

COMSOL NEWS

マルチフィジックス
シミュレーションマガジン

核融合発電の 商業化

General Fusion が
マルチフィジックスシミュレーションで
プロジェクトマイルストーンに到達

PAGE 6

進化する世界のための 最先端技術の開発

世界が進化するにつれ、私たちの社会を形作る製品、ツール、ワークフローも進化していく必要があります。かつては遠い存在に思えた技術革新が、今ではごく当たり前のものとなっています。例えば、パーソナルアシスタントとしても機能するスピーカーで音楽を聴いたり、自動運転車を運転したりすることなどが挙げられます。絶えず変化するテクノロジーと競争の激しい市場で勝ち残るために、世界中の組織は、より迅速かつスマートに、そしてより低コストでイノベーションを起こす方法を模索し続けています。

今年の COMSOL News では、こうしたイノベーションの素晴らしい事例を9つご紹介します。16ページには、IAV 社が自動車メーカーや電池設計者に新たな可能性をもたらす、革新的なツインバッテリーの設計コンセプトを開発した記事が掲載されています。また、NASA が熱モデリングと実験的検証を用いて、国際宇宙ステーションで生活・作業する宇宙飛行士のための次世代二酸化炭素除去技術を開発した記事も掲載されています。特集記事では、General Fusion 社がシミュレーションを用いて大型核融合実証機を設計した事例を取り上げています。この実証機は2025年2月に最初のプラズマ生成に成功し、現在は定期的にプラズマを生成しています。

企業は、シミュレーションソフトウェアを研究開発プロセスに統合することに真剣に取り組んでいます。例えば、13ページで紹介されているライフサイエンス企業 Sartorius 社は、CAE 専任の新部門を設立しました。絶えず変化する技術ニーズに先んじて対応するには、大胆なアイデア、創意工夫、そして限界に挑戦する意欲が不可欠です。モデリングとシミュレーションは、アイデアを現実に変えるプロセスをより容易にします。

Rachel Keatley
COMSOL, Inc.

COMSOL コミュニティと交流する

BLOG comsol.jp/blogs

FORUM comsol.jp/forum

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

Facebook® facebook.com/multiphysics

X (旧 TWITTER®) x.com/@COMSOL_Inc

COMSOL News に関するご意見をお待ちしております。info@comsol.com までお問い合わせください。これらのストーリー記事および関連リソース（参考資料やモデルを含む）は、comsol.jp/stories にてオンラインでご覧いただけます。

© 2025 COMSOL. COMSOL, COMSOL Multiphysics, COMSOL Server, および COMSOL Compiler は、COMSOL AB の登録商標または商標です。その他のすべての商標はそれぞれの所有者の財産であり、COMSOL AB およびその子会社および製品は、これらの商標所有者と提携、承認、後援、または支援されていません。これらの商標所有者の一覧については、www.comsol.com/trademarks をご覧ください。

LinkedIn は、LinkedIn Corporation および米国およびその他の国における関連会社の商標です。Facebook は Meta Platforms, Inc. の登録商標です。X は X Corp の登録商標です。

医薬品および研究機器サプライヤーがシミュレーション主導の研究開発で試作を削減

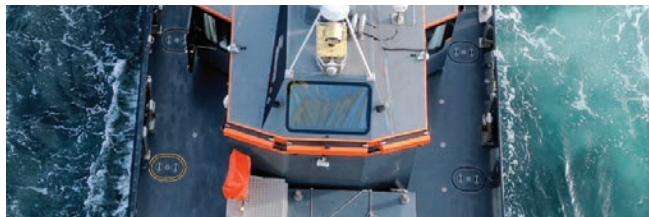
PAGE 13

目次



シミュレーションベースの製品開発

- 4 業界をまたぐモデリングとシミュレーションの9つの用途
COMSOL, Massachusetts, USA
- 6 核融合の未来へのタイムラインを短縮
General Fusion, British Columbia, Canada
- 13 ライフサイエンス企業, CAE 専任部門の設立により
バイオ医薬品の研究開発を加速
Sartorius, Germany
- 33 補聴器技術で世界の聴覚を支援
Sonion, Netherlands



設計の最適化

- 10 超音波トランスデューサーで石油ガス抽出の品質基準を達成
Baker Hughes, Texas, USA
- 20 トポロジ最適化によるジェネレーティブデザインの強化
COMSOL, Massachusetts, USA
- 30 洋上風力タービンのための優れた接岸構造の設計
Wood Thilsted, Denmark
- 36 宇宙でのより良い生活のための次世代二酸化炭素除去技術の設計
NASA Ames Research Center, California, USA



シミュレーションの民主化

- 16 ツインバッテリーアプローチでEV開発を推進
IAV, Germany
- 22 海底構造を可視化するための無人潜水艇の訓練
The University of Southern Mississippi, Mississippi, USA



リサーチスポットライト

- 26 がん個別化医療を支援するシミュレーションアプリが登場
iBMB Srls, Italy

COMSOL, Massachusetts, USA

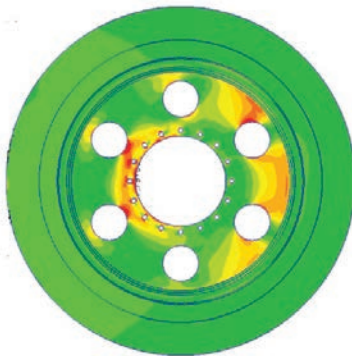
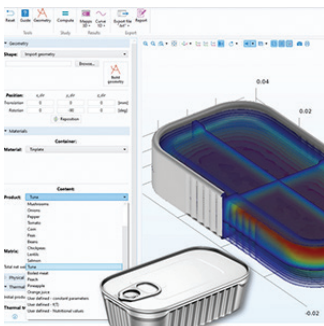
業界をまたぐ モデリングと シミュレーションの 9つの用途

MACKENZIE MCCARTY 著

マルチフィジックスモデリングおよびシミュレーションアプリを活用することで、新たなイノベーションの実現、既存の設計を最適化、持続可能性やコスト効率の向上や、その他の点の改善を行っている組織は数多くあります。COMSOL カンファレンスで発表された9つの業界事例をご覧ください。

鉱山ホイスト

ABB 社が世界中の鉱山会社に提供するドラムホイストシステムは、モーター、制御システム、ドラムシステムなど、多くの部品で構成されています。それぞれの部品は、効率、安全性、信頼性の要件を満たす必要があります。ABB 社のエンジニアは、この目標を達成するために、ホイストシステムの機械的なデジタルツインを構築し、応力分布をシミュレーションすることで、潜在的な問題領域を特定し、ロープの破損を回避するように設計を最適化しました。


comsol.com/paper/134242


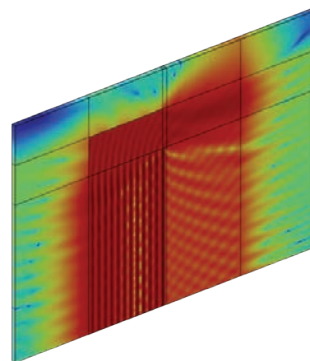
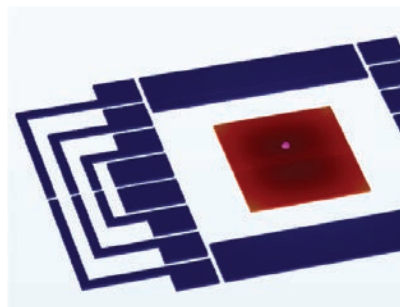
食品安全

BE CAE & Test 社は、缶詰食品の殺菌を行う食品エンジニア向けに、熱処理後の細菌減少、プロセスの効率、殺菌サイクル中の缶内の熱分布を予測するためのスタンドアロンシミュレーションアプリを開発しました。このアプリを使えば、誰でも簡単に缶の形状、食品の種類、熱処理を選択し、結果を可視化できます。

comsol.com/paper/135542

パワーエレクトロニクス 試験装置

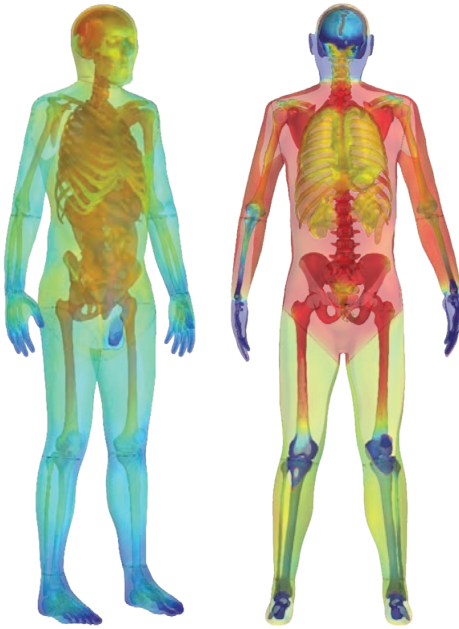
パワーエレクトロニクスでは、マイクロエレクトロニクスチップなどの部品は極端な温度変化にさらされ、経年劣化を引き起こす可能性があります。KAI は、試験装置のレイアウトをアップロードするだけで、シミュレーション専門家の直接的な支援なしに、熱シミュレーションを即座に実行できるシミュレーションアプリを開発しました。

comsol.com/paper/135392


交通騒音バリア

Phononic Vibes 社と Coimbra 大学は、交通騒音公害の軽減を目的として、数値モデリングを用いて換気式防音バリアの性能を研究しました。チームはユニットセル設計をモデル化し、音響透過損失を計算し、音響バンドギャップ周波数を分析しました。これにより、通気性を損なうことなく効果的な遮音効果を持つバリアを設計することができました。

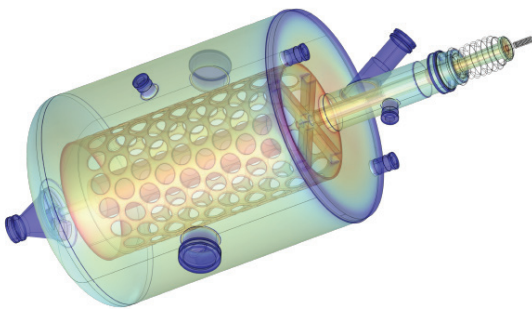
comsol.com/paper/134562



凍傷予測

凍傷予測に関する既存のガイドラインは、過度に単純化されていることが判明しました。人間の体温調節をより包括的に分析するため、米国陸軍環境医学研究所は、皮膚、脂肪、筋肉、骨、臓器の層を含む解剖学的に正確な幾何学的表現を使用しました。これにより、研究チームは皮膚の部位、防護服、性別、運動に基づいて、凍傷の発症をより正確に予測できるようになりました。

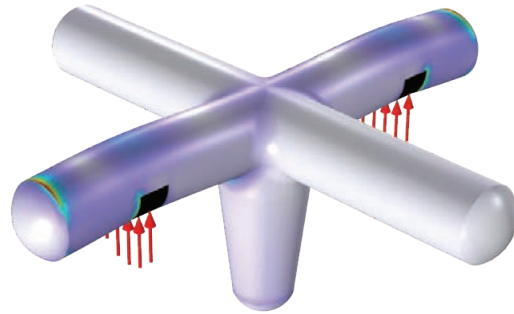
comsol.com/paper/136232



エネルギー貯蔵

EU ホライズンプロジェクト HYSTORE は、4つの異なる熱エネルギー貯蔵システムソリューションを開発しています。このプロジェクトのために、Inova Lab は、従来のマイクロ波加熱ではなく、熱化学材料に RF 加熱を使用する革新的な加熱方法を開発しました。研究チームは、シミュレーションを用いてシステムの電力密度分布を理解し、電極の性能を最適化しました。

comsol.com/paper/134462



コールドスプレー積層造形

コールドスプレープロセスは、複数の材料からなる金属粉末を高速で堆積させることで、ステンレス鋼の疲労特性を向上させます。Triton Systems 社は、マルチマテリアルコールドスプレーコーティングの有無にかかわらず、特定のステンレス鋼の疲労寿命をモデリングによって予測し、実試験に比べて時間とコストを大幅に削減しました。

comsol.com/paper/135902



軽量フライトレコーダー

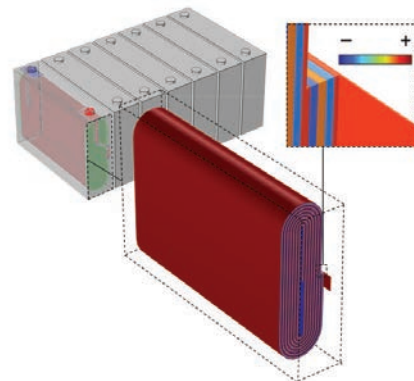
Serma Ingénierie 社は、軽量ヘリコプターに対応し、衝撃、圧縮、火災に関する基準を満たす軽量フライトレコーダーを開発しました。設計が火災試験に合格することを保証するために、チームは熱伝達モデリングと実験的検証を組み合わせました。炎への曝露をシミュレーションすることで、内部材料寸法の最適な比率を見つけ出し、システムの耐火性を効率的に試験することができました。その後、形状最適化を用いて、機器用のコンパクトなハウジングを設計しました。

comsol.com/paper/135042

電気自動車用電池

Veryst Engineering 社は、マルチフィジックスシミュレーションを用いて、EV 電池開発における一般的な設計課題を克服し、電池寿命に関する知見を獲得しました。研究チームは、シミュレーションを用いて、リチウムイオン角柱電池パックの寿命性能、熱管理、構造耐久性に関する条件を試験しました。このプロセスにより試験時間が短縮され、最適な熱管理戦略の決定に役立ちました。

comsol.com/paper/136062



General Fusion, British Columbia, Canada

核融合の未来へのタイムラインを短縮

カナダの核融合エネルギー企業 General Fusion 社は Veryst Engineering 社と協力し、シミュレーションで磁化標的核融合技術を研究しました。概念実証型核融合装置における発生メカニズムをより深く理解することを目指しています。

JOSEPH CAREW 著

磁化標的核融合 (Magnetized Target Fusion, MTF) 発電所は、比較的安価な技術で、かつ炭素排出を伴わずに、大量のエネルギーを生産できる可能性を秘めています。General Fusion 社の MTF 装置では、核融合装置内部に形成された液体金属容器に水素プラズマ (重水素-三重水素 (D-T) など) を注入します。そこから、ピストンの列がプラズマの周りの液体金属容器を圧縮・変形させ、プラズマの密度と温度を核融合条件まで高めることで、核融合が起こります。これは、商用プラントで1秒に1回繰り返されるパルス方式です。容器の液体金属壁は中性子のエネルギーを捕捉し、熱に変換します。そして、それを熱交換器に運び、蒸気を発生させ、最終的に電力を生成します。

General Fusion 社のエンジニアたちは、MTF を用いて核融合発電を商用電力網に導入しようとしています。この取り組みは、General Fusion の大型核融合実証機である Lawson Machine 26 (LM26) の建設により大きな節目を迎えました。General Fusion 社は、マルチフィジックスシミュレーションを活用することで、LM26

の設計と最適化に成功し、将来の核融合発電のビジョンに向けて大きな一歩を踏み出しました。

» LM26 は、リチウムライナーの電磁圧縮を利用して核融合条件に到達します

2024年後半、General Fusion 社が将来的に開発する大規模商用 MTF 装置のリスク軽減を目的として、LM26 (図 1) が建設されました。LM26 におけるプロジェクトの目標は、1 keV、次に 10 keV、そして最終的には科学的損益分岐点相当のエネルギーを達成することです。

LM26 は、球状トカマクプラズマをチャンバーに注入し、固体リチウムライナーを用いて圧縮することで、核融合に必要なプラズマ温度に達するように設計されています。圧縮中、砂時計構造を流れる軸方向電流によってトロイダル磁場が生成され、プラズマが閉じ込められ、安定状態を保ちます。このプロセスにより、プラズマイオンの核融合と中性子の形でエネルギー放出につながるプラズマ温度と密度が生成されます。



図 1 General Fusion 社のチームが LM26 を組み立てている様子。

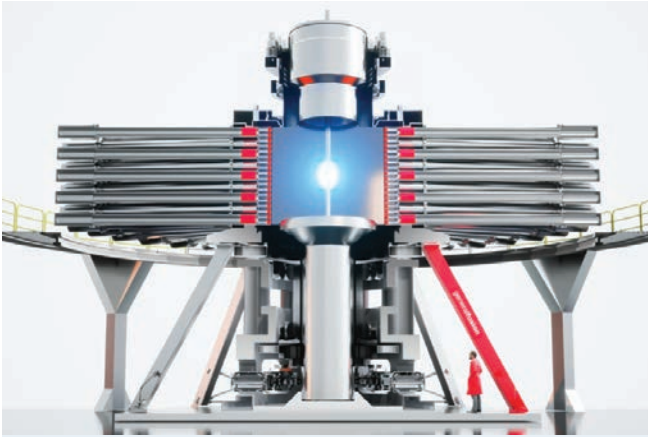


図2 General Fusion 社の商用 MTF 装置設計のレンダリング。

General Fusion 社の MTF 発電所コンセプト (図2) では、LM26 のような磁気コイルではなく、ピストンが圧縮プロセスを開始します。他の核融合方式が超伝導コイル、レーザー、その他の高価な機器に依存しているのに対し、ピストンは、General Fusion 社のアプローチ独自のものです。

“MTF の場合、初期のプラズマ体積が大きいほど、高温状態を維持できる時間が長くなり、プラズマを核融合条件まで圧縮する時間を長く取ることができます”と、General Fusion のエンジニアリング分析マネージャーである Jean-Sebastien Dick 氏は述べています。“General Fusion では、このプロセスを反復的に改良し、商業的に実現可能であるだけでなく、市場に出回っている他の種類のエネルギー源に対しても非常に競争力のある発電所の運転点を開発してきました。”

▶▶ 固体リチウムライナーの磁気機械圧縮のモデリング

LM26 は、固体リチウムライナーを圧縮することで、1 keV、10 keV、そして科学的損益分岐点等価という主要な温度閾値をターゲットとしています。COMSOL Multiphysics® ソフトウェアを使用することで、チ

ームは内部効果をモデル化・測定し、LM26 設計の性能を予測することができました (図3)。

“General Fusion に入社した際、私たちが直面している課題の種類を見て、COMSOL Multiphysics は私たちのソフトウェアリストに追加するのに最適なツールだと思いました”と Dick 氏は述べています。“これが、マルチフィジックス分野の著名な専門

家である Veryst Engineering 社との協業のきっかけとなりました。彼らは COMSOL を非常によく理解しています。”

Veryst Engineering の支援によるリチウム材料モデルのキャリブレーション

General Fusion 社と Veryst Engineering 社とのパートナーシップは、LM26 の開発において不可欠でした。Veryst Engineering 社は、COMSOL 認定コンサルタントであり、高度な非線形シミュレーションと材料モデリングを専門とするエンジニアリングコンサルティング会社です。Veryst の主任エンジニアである Sean Teller 氏は、Dick 氏と協力して、リチウムライナーの応答を正確にシミュレーションするための材料モデルを開発しました。この情報は、LM26 ライナーの軌道を正確に予測するモデリングに不可欠であり、General Fusion 社による LM26 の製造と組み立てを可能にしました。

Teller 氏は次のように述べています。“COMSOL Multiphysics シミュレーションと統合された実験計画および検証を活用することで、General Fusion のチームは LM26 の設計を迅速に反復することができました。この予測モデルは、実現可能で豊富なクリーンな核融合発電の実現に向けて、核融合条件を達成するために不可欠です。”

これらの引張試験の一つに、固体リチウムの材料応答の測定が含まれていました。Veryst 社と General Fusion 社は、高速カメラと衝撃ロードセルを用いて、一対のセラミックヒーターでリチウムを加熱し、サンプルを破断まで引っ張ることで、応力対ひずみ応答を測定しました (図4)。これらの実験結果は、Johnson-Cook モデルのキャリブレーションに使用されました (図5)。

“モデル全体は非常に複雑です”と Teller 氏は述べています。“リチウムと圧縮プラズマには移動メッシュを使用し、非線形固体力学と Johnson-Cook 材料モデルを応用し、モデル化された回路からの電

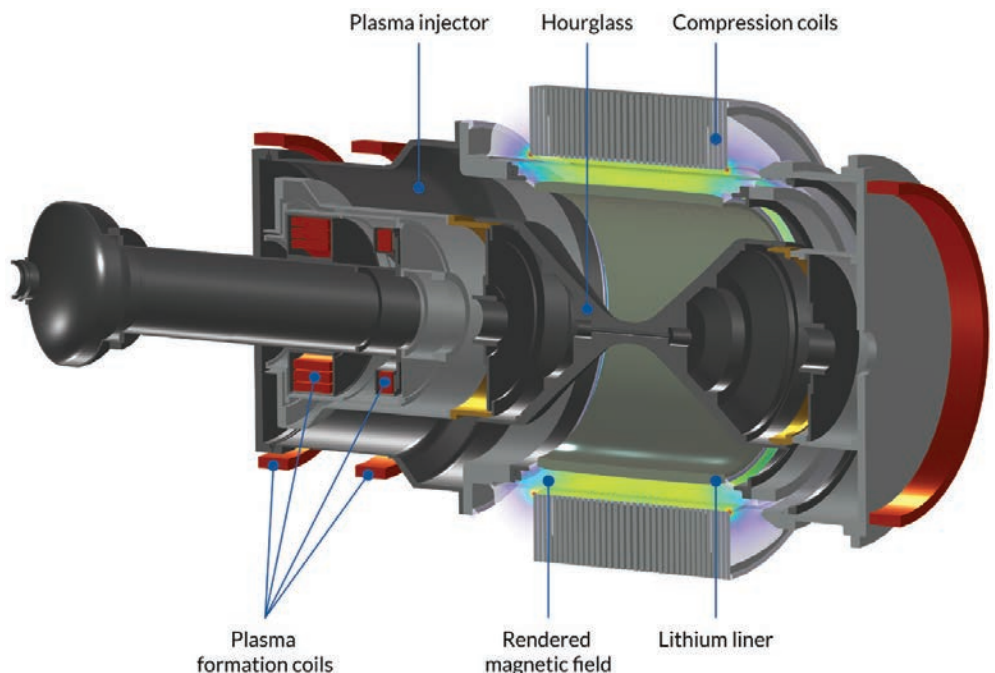


図3 LM26 の形状。



図4 この実験装置は、2つの黒色セラミックヒーター間でリチウム（中央、黒色で銀色の点がある部分）を引張試験するものです。

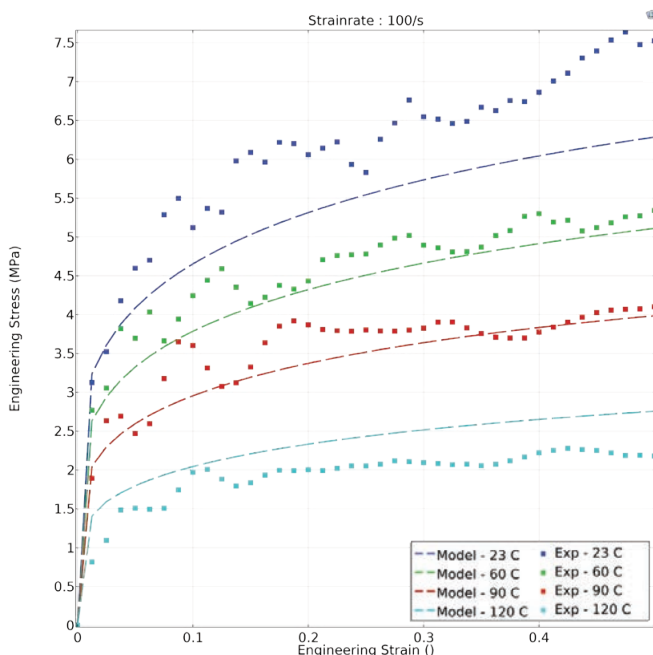


図5 このプロットは、実験データ（四角いデータ点）と材料モデル予測値（破線）を比較したものです。

磁力がリチウムの圧縮を駆動します。リチウムライナーは砂時計型デバイスに衝突するため、正確な予測を行うには非線形接触を捉えることが不可欠です。”さらに複雑なのは、これらのモデルコンポーネント間で熱伝達が発生することです。

