

COMSOL NEWS

マルチフィジックスシミュレーションマガジン



積層造形と予測モデリングの融合

工場の状態をリアルタイムで管理できるシミュレーションアプリ

8ページ

深刻化する世界的な課題に挑むイノベーター

一時代、例えば、“10年”という期間を定義するものは何でしょうか？ 2020年代はまだ始まったばかりですが、私たちはすでに劇的な変化を目の当たりにしています。長らく予言されてきた気候変動がもたらす影響は、バンデミックのような予期せぬ危機の中でも、世界中の人々の生活を大きく変えています。

しかし、時代はその困難によってのみ定義されるのでしょうか？ 歴史を見る限り、困難にどのように対応するかが同じくらい重要であることがわかります。今年の COMSOL News では、マルチフィジックスシミュレーションの助けを借り、現代の課題に立ち向かおうとしている人々のストーリーを9つご紹介します。

その中には、気候変動の影響を直接的に研究されている方もいます。例えば、Alfred Wegener Institute の Angelika Humbert 氏は、グリーンランドの氷河を再形成している粘弾性力をモデル化する研究を行っています。また、Exicom や Bosch などの企業では、化石燃料への依存度を減らすために電気自動車技術を開発しています。さらに、フィンランドの Polar Night Energy のように、太陽熱を砂で造った“バッテリー”の中に蓄える独創的なシステムを開発しているスタートアップ企業もあり、ヘルスケアや通信といった永遠の課題に、有望な新技術で挑むイノベーターもいます。

これらの研究開発スターはすべて、より明るい未来を作るために努力しており、COMSOL Multiphysics® ソフトウェアの助けを借りてそれを実現しようとしています。シミュレーションの初心者でも、その力を発揮しています。8ページでは、イギリスの Manufacturing Technology Centre が、工場の“デジタルツイン”のプロトタイプとして機能するアプリを導入し、工場作業員を力づけた事例をご紹介します。

このようなイノベーターたちからインスピレーションを得ることができれば、この時代を挫折の時代ではなく、より良い世界を築くための一歩として記憶することができるかもしれません。

Alan Petrillo
COMSOL, Inc.

COMSOL コミュニティと交流しましょう

ブログ comsol.com/blogs

フォーラム comsol.com/forum

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

Facebook® facebook.com/multiphysics

Twitter® twitter.com/@COMSOL_Inc

COMSOL NEWS に関するご意見については、info@comsol.com にて受け付けております。これらのストーリーと関連リソース（参考文献やモデルを含む）をオンラインでご覧いただきたい方は、comsol.com/stories よりアクセスしてください。

© 2022 COMSOL. COMSOL, COMSOL Multiphysics, Capture the Concept, COMSOL Desktop, COMSOL Server, COMSOL Compiler, および LiveLink は、COMSOL AB の登録商標または商標です。その他の商標はすべてそれぞれの所有者の財産であり、COMSOL AB およびその子会社ならびに製品は、これらの商標権者との提携、承認、スポンサーシップ、または支援はありません。該当する商標権者のリストについては、www.comsol.com/trademarks をご覧ください。

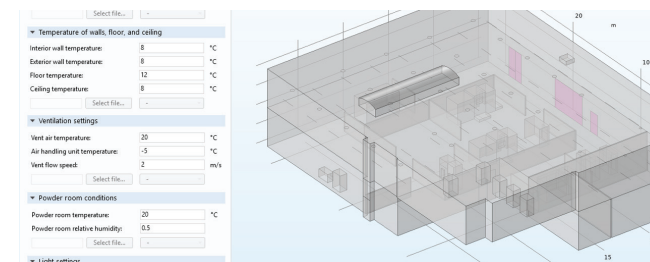
LinkedIn は、LinkedIn Corporation およびその関連会社の米国およびその他の国における商標です。Facebook は、Facebook, Inc. の登録商標です。TWITTER, TWEET, RETWEET および Twitter のロゴは、Twitter, Inc. またはその関連会社の商標です。

目次



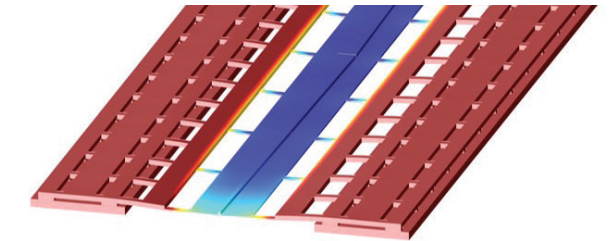
デザインの最適化

- 4 自動車産業の電動化を進化させる Bosch
Bosch, Germany
- 12 集中アプローチ熱モデリングによる車載用
バッテリーマネジメントシステムの高度化
Exicom Tele-Systems, India
- 22 MRI 装置における医療機器の高周波誘導
加熱
MED Institute, Indiana, USA



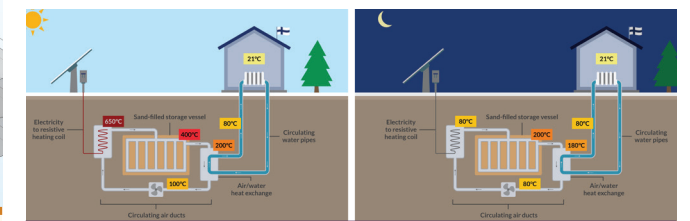
シミュレーションの大衆化

- 8 工場の微調整: 積層造形工場の最適化を
支援するシミュレーションアプリ
Manufacturing Technology Centre, United
Kingdom



シミュレーションによる製品開発

- 15 シミュレーションによるシリコンフォトニック
MEMS 位相シフター的设计
Swiss Federal Institute of Technology Laus-
anne (EPFL), Switzerland
- 26 微量汚染物質分解のための小型廃水処理プ
ラント的设计
Eden Tech, France
- 29 有限要素モデリングによる海底ケーブル設
計の最適化
Hellenic Cables, Greece



リサーチスポットライト

- 18 砂に蓄えた太陽エネルギーによる建物の暖
房装置
Polar Night Energy, Finland
- 32 粘弾性モデリングによるグリーンランド氷河
融解の予測
Alfred Wegener Institute, Germany

ゲスト論説

- 36 音響シミュレーションによるバーチャル製品
開発
Roger Shively 著, JJR Acoustics, Seattle, USA

粘弾性モデリングにより、
氷河の流動と融解を促
進するプロセスを解明

32ページ

Bosch, Germany

自動車産業の電動化を進める BOSCH

ALAN PETRILLO 著

電気自動車への世界的な移行は、自動車メーカーに電気部品やシステムを提供している Robert Bosch のような業界のサプライヤーによって後押しされています。Bosch のチームは、シミュレーションを駆使した設計プロセスで3相インバーターと DC リンクコンデンサーを最適化し、開発サイクルの早い段階で破壊の可能性がある“ホットスポット”を特定することを可能にしています。

パリの観光客がルーブル美術館に惹かれるように、ドイツのシュトゥットガルトを訪れる観光客もまた、この街の名画を展示した美術館に足を運びます。ドガやモネといった画家はいないものの、シュトゥットガルトにはパリの画家以上に有名な名前があります。メルセデスベンツとポルシェです。これらの代表的な自動車メーカーはそれぞれ、故郷であるドイツ南西部のこの都市に博物館を構えています。そのきらめくギャラリーには、歴史的で影響力のある自動車展示されており、そのほとんどが石油燃料の内燃 (IC) エンジンを搭載しています。シュトゥットガルトは今後もドイツの自動車産業の中心であり続けると思われますが、IC エンジンはいつまで自動車の中心であり続けるのでしょうか？

最も成功しているメーカーでさえ、状況の変化に適応しなければなりません。ドイツの自動車産業は、世界の自動車メーカーと同様に、電気自動車の開発によってそれを実現しています。電気自動車は、シュトゥットガルトで創業したもう1つの大手自動車メーカーである Robert Bosch の重要なテーマです。現在、Bosch は世界中の自動車メーカー

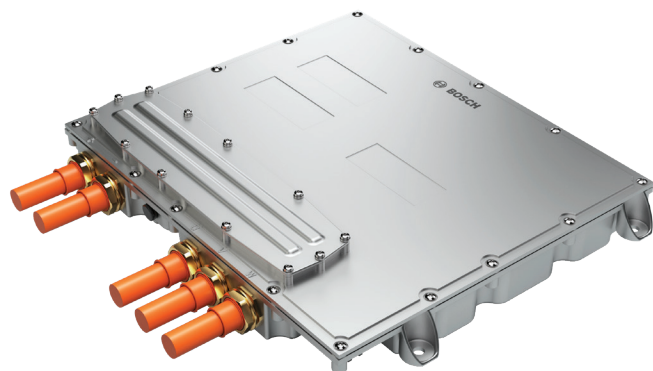


図1 Bosch の自動車ドライブトレイン用の3相インバーター。

に電動のパワートレイン、システム、部品を供給しています。

自動車業界が電動化の未来に向けて競争する中、Bosch は電動ドライブトレインの重要な構成部品の研究開発を加速しています。その1つがインバーターです。インバーターは自動車のバッテリーからの直流電流 (DC) を交流電流 (AC) に変換し、駆動用モーターに電力を供給します (図1)。インバーターがスムーズに電流を流せるかどうかは、内蔵の DC リンクコンデンサーにかかっています (図2)。“コンデンサーは、インバーターを構成する部品の中で最も高価なもの1つです。このコンデンサーの性能は、ドライブトレインの動作の基本となるインバーターの性能と信頼性に直接影響します”と、Bosch のカーエレクトロニクス担当シニアエキスパートである Martin Kessler 氏は説明します。

世界の自動車産業が電動化に向けた野心的な目標を達成するためには、インバーターとそのコンデンサーは継続的な改善と最適化が必要です。Martin Kessler 氏と彼のチームは、マルチフィジックスシミュレーションを使用して、Bosch の DC リンクコンデンサーの試験と改良を行っています。彼らのシミュレーションによる予測解析は、新しい設計のライブプロトタイプングを補完し、最適化します。“試験だけでは、潜在的な問題を予測することはできません。シミュレーションとプロトタイプングの両方を連携させることが必要なのです”と Kessler 氏は言います。

▶▶ 電気自動車時代の到来

“ドライバー、エンジン始動!” まるで世界的なレースの呼びかけに相應るかのように、人々は毎日、IC エンジンをゴロゴロと始動させます。しかし、この音は、自動車の排出ガスによる環境負荷が明らかになるにつれて、不吉な音に聞こえてきます。そこで自動車業界では、これらの排出の削減と地球温暖化防止を目的に、電気自動車と電動トラックの生産を拡大しています。現在販売されている電気自動車の多くは、お馴染みのブランド名を冠していますが、多くの場合、その中身は外部サプライヤーの技術やノウハウに依存しています。

これは、世界の主要産業である自動車産業にとっていかに重要な変化であるか注目に値します。大手自動車メーカーは世界有数の雇

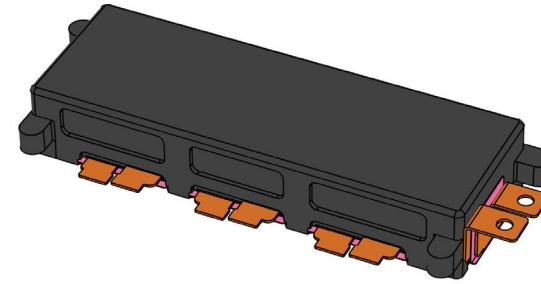


図2 一般的な DC リンクコンデンサー。右側がバッテリーインターフェイス、前面がトランジスターコネクター。

用主であり、従業員、研究開発、生産能力の大部分が IC エンジンの生産に費やされています。General Motors, Bayerische Motoren Werke (BMW) など、内燃機関が重要な役割を担っていることは、社名にも表れています。では、なぜエンジンで有名な企業が、自動車を走らせるために外部に頼るのでしょうか？それはある意味、電動化によって、まったく別のタイプの機械を生産する方法を学ぶことを余儀なくされているからかもしれません。

▶▶ 電気ドライブトレインの構造

完全電気自動車を造るには、エンジンを電気モーターに、ガスタンクをバッテリーに置き換えるだけでは不十分です。自動車が走行するためには、常に変化する状況に対応し、スムーズで信頼性の高い性能を実現するための大きなシステムが必要ですが、バッテリーやモーターなどの身近な部品はこの大きなシステムの一部でしかありません (図3)。

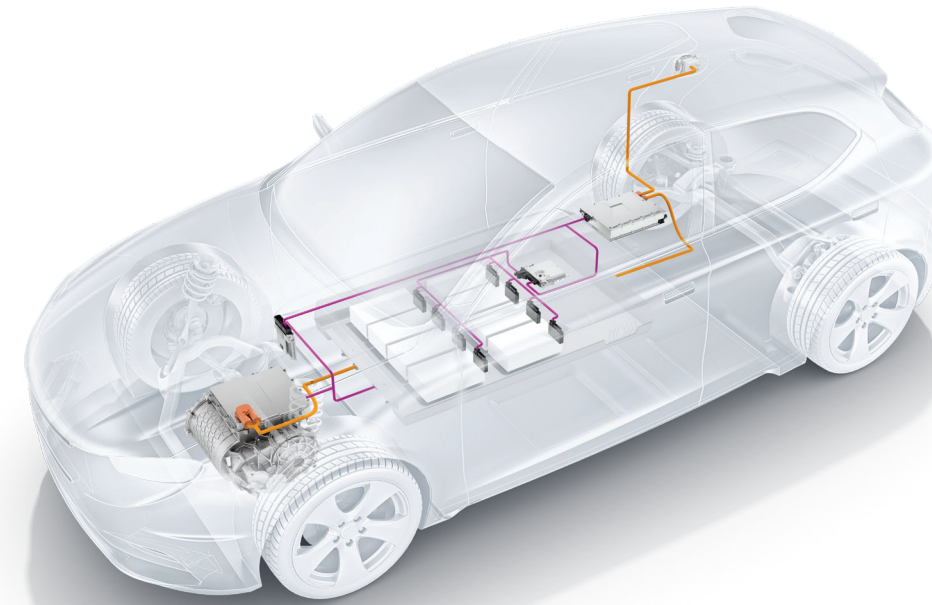


図3 一般的な電気ドライブトレインを流れる電流の経路。経路は、右のチャージャーコンバーターから車の中央のバッテリーに流れます。バッテリーは、駆動モーターアセンブリの上に取り付けられた3相インバーターに DC を供給します。インバーターは、DC を三相 AC に変換し、自動車の駆動モーターに電力を供給します。

▶▶ 必要不可欠なインバーター、重要なコンデンサー

自動車のドライブトレインにおけるインバーターの役割は、概念的には単純ですが、実際には複雑です (図4)。インバーターはバッテリーから供給される DC でモーターの AC 需要を満たす必要がありますが、負荷、充電、温度など、システム各部の動作に影響を与える要因の継続的な変動に対応しなければなりません。これらすべてをコストと空間の厳しい制約の中で実現し、部品はこの性能を何年にもわたって維持しなければならないのです。

インバーターの機能を理解するために、三相 AC モーターが動作するために何が必要かを考えてみましょう。DC に接続すると、モーターは回転しません。そのため、3つの異なる相補的な波形を持つ交流電流を供給し、3分割されたフィールドコイルでローターのセグメントを順次、磁気的に引きつける必要があります。“モーターの動きを制御するには、インバーターの電流出力の振幅と周波数を制御する必要があります”と Kessler 氏は説明します。“モーターの速度は周波数に比例し、振

幅はトルクを決定するのに役立つのです。”

“トランジスターに流れる所望の電流波形は、比較的急な勾配を持っています。この高い勾配を持つスイッチング電流を実現する唯一の方法は、ソース経路のインダクタンスを非常に低くすることです”と Kessler 氏は言います。インダクタンスとは、電流の流れの変化に対抗する特定の力のことです。電流がわずかに変化するだけで、誘起された逆電圧によって制限され、目的の波形、つまりモーターの滑らかな回転が乱されます。

トランジスターのソース経路のインダクタンスを低減するために、バッテリーからの入力リード線を挟んで並列にコンデンサーを配置します。これを DC リンクと呼びます。DC リンクコンデンサー (図5) は、トランジスターの近接に配置され、トランジスターに望ましい電流波形を提供します。コンデンサーのインピーダンスが低いため、バッテリー側に残るリップル電圧は最小限に抑えられます。

一般的なコンデンサーは、2つの電極が空気や何らかの物質で絶縁されたギャップで隔てられています。この用途では、Bosch は金属化ポリプロピレンフィルムで作られたコンデンサーを使用しています。フィルムの両面に電極となる金属を薄くコーティングし、必要な誘電体ギャップを確保します。そして、この金属化フィルムをきつく巻いてキャニスター型にします。インバーター自体と同様、このコンデンサーもシンプルなコンセプトの中に、多面的なエンジニアリング上の問題が隠されていることがわかります。

▶▶ 車載インバーター用 DC リンクコンデンサー設計の課題

コンデンサーは広く普及している部品で、数え切れないほどの電子機器に搭載されています。Martin Kessler 氏は過去7年間、Bosch の DC リンクコンデンサー設計を担当してきました。彼は1989年に入社し、2010年から電気自動車技術に携わっています。このような経験豊富なエンジニアがその部品1つに専念しているということは、その重要性、そして複雑さを示しています。

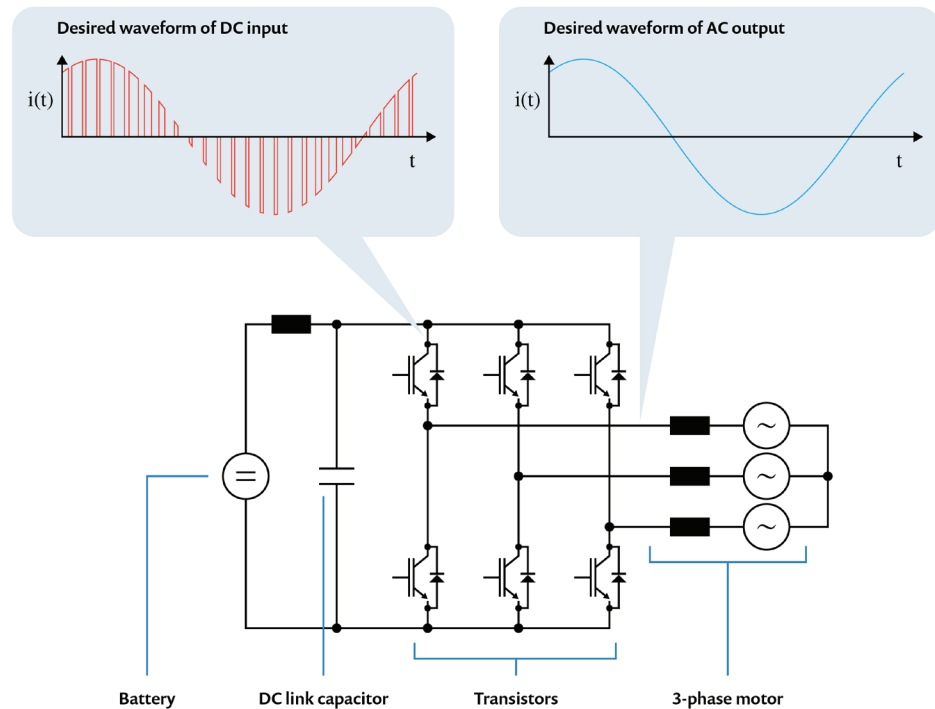


図4 3相インバーターは、バッテリーからのDCを3組のトランジスターで三相ACに変換します。トランジスターが順番にオンオフすることで、三つの異なる位相で交流が発生し、車の駆動モーターが回転します。DCリンクコンデンサーは、入力電流を管理するのに役立ちます。

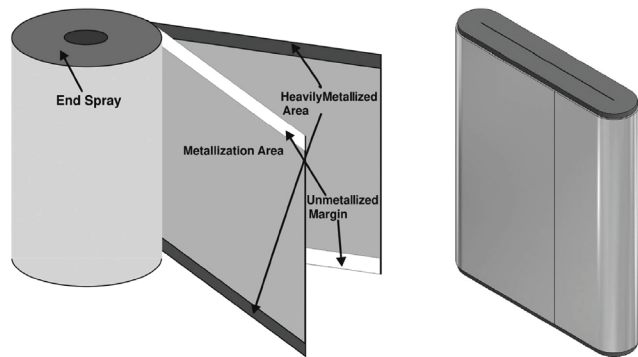


図5 DCリンクコンデンサーは、金属化ポリプロピレンフィルムを細長い円筒形に巻き取ったものです。

“なぜ、市場からコンデンサーを手に入れることができないのでしょうか”と、Kessler氏は問いかけます。“背景として、複数の相互依存的な要因が働いています。第一に、性能と信頼性に対する高い要求があることです。第二に、非常に厳しい空間的要件があります。第三に、コンデンサーのポリプロピレンフィルムは105°C程度までしか耐えられないため、難しい熱的制約がかけられます。この問題は、インバーター全体の電磁気と熱の相互作用によって、さらに深刻なものとなっています。そして最後に、コンデンサーが比較的高価であることです”とKessler氏は説明します。

▶▶ ブラックボックス問題の解決に(運ではなく)貢献するシミュレーション

DCリンクコンデンサーの設計上の課題に対応するために、Kessler氏は実験テストとマルチフィジックスシミュレーションを組み合わせたプロセスを開発しました。彼は、シミュレーションによる解析が自身の仕事において必要な理由の一例として、高熱と結合効果が故障を引き起こす可能性のあるホットスポットの発見と計測の難しさを挙げています。“プロトタイプの内部に多数の熱電対を設置し、様々な負荷点で温度を測定することで、ホットスポットを特定しようとしています”とKessler氏は言います。“しかし、私がよく言っているのは、よほどの幸運がなければ、このようなホットスポットを見つけることはできないということです。熱電対を正しい位置に設置するには、運が必要なのです”と彼は笑います。

“コンデンサーの単純な2Dモデルでも不十分です”とKessler氏は続けます。“インバーターとは、内部共振と複雑な損失分布を持つ分散システムです。電磁気と熱の連成解析では、表皮効果や近接効果を考慮する必要があり

ます。ピーク温度の絶対値を計算するには、3D有限要素法を用いなければなりません。これによって電磁気と熱の連成効果の空間分布をモデル化することもできます。このタスクには、COMSOL Multiphysics®ソフトウェアが最適です”とKessler氏は述べます(図6-7)。

Kessler氏の設計プロセスでは、可能な限りシミュレーションモデルを実測結果と比較して検証し、検証されたモデルを使用して潜在的な問題をピンポイントで特定します(図8)。“モデル内のホットスポットを特定することで、シミュレーションは、開発プロセスの後半や生産開始後に現れるであろう問題を回避するのに役立ちます”とKessler氏は述べています。“具体的な結果を得て、プロセスの早い段階で調整を行うことができるのです。”

“新しい設計には必ずEMモデリングと検証を行います。計算された等価直列抵抗(ESR)曲線と、プロトタイプから測定されたESR曲線を比較します(図9)。これらの曲線が一致していれば、定常および非定常熱計算の境界条件を設定することができます”とKessler氏は言います。“熱電対の温度曲線をCOMSOL Multiphysicsモデルでプロブの結果と比較できます。これらが一致すれば、温度を制限内に保たなければならないすべての臨界点をシミュレーションできます。”曲線データは、LiveLink™ for MATLAB®インターフェース製品を介してCOMSOL Multiphysicsソフトウェアに取り込まれます。

