

COMSOL NEWS

マルチフィジックスシミュレーションマガジン

バーチャルリアリティのための没入型オーディオ

ゲーム用ヘッドセットのゴールドスタンダードに合わせてスピーカーを最適化



GIRO D'ITALIA自転車レースの記録で求められる先進のアンテナ設計

PAGE 23

仮想実験のパワー

2020年の始め、世界はほぼ一夜にして仮想空間に移動したように見えました。教室での講義や業界の会議から、誕生日パーティーや休日のお祝いまで、全てが突然ビデオチャットで開催されるようになりました。これは多くの人にとって大きな変化でしたが、科学者、研究者、エンジニアは、COVID-19が一般用語になるずっと前から、シミュレーションソフトウェアを使用して仮想実験とプロトタイプを成功裏に実施してきました。

今年のCOMSOL Newsで取り上げられているエンジニアは、仮想実験と数値モデリングのパワーを利用して、新しいプロセス、デバイス、および技術を開発しています。この号では、ビデオゲーム開発者と協力して、実際に感じられるほどリアルに聞こえるバーチャルリアリティヘッドセットを作成した音響エンジニアに出会えます。製造室の床の上にあるロケットエンジン部品の積層造形プロセスの結果を予測するために使用できるシミュレーションアプリをご覧いただけます。半固体流れ電池をモデル化する新しい方法と、環境に優しいアノードベーキングプロセスを開発した研究者についてもお読みになれます。また、スポーツの生中継を撮影および放送するための効率的で信頼性の高い方法の開発と、高速通信システム用のテストチャンバーを最適化した方法についてもご説明します。

世界中のCOMSOLユーザーが体験を共有してくれました。彼らの専門知識、洞察、革新的なアイデアを皆さんと共有できることを楽しみにしています。

お楽しみ下さい!

Brianne Christopher
COMSOL, Inc.

COMSOLコミュニティと対話しましょう

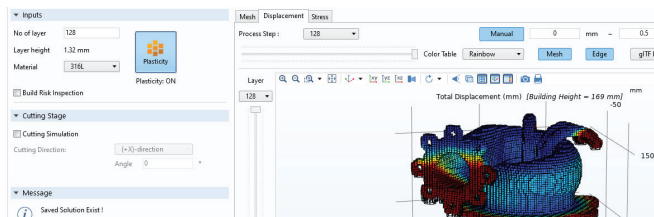
BLOG comsol.com/blogs
FORUM comsol.com/forum
LinkedIn™ linkedin.com/company/comsol-inc-
Facebook® facebook.com/multiphysics
Twitter® [twitter.com/@COMSOL_Inc](https://twitter.com/COMSOL_Inc)

COMSOL Newsへのコメントを歓迎しております;
info@comsol.com までお問い合わせください。

© 2020 COMSOL. COMSOL, COMSOL Multiphysics, Capture the Concept, COMSOL Desktop, COMSOL Server, COMSOL Compiler, LiveLink はCOMSOL AB の登録商標又は商標です。その他の商標はそれぞれの権利者の所有物であり、COMSOL AB並びに同社の子会社及び製品は、かかる権利者又はこれらの商標権者と関連しておらず、これらによる承認を受けておらず、これらによる資金提供を受けておらず、これらによる支援も受け付けておりません。かかる商標権者の一覧は、www.comsol.com/trademarks でご覧いただけます。

LinkedIn は米国および/または他の国の LinkedIn Corporation とその関連会社の商標です。Facebook はFacebook, Inc. の登録商標です。TWITTER, TWEET, RETWEET, Twitter ロゴはTwitter, Inc. またはその関連会社の商標です。

目次



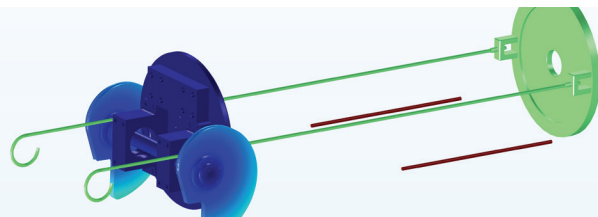
シミュレーションの民主化

- 4** シミュレーションアプリによる積層造形における予測
Industrial Technology Research Institute (ITRI), Taiwan



シミュレーションベースの製品開発

- 7** バーチャルリアリティゲームのための没入型オーディオのゴールドスタンダードの設計
Tectonic Audio Labs, Washington, USA
- 20** 高速通信のワイヤレステストシステムとアンテナの最適化
Bluetest, Sweden
- 26** レンズ解析の範囲と深さを拡張する完全波動シミュレーション
COMSOL, Massachusetts, USA



デザイン最適化

- 10** 鉄道輸送の新時代に向けた架空設備装置の改善
Raychem RPG, India
- 16** 仮想EMIおよびEMC試験環境のシミュレーションの重要な役割
COMSOL, Massachusetts, USA
- 23** シミュレーションによるテレビスポーツイベントのモバイル録画用アンテナのプロトタイプピンギング
Radiotelevisione Italiana (RAI), Italy



リサーチスポットライト

- 13** 古典的な化学の質問に答えるための新しい電池モデルの開発
Flemish Research Institute for Technology (VITO), Belgium
- 29** 数値モデリングによる環境にやさしいアノードベーキングプロセスの設計
Delft University of Technology, Netherlands

ゲスト論説

- 32** COVID-19後の世界における医療機器設計の再考
Daniel Smith, Emphysys, Massachusetts, USA

Industrial Technology Research Institute (ITRI), Taiwan

シミュレーションアプリによる積層造形における予測

工業技術研究院のエンジニアは、積層造形プロセスであるレーザー粉末床溶融の性能を予測するために使用できるシミュレーションアプリを作成しました。このアプリは、Taiwan Innovative Spaceでハイブリッドロケットエンジン用の3Dプリントインジェクターの積層造形プロセスにて時間とお金を削減します。

BRIANNE CHRISTOPHER 著

台湾の工業技術研究院 (ITRI) は、3D印刷のオリジナルデザイン製造(ODM)、再設計、およびシミュレーションサービスを台湾イノベティブスペース (TiSPACE) に提供しています。ITRIでは、TiSPACEハイブリッドロケットエンジンで使用される燃料噴射装置部品の3D印刷プロセスは、始めは順調に始まります。レーザーは粉末の最初の層を溶融してビルドプレートと融合させ、リコーターは粉末の次の層を最初の層全体に広げ、レーザーは層を溶融して融合します。ビルドは問題なく層ごとに続行されます。突然、リコーターが詰まります。レーザーからの熱により、材料に温度勾配が生じ、層が変形し、最終的にはリコーターが詰まってしまったのです。プロセス全体が終了します。

エンジニアは再試行します。今回はビルドは完了しましたが、最終的にはインジェクターが変形して使用できなくなります。グループは3回目の試行を行います。そして4回目。

エンジニアは、ビルドを成功させるためにプロセス全体のパラメーターを最適化する必要があることに気づきますが、試行錯誤のア

プローチは時間、労力、コストの浪費につながってしまいます…

直感的で費用効果の高い積層造形プロセス

レーザー粉末床溶融(LPBF)とは、レーザーが粉末を溶かして融合させる積層造形(AM)の一種です。LPBFは、いくつか例を挙げると、選択的レーザー溶融(SLM)、選択的レーザー焼結(SLS)、直接金属レーザー焼結(DMLS)などのプロセスを表す包括的な用語でもありません。LPBFの間、通常約30~50 μ mの材料の薄層がビルドプラットフォーム上に広がります。レーザーがモデルの最初の層を融合し、次にローラーまたはリコーターが粉末の次の層を最初の層全体に広げます。完全品または部品が構築されるまで、粉末の層が広げられ、融合されます。または、レーザーの代わりに電子ビームが使用され、ビルドが真空中で行われることもあります。

LPBFを使用すると、レーザーの解像度が高いこともあり、メーカーは複雑な形状を作成することができます。このタイプのAMのもう1つ

の利点は、1つのビルドからの未使用の粉末をマシンに組み込んで、別のものに使用できることです。これにより、AMは、材料を無駄にする他の種類の製造プロセスよりも費用効果が高くなります。これらの利点により、LPBFは、航空宇宙、自動車、医療業界など、さまざまな種類の製造で使用されています。また、歯科用途やジュエリー作りでもよく使われます。

ただし、LPBFには独自の課題があります。1つは、このプロセスには高度に局所化されたレーザー加熱が含まれるため、材料に大きな温度勾配が生じることです。この勾配は、成品の印刷時に層に残留熱応力と変形を引き起こす可能性があります。この残留変形が過度になると、機械のリコーター部品が詰まり、製造プロセス全体が中断してしまいます。機械が詰まってビルドが終了した場合は、プロセスを再開する必要があり、費用と時間が無駄になります。

もう1つのリスクは、完成した部品も変形する可能性があり、エンドユーザーの許容限界を超えてしまうことです。



図1 3DPインジェクター部品。

▶▶ LPBFを使用したロケットエンジン部品の製造

ITRIは、コストと時間の制約と適切に作成された完成品とのバランスを取るために、LPBFプロセスを研究しています。エンジニアのWai-Kwuen Choong氏とTsong-Wen Tsai氏、マネージャーのSteven Lin氏を含むITRIのレーザーおよび積層造形技術センター(LAMC)のAMシステムイノベーション部門の研究者は、TiSPACEハイブリッドロケットエンジン

用の3Dプリント(3DP)インジェクター部品を製造するためにLPBFプロセスを最適化します(図1)。3DPインジェクターは、エンジンのハイブリッド推進剤の混合効率を高め、流体力学に最適化された設計を利用するようにTiSPACEによって設計されています。ITRIは、積層造形(DFAM)技術の設計を使用して、設計をさらに改善しました。「この部品は、複雑な内部流路と統合されたコンポーネント機能により、LPBFテクノロジーのデモンストレ

ーションとして優れています」とWai-Kwuen Choong氏は述べます。

インジェクターを製造する際には、LPBFに関連する設計上の課題を考慮することが重要です。このサイズの部品では(一般的に約110 mm x 110 mm x 170 mm)熱応力の蓄積は避けられず、インジェクターの軸方向であるz方向に大きな変形を引き起こす可能性があります。この変形により、リコーターが詰まり、システムが停止する可能性があります(前例もあります)。変形を回避するためにLPBFプロセスを最適化することにより、ITRIとTiSPACEは、ビルドの中断に起因する無駄な時間とコストを削減します。

▶▶ 機械的モデリングによる将来の結果の予測

通常、LPBFプロセスの結果は、単純化された経験則と試行錯誤の方法を使用して予測されます。一例として、45度ルールがあります。これは、積層造形分野で一般的に受け入れられているシンプルなルールで、45度を超えるオーバーハングの角度をデザインに含めないようにする必要があります。そうしなければ、3Dプリントには適していないものになるためです。なぜなら、印刷するレイヤーが下のレイヤーに比べて突出しすぎて、新しい層が下から十分な構造的支持を得られないから

です。このルールは、3DPインジェクターのような複雑で繊細な設計を考慮していないため、試行錯誤の方法は製造プロジェクトの時間とコストに食い込んでしまいます。代わりに、ITRIはシミュレーションを使用して、製造された部品の残留応力と変形を予測します(図2)。そのために、彼らはCOMSOL Multiphysics® ソフトウェアを利用します。

温度勾配がインジェクターの設計でどのように応力と変形を引き起こすかを予測するために、チームは予備シミュレーションで内部ひずみ法を実装しました。この方法は、溶接の問題の残留応力と変形を迅速に予測するために最初に確立され

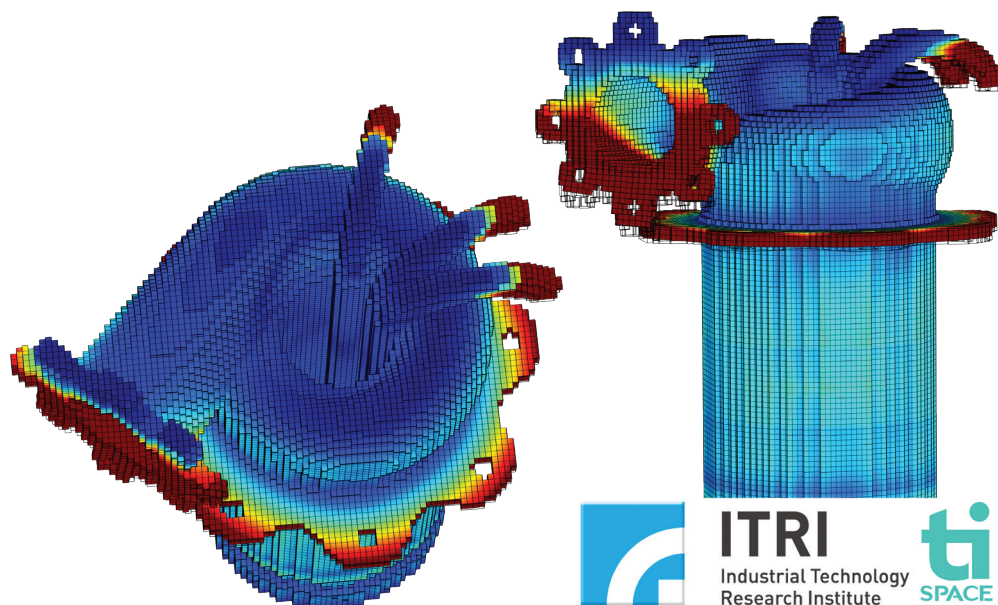


図2 3DPインジェクターのLPBF製造プロセスのシミュレーション。

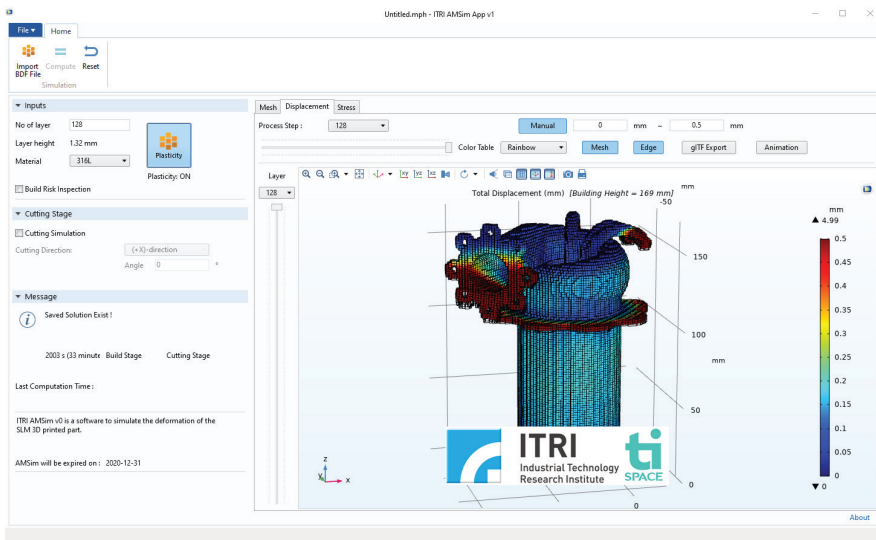


図3 ITRI AMSIM アプリ。

ましたが、金属積層造形の問題を解決するためにもますます使用されています。

チームは構造力学モジュールの固体力学インターフェースを使用して、熱機械解析を実行しました。そうすることで、彼らは製造された部品の残留応力と変形を推定することができました。積層造形に特化したCOMSOL®ソフトウェアのアクティベーション機能は、LPBFに必要な層ごとの繰り返しの追加と融合のモデリングに最適でした。また、最適化モジュールを使用して、ビルド中にコンポーネントの部品の向きと支持構造を最適化しました。

▶▶ 製造ワークフローへの ITRI AMSIM アプリの導入

ITRIチームは、シミュレーションを使用してLPBFプロセス中の応力と変形の結果を正常に予測することに成功しましたが、それでも問題が残りました。LPBFプロセスを展開するAMシステム製造エンジニアは、通常、シミュレーションに精通していないということです。そのためにシミュレーションスペシャリストを雇うことは、プロジェクトの時間とコストを増やすだけです。何をすべきでしょうか？