COMSOL® ソフトウェアでは、異なる LM26 設計を同時に、同じ空間で計量することができました。Veryst 社と General Fusion 社は、時間依存の完全連成ソルバーと自動リメッシュを用いて、LM26 内部の大きな変形と圧力を捉えました。

“このコンプレッサー設計に関する基本的な知見を得るには、物理試験と有限要素モデルを緊密に統合する必要がありました”と Teller 氏は述べています。

LM26 の開発につながったモデルの検証キャンペーンにおいて、General Fusion 社は電磁圧縮法を用いて40個のリチウムライナーを

圧縮し、COMSOL モデルの妥当性を検証しました。チームは、圧縮システムの小型プロトタイプを用いて物理実験を実施しました（図6）。

ライナーの変形を測定するために、General Fusion 社は構造化光再構成法 (structured light reconstruction) を開発しました。これは、レーザー光のシートを用いてライナー内の複数の点で速度を抽出する手法です。また、光子ドップラー速度測定法を用いてリチウムライナーの中心点の速度を測定しました。この組み合わせにより、General Fusion 社は物理実験で観察された変形を再現し、それを検証のためにシミュレーション結果と比較することが可能になりました。その後、彼らはその速度および温度依存性の材料モデル（図5）をプラズマ圧縮の後続シミュレーションに使用し、試験データとこれまでに得られていたデータとの間に良好な一致が見られたことを確認しました。

“このコンプレッサーの性能は、初期のシミュレーションから得られた知見、特にこの設計の推進に役立ったマルチフィジクスモデルなしには実現できなかったでしょう”と Teller 氏は述べています。“これらの検証は、デバイスをさらに推し進め、ローソン基準とクリーンな電力を達成するための今後のモデリング作業に対する信頼性を高めます。”

コンプレッサーのインピーダンスへの取り組み

LM26 の主要コンポーネントの一つは、電磁コンプレッサーです。この部分は、磁化されたプラズマを急速に圧縮する役割を担っています。優れた電磁コンプレッサー設計は、インピーダンスと圧縮時間を一致させる必要があります。インピーダンスと圧縮が同じ時間スケールに従うことで、“効率的な圧縮”が可能になります。これは、電気エネルギーが運動

エネルギーに変換される瞬間です。“効率的な圧縮”とは、初期に蓄積された電気エネルギーの大部分を運動エネルギーに変換することです。

モデリングとシミュレーションにより、General Fusion 社は電源のインピーダンスを調整し、設計変更が性能にどのような影響を与えるかを確認し、圧縮効率を最大化することができました。

インピーダンスを調整するために、Dick 氏はソフトウェアを用いてコンプレッサーのコイルの巻き数を調整し、ライナーとコイル間の初期距離（“エアギャップ”と呼ばれる）を変更し、ライナーの圧縮軌跡における圧縮方法を変化させました。さらに、プラズマの安定性を確保するためには、圧縮過程におけるライナーの形状を制御する必要があり、ライナーの厚さとコイル間の軸方向間隔を反復的に調整する必要がありました。Dick 氏は様々な設計調整を行った上でモデルを解析し、結果を比較することで、装置が安定したプラズマ圧縮を実現できるかどうかを検証しました。

“このライナーが、これらのコンプレッサーで経験している高いひずみ速度と高い塑性ひずみ下で期待通りに挙動することを確認するため、複数の材料特性評価キャンペーンを実施しました”と Dick 氏は述べています。

モデルの検証

材料特性の検証のための実験装置と同様に、General Fusion 社はライナーによる磁場の移流が解析予測と正しく一致することを確認するために、内部検証を実施しました。

“これらのコイルそれぞれについて個別にテストを行い、回路内の抵抗とインダクタンスを調整し、磁束ループで測定した値と可能な限り一致することを確認しました”と Dick 氏は述べています。

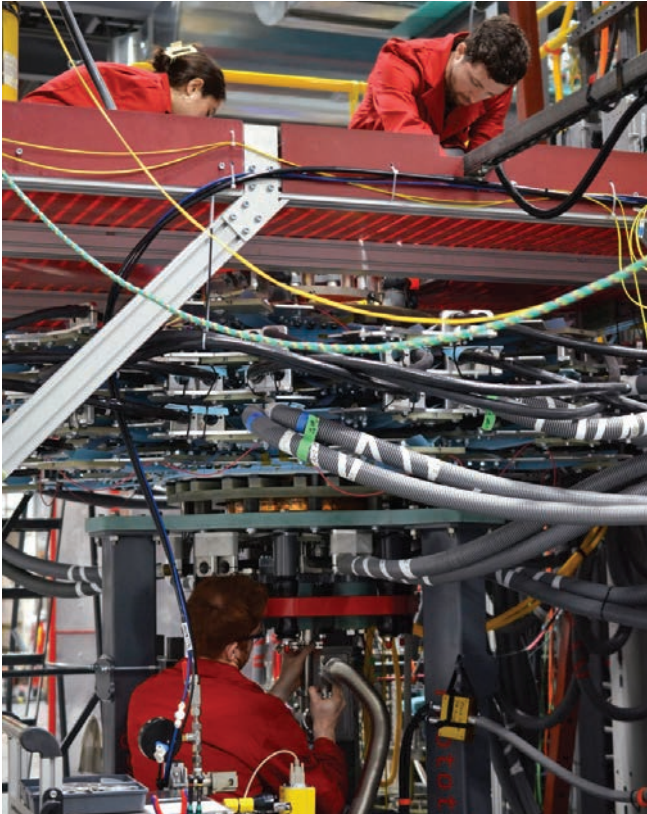


図6 プロトタイプ0, LM26 の圧縮システムの小型版。

Dick 氏は、解析時間を短縮するために、機械の動作の2D軸対称シミュレーション (図7) を使用しました。

》 シミュレーションによるデータポイントの獲得

“COMSOLのフレームワークのおかげで、複雑性を段階的に構築し、設計意図への確信を深めることができ、設計フェーズのやり直しを回避できました”と Dick 氏は述べています。“これらの実験の主要な部分を変更する必要はありませんでした。常に意図したとおり動作し

ていました。”

General Fusion のチームは、シミュレーションをはるかに短い時間枠で実行できるようにになりました。これは、COMSOL Multiphysics のクラスタースイープノードを使用しているためです。このノードにより、複数のノードにまたがる1つの大規模なクラスタージョブを作成できます。追加されるノードの数が多いほど、並列計算されるパラメーター値の量に直接関係します。General Fusion 社はこれを利用して、複数のパラメーターをより迅速に処理しました。

“以前は、これらのシミュレーションの実行には数週間、あるいは数ヶ月もかかっていましたが、今では24時間以内に実行できます”と Dick 氏は述べています。

“この時間枠で、クラスター上で数百ものシミュレーションを実行できます。”

チームはシミュレーションから得たデータを活用し、自信を持って機械の安全な動作空間を開発することができました。

》 シミュレーションと核融合発電の未来

シミュレーションにより、General Fusion のチームは LM26 の設計開発において段階

的に複雑さを増すことができました。そして、実世界の実験とマルチフィジックスシミュレーションを組み合わせることが、概念実証モデルの開発において極めて重要でした。チームが核融合発電を新たな高みへと押し上げる中で、マルチフィジックスシミュレーションと核融合研究は今後も密接に結びついていくでしょう。

LM26 は2025年2月に最初のプラズマを達成し、現在は定期的にプラズマを生成しています。General Fusion のチームは、次のステップであるプラズマを圧縮して核融合と圧縮による加熱を生み出す準備として、性能の最適化に取り組んでいます。

“空気力学、流体力学、構造力学といった分野を一つずつ検討するのではなく、すべてを統合しています”と Dick 氏は述べます。“COMSOL がシミュレーションの世界に取り組む方法は実に素晴らしいと思います。物理現象をパズルのピースのように組み立てることで、複雑さを増していく、標準的で漸進的なアプローチが気に入っています。新しいイノベーションは非常に複雑で、様々な物理現象を組み込む必要があるため、シミュレーションの未来はこれに向かっていくと信じています。”◎

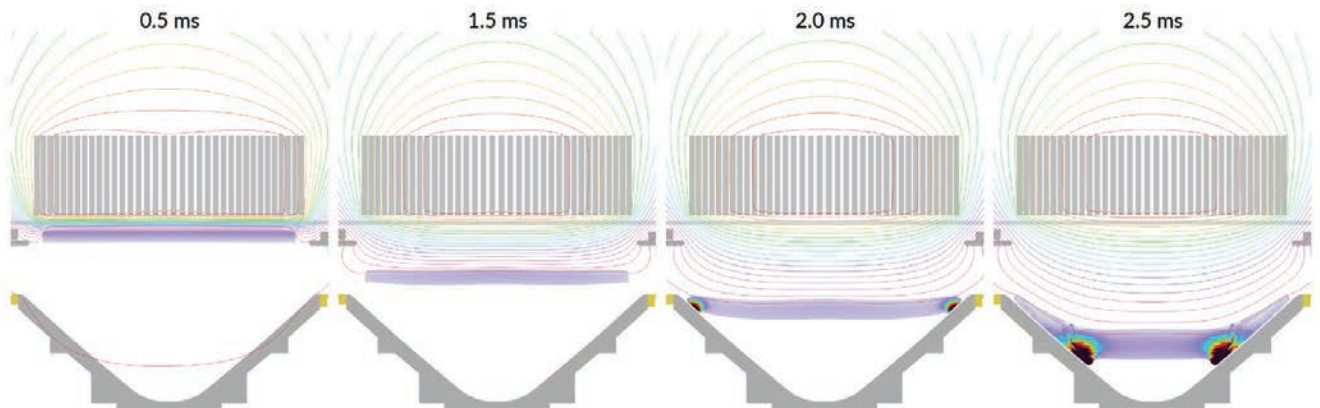


図7 機械の2D軸対称モデル。リチウム内の静水圧等高線と、すべての物体におけるポロイダル磁束等高線。中央の導電コーン (下)。電源に接続されたコイル (上) (灰色の物体)。

Baker Hughes, Texas, USA

超音波トランスデューサーで 石油ガス抽出の品質基準を達成

Baker Hughes 社は、3D超音波シミュレーションを用いて音波伝播を解析しており、実験応答の捕捉、抽出した石油ガスの試験に使用するトランスデューサーの最適化を通して試作コストを 30% 削減しました。

MACKENZIE MCCARTY 著

石油やガスが住宅の暖房、自動車の燃料、発電に使用されるようになるまでには、精製、輸送、抽出、試験といった広範なプロセスを経ます。Baker Hughes 社は、このプロセスの最初の段階、つまり上流段階、特にセメント結合検層技術を用いてガスの品質を評価することに注力しています。同社は、抽出した石油とガスの試験で一般的に用いられる2つの方法、パルスエコー試験とピッチキャッチ試験に使用する超音波トランスデューサーの設計と改良に、マルチフィジックスシミュレーションソフトウェアを活用しています。

» 石油とガス採掘の探査

上流工程でガスを採掘するために坑井を掘削する際、坑井内の流体の流れを制御するために坑井を補強する必要があります。セメント結合評価はこの工程において重要な手順です。ボーリング孔を掘削した後、ボーリング孔内の生産帯間の流体の流通を防ぐため、ケーシングと地層の間にセメントを注入します。Baker Hughes 社の主任科学者である Haiqi Wen 氏によると、セメントシースは流体の流通を防ぎ、地表への流体の流出を遮断する水圧シールを形成します。

坑井の健全性と流体帯の分離状態を正確に評価するために、ワイヤーラインで坑井に挿入される超音波ツールとしてよく使用される2つのツールは、セメント結合検層 (CBL) と可変密度検層 (VDL) と呼ばれます。CBL の結果は1つの波形として得られ、波形の振幅と減衰係数に基づいてケーシングとセメント間の結合品質を判定できます。VDL は“すべての波形を視覚的に表現したもののようなもので、地層とセメントの結合品質に関するより多くの情報を得ることができます”

と Wen 氏は述べています。

抽出地点での石油やガスの試験は、製品が次の工程に進む前に品質基準を満たしていることを確認するために重要です。この試験によって、価値や使用性に影響を与える可能性のある不純物を特定できるほか、組成や生産速度を分析することで生産の最適化に役立つと Wen 氏は説明しました。さらに、この試験によって得られるデータは、オペレーターが貯留層の状態を把握し、安全上の懸念事項を特定できるように、将来の改善に活かすための重要な手がかりにもなります。

圧電トランスデューサーは、プロセスの上流、つまり試験部分で使用されます。Wen 氏と彼のチームは、COMSOL Multiphysics® ソフトウェアを使用して圧電トランスデューサーをモデル化しました (図 1)。ソフトウェアに組み込まれたマルチフィジックス機能を使

用して、流体と圧電トランスデューサー、弾性波と圧力音響、外部電気回路と圧電素子の端子を連成させました。これにより、複数の物理現象がどのように相互作用するかを正確に検証し、電圧信号から弾性波への変換、そしてカスタマイズされた回路パラメーターを用いてトランスデューサー境界における流体構造相互作用をモデル化することができました。

“境界に吸収層を配置して入射波を吸収します”と Wen 氏は述べ、さらに“境界は周波数フィルタリングとスキャン機能も果たします。時間とエネルギーを節約するため、モデルの8分の1のみをシミュレーションしますが、ミラーリングされたデータセットを適用することで、完全なモデル応答とデータを得ることができます”。トランスデューサー設計の重要な要素は、波長と整合層に対する圧電トランスデューサーの厚さで

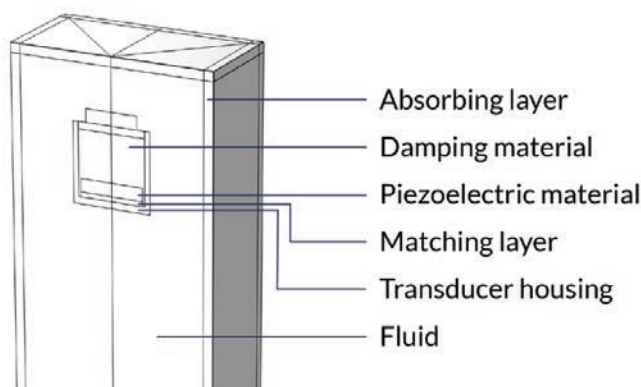


図1 圧電トランスデューサーモデルの形状。

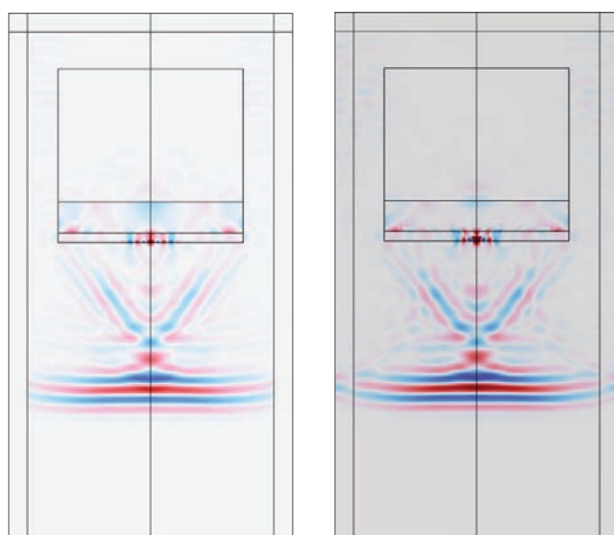


図2 短いパルス信号が、シンプルな2D軸対称モデル(左)と3Dモデル(右)を通過しており、2つのモデルで波動伝播がほぼ同じであることを示しています。

す。この設計では、トランスデューサーの厚さは波長の半分に設定され、整合層の厚さは波長の4分の1に設定されています。

Wen氏は、トランスデューサーの寸法とメッシュ設定を構築する際に、アセンブリと一体化という2つの異なる手法を検討しました。アセンブリは界面に不連続なメッシュを作成しますが、一体化は連続したメッシュを作成します。

“一体化は通常、より堅牢性が高いと思いますが、界面に非常に細かい要素を配置するため、場合によってはシミュレーションがわずかに遅くなる可能性があります”とWen氏は述べています。

» シミュレーションによるプロトタイプコストの削減

Wen氏は、簡略化された軸対称の2Dトランスデューサーモデルと完全な3Dモデル(図2)を構築し、両方のモデルを実験テストで検証しました。シミュレーションでは、井戸のセメント表面に短いパルス信号を送信します。接合品質が良好な場合、材料はすべてしっかりと接合されており、間に空隙や亀裂がないため、受信機は強い信号をあまり表

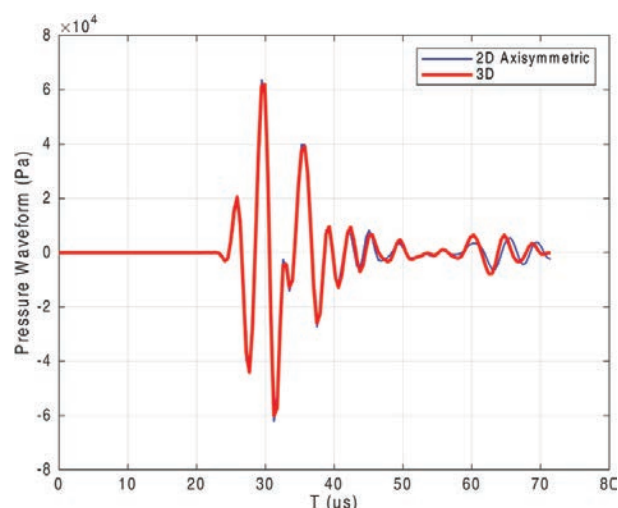


図3 2Dモデルと3Dモデルの圧力プローブ応答は良好な一致を示しています。

示しません。このシナリオでは、信号は表面を通過します。逆に、接合品質が悪い場合は、信号が亀裂や空隙に当たるため、受信機は反射信号を表示します。

“この研究では、波動伝播と圧力応答を比較しました。ご覧の通り、波動伝播はほぼ同じです”とWen氏は述べています。さらにWen氏は、モデルが軸対称であれば2Dモデルを使用してシミュレーション結果をより高速に得ることができそうですが、そうでない場合は3Dモデルを使用する必要がありますと説明しました。

3Dモデルの結果は、 $x = 0$ (図2の右側に表示)のyz断面における圧力応答を評価することで得られます。“この圧力プローブの応答では、2Dモデルは3Dモデルとほぼ重なっています”とWen氏は述べました。彼は、COMSOL Multiphysics ソフトウェアと MATLAB® ソフトウェアを接続するインターフェース製品である LiveLink™ for MATLAB® を使用して結果を比較しました(図3)。

COMSOL のシミュレーション結果と測定データは、LiveLink™ for MATLAB® を介して示されているように、近傍場でよく一致して

います(図4)。結果は、最大圧力が軸上にあり、このデータにおけるトランスデューサーの中心周波数は 280 kHz の振幅であることを示しています。しかし、Wen氏が指摘したように、“解決に取り組んでいる矛盾点がいくつかあります”。その一例として、測定データにはサイドローブが存在するのに対し、シミュレーション結果にはそれが見られなかったことが挙げられます。もう一つの矛盾点は、シミュレーション結果では局所的な打ち消しが観測されるのに対し、測定データは連続的な減衰を示していることです。

“実際のアプリケーションでは圧電材料は複合材料であるため、この問題は圧電材料のモデリングに関連している可能性があります。しかし、現在の研究では均質材料として扱っています”とWen氏は述べ、“現在も改善に取り組んでいます”と続けました。

“全体として、シミュレーションによって試作コストを約 30% 削減できました”とWen氏は述べました。“以前は、新しいトランスデューサーを注文する必要がある場合、通常は仕様の異なる複数のトランスデューサーをまとめ

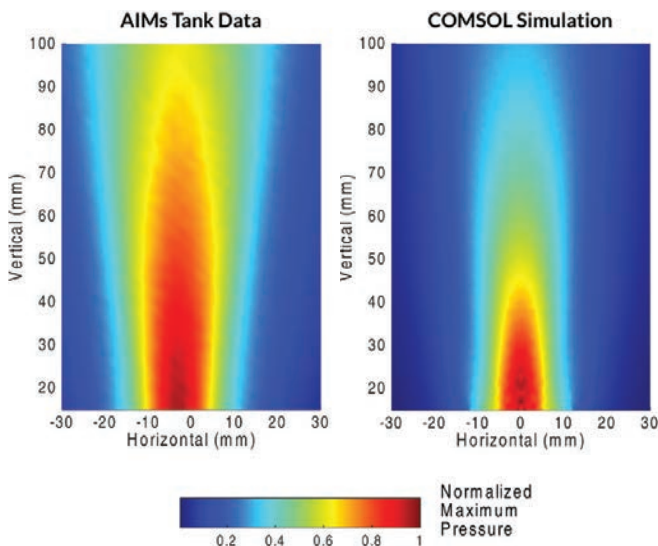


図4 測定データ (左) と COMSOL シミュレーション結果 (右) のピーク圧力は、近傍場において良好な一致を示しています。

で注文していました。しかし、COMSOL® のようなシミュレーションソフトウェアを使用するようになった今では、バッチの中に良い設計がいくつかあることを確認するだけで済みます。新しいトランスデューサーの設計をすべて注文して、どれが最も優れた性能を発揮するかをテストするのではなく、それらの設計を注文するだけで済みます”と Wen 氏は述べています。

パルスエコー法とピッチキャッチ法

研究をさらに進めるため、Wen 氏とチームは COMSOL Multiphysics を用いてパルスエコー試験とピッチキャッチ試験のシミュレーションと最適化を行いました。パルスエコーシミュレーションは、超音波パルス波を発信して材料の欠陥を特定し、反射波形から情報を得たりできる超音波非破壊検査 (NDT) 技術に焦点を当てています。Wen 氏とチームは、トランスデューサーが送信機と受信機の両方の役割を果たし

“全体として、シミュレーションによって 試作コストを約 30% 削減できました。”

— HAIQI WEN, BAKER HUGHES 主任科学者

ながら、金属製の筐体で反射された波を発信しました。波形データは、ポイントプローブで測定した後、分析することができます。

Wen 氏はヒルベルト変換を用いて波形エンベロープを抽出します。そして、“FFT (高速フーリエ変換) を適用することで周波数ピークの1つを取得できます。このピークは、筐体内部の反射に対応しています。信号を送信すると最初の反射が発生しますが、実際には内部反射が存在します”と Wen 氏は説明します。筐体の測定値は、周波数に基づいて計算できます。

ヒルベルト変換は、ピッチキャッチ試験において波長の包絡線を抽出するためにも使用でき、ピークの振幅を追跡することができます。本研究におけるピークは、図5の特定の点に青と赤の点で示されています。Wen 氏は、波の振幅をトランスデューサー間隔の関数としてプロットし、指数曲線を当てはめました (これは図5には示されていません)。彼は、自由管水と発泡セメントの異なる結果を比較することで、領域内の材料特性を理解しました。

“課題は、かなり低い振幅のピークが見られることです。実際のアプリケーションでは、特に高周波数になると、当然ながら信号対雑音比が低下するため、非常に困難になります”と Wen 氏は述べています。彼は、音波の送受信が非常に高速になると、意味のある信号を捕捉することが難しくなると説明しています。