“これを実行する前に、どの要素をモデルに組み込むべきかを考えなければなりません”とKessler氏は言います。“OEMから受け取る変数の中には、最大DCリンク電圧など、シミュレーションにあまり関係のないものもあります”と彼は続けます。“しかし、電流、スイッチング周波数、電子機器の値、変調方式はすべて、電流スペクトルを定義するのに役立ちます。電力損失を求めるには、出力の3相すべてについて電流スペクトルを計算する必要があります。これができたら、電流スペクトルの周波数について、COMSOL Multiphysicsを使用して高調波解

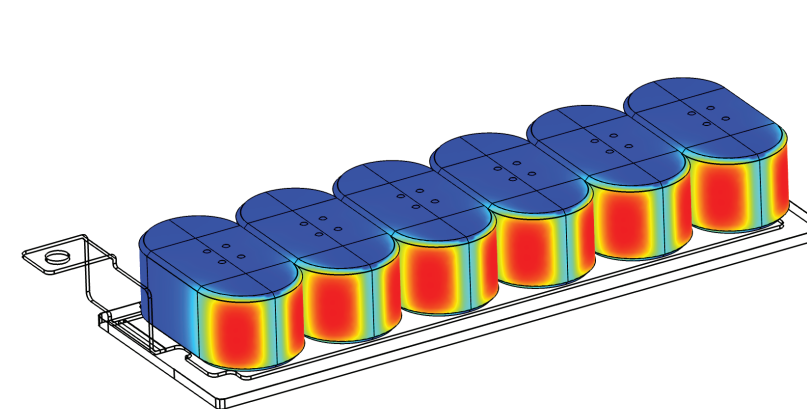


図6 DCリンクコンデンサー設計内部の電磁気効果のシミュレーションを示す3Dモデル画像。

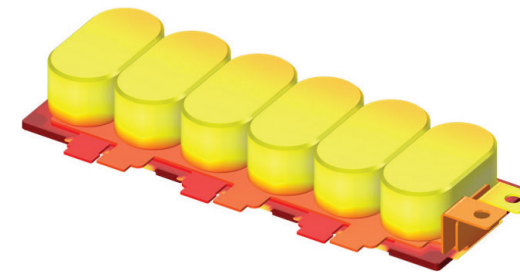


図7 DCリンクコンデンサー設計内部の熱効果のシミュレーションを示す3Dモデル、およびコンデンサー内のホットスポット位置を示す断面図。

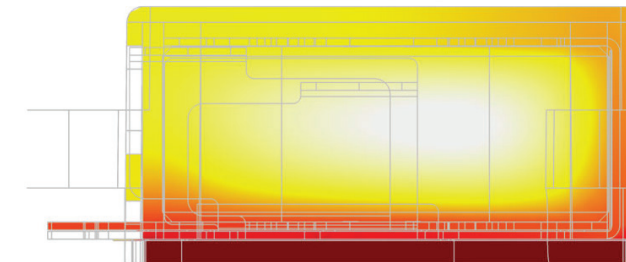


図8 DCリンクコンデンサー設計内部の熱効果のシミュレーションを示す3Dモデル、およびコンデンサー内のホットスポット位置を示す断面図。

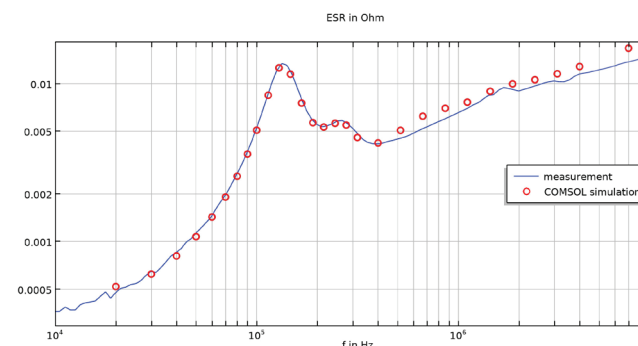
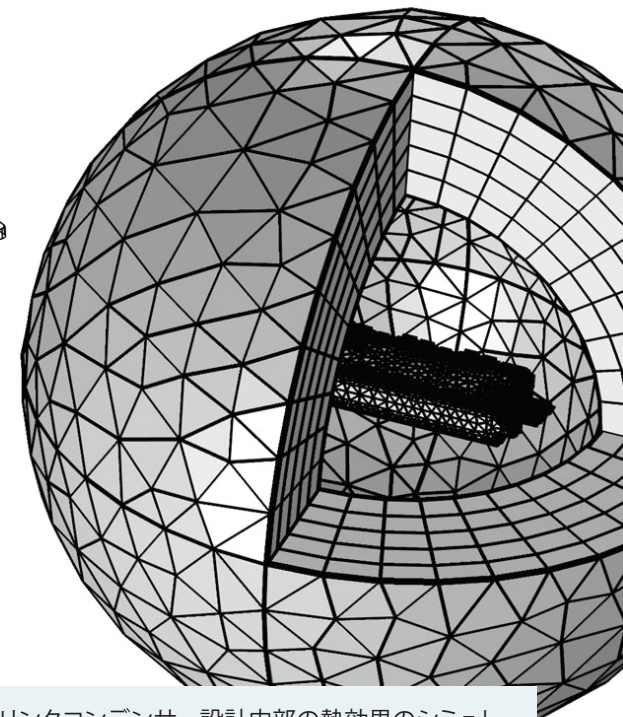


図9 シミュレーションで計算されたESR曲線のプロットと、実機で測定されたESR値を比較したもの。これらの曲線が一致することで、さらなる解析のためにモデルを検証するのに役立ちます。



析を行うことができます。その後、各高調波について損失を合計します”とKessler氏は説明します。

その他の重要な値としては、Kessler氏と彼のチームが結合効果を判断するのに役立つ境界条件があります。“AC/DCモジュールを使ってコンデンサーの寄生インダクタンスを計算します”とKessler氏は説明します。

“また、コンデンサーの巻線または内部バスバーを通る完全なAC損失分布も求めます。次に、その結果を結合して、伝熱モジュールを使ってカバー部品の温度依存抵抗率を求めることができます”と彼は言います。“これにより、電磁気の影響による素子の最大ホットスポット温度を求めることができるのです。”

解析から得られた結果は、設計の変更につながる場合があります。Kessler氏は、新しいコンデンサーの設計には通常、3回の試験が行われると説明しています。“シミュレーションでは、1つの段階から次の段階への改善曲線がより急勾配になります。私たちの知識は迅速に成長し、それが最終製品に反映されるのです。”Boschの最新世代のインバーターは、従来の設計

と比較して航続距離が6%、電力密度が200%向上しています。

▶▶ 電動化が本格化

自動車メーカーがより多くの製品ラインを電気推進に転換するにつれ、迅速かつコストを意識した研究開発の必要性も高まると、Martin Kessler氏は考えています。“電動モビリティは今成長期を迎えているのです”と彼は言います。“OEMは、様々な電力クラスのインバーターや、より厳しい空間的制約を満たすインバーターなど、より多様なニーズを持って当社にやってくると思います”とKessler氏は述べています。“新しいコンデンサーの設計を必要とする製品の数は、今後も増え続けると思います。当社のシミュレーション主導の開発手法なら、このような成長にも対応できると確信しています。”

今後、シュトゥットガルトの自動車博物館を訪れる人々は、自動車産業を新しい電気時代へと駆り立てた歴史的なモーターやインバーターに感嘆の声を上げるかもしれません。◎

Manufacturing Technology Centre, United Kingdom

工場の微調整: 積層造形工場の最適化を支援するシミュレーションアプリ

ALAN PETRILLO 著

金属粉末床溶融結合などの積層造形 (AM) プロセスでは、高品質な部品を迅速かつカスタマイズ可能に製造することができます。英国の Manufacturing Technology Centre は、航空宇宙産業のパートナーとともに、敷地内に粉末床溶融結合施設を建設し、さらに、工場のスタッフがその運用について十分な情報を得た上で意思決定できるよう、シミュレーションモデルとアプリを開発しました。

産業革命は、18世紀半ばにイギリスで始まったと言われています。鋳物工場や製粉工場が煤煙をあげていた時代はとうに過ぎ去りましたが、製造業は依然として不可欠であり、かつ困難なものです。このような現代の産業界の課題に対応するための有望な手段の1つが、粉末床溶融結合法などの新しい技術を用いた積層造形 (AM) です。AMは、迅速、正確、かつカスタマイズ可能な生産を実現するために、工場設備の改造だけでは不十分です。工場の運営や管理に対する新しいアプローチも求められています。

このため、英国の Manufacturing Technology Centre (MTC) は、シミュレーションモデルとアプリを使用して社内の金属粉末床溶融結合 AM 設備を強化し、工場のスタッフが運用について十分な情報を得た上で意思決定を行えるようにしました。COMSOL Multiphysics® のアプリケーションビルダーを使用して作成されたこのアプリは、本格的な AM 工場とそれのいわゆる “デジタルツイン” を組み合わせることができる可能性を示しています。

“このモデルは、粉末床溶融結合工場内の熱と湿度が製品の品質と作業員の安全にどのよ

うな影響を及ぼすかを予測するのに役立ちます”と、MTC のモデリングチームの技術マネージャーである Adam Holloway 氏は述べています。“このアプリを工場からのデータフィードと組み合わせることで、日々の意思決定に予測モデリングを取り入れることができます。” MTC のプロジェクトは、シミュレーションを現代の産業労働者の手に直接委ねることの利点を実証し、シミュレーションが製造業の未来を形作るのに役立つ可能性を示しています。

▶▶ DRAMA による航空宇宙のための積層造形

英国の近代的な工場が世界と歩調を合わせるために、MTC は英国全土で高価値の製造業を促進しています。MTC は、英国の歴史ある産業都市コベントリー (図1) に拠点を置いています。そのため、チームは NCAM (National Centre for Additive Manufacturing) に多大な人的および技術的資源を投入しているのです。

“AM の導入は、単に新しい装置を取り付けることではありません。当社の顧客は、AM 工場の運営をサポートするデジタル基盤の導入につ

いても支援を求めています”と Holloway 氏は言います。“企業向けソフトウェアとデータ接続に加え、シミュレーションをシステムに組み込む方法を私たちは模索しています。”

NCAM の “DRAMA (航空宇宙用のデジタル再設定可能積層造形)” プロジェクトは、この探求のための貴重な場を提供してくれています。多くのメーカーと共同で開発された DRAMA の構想には、先に述べた新しい金属粉末床溶融結合工場 AM 設備が含まれています。そのミニ工場を舞台に、Holloway 氏をはじめとするシミュレーションのスペシャリストたちは、DRAMA の航空宇宙用 AM 部品の生産を成功させるために重要な役割を担っているのです。

▶▶ 柔らかい材料から固体オブジェクトを作成

製造プロセスにおける “積層造形” とは何でしょうか? また、なぜ多くの産業が AM 手法を模索しているのでしょうか? 広義には、積層造形とは材料を除去したり成形したりするのではなく、1層ずつ材料を追加していくことでオブジェクトを作るプロセスを指します。例えば、還元剤または減法的な方法で部品を製造する場合、まず金属の固体ブロックを作り、それを切



図1 イギリスのコベントリーにある Manufacturing Technology Centre の本部。



図2 金属粉末床溶融結合法で製造された部品の一例。

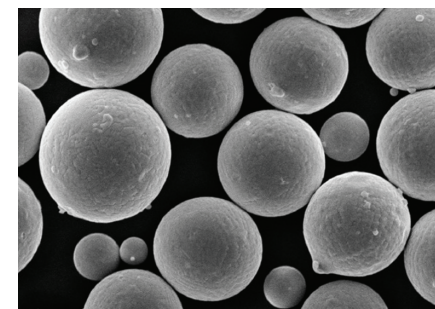


図3 粉末床溶融結合に使用される粉末状の金属粒の顕微鏡によるクローズアップ。

断、穴あけ、研磨して形状を整えます。一方、積層造形法では、まず何も無い空間から始めます。次に、その空間に緩い材料や柔らかい材料を、目的の形になるまで (慎重に制御された条件下で) 追加していきます。そして、その柔軟な材料を固め、耐久性のある完成部品に仕上げるのです。

材料によって、造形物の生成や固化の方法は異なります。例えば、一般的に販売されている 3D プリンターは、温まったプラスチックフィラメントを巻き取って造形物を作ります。このフィラメントは、冷えるとそれ自体と結合して硬くなります。一方、金属粉末床溶融結合では、その名の通り粉末状の金属を熱で溶かし、冷やすと再固体化させます。金属粉末床溶融

結合法によって製造された部品を図2に示しています。

▶▶ 熱と湿度が金属粉末床溶融結合に与える影響

“AM 手法の市場機会は長い間理解されてきましたが、大規模な導入には多くの障害があります”と Holloway 氏は述べています。“これらの障害の一部は、製品や AM 設備の設計段階で克服することができます。一方、環境条件が AM 生産に与える影響などの問題は、設備が稼働している間に対処しなければなりません。”

例えば、熱と湿度の管理は、DRAMA チーム

にとって不可欠な作業です。“粉末床溶融結合 (図3) で使用する金属粉末は、外的条件に非常に敏感です”と Holloway 氏は言います。“つまり、保管中でも酸化したり湿気を帯びたりする可能性があり、こうしたプロセスは施設内を移動する間にも継続されるのです。熱や水分にさらされることで、流動性、溶解性、電荷の受け取り方、固化性などが変化します。これらの要因はすべて、生産する部品の品質に影響を及ぼします。”

粉体金属の不注意な取り扱い、製品の品質を脅かすだけでなく、作業員の健康と安全も危険にさらす可能性があります。“AM プロセスに使用される金属粉末は可燃性で毒性があり、乾燥するとさらに可燃性が高まります”と Holloway 氏は説明します。“湿度レベルを継続的に測定および管理し、粉末が施設内にどのように伝播していくかを把握する必要があります。”

しかし、適切な大気条件を維持するためには、工場の換気を良くするための空調システムが必要で、それには膨大な費用がかかってしまいます。NCAM の試算では、比較的小規模の工場に温度調節器を導入するには、50万ポンド近くかかるということです。しかし、このような複雑なシステムを追加することなく、熱と湿度を適切に管理することができるとしたらどうでしょう?

▶▶ マルチフィジックスモデリングによる即応性のあるプロセス管理

マルチフィジックスシミュレーションを使用して入念なプロセス管理を行えば、コストパフォーマンスの高い代替案を提供できるかもしれません。“DRAMA プログラムの一環として、COMSOL® ソフトウェアの数値流体力学 (CFD) 機能を使用して、当社の施設のモデルを作成しました。私たちのモデル (図4) では、有限要素法を用いて、施設内の空気ドメインにおける

“私たちは、非常に複雑な計算の結果をわかりやすく提示しようとしています。私たちのモデルからアプリを作成することで、スタッフが毎日のシフト中にノートパソコンで予測シミュレーションを実行できるようになります。”

— ADAM HOLLOWAY, MTC テクノロジーマネージャー

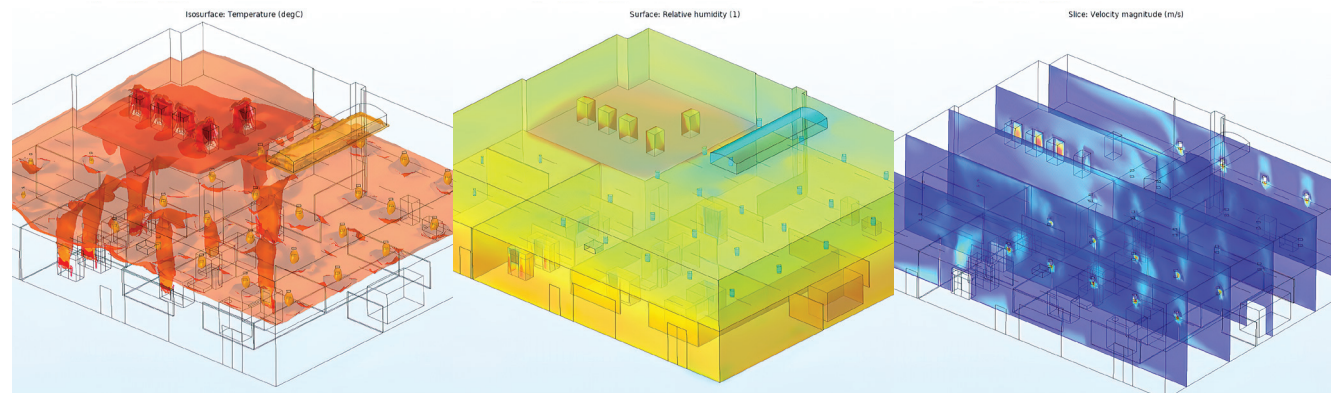


図4 7台の機械が稼働している DRAMA 施設の3つのシミュレーション画像. 左は温度変化を示す等値面プロット. 中央の画像は湿度変化の分布, 右の画像は空間全体の気流速度のスライスプロット.

Facility Boundary Conditions

Load external data

Initial facility conditions

Internal ambient temperature: 8 °C

Internal ambient relative humidity: 0.25

Exterior ambient conditions

External ambient temperature: 8 °C

External ambient relative humidity: 0.25

Temperature of walls, floor, and ceiling

Interior wall temperature: 8 °C

Exterior wall temperature: 8 °C

Floor temperature: 12 °C

Ceiling temperature: 8 °C

Ventilation settings

Vent air temperature: 20 °C

Air handling unit temperature: -5 °C

Vent flow speed: 2 m/s

Powder room conditions

Powder room temperature: 20 °C

Powder room relative humidity: 0.5

Light settings

Light thermal output: 16 W/m

Doors

Close door 1, Open door 4, Close door 2, Open door 5, Close door 3, Open door 6

図5 DRAMA の粉末床溶融結合施設のシミュレーションアプリ. 搭載されている機械や吹き出し口の位置が表示されています. ユーザーは, 空間全体の初期温度や湿度, 空調システム, 照明, 金属粉末保管室などを設定することができます. この場合, 一部の扉 (ピンク色の部分) は開けっ放しになっています.

熱伝達と流体の流れを表す偏微分方程式を解いています”と Holloway 氏と言います. “これにより, 環境条件が複数の変数によってどのように影響されるかを研究することができました. 例えば, 外の天気, 稼働している機械の台数, 店内での機械の配置などです. これらの変数を考慮したモデルは, 工場スタッフが換気や生産スケジュールを調整し, 条件を最適化するのに役立ちます”と彼は説明します.

工場スタッフを助けるシミュレーションアプリ

DRAMA チームは, COMSOL Multiphysics のアプリケーションビルダー (図5) を使用してシミュレーションアプリを作成することにより, モデルをより利用しやすいものにしました. “私たちは, 非常に複雑な計算の結果をわかりやすく提示しようとしています”と Holloway 氏と言います. “私たちのモデルからアプリを作成することで, スタッフが毎日のシフト中にノートパソコンで予測シミュレーションを実行できるようになります.”

アプリのユーザーは, 工場のシフト開始時に関連する境界条件を定義し, 継続的に調整することができます. シフトの途中で, 熱や湿度は必然的に変動します. そのため, 工場のスタッフは, 部品の品質を維持するために生産スケジュールを変更したり, 風通しを良くするためにドアや窓を開けたりする必要があるかもしれません. アプリの設定を変更することで, このようなアクションの効果を検証することができます. 例えば, 図6は AM 機械のビルドチャンバーを開けたときの気温への影響を示す等温サーフェスプロット, 図7は施設の扉を開けたときの気流への影響を示すものです.

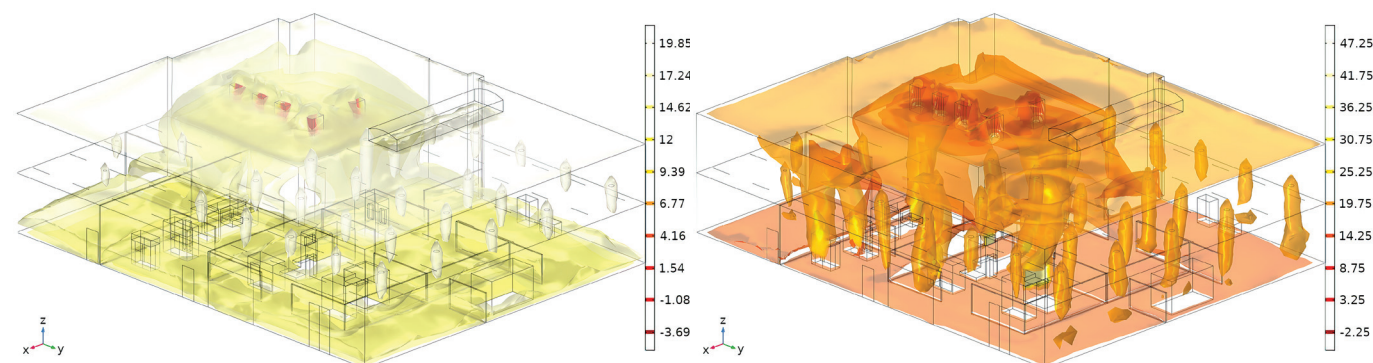


図6 シミュレーションでは, 時間の変化に伴う機械の熱や流体の出力を捉えることができます. これらの等温サーフェスプロットは, 施設内のすべての AM 機械のビルドチャンバーを開いてから30秒後 (左) と60秒後 (右) の温度変化を示しています.

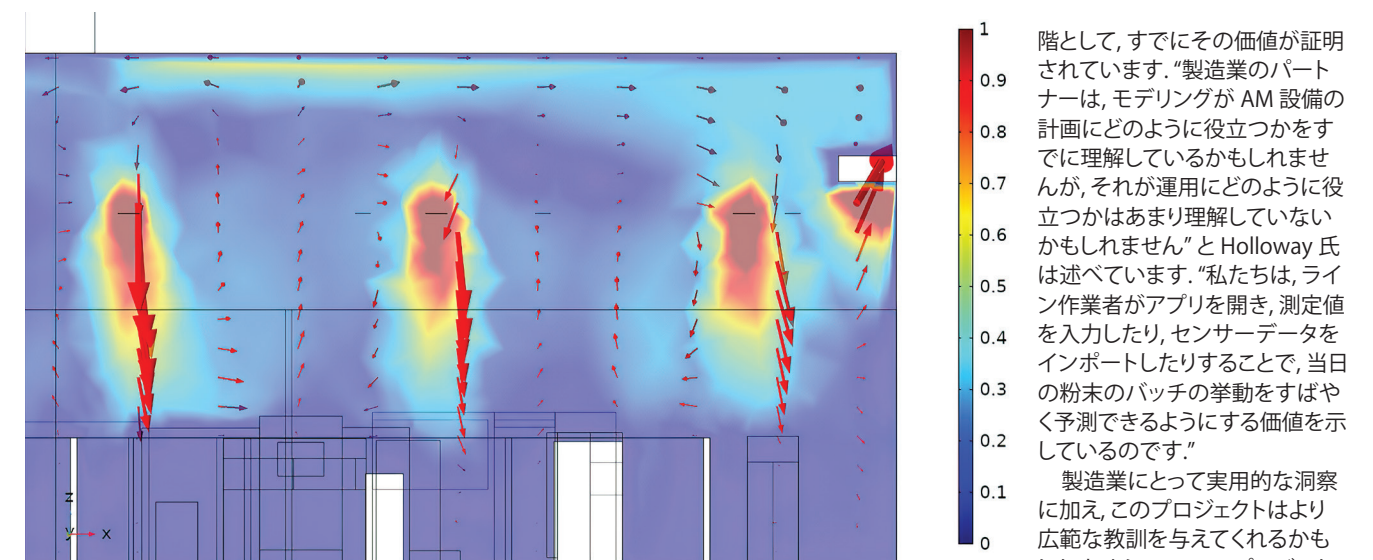


図7 ドアの開閉が気流に与える影響を示すスライスプロット. ダクトの真下にあるドアを開けると, ダクトに向かう風速が大幅に弱まることがわかります.