チームは、直感的なユーザーインターフェースと、LPBFモデルからの特殊な入力と出力を備えたシミュレーションアプリ(図3)を作成し、ITRI AMSIMアプリと名付けました。アプリは、組み込みのアプリケーションビルダーを使用して、COMSOL Multiphysics®の既存のモデルから構築できます。シミュレーションア

プリを使用すると、プロセスエンジニアは、最適化された製造プロセスのビルド特性を予測および評価できるようになります。これには、STLファイル、弾性または弾塑性モデル(非線形構造材料モジュールで利用可能)の入力、および切断プロセスシミュレーションまたはベースプレートの取り外しを有効または無効にする選択が含まれます。また、チタン合金のTi 6Al-4V、CoCrMo合金のMP1、ステンレス鋼の種類PH1と316L、そしてアルミニウム合金のAlSi10Mgなど、5種類の粉末材料から選択できます。アプリの出力は、プロセスエンジニアが必要とする結果です。例えば、構築段階中および切断後の変位や残留応力の分布などです。

アプリの入力は、実験的なキャリブレーションに基づいています。ITRIチームは、さまざまなスキャン戦略を介してこれを実行し、正しい固有のひずみベクトルを抽出しました。このベクトル、またはこのベクトルの成分は、粉末材料と、レーザー出力、ビームサイズ、スキャン速度、ハッチサイズなどのレーザーパラメーターに応じて変化します。

アプリは、COMSOL Compiler™を使用してスタンドアロンの実行可能ファイルにコンパイルされました。コンパイルされたアプリケーションはプロセスエンジニアに配布され、COMSOL Multiphysics®またはCOMSOL Server™のライセンスがなくても実行できます。実際、ITRIチームは独自の裁量でアプリのライセンスを取得し、3か月の試用期間で対

象のユーザーにアプリを提供しました。

ITRIとTiSPACEを組み合わせたプロジェクトでシミュレーションアプリを使用するメリットについて質問されたとき、Choong氏は時間とお金を節約するメリットについて繰り返し、「コストの問題がすべて」だと付け加えました。

▶▶ アプリで時間とコストを節約

シミュレーションアプリにより、チームは部品におけるリスクの高い領域を予測し、設計に支持を追加して、ビルドを成功させることができました。物理的なAMプロセスを実行して部品のビルドをテストするには、約1週間かかりますが、アプリのシミュレーションには1時間もかかりません。プロセスのテストに費やされた合計時間は75%減少しました。これは、AMSIMを構築して展開する前のテストプロセスよりもはるかに効率的です。TiSPACEでの3DPインジェクターのビルドは、試行錯誤の方法を使用した際には、4回開始および終了しました。毎回、リコーターが詰まったり、パーツ自体が壊れたりすると、プロセスが失敗しました。

これらの試験の人件費、機械費、材料費、加えてシミュレーション実行のための費用を計算すると、コストはさらに短縮され、今回は83.3%短縮されました。

そして最後に、シミュレーションを実際の製造プロセスと比較した場合、3DPインジェクターのAMプロセスの結果を取得するのにかかる時間は、なんと99%短縮されました。

▶▶ アプリ拡張のための将来の計画

ITRIチームは、すでに3回の反復を経たAMSIMを、材料キャリブレーションの新機能、リコーター干渉の検出、支持構造のシミュレーションなどの機能で改善することを計画しています。彼らは、より高度でありながらユーザーフレンドリーな機能をアプリに追加することで、アプリの時間と費用効果が以前よりもさらに高くなり、学習曲線が短縮されることで、AM業界のエントリーレベルユーザーの投資収益率がさらに高まることを望んでいます。

ITRI AMSIMアプリにより、3D印刷プロセスの正確なプレビューと、失敗のない制作が現実になっています。◎

Tectonic Audio Labs, Washington, USA

バーチャルリアリティ ゲームのための 没入型オーディオの ゴールドスタンダード の設計

JULIA ABRAMS 著

Tectonic Audio Labsは、電磁気、機械、音響のシミュレーションを使用して、最先端のバランスモードラジエータースピーカーを作成しました。スピーカーは、Valve Corporationのバーチャルリアリティ(VR)ヘッドセットに実装され、現在、VRオーディオのゴールドスタンダードと見なされています。

バーチャルリアリティは、仮想世界を可能な限りリアルに感じさせることで、ユーザーをその世界にできるだけ没頭させることを目的としています。バーチャルリアリティが正しく行われると、ソファから史跡を訪れたり、博物館で大昔の生息地を体験したり、快適なリビングルームから火星や月を探索したりすることができます。

ゲーム業界はVR開発で大きな進歩を遂げていますが、ゲーム開発者が直面した1つの課題は、仮想世界でそれが現実ではないという不信をいかに効果的に取り払うかです。

VRを使用して地球に接近する小惑星を研究する場合でも、地球にミサイルを発射するゲームで遊ぶ場合でも、没入型の体験はより良いものになります。文学や映画などの他のエンターテインメント分野でも、現実体験の模擬という同じ課題に直面していますが、VRにはオーディオへの没入という特徴があります。

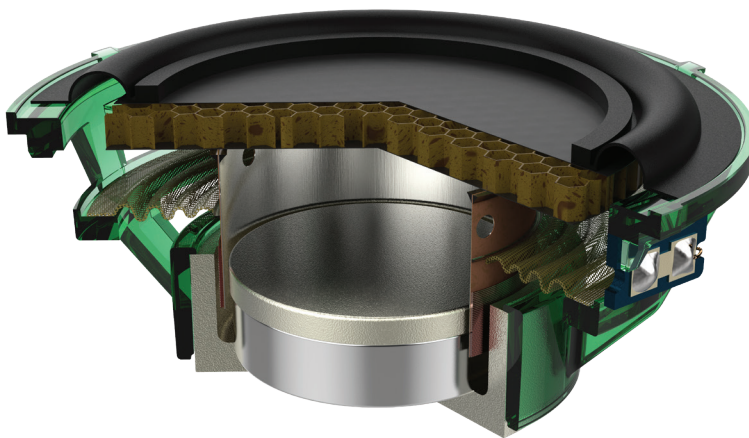


図1 BMRスピーカーの断面図。

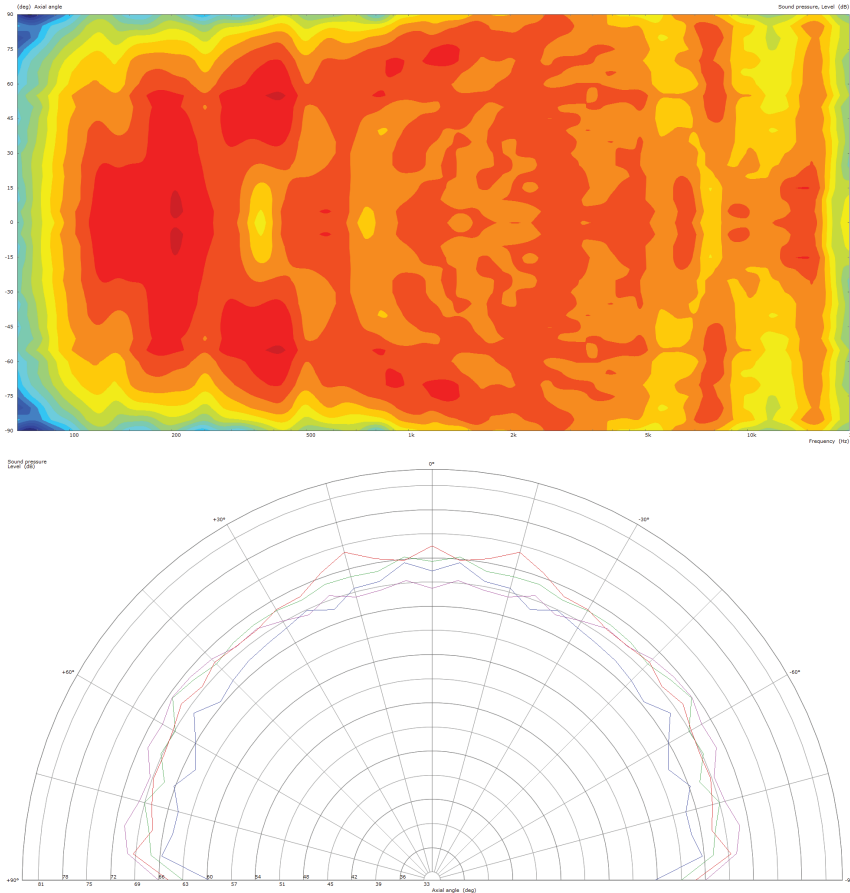


図2 BMRスピーカー分析の指向性と極座標プロット。

▶ VALVE INDEX® ヘッドセットでオーディオ没入を実現

ゲーム、ゲームプラットフォーム、ゲームハードウェアを作成するゲーム業界の大手開発者であるValve Corporationは、現実と信じさせる体験を提供できるValve Index® VRヘッドセットの開発を目指しました。そのために、ValveエンジニアのEmily Ridgway氏と彼女のチームは、没入型のオーディオ体験を作成する方法を理解する必要がありました。

ビデオゲームで遊んでいる間、プレイヤーはしばしばステレオヘッドホンを着用して、ゲーム内のキャラクターと比較して音がどこから来ているかを判断します。音源がキャラクターの左側にある場合、音はプレイヤーの左側のヘッドフォンスピーカーから聞こえます。その逆も同様です。ヘッドホンは、音を分離し、ノイズをキャンセルし、周波数応答を誇張するように設計されているため、Valveチームは、従来のヘッドホンの使用を拒否しました。Ridgway氏は、ヘッドホンの物理的な設計そのものが

オーディオの没入感を妨げる可能性があることを懸念していました。例えば、ヘッドホンは外耳道に直接音を入れるため、音が想像上のもの(内部化された聴覚源)として、もしくは頭の中から聞こえるものとして、または他の意味で「本物でない」ものとして感じ取られるかもしれません。また、ヘッドホンは物理的に不快であったりするため、この不快感はユーザーをゲーム体験から引き離してしまう可能性があります。ヘッドホンの代わりにスピーカーを選ぶ人もいます。スピーカーはこれらの問題のいくつかを軽減しますが、独自の問題があります。スピーカーの音は、実際の部屋の形状と音響に影響されるということです。もう1つの理由は、最高の音質を得るためにプレイヤーが留まる必要がある「スイートスポット」がありますが、VR体験では、動き回ることが多いということです。

Ridgway氏の解決策は、超近距離、フルレンジ、オフイヤー(耳外)ヘッドフォンでした。

Ridgway氏と彼女のチームは、ヘッドセッ

ト用いくつかのタイプのオーディオスピーカーを使用しました。彼らの目標に完全に一致するものではありませんでした。正確には、Tectonic Audio Labのバランスモードラジエーター(BMR)スピーカーが見つかるまではなかったということです。Ridgway氏は「いくつかのプラスのメリットにすぐに気づいた」とブログ記事に書いています。「スピーカーの位置ずれによる着色を減らし、重量目標のほぼ範囲内にあり、高中音域で優れた周波数応答を示し(これはバイノーラルシミュレーションにおいて重要な点である)、従来のスピーカードライバーよりもはるかに薄いものでした。」ValveはTectonic Audio Labsと協力して、これらの利点を活用し、VRヘッドセット用のカスタムスピーカーを設計しました。

▶ BMRスピーカーテクノロジーとは?

従来のスピーカーでは、オーディオはピストン的に動くコーンダイアフラムによって生成されます。この動きは、動きの軸に沿ってエネルギーを伝達し、音を生成します。BMRスピーカーは、曲げ波、つまり伝搬方向に垂直に移動する波を利用しているという点で異なります。これによって、周囲の空気との相互作用が大きいため、より多くのエネルギーを伝達できるのです。より高い周波数は、従来のダイアフラムが波打ったり曲がったりする可能性があるため、従来のスピーカーでは処理が難しい場合があります。これはコーンブレイクアップとも呼ばれます。その後の山と谷はオーディオ品質を低下させ、配置感度を高めます。ほとんどのスピーカーは曲がる波を避けようとしますが、BMRはそれらを活用します。

「私たちは曲げモードを活用し、むしろそれらが発生することを望んでいます。それらが発生する場所を制御できます。軸外出力を保持してくれるのはそれらの曲げモードです。私たちは共鳴分裂を有利に利用しています」とTectonic Audioのエンジニアリング担当副社長であるTim Whitwell氏は述べています。「多くの点で、BMRは従来の音響工学の考え方に反しています。」

BMR技術は、材料の選択や質量負荷などのいくつかの特性を最適化することにより、この高周波の波打ちを利用できます。この曲げモードの活用、および曲げモードとピストンモードの両方の重ね合わせにより、BMRスピーカーで音が均等に伝播されます。

▶ ゴールドスタンダードの作成

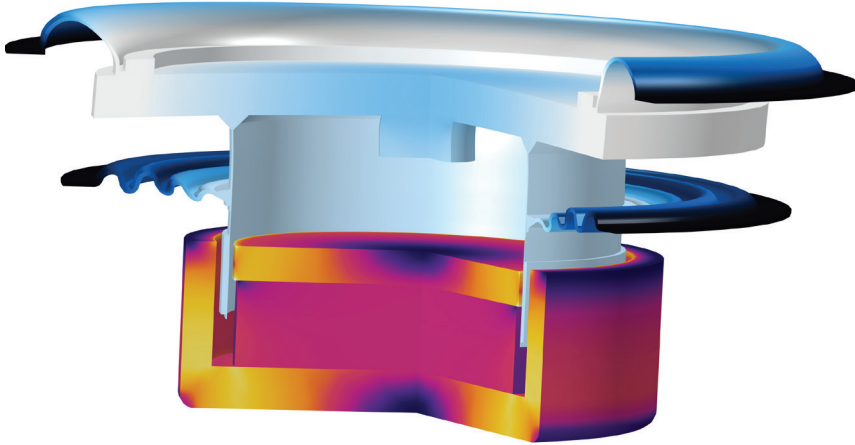


図3 完全連成したBMRモデル。

Tectonic Audio Labsのチームは、Valve Index® VRヘッドセットのオーディオスピーカーに取り組み始めました。「私たちにとって、出発点は横隔膜のモーダル構造を分析することです」とWhitwell氏は述べます。「BMRで私たちにとって本当に重要なことは、ピストン動作がビームングを開始すると同時にモーダル動作が正しく開始されることを確認することです。」ビームングが開始されようとする、曲げモーダル動作が開始され、ビームが無視する軸外出力が「埋められ」ます。

この動作を最適化するために、Tectonic チームは、最初にディスクの曲げモーダル動作が発生する場所と、帯域幅全体で発生する曲げモードの数を把握する必要がありました。彼らはCOMSOL Multiphysics® ソフトウェアを使用して、この動作の固有振動数分析を実行しました。そこからディスクの厚さと材質を最適化することで曲げモードを制御することができました。Tectonic Audio は、この動作が必要な場所とタイミングで正確に発生するようにすることで、スピーカーの広い指向性出力を範囲全体で維持できます。

Tectonic はモーター設計も解析し、電磁場解析を実行してボイスコイルを最適化しまし

た。「ボイスコイルワイヤーに多くの巻きを追加することで、電磁エネルギーから機械エネルギーへの変換を増やすことはできますが、重量が増えるため、そこで競合する制約が発生するのです」とWhitwell氏は説明します。「その最適化の全てをCOMSOL®内で実行します。」

機械モデルと電磁場モデルは別々に計算および最適化されました。

Tectonic Audio Lab の次のステップは、連成解析のために2つを1つにまとめることでした。モデル内のほぼすべてが軸対称であるため、2D軸対称空間で連成をモデル化でき、計算リソースを節約できました。ダイヤフラムの材質だけが例外でした。「ダイヤフラムの素材自体は実際には直交異方性で、方向によって剛性が異なります」とWhitwell氏は述べています。「COMSOL Multiphysics® の固体力学インターフェースにより、2D軸対称空間内の材料の直交異方性をモデル化できます。これは本当に素晴らしいことです。」