COMSOL Multiphysics で2つの試験方法をシミュレーションすることで、超音波パルス波からのデータ収集効率が向上し、トランスデューサーをモデル化することで、設計を最適化しながらリソースを節約できます。シミュレーションは、Wen 氏と彼のチームが波が様々な物質をどのように伝播するかを解明し、最終的な波形の要因を突き止めるのに役立ちます。“これは、試験実験では得られない情報をシミュレーションが提供できる真の力で”と Wen 氏は説明します。最終的に、これは Baker Hughes 社が石油とガス生産プロセスの上流工程における効率と精度を向上させるのに役立ちます。◎

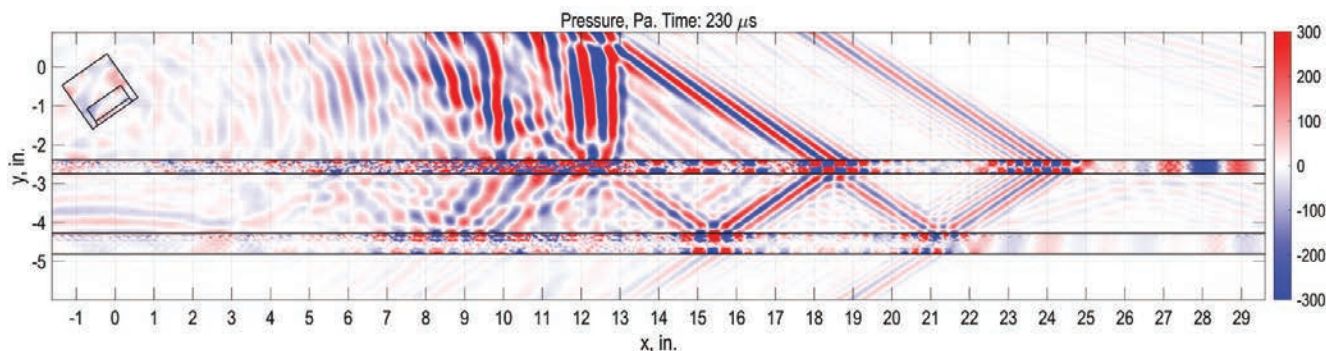


図5 自由管水と発泡セメントにおける圧力波のピッチキャッチシミュレーション。2つの水平帯はケーシングを表しています。(18.5, -2.5), (21, -4.5), (23.5, -2.5), (28, -2.5)のピークに注目してください。

Sartorius, Germany

ライフサイエンス企業, CAE 専任部門の設立により バイオ医薬品の研究開発を加速

Sartorius 社は、バイオ医薬品の開発を可能にするデバイスの最適化に、コンピューター支援エンジニアリング (Computer-Aided Engineering, CAE) 部門を活用しています。

JOSEPH CAREW 著

バイオ医薬品は、がん、多発性硬化症、リウマチなどの疾患に対する効果的な治療薬となり得ます。これらの新規医薬品は非常に複雑であり、その製造にはバイオリアクター、バイオテクノロジープロセス、そして多大な時間とリソースの投資が必要です。国際的な医薬品および実験機器サプライヤーである Sartorius 社の CAE 部門は、COMSOL Multiphysics® ソフトウェアの活用により、開発のスピードアップ、試作の削減、イノベーションの支援、試験の最適化といった、一般的な製造課題の克服に成功したと実感しています。

▶▶ 1万分の1の製品 を作る：成功するバ イオ医薬品の製造

バイオ医薬品とは、生物由来の原料から製造、抽出、または合成された医薬品です。化学薬品ベース

の医薬品とは異なり、バイオ医薬品は特定の細胞を標的とするようにカスタマイズ可能で、ワクチン、体細胞、組織、全血などがその例です。近年の注目すべきバイオ医薬品の成功事例として、COVID-19 ワクチンが挙げられます。

バイオ医薬品は優れた性能を誇る一方で、開発プロセスには課題がつきものです。

“新薬候補は1万種類のうちわずか1種類しか市場に出回っていません”と、Sartorius 社の CAE シミュレーション担当シニアサイエン

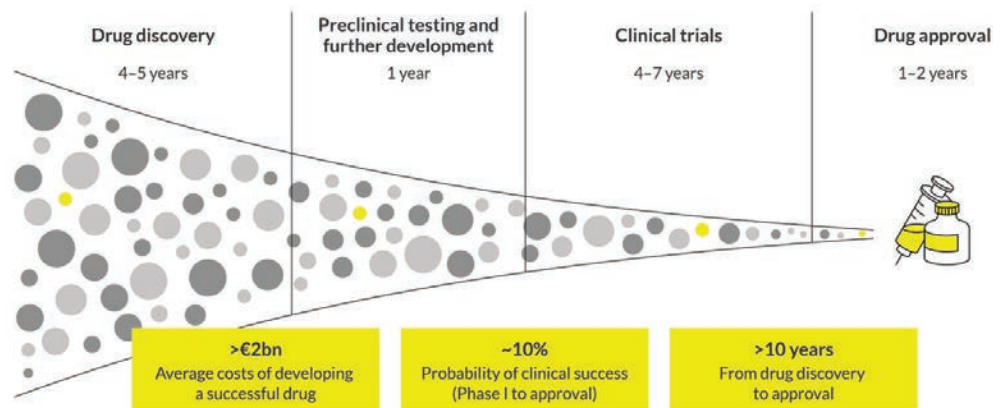


図1 すべての候補薬剤のうち、長く費用のかかる開発プロセスを経て市場に出るのはわずか1万分の1です。

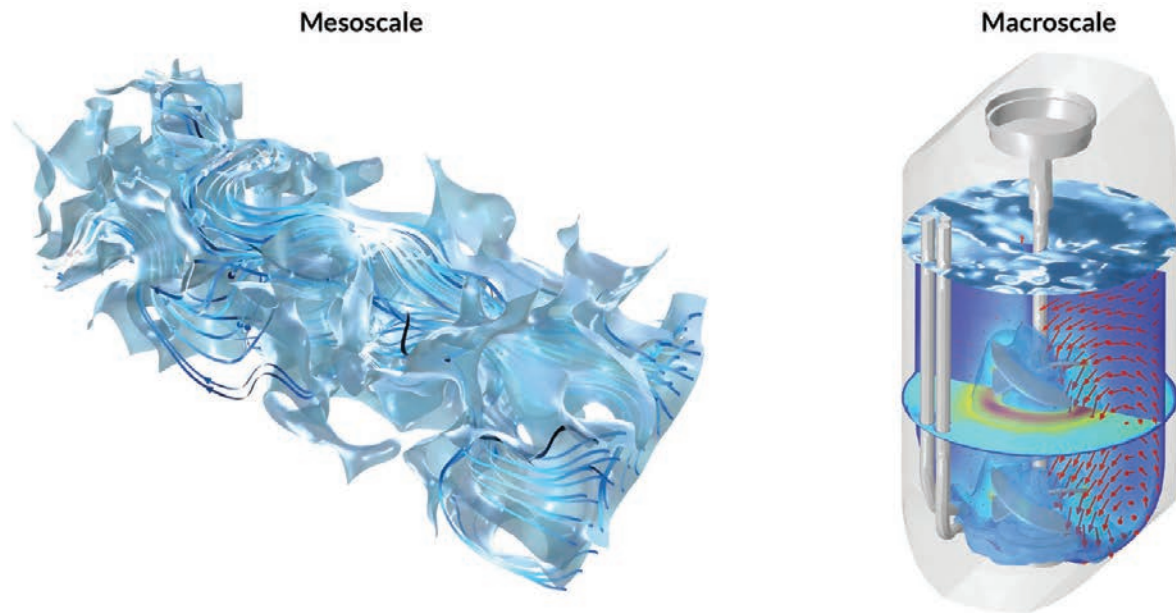


図2 メソスケールのモデルは、より小さな部品を通る流れを可視化します (左)。一方、マクロスケールのモデルは、デバイスの性能を評価することを可能にします (右)。

ティストである Friedrich Maier 博士は説明します。“1種類の薬剤の開発コストは20億ユーロを超え、開発に要する時間も相当な額に上ります。” (図1)

バイオ医薬品の開発コストは、主にその複雑な分子構造、特殊な製造プロセス、そして業界に対する規制要件のために高額です。特に物理実験は高額な投資となります。モデリングとシミュレーションはこうした負担を軽減し、実験への依存度を低減しますが、モデルを適切に構築することは容易ではありません。再現が必要な生物学的プロセスは複雑で、変動が大きく、再現が容易ではないためです。Sartorius 社は、バイオ医薬品およびライフサイエンス分野の顧客に対し、生物学的プロセスをデバイスに綿密に統合することでサポートを提供し、エラーの伝播を最小限に抑え、製品収率を最大化することを目指しています。

CAE 部門の導入とコラボレーションと開発の最適化

2019年、Sartorius 社は製造上の課題解決を支援するために社内に CAE 部門を導入しました。Maier 博士はどこから着手すべきかを明確に理解していました。“最初のステップは、使用するツールを定義することでした”と彼は語ります。

Maier 博士と彼のチームは、デバイスを開発するエンジニアとプロセスを検証する科学

者の間で、知見と結果の共有を改善したいと考えていました。チームは COMSOL Multiphysics ソフトウェアの導入を決定し、以来、COMSOL Multiphysics は CAE ツールキットの重要なツールとなり、円滑なコミュニケーションと問題解決のための重要な要素となっています。

CAE 部門は、エンジニアリング部門の同僚にシミュレーションソフトウェアの使用方を指導し、社内プロジェクトの品質チェックを行える社内シミュレーションコミュニティを構築しました。“私たちの課題は、物理特性、プロセス、空間と時間の次元、そしてモデリング手法で考慮する必要がある材料や材料の相互作用によって定義されます”と Maier 博士は述べています。

Sartorius 社で CAE 部門が設立されて数年が経った現在、チームは CAE と V 字モデル開発アプローチを組み合わせた開発プロセスを確立しています。“アイデア段階では、コストレベルを検討し、それを主要項目に分解します。そして、内部のプロセスを理解した上で、再びシステムレベルに構築していきます”と Maier 博

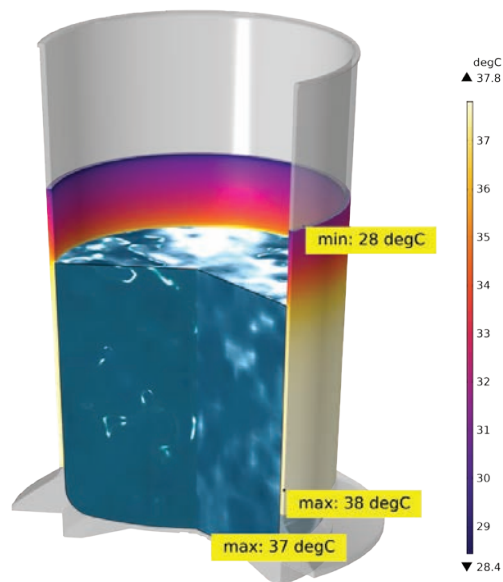


図3 このモデルはヒートジャケットの過渡挙動を捉え、温度分布、センサーとスイッチの性能、加熱効率を明らかにし、材料の完全性に影響を与える可能性のある潜在的なホットスポットを特定します。

士は述べています。このアプローチは、専門家を招き入れて設計を最適化し、製品の改善方法に関するアイデアを共有し、最終的にデジタルプロトタイプを作成する成熟段階を含む、生産チェーン全体に広がっています。

Sartorius 社の CAE 部門は、様々なスケールレベルにまたがり、幅広いバイオ医薬品デバイスを網羅する多様なプロジェクトに取り組んでいます。各プロジェクトは独立して運営されているため、集中的なイノベーションが可能です。あるプロジェクトでは、チームはバイオリアクターを開発しました。同時に、メソスケールでの膜構造の3Dモデリングに関する研究も進めていました。これは、バイオリアクタープロジェクトとは独立して実施された研究です。しかし、このメソスケールモデルから得られる知見は、バイオリアクターアセンブリやその他のバイオ医薬品デバイスの不可欠な部品であるフィルターの設計を向上させます (図 2)。

彼らのシミュレーションの大部分はマクロスケールで行われていますが、Maier 博士と CAE チームはシステムの相互作用も調査しています。“原料から医薬品までのバリューチェーン全体を見ると、ピペット、オーバーマキサー、下流工程、そして薬剤投与量に達するまでの多くのろ過クロマトグラフィー工程、凍結、最終充填に至るまで、膨大な数のリクエストが私たちの机の上に積み重なっています”と Maier 博士は述べています。これほど幅広いプロジェクトを抱えているため、CAE チームは複数の物理領域をモデル化できる必要があります。

“バイオ医薬品はマルチフィジックスです”と Maier 博士は言います。“私たちの製品では、堅牢性を確保するための構造力学に重点を置く必要がありますが、同時に数値流体力学にも着目し、その性能を把握する必要があります。あらゆる場所に液体系が存在します…そして、この点において COMSOL Multiphysics は非常に役立っています。”

▶ モデルから製造デバイスへの移行

Sartorius 社の CAE 部門は、ミキサーや多孔質媒体などの特殊な CFD アプリケーションに COMSOL Multiphysics を頻繁に使用してきました。さらに、凍結、溶接、反応輸送、伝熱プロセス、流体構造連成 (FSI) を考慮する必要のあるプロジェクトにも取り組んできました。Maier 博士は方程式ベースモデリングを用いることで、制御と制御プロセスを統合し、設計性能の向上、開発期間の短縮、試作の削減を実現しました。

CAE 部門のシミュレーションは、組織全体の専門家に多様な現象に関する詳細な知見



図 4 ヒートジャケットが一体的に取り付けられた Univessel® SU.

を提供してきました。根本原因分析においては、デバイス内部を観察できない場合など、物理的な試験では得られない知見を得ることで、専門家は知識を強化することができます。シミュレーションは、Sartorius 社の設計者の試験プロセスにも役立ちます。

“私たちは試験に挑み、試験もまた私たちを試す。つまり、それは双方向のやり取りです”と Maier 博士は説明します。結果は、試験とシミュレーションの両方における不確実性を示す可能性があります。そこから、チームは追加のシミュレーションや測定が難しい指標を用いてテストを拡張し、テストの取り組みを最適化できます。

▶ 単一プロトタイプによるバイオリアクターアクセサリの開発

COVID-19 パンデミックの間、Univessel® SU バイオリアクターポートフォリオは、バイオ医薬品の製造には高品質な製品が必要であることを実証しました。オリジナルの Univessel® SU バイオリアクターは、BioNTech 社の最初の COVID-19 ワクチン製造における重要なコンポーネントであり、その成功を受けて、Sartorius 社は機能とサイズを拡充した改良版の開発を決定しました。その機能の一つが、バイオリアクターの重要なアクセサリであるヒートジャケットです。ヒートジャケットの開発は、CAE 部門の典型的なアプローチです。

チームは、市場で効率の低い市販のヒートジャケットから調査を開始し、設計をモデル化してより良いものを開発することにしました。新しいヒートジャケット設計 (図 3) を表すモデルの構築には、センサー、スイッチ、コントローラーを考慮した CFD、伝熱、方程式ベースのモデリングが含まれました。Maier 博士によると、その結果は開発チームに、スイッチやセンサーの配置場所や加熱の分配方法など、明確な推奨事項を提供し、スマートな設計に役立ったとのことでした。

“これにより良好な過渡応答を制御したシミュレーションが得られ、最適化された設計を導き出すことができました”と Maier 博士は述べています。シミュレーションと実環境実験では温度が完全に一致し、チームは設計のプロトタイプを1つ作成するだけで済みました (図 4)。

Sartorius 社の CAE チームが活用する各種ツールのおかげで、同社はバイオ医薬品製造における課題を克服する効率的で高性能な部門を確立しました。その根底にある目標はただ1つです。“私たちの目標は、ライフサイエンスおよびバイオプロセッシング分野において、科学者やエンジニアが研究開発をより簡便かつ迅速に進め、新しく優れた、そしてより手頃な医薬品を生み出せるよう支援することです”と Maier 博士は説明します。◎

IAV, Germany

ツインバッテリー アプローチで EV 開発を推進

IAV 社は、エネルギー効率、エネルギー密度、そして環境への配慮を考慮し、相補的なナトリウムイオン電池と固体リン酸鉄リチウム電池技術をツインバッテリーシステムに組み合わせました。このシステムは、マルチフィジックスシミュレーションによって最適化、検証されており、自動車メーカーと電池設計者に新たな可能性をもたらします。

JOSEPH CAREW 著

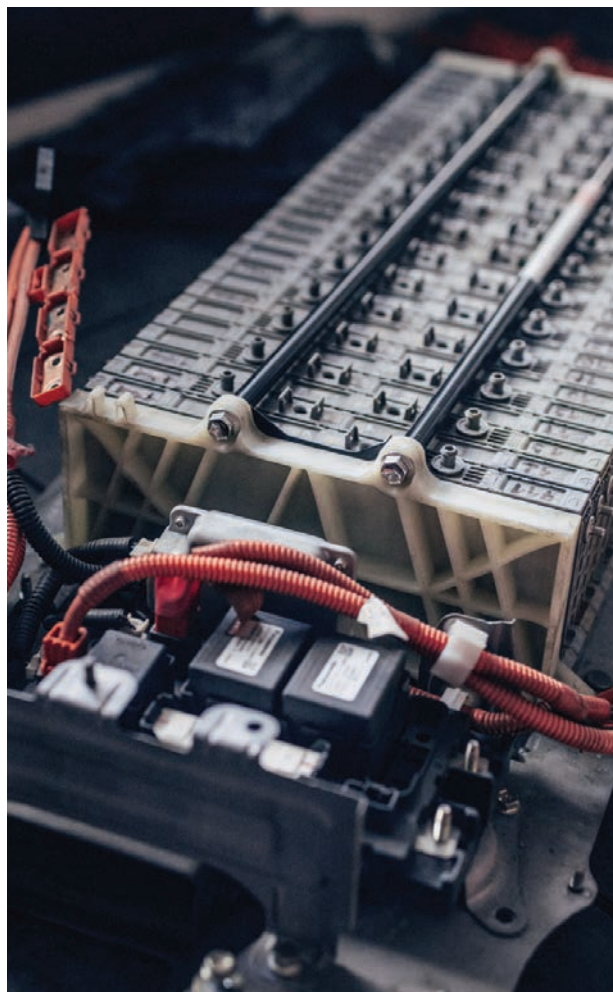


図 1 修理工場におけるリチウムイオン電池。

従来の電池製造に必要な希少原材料の使用を避けつつ、エネルギー密度を犠牲にしないことは、世界の電動化を目指す企業にとって大きな目標です。リチウムイオン電池は、今日のほとんどの電気自動車 (EV) の動力源となっていますが、高コストに加え、持続可能性と環境への懸念も伴います。電池業界のエンジニアや開発者は、これらの懸念に対処し、コストを削減しながら、ほとんどのリチウムイオン用途の要件を満たす新たなアプローチを見つけるため、代替の化学組成と設計を研究しています。

IAV 社は世界最大級のエンジニアリング企業の一つです。未来のモビリティを見据えた広範なポートフォリオにおいて、電池開発は重要な役割を果たしています。同社の技術コンサルタントである Jakob Hilgert 氏を含む IAV のエンジニアチームは、適切なアプローチを採用すれば、より優れた電池設計を実現できると考えました。チームは、既存の単一化学組成設計の成功要因と、それぞれの阻害要因に関す

る知見に基づき、電池のエネルギー密度、持続可能性、熱管理の問題を解決する画期的なアプローチ、すなわちツインバッテリー設計を開発しました。

IAV のエンジニアたちは、リチウムイオンセルだけに頼るのではなく、2種類の異なる電池化学を組み合わせることで、EV 用途に対応できる、より安価で環境に優しいシステムを構築できると考えました。このアプローチを念頭に、IAV 社はマルチフィジックスシミュレーションを活用し、ツイン

バッテリーソリューションの設計と検証に成功しました。

リチウムイオン電池の問題点の回避

リチウムイオン電池 (図 1) は、高いエネルギー密度のためによく使用されますが、その製造には環境への悪影響が伴う可能性があります。リチウムの露天掘りは、植生を伐採し、有毒な土壌を作り出し、人や動物の病気のリスクを高める粉塵を放出します。これらの電池の製造には多額の費用が

かかり、比較的希少な材料に依存しています。IAV のエンジニアたちは、ツインバッテリーアプローチに組み込む技術を選択する際に、これらの懸念を回避するよう努めました。

“リサイクルと資源に重点を置いた電池に備える必要があります”と Hilgert 氏は述べました。

“理論上可能な限り最高のエネルギー密度を持つセルを常に採用して、それを解決策として採用できるわけではありません。”

IAV のチームは、ナトリウムイオン電池 (SIB) とリン酸鉄リチウム (LFP) 固体電池 (SSB) を設計

に組み合わせることにしました。これは、これらの化学組成が互いに補完し合うという独自の特性を持つためです。SIB は通常、従来のリチウムイオン電池よりも安価で、調達の持続可能性が高く、リサイクルも容易です。しかし、エネルギー密度は比較的低く、サイクル寿命も短い傾向があります。一方、従来の LFP は安定性と長いサイクル寿命で知られていますが、従来のリチウムイオン電池と比較するとエネルギー密度が劣ります。最後に、SSB は従来のリチウムイオン電池の化学組成よりも高いエネルギー密度を持

つことで知られています。SIB と LFP-SSB を組み合わせることで、理論的には環境フットプリント (図 2) が改善され、製造コストが削減され、EV の駆動など要求の厳しい用途に適した比較的高いエネルギー密度を実現できる設計となるはずです。

“自動車用電池の開発は急速に進んでいます。これは希少原料の需要増加と密接に関連しています”と Hilgert 氏は述べています。“セルの化学組成の多様化は、市場の変動に対応し、同時にシステムコストを最小限に抑えるための有望なアプローチです。”

熱適合性の実現

IAV 社のツインバッテリー設計は、SIB と LFP-SSB 間の熱適合性をテストするためにも開発されました。SIB からの廃熱を LFP-SSB に導くことで、LFP-SSB の固体セルを急速に活性化し、最も性能を発揮する高温域まで押し上げると同時に、SIB が最大動作温度を超えるのを防ぎ、システム全体のエネルギー効率を向上させるというアイデアでした。