“工場レベルのデジタルツイン”への一歩

現在のアプリの導入は重要なステップですが, それでも作業者は関連データを手動で入力する必要があります. DRAMA チームは, より統合的でより強力なもの, すなわち AM 施設の “デジタルツイン” を構想しています. デジタルツインとは, Ed Fontes が COMSOL Blog の 2019年の投稿で説明したように, “実際の製品, デバイス, またはプロセスを継続的に更新される動的な表現” のことを指します. ここで重要なのは, たとえシステムの最も詳細なモデルであっても, 必ずしもそのデジタルツインであるとは限らないということです.

“工場環境モデルをデジタルツインにするには, まず実際の工場からのライブデータを継続的に提供します”と Holloway 氏は説明

します. “工場モデルがバックグラウンドで実行されるようになれば, データフィードに応じて予測を調整し, その予測に基づいた具体的なアクションを提案できるようになります.” “予測モデルを, 実際の工場とそのスタッフを含むフィードバックループに統合したいのです. 目標は, 現在の工場の状況に対応し, シミュレーションによって将来の状況を予測し, その予測に基づいてシームレスに自己最適化調整を行う総合的なシステムを構築することです”と Holloway 氏と言います. “そうすれば, まさに工場のデジタルツインを構築したと言えるでしょう.”

工場現場でのシミュレーション

DRAMA シミュレーションアプリは, 工場レベルの完全なデジタルツイン構築への中間段

階として, すでにその価値が証明されています. “製造業のパートナーは, モデリングが AM 設備の計画にどのように役立つかをすでに理解しているかもしれませんが, それが運用にどのように役立つかはあまり理解していないかもしれません”と Holloway 氏は述べています. “私たちは, ライン作業者がアプリを開き, 測定値を入力したり, センサーデータをインポートしたりすることで, 当日の粉末のバッチの挙動をすばやく予測できるようにする価値を示しているのです.”

製造業にとって実用的な洞察に加え, このプロジェクトはより広範な教訓を与えてくれるかもしれません. DRAMA プロジェクトは, 生産ラインと動的シミュレーションモデルを組み合わせることで, 作業全体の安全性, 生産性, 効率性を向上させてきました. DRAMA チームは, モデルを最も効果のある場所, つまり工場の現場で働く人々の手に届けることで, それを達成したのです. ☺



MTCにあるNCAMの金属粉末床施設内の作業員.

Exicom Tele-Systems, India

集中アプローチ熱モデリングによる車載用バッテリーマネジメントシステムの高度化

インドの輸送部門が野心的な電動化目標を達成するためには、メーカーはバッテリーマネジメントシステム (BMS) などの不可欠な要素の開発を加速させる必要があります。Exicom はマルチフィジックスシミュレーションで様々な電池セルや電池パック設計の熱挙動を理解し、BMS の性能を最適化しています。

NEENA PICARDO 著

インドは電気自動車 (EV) 市場が急成長しており、ある調査では、2030年までにインドで販売される自動車の 30% 以上が電気自動車になると予測されています。電気自動車を駆動する電池パックは、インドにおける電気モビリティ革命の主要な推進要因の1つです。電池パックの性能と安全性を監視および管理するために、電池パックには通常、バッテリーマネジメントシステム (BMS) が搭載されています。BMS は、バッテリーの電圧、温度、冷却水流れ、健康状態を監視し、電流の変化や発熱など様々な性能パラメーターを予測する電子システムで、電池パックから最適な性能を引き出すために役立ちます。

正確な BMS の開発におけるシミュレーションの役割

Exicom Tele-Systems Pvt. Ltd. は、最新のリチウムイオン電池技術を含むエネルギーソリューションの設計、開発、配備を行っています。現在までに、一社で世界最高レベルの合計 1.8 GWh 以上のリチウムイオン電池ソリューションを展開しています。Exicom は、インドにおける電動モビリティの成長を牽引する電動二輪車や小型電気自動車向けの充電ソリューションや BMS も提供しています。Exicom の革新的な BMS ソリューションは、その性能と寿命が高く評価されています。

インドのグルグラムにある Exicom の研究

開発センターでは、Parmender Singh 博士の率いる技術チームが、幅広い電圧範囲 (最大 1000V) にわたるアプリケーションでリチウムイオン電池を精密に監視、管理するために使用できる BMS を開発しました。この BMS は化学的な制約を受けないため、フェロリン酸リチウムまたはリン酸鉄リチウム (LFP)、ニッケルマンガンコバルト酸化リチウム (NMC)、リチウムニッケルコバルトアルミニウム酸化物 (NCA) など、様々な化学組成のリチウムイオン電池で使用することができます。

BMS の精度は、システムのプログラミングや校正に使用される入力品質と正確さに依存します。例えば、BMS には、電池パック全体に分散した多数の温度センサーが搭載されています。電池パックの温度分布を正確に監視し、対応する性能を予測するためには、センサーを適切な位置に配置することが不可欠です。そのためには、各電池セルの熱プロファイルと、パック全体の熱の変化を詳細に理解する必要があります。そこで COMSOL Multiphysics® が重要な役割を果たします。それは、熱プロファイル情報など、精密な BMS の開発に必要な入力を正確に計算および照合できるようにすることです。

潜在的な熱暴走の予知と防止

Exicom の Singh 博士のチームは、COMSOL Multiphysics を使用して、電池セルの熱挙動

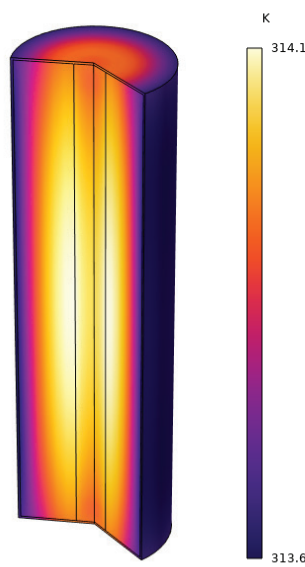
に関する数多くの解析を実行しました。また、機器の損傷や火災の原因となる熱暴走 (制御不能な自己発熱プロセス) を引き起こす可能性のある外部短絡の解析にもシミュレーションを使用しました。Exicom のチームは、異なるフォームファクターの円筒形セルで発生する熱の解析から始め、さらにセルで発生する熱プロファイルを使用してこのモデルをパックレベルまで拡張しました。“特に空冷式電池パックの温度勾配を改善することに重点を置いていました”と Singh 博士は述べています。

円筒形セルの 1C 放電時のセルレベルでの熱モデリング結果を図 1 に示しています。図 1 の左側の可視化は温度分布を示しており、セル中央部で最高温度が観測されています。右側の可視化は温度の等高線分布を示しており、最高温度がセルの活物質にあることがわかります。

このシミュレーション結果を実験結果に対して検証したところ、標準的な充放電プロファイルでは ±5% の誤差の範囲内にあることが確認されました。さらに、外部短絡試験で規定されている UL1642 規格に準拠した 100% 充電状態 (SOC) での 2C 放電を実現させるためにモデルを拡張しました。

セルの正極と負極は 80 ± 20 mΩ の抵抗を介して短絡されました。COMSOL® ソフトウェアの集中アプローチに基づく熱モデルを、セルの充放電プロファイルの実験データに

R_short_ext(3)=0.8 Ω Time=4000 s
Surface: Temperature (K)



R_short_ext(3)=0.8 Ω Time=4000 s
Contour: Temperature (K)

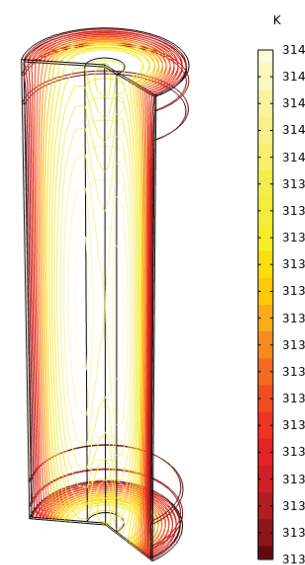
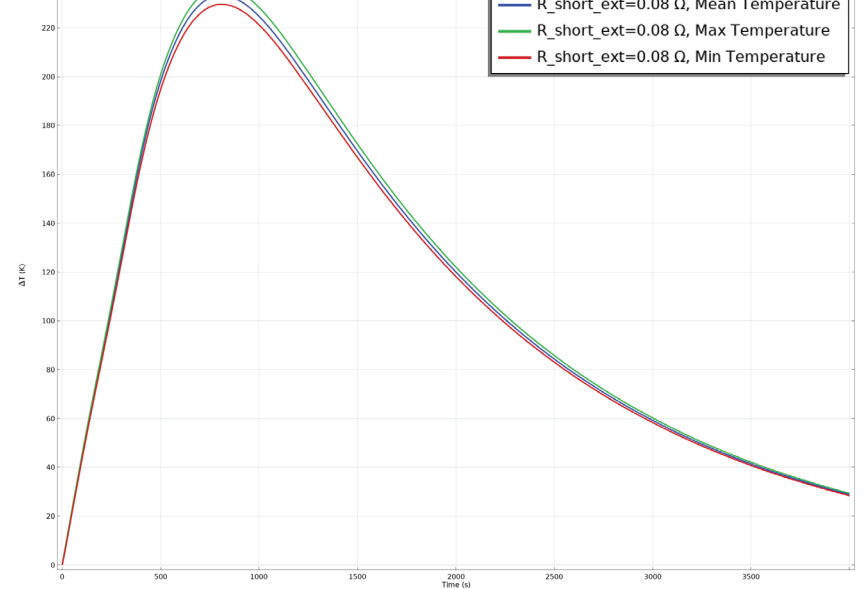


図 1 1C 放電時の円筒形セル内の温度分布 (左) と、温度の等高線分布 (右)。

Temperature change



Global: Cell potential (V) Global: Cell open circuit voltage (V) Global: Cell current (A)

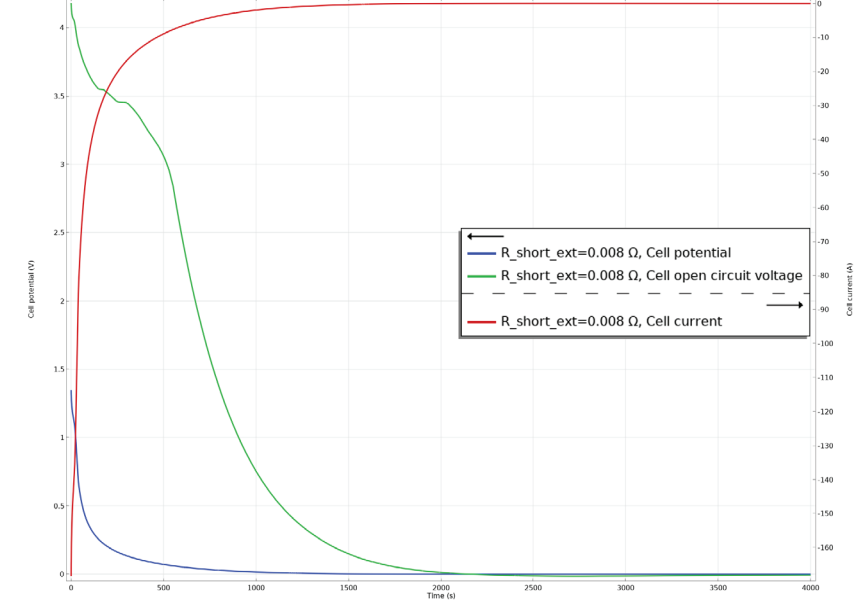


図 2 熱暴走後のセル内の温度プロファイル (左) と熱暴走後のセル内の電気化学プロファイル (右)。

対して検証しました。なお、彼らは以下を開発しました。

- COMSOL® の最適化機能を用いた、円筒形セルのサイクリックおよびカレンドリック容量フェードモデル。
- 抽出された電気化学パラメーターを用いた円筒形セルの高忠実度疑似 2 次元 (P2D) モデル。

集中アプローチにより、セルのジオメトリ、電極の厚さ、熱伝導率、熱容量、駆動サイクル、開放電圧 (OCV) - SOC テーブルなど、電池パックメーカーから容易に入手できる最小限のパラメーターでモデルを構築できることを彼らは発見しました。

これらのパラメーターを実験的に抽出することは、時間がかかるだけでなく、実験条件が変動するため誤差が生じやすくなります。例えば、周囲温度は変動するため、セルの正確

な熱プロファイルを抽出するには、異なる周囲温度で広範な一連の試験を実行する必要があります。しかし、Singh 博士とそのチームは、シミュレーションを使用することで、これらの実験を非常に簡単に実行することに成功しました。充放電プロファイル、異なる充放電率での熱挙動、および異なるセル化学 (図 3) の外部または内部短絡による熱暴走 (図 2) を、効率的に研究することができました。また、電池パック内のホットスポットを特定し、

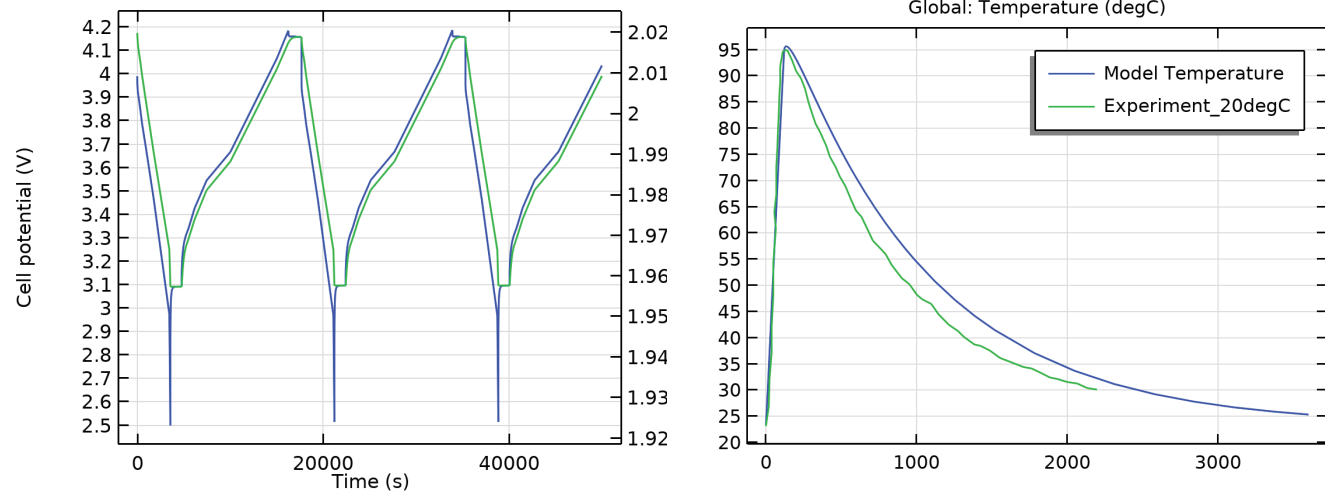


図3 外部短絡試験時のシミュレーションと実験データ。

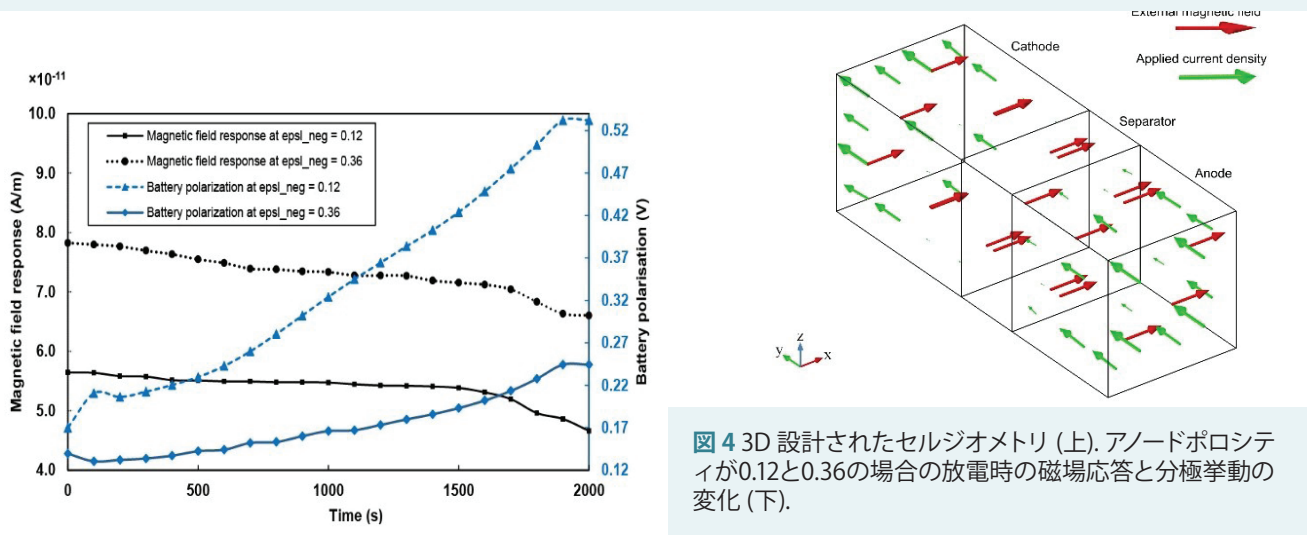


図4 3D 設計されたセルジオメトリ (上). アノードポロシティが0.12と0.36の場合の放電時の磁場応答と分極挙動の変化 (下)。

容量フェード解析に基づくセルのグレーディングを高精度に決定することができました。これらの結果は、BMS の開発サイクルタイムの短縮に直接的に貢献しました。ホットスポットは、BMS 内の熱センサーが最も効率的に機能するための最適な配置を示していたからです。Singh 博士は、「COMSOL® は、バッテリー設計と熱モデリングのための、習得が容易で適応性の高い有限要素ツールです」と述べています。

» 将来の展望: 経年劣化を予測するためのバッテリーシミュレーションの拡張

Singh 博士は、熱シミュレーションに加えて、もう一つの重要な現象であるバッテリーの経年劣化の調査にもシミュレーションの利用を拡大しました。バッテリーの寿命において、固体電解質相間界面 (SEI) 層の成長など不可逆的な物理的、化学的変化により、その健全

性 (SOH) が徐々に低下し、電池セル内のポロシティが低下し、分極や内部抵抗の上昇につながることがあります。バッテリーの SOH を監視するための非侵襲的な方法で、磁場プロービング (MFP) というものがあります。MFP 法の可能性を実証するため、Singh 博士は COMSOL® でマルチフィジクスモデルを開発し、リチウムイオン電池の磁場応答、電池の分極、リチウムイオン応答の内部抵抗を評価しました (図4)。その結果、電極のポロシティのばらつきが磁場応答に大きな影響を与えることが確認されました。この研究はまだ予備的な段階にありますが、その応用の可能性は極めて大きなものです。「この現象をさらに詳しく調べることで、バッテリーの経年劣化を監視する機能や、BMS 自体のより良い保護メカニズムを開発および導入することが可能になると期待しています」と Singh 博士は語っています。

Exicom チームは現在、セルレベルでの熱および容量フェード解析のための電気化学的な P2D モデリングに取り組んでいます。さらに、電極と SEI 層での熱発熱方程式を追加してモデルを拡張し、熱暴走時の精度を向上させる予定です。また、集中容量フェードモデルを周期的、カレンダー的な予測解析に利用することも計画しています。将来的には、SOC と SOH のための次世代低減モデルを実装し、ASIC レベルまでのコード生成のために MATLAB® にモデルをエクスポートすることも計画しています。

インドおよび世界中で電動モビリティへの移行が加速する中、バッテリー技術に関する研究は今後大幅に増加することが予想されます。COMSOL® のようなシミュレーションソフトウェアは、より効果的なソリューションを提供し、製品の市場投入期間を短縮したいと考えている電動モビリティ分野の企業にとって、極めて重要な戦力となるでしょう。©

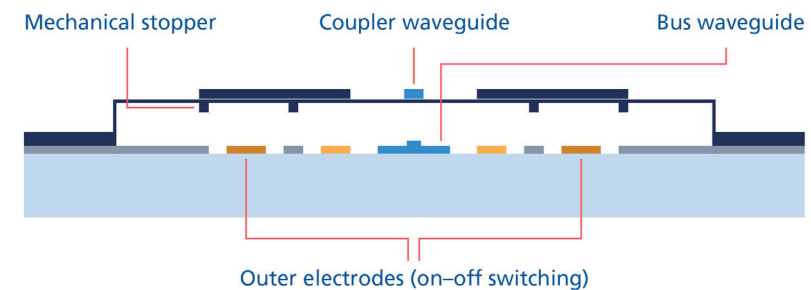
Swiss Federal Institute of Technology Lausanne (EPFL), Switzerland

シミュレーションによるシリコンフォトニクス MEMS 位相シフター的设计

ALAN PETRILLO 著

インターネットの重要要素である光ファイバーネットワークは、多くの電気信号処理デバイスに依存しています。位相シフターなどのナノスケールのシリコンフォトニクスネットワーク部品は、光ネットワークの速度、容量、信頼性を向上させることができます。EPFL (Swiss Federal Institute of Technology Lausanne) の研究チームは、これらの小型で強力なデバイスを設計するために、シミュレーションを使用して光学的性能と電気機械的性能の両方を最適化しています。

Phase shifter off (no optical coupling)



Phase shifter on (continuous tuning)