チームは、完全連成モデルを開発した後、コイルを中央に配置してその動きを制御するスパイダーサスペンションなどの他の要素を導入しました。同時に、完全に連成したモデルの最適化を継続し、ダイヤフラムの動作のバラ

スが取れるようにしました。これこそがBMR技術の鍵であり、Valve Index® VRヘッドセットで適切に機能し、さまざまなユーザーに優れた体験を提供します。

スピーカーが完全にダイヤラインされると、サスペンションが次の焦点となり、その形状が非線形スタディで解析されます。「サスペンションの形状を上下に変形させて、これらの部品の剛性が変位によってどのように変化するかを確認します」とWhitwell氏は言います。「繰り返しになりますが、そこには多くの最適化が必要です。」Whitwell氏は、この最適化がこのプロジェクトで特に重要であることを強調します。「ドライブユニットのノイズや歪みは、リスナーにとって非常に明白となります。」サスペンションが完全に最適化された後、連成モデルに戻ります。

「まずは、全てが私たちが望むパフォーマンスを発揮していることを確認します。そして、プロトタイプを作成することができます。」とWhitwell氏は言います。

▶▶ VRヘッドセットの「王様」

Tectonic Audio Labの設計の最適化とプロトタイプングが成功した後、Valve Corporationはヘッドセットを市場に投入することができました。それ以来、非常に多くの肯定的なレビューを獲得しています。

一例として、Linusが運営するLinus Tech Tipsと呼ばれる人気のYouTubeチャンネルがあります。ビデオのトピックは、RAMを増やすことでコンピューターが高速になるかどうかの説明から、最近リリースされたワイヤレスキーボードのレビュー、さらには段ボールからPCタワーケースを構築することまで多岐にわたります。そしてもちろん、さまざまなVRヘッドセットをレビューしています。

2019年8月、Linusは「VRはまだ終わりではないかもしれない…」というビデオをアップロードし、Valve Index® ヘッドセットをレビューしました。当初、彼のスピーカーに対する感想は曖昧でしたが、ヘッドセットを1日使用した後、Linusは感銘を受けました。

「このスピーカーは素晴らしい」と彼はやや疑わしげに言う。「実際に驚くほど良い音を出します！」動画の残りの部分では、Linusがヘッドセットの仕様について説明しています。

ビデオの最後で、LinusはValve Index® ヘッドセットを持ち上げ、カメラを直接見ながら、「これは絶対にVRゲーミングヘッドセットの王様です」と言います。◎

「ボイスコイルワイヤーに多くの巻きを追加することで、電磁エネルギーから機械エネルギーへの変換を増やすことはできますが、重量が増えるため、そこで競合する制約が発生するのです。その最適化の全てをCOMSOL®内で実行します。」

— TIMWHITWELL, TECTONIC AUDIOLABS エンジニアリング担当副社長

Raychem RPG, India

鉄道輸送の新時代に向けた 架空設備装置の改善

インド政府が国の鉄道システムを活性化する計画の一環として、Raychem RPGの研究者は、構造モデリングと最適化を使用して、カテナリー線と接触線用の自動張力装置とモジュラーカンチレバーを設計しました。

ADITI KARANDIKAR 著

鉄道網はインドの交通システムの中核であり、遠隔地の村や町と全国の大都市を結んでいます。最近の政府のイニシアチブは、2030年までにネットワーク全体を刷新し、近代化することを目指しており、過去2年間で、すでに鉄道システムに多くの変化がもたらされています。技術的な観点から、インドの鉄道には2つの注目すべき変化が期待できます。それは、電気および太陽光発電の列車の導入と、列車の運行速度の100 km/hから160~220 km/hへの増加です。これらの計画をサポートするには、カテナリー線や連絡線などの架空設備(OHE)やパンタグラフアセンブリなど、既存のインフラストラクチャーと部品に適切な変更を加える必要があります。

さまざまなセクター向けの革新的なエネルギーソリューションのパイオニアである Raychem RPGには、進化する鉄道ネットワークの困難な要件を満たすことができる製品に取り組んでいる専任チームがいます。Ishant Jain氏が率いる科学者と研究者のチームは、マルチフィジックスシミュレーションを使用して、鉄道の架空設備の最も重要な部品の2つであるオートテンションデバイス(ATD)とモジュラー

カンチレバー(MC)の設計を改善しました。

» 自動張力装置とモジュール式カンチレバーによる鉄道OHE線の保護

電気鉄道システムでは、電力は線路の全長に沿って走る架空送電線から供給されます。この電力は、機関車の上部に取り付けられた集電装置であるパンタグラフによって列車に伝達されます。ATD (図1, 左) は、自動張力調整のメカニズムを提供し、接触線の終端点として機能します。接触線は長さが増えるため、張力が必要です。接点線は主に銅系合金で

きており、気温の変動により伸縮しやすくなっています。架空送電線の導体は、非常に特定の張力値で設置されます。この張力は時間とともに変化し、周囲温度に密接に依存します。張力がないと、架空線がたるんだり引き締まったりして、パンタグラフが絡まったり、架空機器(OHE)線が折れたりしてしまいます。

同様に、架空送電線MCは、架空送電線、つまり、カテナリー(1000/1200 kgf張力)、接触(1000/1200 kgf張力)、およびスライトのアセンブリを支持するように設計されており、全体的な曲げ、横方向、および垂直方向の荷重を絶縁体を介してマストに伝達します。(図1, 右) 典型的なカンチレバーは、最大250 km/hの列車速度で通電アセンブリを支持するのに十分軽量で頑丈です。これらの機

「COMSOL®を使用したモジュラーカンチレバーアセンブリの構造最適化により、Raychem はさまざまな設計で4つの特許を取得することができました。」

— RAYCHEM RPG, ISHANT JAIN

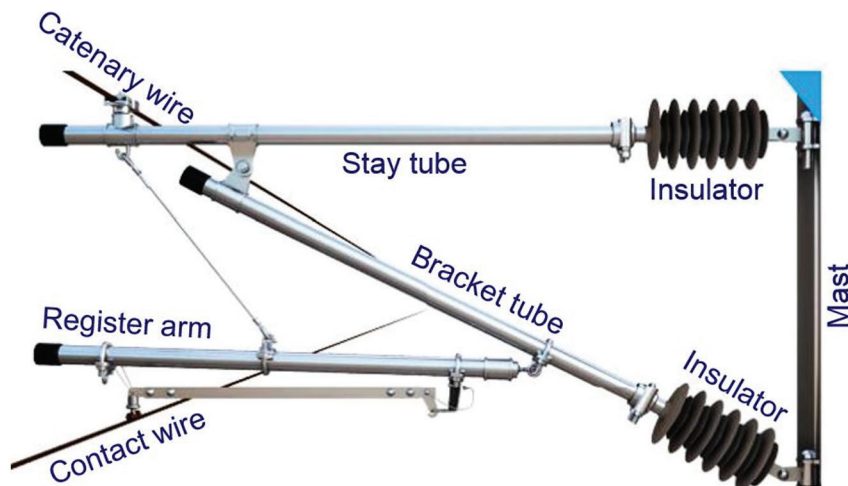


図1 オートテンション装置(左)とモジュラーカンチレバーアセンブリの図(右)。

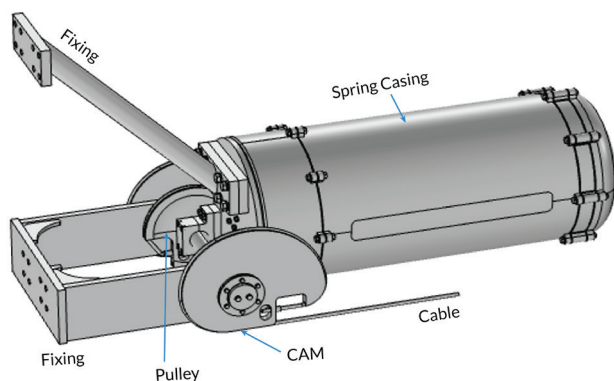


図2 ATDの形状。

能要件に加えて、メンテナンスの容易さ、輸送、取り扱い、および美観も考慮する必要があります。

▶▶ 鉄道部品の設計上の課題

高速での鉄道乗客の安全を確保するために、ATDには厳しい設計要件があります。ATD設計の正確性と効率を実験的に判断するためには、プルアウトテストが実行されます。このようなテストには大規模な実験セットアップが必要ですが、これは常に実行可能なわけではありません。Raychemイノベーションセンター(RIC)で働くRaychem RPGのチームは、サービス、組み立て、およびメンテナンスの容易さを提供しながら、軽量で温度変動に非常に敏感なATD

の設計を任せられました。

さらに、ヨーロッパやアメリカの市場から輸入できるMCはかさばり、多くの補助部品が含まれています。インド政府の「Make in India」イニシアチブの一環として、材料を効率的に使用することで構造的完全性を確保しながら、これらの補助部品を排除する新しい設計を考案することでした。これにより、最終的にコストを節約し、重量を削減できます。

両方の設計目標を達成するために、Raychemチームは、さまざまなアイデアを生成および概念化するために、問題に対する革新的な解決策を考え出すための理論であるTRIZを使用しました。次

に、鉄道の基準に従って最適化と設計検証を行うために、COMSOL Multiphysics® ソフトウェアを利用しました。

▶▶ 軌道に乗る: COMSOL MULTIPHYSICS® による解析の実行

Raychemチームは、COMSOL Multiphysics® とそのアドオンモジュールを使用し、ATDの個々の部品を構造的に最適化すると同時に、マルチボディ解析を実行して、システムレベルの解析のためにこれらの部品の連成運動を研究しました。チームは最初に典型的なアセンブリをインポートし(図2)、次に動的荷重の影響を説明するために適切な境界条件を適用しました。さらに、ばね力の変化とともに外側ケーブルの張力を計算するための研究を行いました。

解析の結果(図3)は、ケーブルの変位と張力を表しています。張力を変えない、というプロジェクトの目的の1つを達成していることがはっきりとわかります。

モジュラーカンチレバーの解析のため、初期モデルがCOMSOL Multiphysics® にインポートされました。カンチレバーモデルを解析しているときに、チームはMCが

かなりかさばり、応力が不均一に分散していることにすぐに気がきました。次に、設計の構造最適化を実行し、多変数最適化を実行しました。ここでは、総ひずみエネルギーの最小化が、総質量基準の最小化とともに目的関数として設定されます。

トポロジー最適化を使用すると、システムの質量は、設計仕様には違反することなく、初期ジオメトリ(図4, 上)と比較して75%削減されました。次に、最適化スタディを使用して3Dモデルを作成し、その後、静的および動的な構造荷重(図4, 下)を適用して、250 km/hで移動する列車の衝撃を再現しました。

▶▶ 前進: 構造解析と最適化がRAYCHEMチームにどのように役立ったか

シミュレーション解析の観察結果を使用して、ATDアセンブリ全体が完全に再設計され、アセンブリサイズが50%縮小された折りたたみ式的设计が組み込まれました。さらに、Jain氏のチームは、金属ばねを、構造力学モジュールとCOMSOL Multiphysics® のアドオンである非線形構造材料モジュールを使用して設計されたポリマーばねに置き換えました。これら全ての設計変更により、アセンブリ全体の重量が80

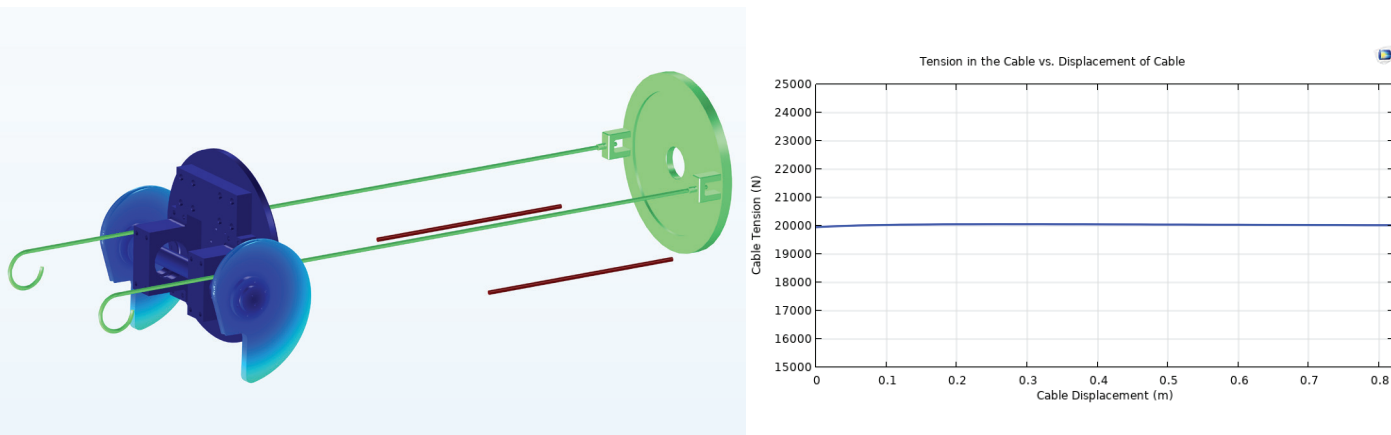


図3 適用荷重でのケーブル変位(左)とケーブルの張力(右).

%減少しました。「ATDで実行した構造解析とマルチボディ解析の助けを借りて、部品数を以前の設計の20からわずか8に減らすことができました」とJain氏は言います。

さらに、COMSOL Multiphysics®のトポロジー最適化の助けを借りて、従来のオーバーヘッドモジュラーカンチレバーを最適化するためのシミュレーションモデルが確立されました。得られたモデルを使用して、簡略化された設計コンセプトを作成し、その後、強度と振動モードの観点から詳細な構造解析を行って、最適化された結果を検証しました。シミュレーションは、部品数を12から5に減らし、重量を約33%削減することで、設計の複雑さを軽減するのに役立ちました。提案された2つの設計のうち、インド鉄道委員会はすでに1つの設計を承認しており、もう1つの設計は承認段階にあります。Jain氏によると、「COMSOL®を使用したモジュラーカンチレバーアセンブリの構造最適化により、Raychem はさまざまな設計で4つの特許を取得することができました。」

2020年6月、Raychem チームは、モジュラーカンチレバーシステムの折りたたみ式設計により、Golden Peacock Innovative Product Award (GPIPSA)、エンジニアリング部門、を受賞しました。

» 今後の展望: RAYCHEMの将来の 計画AT RAYCHEM

今後10年間にインドの鉄道インフラストラクチャーに変更が予想されるため、Raychemイノベーションセンターのチームは現在COMSOL Multiphysics®を使用して、インド鉄道のためのより多くの新しいOHE製品を開発しています。エネルギーユーティリティおよび石油・ガス業界のプロジェクトに加えて、鉄道システムは現在、Raychem RPGがマルチフィジックスシミュレーションの力で革新的なソリューションを提供し続けるもう一つの専門分野です。◎

謝辞

Ishant Jainは、この記事で説明されている調査に協力してくださった次の人物に感謝します。Ganesh Bhoje, Nitin Pandey, Raghav Upasani, and Hamza Saiger.