“高温で動作するセルと低温で動作するセルがある場合、高温で動作するセルの排熱を利用して

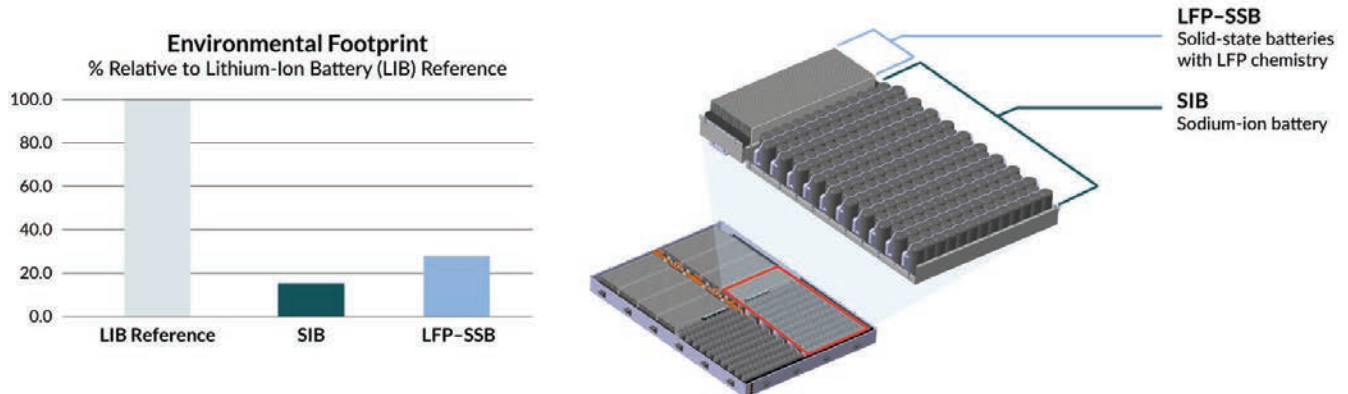


図 2 ツインバッテリー方式で使用される2つの電池技術の比較。

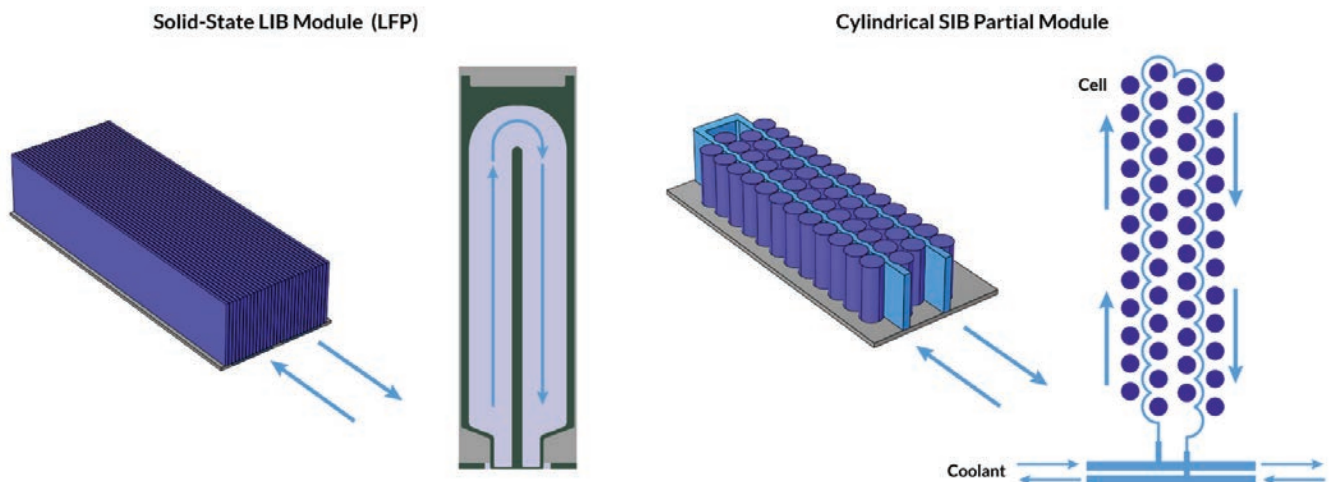


図 3 COMSOL モデルに表示される2つの電池技術。

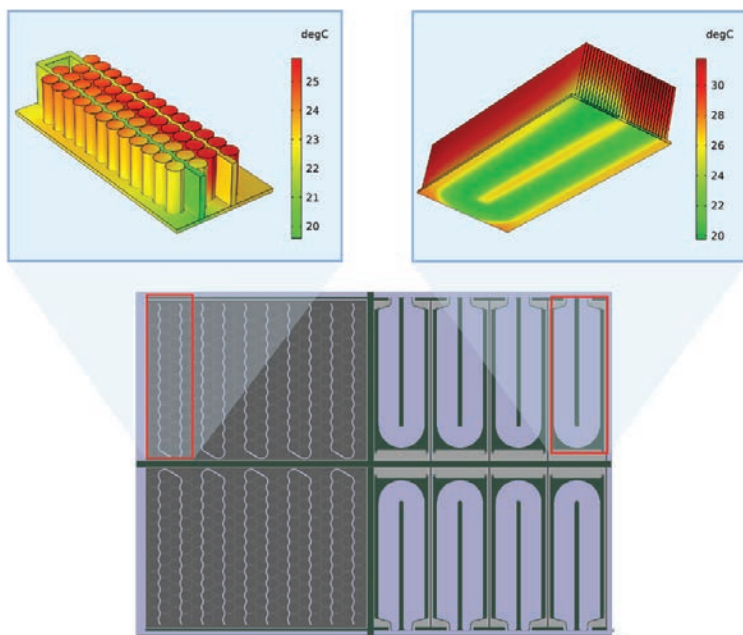


図4 1つのシステムとして機能する2つのバッテリー技術。

低温で動作するセルを加熱します。その逆もまた有効です”と Hilgert 氏は述べています。“そのため、低温状態を望むセルから高温状態を望むセルへエネルギーを移行する冷却システムを考案しました。”

液体電解質を使用するセルは熱安定性に限界があり、冷却が必要です（ナトリウムセルとリチウムセルの両方に当てはまります）。また、約60℃を超える温度は避ける必要があります。固体セルは固体電解質を使用しているため、より高温で動作できますが、使用可能なイオン伝導性に達するには高温が必要です。したがって、このコンセプトでは SIB セルは冷却が必要であり、SSB セルは加熱が必要であり、両方のセルは相互の熱交換から恩恵を受けます。IAV のエンジニアは、特にこの相互作用が最適化における大きな課題となることを認識しており、複雑さを軽減するにはモデリングとシミュレーションが不可欠だと感じていました。そこで、チームは COMSOL Multiphysics® ソフトウェアを採用しました。

電池システムの設計

IAV 社は10年以上前に、設計ワークフローの改善を目的として COMSOL Multiphysics ソフトウェアを導入しました。

“私たちは、様々な専門分野ごとに膨大な数の専用ツールを使用していました”と Hilgert 氏は言います。“電池の開発を始めたとき、‘これらすべての分野に対応できる1つのツールが必要だ’と考えるようになりました。”

このプラットフォームの包括的なワークスペースにより、IAV 社はクライアント向けに不要なプロトタイプを作成することを避け、設計を容易に最適化することができます。ツインバッテリーモデルを使用することで、IAV のエンジニアは様々なパラメーター（例えば、特定の回路の冷却に影響を与えるパラメーターや、特定の温度におけるセルの最大出力など）を微調整し、設計を変更することで、実際の製品が

可能な限り効率化されるようにすることができます。

“これらのパラメーターをすべて推測する必要がなくなるため、プロトタイプの技術完成度は大幅に向上します”と Hilgert 氏は述べています。

電池モデリングはマルチフィジックスを扱うため、COMSOL® ソフトウェアの機能はツインバッテリーシステム（図3）開発プロジェクトに最適でした。実際に動作する電池を設計するには、適切な熱管理、各セルの材料がモジュール内でのどのように機能するかについての理解、電池

内部のプロセスにおける圧力変動に関する知識、そして全体の電気化学的理解が必要です。また、充放電中の膨張や収縮がこれらのシステムのメカニクスにどのような影響を与えるかについても理解する必要があります。

“高度に統合されたモデルベース開発プロセスを用いることで、様々なセルの化学組成、設計、冷却コンセプトの可能性を調査できます”と Hilgert 氏は述べています。“これにより、物理的なプロトタイプの必要性が軽減され、自動車用途の一般的な要件に合わせて性能を最適化することができます。”

加熱、冷却、設計最適化

IAV のエンジニアは、マルチスケール、マルチドメイン連成シミュレーション（図4）を用いて、ツインバッテリーコンセプトの性能を検証しました。チームは、コンセプト開発中に設計が期待通りに機能することを発見し、より優れた電池設計への道筋を切り開きました。モデルは、固体セルの非常に

高速なオンデマンド起動と、SIB（固体セルベース）の廃熱による部分的なプリコンディショニングを示しました。チームは2つのセルの熱管理を最適化し、寒冷条件下でのSSB起動に必要な時間とエネルギー入力を短縮しました。

“シミュレーションによって、私たちが考えていたことが実際に実現可能であることが示されました”と Hilgert 氏は述べています。“廃熱は実際には冷却システムによって輸送され、その熱量は電池の他の部分を加熱するのに十分な量です。”

IAV 社は、仮想プロトタイプとして機能するモデルを用いて、複数のシナリオを実行し、様々な周囲条件やパラメーター選択に対する感度レベルを比較することができました。チームは、3Dセル温度分布、擬似2D（P2D）電気化学モデリング、1D冷却回路ダイナミクスを包括的な電動パワートレインモデルに統合することに成功しました。

アプリによるツインバッテリーモデルの民主化

IAV 社のシミュレーション専門家は、顧客向けにホワイトボックスモデルを開発した後、COMSOL Multiphysics のアプリケーションビルダーを使用して、その機能をシミュレーションアプリにパッケージ化します。これは、入出力が制限されたカスタム構成のユーザーインターフェースで、顧客は社内異なる分野の同僚に配布し、それぞれの状況でシミュレーションを実行し、結果を評価することができます。アプリのユーザーは、詳細な知識を必要としません。“こうしたシミュレーション作業を、普段モデリングを行わない人々に広めたい”と Hilgert 氏は言います。

“まずは基本機能から始めて、全員に配布すれば、誰も問題なく使えるでしょう。後から、より詳

“COMSOL Compiler が配布オプションとして利用できることは、私たちの仕事にとって大きなメリットです。ライセンスを待つことなく、いくつかのアプリケーションをコンパイルするだけで、独自のモデルをシミュレーションやプロファイリングテストに使用することができます。”

— JAKOB HILGERT, IAV 技術コンサルタント

細な機能が必要になった場合は、アプリケーションに合わせてアプリを拡張し、物理特性、オプション、ボタンなどを追加していくことができます”と Hilgert 氏は語ります。

IAV 社のエンジニアは、COMSOL Compiler™を使用してシミュレーションアプリをスタンドアロンの実行ファイルに変換し、基盤となるモデルのホワイトボックス版と一緒に顧客に送付しています。顧客は COMSOL ライセンスなしでアプリを実行できます。これにより、分散開発環

境でのシミュレーション実行が容易になります。ツインバッテリー設計の場合、冷却システムエンジニアは COMSOL ライセンスなしで並列最適化計算を実行できます。シミュレーション結果へのアクセスが合理化されることで、開発プロセスが効率化され、社内および IAV の顧客の間でモデルベース開発の受け入れが大幅に向上しました。

“COMSOL Compilerを配布オプションとして利用できることは、私たちの仕事にとって大きなメリットです”と Hilgert 氏は言いま

す。“ライセンスを待つことなく、アプリをコンパイルして他の人に作業を任せるだけで、独自のモデルをシミュレーションやプロファイリングテストに使用できます。”

COMSOL ソフトウェアの API を活用し、IAV 社が構築するアプリをリモート制御するために、Java コードのインターフェースが使用されています。このリモート制御により、ユーザーは反復的なモデリング手順を自動化できます。また、チームはファンクショナルモックアップユニット (FMU) インターフェースも実装しており、

サードパーティ製ソフトウェアの車両シミュレーション環境と連携させてコシミュレーションを実現しています。

ツインバッテリーアプリのユーザーには、電圧、充電状態 (SOC)、温度、消費電力が電池管理システムと冷却システムへの入力として提供されます。設計エンジニアはこれらのアプリを通じてセル内部の状態を確認し、変化する電池性能を評価しながら冷却システムに変更を加えることができます。

社内でのアプリの使用

IAV 社内で使用されるアプリは、多くの場合、COMSOL Multiphysics や外部ツールチェーンとのコシミュレーション用に設計されており、IAV 社の仮想テストベンチインターフェースを介してルーティングされます。図 5 は、コシミュレーションに使用されるバッテリーモジュールアプリの例を示しています。このアプリは、電流、電圧、温度などのモデルの内部状態に関する基本的なユーザーフィードバックを提供します。アプリの結果は、コシミュレーションフレームワーク内の他のプログラムにリアルタイムデータストリームとして提供され、そこで詳細な評価が行われます。

より良い電池のための戦いに勝つ

IAV 社は、ツインバッテリー設計コンセプトが、電池業界の他の企業にとって、たとえ相反する要求があっても解決策が存在することを示すショーケースになると期待しています。

“ツインバッテリーアプローチは、自動車メーカーや電池設計者に、問題を解決するためのより多くの選択肢を提供します”と Hilgert 氏は述べています。“また、全く異なる原理を持つ将来の技術を既存のフレームワークに統合する方法があることも示しています。”◎

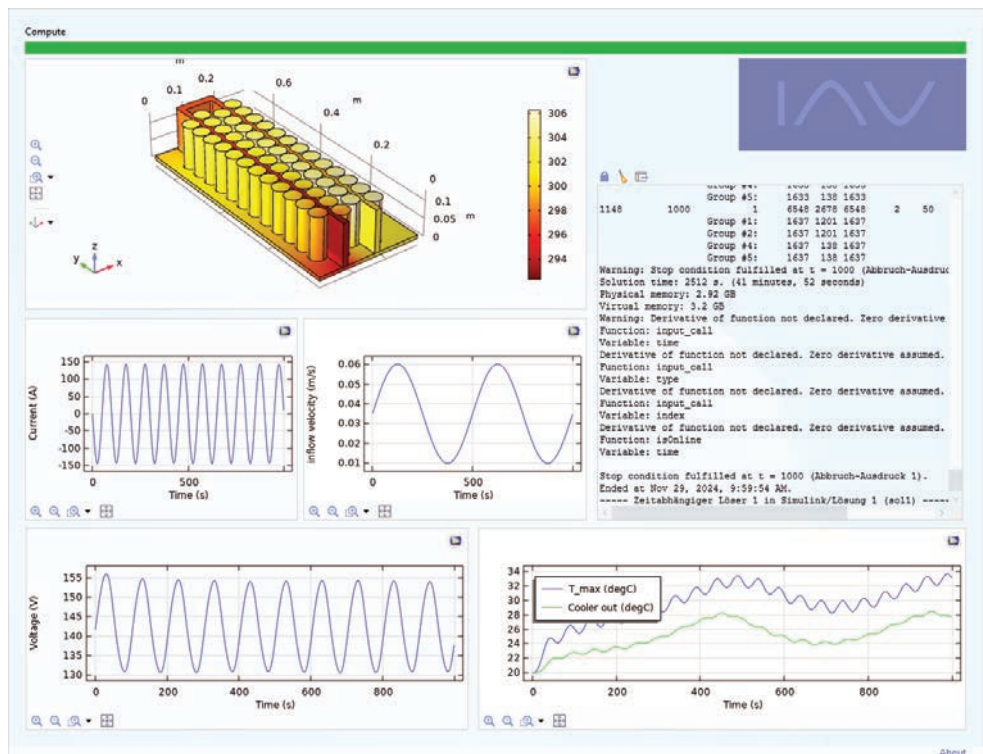


図 5 IAV 社のバッテリーモジュールアプリでは、出力グラフによって、実行中のモデルの状態に関する便利な視覚的フィードバックがユーザーに提供されます。

COMSOL, Massachusetts, USA

トポロジ最適化によるジェネレーティブデザインの強化

ジェネレーティブデザインとトポロジ最適化は設計プロセスを自動化し、設計反復の効率を高めます。どちらのアプローチにも利点があり、これらを組み合わせることで、設計者は両方の利点をバランスよく兼ね備えた製品を開発できます。

BETH BEAUDRY 著

ジェネレーティブデザインは設計プロセスを自動化することで、製造における自由度を高めます。トポロジ最適化はジェネレーティブデザインの一種と見なすことができますが、その独自の性質により、2つのプロセスを組み合わせたハイブリッドアプローチに組み込むのに適しており、特に性能面で製品を改善できます。

ジェネレーティブデザインとトポロジ最適化の主な類似点は、どちらも設計者が定義した基準に基づいて計算ソフトウェアを使用して設計を生成する点です。設計者が各設計反復を手動で作成する点が異なります。しかし、ジェネレーティブデザインプロセスは、最終

製品の外観に対する設計者の要件をより重視するという点で、トポロジ最適化とは異なります。このため、トポロジ最適化はルールベースのプロセスと呼ばれることがよくあります。設計者が設計値を定義し、ソフトウェアはそれに従います。トポロジ最適化は、製品の見た目よりも性能に重点が置かれている場合によく用いられます。さらに、トポロジ最適化は実はルールベースというよりは物理ベースであり、設計者が設定したルールに主に従うのではなく、問題の物理的な特性に基づいて最適化が行われます。

一方のプロセスではプレゼンテーションを優先し、もう一方のプロセスではパフォーマン

スを優先します。ジェネレーティブデザインとトポロジ最適化を組み合わせたハイブリッドアプローチを採用することで、十分なパフォーマンスと最適なプレゼンテーションを備えた最終製品を作成できます。さらに、純粋なジェネレーティブアプローチではなくトポロジ最適化を組み込むことで、より持続可能な最終製品を実現できます。トポロジ最適化で作成された設計は客観的な基準に基づいており、時代を超越する傾向があるためです。

ハイブリッドアプローチとしては、1つの大型製品の異なるコンポーネントにジェネレーティブデザインとトポロジ最適化を適用することが考えられます。最も一般的な方法は、コ

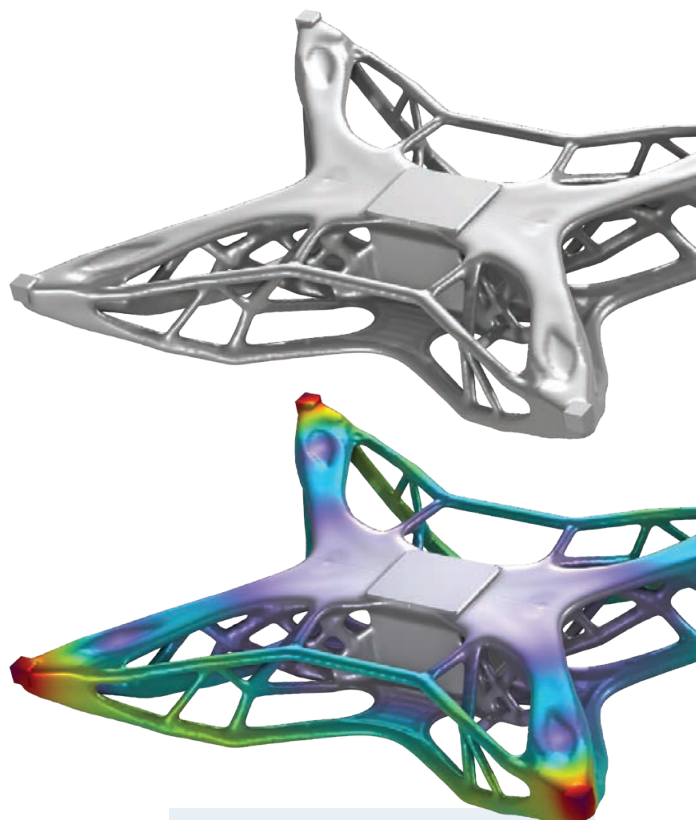


図1 上: COMSOL Multiphysics® のトポロジ最適化機能とアドオン最適化モジュールを使用することで、優れたパフォーマンスを備えたドローンモデルを生成できます。下: 最適化プロセスを視覚的に理解しやすくするために、モデルに変位量が表示されています。

ンポーネントの大部分を従来の方法で製造し、特定のコンポーネントにのみジェネレーティブデザインとトポロジ最適化を適用するというものです。どの部品のプレゼンテーションを犠牲にしてパフォーマンスを向上させるか、またその逆を行うかなど、各コンポーネントのニーズをどのようにバランスさせるかは設計者の責任となります。

トポロジ最適化の詳細

トポロジ最適化を使用する場合、設計者は設計のための幾何学的仮想空間(多くの場合、箱のようなフレーム)を作成し、必要なパラメーターをソフトウェアに入力します。ソフトウェアは、材料の削除と追加を繰り返して設計を完成させ、この幾何学的空間に収まる最適化された設計を生成します。トポロジ最適化は通常、設計プロセスの初期段階で用いられます。この段階では柔軟性が高く、設計レイアウトのトポロジ変更に関連する性能向上の可能性が高くなるためです。プロジェクトが製造段階に近づくほど、設計者が設計の見直しに多くのリソースを費やすことをいとわない限り、設計変更は少なくなります。トポロジ最適化により、設計者は良好な性能を備えた最適な設計を決定し、製造段階に近づくにつれて、シミュレーション精度に重点を移すことができます。シミュレーションの精度は常に重要ですが、特に設計プロセスの後半、つまり設計者がシミュレーションを用いて、デバイスが物理的なプロトタイプになった際にどのように動作するかを予測する際には、その重要性が増します。

トポロジ最適化の設計自由度をより深く理解するために、ドローンの構造を作成するという以下の例を考えてみましょう。このモデルでは、2つの荷重ケース、体積率、および最小長さスケールを入力します。

この場合の目標は、特定の材料量で剛性を最大化することです。荷重ケースは対称であるため、ドローン全体ではなく、領域の4分の1のみをモデル化することで、時間と計算リソースを節約できます。その後、結果の可視化ステップでモデルが複製され、プロセスの最後に最適化された完全な設計を確認できます(図1)。

このトポロジ最適化の例を実行すると、計算はドローンの電池を中央に、4つのモーターを四隅に配置した状態で開始されます。最初にモデル化された4分の1が設計の残りの

部分にミラーリングされ、ソフトウェアがモーター同士を接続し、中央の電池に材料を追加していく様子を見ることができます。材料の剛性と重量の比率は、最終結果が明確な物理的解釈を持つまで調整されます。

製造への適合性

設計を実際に製造する際には、その複雑さがどの製造プロセスを使用するかを決定する上で重要な要素となります。ジェネレーティブデザインとトポロジ最適化の独自の成果は、通常、従来の製造プロセスや大量生産には適していません。そのため、これらの手法、あるいはそのハイブリッド手法で作成された設計は、積層造形と併用されることがよくあります。例えば、ドローンモデルの例は、積層造形に最適です。

しかし、この適合性があるからといって、積層造形がソフトウェアで生成された設計を実現するための唯一の選択肢であるわけではありません。多くの場合、設計者はトポロジ最適化を使用して設計アイデアを改善したいと考えますが、同時に、積層造形では通常実現可能なよりも低コストまたは大規模に製品を製造する必要がある場合もあります。このような設計を従来の製造プロセス向けに準備する場合、例えば、最適化プロセスにおいてフライス加工の制約を考慮する必要がある場合があります。COMSOL®シミュレーションソフトウェアに搭載されているトポロジ最適化のための専用機能は、このような制約を考慮するために使用できます。

トポロジ最適化されたホイールリム設計を減算型製造で製造する必要があるシナリオを考えてみましょう。図2は、COMSOL®ソフトウェアを使用してモデル化した例です。最適な剛性を持つホイールリム設計が生成され、その軸に沿ってフライス加工の制約が追加されます。しかし、フライス加工拘束を追加すると設計の自由度が低下し、特定の質量拘束における剛性も低下します。この場合、フライス加工拘束を追加すると、従来のトポロジ最適化で生成した場合よりも剛性が30%低下した設計になります。この妥協は、製造要件を満たすために必要です。

完全な設計の自由度が許可された場合、最適な設計は通常、荷重ケースと同じ対称性を持ちます。しかし、対称性を実現するには多くの荷重ケースが必要になる場合があり、荷重ケースの数が多いと計算コストが高くなる



図2 ホイールリムモデルの変位量。

可能性があります。この例では、ホイールが回転する必要があるため設計の対称性が期待されますが、対称的な荷重ケースがないという課題に直面しています。このため、荷重ケースが設計にどのような影響を与えるかを確認するには、最適化の反復ごとにホイール全体をモデル化する必要があります。