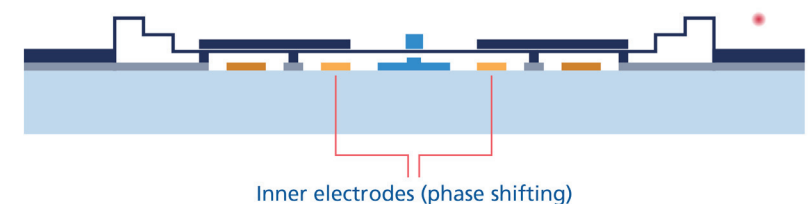
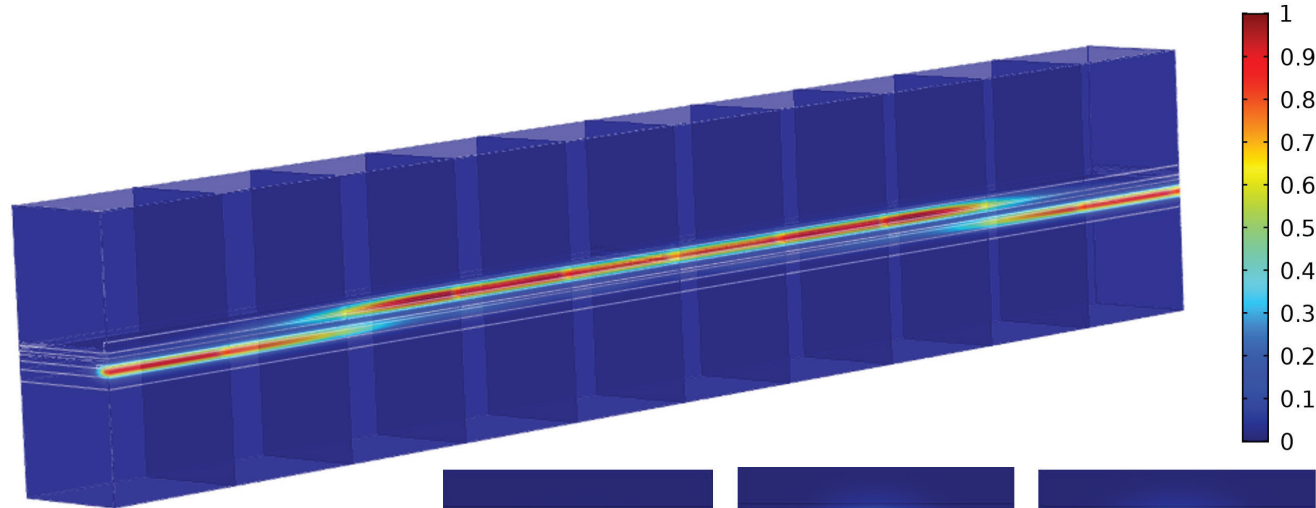


図1 位相シフターの MEMS 機構の2段階の動作。

インターネットに接続された現代社会は、しばしば「ワイヤード (有線)」と表現されますが、実はコアネットワークのデータトラフィックのほとんどは、電線ではなく光ファイバーによって伝送されています。それにもかかわらず、既存のインフラは、光ファイバーネットワーク内に埋め込まれた多くの電気信号処理部品に依存しています。これらの部品をフォトニックデバイスに置き換えることで、ネットワークの速度、容量、信頼性を向上させることができます。この新しい技術の可能性を実現するために、EPFL (Swiss Federal Institute of Technology Lausanne) の多国籍チームは、次世代の光ファイバーデータネットワークに不可欠な構成要素となり得るシリコンフォトニック位相シフターのプロトタイプを開発しました。



全光ネットワークへの道を照らします

フォトニックデバイスを使って光信号を処理することは理にかなっているように思えますが、なぜこのアプローチがまだ標準化されていないのでしょうか？ 現在、CSEM (Swiss Center for Electronics and Microtechnology) で、微小電気機械システム (MEMS) 技術を中心とした PIC (光集積回路) を研究するエンジニアの Hamed Sattari 氏は、“非常に良い質問ですが、実は答えるのが難しい質問です！”と言います。Sattari 氏は、シリコンフォトニック位相シフターを開発した EPFL のフォトニクスチームの主要メンバーでした。光信号処理に対する MEMS に基づくアプローチを追求する中で、Sattari 氏と彼の同僚は、新しく登場した製造技術を活用しています。“10年前でさえ、このようなデバイスに使用する集積化された可動構造を製造することはできませんでした”と Sattari 氏は言います。“現在では、シリコンフォトニクスと MEMS は、マイクロエレクトロニクス産業の現在の製造能力で実現可能になってきています。私たちの目標は、これらの機能を用いて、光ファイバーネットワークのインフラをどのように変革できるかを実証することです。”

この位相シフター設計プロジェクトは、光ファイバーデータネットワークや宇宙アプリケーション向けのプログラム可能なフォトニック部品の開発という、EPFL の幅広い取り組みの一環です。これらのデバイスには、スイッチ、チップ-ファイバーグレーティングカプラー、可変光減衰器 (VOA) および光信号を変調する位相シフターが含まれます。“既存の光位相シフターは、かさばるか、信号の損失が大きい傾向があります”と Sattari 氏は述べます。“私たちは、より小型で低損失の位相シフター

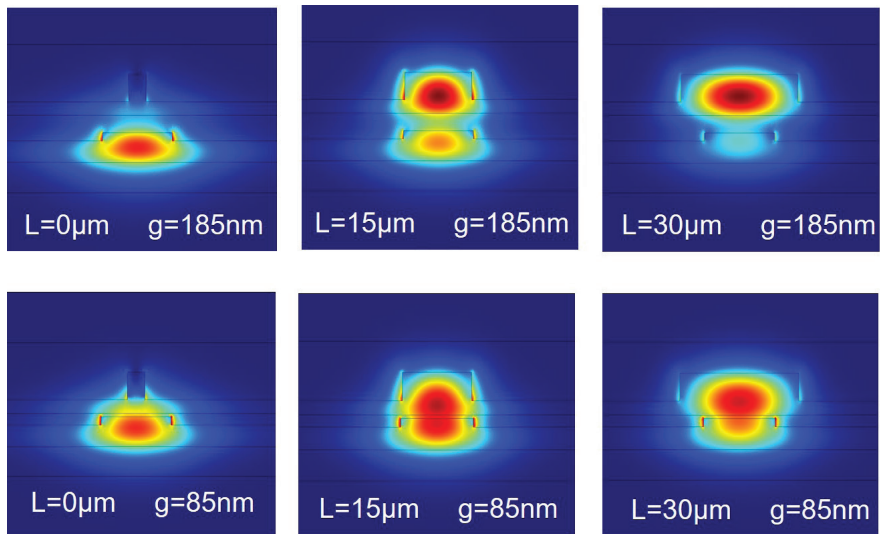


図2上: 光バスと結合された可動導波路で構成された経路を左から右へ光が通過します。下: 結合デバイスを通る際のシミュレーション光波形の6つの断面スライス。EPFL の研究チームは、シミュレーションで2つの光学素子間の距離を調整することにより、その距離が光信号の速度 (位相) にどのような影響を与えるかを判断することができました。画像提供: FPL, ライセンス: CC BY 4.0.

を開発し、多くのネットワークアプリケーションで使用できるように拡張性を持たせることに優先的に取り組んでいます。可動導波路を MEMS で作動させれば、小さなフットプリントで低消費電力の光信号を変調させることができるのです”と彼は説明しています。

可動導波路が光信号の変調に役立つ理由

MEMS 位相シフターとは、光の速度を調整するという、一見単純そうに見える高度なメカニズムです。光の位相を変えるということは、光の速度を落とすことを意味します。光がデータ信号を運んでいるとき、その速度が変われば信号も変わります。位相が速く正確に変化することで、信号が変調され、ネットワーク全体において損失を最小限に抑えたデータ伝

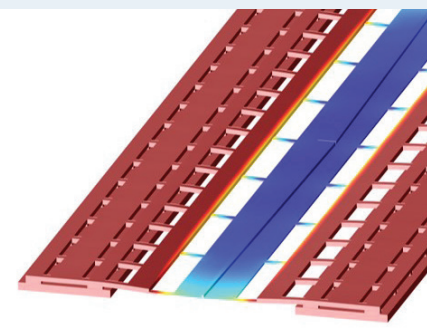


図3 可動導波路の支持構造の変形を示すシミュレーション。可動導波路を吊り下げている薄い素子は、印加電圧に反応してたわみます。画像提供: EPFL, ライセンス: CC BY 4.0.

送が可能になるのです。光ファイバー導体 (バス導波路) を通る光の位相を変えるために、MEMS 機構はカプラーと呼ばれる半透明のシリコンをバスの近くに移動します。

位相シフターの MEMS 機構は、2段階の動作をする設計になっています (図1)。第1段階では、カプラーの導波路を単純にオンオフすることで、カプラーをバスに接続または切断します。カプラーが結合されると、2段階目の動作でより細かい動作が可能になります。これにより、カプラーとバスの間隔を調整し、光信号の位相変化を精密に変調することができますようになります。“カプラーをバスの近くに移動させることで、信号の位相を変化させることができます”と Sattari 氏は説明します。“カプラーは、屈折率の高いシリコンできています。2つの部品が結合されると、バス内を進む光波がカプラーをも通過し、波の速度が遅くなります。”カプラーとバスの光結合が慎重に制御されていないと、光の波形が歪み、信号、そしてデータが失われる可能性があります。

光学と電気機械シミュレーションによるナノスケールの設計

Sattari 氏と彼のチームの課題は、結合プロセスをできるだけ正確かつ確実に制御するナノスケールの機構を設計することでした。位相シフターは電流を使って光学素子を物理的に動かすため、Sattari 氏と EPFL チームは、デバイスの設計に2つの方向からアプローチすることにしました。その目的は、光信号に望ましいシフトを引き起こすために、MEMS 機構に印加する必要がある電圧を決定することでした。電圧と位相の関係を確立するための複数の値を決定するために、シミュレーションは不可欠なツールでした。“電圧 VS 位相は、複雑なマルチフィジックスの問題です。COMSOL Multiphysics® ソフトウェアは、この大きな問題をより小さなタスクに分割するための多くの選択肢を与えてくれました”と Sattari 氏は述べています。“光学モデリングには RF モジュールを、電気機械シミュレーションには構造力学モジュールを使用し、2つの並列アークでシミュレーションを実行しました。”

光学モデリング (図2) では、モード解析により結合した導波路素子の実効屈折率を求め、その後、信号の伝播のスタディを実行しました。“私たちの目標は、所望の光の位相だけを変化させてデバイスに入出力させることです”と Sattari 氏は言います。“これを達成するために、私たちは COMSOL® でシステムの固有モードを決定します。”

Sattari 氏は、導波路と作動メカニズムの物理的な形状を決定すると同時に、繰り返し動作による不要な変形や変位といった応力効果についてもシミュレーションで研究することができました。“設計に関するすべての決定は、シミュレーションで明らかになったものに基づい

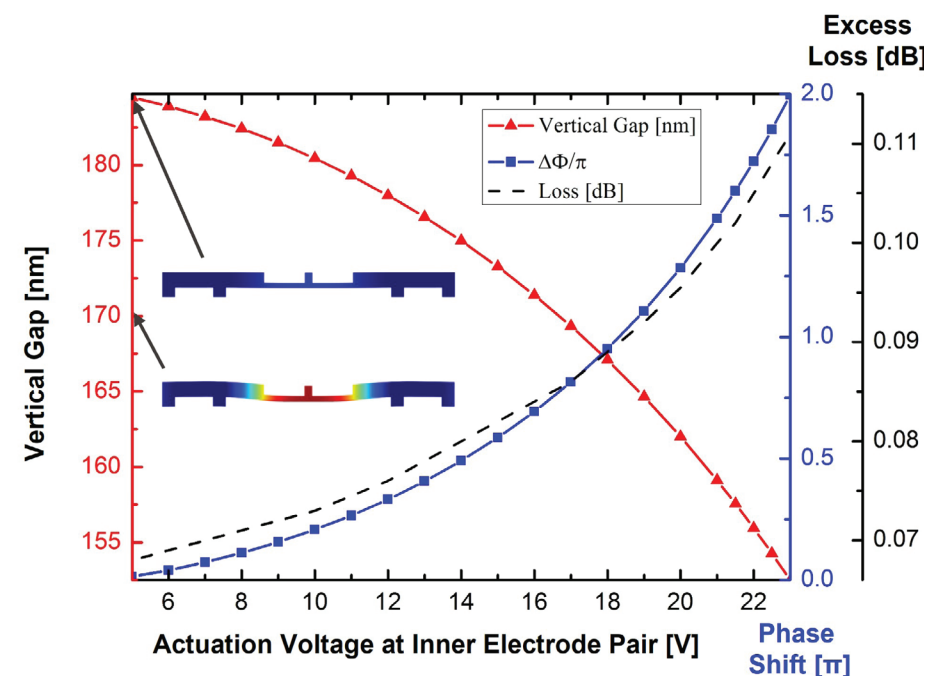
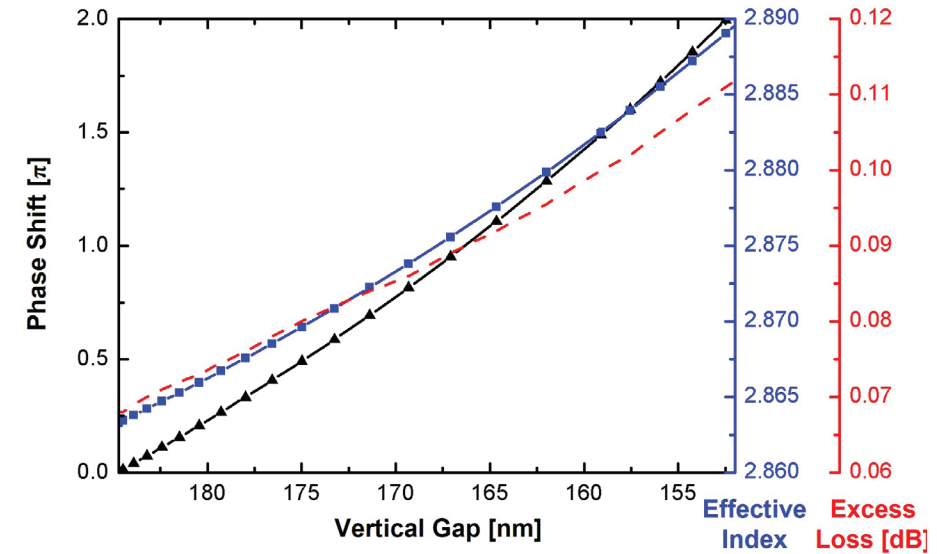


図4 光学シミュレーション (上) では、光信号に所定の位相シフトをもたらすカプラーと導波路の垂直距離を求めました。電気機械シミュレーション (下) では、MEMS 機構に印加したときに、カプラー導波路をバスから所定の距離まで移動させる電圧を決定しました。画像提供: EPFL, ライセンス: CC BY 4.0.

ています”と、彼は言います。

将来のフォトニックネットワークの基盤に貢献

このプロジェクトの目的は、既存の製造能力で MEMS 位相シフターを製造する方法を実証することでした。その結果、既存の表面微細加工技術の製造プロセスで実現可能な、堅牢で信頼性の高い設計を、わずか60 μm ×

44 μm のフットプリントで実現することができました。概念実証に成功した今、Sattari 氏たちは、自分たちの設計が世界の光データネットワークに組み込まれることを心待ちにしています。“私たちは未来への土台をつづけているのであり、その可能性が現実となるのを見届ける時に、努力が報われるでしょう”と Sattari 氏は言います。◎



Polar Night Energy, Finland

砂に蓄えた太陽エネルギーによる建物の暖房装置

arctic circle

ALAN PETRILLO 著

FINLAND

Kankaanpää
Tampere
Helsinki

図1 フィンランドの地図 (一部は北極圏の上に位置する)。現在 Tampere 市とカンカンパ市に設置されている Polar Night Energy の蓄熱システム。

フィンランドのスタートアップ企業である Polar Night Energy は、太陽熱を砂に蓄え、建物を暖める技術を開発しました。同チームは熱モデリングを用いて蓄熱および分配システムの設計を最適化し、フィンランドの都市が再生不能な暖房用燃料の消費を減らすのに貢献しています。

自然を客観的に研究しようとする、自然の力がいかに私たち個人に影響を与えるかを思い知らされることがよくあります。机の前に座って、様々な形の熱について考えることはできますが、足の指が冷たいと気が散ってしまいます。家庭や職場で暖房をつける時、暖かさを求める個人的な欲求と、石油、ガス、石炭またはバイオマスなどの化石燃料を燃やすことによる地球への影響とのバランスをとらなければなりません。人為的な気候変動は、人類に課題を突きつけています。どうすれば今の自分たちを暖めながら、将来、世界がオーバーヒートするのを防げるのでしょうか？

この難題に挑戦しているのが、寒い小国フィンランドのスタートアップ企業、Polar Night Energy です (図1)。冬の夜が長く暗いことで知られるこの地域で、Polar Night Energy は Tampere 市に、昼も夜も、そして冬の間、蓄えた太陽エネルギーで建物を暖めることができるシステムを構築しています。一見矛盾している点は、それだけではありません。希少で高価な素材を使った複雑なクリーンテックソリューションが多い中、Polar Night Energy の蓄熱および分

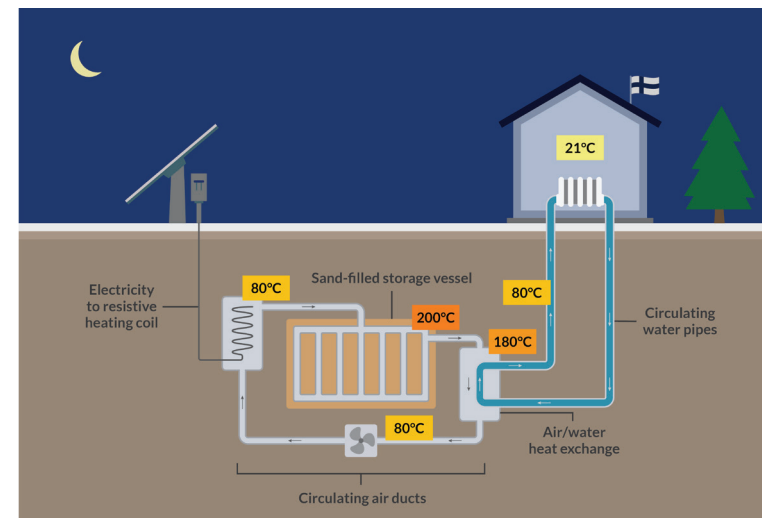
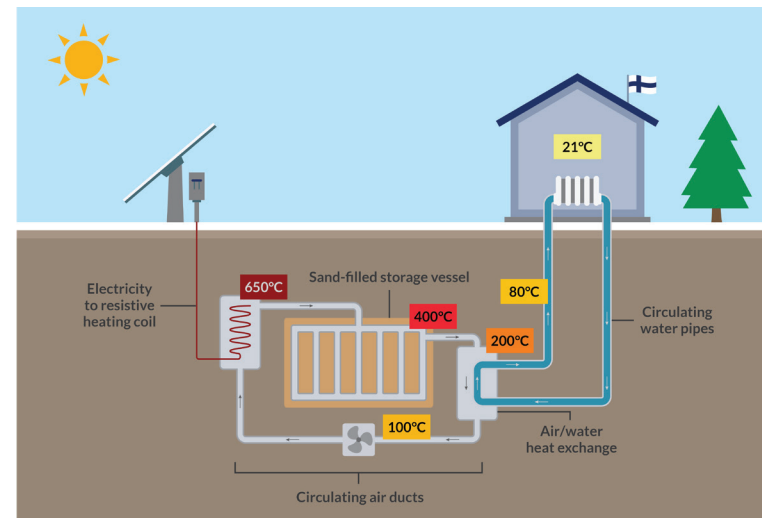


図2 Polar Night Energy システムの構成部品と動作サイクルの模式図。

配システムは、単純なダクト、ポンプ、バルブと砂で構成されています。この斬新なシステムは、地球規模の問題に忍耐強く、思慮深く、人間的なスケールで取り組む可能性を示しています。

大きな暖房ニーズを持つ小さな国

大きな問題には大きな解決策が必要であり、21世紀において気候変動ほど大きな問題はないでしょう。この問題に対処するため、多くの政府や組織が化石燃料の使用を減らすための新しい技術に投資しています。このような取り組みは、主に再生可能エネルギーの発電、配電および貯蔵に焦点を当てたものです。

“クリーンエネルギーというと、電気を思い浮かべますよね”と Polar Night Energy の CEO, Tommi Eronen 氏は語ります。“しかし、暖房による排出も削減する必要があります。”フィンランドのエネルギー関連の排出量のうち、82% は居住用建物の暖房によるものです。“地球規模の気候目標を達成するためには、そのすべてを置き換える必要があります”と Eronen 氏は言います。

グローバルに考え、ローカルに暖める

1960年代に生まれた“グローバルに考え、ローカルに行動する”の精



図3 Markku Ylönen 氏と、Polar Night Energy の“土のように”安価な蓄熱材のサンプル。



図4 Polar Night Energy の蓄熱槽のダクトを検査する Eronen 氏 (手前) と Ylönen 氏。

神は、Polar Night Energy のイノベーターチームにも受け継がれています。彼らの旅は、創業者の Tommi Eronen 氏と Markku Ylönen 氏が大学の同級生だった頃に提起した質問から始まりました。“太陽光発電だけで、エネルギー自給自足で費用対効果の高いエンジニアのためのヒッピーコミュニティを作ることはできないか？”卒業後、彼らがコードネーム“Hippie Commune”と名づけたプロジェクトは、Eronen 氏が CEO, Ylönen 氏が CTO を務める Polar Night Energy となりました。学生の軽い(しかし真剣な)気持から始まったこのプロジェクトは、フィンランドの Tampere 市で 3 MWh/100 kW のパイロット

プラントとなり、2020 - 2021年の冬に稼働を開始しました。このシステムは、電気で空気を温め、その空気を交換機で水を温めて循環させ、市内の Hiedanranta 地区の複数のビルに配給しています (図2)。

システム内では、電動抵抗発熱体によって空気が 600°C 以上に加熱されます。この高温の空気は、砂を詰めた蓄熱容器の中をパイプで循環しています。そして、その熱風は蓄熱容器から熱交換器に戻され、水を加熱して建物の暖房システムに循環させます。この砂の蓄熱効果により、抵抗体が冷えている時でも、循環する空気は水(そして建物)を暖かく保つのに十分なのです。

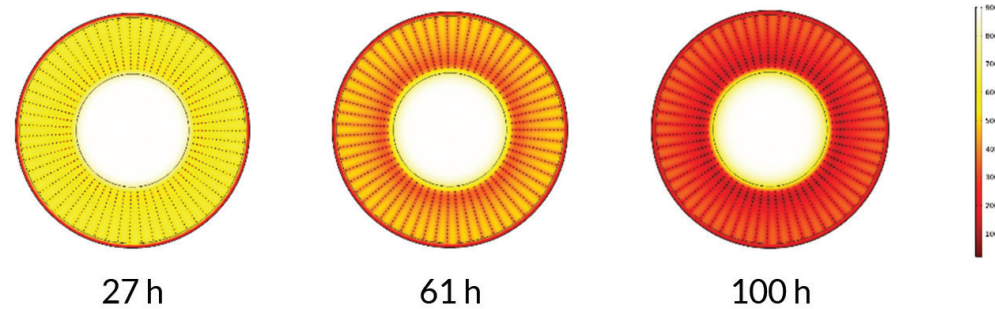


図5 提案された砂と空気の熱貯蔵容器内の100時間にわたる温度変化を示すシミュレーション画像。

“パイプとバルブとファンと電熱器しかないんです。特別なものは何もないんです!”と、Eronen氏は笑います。

▶▶ 砂でつくる熱のバッテリー

著名な化学技術者である Donald Sadoway 氏の言葉があります。“土のように安い電池を作りたいなら、土から作るしかありません。” Polar Night Energy のシステムは、他のエネルギーインフラと同じ主要な課題に直面しています。必要な時に、必要な場所に、無理のない価格で電力を供給しなければなりません。つまり、エネルギーの貯蔵と配給は、発電と同じくらい重要なのです。

既存のインフラは、このような課題を身近な方法で解決しようとしています。燃烧式暖房の場合、石油やガスなどの燃料を貯蔵し、燃烧可能な場所まで移動させます。また、電力網が効率的な配電をサポートし、風力や太陽光など再生可能な手段で発電したエネルギーを利用して、日照時間や強風の断続的な性質は厄介な問題です。再生可能エネルギーの入力の最大値と最小値の間で安定した出力を維持するためには、エネルギー貯蔵が必要です。しかし、近年のバッテリー技術の進歩にもかかわらず、電力を貯蔵することは比較的高価であり、特にビルの暖房に必要な規模であればなおさらです。もし、電気を蓄える代わりに、“バッテリー”が熱を蓄えることができたらどうでしょう？

従来の暖房システムの多くはすでに、温水を保持し循環させることで熱を蓄え、分配する仕組みになっています。Eronen氏と Ylönen氏は、水を使った蓄熱の利点と同時に、その限界も認識していました。“水に熱を加えても、蒸気になるまでには限界があります”と Eronen氏は言います。“蒸気は熱を効率よく分散させることができますが、大規模な蓄熱にはコスト的に不利なのです。”

水に熱を蓄えることの欠点を避けるために、彼らは代わりに42トンもの砂を利用したのです! (図3)。太陽が沈むと、砂に蓄えられた熱は徐々に循環気流に放出されます。その結果、循環する空気は高温に保たれ、顧客のラジエーターに流れる水の温度は一定に維持されます。このように、砂を利用することで、フィンランドで最も暗く寒い夜でも、太陽光発電で暖かく過ごすことができます。“砂は、水の4倍のエネルギーを蓄

"このすべての装置とすべての砂を組み立てる前に、できるだけ多くの疑問に答えるための予測モデリングが必要なのです!"

