Design, Inc は、創業以来、COMSOL 社認定のコンサルタント企業です。マイクロ流体工学、電磁気、化学工学、そしてほかの様々なテクニカル分野に関連した業務に数多く携わっています。

数マイクロ秒という時間スケール、そして数ナノメートルから数ミクロンまでの長さスケールにおけるマイクロ流体工学関連のアプリケーションにも数多く携わっています。長さスケール、時間スケールともに単位が極めて小さいため、実験パフォーマンス評価のためのデバイスを準備することが大変難しい場合もあります。幸運にも、COMSOL Multiphysics® を活用してこれらのデバイスのシミュレーションは可能となり、最適なパフォーマンス実現のための数値解が求められます。

私たちは、ハードウェアプロトタイプ設計では製造不可能とされている、マイクロ流体デバイスを定期的に設計しています。しかも、数多くのマイクロ流体デバイスの微細製造プロセスは、微細加工を実践するために何万ドルもの費用がかかり、完了するために 6 か月ほどかかってしまいます。このように長期的な時間と高額な費用がかかるために複数の設計反復は非現実的です。実際にハードウェアの製造に取り組む前に、COMSOL を使用することで、迅速なシミュレーション、数多くのデザインコンセプトの分析、そしてデザインの最適化が可能となります。

今はたくさんの最適化ツールが市販されています。しかしマルチフィジクススペースの形状最適化にとって、COMSOL は理想的なツールで、第 1 原理からは工学的厳密性に欠けるような、複雑な構造の設計にも役立ちます。最近の産業事例として、私たちは、非線形マルチフィジクス課題において 10 変数でのパラメータ最適化モデルを構築しました。もしすべてのパラメータのコンビネーションが計算実行され、各パラメータがスイープされた場合、10 ステップで、1,010 のシミュレーション結果になります。各非線形スイープの求解に約 30 分必要とした場合は、そのすべてを完了するまでに約 570,000 年必要となってしまいます。COMSOL を活用すれば、わずか 1 日でこの課題の最適化を行うことが可能になります。ジオメトリ構成の結果は非直感的で、事前に予測することは不可能です。



著者について

Carl Meinhart 博士は、カリフォルニア大学サンタバーバラ校の機械工学の教授です。1994 年、イリノイ大学にて博士号を取得しました。1996 年に UCSB に入社以来、彼はマイクロファブリックデバイスの開発と輸送機構の原理を中心に研究を行ってきました。Meinhart 博士は Numerical Design, Inc. の創設者であり CEO です。Numerical Design, Inc. はカリフォルニア州サンタバーバラに拠点を置いた COMSOL 認定コンサルタント企業です。Meinhart 博士は米国物理学会の会員でもあります。