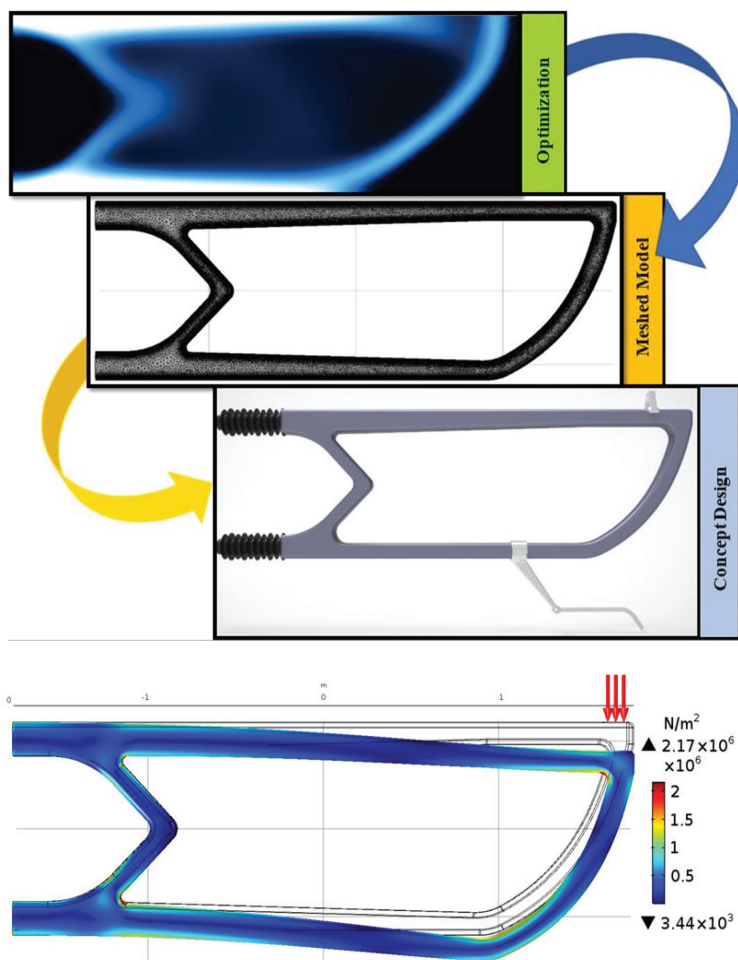


図4 カンチレバー設計最適化(上)と最適モデル(下)における荷重テスト.

Flemish Research Institute for Technology (VITO), Belgium

古典的な化学の質問に答える新しい電池モデルの開発

フランダース技術研究所(VITO /EnergyVille)とKU Leuvenの研究者は、流量が粒子の放電にどのように影響するか、放電プロセス中にセル電圧がどのように変化するかなど、設計上の質問に対する信頼できる回答を見つけるために、半固体流れ電池の疑似3次元モデルを開発しました。

BRIANNE CHRISTOPHER著

プロセス、部品、またはデバイスの開発には、ある程度の試行錯誤が伴います。最初から完璧なものはありません。モデリングアプローチ自体に関しても同じです。例えば、半固体流れ電池(SSFB)のモデリングを考えてみましょう。これは、バナジウムレドックス流れ電池(VRFB)に似ていますが、固体粒子を運ぶ液体電解質を含む革新的なタイプの流れ電池です。最近まで、SSFBに関する文献はまばらでした。

Kudakwashe Chayambuka氏は現在、フランダース技術研究所(VITO /EnergyVille)のエネルギー技術ユニットのGrietus Mulder氏と、VITOの上級科学者であるXochitl Dominguez氏、およびルーベンカトリック大学のJan Fransaer教授によって共同で振興されている博士課程の研究者です。彼はSSFBモデリングの研究におけるこのギャップに対処しました。

SSFB系の初期の研究では、活性粒子内で発生する輸送メカニズムとして拡散と対流を考慮したモデルが使用されていました。何が問題であったか?この仮定は、物理的にも概念的にも間違っています。「これらのモデルは、電荷が流れる粒子の内部に含まれている場合、対流を想定しています」とChayambuka氏は言います。「元のモデルの方程式は維持されず、物理的でもありません」とFransaer氏は言い、モデルを「怪しいものだと述べます。

「私たちは適切なフィジックスをモデル化しようとしてきました」とChayambuka氏は続けます。この場合、「適切な物理学」とは、分子拡散がSSFBの固体活性粒子内で発生する唯一の輸送メカニズムであるという事実を指します。それらのバルク運動は、この分子輸送メカニズムとは関係ありません。チームは、SSFBの動作と周囲の物理を正確に考慮できるSSFBをモデル化する新しい方法を開発しました。

▶▶ 電池の戦い

流れ電池は、発電容量とエネルギー貯蔵容量を分離(および独立してスケールアップ)することができます。では、半固体流れ電池(図1)が特別な理由は何でしょう?「SSFBは非常に興味深く、実現するのが非常に困難です。蓄えることができるエネルギーの量に制限はありません」とFransaer氏は言います。この種類の電池は、体積エネルギー密度が高いため、多くのアプリケーションで有益です。実際、既存のバナジウムレドックス流れ電池(VRFB)の10倍の容量のストレージを提供します。

Wリチウムイオン電池と同じ材料をベースにした場合、SSFBは理論的には最高のエネルギー密度を提供しますが、製造コストが高く、毒性のリスクが高いなど、いくつかの欠点があります。ニッケル水素(NiMH)材料で作られたSSFBには、これらの問題を回避するために水酸化カリウムの水性電解質が含まれ

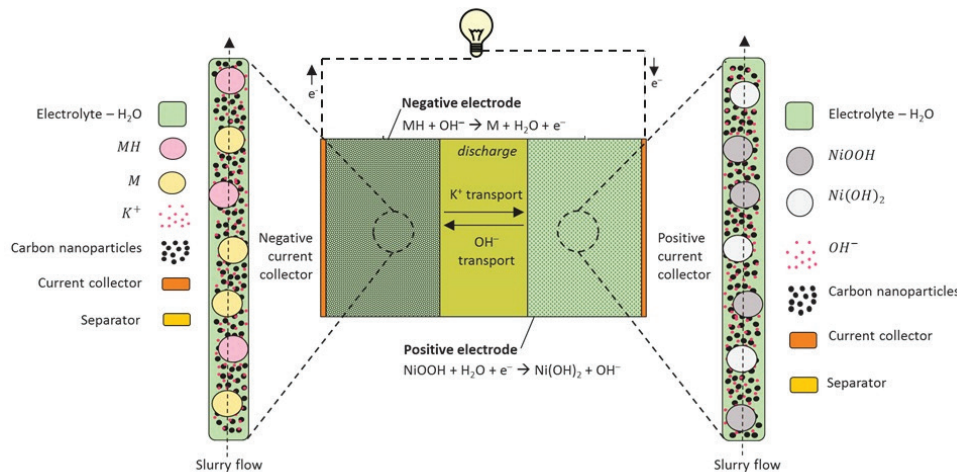


図1 半固体流れ電池の概略図。

マイクロスケールドメイン間の相互作用、および複数の物理プロセスを同時に正しく考慮する必要があります。SSFBは他の電池に比べて非常に複雑な系です。例えば、スラリーには適切な粘度が必要です」とDominguez氏は言います。「何が起きているかを予測するには、それをモデル化する必要があります。実験には時間がかかりすぎ、複雑すぎます。」

グループは、COMSOL Multiphysics® ソフトウェアが彼らの研究が必要とするマルチフィジックスおよびマルチスケール機能を提供することを発見しました。さらに、COMSOL®ソフトウェアで可能な正確で効率的な電気化学的

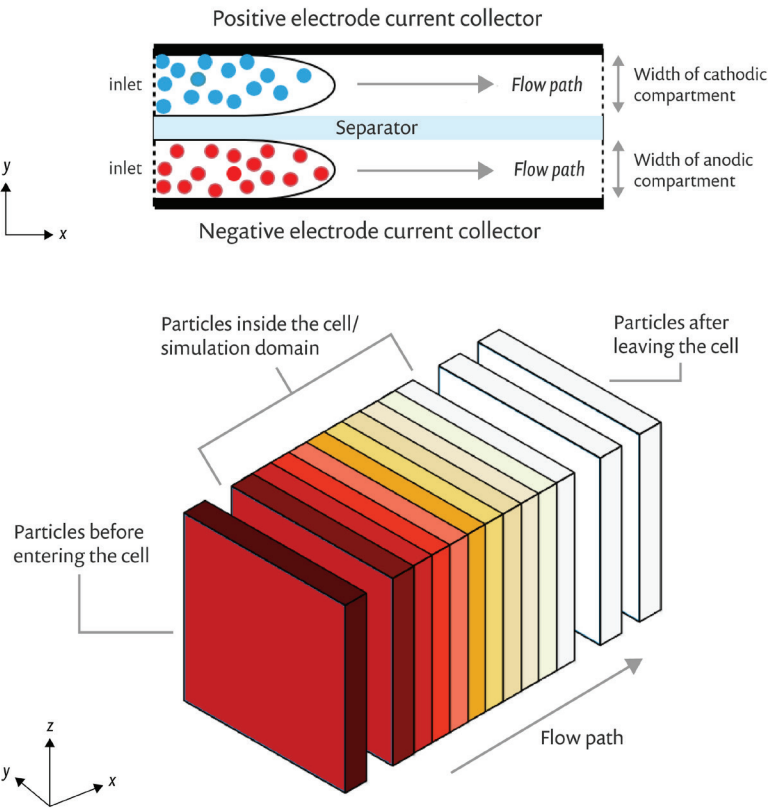


図2 SSFBのP3Dモデル。

ています。

SSFBの種類に関係なく、対処すべき主要な設計上の課題があります。研究者は、設計内で発生する速度論および輸送プロセスを正確に記述する電気化学モデルを必要としています。ここで、研究グ

ループとその斬新なモデリングアプローチが活躍します。

» 電池設計: 現在はP3Dで

研究者たちは、SSFBのモデル化を成功させるには、マクロスケールドメインと

モデリングにより、NiMH SSFB系の最適化とスケールアップが容易になります。「このようなシミュレーションは本当にCOMSOLでのみ可能です」とMulder氏と言います。

マルチフィジックスとマルチスケールモデリングの両方の必要性とは別に、SSFBは別のユニークなモデリングの課題を提示します。電池にはアクティブな粒子が含まれているため、モデルには粒子追跡を含める必要があります。ただし、2つの研究には互換性がないため、流体力学解析を完全な粒子追跡アプローチと組み合わせることができません。研究者たちは、2段階のアプローチでこの問題に取り組みました。最初に、彼らは2Dで非流動SSFB系の電極運動をモデル化しました(図2)。2Dモデルは、電解質の濃縮および希釈溶液理論、固体活性粒子の物質収支、電流収支、反応速度、モデル形状などの最適化されたパラメータを選択できる最初の近似として機能しました。

次に、研究者は2Dモデルを流れるSSFB系の疑似3D(P3D)モデルに拡張しました。「粒子追跡に近く、時間領域で離散化されたフィジックスを含み、停止して求解し、粒子の位置を更新して、適切な結果を生成するモデルを作りたかったのです」とChayambuka氏と言います。「電池の流れ全体をモデル化するには、P3Dジオメトリが必要でした。」そのために、チームは、個別のドメイン内のすべての従属変数と、対応する座標でさまざまなジオメトリで使用できるようにする必要のある関連変数を決定しました。「COMSOL Multiphysicsの押し出しオペレーター機能により、2Dドメインと3Dドメインを簡単にリンクできました」と彼は言います。押し出しカップリング機能により、シミュレーションの全てのタイムステップで別々のジオメトリ間で変数をマッピングすることもできました。

チームは、P3Dモデルを使用して、チームは、非圧縮性ニュートン流体のナビエ・ストークス方程式による電解質の輸送や、

「何が起きているかを予測するには、それをモデル化する必要があります。実験には時間がかかりすぎて複雑すぎます。」

— VITO上級科学者, XOCHITL DOMINGUEZ

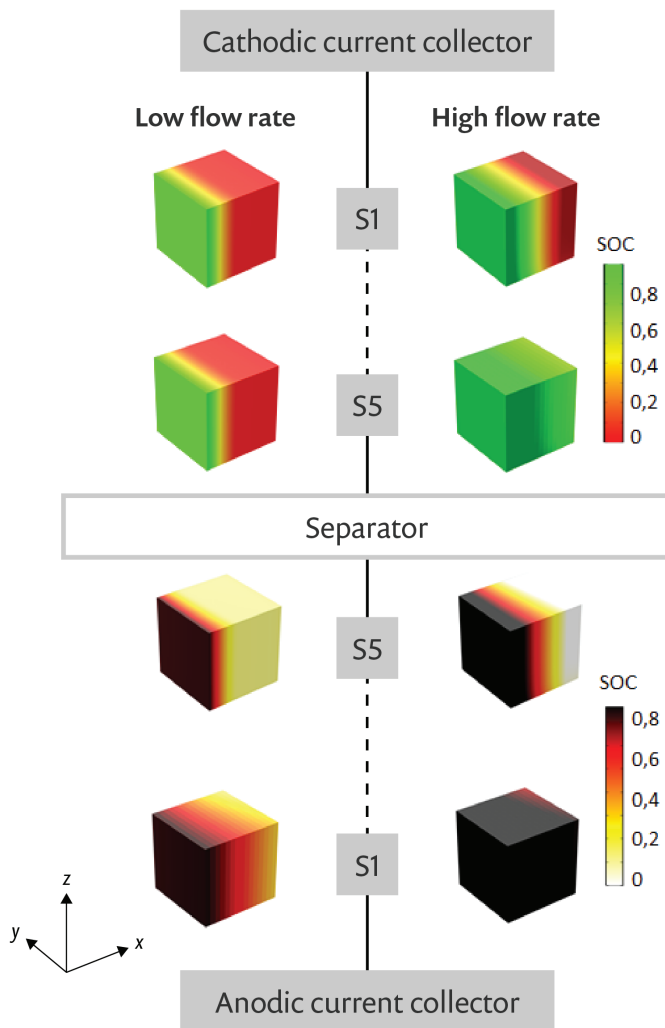


図3 P3D NiMH SSFBモデルにおける低流量と高流量のSOC分布の比較。

純粋な拡散によってモデル化された水素インターカレーションプロセスを含む固相の輸送など、SSFBの流体力学的効果を考慮することができました。チームは、偏微分方程式(PDE)を使用して、アクティブ粒子内の時間依存拡散方程式を解きました。

研究者たちはまた、LiveLink™ for MATLAB® インターフェイス製品が特に役立つことを発見しました。LiveLink™ for MATLAB® をモデリングワークフローに導入する前は、研究者は自動化されたP3Dプロセスを持っていませんでした。つまり、シミュレーションを繰り返し実行し、粒子の位置を変更してから、最初からやり直す必要がありました。このプロセスは、最初にプロジェクトを開始したときには問題ありませんでしたが、

可能な充電の全てが均等に使い果たされているわけではないことを発見しました。実際、各粒子の放電の程度は、その位置によって異なります。P3Dモデルは、電池の流量が粒子の放電にどのように影響するかを研究者に示してくれました。これは、電池セルの動的挙動を分析するための重要な要素です。

チームは、高流量では、セル電圧がほぼ安定していることに気づきました。放電電流が増加すると、初期電圧と定常状態電圧の電圧差が増加します。低流量の場合、初期段階と定常状態段階の間の電圧差がより顕著になります(図3)。流量がセルの動的挙動にどのように影響するかを理解することにより、さまざま

グループはすぐに、必要な結果を見つけるのに長い時間がかかるとに気付きました。また、この方法ではエラーが発生しやすくなりました。後でLiveLink™機能をプロセスに導入したとき、「結果の生成が非常に簡単になり、常にコンピューターの目の前にいる必要はありませんでした」とChayambuka氏は述べています。

▶▶ 流量, 充電状態, およびエネルギー出力

2Dモデルの結果を通じて、研究者はSSFBの利用可能な流量のSSFBを設計し、特定の初期条件のセットの定常状態を予測できます。

プロジェクトの最もエキサイティングな側面の1つは、SSFBの流量動作がモデルで示されるのが初めてであるということです。さらに、実験的なSSFBは、COMSOL Multiphysicsで見られるものと同様の過渡プロファイルを示しており、このタイプの研究に対するP3Dモデルの有効性を示しています。

▶▶ 電池研究の未来を活性化

P3Dモデルを通じて、研究チームはSSFBの動作をモデル化する斬新な方法を示しました。このモデルを使用して、流体力学的現象と電気化学的現象の関係を可視化することができ、さまざまな種類の電池設計を解析する新しい方法を提供することができました。次のステップには、モデル材料への相変化効果の導入、非ニュートン挙動の導入、電解質と同じレオロジー挙動を持つ炭素-水懸濁液を使用した実験によるシミュレートされた流れ場の検証などが含まれます。

▶▶ 電池研究の未来を活性化

「私たちの希望は、このモデルを他のタイプの流れ電池に適用し、他の化学物質をテストすることです。これは興味深い実験になるでしょう」とChayambuka氏は言います。さらに、「この種のモデルは、同じ原理を使用しているため、他の系に外挿することができます」とDominguez氏は言います。彼女は、一例として、粒子ベースの廃水処理システムを挙げます。

グループは、作業を継続することで、SSFBモデルを検証する実験系を実現できることを期待しています。これにより、より多くの関心と資金が生まれ、エネルギー損失と最適化された条件をモデル化するより多くの方法を検討できるようになります。電池設計を改善し、それらがどのように機能するかをよりよく理解することで、電池メーカーがエネルギーを蓄え、電力を生成する方法を改善できます。) (C)

グループは、作業を継続することで、SSFBモデルを検証する実験系を実現できることを期待しています。これにより、より多くの関心と資金が生まれ、エネルギー損失と最適化された条件をモデル化するより多くの方法を検討できるようになります。電池設計を改善し、それらがどのように機能するかをよりよく理解することで、電池メーカーがエネルギーを蓄え、電力を生成する方法を改善できます。) (C)

COMSOL, Massachusetts, USA

仮想EMIおよびEMC試験 環境のシミュレーションの 重要な役割

5G, モノのインターネット, および高速ワイヤレス通信は全て, パフォーマンスが最適化されたマイクロ波およびミリ波デバイスとシステムの展開を必要とします. これらのシステムの動作を保証し, EMIとEMCを回避するために, 設計者はシミュレーションソフトウェアを介して仮想テストプラットフォームを利用できます.