— TOMMI ERONEN (POLAR NIGHT ENERGY CEO)

えることができます”と Eronen氏は説明します。“砂は効率が高く、無害かつ持ち運びもできる上に、安いのです!”

▶▶ シンプルなソリューションに隠された高度な解析

コスト効率は、Polar Night Energyの価値提案の基本です。“このアイデアを追求すると決めたときから、私たちは価格状況を把握しようとしていました”と Eronen氏は言います。より少ない費用でより多くのことを実現するために、Polar Night Energyは数値シミュレーションツールに長年頼ってきました。Eronen氏と Ylönen氏は学生時代に COMSOL Multiphysics® を使い始め、現在も彼らの設計プロセスには不可欠なものとなっています。

例えば、Tampere市では、より多くの建物に対応するため、蓄熱システムを拡張した仕様になっていると、Eronen氏は説明します。人口3万5千人分の地区に熱を供給するためには、高さ25メートル、直径40メートルの砂を詰めた蓄熱筒が必要だと計算しました。なぜ、このような寸法になったのでしょうか? “1立方メートルの砂に蓄えられる熱量がわかってるので、大まかな必要量を計算するのは簡単です”と Eronen氏は説明します。“また、砂と空気循環システム間の効率的な熱伝達に必要な空間を決定しなければなりません(図4)。これは

▶▶ 既存インフラに新発想の取り入れ

COMSOL® を使用して、様々な設計オプションをモデル化し、評価しました。”

Tempere市は、人口25万人ほどのフィンランド内陸部の工業都市であり、この新技術の理想的な実験場です。“Tempereは、ヨーロッパの多くの都市と同様、近隣全体に水を循環させる地域暖房

設計オプションをモデル化し、評価しました。”

Polar Night Energyの熱交換器の設計は、マルチフィジックスシミュレーションソフトウェアによって形作られました(図5-6)。Eronen氏は次のように述べています。“私たちは、設計上のあるアイデアを検討するために特定のモデルを作成しました。砂の超高温コアを作り、その周囲を加熱ダクトで囲んだらどうなるか? というアイデアです。” COMSOL Multiphysicsソフトウェアを使用して流体の流れと熱伝達の効果をモデリングすることにより、Polar Night Energyのチームは設計の利点と欠点を比較定量化することができました。“シミュレーションの結果、高温コア設計は非常に長期間熱を蓄えるのに適していることが確認されました”と Eronen氏は言います。“しかし、私たちが想定している運用サイクルでは、砂貯蔵容器全体に熱風ダクトを均等に配置する方が理にかなっています”と Eronen氏は説明します。

Polar Night Energyの砂型蓄熱システムの規模は非常に大きいため、シミュレーションソフトウェアが不可欠となります。“私たちのアイデアをすべて試すために、実物大のプロトタイプを作ることは不可能です。このすべての装置とすべての砂を組み立てる前に、できるだけ多くの疑問に答えるための予測モデリングが必要なのです”と Eronen氏は言います。“これらの非常に強力なツールを使うことは、私たちにとって不可欠なことなのです。”

▶▶ 既存インフラに新発想の取り入れ

Polar Night Energyは、蓄熱というタスクを発熱と配熱から分離することで、より効率的で適応性の高いシステムを実現しました。砂を詰めた同社の蓄熱と熱伝達システムは、既存のインフラにレトロフィットできる大きな可能性を秘めています(図7)。

Tempere市は、人口25万人ほどのフィンランド内陸部の工業都市であり、この新技術の理想的な実験場です。“Tempereは、ヨーロッパの多くの都市と同様、近隣全体に水を循環させる地域暖房

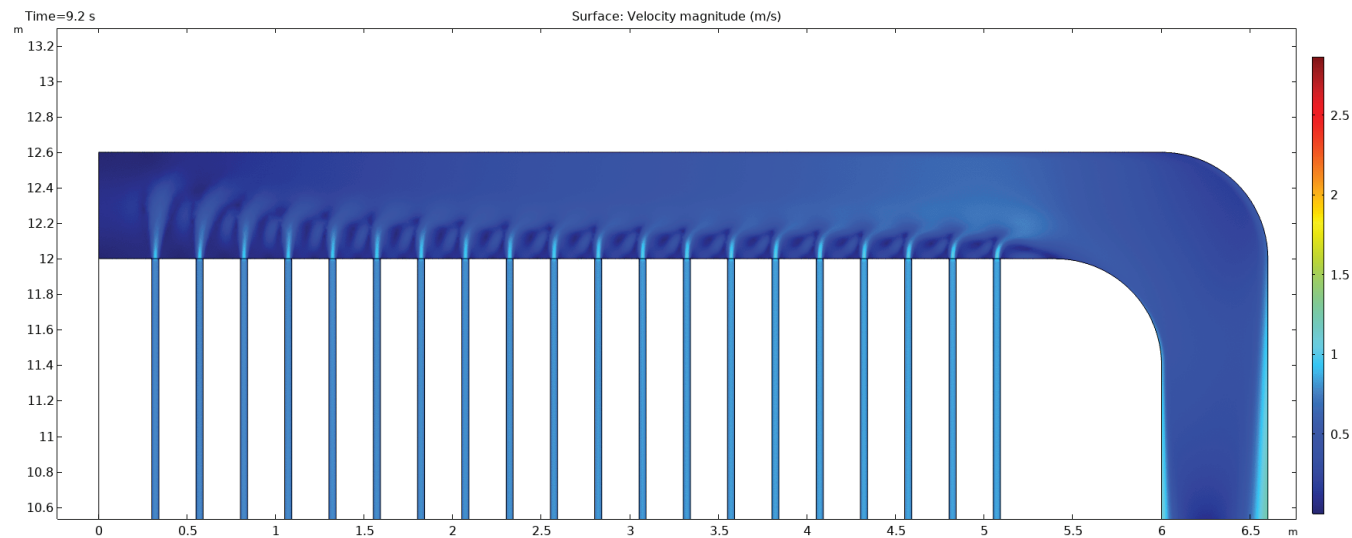


図6 砂貯蔵容器内のダクト内の自然対流効果のシミュレーション画像。



図7 フィンランドのTempereにあるPolar Night Energyが設置した熱伝達システムの一部。左側の垂直パイプは熱交換器の一部で、右側の白い抵抗発熱体は白い断熱材に包まれています。これらの部品の間にあるのが、空気循環式のラジアルブローです。

システムをすでに備えています”と Eronen氏は言います。“そのため、多くの建物を再生可能な熱源にすばやく切り替えることができます。” TempereにあるPolar Night Energyのパイロットプラントでは、新しいソーラーパネルで発電した電力と共に、既存の電力網からの電力を利用することもできます。信頼性の高い蓄熱により、最も安価な時期に発電または電力を購入し、最も必要な時期に熱を供給することができるのです。

▶▶ 今日のことはフィンランド、明日には世界へ

2020 - 2021年の冬にTempereのシステムが稼働を開始して以来、Polar Night Energyチームは、モデルと比較するためのデータを収集してきました。“私たちのシミュレーションは非常に

正確であることが証明され、これは励みになります”と Eronen氏は言います。そして、Polar Night Energyチームは、地元でアイデアを開発させながら、世界的な発展も目指しています。

フィンランドの長く寒い夜を暖めるのと同じ技術は、世界の他の地域にもより良いエネルギー管理の選択肢を提供することができます。安価の蓄熱材は、産業界や都市が現在浪費している熱を回収したり、風力や太陽光発電の出力のばらつきをバランスをとるのに役立つでしょう。しかし、Polar Night Energyは、潜在的な顧客と直接取引することを望んでいます。今後の課題は、彼らだけで取り組むには大きすぎることを認識しています。

“この技術をライセンスしたいと思っています。発電所を運営されている方、ぜひご連絡ください”と Eronen氏は笑います。今度は真面目に、彼は次のように言います。“バイオマスも含めて、あらゆる燃烧から脱却しなければなりません。森林が空気中の炭素を除去し続けられるように、森林を保護および再生する必要があります。気候変動の進むスピードはとても速いので、私たちのアイデアをできるだけ早く広めていきたいのです。”◎

MED Institute, Indiana, USA

MRI 装置における医療機器の高周波誘導加熱

DIXITA PATEL 著

患者に埋め込まれる医療機器は、磁気共鳴画像法 (MRI) 環境下での安全性と適合性を考慮して設計する必要があります。医療機器の受託研究機関である MED Institute は、計算モデリングとシミュレーションを使用して、MRI システム内の機器の RF 加熱を解析しています。

MRI (磁気共鳴画像法) スキャンは、全世界で年間8000万件以上実施されています。MRI 装置には様々な形や大きさのものがあり、磁場の強さによって識別されます。これらのスキャナーは、0.55テスラ (T) 以下から3 T 以上のものまであります。ここで“テスラ”は静磁場の強さを表す単位です。金属製の医療機器を埋め込んでいる患者さんにとって、MRI システムから発生する強い磁場は、安全面でいくつかの懸念を引き起こす可能性があります。

例えば、高出力磁石は力とトルクを発生させるため、インプラントが移動し、患者に害を与える可能性があります。また、空間定位に使用される MRI システムの勾配コイルは、勾配による加熱、振動、組織への刺激、および装置の誤動作を引き起こす可能性があります。最後に、MRI システムの大型の高周波 (RF) コイルによって導電性インプラントが電磁的に共振し (“アンテナ効果”と呼ばれる)、RF 誘導加熱が発生して患者が火傷を負う可能性があることが挙げられます。

医療機器業界向けの総合的な受託研究機関 (CRO) である MED Institute は、マルチフィジックスシミュレーションを使用して、MRI スキャンを必要とする患者のために、医療用埋込みデバイスの RF 誘導加熱の影響をより良く理解しようとしています。

医療機器の標準試験方法

MED Institute は、製品開発サイクル全体を通してサポートを提供しています。同機関の MRI 安全性チームは、メーカーが医療機器の評価や物理的テストを行い、MRI 環境下での安全性とコンプライアンスを確認するのを支援しています (図1)。また、医療機器の安全で効果的な使用のために開発を監督する FDA (米国食品医薬品局) と緊密に連携しています。さらに、ASTM (米国材料試験協会) や ISO (国際標準化機構) の規格に準拠しています。具体的には、ゲルファントム内の医療用イン

プラントの RF 誘導発熱を測定する ASTM F2182 規格 (図2)、MRI 中の電氣的能動型植込み医療機器 (AIMD) を評価する ISO/TS 10974規格を遵守しています。

試験に使用するゲルファントムは、直方体のアクリル容器に、平均的な人体組織の熱的、電氣的特性に近似した導電性ゲルを充填したものです。このファントムを MRI スキャナーの RF コイル内の患者台に置き、光ファイバー温度プローブ (直径1 mm) を装置に取り付けてからゲル内に沈めます。プローブは、MRI スキャン中にデバイスが受ける温度変化を測定します。このような物理的な実験はよく行われますが、いくつかの問題が潜在しています。例えば、ファントム内の動きによって実験に不確実性が生じたり、プローブの配置が不正確だと結果が無効になってしまう可能性があります。また、ファントムの材質や磁化率によっては、磁力が問題になることもあります。

これらの問題に対処するために、MED Institute のチームは物理的テストの代わりに計算モデリングとシミュレーションを使用しています。MRI 安全性評価およびエンジニアリングシミュレーションのディレクターである David Gross 博士 (PE) は、シミュレーションを使用して物理ベースの問題の理解を深める解析チームを率いています。彼は次のように述べています。“このシミュレーションにより、関心領域内のあらゆる場所の 3D 温度等高線が得られます。個別のポイントプローブ測定に限定されず、装置の不確実性や実験からのプローブ配置の不確かさを心配する必要はありません。”

同チームは、患者がコンパクトなチューブ内にあるクローズドボア MRI システムでこのシミュレーションを実行した経験があります。現在、研究チームはシミュレーションを使用して、オープンボアシステムについても同様の解析を行っています (図3)。オープンボアシステムは、物理的なアクセス範囲が広く、“お子様、肥満の方、ご高齢の方、閉



図1 MRI 環境下での医療機器の安全性を評価するために実際の MRI 試験を行う MED Institute Inc. のエンジニアたち。

所恐怖症の患者様の画像化”に有効であると、MED Institute のウェブサイトでも説明されています。

RF 誘導加熱のためのマルチフィジックスシミュレーション

MED Institute は COMSOL Multiphysics® を使用して、インプラントの RF による温度上昇を評価し、製品群内の様々なサイズと構造のデバイスの結果を比較して、ワーストケースの構成を決定しています。MED の解析担当者は、COMSOL Multiphysics のアドオンである CAD イン

ポートモジュールを使用して、顧客のデバイスの CAD ファイルをインポートすることができます。RF 誘導加熱については、アドオン製品の RF モジュールと伝熱モジュールを使用して、電磁気学のフィジックスと過渡熱伝導を組み合わせています。電磁気の解析

ポートモジュールを使用して、顧客のデバイスの CAD ファイルをインポートすることができます。RF 誘導加熱については、アドオン製品の RF モジュールと伝熱モジュールを使用して、電磁気学のフィジックスと過渡熱伝導を組み合わせています。電磁気の解析

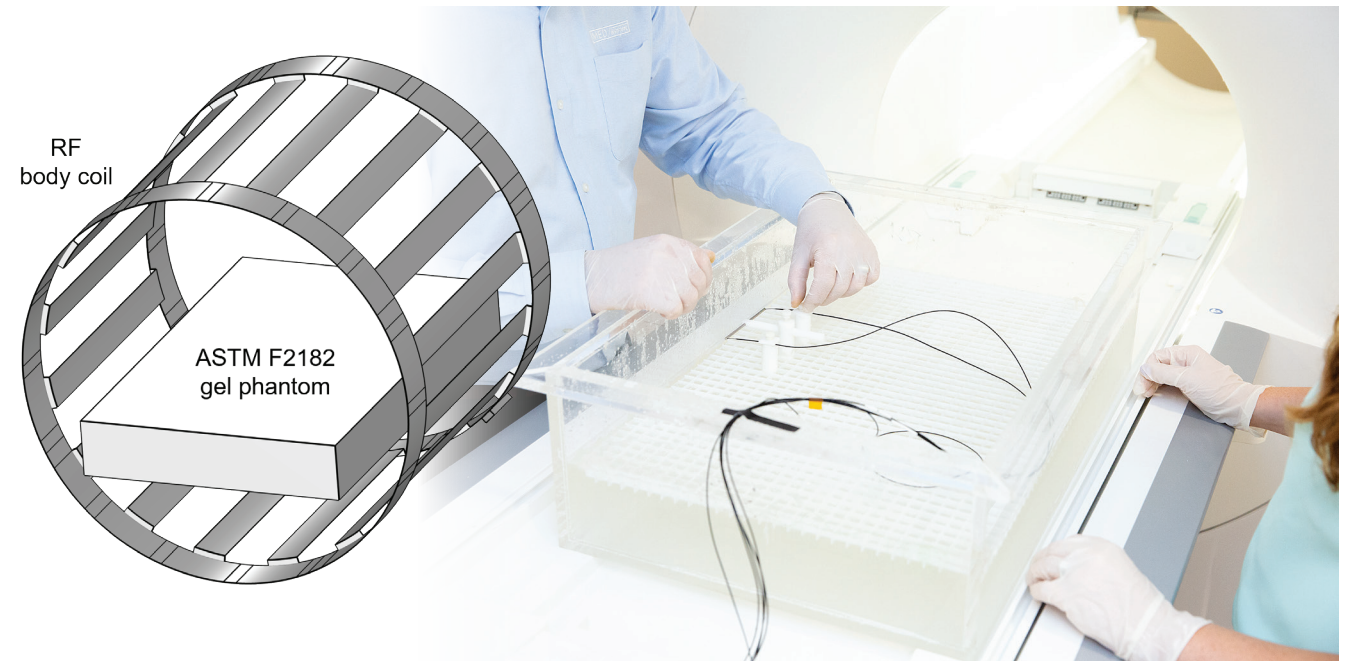


図2 仮想テスト (左) および MRI による物理的なテスト (右) で使用された ASTM F2182 規格。

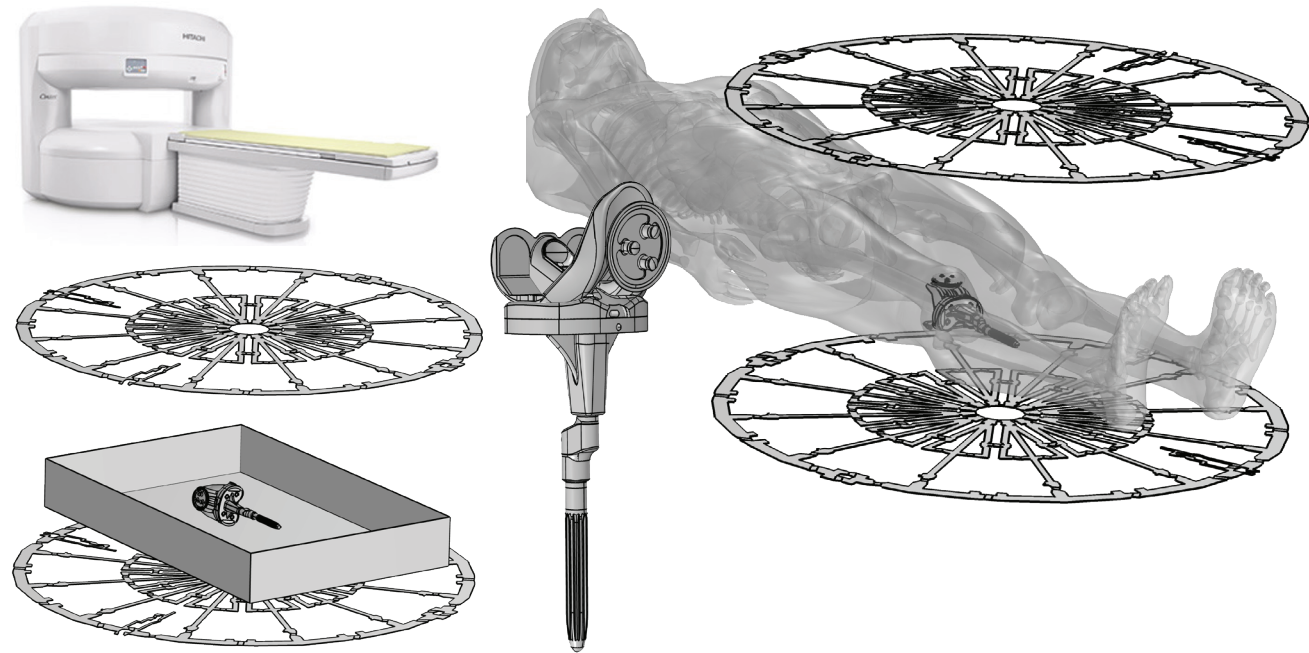


図3 オープンボア MRI システム (左上), IT'IS Foundation のバーチャルヒューマンモデル (Duke) と RF ボディコイル (右上), ASTM ゲルファントム内の膝関節用インプラントの RF ボディコイル (左下), 膝関節用インプラントの CAD モデル (中央下).