ここで対称性を実現するために、セクターの1つを最適化し、その設計を他のセクターにコピーすることで、設計のセクター対称性を明示的に強制することができます。ドローンモデルの設計において対称性機能の使用が役立ったのと同様に、これにより計算コストが削減され、プロセス効率が向上します。

最終的には、優れた性能を備えながら製造要件を満たす最適化された設計が得られます。

シミュレーションによる設計のカスタマイズ

ジェネレーティブデザインと同様に、トポロジ最適化は設計プロセスを自動化し、設計者は手作業による反復よりも効率的に選択肢を検討できます。ジェネレーティブデザインとトポロジ最適化はどちらも COMSOL®ソフトウェアで活用でき、自動化された設計を特定の製造方法に適応させるカスタマイズ機能も備えています。これらの機能は、構造力学、流体流動、伝熱、音響など、あらゆる工学、科学研究分野、そしてあらゆる物理学分野に適用できます。例えば、このソフトウェアのトポロジ最適化機能は、自動車業界で電気モーターの設計に積極的に活用されています。◎

The University of Southern Mississippi, Mississippi, USA

海底構造を 可視化するための 無人潜水艇の訓練

南ミシシッピ大学は、シミュレーションアプリを開発、活用し、無人潜水艇および水上艇の訓練に機械学習モデルを統合しています。

JOSEPH CAREW 著

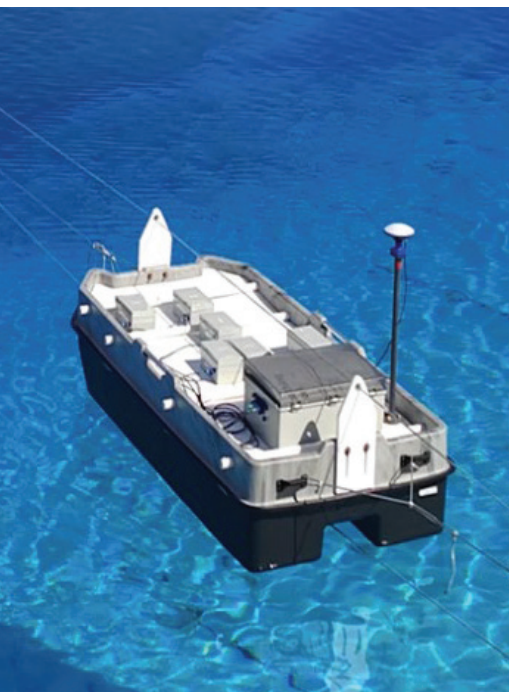


図 1 USM が実験データを記録するために使用したセンサープラットフォーム。

ミシシッピ州沿岸の穏やかな日、小型水上艇が試験海域で規則的に前後に牽引されています。この低磁気特性センサープラットフォームは、強磁性ターゲットを探して海底を精力的にスキャンしています。これらのスキャンは、南ミシシッピ大学 (University of Southern Mississippi, USM) の Roger F. Wicker 海洋事業センターが実施している野心的なプロジェクトの一部に過ぎません。USM の研究者たちは、モデリング、シミュレーション、機械学習 (ML) を組み合わせることで、波の下に何があるのかを自律的かつ正確に明らかにできるインテリジェントな無人潜水艇 (UUV) の基礎を築いています。

▶▶ 海底の強磁性構造のモデリング

多くの港湾の底 (および一般的な海底) には、人工構造物や瓦礫、さらには不発弾などの強磁性体が存在します。港湾交通がこれらの危険物に遭遇しないようにするには、航海図にそれらの位置を正確に反映させる必要があります。これらの水中磁気異常をスキャンするより効果的な方法の一つは、高度なセンサ

ー機器を搭載した UUV を使用することです。しかし、これらの探査機には、製造コストが高く、物理的なスキャンが複雑で、プラットフォームノイズや環境ノイズ (環境によるクラッタ、風、波など) の影響が大きいため、必ずしも正確な画像が描けるとは限らないという課題があります。さらに複雑なことに、海底の様相が一意ではないため、異なる海底構造のスキャン結果が似通って見えることがあります。USM のチームは、これらの課題を克服し、UUV を用いたより高精度なセンシングおよびマッピング技術の実現に向けて研究を進めています。

“私たちは、海中と海面の両方 (図 1) における、新しい無人システムプラットフォームのデータ駆動型試験と評価、そして高度なセンサー統合を数多く行っています” と、USM の研究者である Jason McKenna 博士は述べています。“特に、環境ノイズやプラットフォームノイズが大きい UUV に磁気センサーを直接統合する方法について研究しています。” 研究チームは、モデリング (実証データにより検証済み)、シミュレーションアプリ、機械学習技術

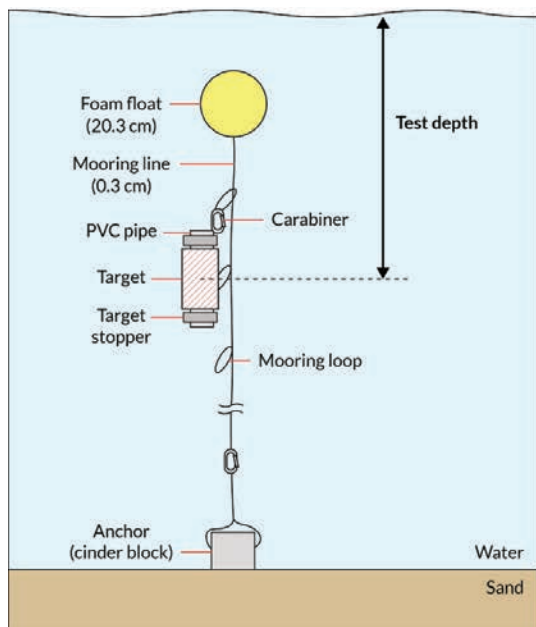


図2 長さ 20.3 cm, 直径 2.5 cm の円筒形磁石。

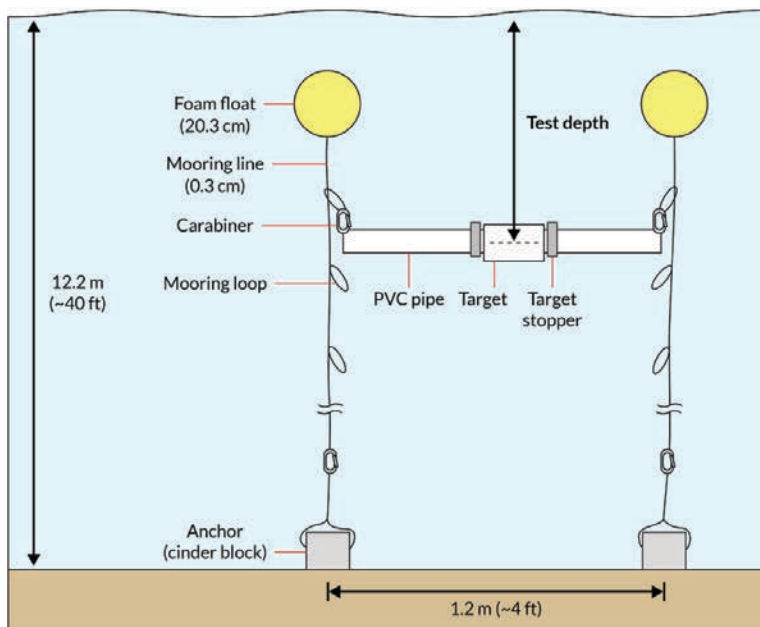


図3 長さ 30.5 cm, 直径 11.4 cm の水平方向の鋼管。

を活用し、UUV に統合可能な計算システムを開発しました。このシステムは、自動ターゲット認識 (ATR) と、UUV が記録する磁気場、そして最終的には重力場データの精度向上を実現します。

» 海底2万里にも満たない

モデルを作成する前に、チームはモデルのベンチマークおよび検証に使用する実測データを取得する必要がありました。そのために、チームは高精度の重力センサーと磁気センサーで調査可能な既知のターゲットがある管理された海洋環境を訪れました。物理実験はメキシコ湾近海で行われ、チームはウインチシステムを使用して、2点間を70メートルにわたってセンサープラットフォームを牽引しました。海面下では、センサープラットフォームは2つの異なるターゲットのいずれかをスキャンしました。1つは長さ 20.3 cm, 直径 2.5 cm の円筒形の磁石で垂直に設置されたもの (図2)、もう1つは長さ 30.5 cm, 直径 11.4 cm の鋼管で水平に設置されたもの (図3)。チームはターゲットごとにこれを数回繰り返し、磁石またはパイプを保持するキャニスターを1メートル、3メートル、5メートルの深さに配置しました。“ここで議論している物理法則は、 $1/r$ の3乗減衰に従うため、磁場は非常に急速に減衰します”と McKenna 博士は述べました。

“何かを観測したいのであれば、対象物に近づく必要があります。そのため、考古学調査を行う際には、一般的に磁力計を曳航し、船舶の振動から十分離れた場所に置きます。船舶の振動はノイズを発生させ、海底からわずか数メートルの地点で浮上させます。”

McKenna 博士は、チームが使用した磁石は、センサーが現場で遭遇する可能性のある振動よりも強い振動を発生させると説明しました。これは意図的に選択されました。

“私たちが使用するデータは決してクリーンではありませんが、(この実験は) 適切なアプローチ、適切な物理学、そして適切な境界条件を用いることで、個々の対象物で経験するであろう現象の多くを近似できることを示しています”と McKenna 博士は述べます。“そして、それらの対象物をすべて加算し、プラットフォームのノイズを導入することで、非常に複雑な結果を得ることができます。”

» 合成データ生成のためのモデル開発

物理実験フェーズが完了すると、USM チームは UUV の性能向上に必要なアルゴリズムを得るために、いくつかのステップを踏む必要がありました。最終的なプロセスは、ポテンシャル場モデルの作成と不確実性定量化 (UQ) 解析の実施、検証済みモデルに基づくデータ

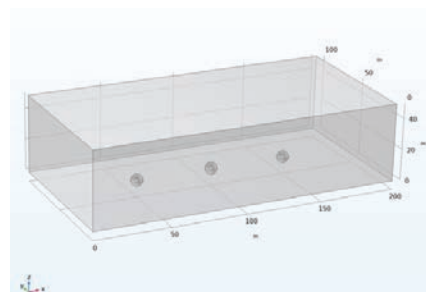


図4 USM がモデリングに使用した形状。内部の3つの球体は、それぞれ長さ 30.5 cm, 70 cm, 91.4 cm (12 インチ, 24 インチ, 36 インチ) のパイプを表しています。

生成可能なシミュレーションアプリの作成、そして最後に、生成されたデータを用いて ML モデルを学習させ、UUV が対象物体を検出できるようにするというものでした。

ポテンシャル場モデル

McKenna 博士と彼のチームは、COMSOL Multiphysics® シミュレーションプラットフォームと AC/DC モジュールを用いてポテンシャル場モデルを構築しました。これらのモデルは、磁場、重力場、または温度場と物体との相互作用を表現できるため、海底とその物体のシグネチャーを定量化するために不可欠です。

McKenna 博士はまず、対象物体の物理的特性を定義し、ソフトウェアに組み込まれている磁場（電流なし）インターフェースを用いて一連のターゲットを生成し、テストベッドを作成しました。次に、シミュレーション空間に低（30.5 cm, 12 インチ）、中（70 cm, 24 インチ）、高（91.4 cm, 36 インチ）の磁気ターゲットを配置した空間構成を導入しました（図 4）。最後に、ターゲットと周囲の媒質との相互作用を計算しました。その後、重力異常と磁気異常（ターゲット）は様々な UUV シミュレーションから記録され、異なるシナリオにおける潜在的な磁場変動のニュアンスを捉えた大規模なデータセットが得られました。これらの UUV シミュレーションに情報を提供するために、研究チームは UQ 解析を使用しました。

不確実性の定量化による変数の精査

UQ 研究は、UUV の動作をモデル化する際に不確実性がどのように作用するかを検証し、実世界の実験では再現できないパラメーターのギャップを埋めるために、チームのプロセスに統合されました。具体的には、McKenna 博士は COMSOL Multiphysics のアドオンである不確実性定量化モジュールを用いて、スクリーニング分析と感度分析を実施しました。このモジュールは、不確実性の特性評価、モデルへの入力不確実性の伝播、そして関心のある出力量の統計分析のための汎用インターフェースとして機能します。

“モデルの不確実性の定量化は非常に直感的でした”と McKenna 博士は言います。

“主成分分析を用いて行うのと同様のスクリーニング分析を試してみたかったのです。これは、多くの変数の依存性を明らかにする非常に洗練された方法です。”

“数分から1時間で、機械学習アルゴリズムのための豊富で堅牢なトレーニングセットを構築できます。”

— JASON MCKENNA, USM 研究員

McKenna 博士と彼のチームは、スキャンで測定しようとする強磁性構造またはデバイスのパラメーターの予想範囲を特定することができました。チームは、ターゲットの長さ、壁の厚さ、磁化率をパラメーター化し、地球磁場（UUV スキャンによる金属物体の探査における特徴の誘発に最も大きく関与する要因）の影響を導入することができました。これらのパラメーターの有効範囲に関する知見により、電位場モデルを容易に再校正、解析することが可能になり、通常であればチームが水上で数日を要し、膨大な計算コストをかけて実施する様々な UUV 探査を再現できるようになりました。

磁気緯度、経度、そして力場の強度をプラスマイナス x% 変化させることで、チームは変

化の影響を測定することができました。“この方法で感度分析を行うことができます。不確実性の定量化を用いてこれらの値の範囲を特定し、ある程度の理解を深め、測定値が期待通りかどうかを判断できます”と McKenna 博士は述べています。“数分から1時間で、機械学習アルゴリズムのための豊富で堅牢なトレーニングセットを構築できます。”

検証済みモデルから ML トレーニングアプリへ

不確実性の定量化研究が完了し、電位場モデルが確立されると、McKenna 博士はシミュレーション結果を実際の実験と比較することができました（図 5）。彼は比較のためにいくつかの単純化されたモデルを作成し、よく一致する多くの有意義な結果を得ました。

良好な結果が得られたことから、McKenna 博士は検証済みモデルを用いて、ML アルゴリズム用の膨大なトレーニングデータへのアクセスを必要とするデータサイエンスチーム向けのシミュレーションアプリ（図 6）を作成しました。McKenna 博士は COMSOL Multiphysics のアプリケーションビルダーを使用してアプリを作成しました。このアプリは使いやすく、科学者が ML トレーニングデータを生成できます。

“いくつかの例に沿ってアプリを構築し、1～2時間でアプリを稼働させることができました”と McKenna 博士は述べています。“様々なパラメーターを入力し、それを変更すると

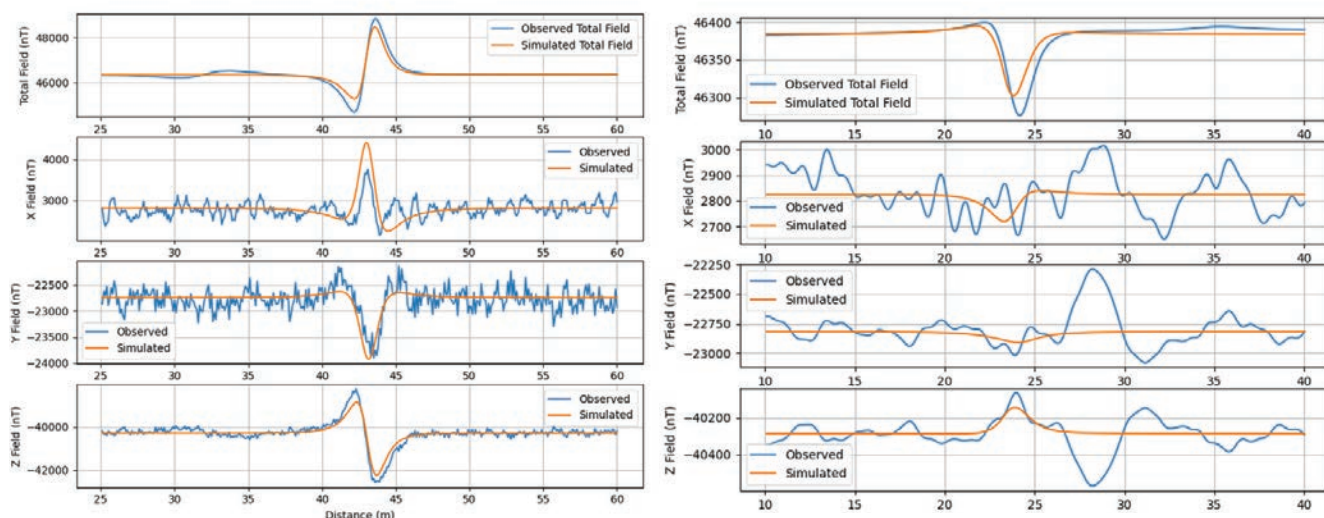


図5 鋼管(左)と円筒形磁石(右)のスキャンとシミュレーションの比較結果。

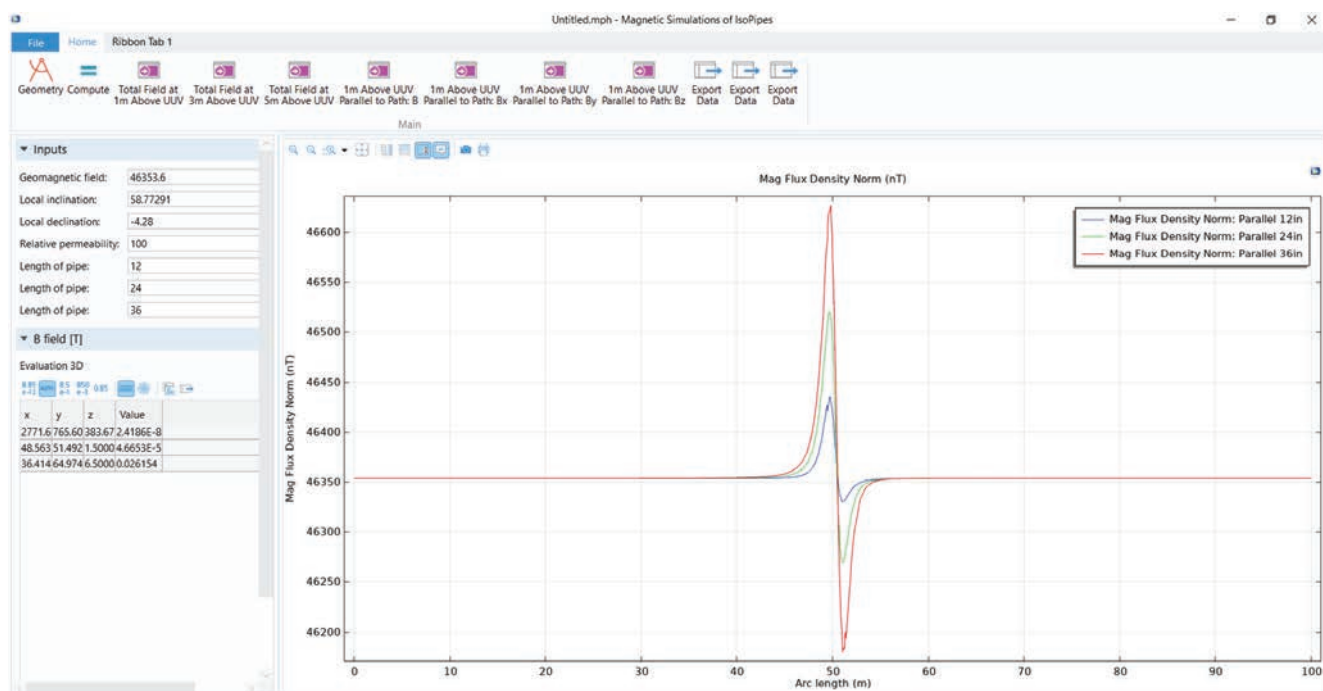


図6 USM のシミュレーションアプリのユーザーインターフェース。左側に入力フィールド、右側に結果が表示されます。

磁力線が変化します。まさに私たちが求めていたものです。”

データサイエンスチームは、モデルがこれらのデータポイントを捕捉できることを確認する必要がありますが、COMSOL® を使用することで、モデルを常に監視することなくそれを実現することができました。データサイエンスチームはパラメーターを変化させ、UUV が遭遇、スキャンすると予想される様々なシグネチャーを開発できます。シミュレーションアプリは、USM にアルゴリズムを適切にトレーニングするために必要な質と量のデータを提供しました。

これらのアプリを使用することで、USM は研究作業を分担し、各チームが専門知識を活かせるようにすることができました。“全員がそれぞれの専門分野で生産性を発揮することができました”と McKenna 博士は述べています。“このようなことを行うにはチームワークが必要です。”

》 機械学習技術

チームが使用した機械学習技術には、長短期記憶 (LSTM) ネットワーク、回帰分析、ツリーブースティング、ディープニューラルネットワーク (DNN) モデルなどが含まれます。

LSTM モデルは、シミュレートされたセンサーシーケンスデータ上で実行した場合に予

測能力がどのように変化するかを評価するために使用されました。この評価は、さらに、シミュレーションが観測データのデータ拡張に効果的に使用できるかどうかを判断するために使用できます。回帰、ツリーブースティング、および DNN モデルは、シミュレーションデータパターンの確認のために選択されました。

これらのモデルはシミュレートされたデータでのみ実行され、LSTM モデルは合計50万を超えるデータポイントから10個のデータポイントの埋め込みシーケンスを使用して実行されました。これらのモデルは、時系列分析を含むシーケンスデータと互換性があるため、UUV 統合センサーデータの解釈に特に有用です。

COMSOL カンファレンスの McKenna 博士の発表 (文献 1) で説明されているように、“COMSOL モデルから生成された合成データセットは、多様なトレーニング例を提供し、ML モデルが複雑な時間的関係とシグネチャーパターンを学習することを可能にします。”

》 インテリジェント UUV の将来展望

河川、湖沼、水路の底には、安全と航行のために記録されるべき強磁性構造物や装置が存在します。UUV は、これらの潜在的な危険箇所をマークし、港湾の航行性を向上させる

航海図の精度向上に重要な役割を果たします。例えば、自然災害で船舶が沈没し、想定外の場所に残骸が残された場合、スマート UUV は海底を迅速にスキャンし、波の下に何があるのかについての洞察を提供することができます。

USM の研究チームは、シミュレーションと機械学習の融合により、UUV の予測能力を向上させることに取り組んでいます。McKenna 博士が“シミュレーション駆動型の機械学習を地球物理学や工学の幅広い分野に取り入れるための指針”と考えているこのプロジェクトは、まだ道のりのほんの始まりにすぎません。彼の将来の目標は、モデルにさらなる複雑さを加え、まだ考慮されていない現象に焦点を当てることです。これには、より大きな強磁性体の自己消磁や、音響現象や熱現象などの物理学の組み込みが含まれます。また、McKenna 博士は COMSOL Server™ を通じて機械学習のトレーニング用にアプリを内部展開し、よりリアルな海底モデルの開発、USM における不確実性定量化最適化の活用をさらに進めたいと考えています。◎

謝辞

この研究は、USM が海軍研究局から受けた助成金によって支援されました。

iBMB Srls, Italy

がん個別化医療を 支援するシミュレー ションアプリが登場

DIXITA PATEL 著

乳がんの腫瘍進行を予測するため、イタリアの Potenza に拠点を置く initiatives for Bio- Materials Behavior (iBMB Srls) というスピンオフ企業は、医療従事者が術前化学療法の前に腫瘍病変の体積と治療効果をより適切にモニタリングできるようにするためのシミュレーションアプリケーションを開発しました。