JIYOUN MUNN著

マイクロ波およびミリ波デバイスとシステムを5G, モノのインターネット, および高速ワイヤレス通信内に展開する前に, それらのパフォーマンスを予測することが不可欠です. このニーズにより, シミュレーションソフトウェアを介した仮想テストプラットフォームの需要が高まっています.

このようなシステムに存在する複数のデバイス間の高データレート通信には, 高いキャリアおよびシステムバス周波数が必要です. ただし, 動作周波数の増加は, 特に通信が混雑している場合に, 望ましくない厄介な電磁両立性(EMC)および電磁干渉(EMI)の問題を引き起こす可能性があります. さらに, 他のフィジクスからの影響は, ミリ波デバイスではもはや無視できません. 熱膨張による構造変形などのマルチフィジクス現象も, 設計上で考慮する必要があります. 幸い, テスト構成を実際の環境に複雑に適合させることなく, ささまざまなEMCおよびEMIシナリオを仮想的にエミュレートおよびテストすることができます.

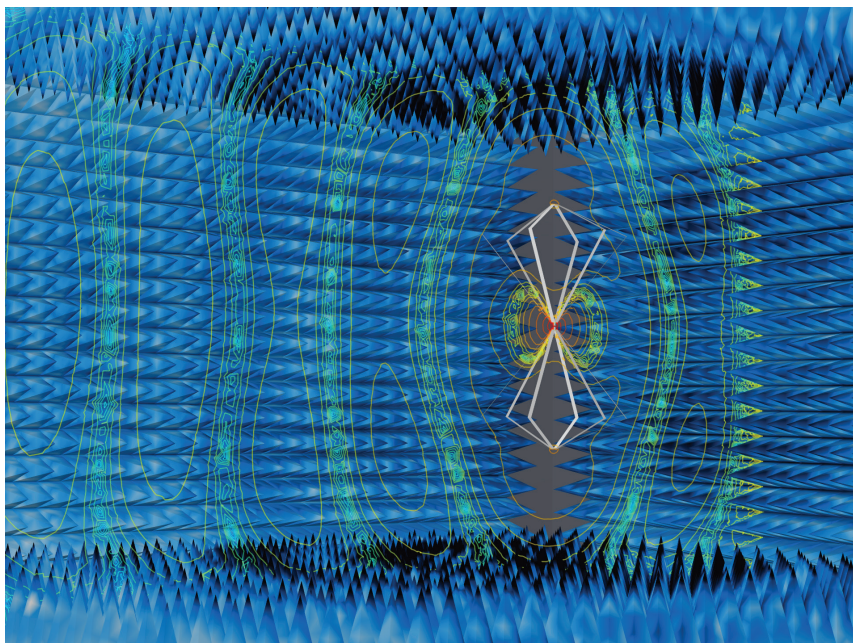


図1 完全無響室におけるバイコニカルアンテナの対数場分布の等高線図.

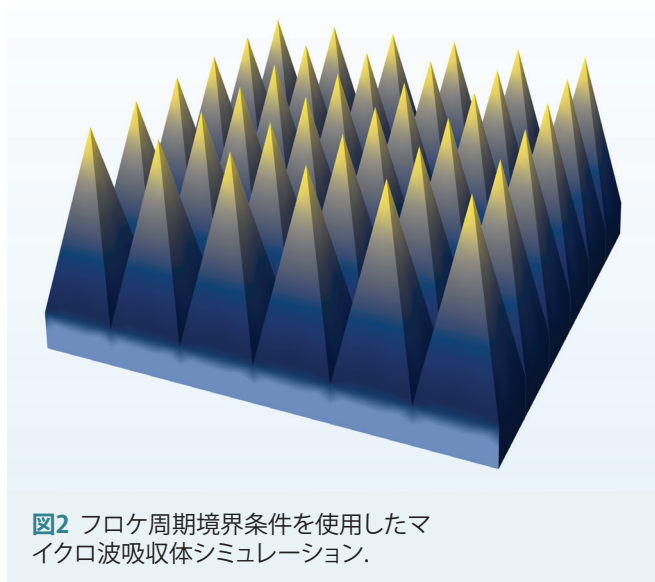


図2 フロケ周期境界条件を使用したマイクロ波吸収体シミュレーション。

できます。

デバイスの機能を評価するために電磁気シミュレーションソフトウェアを使用すると、開発および製造サイクル中の時間とコストが削減されます。仮想評価は、製造、テスト、製造の前に実行でき、信頼性の高い品質管理プロセスの重要な一部です。

シミュレーションの目標は、実証済みの物理方程式を使用して、コンピューター上で現実の世界を可能な限り詳しく説明することです。理想的には、数値モデルを使用して、ラボ環境では実現が難しい多種多様な動作条件を表す複数の物理現象を模倣します。実際の設計と条件を正確に解析するには犠牲が伴います。解析が複雑になるほど、より多くの計算リソースが必要になるということです。したがって、解析から不要な部分を除去し、効率的な計算を確実にするためにシミュレーション設定を構成するべく、工学的判断が使われます。

▶▶ 仮想EMC/EMIテスト

放射デバイスのEMIおよびEMC性能を評価する場合、テストエンジニアは完全に無響室で測定を実行することがよくあります。有

限要素法(FEM)などを使用して、このようなテストを仮想的に再現できる数値環境を設定するために、シミュレーションツールが使用されます。例えば、無響室の壁に取り付けられているピラミッド型の吸収体には、損失のある導電性炭素粒子が含まれています。吸収体は、わずかな不要な反射だけを残し、入射電磁波を徐々に減衰させます。効率を上げるために、吸収体の実物大の壁をモデル化する代わりに、シミュレーションでは周期境界条件を持つ単一のピラミッド型ユニットセルのみを使用します(図2)。これは、反射率が最小であることを確認するために、吸収体の完全なセットの性能を推定する効率的な方法です。モデルが単一の単位セルのみで構成されている場合でも、周期境界条件により、モデルはピラミッド型吸収体の無限配列と同等になります。次に、ユニットセルシミュレーションから得られた効果的な均質材料特性が、無響室の壁全体に使用されます。

無響室の仮想バージョンを検証するために、広帯域バイコニカルアンテナが無響室の内部に配置されます。吸収体の特性評価が不完全なために性能が低下

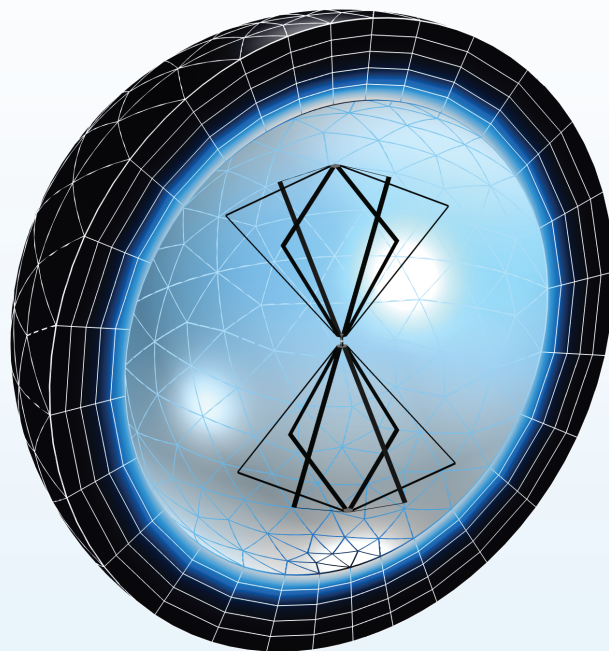


図3 完全整合層(PML)で囲まれたバイコニカルアンテナ。前面のPMLは内部を表示するために表示されていません。

しないことを検証するために、アンテナの性能(例えば、遠方場パターンやSパラメーター)が計算されます。

▶▶ メモリ節約型計算手法

図1で示されているように、シミュレーションでの完全無響室内のアンテナの実際の表現は視覚的に非常に魅力的ですが、その計算コストは不必要に高くなります。シミュレーションは、無響室の壁と同等の数値手法を使用することにより、メモリ使用量の点ではるかに高速かつ効率的に行うことができます。このような手法には、完全整合層(PML)の使用と、境界条件の特徴の吸収が含まれます。近距離場と遠距離場およびその他のアンテナパラメーターを効率的に解析するには、完全整合層で囲まれたはるかに小さい周囲の空気領域に同じバイコニカルアンテナを配置するだけで十分です(図3)。

大規模な系を効率的にシミュ

レートするには、適切な数値境界条件を選択することが重要です。さらに、結果にほとんど影響を与えないと思われる設計の詳細を削除し、関連する部品だけを保持するだけで、効率をさらに向上させることができます。PMLを使用することで、デバイスレベルのモデリングだけでなく、大規模な系をシミュレートできます。

図4では、車の後部フロントガラスにある架空の放射装置から送信された電界を調べて、内部のケーブルハーネスに対する放射効果を確認しています。PMLが上半空間をカバーし、全ての発信波を吸収し、反射波が車に跳ね返らないようにします。一方、地面と車体は、ケーブルハーネスに反射とマルチパスフェージング効果を生じます。

ケーブルに結合された電磁波は、不要な伝導性放射の発生源でもあります。実際の自動車システムでは、EMI/EMCテストのソースとビクティムにアクセスして再

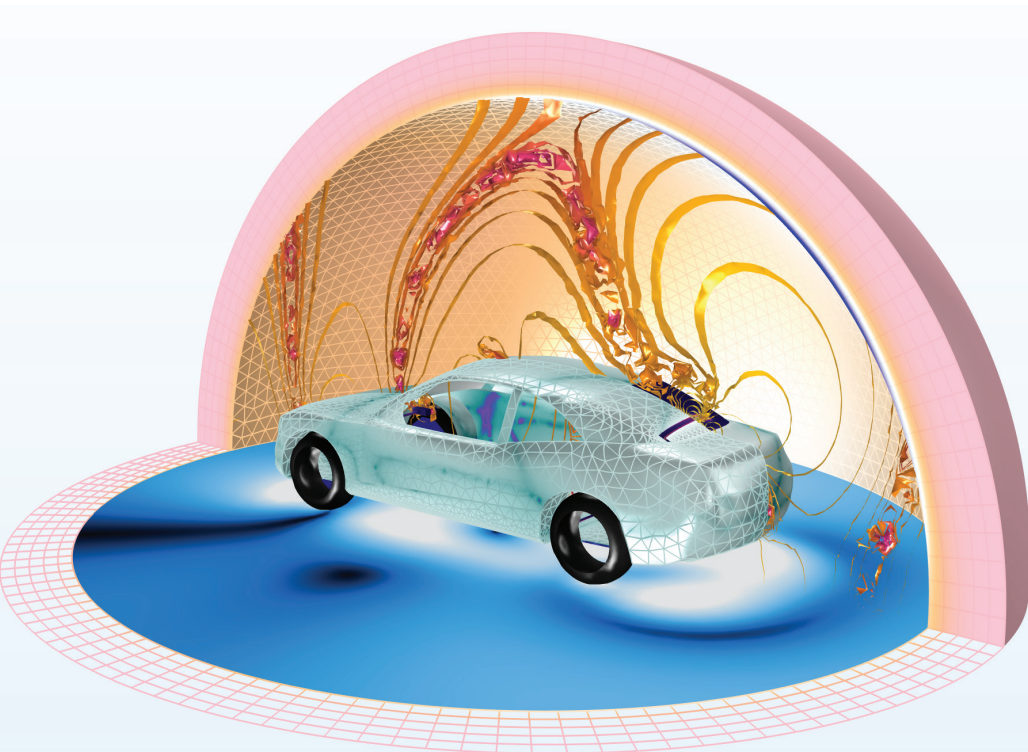


図4 FMラジオ周波数帯域のリアフロントガラスからの放射によるケーブルハーネスへの影響。

配置することは困難です。ただし、シミュレーションを使用することにより、任意の構成を解析することができます。このように、物理的なテストに制限されないことにより、エンジニアはより堅牢なシステム設計を作成できます。

» IOT設計ソリューションの数値計算方法

シミュレーションを使用することで、IoTアプリケーションのデバイスが実際の環境に適用されたときの実際のパフォーマンスを見積もることができます。IoTデバイスは、居間、ガレージ、または家の他のスペースにも配置できます。しかし、いわゆる完全波動法による数値計算では、そのような場合の問題のサイズは、波長と比べて大きな空間であり、対処できる範囲を簡単に超えてしまう可能性があります。完全波動法には、有限要素法(FEM)、有限差分時間領域(FDTD)法、およびモーメント法

(MoM)が含まれます。精度をあまり犠牲にすることなくIoTデバイスのパフォーマンスを概算するために利用できる代替の計算電磁気アプローチがあります。さらに、このような近似法は、限られた計算リソースを使用しながら、有用な結果を生み出すことができます。そのようなアプローチの1つに光線追跡法があります。図5は、光線追跡をFEMと併用した場合のマルチスケールシミュレーション機能を示しています。FEMを使用するシミュレーションの一部は、切り取られた周囲の空気ドメインを含む、ワイヤレスルーターのアンテナを囲む小さなシミュレーションドメインを解析します。光線はアンテナの位置から発射され、その初期強度はアンテナの3D遠方場放射パターンの指向性強度に比例します。メディアルーム内のアンテナカバレッジ(図5)は、長いシミュレーション時間や過度のメモリ使用なしですばやく

概算できます。このマルチスケール電磁気モデリング技術は、大規模なEMIおよびEMC問題に対する従来の計算方法の制限を克服するための優れた代替手段です。

既存の計算手法を組み合わせるだけで、従来の数値解析の限界を克服することができます。このような状況の例では、高周波分解能で広帯域の結果を生成する必要がある場合、または大型デバイスのシグナルインテグリティとタイムドメインリフレクトメトリ(TDR)を解析する必要がある場合などの2つがあります。このようなシミュレーションは非常に時間がかかります。ただし、どちらの場合も、時間領域から周波数領域へ、またはその逆のいずれかで高速フーリエ変換(FFT)を実行することにより、計算パフォーマンスを大幅に向上させることができます。例えば、最初に過渡解析を実行してから、時間-周波数FFTを実行して、周波数領域で広帯域S