性のある主因に焦点を当てるのです”と Gross 博士は述べています。COMSOL® ソフトウェアを使用することで、共振が予想される相対的境界と、異なる電磁場下でのデバイスの挙動をより良く理解することができます。これは、感度解析を行う際に役立つもので、ステムの直径やインプラントの他の部品の変更など、共振の変化を引き起こす原因を調べることができます。このケースでは、何百回ものシミュレーションを行い、ワーストケースのデバイス寸法とワーストケースの RF 周波数を決定しました。

ワーストケース解析は、検証プロセスにおいて非常に重要です。なぜなら、これによりメーカーは、1つの製品のすべてのバリエーションについて物理的な実験を行うのではなく、幅広いデバイスについて様々な要因 (どのサイズが最も複雑になるかを判断するなど) を検証することができるからです。“物理的な MRI スキャナーを使用する時間当たりのコストを特に考慮すると、複数の物理的な実験を行うことは非常に高価で時間がかかります”と Gross 博士は言います。

図4に示すように、1.2T オープンボアシステム (左上) と 1.5T クローズドボアシステム (右上) ではゲルファントム内の電場が大きく異なっていることがわかります。両システムで膝関節インプラントのシミュレーションを行ったところ、ステム先端での共振と最高温度上昇が異なる結果となりました (下の画像)。

COMSOL® を使用することで、チームは電磁場下でのデバイスの挙動をよりよく理解することができました。この結果を受けて、実際の MRI システムでデバイスを物理的にテストして温度上昇の結果を確認しながら、チームは温度プローブをどこに配置すべきかを決定することができました。

» MED INSTITUTE の仮想 MRI の安全性評価に対する FDA の認定について

MED Institute がシミュレーションを使用して医療機器の RF 誘導加熱をテストした経験は、製品開発サイクルを加速する有望な新しいシミュレーションツールの開発につながりました。MED Institute のチームは、このシミュレーションツールを FDA の医療機器開発ツール

(MDDT) プログラムに提出しました。このプログラムにより、FDA は医療製品や研究を促進する目的で新しいツールを評価できます。FDA のウェブサイトにあるように、“MDDT プログラムは、医療機器のスポンサーが医療機器の開発および評価に使用できるツールを FDA が認定するための方法です。” 認定されたツールは、FDA により正式な MDDT として認められます。

2021年11月、MED Institute は MDDT “医療機器の仮想 MRI 安全性評価” の FDA 認定を取得しました。これは、マルチフィジックスモデリングとシミュレーションを用いて、MRI 環境における医

療機器の相互作用を試験する評価プロセスです。このツールは、MRI システムの RF コイル、ASTM ゲルファントム、およびゲル内に設置された医療機器のモデリングに使用されます。そして、シミュレーションにより、デバイスの周囲で発生する電磁気と熱を解析します。

試験終了後、装置のラベリングは ASTM 2503、または電気的能動型インプラントの場合は ISO 10974の試験によって記述されます。ラベルは装置のパッケージと使用説明書 (IFU) の内側に貼られ、MRI 技師や放射線技師が装置を埋め込んだ患者向けの関連情報を見ることができるよう

“MDDT を使えば、物理的テストを補強するだけでなく、場合によってはシミュレーションに置き換えることもできます。直接的な良い結果としては、顧客はシミュレーションに頼ることができるため、より早く、より低コストで製品を評価することができます。”

— DAVID GROSS (MED INSTITUTE, MRI 安全性評価およびエンジニアリングシミュレーション担当ディレクター)

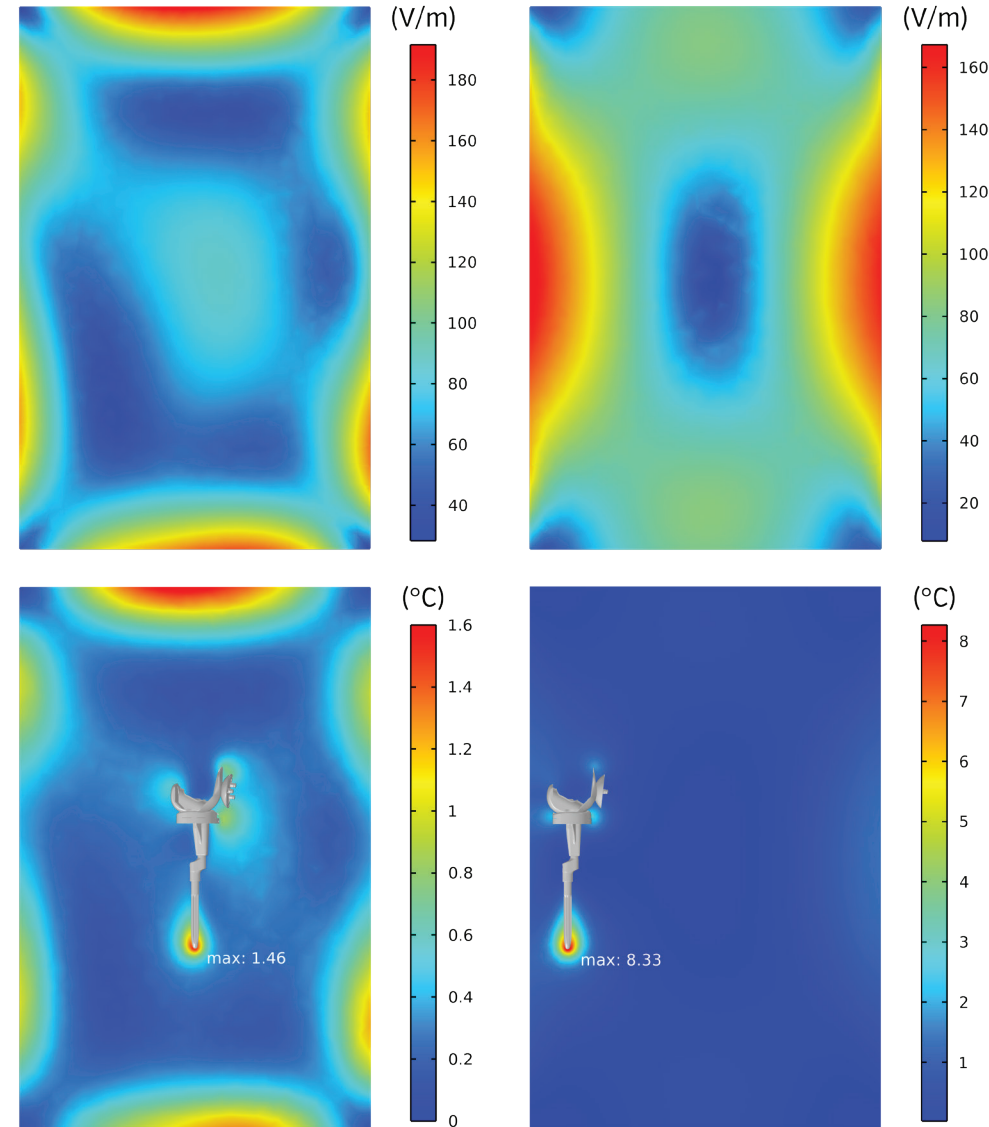


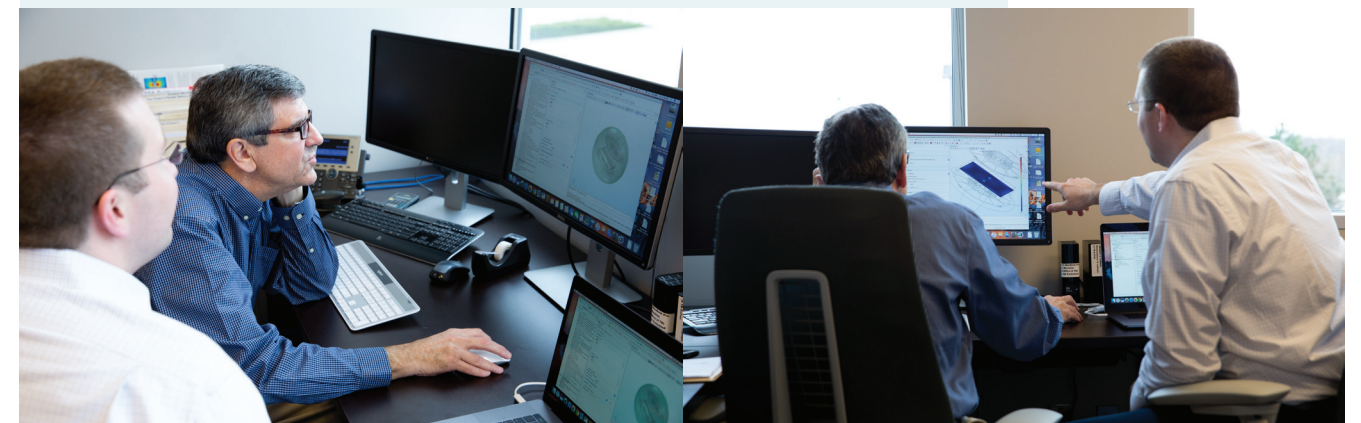
図4 ゲルファントム内の膝関節インプラント (オープンボア (左) とクローズドボア (右) のシミュレーション結果を比較したもの)。

にします。“MDDT を使えば、物理的テストを補強するだけでなく、場合によってはシミュレーションに置き換えることもできるのです”と Gross 博士は言います。

» FDA によるモデリングおよびシミュレーションのサポート

MED Institute は長年にわたり、COMSOL Multiphysics シミュレーションを使用して多くの医療機器の MRI 安全性評価を行ってきました。その結果、COMSOL® は複雑なマルチフィジックス問題を解くための強力かつ効率的なプラットフォームであることがわかりました。“直接的な良い結果としては、顧客はシミュレーションに頼ることができるため、より早く、より低コストで製品を評価することができます。RF 誘導発熱を調べるために実際の製品を送ってもらう必要がないのです”と Gross 博士は言います。

FDA は、計算モデリングを支持しており、物理的テストの代わりにシミュレーションによるデータを評価し、受け入れることに賛同しています。“医療機器のスポンサーにとって、FDA の奨励と支援があるということは重要です”と Gross 博士は述べています。MED Institute は、患者の利益のために、長年 FDA と一緒に仕事をする機会に恵まれてきました。“これは、FDA がモデリングとシミュレーションの力を信じ、期待していることを示しています”と Gross 博士は付け加えます。◎



MED Institute は、COMSOL Multiphysics® ソフトウェアを使用して、顧客の製品開発サイクルを加速させています。

Eden Tech, France

微量汚染物質分解のための小型廃水処理プラントの設計

世界の湖、川、小川では、日々微量汚染物質が発生しています。従来の廃水処理プラントの多くは、これらの潜在的に危険な化学物質の残留物を廃水から除去する機能を備えていません。フランスのパリに拠点を置くディープテック企業である Eden Tech は、マルチフィジックスシミュレーションを利用して、この新たな問題に対応するための装置を開発しています。

RACHEL KEATLEY 著

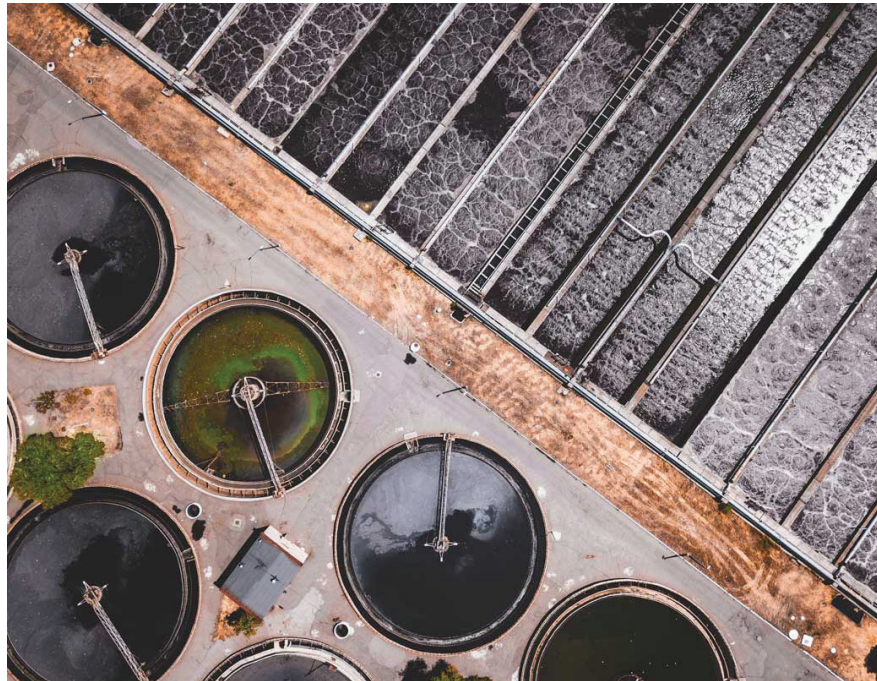


図1 従来の水処理プラントの多くは、微量汚染物質を除去することができません。

1985年に放映されたアクション冒険テレビドラマ「MacGyver」は、身近にあるものを使って問題を解決する秘密工作員、Angus MacGyverの人生を描いた作品です。例えば、あるエピソードでは、冷蔵庫の中古部品を使ってヒートシールドを作るシーンがあります。また、キャンディーの包み紙で釣りのルアーを作るというエピソードもあります。この番組の教訓は、30年以上経った今でもなお生きています。その場しのぎや創造的な方法で何かを設計する、という意味の「MacGyverする」という動詞は、2015年にオックスフォード現代英英辞典に追加されました。

あなたの「マクガイバー」スキルを試してみてください。もしあなたがCDを何枚か手渡されたら、それを使って何を作りますか？ 反射壁アート、モザイク装飾、または風鈴などでしょうか？ ミニチュアの水処理装置はどうでしょう？

これは、マイクロ流体技術の開発を専門とする Eden Tech でエンジニアと研究者のチームが行なっていることです。同社の研究開発部門である Eden Cleantech では、廃水中の微量汚染物質の増加に対応するため、小型で省エネルギーの水処理システムの開発を進めています。CDを使用した AKVO システム（

ラテン語で水を意味する「アクア」から名付けられた）の性能を解析するために、Eden Tech はマルチフィジックスシミュレーションを採用しました。

▶▶ 新たに懸念される汚染物質

Eden Tech の上級化学エンジニア兼最高製品責任者である Wei Zhao 氏は、「微量汚染物質が廃水に混入する経路は様々です」と述べています。このような微細な化学物質が世界中の廃水に増加しているのは、人間の日々の活動の結果です。例えば、石鹸で手を洗ったり、掃除用具で洗面台を拭いたり、薬を体外に流したりする際に、様々な化学物質が排水口に流され、下水道に流れ込んでしまうのです。これらの化学物質の中には、微量汚染物質、または新たに懸念される汚染物質（CEC）に分類されるものがあります。水路に微量汚染物質が増えているのは、家庭廃棄物のほか、農業汚染や産業廃棄物も原因となっています。

残念ながら、従来の多くの廃水処理プラント（図1）は、これらの汚染物質を除去するように設計されていません。そのため、これらの汚染物質は、河川、小川、湖、さらには飲料水など、様々な水域に再び運ばれることが多いのです。それらが人間や環境の健康に及ぼすリスクは完全には解明されていませんが、世界の水域で見られる汚染物質が増加していることは懸念されるどころです。

そこで、Eden Tech はこの問題を解決するために開発に着手し、AKVO が誕生しました。1つの AKVO カートリッジは、様々な数の CD を積み重ねて構成されており、それらを組み合わせることで小型化された工場が作成されます。AKVO の各 CD コアは、直径15 cm、厚さ2 mm に設計されています。1枚の AKVO コアで毎日0.5~2 m³の水を処理できます。つまり、1万枚の CD で構成された AKVO システムで平均的な地方自治体のニーズを処理できるということです。さて、ここで疑問が生じます。CD から作られた装置で、どのように水を除染することができるのでしょうか？

▶▶ 持続可能な廃水処理方法

単一の AKVO システム（図2）は、カスタマイズ可能なカートリッジに、それぞれマイクロチャネルネットワークが刻まれた CD を積層したものです。それらのマイクロチャネルネットワーク内で水を循環させることで、微量汚染物質などの廃水中の好ましくない要素を除去します。これらのネットワークは、小さなポンプで大量の水を循環させ、洗浄することができるため、エネルギー効率が高いのです。AKVO システムのカートリッジは簡単に交換することができ、Eden Tech がそのリサイクルを行っています。

AKVO の画期的なデザインは、光触媒作用とマイクロ流体工学を1つのコンパクトなシステムに統合したものです。光触媒作用とは、AOP（促進酸化法）の一種であり、廃水から微量汚染物質を迅速かつ効果的に除去する方法です。光触媒作用は、他の AOP と比較して、光源を利用しているため、より安全で持続可能な方法であると考えられています。光触媒作用では、光が電子正孔対を生成する光触媒に吸収され、その電子正孔対がフリーヒドロキシルラジカルを生成して、対象となる汚染物質と反応し、分解します。光触媒作用とマイクロ流体工学を組み合わせることで廃水を処理す

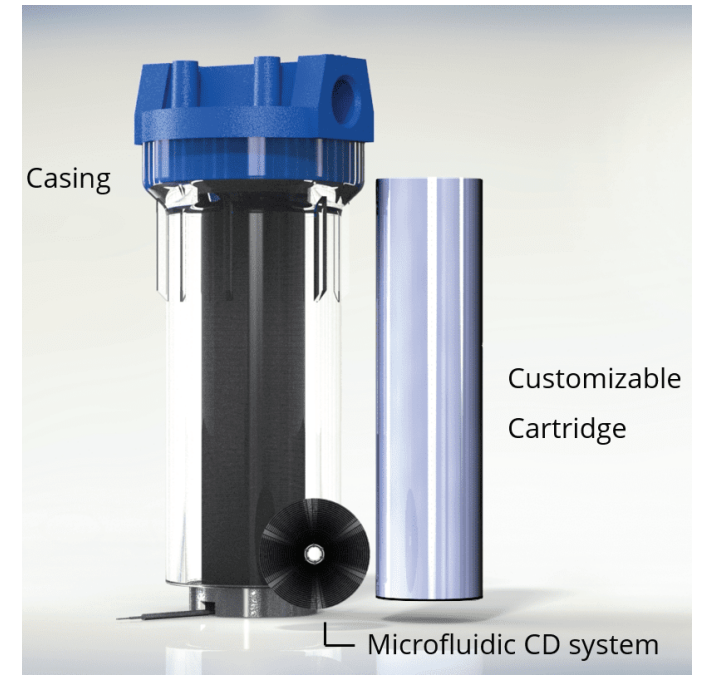


図2 全部品が表示された AKVO。

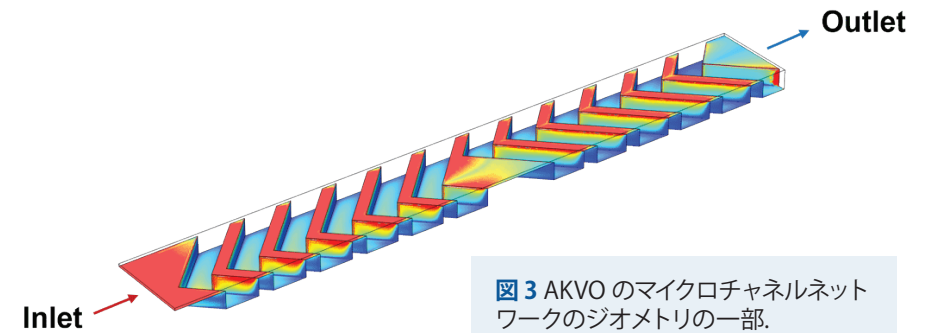


図3 AKVO のマイクロチャネルネットワークのジオメトリの一部。

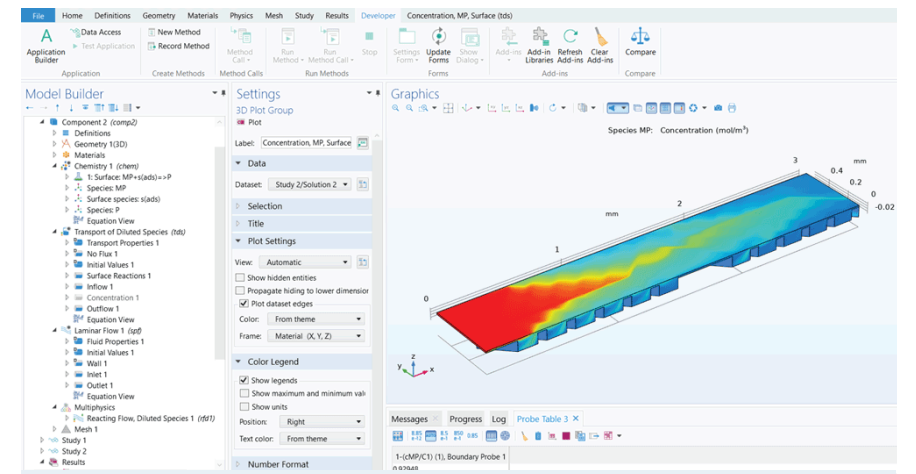


図4 Zhao 氏は、COMSOL Multiphysics® のインターフェース（化学、希釈種輸送、層流、反応流、希釈種）を使用しました。

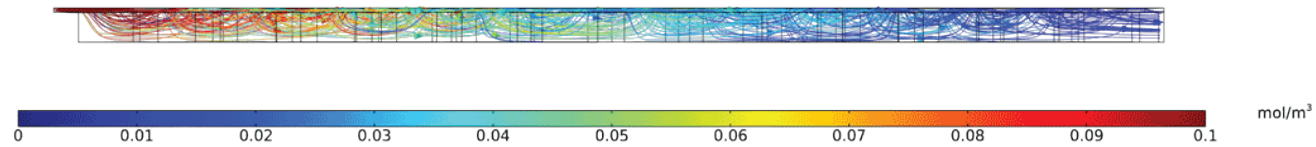


図5 “明示的な表面吸着” モデルの結果。

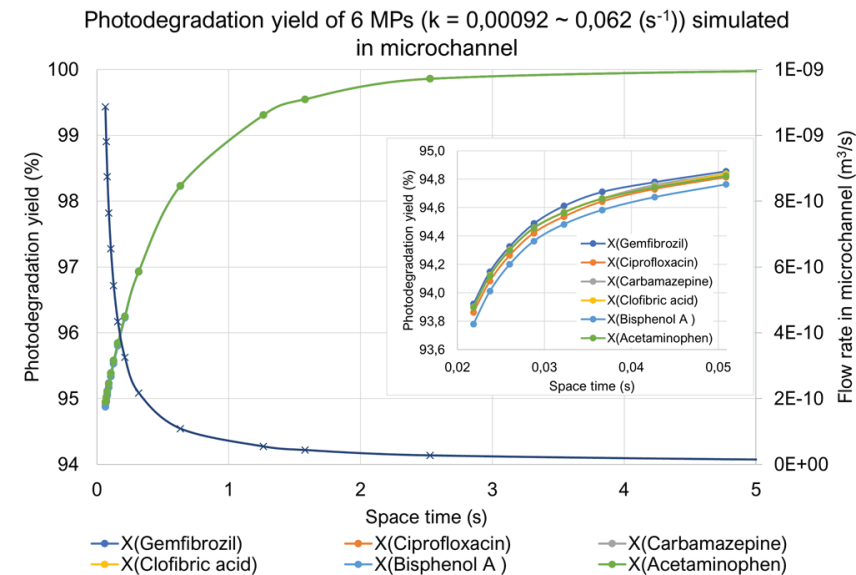


図6 6種類の微量汚染物質の光分解に対する SHM 設計の性能の比較。

ることは、これまでに行われたことがありません。“これは非常に野心的なプロジェクトです”と Zhao 氏は言います。“環境に優しく、効率的な廃水処理方法を提供するために、革新的な方法を開発したかったのです。” AKVO の現在の設計は簡単にできたものではなく、開発中に Zhao 氏と彼のチームはいくつかの設計上の課題に直面しました。

設計上の課題の克服

使用時には、AKVO マイクロチャンネルの壁を通して化学剤（触媒）と廃水が分散されます。触媒（この場合は二酸化チタン）の役割は、微量汚染物質と反応し、それらの除去を助けることです。しかし、AKVO の高速流量は、この作用を複雑にします。“大きな問題として、(AKVO には) 流速の速いマイクロチャンネルがあり、チャンネルの壁の1つに化学剤を入れても、廃水中の微量汚染物質が化学剤と効率的に反応できない場合があります”と Zhao 氏は述べます。そこで Zhao 氏のチームは、微量汚染物質と固定化化学剤の接触の確率を上げるために、AKVO のマイクロチャンネルネットワークに千鳥式ヘリングボーンマイクロミキサー (SHM) のデザインを採用しました (図3)。

微量汚染物質を分解するための化学反応をサポートする SHM デザインの性能を解析するために、Zhao 氏は COMSOL Multiphysics ソフトウェアを使用しました。

微量汚染物質分解のための化学反応のシミュレーション

Zhao 氏は、COMSOL Multiphysics (図4) を用いて、“明示的な表面吸着 (ESA)” モデルと “変換表面濃度 (CSC)” モデルという2つの異なるモデルを構築しました。これらのモデルは、いずれも化学現象と流体现象を考慮したものです。