図1 患者のスキャン画像を確認する従来の医療アプローチ。

世界中で、女性に最も多く見られるがんの一つが乳がんであり、現在利用可能ながん治療法は改善されてきましたが、乳がんの正確な予後を予測することは依然として困難です。患者ケアの改善に役立つ可能性のあるアプローチの一つが、予測腫瘍学です。このアプローチは、従来のがん治療（図1）からの転換であり、患者固有のデータをより正確かつ個別化された方法で考慮することで、腫瘍専門医が、特定の治療に対する腫瘍反応をより深く理解できるようにします。

計算モデリング（図2）と組み合わせることで、予測腫瘍学はアルゴリズムと機械学習技術を用いて患者の治療結果を予測することができます。例えば、がんの増殖の背後にある生物学および物理的メカニズム、そして治療反応を記述する数式を用いて、腫瘍の進行の決定論的モデルを作成することができます。このように数式を活用している企

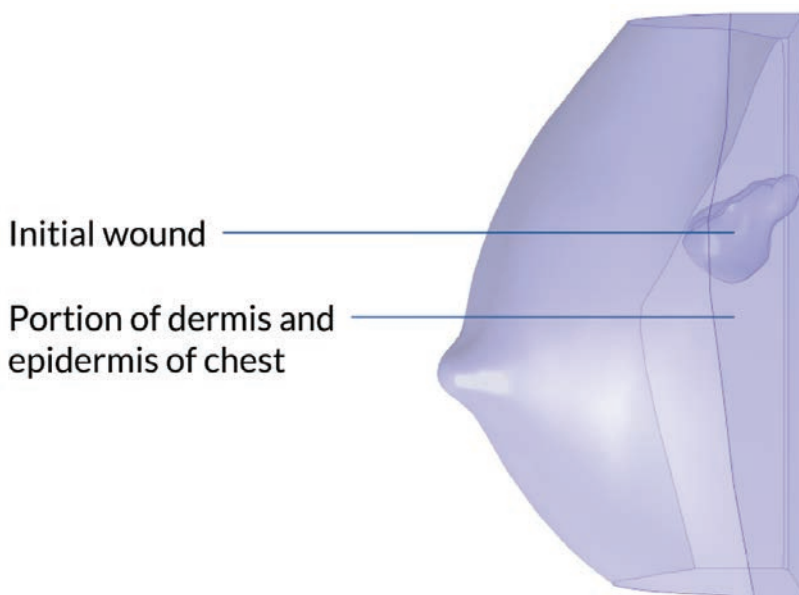


図2 臨床 DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine) 画像スタックから取得した女性の乳房の3D画像。

業の一つが、バジリカータ大学 (University of Basilicata) から独立した initiatives for Bio-Materials Behavior (iBMB Srls) です。iBMB Srls は、COMSOL Multiphysics® ソフトウェアを用いて、腫瘍の挙動を表す数式モデルに基づくシミュレーションアプリ CancerMate を開発しました。腫瘍専門医は、このアプリを使用することで、乳がん、特に術前補助療法 (LYNPARZA®) を受けた非転移性トリプルネガティブ乳がんの固形腫瘍の進行をより適切にモニタリングおよび評価できます。このアプリの結果に基づき、腫瘍専門医は治療の有効性を最適化し、副作用を軽減するために治療方針を柔軟に調整することが可能となります。

“現行の治療法は、個別化と精度が不足しています”と、iBMB Srls の CEO である Gianpaolo Ruocco 氏は述べています。“CancerMate を使用すれば、医師は仮想シナリオを実行できるため、患者の負担と治療費を軽減できます。”

▶ 仮想バイオマーカーによる腫瘍体積の測定

CancerMate アプリの本来の目的は、患者が腫瘍サイズを縮小する術前化学療法を受ける前に、病変の体積を定量化することです。CancerMate の Mark 1 バージョンは、LYNPARZA® (オラパリブ) という薬剤で治療

された非転移性トリプルネガティブ乳がん患者の臨床データに対して検証されました。臨床試験では17人の患者からなる後ろ向きコホートが含まれ、実験データは、乳がんの代謝反応の予測、腫瘍の進行の仮想化、および個々の患者に対する治療に対する腫瘍の動態の予測のために、コンピューター内での反応拡散モデル (偏微分方程式 (PDE) に基づく) のテストに使用されました。

この臨床実験により、チームは、腫瘍の治療への反応の予測に必要な、主要な乳がんバイオマーカーを特定することができました。臨床現場において、バイオマーカーは血液などの体液や組織検査から測定される患者の健康状態の指標です。研究期間中、免疫応答を特徴付ける腫瘍浸潤リンパ球 (TILs) と、腫瘍の悪性度を特徴付けるタンパク質 Ki67 を経時的に綿密

にモニタリングしました。CancerMate アプリでは、仮想バイオマーカーが、生物学的プロセスまたは疾患特性を表すデジタルまたは計算指標としてモデルに統合され、従来の臨床バイオマーカーを補完または予測することを目的としています。

臨床実験では、従来のバイオマーカーである Ki67 および TIL と相関する、個別化悪性度 (r_c) および個別化薬力学的効率 (ϵ_{PD}) のバイオマーカーが数値モデルに組み込まれました。これらのバイオマーカーは、実験中にオラパリブの有効性を定量化するのに役立ちました。臨床試験に関する研究論文で説明されているように、“モデルは、予め仮定を一切置くことなく、オラパリブの有効薬力学的効率が、基礎 TILs レベルと腫瘍体積 V 、または代謝腫瘍体積 SUV_{max} 増殖率に強く依存することを示しました。 V または SUV_{max} は、本症例では Ki67 発現と TIL 数に直接依存する数学的パラメーターで表されました。” (文献 1)

iBMB のチームは、数学モデルを説明し、実験から得られた予測値と実測値を視覚的に比較するために、Gompertz 曲線を用いて腫瘍の成長をモデル化し、特にオラパリブ投与前後の段階をモデル化しました (図 3)。この曲線は、3つの異なる癌増殖段階における腫瘍体積 V の経時変化 (t) を表しています。こ

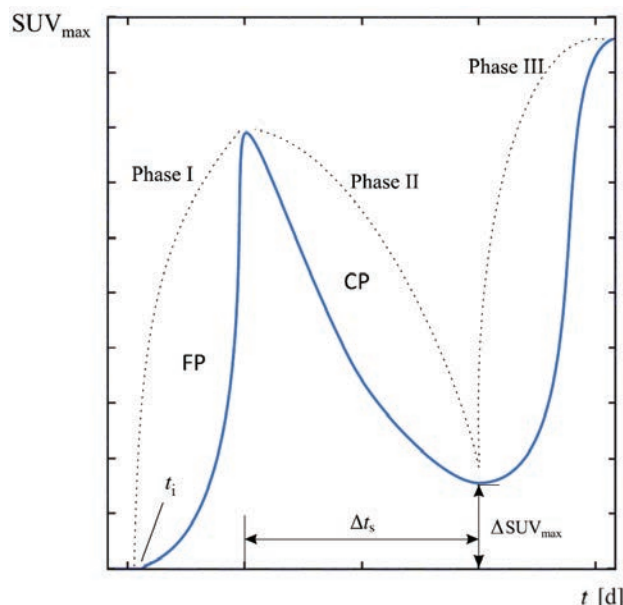


図3 腫瘍が体内を進行する過程の図。増殖段階 I ~ III における代謝腫瘍体積 (SUV_{max}) を時間 (t) との関係で示しています。画像は文献 1, CC BY 4.0 より引用。



図4 コンパイルされた CancerMate アプリを開いた際に表示されるスプラッシュスクリーン。

これらの3つの段階は、自由増殖、増殖抑制、そして制御不能増殖です（図3ではそれぞれ“第Ⅰ段階”、“第Ⅱ段階”、“第Ⅲ段階”と表記されています）。

第Ⅰ段階（自由増殖）は、未知の開始点 (t_i) から始まり、腫瘍の診断が下されるまで ($t = 0$) 続きます。この時点で、診断画像が撮影され、腫瘍専門医が患者に必要な治療法を決定します。その後、第Ⅱ段階（増殖抑制）は治療開始を表し、治療介入による腫瘍の部分的な退縮を観察します。最後に、第Ⅲ段階（制御不能増殖）は、治療終了後または耐性発現後に腫瘍のさらなる増殖や代謝活性の増加がみられるかどうかを観察する期間です。この段階は、さらなる経過観察や追加治療が必要かどうかを判断するのに役立ちます。検証済みの数値モデルは CancerMate に統合され、 r_c と ϵ_{PD} が主要な仮想バイオマーカーとして使用されています。

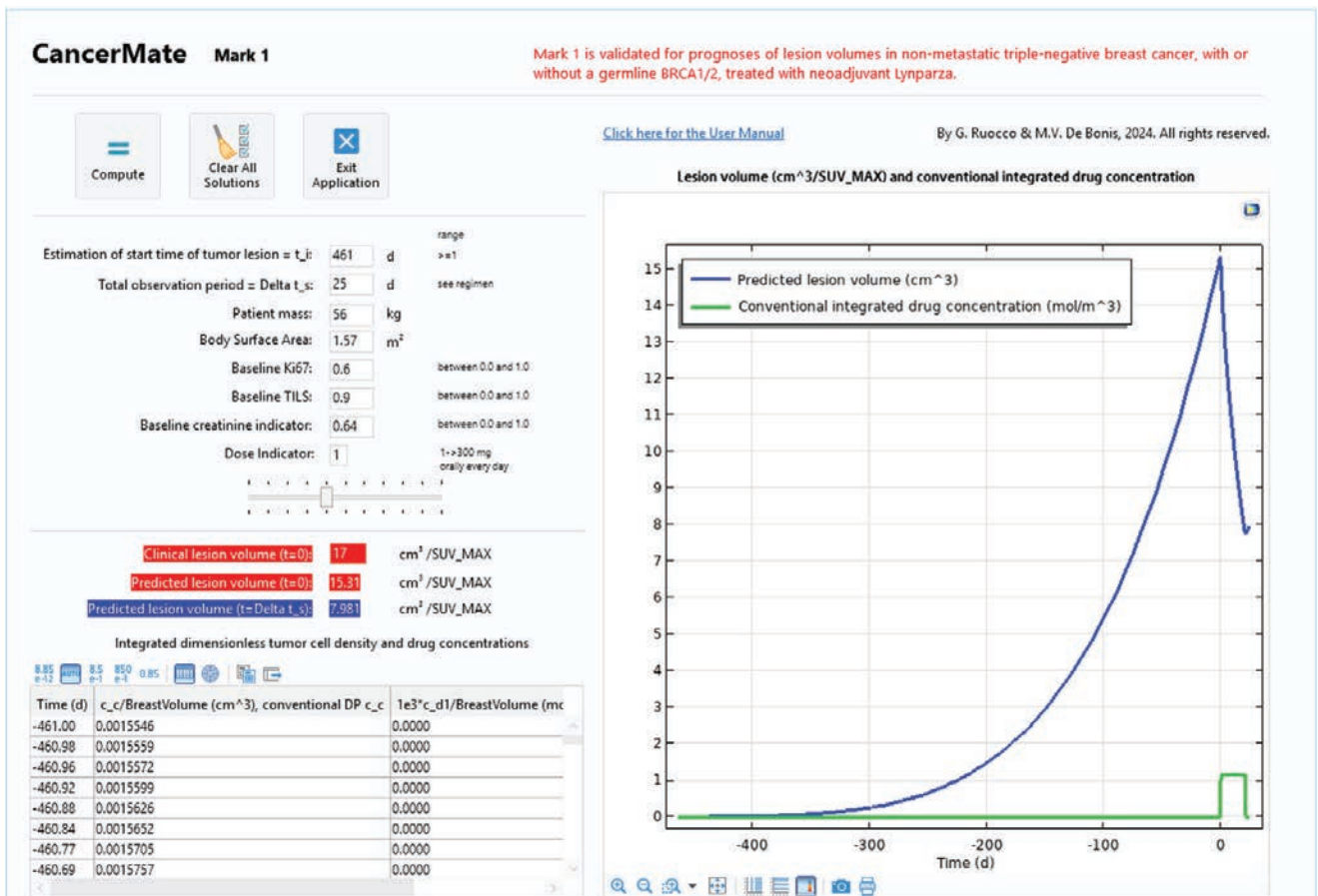


図5 CancerMate Mark 1 アプリのユーザーインターフェース。入力オプションと、基盤となる COMSOL モデルに基づく計算結果の例が表示されています。



図6 手術中に VR を使用する医師。

▶ CANCERMATE: 個別化がん医療への飛躍

Ruocco 氏とチームは、COMSOL Multiphysics の方程式ベースモデリング機能を使用して CancerMate を開発しました。腫瘍の成長と治療反応を表す PDE (輸送現象に基づく) を統合し、がん細胞の増殖と術前化学療法の影響をシミュレーションするために使用できるようになりました。このアプリは、COMSOL Multiphysics のアプリケーションビルダーを使用して作成され、ボタンをクリックするだけでアプリをコンパイルできるアドオン製品である COMSOL Compiler™ を使用してスタンドアロンアプリに変換されました (図4)。CancerMate をスタンドアロンアプリに変換することで、Ruocco 氏はアプリを臨床医に簡単に配布できるようになりました。臨床医は仮想シナリオを実行し、がんの進行に関する詳細情報をデスクトップで直接受け取ることができるようになりました。

アプリのインターフェースには、患者データを入力し、数値結果の表示、予測される病変体積と薬物濃度積分の進捗状況をグラフによって可視化する機能が含まれています (図5)。患者固有のバイオマーカーの入力フィールドは腫瘍学的予測の出発点であり、最初の入力フィールドは腫瘍病変の開始時期の推定値です。その他の入力フィールドには、全観察期間 (使用する治療法によって異なります)、患者の体重、体表面積、ベースラインの Ki67 値と TILs 値が含まれます。さらに、投与

量とベースラインのクレアチニン指標の入力フィールドも含まれており、これらは薬力学 (薬剤が腫瘍とどのように戦うか) と薬物動態 (薬剤が体内でどのように代謝、排泄されるか) に直接関連しています。

アプリは数値モデルを使用して、 SUV_{max} , TILs, Ki67 などのベースライン測定値を含む臨床データを統合します。仮想バイオマーカーである r_c と ϵ_{PD} はモデルの予測に役立ち、腫瘍の増殖と治療への反応を経時的に記述する一連の方程式に適用します。計算後、 $t = 0$ および $t = \Delta t_i$ における予測臨床病変値の数値結果が表示され、予測された腫瘍体積値と薬剤濃度の積分値の推移がグラフで示されます。COMSOL Multiphysics に組み込まれた複雑な偏微分方程式を解く機能を活用することで、CancerMate は臨床医に患者の治療反応を効率的にモニタリングする方法を提供します。

▶ 腫瘍学における CANCERMATE とバーチャル ヒューマンツインの未来

CancerMate の使いやすさとシミュレーション機能は、専門腫瘍医や製薬研究者にとって個別化がん治療における有用なツールとなります。CancerMate の現行バージョンは、臨床現場での導入準備が整っており、特にトリプルネガティブ乳がんの治療や LYNPARZA® 療法に適しています。Ruocco 氏は、データセットがさらに利用可能になれば、基盤となるモデルをトレーニングして、乳がんのさまざ

“CancerMate の現在のバージョンは、特にトリプルネガティブ乳がんの治療と LYNPARZA® 療法において、臨床現場での導入準備が整っています。”

— GIANPAOLO RUOCCO, IBMB SRLS
最高経営責任者

まなサブタイプと治療法間のより多くの相関関係をカバーできるようになると述べています。また、現段階では乳がんに特化していますが、iBMB のチームはアプリの基盤技術を拡張し、他の種類のがんや医薬品にも焦点を当てる予定です。

iBMB は、アプリの利用範囲を拡大するだけでなく、バーチャルヒューマンツイン (Virtual Human Twins, VHT) 技術と併用できるツールとして CancerMate を推進することを目指しています。VHT は、がん疾患の状態を再現するツインを作成することを目的としており、精度の向上や個別化がん医療の発展に貢献する可能性があります。Ruocco 氏によると、VHT のひとつの活用方法として、外科医が装着できるヘッドマウントディスプレイを通じて投影することが考えられます (図6)。このようなヘッドセットを使用すれば、外科医は仮想現実の中で手術部位を確認できます。例えば、乳房の病変が骨に近すぎる場合などを視覚的に把握し、その結果に応じて治療計画を調整することが可能になります。“VHT は、医療を個別化かつ精密化するための手法であり、従来の価値観を変えるものです” と Ruocco 氏は述べています。

予測腫瘍学が進化するにつれ、CancerMate のようなツールは、臨床医が腫瘍病変の体積を評価およびモニタリングするのを支援することで、個別化医療を形作ることができるでしょう。Ruocco 氏は、“患者は必要以上に長く治療されることがよくありますが、in silico ツールによってこの状況を改善することができます” と説明しています。◎

参考文献

1. F. Schettini et al., "Computational Reactive-Diffusive Modeling for Stratification and Prognosis Determination of Patients with Breast Cancer Receiving Olaparib," *Scientific Reports*, July 2023; <https://doi.org/10.1038/s41598-023-38760-z>



Wood Thilsted, Denmark

洋上風力タービン のための優れた接 岸構造の設計

構造解析は、海洋エンジニアリング会社が荒波や200トン級船舶との相互作用に耐えるボートランディングを設計するのに役立ちます。

JOSEPH CAREW 著

海が荒れ、保守作業員が洋上風力タービンに近づくと、船は前後に揺さぶられます。船は構造物専用のボートランディングに押し付けられ、乗組員は下船を始めます（図1）。乗組員がボートからタービンへと移動する際、波が船を押し流し、乗り場の下部に残っている乗組員に向かって押し戻します。幸いにも、鋼鉄製のフェンダーが衝撃を吸収し、乗船は安全に進むため、大惨事は回避されました。

容赦ない海の力、乗船する乗組員の脆弱さ、そして重量のある船舶との頻繁な接触を考えると、ボートランディングは強固でなければなりません。強度を高めるには鋼材を追加することもありますが、適切な情報に基づいて判断しなければ、設計エンジニアは実際には必要のない部分に材料を追加してしまい、最終的な費用を不必要に増やしてしまう可能性があります。したがって、安全性と強度だけでなく、材料の効率的な使用にも配慮してボートランディングを設計することは、洋上風力タービンを稼働させるために不可欠です。

これらの課題に対処するため、オフショアエンジニアリングのリーダーである Wood Thilsted 社は、海上と安全性の両方を考慮しながら、ボートランディング設備の設計をコスト効率と効率性の両方で作成、テスト、検証する方法を開発しました。具体的には、COMSOL Multiphysics® シミュレーションソフトウェアを使用することで、作業負荷を軽減し、潜在的なエラーを最小限に抑え、設計プロセスの多くを自動化しました。

図1 風力タービントーミナルに接岸する船舶。

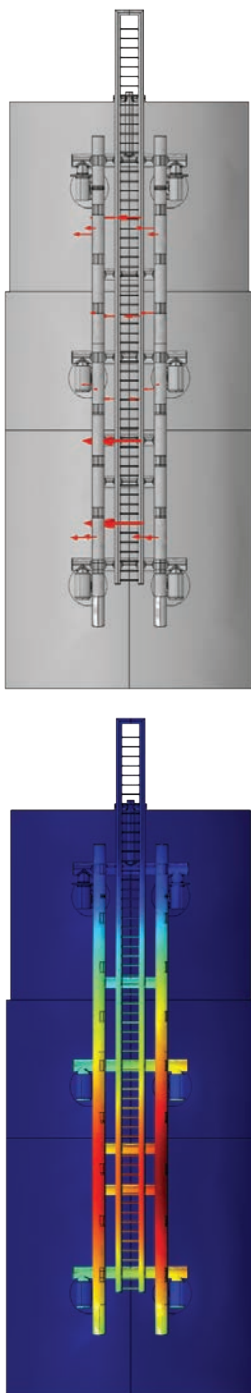


図2 海上でのボートランディングの設計に作用する力を可視化したモデル。上: 赤い矢印は横方向の力を示しています。下: 表面プロットは設計における重要なひずみ点を強調表示しています。

入渠の課題

典型的なプロジェクトでは、Wood Thilsted のチームは、荒波や200トン級船舶との相互作用に耐え、30年間使用できる新しいボートランディングの設計に、1〜2ヶ月を費やします。Wood Thilsted 社のシニア構造エンジニアである Louise Bendtsen 氏は、最も基本的なコンセプトに落とし込むと、これらの着岸は一見簡単に思えるかもしれないと述べています。

Bendtsen 氏は当時を振り返り、“かつて誰かがこう言いました。‘ただのチューブだ! そんなに難しいことじゃない’と。しかし、実際には非常に難しいのです”と述べています。厳しい現実の要件により、沖合の船着場は設計上、非常に困難な課題となっています。“設計上の課題は、異なる荷重ケースを持つ一連の要件があり、それらが矛盾していることです。設計のある側面を最適化するのに多くの時間を費やしても、別の設計ケースではうまく機能しないことが判明することがあります”と Bendtsen 氏は述べています。“（設計者にとって）これは、設計全体をより広い視点で捉える必要があることを意味します。小さな細部に時間をかけすぎると、うまく機能しなくなるからです。”

保守作業員がボートランディングを使用して船舶から風力タービンへ安全に移動するため、設計の複雑さが増しています。この作業中、特別に設計された200トンの船舶の船首がボートランディングのフェンダーに押し付けられ、作業員は構造物上の梯子に乗り移り、安全な場所に登る必要があります。ボートランディングは、これらの衝撃だけでなく、想定される30年間の耐用年数にわたって波の力にも耐えられる必要があります。エンジニアは、包括的な荷重ケース要件を満たすだけでなく、意図しない衝突な

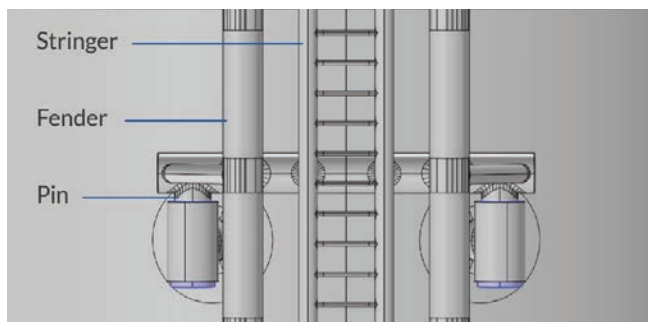


図3 ボートランディングに関連する設計部品。

どの事故ケースも考慮して設計する必要があります。

極限限界状態と疲労限界状態の特定

様々な設計の性能を最大限に理解するために、Wood Thilsted のチームは、極限限界状態 (ULS) 波と疲労限界状態 (FLS) 波をモデル化できるシミュレーションソフトウェアプラットフォームを必要としており、COMSOL Multiphysics® ソフトウェアを採用しました。ULS 波は、ボートランディング設備が想定される耐用年数を通じて受ける予想される最大ピーク力を表し、FLS 波は、30年間にわたる波浪と伝達が構造物に及ぼす累積的な影響を表します (図2)。ULS 波と FLS 波は、安全な洋上風力タービンへのアクセスを実現するあらゆる設計解において、支配的な荷重ケースとなります。

ボートランディング設備には、はしご、フェンダー、ピン、その他多くの部品が含まれるため (図3)、Wood Thilsted のチームは、ユーザーの安全を確保するために、さまざまな設計をテストする必要もあります。しかし、各パーツを個別に変更し、全体の形状を再構築するのは非常に時間がかかります。COMSOL® ソフトウェアの合理化された環境を活用することで、チームはラダーの段間の距離、ラダーの幅、フェンダー間のスペース、ステップオーバー距離といった主要な測定値を迅速に調整、テスト、最適化しています。