パラメーターと遠方場の計算を実行できます。または、最初に周波数掃引を実行してから、時間領域のバンドパスインパルス応答に対して周波数-時間FFTを実行することもできます。これはインピーダンスの不一致や信号品質の低下をもたらす伝送線路の欠陥部分の特定など、時間領域の反射率測定分析に役立ちます。

» 電磁気シミュレーションの組織全体への導入

シミュレーションは、さまざまなテストシナリオに対応する仮想解析プラットフォームを提供します。ただし、電磁気シミュレーションソフトウェアの使用方法を学ぶことは、組織内のすべての人にとって時間の有効的な使い方になるとは限りません。限られたトレーニングとシミュレーションソフトウェアへのアクセスにより、電磁気シミュレーションツールの使用が少数の専門家ユーザーに制限される場合があります。完成した数値EMIおよびEMCテストモデルでは、実際のテスト環境の変動に対応するために、新しい入力パラメーターが必要になることがよくあります。シミュレーショングループの外部で境界条件、メッシュ、およびポスト処理設定を更新する必要があると、開発サイクルで予期しない遅延が発生する可能性があります。

幸いなことに、シミュレーションソフトウェアは、専任のシミュレーションエンジニアではないスペシャリストでも使用できるように進化しました。シミュレーションモデルは、使いやすいアプリに変換できます(図6)。アプリは、単純で特殊なユーザーインターフェース(UI)を備えており、既存のウェブブラウザを介して、またはスタンドアロンの実行可能ファイルとして同僚や顧客に展開できます。このようなスタンドアロンアプリは、追加のソフトウェアライセンス

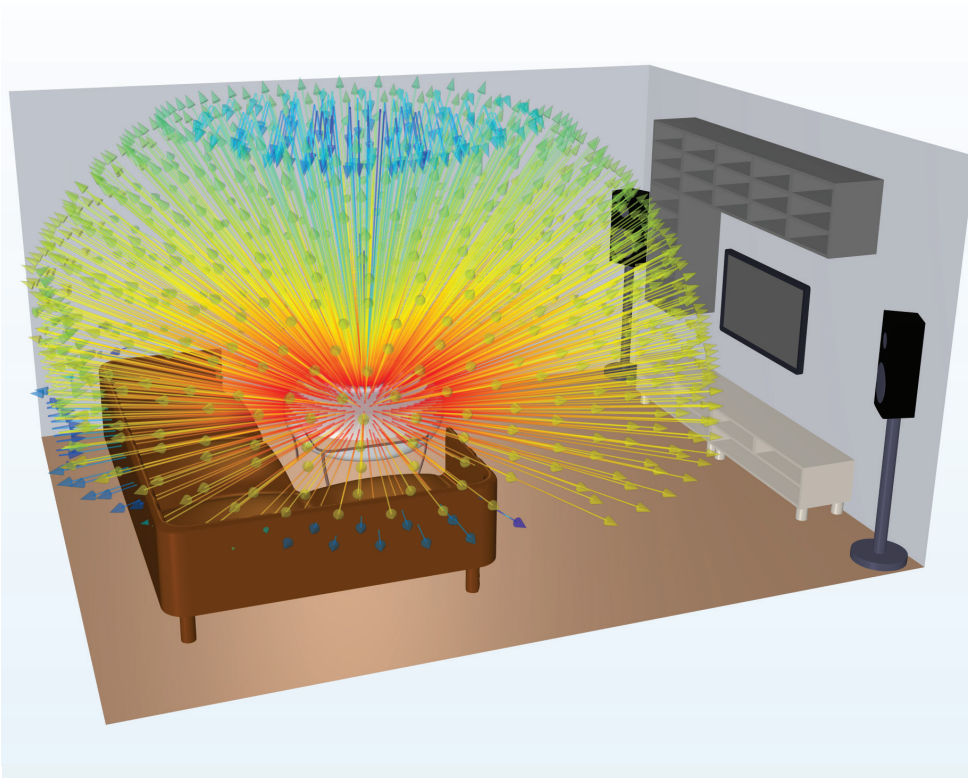


図5 マルチスケール電磁気シミュレーションの例. これは、アンテナ解析のための従来の有限要素法と屋内通信を記述するための光線追跡を組み合わせたものです。

を購入する必要がなく、オペレーティングシステムに関係なく実行できます。EMIテストプロジェクトに携わる多くの人々が、アプリが提供する仮想テストキットに簡単にアクセスして、カーテンの後ろでソフトウェアを使用する方法を学ぶことなく製品を最適化できます。

» 進化する5GおよびIoTの世界のための進化するシミュレーションツール

電磁気学内の複数の数値手法をサポートするさまざまなシミュレーションツールは、エンジニアや研究者がフィルター、カプラー、アンテナ、導波管構造などの従来のデバイスを設計するだけでなく、5G, IoT, およびワイヤレス通信のアプリケーションでEMIおよびEMCの問題をテストするのに役立ちます。従来の電磁気解析は、マルチフィジクスシミュレーションを使用して複数の物理的效果を含めるように拡張できます。また、シミュレーションソフト

ウェア業界は、新しい高速通信技術に対するペースの速い市場の需要に対応し、より多くの人々がシミュレーションから利益を得られるように進化しています。◎

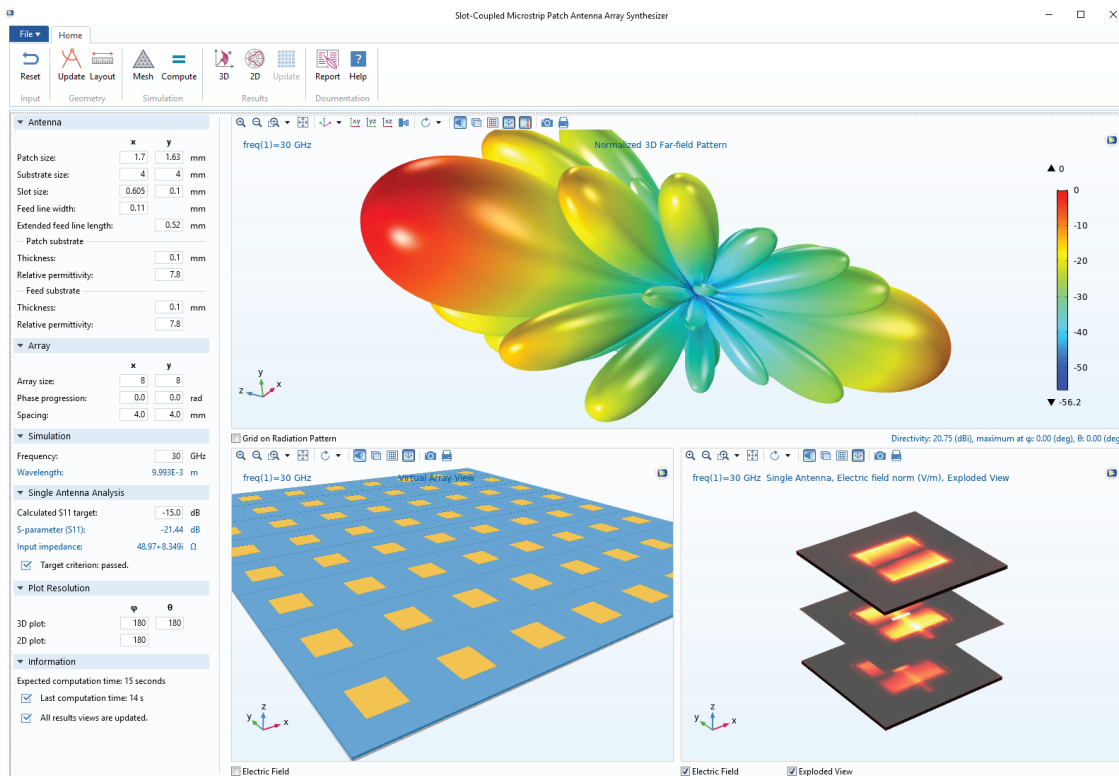


図6 完全波動計算による単一アンテナシミュレーションとアレイファクターを使用してフェーズドアレイアンテナの遠方場パターンをすばやく推定するためのシミュレーションアプリ。

Bluetest, Sweden

高速通信のワイヤレステストシステムとアンテナの最適化

RACHEL KEATLEY 著

ワイヤレステストソリューションのパイオニアである Bluetest は、ワイヤレスデバイスと広帯域アンテナのパフォーマンスを測定するために使用される残響システムを設計しています。彼らはRFシミュレーションを使用して、設計、製造、テスト、検証の開発サイクルを合理化し、その過程で高速無線通信を強化しています。



図1 RTS65として知られる Bluetest の残響テストシステムの1つの例。Bluetest は現在、5つの異なるRTSを市場に出しています。

毎年、消費者は市場に出回っている最新のスマートフォンやワイヤレスデバイスに目がくらんでいます。これらのアップグレードされたガジェットが棚に届く前に、それらを開発するための広範な設計とテストの工程があります。ワイヤレスデバイスの最も重要な一部であるアンテナは、5Gやモノのインターネット(IoT)などの高度なテクノロジーに対応するために、常に更新されています。それらは、より広い帯域幅を持ち、安全規制を満たし、マイクロデザインに適合するのに十分小さくなければなりません。

スウェーデンのイエーテボリに本拠を置く会社である Bluetest は、ワ

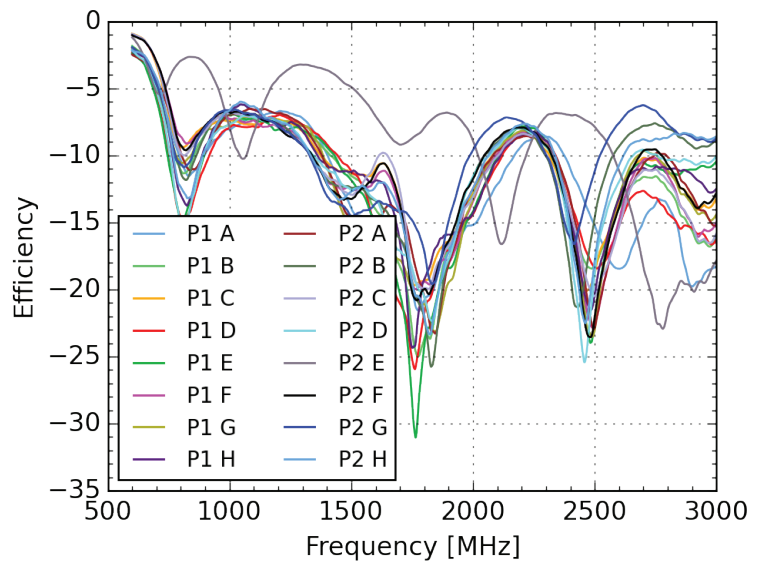
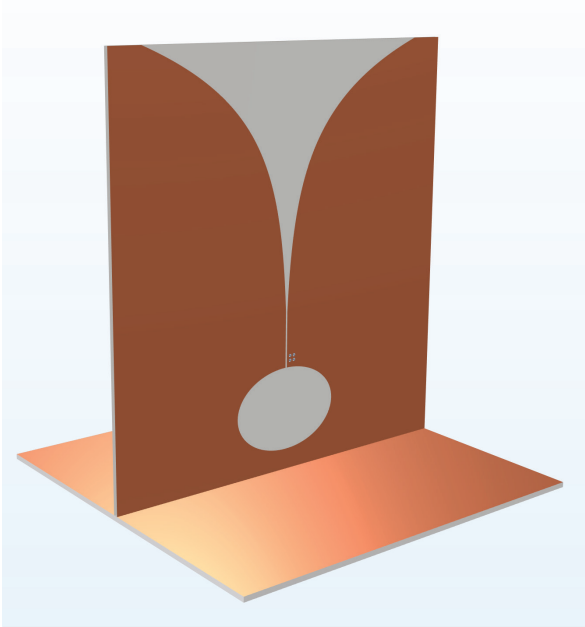


図2 COMSOL Multiphysics®によるBluetestの最初のVivaldiアンテナのプロトタイプ.S1パラメータプロット(右)は3GHzまでのインピーダンス整合特性を示しています。

イヤレス機器を扱うエンジニアを支援するために、ワイヤレスデバイスとアンテナのパフォーマンスを測定する使いやすい残響テストシステム(RTS)を開発しました。現在、Bluetestは、無線、多入力多出力(MIMO)テストのマーケットリーダーです。Bluetestの最高技術責任者(CTO)であるRobert Rehammar氏は、シミュレーションを使用して、BluetestのRTS設計の部品がパフォーマンスに対して最適化されていることを確認します。

▶▶ ワイヤレステストソリューションでのスタートアップから世界規模の発電所まで

1940年代初頭以来、アンテナの性能は無響室やマイクロ波吸収室でテストされてきました。このようなチャンバーでは、アンテナが回転し、その放射強度がさまざまな方向で測定されます。このテスト方法から得られたデータは比較的簡単に解釈できますが、無響室は高価になる傾向があり、サイズが大きいため扱いにくくなっています。1960年代に、別の種のチャンバー(残響室)が開発されました。これ

は、もともと電磁両立性(EMC)テストに使用されていました。無響室とは異なり、残響室は電磁波(または音響的に同等の音)を吸収するのではなく反射します。「この種のチャンバーでは、非常に高い電界強度を生成できます。これは、免疫性をテストするための優れた機能であり、高出力の電磁場が放射されたときのデバイスの感度もテストできます」とRehammar氏は述べています。

1990年代後半、残響室を使用して特定のアンテナパラメータをテストできることがわかりました。例えば、小さなアンテナの最も重要な特性は、その効率、または実際に放射される電力量(通常はdBで測定される)と比較したアンテナに投入する電力間の商です。「残響室でアンテナ効率を測定できることがわかったのです。さらに、小さなアンテナの場合、非常に高速かつ正確に測定できるのです」とRehammar氏は言います。

残響試験システムが普及し始めた頃、スウェーデンのチャルマース工科大学のアンテナシステムの教授であるPer-Simon Kildal氏は、

残響室とそのアンテナ分析能力に関する研究プロジェクトを開始しました。これらのチャンバーを研究した後、Kildal氏は彼の発見に基づいて会社を始めようと考えました。その結果、Bluetestが生まれたのです。数年間、Bluetestは小さな研究スタートアップでしたが、2010年に会社は大幅に成長しました。この頃、MIMOとともに4G、つまり第4世代のモバイルシステム(LTEとも呼ばれます)が導入されました。その結果、「これらのシステムのパフォーマンスをどのようにテストするのか、など、非常に複雑な質問が多数出てきました」とRehammar氏は述べます。

Bluetestにとって幸運なことに、4GおよびMIMOテストに残響チャンバーを使用すると、高速で手頃な価格で正確であるため、非常に効率的であることがわかりました。「現在、実際世界中の全ての携帯電話ベンダーは、アンテナと無線の性能をテストするためにBluetest機器を使用しています」とRehammar氏は言います。

▶▶ アンテナ性能の測定

Bluetestの残響システム(図1)は、パッシブテストとアクティブテストを実行して、デバイスが最適化されているかどうかを判断します。パッシブテストは主にアンテナ効率を測定しますが、アクティブテストはテスト対象デバイス(DUT)の送信機と受信機の合計放射電力と合計平方