どちらのモデルでも、AKVO の SHM 構造が、AKVO を通過する流れに渦を発生させることで、微量汚染物質と化学剤の反応期間が長くなり、各流体層間の物質移動が促進されることを Zhao 氏は発見しました。しかし、ESA モデル (図5) の結果では、処理中の微量汚染物質の浄化率は 50% 程度で、Zhao 氏の予想よりも低い数値に留まりました。

ESA モデルとは異なり、CSC モデルでは、吸着制限がないと仮定しています。したがって、微量汚染物質が触媒の表面に到達さえすれば、反応が起こることは既存の文献でも説明さ

れています。このモデルで Zhao 氏は、ゲムフィブロジル、シプロフロキサシン、カルバマゼピン、クロフィプリン酸、ビスフェノール A、アセトアミノフェンなど、6つの異なる微量汚染物質の分解について設計がどのように機能するかを解析しました (図6)。このモデルの結果は Zhao 氏の予想通りで、微量汚染物質の 95% 以上が処理されていました。

“COMSOL Multiphysics の結果には本当に満足しています。次のステップは主に、(AKVO のプロトタイプ) 実験室でのテストです”と Zhao 氏は述べます。このプロトタイプは最終的に、南フランスの病院や水処理施設でテストされる予定です。

このプロジェクトにシミュレーションを利用することで、Eden Tech のチームは時間と費用を節約することができました。AKVO のようなマイクロ流体システムのプロトタイプの開発にはコストがかかります。AKVO の各 CD にマイクロチャンネルネットワークを刻印するためには、マイクロチャンネルのフォトマスクが必要です。Zhao 氏によると、1枚のフォトマスクを製作するのに約3000ユーロ (約3500米ドル) かかります。そのため、製作前に自分たちのシステムが正常に機能することを確認していることが非常に重要なのです。“COMSOL Multiphysics は、モデルと設計の検証に非常に役立ちました”と Zhao 氏は述べています。

微量汚染物質の処理における先駆者

2016年、スイスでは廃水処理プラントに廃水から微量汚染物質を除去することを義務付ける法案が導入されました。その目標とは？スイスの100以上の廃水処理プラントにおいて、80% 以上の微量汚染物質を除去することです。スイスに続いて、多くの国が水路に増え続ける汚染物質への対応を検討しているところです。AKVO は、コンパクトで環境に優しい方法で、この問題を解決する可能性を秘めています。

今度、古い CD やその他の家庭用品を捨てるときは、ご自分に問いかけてみてください。MacGyver ならどうするのでしょうか？それかもっといいのは、Eden Tech ならどうするのでしょうか？もしかしたら、あなたの手元には、次の革新的なデザインのための鍵があるかもしれません。◎

Hellenic Cables, Greece

有限要素モデリングによる海底ケーブル設計の最適化

洋上風力発電所の風力タービンは、より沖合に建設され始めています。このため、より長い距離に到達し、より深い海域でも壊れず、持続可能な電力で世界をよりよくつなぐことができる、優れた設計の海底ケーブルが新たに必要となっています。ギリシャの Hellenic Cables では、有限要素モデリングを使用して、地中および海底ケーブルの設計を解析し、検証しています。

BRIANNE CHRISTOPHER 著

洋上風力発電 (OSW) 産業は、世界で最も急速に発展している電力源の1つです。それも理にかなっています。洋上では陸上よりも風が強く、安定しています。世界のエネルギー需要は10年後には 20% 増加すると予想されており、その大部分は風力発電のような持続可能なエネルギー源によって供給されると考えられています。

洋上風力発電所は、タービンのネットワークで構成されています。このネットワークには、風力発電所と海岸をつなぐケーブル (図1) が含まれており、電力を送電網インフラに供給しています (図2)。多くの洋上風力発電所は、モノ

パイルなどの底面に固定された風力タービンで構成されています。これらの構造物の基礎は、建設費が高く、ケーブルを海底に埋設する必要があるため、深海環境での設置は困難です。浅瀬であれば、設置やメンテナンスはより容易に行えます。

洋上風力発電の未来は、バラストや係留物を用いて風車を浮かせ、海底に直接ケーブルを敷設する方式が主流になると考えられています。浮体式洋上風力発電所は、海岸に設置された風力発電所が混雑している場合に最適なソリューションです。また、沖合で発生する大きくて強力な風を利用することもできます。

耐障害性の高い海底ケーブルの設計要素

洋上風力発電の普及に伴い、洋上風力発電所と電力網を安全かつ効率的に接続する電力ケーブルの開発ニーズが高まっています。

数十億円もの費用がかかる海底ケーブルの修理、設置をする前に、ケーブル設計者は、設計が海底で意図した通りに機能することを確保する必要があります。この作業は通常、計算電磁気学モデリングを用いて行われています。ケーブルのシミュレーション結果を検証するために、国際的な規格が使用されていますが、近年の計算能力の向上やシミュレーションソフトウェアの高機能化に、規格が追いついていないのが現状です。Hellenic Cables とその子会社の FULGOR では、有限要素法 (FEM) を用いてケーブル設計を解析し、実験的な測定値と比較することで、しばしば国際規格を上回る結果を得ています。

ケーブル損失の新しい計算方法

国際電気標準会議 (IEC) では、ケーブルの損失と定格電流を計算するための規格 60287 1-1 など、電気ケーブルに関する規格を定めています。規格 60287 1-1 で使用されている計算式では、ケーブルの損失を過大評価してしまうと

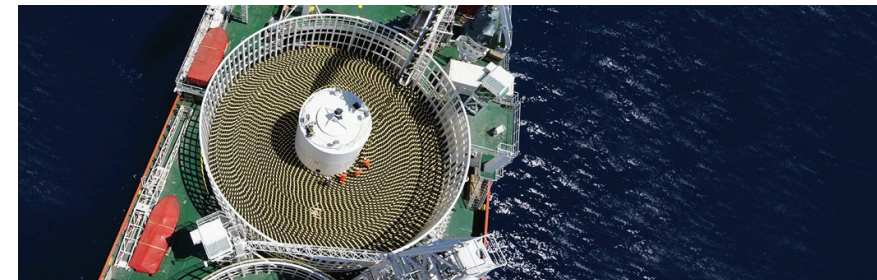


図1 海底設置用のコイル状ケーブルを運搬する船。

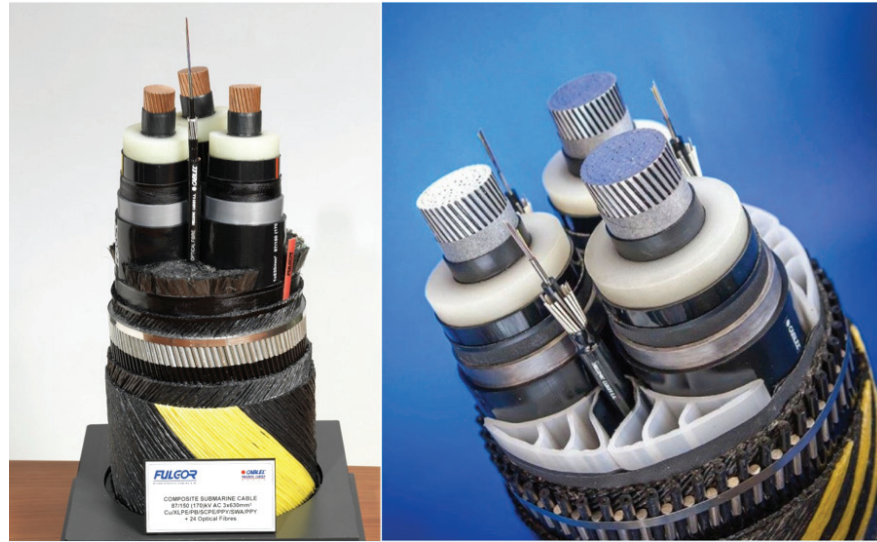


図2 Hellenic Cables の3芯 (3C) 海底ケーブルの例。

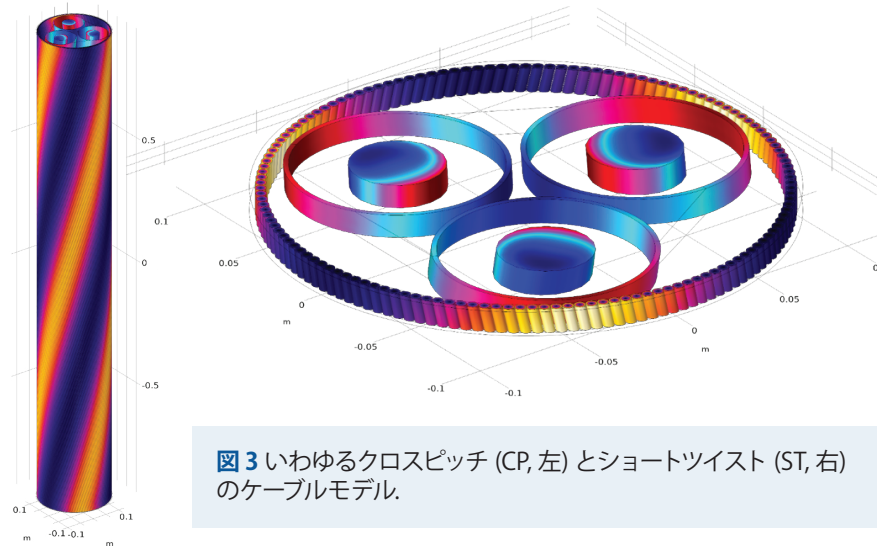


図3 いわゆるクロスピッチ (CP, 左) とショートツイスト (ST, 右) のケーブルモデル。

という問題があります。ケーブル設計者は、このような解析を行うために新しい方法を採用することを余儀なくされており、Hellenic Cables のチームもそれを認識しています。Hellenic Cables の数値解析グループのチームリーダーである Dimitrios Chatzipetros 氏は、「より正確で現実的なモデルを使用することで、大幅な最適化マージンが期待できます」と述べています。この新しい手法により、エンジニアはケーブルの断面積を減らし、コストを削減することができます。

電気ケーブルはモデル化するのが複雑な装置です。幾何学的構造は、特定の層長でらせん状にねじられた3つの主電源コアと、第2または第3の層長でねじられた数百本の追加ワイヤー (スクリーンワイヤーまたはアーマーワイヤー) で構成されています。その

ため、メッシュを生成して電磁場を解くのが難しいのです。Hellenic Cables の研究開発部門で准首席エンジニアを務める Andreas Chrysochos 氏は、「これは、一部の要素が強磁性体であるため、難しい材料特性を伴う厄介な 3D 問題です」と述べています。

Hellenic Cables のチームは、まず FEM を使用して、長さ約30~40メートルのケーブルの全断面をモデル化しました。しかし、これはスーパーコンピューターでなければ現実的に求解できないほどの大きな数値的な課題であることがわかりました。そこで、ケーブルのクロスピッチと同じ周期長の周期モデルに変更することで、40メートルあった問題を2~4メートルにまで短縮しました。さらに、ショートツイスト周期性を導入すると、モデルの周期長がメートル単位からセンチメートル単位

に短縮され、より容易に解くことができるようになりました (図3)。

FEM がケーブル解析にもたらす改善点は大きいですが、Hellenic Cables は、その検証結果が現行の IEC 規格が提供するものよりも現実的であることを顧客に納得してもらう必要があります。顧客は、IEC 60287がケーブル損失を過大評価しているということを既に認識していることが多いですが、結果を可視化して実測値と比較することで、プロジェクト関係者の信頼を得ることができます (図4)。

ケーブルシステムの有限要素モデリング

電磁干渉 (EMI) は、ケーブルシステムの設計において、特にケーブルの導体とシース間の容量性および誘導性カップリングにいくつかの課題をもたらします。例えば、定格電流を計算する際には、通常動作時のケーブルシースでの電力損失を考慮する必要があります。さらに、ケーブルシースの過電圧は、一般的な安全衛生基準を満たすために許容範囲内である必要があります。

これらの容量性および誘導性カップリングを計算するには、主に3つのアプローチがあります。1つ目は、ケーブルシステムの電流と電圧を計算し、その容量性電流を無視する複素インピーダンス法 (CIM) です。もう一つの一般的な方法は、電磁過渡現象プログラム (EMT) ソフトウェアです。これは、時間領域モデルと周波数領域モデルの両方を使用して、電力システムの電磁過渡現象を解析するために使用できます。

3つ目の方法である FEM は、COMSOL Multiphysics® ソフトウェアの基礎となるものです。Hellenic Cables のチームは、COMSOL Multiphysics とアドオンの AC/DC モジュールを使用して、導電性媒体中の電場、電流、および電位分布を計算しました。「AC/DC モジュールとその背後にあるソルバーは、この種の問題に対して非常にロバストで効率的です」と Chrysochos 氏は述べています。

Hellenic Cables のチームは、公称電圧 87/150 kV、断面積 1000 mm² の地中ケーブルシステムを解析する際に、3つの方法を比較しました (図5)。チームは、外部電気回路とのボンディングタイプを考慮して、ケーブルシステムの導体内およびその周辺の磁場と誘導電流密度分布をモデル化しました。その結果、3種類の構成 (ソリッドボンディング、シングルポイントボンディング、クロスボンディング) において、3つの手法がよく一致することがわかりました (図6)。この一致は、容量性および誘導性カップリングを考慮した場合、FEM がすべてのタイプのケーブル構成と設置に適用できることを実証しています。

風が吹く明るい未来

Hellenic Cables チームは、これまで開発した

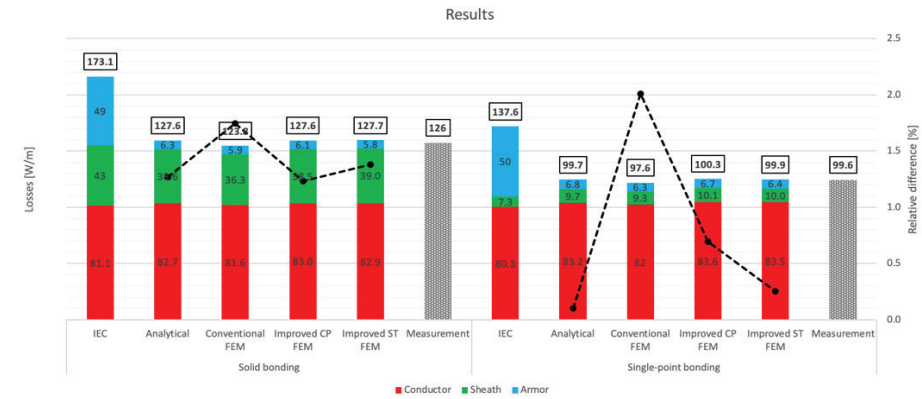


図4 特定のケーブルジオメトリに基づき、ソリッドボンディングとシングルポイントボンディングの2つのボンディングシナリオの結果。この結果には、IEC 60287 (規格)、解析計算、従来の FEM、改良型 CP FEM (クロスピッチモデルに基づく)、改良型 ST FEM (ショートツイストモデルに基づく)、および測定値による損失が含まれています。

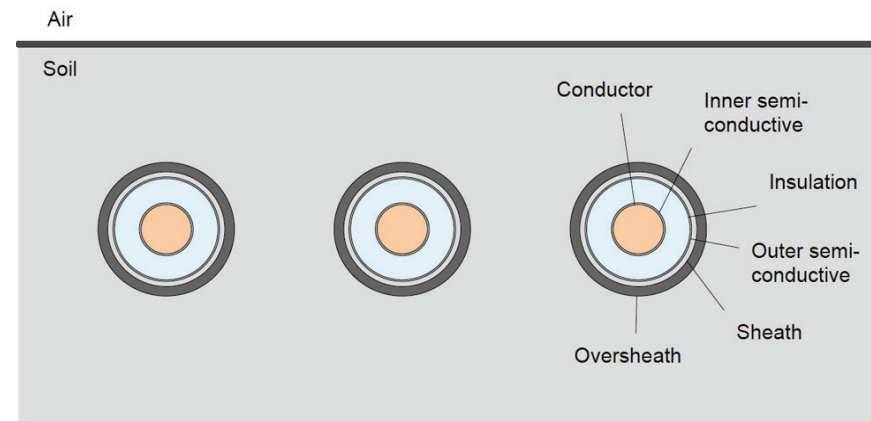


図5 ケーブルモデルのジオメトリ。

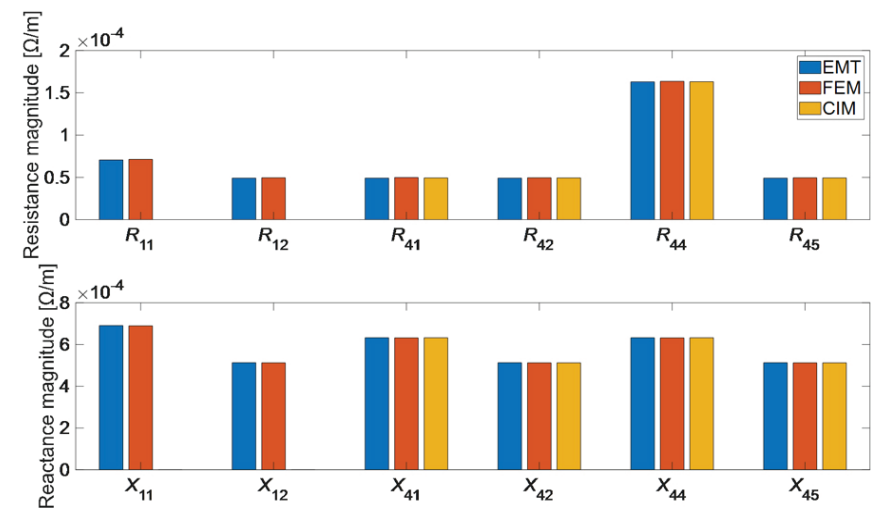


図6 EMT, FEM, CIM の結果比較。

すべてのケーブルモデルをさらに改良するという重要な仕事を続けていく予定です。また、架橋ポリエチレン (XLPE) 絶縁体と電圧源コンバーター (VSC) 技術を用いた高電圧直流 (HVDC) ケーブルの研究も進んでいます。HVDC ケーブルは、長距離に設置されるシステムのコスト効率を高めることができます。

洋上風力発電に使われる風のように、電気ケーブルは私たちの身近にあるものです。私たちの目に触れることはありませんが、ケーブルは私たちが高電力で接続された世界を利用できるよう、懸命に働いています。海底ケーブルの設計を最適化することは、持続可能な未来を築くために重要な要素となるでしょう。◎

Alfred Wegener Institute, Germany

粘弾性モデリングによるグリーンランド氷河融解の予測

北東グリーンランド氷河系は、世界の海面を1メートル以上上昇させるのに十分な水を含んでおり、その氷の海への流出は加速しています。この流出をよりよく理解し、予測するために、Alfred Wegener Institute の研究者たちは、潮汐と氷河下の地形が氷河の流れにどのように寄与しているかを把握するために、改良した粘弾性モデルを開発しました。

ALAN PETRILLO 著

氷河の近くに立っている人の目には、それは地球上のどのようなものよりも安定し、永久に存在するかのように見えるかもしれませんが、しかし、地球の巨大な氷床は、常に動き、進化しています。ここ数十年で、この絶え間ない動きが加速しています。実際、極域の氷は、単に移動するだけでなく、驚くほど危険なものであることが明らかになりました。

気温と海水温の上昇は、氷河の氷が海への流出を加速させ、地球全体の海面上昇の一因となっています。この不吉な進行は、予想よりもさらに速いスピードで起こっています。氷河の力学と氷の流出に関する既存のモデルは、ここ数十年の氷の実際の流出率を過小

評価しています。このため、グリーンランドの Nioghalvfjærdsbra 溢流水河を研究する物理学者である Angelika Humbert 氏の研究は、特に重要であり、緊急性を帯びています。

ドイツ、Bremerhaven にある Alfred Wegener Institute (AWI) ヘルムホルツ極地海洋研究センターの氷河学セクションのモデリンググループのリーダーとして、Humbert 氏は、Nioghalvfjærdsbra の氷河融解からより幅広い教訓を引き出すために研究を行っています。彼女の研究は、氷床の挙動に関する粘弾性モデリングと現地観測のデータを組み合わせたものです。氷河の流れに対する弾性効果のモデリングを改善することで、Humbert

氏と彼女のチームは氷の消失と、その結果生じる世界の海面への影響をより正確に予測しようとしています。

彼女は、時間が限られていることを痛感しています。“Nioghalvfjærdsbra はグリーンランドにある最後の3つの“浮き舌”氷河の一つです”と Humbert 氏は説明します。“他の浮き舌氷河のほとんどはすでに崩壊しています。”

▶▶ 1.1メートルの海面上昇に値する体積を持つ1つの氷河

北大西洋に浮かぶグリーンランドは、南極大陸に次いで世界で2番目に大きな氷に覆われています(図1)。人口の少ないグリーンランド

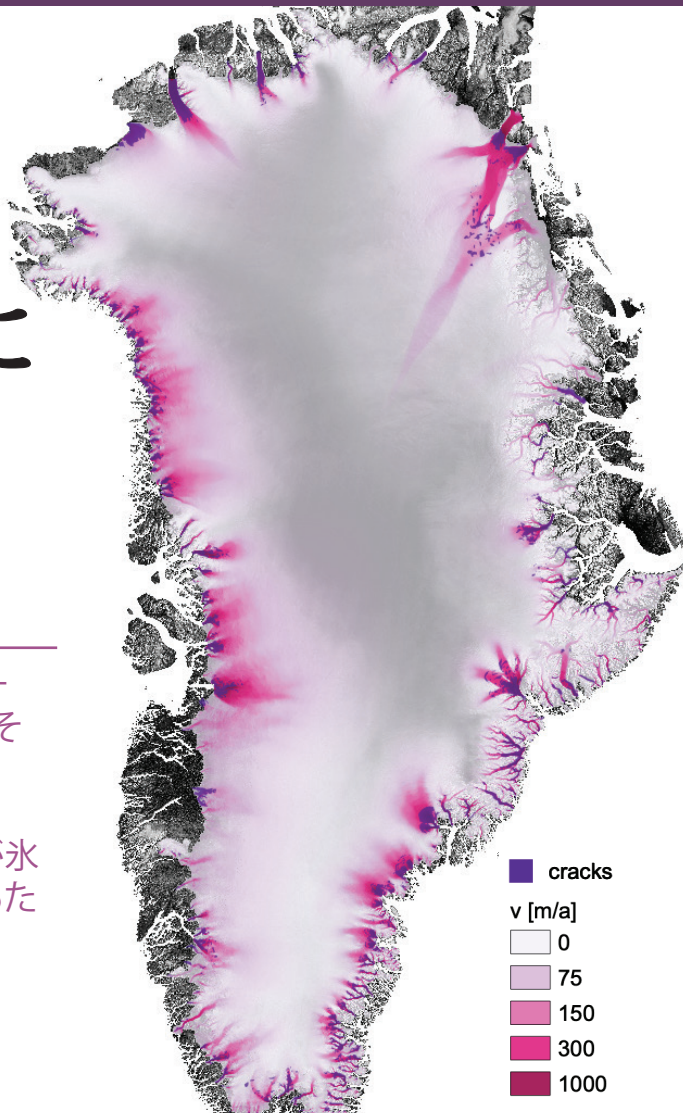


図1 グリーンランドの地図。カラースケールは、特定の地域における氷河の動きの速度を示しています。海岸付近で氷河が大きく動いていることがわかります。紫色で塗りつぶされた領域は、氷河にできた大きな亀裂の位置を示しています。