設計上の着陸

Wood Thilsted 社のボートランディング設備の設計は鋼鉄製で、風力タービンが水面に接する部分のトランジションピースに溶接された3組の水平ラダー支柱が特徴です。上部支柱はフランジに溶接されたピンで、ボート着岸設備の垂直方向の拘束材として機能します。下部の2つの支柱は、バケット内に加硫ネオプレンで覆われたピンです。ネオプレンにより、支柱システムのコーティングが損傷することはありません。この設計アプローチにより、万が一、想定寿命前に交換が必要になった場合でも、ボート着岸設備を容易に取り外すことができます。

シミュレーションソフトウェアによる自動化

時間とリソースの面で非効率的な繰り返し解析を回避するため、Wood Thilsted のチームはシミュレーションの自動化を選択しました。

“COMSOL を使用することで、ボート着岸設備の応力集中係数 (SCF) を迅速かつ簡単に計算し、プロジェクト全体を通して追跡しています”と Bendtsen 氏は述べています。設計案のさらなる検証のため、彼女のチームは Wood Thilsted 社の Primary Steel チームと協力し、SCF (標準応力係数) と使用材料の限界に関するフィードバックを得ています (図4)。

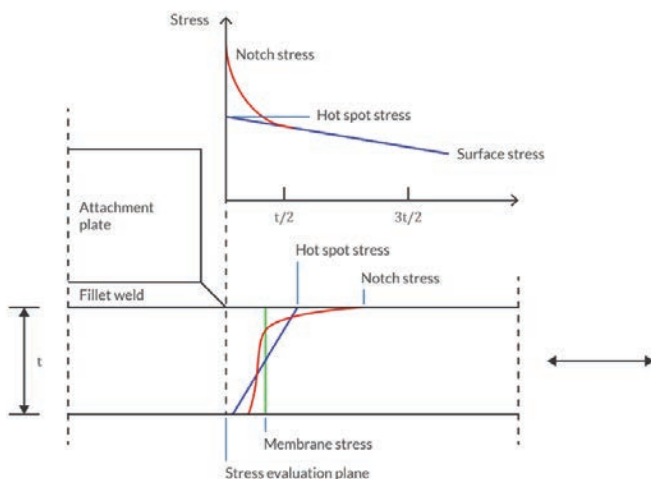


図4 展開中、構造物は応力特有のホットスポットに悩まされます。

Wood Thilsted のチームは、COMSOL Multiphysics® のアドオン製品である LiveLink™ for MATLAB® を使用して、荷重の適用、材料特性の設定、解析タイプの選択などのプロセスを自動化することで、一貫性と高品質を確保しています。

“COMSOL Multiphysics® を使用することで、応力を自動的に取得し、LiveLink™ for MATLAB® を使用してこのデータを MATLAB® に接続します”と Bendtsen 氏は述べています。“これにより、応力とひずみを抽出し、さまざまな荷重ケースのすべての結果評価を実行する独自のスクリプトを作成できるため、設計の改善に時間を割き、困難な部分に集中することができます。”

これらの荷重ケースには、通常の波浪荷重だけでなく、船舶の予期せぬ衝突のシミュレーションも含まれます。COMSOL® では、特定の部品に関する情報を構築、保存することで、これらすべてを最適化および自動化できます。“このソフトウェアには自動化の余地が数多くあり、類似しつつも異なる荷重ケースを多数扱う私たちにとって、これは非常に有益です”と Bendtsen 氏は述べています。

パーツライブラリとパラメーター

Wood Thilsted 社の設計アプローチの効率化を支えているのは、ジオメトリパーツライブラリです。COMSOL Multiphysics® では、ユーザーは設計を作成して保存できるだけでなく、複雑なジオメトリを再現し、パラメーター化することも可能です。この機能を利用して、Bendtsen 氏とチームはボートランディングの設計を部品ごとに構築し、各部品を個別にマッピングしてパラメーターを保存することで、設計の一部を別の部品と交換できるようにしています。このアプローチにより、対応するグローバルジオメトリパラメーターを変更することで、複数の類似

部品を同時に変更することができ、以前の反復と比較して設計を簡単に評価できます。

具体的には、Wood Thilsted 社のジオメトリパーツライブラリには、フェンダーサポート、バケットサポート、フェンダー、はしごなど、あらゆる部品が保存されており（図5）、必要に応じてモデルに部品を組み込むことができます。“つまり、これらの異なる形状パーツを組み合わせ、ボートランディング全体の設計を構築できるということです”と Bendtsen 氏は言います。“また、パーツには複数の構成があるため、ジョイントの種類や角度を変更することで、様々な構成を実現できます。”

Bendtsen 氏は、設計をモデリングしシミュレーションした後、様々なファブリーケーターと連携する際に、この手法が特に役立つと考えています。複数のファブリーケーターと連携することで、実際にボートランディングを製作する際の個々の好みが見えになります。“様々な構成があるため、ボートランディングを様々な方法で構成できるパーツライブラリを作成しました。簡単に調整できます”と Bendtsen 氏は言います。

さらに、Wood Thilsted 社の 3D COMSOL モデルにより、設計者は設計案を簡単に視覚的に確認し、すべてが適切であることを確認できます。構造力学シミュレーションにより、Wood Thilsted のチームはボートランディングの設計を正確にモデル化し、環境や船舶がそれらに及ぼす劇的な影響をシミュレーションすることができます。

より良いボートランディングのための準備

ボートランディングは、単にチューブを並べるだけでなく、効率的かつ安全性を考慮して設計する必要があります。コストとリスクの両面で多くのリスクが伴うため、モデリングとシミュレーションは、プロセスから推測を排除するのに役立ちました。さらに、Wood Thilsted 社はプロセスの一部を自動化し、風力タービンによるボートランディングの設計を洗練させることができました。“当社の設計は実績があり、その有効性が実証されているため、クライアントはボートランディングの設計を引き続き当社に依頼してきます”と Bendtsen 氏は述べています。この考えは、迅速かつ柔軟に設計を実行するという Wood Thilsted 社のモットーと密接に関連しています。Bendtsen 氏は次のように述べています。“当社のプロジェクトチームは機敏かつ迅速です。設計変更には数週間ではなく数時間に対応し、最も鋼材効率の高い設計を迅速に実現できます。”

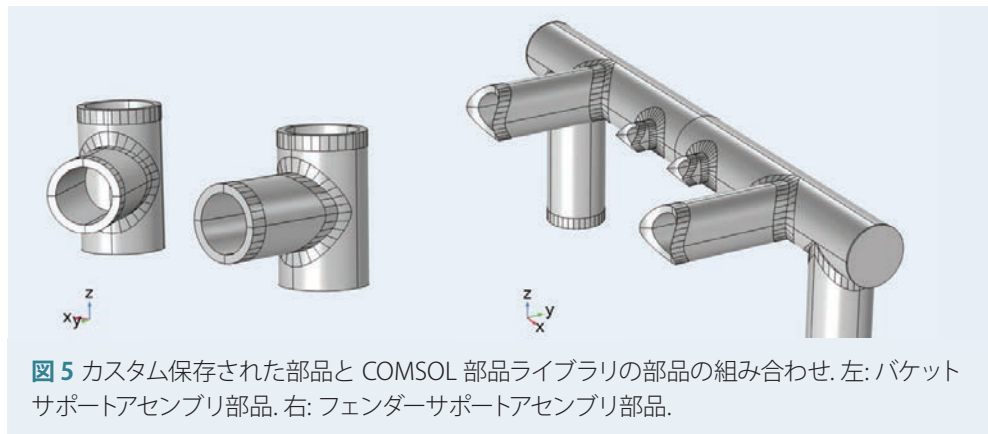


図5 カスタム保存された部品と COMSOL 部品ライブラリの部品の組み合わせ。左: バケットサポートアセンブリ部品。右: フェンダーサポートアセンブリ部品。

Sonion, Netherlands

補聴器技術で 世界の聴覚を支援

Sonion 社は、振動音響モデリングと実験的検証を用いて、補聴器やプロ用オーディオ機器の部品を開発しています。同社の Michele Colloca 氏が、チームの取り組みと補聴器技術の将来について COMSOL に語りました。

JOSEPH CAREW 著

オーディオモニター、イヤホン、ヘッドホン、補聴器といった人気のオーディオ技術は、多くの場合、単一のブランド名で呼ばれますが、これらの製品のほとんどは、様々な企業によって設計・製造された部品が組み込まれています。例えば、世界最大の補聴器メーカー6社のうち5社は、補聴器メーカーやプロ用オーデ

ィオメーカー向けに、バランスドアーマチュアレシーバー、ハイエンドマイク、音声ピックアップセンサー、その他の電気機械部品といった高度な小型部品を設計、製造するグローバル企業である Sonion 社が開発したトランスデューサー部品を採用しています。Sonion のエンジニアは、初期構想から設計の改良、量産に至るまで、製品開発の各段階で顧客をサポートしています。“私たちの目標は、単なるサプライヤーではなく、お客様とパートナーとなり、共同開発を行うことです”と、Sonion 社のレシーバー & RIC 開発責任者である Michele Colloca 氏は述べています。

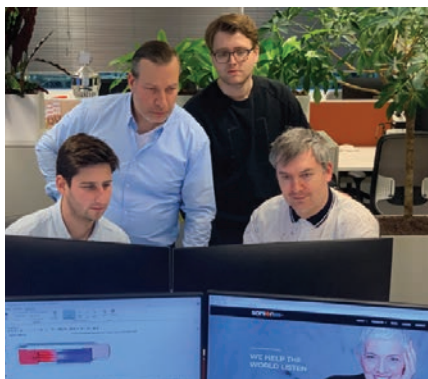
Colloca 氏は、オランダとベトナムのシミュレーションエンジニアチームを率い、Sonion 社とその顧客の様々な研究開発部門に対し、既存製品や新製品のコンセプトに関するモデリング支援、実験によるモデルの検証、Sonion 社のトランスデューサーの仕組みの説明などを行っています。“モデリングは、情報交換や問題解決といった相互理解を深める場だと考えています。私たちのモデルは、エンドユーザーの体験を向上させるために、

私たちとお客様が協力し合う場なのです”と Colloca 氏は語ります。

以下の Q&A で紹介されているように、私たちは Colloca 氏にインタビューを行い、補聴器の設計における主な課題、モデリングとシミュレーションが研究開発の加速にどのように役立つか、そして Sonion 社が補聴器技術をどのように進化させているかについて話を伺いました。

Q 補聴器技術の新たな発展を牽引しているトレンドと消費者のニーズは何ですか？

MC: 補聴器の主な目的は、あらゆる環境下で人々がより良く聞こえるようにすることです。これには、機器の音質、特に騒音下での音声理解を向上させることが含まれます。さらに、補聴器の堅牢性を高め、小型化することで見た目を向上し、人々が補聴器を装着しやすくなるようにすることも重要です。最終的には、聴覚ケアをより身近で手頃な価格にすることで、より多くの人々が補聴器を利用できるようになることも含まれます。



Sonion 社のモデリングおよびシミュレーションチーム。左上から時計回り: Michele Colloca, Justin den Heijer, Oleg Antoniuk, Bas Haayen.

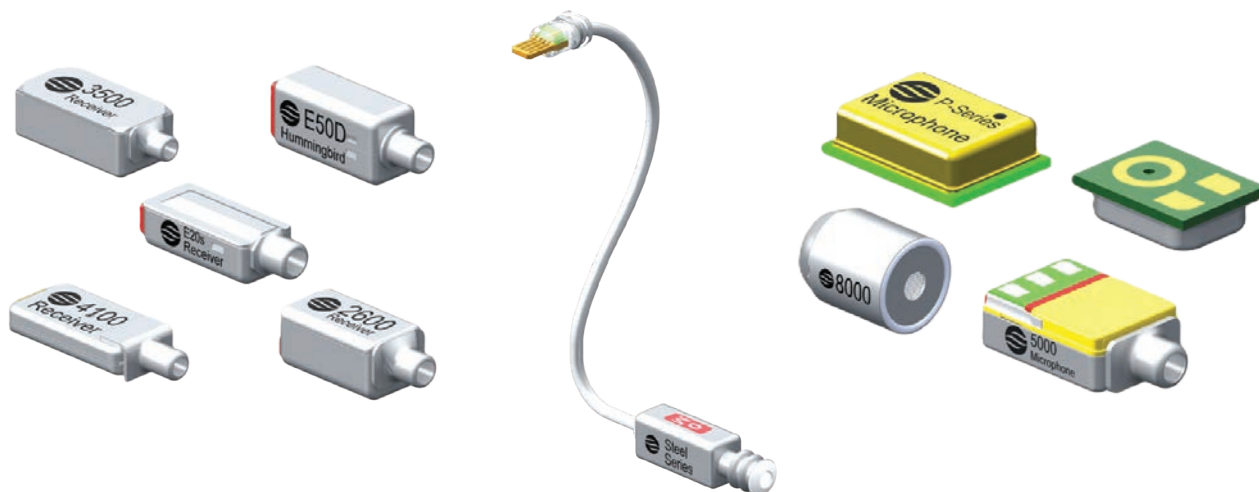


図1 Sonion 社のバランスドアーマチュアレシーバー (左), 既製のスチール製 RIC システム (中), 小型エレクトレットおよび MEMS マイク (右).

Q 補聴器用部品の設計において、主な課題は何ですか？

MC: Sonion 社では、幅広い補聴器の出力レベルと用途に対応するバランスドアーマチュア型レシーバー (シングル構成とデュアル構成の両方)、特殊用途およびプロフェッショナル用途向けのハイブリッド型および静電型レシーバー、既製のスチール製またはプラスチック製の補聴器用耳あな型レシーバー (RIC)、そして高性能かつ低電力補聴器向けの小型エレクトレットおよび MEMS マイクロフォンを設計、開発しています (図 1)。

そのため、私たちは複数の重要なトレードオフに対処する必要があります。例えば、私たちのトランスデューサーは、補聴器に収まるほど小型でありながら、低消費電力、最小限の歪み、そしてバランスドアーマチュアレシーバーの場合は機械振動、磁気フィードバック、音響フィードバックによる干渉を低減する必要があります。さらに、MEMS マイクは音に対して高い感度を持ちながら、振動に対しては低感度である必要があります。さらに、部品は温度、湿度、耳垢や埃による汚染に対して信頼性が高く堅牢でなければなりません。

モデリングの観点から見ると、私たちのデバイスは本質的にマルチフィジックスであり、強い非線形性を特徴としています。例えば、モデルの電気領域を最適化すると、音響領域に悪影響を与える可能性があり、その逆もまた同様です。適切なバランスを見つけることは、常に困難でありながら魅力的な作業です。

Q この研究の重要性を考えると、設計を間違えた場合、どのような結果が生じるでしょうか？

MC: 最適な設計が達成されない場合、複数の設計反復が必要になり、開発期間の長期化と研究開発コストの増加につながる可能性があります。OEM (相手先ブランド供給) の市場投入および製品発売の遅延、入札段階での設計受注機会の喪失などです。

Q Sonion 社が補聴器部品の開発にモデリングとシミュレーションを活用する理由は何ですか？

MC: モデリングとシミュレーションを活用することで、試作段階に入る前に時間とリソースをより効率的に活用できます。COMSOL Multiphysics® ソフトウェアで仮想プロトタイプを構築することで、設計コンセプトの反復作業を迅速化できます。さらに、このソフトウェアに搭載されている有限要素解析 (FEA) 技術を活用することで、実験室では測定や観察が難しい製品の挙動を徹底的に研究することができます。

Q モデリングとシミュレーションが特に重要だと感じた事例を教えてくださいませんか？

MC: 多くの用途において、バランスドアーマチュア (BA) レシーバーは強力な外部磁石に近づくことがあります。例えば、イヤホンなどの補聴器を充電ケースに入れた際に、このよ

うな問題が発生する可能性があります。充電ケースには、挿入された機器を所定の位置に誘導するための磁石が内蔵されている場合があります。しかし、外部磁場が BA レシーバーの高透磁率部品を貫通し、磁気動作に干渉する可能性があるため、悪影響が生じる可能性があります。その結果、充電ケースからの外部磁場と BA レシーバーからの内部磁場の相互作用により、BA レシーバーの音生成能力が低下したり、音が歪んだりするため、補聴器またはイヤホンが誤動作する可能性があります (図 2)。

この相互作用を解析するために、COMSOL® でモデルを作成し、外部磁石による磁束と、アーマチュアを変位させる BA レシーバーによって生成される磁束の干渉を解析しました。シミュレーション結果から、外部磁石によってレシーバー内部の磁気経路に磁束が追加されると、磁束によって磁気回路全体の磁気抵抗が変化し、レシーバーの磁石が減磁することが示されました。

Q モデリングとシミュレーションの活用が有益だった2つ目の事例を挙げてくださいませんか？

MC: プロフェッショナルオーディオおよび補聴器技術において、集中定数モデルは MEMS マイクなどのオーディオトランスデューサーの挙動を予測するための迅速で便利なツールとしてよく用いられます。これらのモデルの精度を高めるには、音響チャンネル長に、音響口または音響入口の端部補正を考慮する必

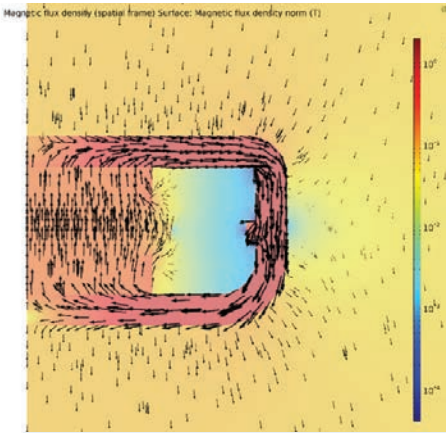


図2 充電ケースの外部磁石とバランスドアーマチュアレシーバーの内部磁石の両方によって生じる磁束密度。

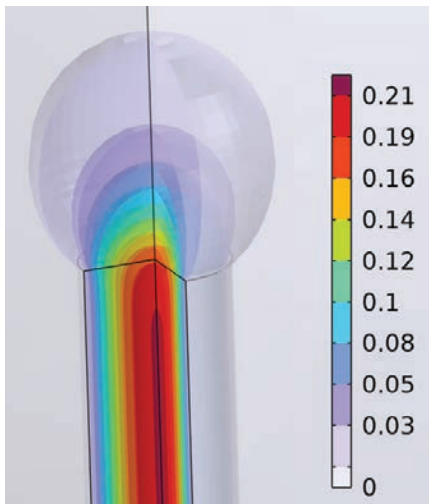


図3 熱粘性効果を含む、外部に開放された音響チャンネルの粒子 z 方向速度プロファイルを示すシミュレーション。このシミュレーションにより、Sonion社は開放環境への音響放射による端部補正を正確に定量化することができました。

要があります。これらの端部補正は、音響流路が外部環境に対してどのように開いているかを表します。例えば、開口端を持つ流路や、バップルと呼ばれる無限平面に開口部を持つ流路などです。端部補正を音響口または音響入口の音響質量に反映する係数はよく知られています。音響インピーダンスの実部（流路の音響抵抗に対応）の端部補正係数は、通常、音響質量の係数と同じであると仮定されます。本研究では、COMSOLの熱粘性音響モ

デルを用いて、音響抵抗の端部補正を導入し、定量化しました。その結果、音響質量の端部補正は、音響抵抗の端部補正とは異なる可能性があることが分かりました（図3）。

Q 集中要素モデルは、オーディオおよび聴覚技術の研究開発においてなぜ重要なのでしょうか？

MC: 電気インピーダンス、音圧レベル、振動といった受信機の主要な性能指標は、トランスデューサー自体の設計と、それに接続される音響負荷に大きく依存します。この場合、音響負荷は人間の耳とそれに接続する音響チャンネルを表しています。平均的な人間の耳をモデル化するために使用される典型的な装置は、711カップラーとして知られる耳シミュレーターです。しかし、この耳シミュレーターの全体の体積と特殊な機能、そして受信機と耳シミュレーターを接続するために必要な音響チューブの構造を考慮すると、計算コストのかかる非常に大規模な完全連成 FEA モデルになってしまいます。

音響チューブと711カップラーを、完全連成 FEA モデルではなく、2ポートネットワークとしてシミュレーションするアプローチを採用しました。このアプローチは、計算時間を大幅に短縮できます。COMSOL Multiphysics ソフトウェアを用いて、トランスデューサー、チューブ、カプラーの完全な FEA に対して伝達行列法を検証しました。伝達行列実装を採用することで、チューブとカプラーの集中表現を設定することで、モデルの複雑さと計算時間が大幅に削減されました。最終的には、さまざまなコンセプトをテストし、仮想プロトタイプを迅速に選択して、ラボでのテスト用の物理プロトタイプを開発することができました。

Q Sonion 社におけるシミュレーションの製品開発はどのように改善されましたか？

MC: 仮想プロトタイプは実際のプロトタイプに取って代わることはできません。常に物理プロトタイプを作成し、測定を行い、モデルを検証する必要があります。しかし、モデルが検証されれば、仮想プロトタイプは適切な設計コンセプトを選択するのに十分な堅牢性を持つようになります。この点をさらに説明するために、プロトタイプングプロセスの例を考えてみましょう。単一の設計コンセプトをテストする場合、仮想プロトタイプが1つ必要で、

その構築には約7時間かかります。しかし、仮想プロトタイプがなければ、各コンセプトごとに少なくとも5つのサンプルを作成し、テストと測定を行う必要があり、平均で40時間かかります。つまり、シミュレーションによって、1つの設計コンセプトのテストに必要な時間が少なくとも5.7分の1に短縮されます。このシナリオでは、仮想プロトタイプングを導入することで、投資額あたりの学習プロセス数が飛躍的に増加しました。

Q Sonion 社の製品は、補聴器技術の進歩にどのように貢献していますか？

MC: Sonion 社の製品は、補聴器市場の主要なトレンドに対応しています。私たちは、製品の性能向上と音質の向上に努めています。新製品は厳格な品質基準を満たす必要があり、より優れた堅牢な補聴器を実現するために、製品の信頼性の限界を常に押し広げています。当社の製品設計は補聴器全体を考慮しているため、メーカーはより小型の補聴器を製造することができます。さらに、私たちは常に費用対効果の高いソリューションを設計することで、より手頃な価格の補聴ケアをサポートできるようにしています。

今後は、マルチフィジックスモデルをさらに開発し、部品サイズのバリエーションを追加することで仮想プロトタイプの精度を高め、計算時間を大幅に短縮し、FEA 解析を通じて集中素子モデルベース回路のパラメーターベクトルを改善していく予定です。

Q 補聴器技術の将来において、シミュレーションはどのような役割を果たすのでしょうか？

MC: 仮想プロトタイプはより正確になり、物理プロトタイプとのギャップは最小限に抑えられるでしょう。また、コンピューターの処理速度の向上により、設計からテストへの移行、そしてテストから製品発売への移行が迅速化されます。

補聴器技術全般の将来については、さまざまな環境における音声明瞭度、接続性、音質、堅牢性、そして小型化を向上させる高度な信号処理機能が含まれると考えています。新しい補聴器プラットフォームには、消費電力とのトレードオフはあるものの、騒音下での音声認識を強化するための AI がますます多く搭載されるようになるでしょう。◎

NASA Ames Research Center, California, USA

宇宙でのより良い生活のための 次世代二酸化炭素除去技術の設計

NASAは、国際宇宙ステーション(ISS)の空気を呼吸可能な状態に保つシステムに最適なコンプレッサー設計を見つけるため、熱モデリングと実験的検証を組み合わせました。