「現在、実際世界中の全ての携帯電話ベンダーは、アンテナと無線の性能をテストするためにBluetest機器を使用しています」

— BLUETEST 最高技術責任者, ROBERT REHAMMAR

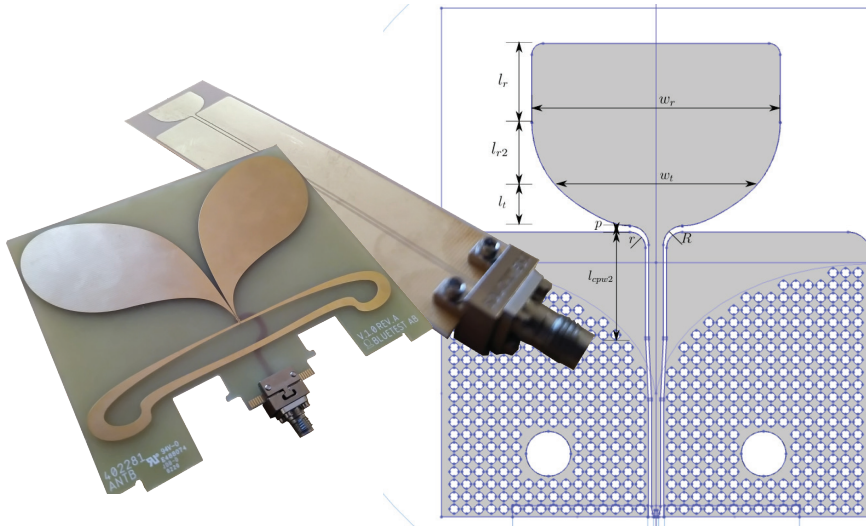


図3 COMSOL Multiphysics® を使用して設計された製造アンテナ。

性感度をそれぞれ測定します。アクティブテスト中、DUTの送信機と受信機の電源はオンになります。アクティブテストは、DUTが全体としてどのように機能するかについての概要を示すのに役立ちます。どちらのテストも、携帯電話などのデバイスが規制や顧客の要件を満たしていることを確認してくれます。

Bluetestの残響テストシステムと製品は全て、ヨーテボリの本社で設計および製造されています。RTSには、反射材で作られた壁、基準アンテナ、異なる偏波の4~16個の測定アンテナ、モードスターラー、RFインターフェースなど、さまざまな部品が含まれています。

製造工程が完了すると、システムは大きな木製箱に梱包され、世界中の顧客に送られます。「残響テストシステムの優れた点の1つは、コンピューターや測定機器と比較すると非常に大きいにもかかわらず、無線テストシステムにしては非常に小さいことです」とRehammar氏は述べています。

技術の進歩について

Bluetestは、中心周波数が従来のマイクロ波アプリケーションよりも1桁高い、5Gミリ波帯域を含むミリ波アプリケーションの残響テストシステムで使用する新しい技術を設計中です。高速通信は、高い搬送周波数によって提供される広い帯域幅に依存しています。広帯域アプリケーションで最も人気のあるアンテナ設計の1つは、Vivaldiアンテナ(テーパースロットアンテナ)です。「アンテナに関しては、650MHz付

近から40GHzを超える低セルラー帯域まで、あらゆるものをテストできる必要があります」とRehammar氏は述べています。

ミリ波デバイス設計の波長はマイクロ波波長よりもはるかに小さく、熱構造効果または製造公差誤差による小さな物理的歪みは、性能に望ましくない影響を及ぼします。したがって、シミュレーションを使用してそのようなデバイスのパフォーマンスを検証することが重要です。Bluetestは、COMSOL Multiphysics®ソフトウェアとアドオンRFモジュールを使用して、Vivaldiアンテナを含むアンテナと回路設計を最適化しました。

Vivaldiアンテナ設計の最初のプロトタイプは、厚さ1.6 mmのFR4基板(ガラス繊維織物とエポキシ樹脂で構成された複合材料)でモデル化されました。このアンテナを最初にシミュレートしたときにRehammar氏と彼のチームは、低周波数で動作しているときの取り付け、サイズ、安定性、および効率に関連するいくつかの問題があることを確認できました。これらの発見のおかげで、彼らはベジェ曲線をモデルに実装することにより、改良されたVivaldiアンテナをシミュレートすることに成功しました(図2)。

Bluetestはまた、6~67 GHzで動作する超広帯域用の広帯域モノポールアンテナの効率をシミュレート、設計、およびテストしました。このタイプのアンテナは、5G測定用の残響テストシステムで使用されています。また、標準のテストアンテナを切り替えることなく測

「設計構築の初期段階ではシミュレーションが必要です。また、物理デバイスが正しく機能していることを確認するには、測定を行う必要があります」

— ROBERT REHAMMAR, BLUETEST
最高技術責任者

定中に使用できるため、システムの汎用性を高めるのにも役立ちます。

シミュレーションの使用はアンテナ設計以外でも役立ちます。残響室の性能を向上させるために、Bluetestは、カスタマイズされたキャビティの共振固有モードを解析しただけでなく、RFモジュールを使用して回路から導波管への遷移も開発しました。

技術の進歩について

Rehammar氏は、Bluetestでは、シミュレーション技術と測定技術が互いに完全に補完し合うと考えています。「設計構築の初期段階ではシミュレーションが必要です。また、物理デバイスが正しく機能していることを確認するには、測定を行う必要があります」とRehammar氏は言います。Bluetestのシステムは、特に携帯電話開発業界内で、ワイヤレス技術の進歩に対応するために一貫して更新されています。「5G以前は、モバイルシステムは最大約2.6 GHzで動作していましたが、現在は最大40GHzで動作できる5Gシステムがあります」とRehammar氏は述べています。この進歩する分野の軌道に乗るために、Bluetestは可能な限り多くの周波数帯域のサポートに取り組んできました。シミュレーションの助けを借りて、Bluetestは、テストの複雑さを高レベルに保ちながら、RTSテスト時間と測定精度の向上に集中できます。

ワイヤレステクノロジーの将来については、Rehammar氏はBluetestがインターネットアクセスのない世界の一部にそれを提供する手助けができることを望んでいます。Rehammar氏は次のように述べています。「世界にはまだ安定したインターネットアクセスがない人が何十億人もいます。今後10年以内に、私たちがこれを変える手助けができることを本当に望んでいます。」◎

Radiotelevisione Italiana (RAI), Italy

シミュレーションによるテレビスポーツイベントのモバイル録画用アンテナのプロトタイピング

DIXITA PATEL 著

Radiotelevisione Italiana (RAI)の研究者は、マルチフィジックスシミュレーションの助けを借りて、スポーツの生中継を記録するための新しい円偏波アンテナを設計および最適化しています。

イタリア(およびその近隣諸国)では毎年、何十万人ものファンが最も有名なサイクリングイベントの1つであるジロデイタリア(イタリアツアーとも呼ばれる)を取り囲んでいます。この多段階の自転車レースは、ツールドフランスとブエルタアエスパーニャを含む、世界の3つの壮大なサイクリングツアーの1つです。イタリアの全国公共放送協会であるRAIのおかげで、レースのファンに加えて、何百万人もの視聴者が自宅から参加することができます。

移動中のスポーツの生中継を記録することは、何十年もRAIの伝統的な活動でした。そのために、通常8台のバイクには、ラジオカメラ、コメンテーター用のオーディオラジオリンク、地理的位置特定手段など、さまざまな設備が備わっています(図1)。生放送のテレビを放送配信に伝達するには、2機の記録ヘリコプターと2機の航空機が信号をリモートの中継(OB)バンに中継するなどの複雑なインフラストラクチャーが必要です。この枠組みの中で、研究・技術革新・実験センター(RAI-CRITS)は、このテレビ制作セグメントで技術サポートを提供してきました。



図1 ジロデイタリア(イタリアツアーのサイクリングイベント)に使用されるオートバイ。

最近、バイクからヘリコプターへの解説無線リンクに関する問題が、特定の解析を必要としました。RAIの研究者であるAssunta De Vita氏、Alessandro Lucco Castello氏、およびBruno Sacco氏は、問題を特定し、薄型の円偏波(CP)アンテナの設計に基づいた解決策を提案しました。提案された放射システムは、COMSOL Multiphysics® ソフトウェアでモデル化およびシミュレーションされています。結果は、実験室での測定とフィールドテストによってプロトタイプで確認されています。

▶ ライブスポーツイベントのテレビ撮影:デジタルへの移行

近年、移動中のスポーツの生中継の記録は徐々にデジタル化されています。RAIにとって、ジロ・デ・イタリアの撮影に関しては、レース期間中、解説を効果的に調整することが重要です。ライブイベント中、オートバイには、レーサーと一緒にライブ撮影するコメンテーター用のビデオカメラとオーディオラジオが装備されています。レースの上空では、3機のヘリコプターと1機の飛行機が飛んでいます。2つはビデオ撮影用で、もう1つは「ブリッジ」として機能し、

バイクから受信した信号をフィニッシュラインのOBバンに中継します。そこで、技術者はバイク、ヘリコプター、スチルカメラ、モバイルイン

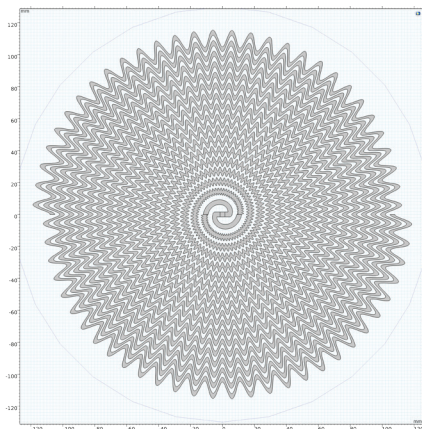


図2 UHF CP 蛇行スパイラルアンテナのワークプレーン。

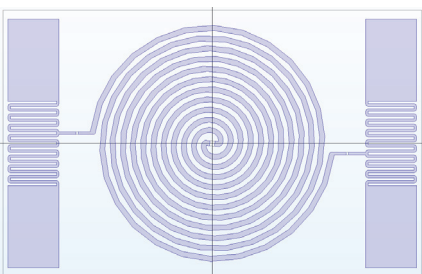


図4 2アームアルキメデススパイラル構造と誘導ダイポールによるデュアルバンド VHF/ UHF CP アンテナ。

タビューチームのカメラ、および解説からの信号を混合します。

場合によっては、チームは散発的な信号の中断などの問題に遭遇します。「バイクとヘリコプターの間無線リンクの切断を経験したことがあります。私たちの調査では、偏波のずれの問題が特定されました。これは、航空機搭載無線アプリケーションの既知の側面です」とSacco氏は述べています。通信リンクを改善するために、RAIは、円偏波(CP)に基づいてアンテナを設計し、任意の相互方向からの正しい受信を可能にすることで解決しました。

この新しいアンテナ設計は、デュアルバンド、超短波/極超短波(VHF/UHF)構成で動作できるようにする必要がありました。アンテナはまた、バイクのトップケースに入れるのに十分コンパクトである必要がありました。ただし、トップケースで利用できる限られたスペース(約40 cm x 20 cm)は、多少大きな寸法を必要とするVHF操作と競合していました。これらの厳しい要件により、研究者は、インピーダンス整合、実現ゲ

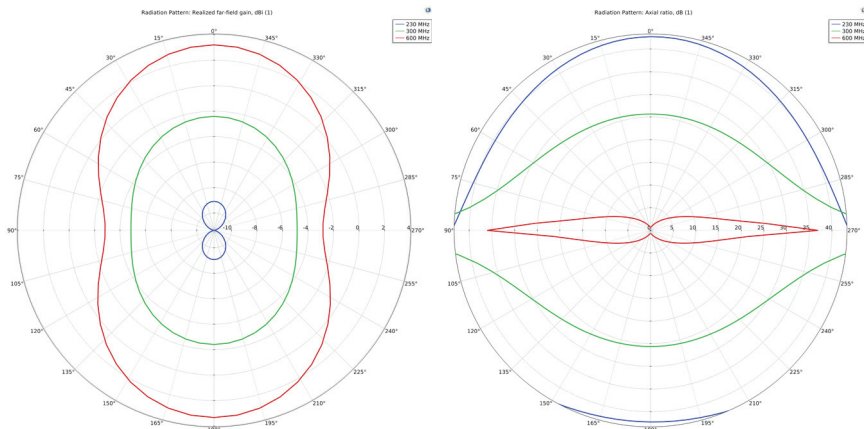


図3 アンテナゲインを示す放射パターンプロット(左)と軸比(右)。

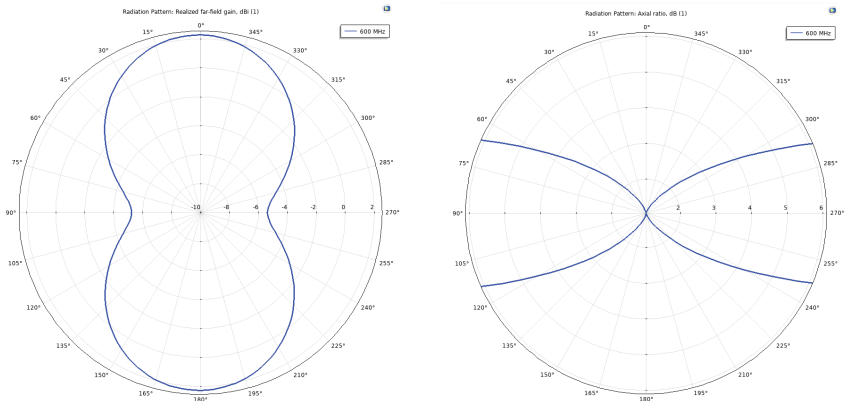


図5 600 MHzにおけるアンテナゲインを示す放射パターンプロット(左)と軸比(右)。

イン、および軸比の観点から、対象の周波数帯域で多くのアンテナ設計をモデル化およびテストしました。

数値モデリングによるコンパクトアンテナソリューションのプロトタイプピング

必要な要件を満たすコンパクトなアンテナソリューションを設計するために、研究者は、RFおよび最適化モジュールとともにCOMSOL Multiphysics® を使用してさまざまなアンテナプロトタイプを実装しました。彼らは、アルキメデスのスパイラルCPアンテナやデュアルクロス、ダブルフォールドダイポール(DCDFD)アンテナなど、対象の周波数範囲で最高のパフォーマンスが得られるようにいくつかの構成をテストしました。リフレクターの導入によるゲインの向上と帯域幅および偏光純度への影響も研究しました。

最初の試みは、従来の2アームアルキメデス

スパイラル構造に基づく円偏波アンテナ設計でした。スパイラルアンテナのみをシミュレートした後、結果は500~600 MHzのUHF帯域で良好なCPパフォーマンスを示しましたが、サイズ制限のために230 MHzでは同じような結果は見られませんでした。「アンテナは両方の帯域で同時に動作する必要がありました。UHFではうまく機能しましたが、VHF帯域で適切に機能するには、サイズが限られているため大変難しかったです」とSacco氏は述べています。受信機に向けて伝達されるRFエネルギーを最大化するには、多くの場合、導電性平面反射器の採用が望まれます。アンテナ性能に対する幾何学的および電気的パラメータの影響を推定するために、パラメトリックスイープ機能が使用されました。特に、遠方場放射パターンと軸比に対する反射器距離の影響を解析しました。予想通り、リフレクターは



図6 実際のシステム環境であるバイクのトップケースへの展開

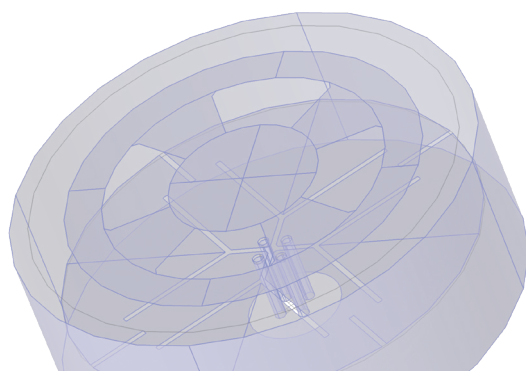


図7 DCDFD円偏波UHFアンテナのジオメトリ。

アンテナゲインを改善しますが、軸比を悪化させ(図3)、さらに最適化する必要を作ってしまいます。

図2で示しているように、半径方向の摂動を伴う2アームのアルキメデススパイラル周辺の蛇行線を使用して、全体のサイズを大きくすることなく、動作周波数範囲を下方に拡張しようと試みました。このために、COMSOL®ソフトウェア内でスパイラル形状をパラメータ化しました。「ジオメトリが複雑なため、パラメトリックカーブ機能を採用しました」とDeVita氏は言います。この場合、シミュレーションでは、使用可能な最小周波数が実際にはVHF帯域に向かって拡張されていることが示されましたが、230 MHzの目標は、使用可能なアンテナ直径内でまだ完全には達成されていませんでした。