図2 2020年6月と7月に撮影されたこの一連の画像から、Nioghalvfjærdsbra 溢流水河の浮遊部分が破碎、離脱しているのがわかります。

は、一見すると手付かずの自然が残っているように見えますが、実は気候変動によって氷のマントルが引き裂かれているのです。

Humbert 氏らが執筆した、2021年の Communications Earth & Environment 誌の記事によると、海への継続的な氷の流出は、“氷床の質量収支における基本的なプロセス”であるとしています。この記事では、グリーンランド北東部の氷流全体に、世界の海面を1.1メートル上昇させるのに十分な氷が含まれていると指摘されています。氷河全体が消失するわけではありませんが、1990年以降、グリーンランド全体の氷面積は劇的に減少しています。この減少の過程は、島全体において直線的であったり、均一であったりするわけではありません。例えば、Nioghalvfjærdsbra は現在、グリーンランド最大の溢流水河となっています。近くの Petermann 氷河は以前はもっと大きかったのですが、さらに急速に縮小しています。

▶▶ 既存モデルでの氷河融解速度の過小評価

グリーンランドの氷河の融解は、氷河の浮き舌から氷山が切り離される“カービング”とは異なります。カービングは海面を直接的に上昇させることはありませんが、カービングのプロセスによって、陸上の氷が海岸に向かって移動するのを早めることができます。European Space Agency の衛星画像(図2)が、急速かつ劇的なカービングの現場を捉えています。2020年6月29日から7月24日にかけて、

Nioghalvfjærdsbra の125 km²の浮遊部分が多く別の氷山に分かれ、漂流して北大西洋に溶け込んでいたことがわかりました。

氷床の挙動を直接観測することには価値がありますが、グリーンランドの氷河融解の軌跡を予測するには不十分です。氷河学者は何十年にもわたって氷床モデルを構築し、改良してきましたが、Humbert 氏が言うように、“このアプローチにはまだ多くの不確実性があります。”2014年から、AWI のチームは他の14の研究グループと協力し、2100年までの潜在的な氷河融解の予測を比較し、改良しました。また、過去数年の予測と実際に発生した氷河融解も比較しました。不吉なことに、彼女ら専門家の予測は2015年以降、“実際に観測された結果をはるかに下回っていた”と AWI の Martin Rückamp 氏は述べています。“グリーンランドのモデルは、気候変動による氷床の現在の変化を過小評価しているのです”と彼は言います。

▶▶ 高速に作用する力を捉える粘弾性モデリング

Angelika Humbert 氏は、個人的にグリーンランドや南極に何度も足を運び、データや研究サンプルを収集してきましたが、氷河学への直接的なアプローチには限界があることを認識しています。“現場での作業は非常にコストと時間がかかる上、見えるものは限られています”と彼女は言います。“私たちが知りたいことはシステムの中に隠されていて、そのシステムの多くは何トンもの氷の下に埋もれ

ています。氷河融解を促す挙動が何であるか、また、その挙動をどこで探せばよいかを教えてください。モデリングが必要なのです。”

1980年代以降、研究者たちは氷床の進化を記述し、予測するために数値モデルに頼ってきました。“彼らは、粘性べき乗則関数を中心に構築したモデルで、温度変化の影響を捉えることができることを発見しました”と Humbert 氏は説明します。“安定した長期的な挙動をモデル化し、粘性変形と滑りを正しく設定できれば、モデルは適切な仕事をしてくれます。しかし、短い時間スケールで変化する荷重を捉えようとするならば、別のアプローチが必要になります。”

氷床の挙動に影響を与える荷重の短期的な変化は、何が原因なのでしょう？ Humbert と AWI のチームは、重要であるものの、あまり理解されていない2つの原因に焦点を当てています。それは、(図2のような)浮遊氷舌の下の潮流と、グリーンランド自体の陰しく起伏のある地形です。潮の動きとグリーンランドの地形の両方が、島の氷がどれくらい速く海に向かって移動するかを決定する要因となっています。

これらの要因によって生じる弾性変形を調べるため、Humbert 氏と彼女のチームは、COMSOL Multiphysics® ソフトウェアを使用して Nioghalvfjærdsbra の粘弾性モデルを作成しました。氷河モデルのジオメトリは、レーダー調査のデータに基づいています。このモデルは、図3に示す青線に沿った垂直断面からなる2D モデルドメインにおいて、粘弾性マックスウェル材料の方程式系を解いたものです。そして彼女らは、このシミュレーション結果を、4つの

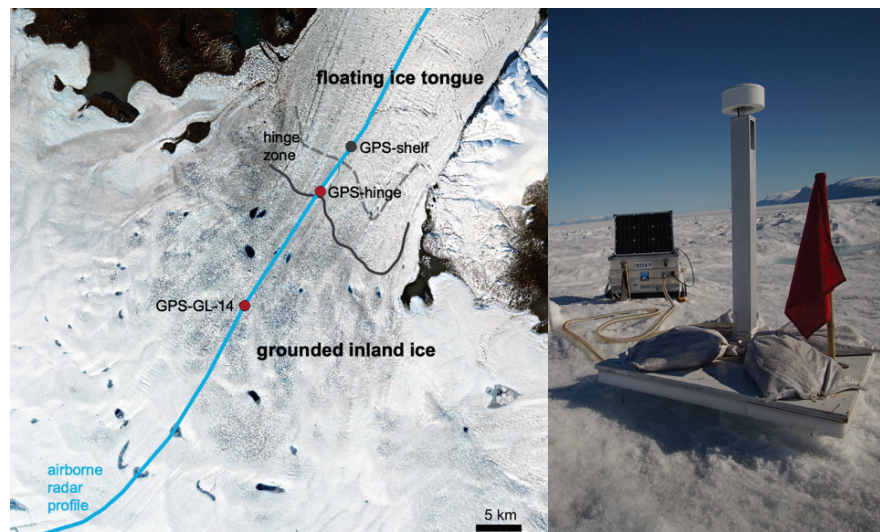


図3 Nioghalvfjærdsbræ に取り付けられた GPS 計測ステーションの位置 (左) と個々のステーション (右; 撮影者: AWI, Ole Zeising 氏).

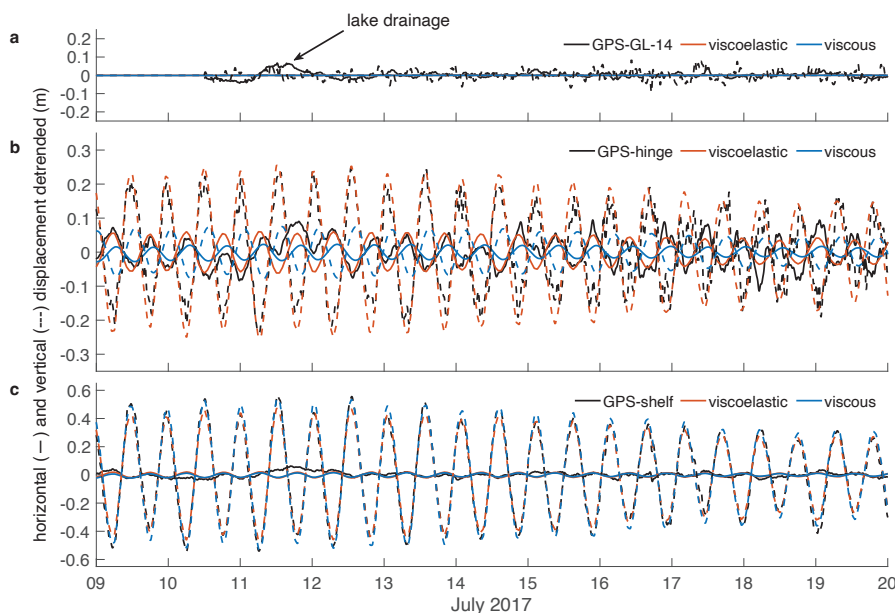


図4 Nioghalvfjærdsbræ の3つの場所における氷河の氷の経時的な変位。黒線は計測された変位、オレンジ線は AWI が COMSOL® ソフトウェアで構築した "COMice-ve" 粘弾性モデルによる変位のシミュレーション、青線は粘性モデルでの変位のシミュレーションをそれぞれ示しています。

GPS ステーションで得られた氷河流の実測値と比較しました。

▶▶ 潮周期が氷河の動きに与える影響

グリーンランド周辺の潮の満ち引きは、通常1周期で1~4 m ほど沿岸の水位が上下します。この作用は、溢流氷河の浮き舌に大きな力を与え、その力は氷河の陸上部分にも伝わります。AWI の粘弾性モデルは、こうした応力分布の周期的な変化が、海へ向かう氷河の流れ

にどのような影響を与えるかを調べました。図4は、Nioghalvfjærdsbra に作用する潮汐による応力の3カ所の測定値と、粘性および粘弾性シミュレーションで予測された応力と重ね合わせたものです。グラフ a は、接地線 (GL) から14 km 内陸に入ったところで変位がさらに減少していることを示しています。グラフ b は、海陸の接地線付近の屈曲部にある GPS ヒンジで周期的な潮汐応力が小さくなっている

ことを示しています。グラフ c は、GPS シェルフと呼ばれる、海に浮かぶ氷の上に設置された場所での活動を示しています。したがって、氷に作用する周期的な潮汐応力の波形がここで最も顕著に現れています。

“浮遊氷舌が上下に動くことで、氷河の陸上部分に弾性反応が生じます”と、AWI チームの数学者で、シミュレーションモデルの構築に重要な役割を果たしている Julia Christmann 氏は述べています。“また、内陸の氷と地面間に液体の水の氷底水文システムも存在します。この底層水システムはあまり知られていませんが、その影響を示す証拠を観察することはできません”。例えば、グラフ a は、氷河の上にある湖の下の応力が急上昇していることを示しています。“湖の水は氷を伝って流れ落ち、氷河下の水層を増やし、潤滑効果を高めているのです”と Christmann 氏は言います。

プロットされた傾向線は、純粋な粘性モデルと比較して、研究チームの新しい粘弾性シミュレーションの精度が高いことを強調しています。Christmann 氏が説明するように、“粘性モデルでは、応力の変化を完全に捉えることができません、正しい振幅を示すことができません (図4のグラフ c を参照)。曲げ領域では、弾性応答によるこれらの力の位相シフトを見ることができます。” Christmann 氏は次のように続けます。“粘弾性の “ばね” 作用を考慮しなければ、正確なモデルを得ることはできません。”

▶▶ 凹凸のある地形から生まれる弾性ひずみのモデル化

グリーンランド氷河のクレバスは、その下にある地形の凹凸を見せています (図5)。また、クレバスは、氷河の氷が純粋な粘性物質ではないことのさらなる証拠にもなります。“氷河を長い間観察していると、粘性のある物質がそうであるように、氷河が這い上がってくるのがわかります”と Humbert 氏は言います。しかし、純粋に粘性のある物質であれば、氷床のように持続的な亀裂を形成することはないと考えられます。“氷河学が始まった当初から、私たちはこうしたクレバスの存在を受け入れなければならなかったのです”と彼女は言います。研究チームの粘弾性モデルは、Nioghalvfjærdsbra の下にある地形がどのようにクレバスの発生を促し、氷河の滑りにどのような影響を与えるかを探る新しい方法を提供します。

“シミュレーションを行ったとき、地形によって生じる弾性ひずみの大きさに驚きました”と、Christmann 氏は説明します。“潮の満ち引きとは関係ないような、はるか内陸にまで影響が及んでいるのです。”

図6は、氷河の垂直方向の変形がその下の地形とどのように対応しているかを示しており、局所的な弾性垂直運動が氷河全体の水平方向の動きにどのように影響するかを研究者が理解するのに役立っています。陰影の



図5 クレバスの広範な模様を示す Nioghalvfjærdsbræ の空撮画像。(撮影者: AWI, Julia Christmann 氏)

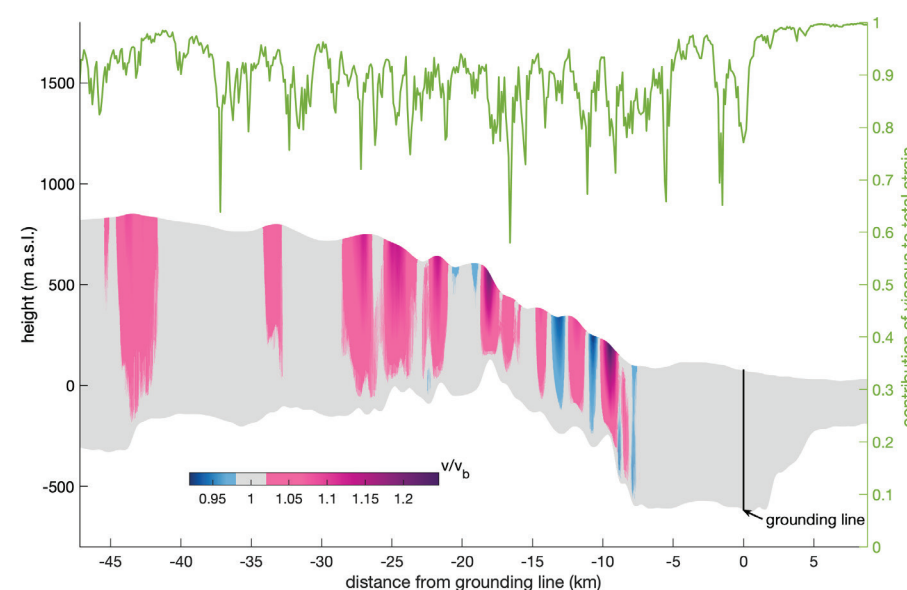


図6 Nioghalvfjærdsbræ の断面図 (左目盛)。氷河内部の氷の動きの垂直方向の速度を、氷河の基底部の動きと比較して示しています。青い部分は基底部の速度より遅く、ピンクと紫の部分は基底部の氷より速く動いています。緑色の線 (右目盛) は、断面線に沿った全ひずみに対する粘性ひずみの割合を示しています。

ついた部分は、氷河の基底速度と比較して、その部分の速度を示しています。青い部分は、地面の真上にある部分よりも遅い速度で垂直方向に移動しており、氷が圧縮されていることを示しています。ピンクと紫の部分は、基底部の氷よりも速く動いており、氷が垂直方向に引き伸ばされていることを表しています。

これらのシミュレーション結果は、AWI チームが改良したモデルによって、氷河の動きをより正確に予測できることを示唆しています。“これは私たちにとって驚きの効果でした”と Humbert 氏は言います。“潮の満ち引きが氷河の流れに影響を与える弾性ひずみを生み出すように、今度は岩盤上の満ち引きの弾

性部分も捉えることができるのです。”

▶▶ カウントダウンが進むにつれてスケールアップ

Nioghalvfjærdsbra の粘弾性モデルの改良は、Humbert 氏が数十年にわたって数値シミュレーションツールを氷河研究に活用してきた最新の例に過ぎません。“COMSOL® は私たちの研究に非常によく適しています”と彼女は言います。“新しいアイデアを試すのに最適なツールです。このソフトウェアでは、カスタムコードを記述することなく、比較的簡単に設定を調整し、新しいシミュレーション実験を行うことができます。” Humbert 氏の大学の学生たちは、頻繁にシミュレーションを研究に取り入れています。例えば、Julia Christmann 氏の博士課程では、棚氷のカービングを研究し、別の学位プロジェクトでは、表面から氷床へ融解水を運ぶ氷河下水路の進化をモデル化しました。

AWI チームは、自分たちの調査および研究を誇りに思っていますが、Humbert 氏は、世界の氷河がいかに未知であるか、そして、時間に限りがあることを十分に認識しています。“グリーンランド全域のマックスウェル材料シミュレーションを行う余裕はありません”と Humbert 氏は認めます。“何年もの計算時間を費やしても、すべてをカバーすることはできないでしょう。しかし、私たちのモデルの局所的な弾性応答効果をパラメーター化し、より大きなスケールで実装することはできるかもしれません”と彼女は言います。

21世紀の氷河研究者が直面する課題は、まさにこの“スケールの大きさ”なのです。研究対象の大きさは驚異的であり、彼らの仕事の世界的な重要性もまた然りです。知識が増えていくにつれても、より多くの情報をより早く見つけ出すことが不可欠です。Angelika Humbert 氏は、粘弾性材料を研究している他の分野の人々からの情報提供を歓迎しています。“他の COMSOL ユーザーで、マックスウェル材料の破壊を扱っている場合、そのモデルが氷とは全く関係なくても、おそらく我々と同じ問題に直面しているはずですよ!”と彼女は言います。“もしかししたら、意見交換して、これらの問題と一緒に取り組むことができるかもしれません。”

この精神に基づき、氷河学者の研究から恩恵を受ける私たちは、彼らが背負う膨大で重みのある課題の一部を肩代わりすることができるかもしれません。◎

音響シミュレーションによるバーチャル製品開発

ROGER SHIVELY 著

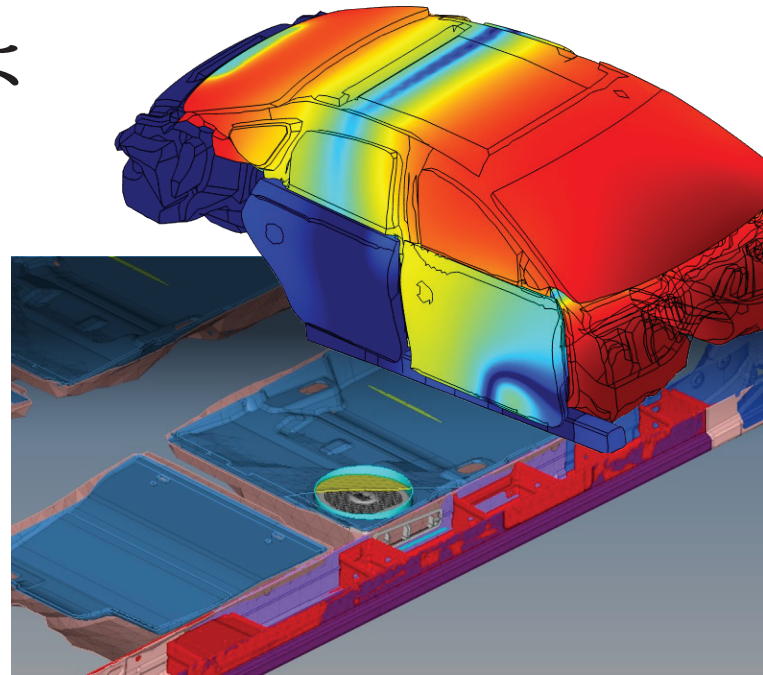
世界各国の相手先ブランド製造者 (OEM)、特に自動車市場では、シミュレーションソフトウェアの利用により、物質的なプロトタイプ の必要性を減らすことでコスト抑制に貢献しています。

シミュレーションは、自動車の衝突安全性、耐久性および NVH (騒音、振動、乗り心地) 研究のために、自動車分野で初めて利用されました。これらのシミュレーションは、効率的なオーディオシステムや車両音響モデル構築の道を開くことに貢献しました。例えば、衝突、耐久、騒音モデルのために作成されたメッシュは、音響メッシュに再利用されています。これを OEM や部品メーカーが社内で行う場合も、JJR Acoustics のような独立系コンサルティング会社が行う場合も、これらのメッシュを再利用することで、CAD の生ファイルからメッシュを作成するのに必要なリソースを節約することができます。

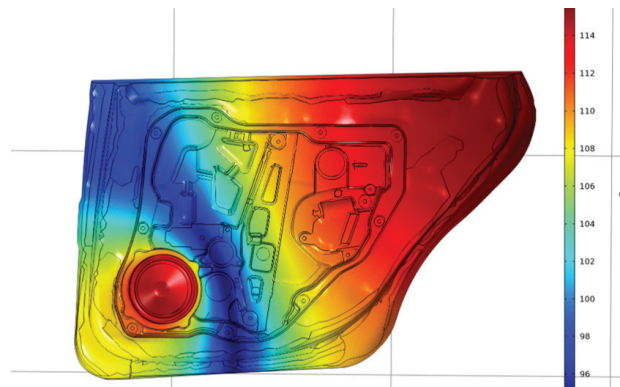
COMSOL Multiphysics® を使用した音響シミュレーションは、自動車音響エンジニアがラウドスピーカーの設計品質を維持しながら、オーディオシステムのラウドスピーカーを車両に組み込む際に役立ちます。現在、必要とされるシミュレーション、チューニング、および可聴化の多くは、研究室の外で行われています。音響エンジニアは、バーチャルでもラボでも、チューニングのオプションを検討することで、音響空間とラウドスピーカーシステムの理解を深め、最適な車載オーディオ体験の道筋を見出すことができるようになります。その後、トリム、スピーカー、スピーカーの位置を変更し、別の道筋を見つけることで、知識が構築されます。マルチフィジックスシミュレーションソフトウェアを使用すると、この最適化と反復のプロセスで得られた知見を仮想的に利用することが可能になります。デジタルツインに開発されたモデルや既存のデジタルツインをベースにしたモデルによって、コンセプトカーがまだ設計段階にあるうちに、仮想的に音響チューニングを行うことができます。このデジタルワークフローは、従来の物質的なプロトタイプングやメカニカルシミュレーションを使用するエンジニアには馴染み深いものですが、内装を決定する前に、デザインスペース全体を迅速かつコスト効率よく調査することも可能にしてくれます。

COMSOL Multiphysics で実現したシステムレベルの自動車シミュレーションの用途には、ラウドスピーカーの配置の最適化、ラウドスピーカーと取り付け位置の構造的な負の相互作用の低減などがあります。この種のシミュレーションでは、車室内の広範囲の周波数について結果を計算する必要があります。リスナーの頭の位置で平均化された音響周波数応答は、音質を決定する重要な要素です。これは、車内の複数のリスニングポジションに対して行うことができます。

今後、音楽再生に伴うアクティブノイズコントロールの設計が、オーディオおよび音響エンジニアにとって大きな焦点になるでしょう。ノイズとそのキャンセルのための音響伝達経路のマルチフィジックスシミュレーションは、これらの現象の影響を理解し、その洞察を設計プロセスに適用するために非常に重要です。◎



サブウーファーの取り付け位置、音圧レベル (SPL) モード、リスナーでの SPL レスポンスの最適化の一例。



ウーファーとドアの構造相互作用。

著者について



Roger Shively 氏は、JJR Acoustics (ワシントン州シアトル) の共同設立者であり、代表を務めています。彼は34年以上のエンジニアリング研究開発の経験を持ち、世界中の OEM メーカーでの製品化および新製品立ち上げに多大な貢献をしてきました。2011年に JJR Acoustics を共同設立する以前は、1986年から Harman International Industries Inc. の自動車部門で音響システムのチーフエンジニア、北米およびアジアのエンジニアリング製品開発チームのファンクショナルマネージャーを務めていました。