FANNY GRIESMER 著

国際宇宙ステーション (ISS) は、大気中の二酸化炭素を回収、除去するシステムのおかげで、居住可能な状態を保っています。このシステムの中で主力となるのはコンプレッサーで、二酸化炭素回収の役割を果たしますが、騒音が大きく、頻繁なメンテナンスが必要になるという欠点があります。NASA のエンジニアは、モデリングとシミュレーション、そして実験的検証を用いて、次世代のコンプレッサー設計を分析しました。

» 汚染物質除去技術

ISS での生活と作業に同意する宇宙飛行士たちは、船室から二酸化炭素を除去する汚染物質除去技術を開発するエンジニアに大きな信頼を寄せています (図 1)。“現在、二酸化炭素除去装置 (Carbon Dioxide Removal Assembly, CDRA) と呼ばれるシステムがあります”と、NASA エイムズ研究センター (NASA Ames Research Center) の航空宇宙システムエンジニアである Hannah Alpert 博士は説明します。

“CDRA は二酸化炭素を吸収して船室から除去します。その後、その二酸化炭素はサバティエ反応器に送られ、そこで酸素発生シス

テムからの水素と混合されて水が生成されます。”この水は宇宙飛行士の飲料水として供給されます (図 2)。“この閉ループシステムは宇宙飛行士の生命維持のためにありますが、二酸化炭素がサバティエ反応器で機能するためには、吸収時の圧力よりも高い圧力にする

必要があります。そのため、CDRA とサバティエ反応器の間にコンプレッサーを設置しています”と Alpert 博士は述べています。CDRA は現在、新型の4ベッド分子蒸気システム (4ベッド CO₂ スクラバー、略称 4BCO2) へのアップグレード中です。



図 1 CDRA を操作する宇宙飛行士たち。画像は NASA 提供、Wikimedia Commons よりパブリックドメインで提供されています。

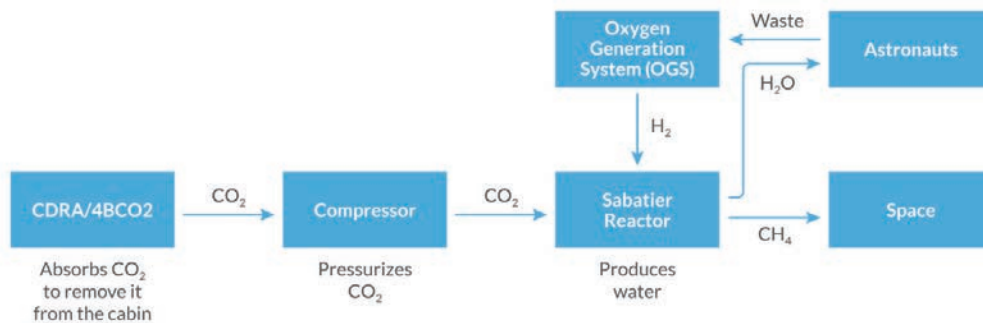


図2 汚染物質除去システムのプロセス。

Alpert 博士は、新システムは CDRA の信頼性と性能を向上させることを目的としており、そのために様々な変更を加えていると説明しました。まず、CO₂ 回収に使用していた吸着剤を交換する必要があります。さらに、一部の部品を再設計しました。“吸着剤の分散性を向上させ、空隙をなくすために、吸着剤ベッドを長方形から円筒形に変更し、ヒーターコ

アを再設計しました。また、ダストを捕集するフィルターと、動作寿命を延ばすための新しいバルブを追加しています”と Alpert 博士は説明しました。とはいえ、Alpert 博士のチームが開発中のコンプレッサーと 4BCO₂ の統合に関する基本的な機能は、現行システムと本質は同じです。

》コンプレッサーの再設計

現行システムは、質量と出力が大きい機械式コンプレッサーを採用しており、騒音が大きくなっています。多くの機械式回転部品があるため、頻繁なメンテナンスが必要であり、製造

と運用にコストがかかります。“そこで、私たちはいくつかの代替技術を検討しており、有力な選択肢の一つが空冷式温度スイング吸着コンプレッサー (AC-TSAC) です”と Alpert 博士は述べています。“AC-TSAC は質量と電力消費が少なく、騒音も少なく、回転部品がないため部品交換の頻度も減るでしょう。さらに、製造コストが低く、製造も容易です。”

AC-TSAC は、ゼオライトペレットと呼ばれる CO₂ を捕捉する鉱物を充填した吸着層で、室温でより効率的に CO₂ を吸着します。

CO₂ は加圧された後、サバティエ反応器に送られます。サバティエ反応器への CO₂ の供給を安定させるため、AC-TSAC は2つの吸着層に分割されています。研究チームは AC-TSAC の1つのバージョンを開発しており、現在は熱モデリングを用いて設計をさらに改良しています。

》熱モデリングが設計選択を左右する

Alpert 博士は、現在の AC-TSAC 設計のモデル構築に COMSOL Multiphysics® ソフトウェ

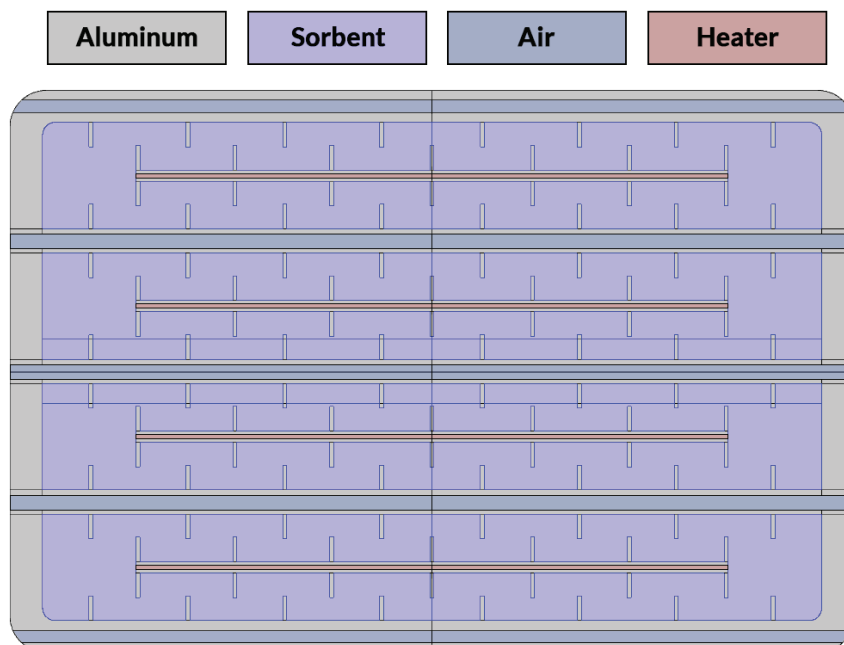
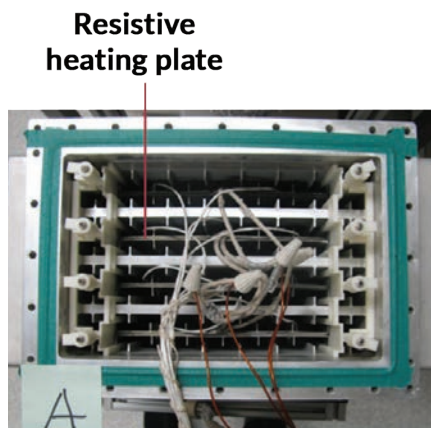
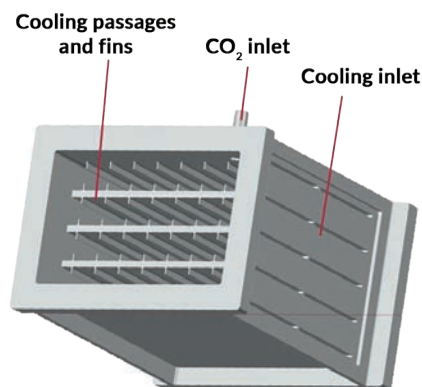


図3 実際のコンプレッサーとそれを表すモデル。

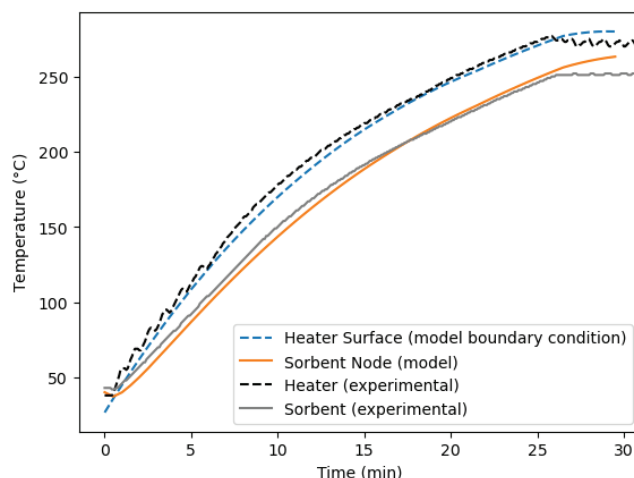
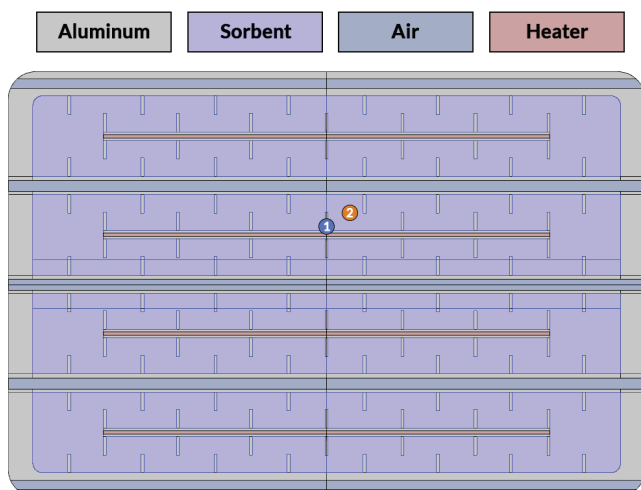


図 4 2つのベッド試験とモデルの実験結果は良好な一致を示しています。

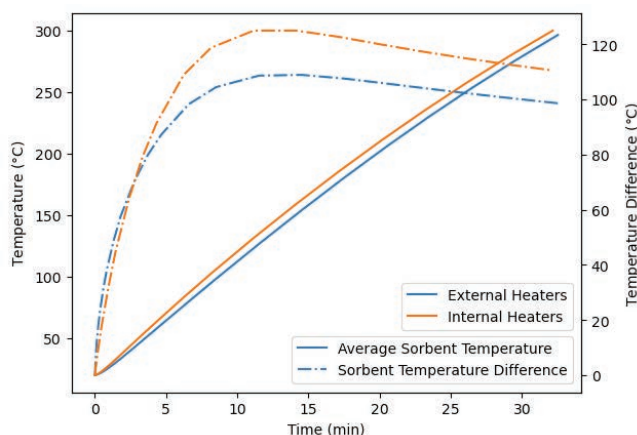
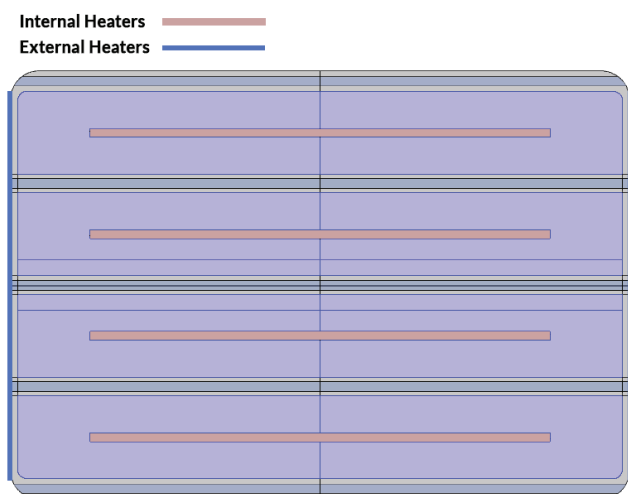


図 5 熱モデル化により、外部ヒーター (青) と内部ヒーター (オレンジ) の性能は同等であることがわかりました。

アを採用しました。“ここ数年、COMSOL® は非常に役立っています。NASA に入社して最初に取り組んだプロジェクトの一つは、Mars 2020 の熱シールドに搭載された熱流束計のモデリングでした。最近では、最適化モジュールを使用して熱シールドの表面熱流束を再構築しています”と Alpert 博士は述べています。

コンプレッサープロジェクトでは、3Dバージョンと2Dバージョンの両方のモデルを構築し、どちらも目的に合致する結果が得られたため、実行時間が短い2Dモデルを採用しまし

た。AC-TSAC の内部には、中央に3つの棚があり、その隙間にゼオライトペレットが詰め込まれています (図 3)。各棚の間には、ベッドを加熱するための抵抗加熱プレートが配置されています。冷却流路は、冷却段階で空気を通過させます。

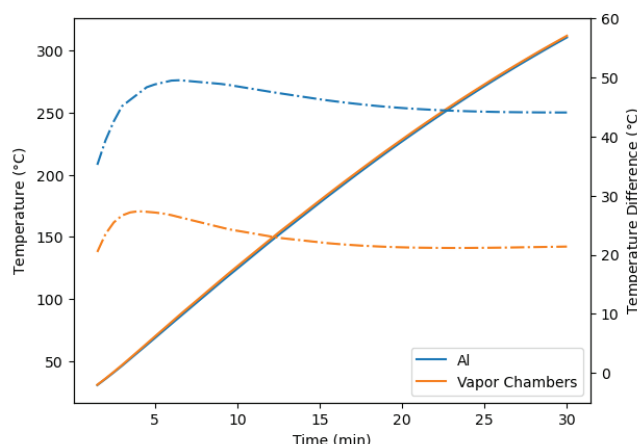
モデルの検証

モデルを検証するために、チームは AC-TSAC で実施した2つの試験における温度と電力の測定値を使用しました。“最初の試験は、NASA マーシャル宇宙飛行センターで2つ

のベッドを用いた機能性試験でした。次に、NASA エイムズ研究センターで、より焦点を絞った試験を実施し、1つのベッドを用いて正確な特性を分離しました”と Alpert 博士は述べています。

NASA マーシャル宇宙飛行センターの試験では、ヒーター表面に抵抗温度検出器を設置して温度を測定しました。そして、測定された温度をモデルの境界条件の1つとして使用し、モデルを実行して、モデル化された温度が実験データと一致するかどうかを確認しました (図 4)。

Rectangular Bed



Cylindrical Bed

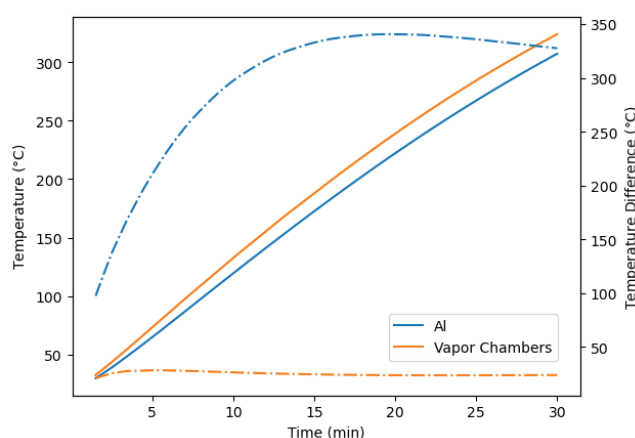


図6 吸着剤の平均温度 (実線) はほとんど変化していませんが、蒸気チャンバーでは均一性 (破線) が大幅に向上しています。

次に、研究チームはNASAエイムズ研究センターで集中試験を実施しました。単一のベッドを試験し、ヒーター表面と吸着剤ノードから実験データを収集しました。このケースでは、測定された電力をモデルへの入力として用い、次にモデル内のヒーターノードと吸着剤ノードの温度を測定しました。モデルと試験結果を比較したところ、データは良好な一致が見られました。

検証済みのモデルを手にした Alpert 博士とチームは、様々な設計変更がコンプレッサーの加熱と加熱速度にどのような影響を与えるかを分析する準備が整いました。

設計トレードスタディ

最適な新設計を模索する中で、チームは内部ヒーターと外部ヒーター、アルミニウムベッドとベイパーチャンバーなど、具体的な設計トレードスタディを検討しました。目標は、迅速に高温に到達し、昇温時にベッド全体の温度を均一に保つことでした。

“最初に検討した設計トレードは、内部ヒーターからの切り替えでした。現在、内部ヒーターはベッドの中央に配置されており、これが故障の原因となる可能性があります。ベッドには多数の配線が通っており、配線とヒーターが複雑に絡み合った状態になっています”と Alpert 博士は述べています。このことから、チームはこれらのヒーターを移動できるかどうか、そして移動させたとしても吸着剤を迅速かつ均一に加熱できるかどうか疑問に思いました。Alpert 博士のモデルを用いて、研

究チームは内部ヒーターと外部ヒーターに電力を供給し、加熱速度と均一性を比較しました (図5)。“内部ヒーターから外部ヒーターへの切り替えによる影響はそれほど大きくありませんでした。つまり、内部ヒーターではなく外部ヒーターを使用することで、吸着剤の温度均一性を向上させるか、少なくとも同等の均一性を維持しながら、システムの複雑さを軽減できる可能性があります。”

別の研究では、研究チームはアルミニウムベッドからベイパーチャンバーへの切り替えの影響を分析しました (図6)。NASAは、ベイパーチャンバーの製造と試験を行い、高忠実度モデリングを行う外部パートナーと協力しています。研究チームは、アルミニウムの材料特性を用いながらも、はるかに高い熱伝導率でベイパーチャンバーをモデル化し、その効果を検証しました。Alpert 博士は、研究の主な成果として、“アルミニウムベッドから蒸気チャンバーベッドに切り替えると、吸着剤の平均温度はほぼ同じままですが、蒸気チャンバーを使用することで吸着剤の温度均一性を向上させる可能性があること”を挙げています。

性能感度分析

NASAのチームは、吸着剤自体の熱伝導率の向上も目指しました。元のAC-TSAC設計の熱モデルでは、吸着剤の熱伝導率を高めても吸着剤の平均温度にはほとんど影響がないものの、温度均一性は大幅に改善されることが分かりました。“これは、私たちが間違いなく正しい方向に進んでいることを示し、その結果、

開発努力の多くをこれに注力しています”と Alpert 博士は述べています。

同様に、チームが蒸気室を備えた円筒形ベッドのモデルで熱伝導率を高めたところ、シミュレーション結果ではベッド全体の吸着剤の温度均一性が大幅に改善されることが示されました。

シミュレーションと実験を組み合わせてより良い設計を見つける

Alpert 博士と彼女のチームは、既存のAC-TSACの熱モデルを作成し、実験データと照合して検証しました。検証済みのモデルを用いることで、望ましい結果を得るためにどの設計パラメーターを変更すべきかを決定することができました。シミュレーションを通して、チームは外部ヒーターがシステムの複雑さと故障の可能性を低減すること、蒸気チャンバーは熱伝導率が高いため吸着剤の温度均一性が向上すること、そして吸着剤の熱伝導率の向上に引き続き注力すべきことを学びました。チームは今後も実験データを用いて熱モデルの検証を続け、熱損失などのメカニズムを考慮していきます。◎

これは、<https://www.comsol.com/story/designing-next-generation-co2-removaltechnology-for-better-life-in-space-131721> に掲載された記事の要約版です。

図2-6: NASA提供のオリジナル画像をCOMSOLが修正しました。

シミュレーションアプリで開発を加速させる

FANNY GRIESMER 著

あらゆる業界のエンジニアが、モデリングとシミュレーションを活用することで、設計の反復を大幅に高速化し、理解を深め、R&D プロジェクトをより効果的に計画できることを、繰り返し実証しています。こうした成功事例の一部は、本誌にも掲載されています。ただし、従来の意味でのシミュレーションを活用するには、選択したソフトウェアの使用方法に関する特別な専門知識とトレーニングが必要です。モデリングとシミュレーションは、計算モデルの構築に必要なスキルを習得したエンジニアにとって最も有用であり、組織が得るメリットは、本来の限界を超えています。シミュレーションの活用が R&D 部門を超えて拡大したらどうなるでしょうか。シミュレーションに基づく意思決定は、現場、工場、研究室で働く同僚や顧客に大きなメリットをもたらし、結果としてビジネス全体に幅広い影響を与えることができます。

例えば、現場の技術者、営業担当者、顧客は、気象データ、顧客から提供された詳細情報、その他の状況情報などのリアルタイム入力を使用して、シミュレーションに基づいた意思決定を現場で行うことができます。工場現場で働く同僚は、施設の状況に基づいて生産プロセスを最適化し、設計変更をその場で検証することで、最終的には企業全体の製造成果を向上させることができます。研究室の研究者は、実験とシミュレーションをその場で組み合わせることで、結果への理解を深め、得られた知見に基づいてより迅速な予測を行うことができます。

モデリングとシミュレーションは、プロジェクト計画や設計にコミットする前に現実世界の結果を事前に確認するのに効果的であることは既に知られています。さらに、実験データと組み合わせることで、より包括的な結果と理解が得られます。しかし、その活用拡大を阻む障壁の一つは、現場、工場、研究室にいる同僚や顧客が、その場で即座に答えを必要としており、全く別の場所で作業するシミュレーションエンジニアと何度もやり取りする余裕がないことです。では、次に何をすべきでしょうか？

シミュレーションが及ばない領域があることを受け入れるのではなく、計算モデルをベースに、入力フィールドを限定し、より迅速に結果を取得できる独自のカスタムアプリの構築を検討してください。独自

のシミュレーションアプリを構築・配布することは、従業員や同僚のポケットに専属のシミュレーション専門家を入れるようなものです。彼らはどこにいても、必要な時にすぐに相談することができます。アプリを通じて収集された実世界のデータは、オフィスで働く設計エンジニアやシミュレーションエンジニアに送り返すこともでき、モデルの検証や改善に役立てることができます。

COMSOL Multiphysicsソフトウェアには、モデルからシミュレーションアプリを構築・編集するためのツールが含まれています。アプリのユーザーインターフェースを素早くカスタマイズできる機能が組み込まれていますが、必要に応じて独自のコードを記述することもできます。結果を瞬時に表示するアプリには、機械学習機能を活用できます。シミュレーションアプリを必要とする人々に届けるには、主に2つの方法があります。世界中の誰でも実行できるスタンドアロンファイルにコンパイルするか、ウェブブラウザ経由でアクセスを管理できる COMSOL Server 環境を使用するかです。それぞれの方法には異なる利点があるため、どちらを選ぶかは完全にあなた次第です。

シミュレーションアプリは、もちろん、一般的な R&D ワークフローにおいても役立ちます。エンジニアが設計の反復を迅速にテストし、組織全体で知識の共有を強化することで、生産性の向上をもたらします。アプリの作成者がアプリのユーザーを兼ねる場合もあります。モデル用の合理化されたユーザーインターフェースを構築することで、時間の節約にもつながります。可能性は無限大で、ほぼあらゆる状況に合わせて、お客様自身でカスタマイズできます。COMSOL はお客様に代わってアプリを構築したり管理したりするわけではありません。その権限はお客様に委ねています。

独自のアプリを構築・配布する組織は、シミュレーションに基づく意思決定のメリットを、R&D ワークフロー内のより多くの協力者、さらにはワークフローから遠く離れた同僚や顧客にまで広げることができます。その結果、効果的なコラボレーションとイノベーションの加速が実現します。◎