次の試みは、230 MHzの目的のVHFに調整された2つの誘導性負荷ダイポール(図4)のフラットスパイラルへの追加でした。著者らは、複数回の反復により、230 MHz帯域と低UHF帯域の両方で、アンテナゲインと軸比(図5)のVHF帯域でこの新しいモデルの設計パラメータを最適化しました。「軸比機能は、円偏光の品質を評価するための優れたツールです」とSacco氏は述べます。

プロトタイプアンテナは、非常に近接場のスキャナーEMscan RFX2を使用して実験室で測定されました(図6)。シミュレートされた遠方場アンテナの性能は、このような実験室での測定とフィールドテストによって確認されています。

2番目のフェーズでは、動作周波数が再割り当てされ、VHF要件が削除されたため、新しい周波数(UHF、500および600 MHz)の別の設計セッションが開始されました。「アンテナの解

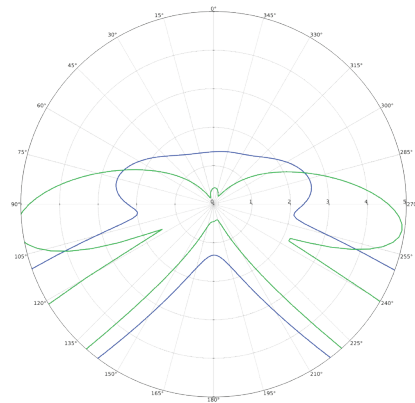
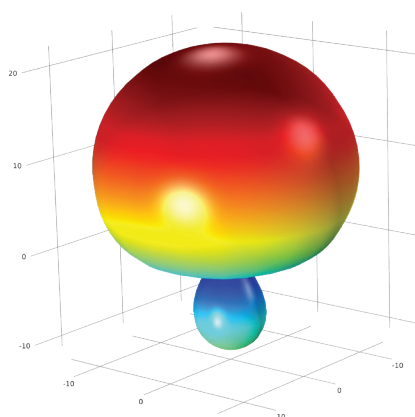


図8 500MHzと600MHzでのDCDFD CP UHFアンテナの実現ゲイン(左)と軸比(右)の3Dプロット。

析を続け、4相給電ネットワークが必要な、もう少し複雑な別の種類のプロトタイプを作成しました」とSacco氏は述べています。

新しい設計は、デュアルクロス、ダブルフォルドダイポール(DCDFD)アンテナでした(図7)。このアプローチは、反射空洞の存在下で正しいインピーダンスを実現します。シミュレーション解析では、良好な軸比、アンテナゲイン、およびインピーダンス整合が見られました。(図8)。現在、帯域幅パフォーマンスの最適化と4相給電ネットワークの設計を評価するためのさらなるテストが進行中です。

▶ モバイルテレビの未来

今後の研究として、RAIは、スマートフォン、タブレット、その他のモバイルデバイス向けのモバイルTVサービスを受信できるアンテナを研究するプロジェクトを進行中です。「モバイルデバイスにTVサービスを提供するチャンスがありますが、このサービスを可能にするためには

多くの問題を解決する必要があります」とDeVita氏は述べています。実際、UHF帯域の下部にあるモバイル端末へアンテナが統合された場合、アンテナ設計者にとって大きな課題となります。これは、モバイルデバイスの限られた寸法が達成可能な帯域幅の上限を物理的に設定し、期待されるパフォーマンスに基本的な制限をかけてしまうからです。

また、モバイル機器の場合、アンテナの動作も人間の手に持ったときに影響を受けるため、RAIの研究者にとっては克服すべき問題です。「この次の作業は、移動中の撮影をいくらか補完します。撮影はプロのアプリケーションであるため、アンテナが可能な限り良好で信頼できるものであることを確認する必要があります」とSacco氏は言います。

RAIによると、シミュレーション結果は非常に有望であり、研究をさらに改善し続けるのに役立つと思われます。◎

COMSOL, Massachusetts, USA

レンズ解析の範囲と深さを拡張する完全波動シミュレーション

YOSUKE MIZUYAMA 著

光学レンズは携帯電話やラップトップに搭載されており、デバイス、食品包装の日付を刻印する装置や、車のドア枠を形成する装置に使用されています。シミュレーションを使用して光学レンズを解析および最適化することにより、設計者は必要なプロトタイプの数減らし、より良いレンズ実験を実施するための貴重な洞察を得ることができます。



携帯電話やノートパソコンなどに見られる光学レンズに加えて、私たちは毎日光学レンズで処理される物に囲まれています。例えば、携帯電話やコンピューターなどのハードウェアデバイスに見られるロゴやその他のグラフィックスの多くは、レーザーで刻まれているか、高出力レーザーで切り取られています。この場合、レーザービームは多くのレンズを通過します。食品パッケージの日付のマーキング、医療機器のマーキング、および車のドアに見られるいわゆるドア枠のステッカーにも同じことが当てはまります。その結果、私たちは知らず知らずのうちに、レンズシミュレーションから間接的に大きく助けられています。

このようなレンズ(図1)が実際に使用される前に、通常、多くのコンピューターシミュレーションが実行されます。

図1 光学レンズ。Bill Ebbesen氏による画像で、ウィキメディアコモンズ経由でCC BY-SA3.0によりライセンスされています。

シミュレーションはテストに取って代わるものではありませんが、必要なプロトタイプの数減らすのに役立ち、より良い実験を行うための貴重な洞察を提供してくれます。レンズのシミュレーションには、従来のレンズ設計方法から完全なマクスウェル方程式系を解くシミュレーションまで、さまざまな方法が利用できます。しかし、どの方法を使用してレンズシミュレーションを実行するかを何をもって決定すればよいのでしょうか？

▶▶ 設計と解析

この記事の目的上、レンズシミュレーションは設計と解析の2つのカテゴリに分類できます。ここでの設計とは、特定のアプリケーション向けにレンズを最適化することを意味しますが、解析とは、レンズ系で何が起きているのかをより深く理解することを指します。

レンズ設計では、希望する方法でビームを照射できるように、レンズの最適な形状を見つけようとします。別の言い方をすれば、レンズがビームを適切に集束または発散しているか確認するという事です。レンズ設計の目標は通常、光学収差を最小限に抑えることです。シミュレーションを使用することで、最適なレンズ設計を実現できます。これは、光学シミュレーションの標準的なやり方です。この目的のために、シミュレーションは通常、計算効率の理由から光線追跡法によって実行されます。

光線追跡シミュレーションでは、電磁波は光線で近似されます。このアプローチの欠点は、回折効果が含まれていないことです。ただし、多くの場合、回折効果を理解することはレンズ設計において重要ではありません。回折効果が重要な場合は、コンピューターでシミュレーションをデジタル形式に適合させるために必要な数値近似以外の特有の近似を行わずに、完全なマクスウェル方程式系を解く波動光学法が使用されます。レンズシミュレーションに光線追跡ではなく波動光学を使用するのは設計と解析のどちらの場合でしょうか？実は両方で役に立つのです。

レンズ設計において、レンズの重要な特徴の1つはスポットサイズです。光線追跡は集束ビームをシミュレートすることはできません。それはスポットの形成自体が回折効果の結果であるためです。回折の詳細なシミュレーションには完全波動光学シミュレーション

が必要です。これに対処するために、光線追跡ソフトウェアにはフーリエ変換やホイヘンスの定理やフレネル回折に基づく方法など、いくつかの波動光学シミュレーションツールが付属していることがよくあります。これらの3つの方法は、まとめて物理光学と呼ばれることもあります。使用される式は近似理論から導き出され、通常、スカラー電磁界解を見つけてみます。これは、多くの場合、ビームサイズを設計するのに十分です。

レンズ解析では、物理光学だけで十分な場合がありますが、電磁界の完全なベクトル表現を取得するには、より厳密な理論、具体的にはマクスウェル方程式系が必要になる場合があります。この方法論は、完全波動法と呼ばれることもあります。物理光学法は高開口数レンズの解析には適用できないため、高開口数レンズを正確に解析するには完全波動アプローチが必要です。

偏光が重要な場合、または材料に異方性がある場合は、スカラー近似の代わりに完全波動解析が必要となります。レンズ自体がこのような複雑な特性を持っていることは稀ですが、解析対象の系が単一のレンズのみで構成されていることも稀です。通常、他のいくつかの光学部品が関係しています。もしそうなら、可能であれば、レンズだけでなく、レンズと一緒に周囲の光学系も完全波動法でシミュレートするのが最善かもしれません。歴史的に、完全波動法は非常に計算量が多いこともあり、実際にそうすることは不可能でした。

▶▶ 物理光学と完全波動光学

物理光学と完全波動シミュレーションの間には、2つの根本的な違いがあります。

物理光学の場合、ある平面で場がわかれば、別のどここの平面でも場を計算することができます。つまり、2つの平面間の空間が均一である限り、2つの平面間の情報は必要ないということです。したがって、計算領域に体積メッシュは必要ありません。

一方、完全波動アプローチでは、ドメイン全体でマクスウェル方程式系を解く必要があります。この目的に使用できる非常に強力な数値解法は、ドメインをメッシュ化し、単純な形状の小さな要素に細分化する有限要素法です。メッシュ要素の最大サイズは、ナイキスト基準を満たすために波長の数分の一に制限されます。波長が短いほど、有限要素メッシュ要素のサイ

ズは小さくなります。要素サイズが小さいということは、必要な有限要素の数が多いことを意味し、それに伴い、計算時間とメモリの観点から計算リソースが増えます。

物理光学法は通常、反射を無視して、透過波だけを見つけます。これが物理光学式の導出方法です。これと比較して完全波動法は、反射がある場合はそれを自動的に含む解を見つけます。シミュレーションモデルに材料界面がある場合、マクスウェル方程式系は反射波のない透過波だけの解を出すことはありません。それが正しい解ではないからです。正しい解は、透過波と材料界面から反射した反射波とのコヒーレントな結合波です。

▶▶ 完全波動法によるレンズシミュレーション

完全波動法を用いたレンズシミュレーションが難しい理由は3つあります。

完全波動アプローチにはメッシュが必要であり、メッシュサイズは波を分解する必要があることを考えると、完全波動法でレンズをシミュレートすることがいかに難しいかをすぐに理解できます。例えば、レンズのサイズと焦点距離がミリメートルスケールの範囲である場合、ドメインサイズは波長の1000倍になる可能性があります。そうすると、メッシュ要素の数は数十億になり、通常のコンピューターでは処理できなくなります。

2番目の理由は屈折率です。通常、光学部品の屈折率は1より高くなります。例えば、1.5だとしましょう。すると、光学部品中の波長は真空中の波長の1/1.5倍になり、真空中の波長よりも短くなります。これにより、メッシュ要素の数が更に増加し、それによって計算負荷がさらに増加します。

3番目の理由は干渉です。全ての光学部品には、フレネル反射が発生する材料界面があります。法線入射のビームの場合、屈折率1.5の材料表面から4%の反射があります。

この反射により、入射ビームとの干渉が発生し、波長の半分の周期性を持つ干渉縞が発生します。メッシュは波長の1/2倍を分解する必要があります。屈折率効果と組み合わせると、屈折率が1.5の場合、波長の1/3倍を分解する必要があります。つまり、レンズシミュレーションの状況は、すでに困難な自由空間でのシミュレーションよりも3倍悪いということです。

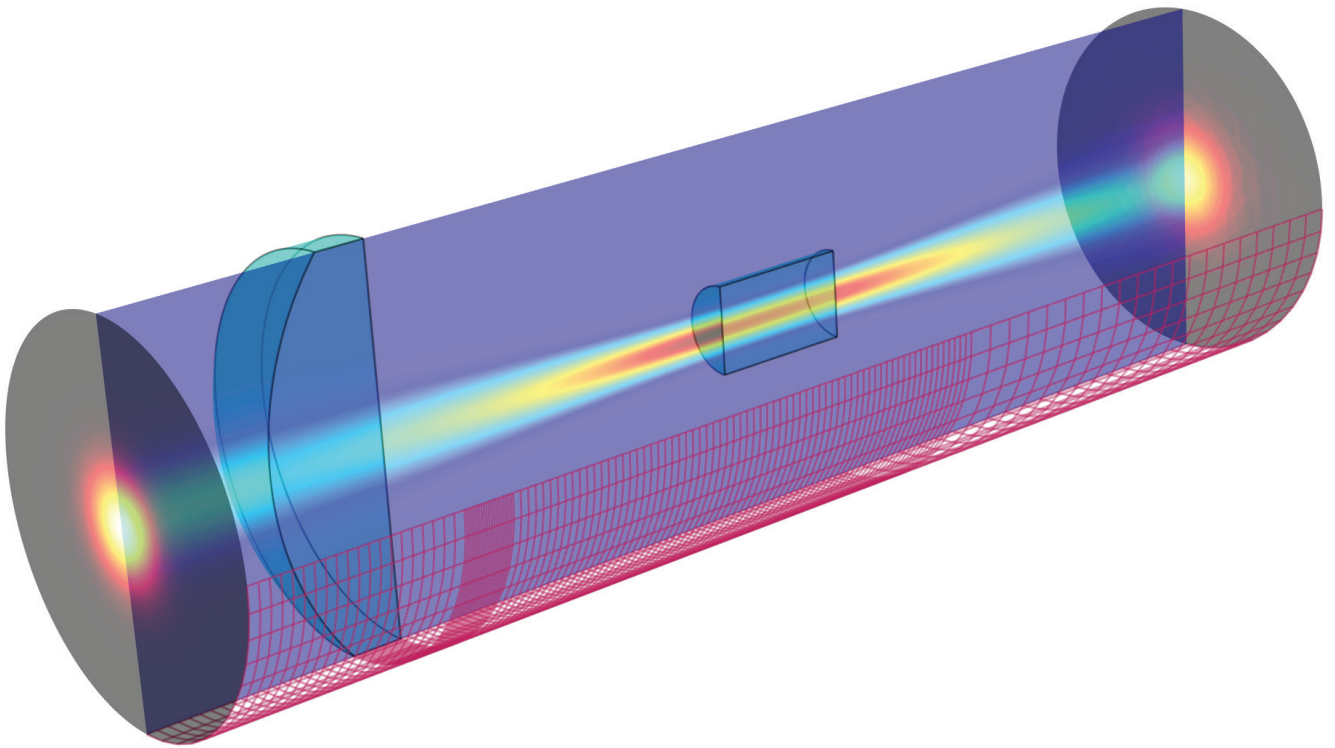


図2 複数の光学部品を含むレンズ系の完全波動シミュレーション。

▶▶ ビームエンベロープ法とARコーティング

上記の議論から、レンズをシミュレートすることはほとんど不可能であるように思われます。しかし、次の2つの救済策を自由に使って完全波動法を使用することができます。ビームエンベロープ法と無反射 (AR) コーティングです。

高速振動電場を解く代わりに、波数ベクトルがわかっている場合は、ゆっくりと変化する包絡 (エンベロープ) 関数を解くことができます。これはビームエンベロープ法と呼ばれます。この場合、理論的な近似はなく、行うことはマクスウェル方程式系を解くことと同等です。この定式化では、メッシュは電場自体ではなく電場の包絡関数を求解します。包絡関数がゆっくりと変化する場合、メッシュ要素の数は大幅に減少します。これは、多くのレンズシミュレーションで実際に当てはまります。

ビームエンベロープ法を使用しても、干渉縞があると包絡関数がそこでゆっくりと変化しなくなるため、干渉縞は設計者に楽をさせてくれません。これを改善するために、ARコー

ティングを使用することができます。人工的な位相ジャンプで材料界面を模擬することが可能です。これは、入射ビームとの打ち消しあうような干渉を人工的に生成し、最終的に干渉縞がなくなるようにするものです。光学部品はほとんどすべての実用的なケースでARコーティングされているため、この人工ARコーティングを導入することは妥当なことだと思われれます。

COMSOL Multiphysics® ソフトウェアでは、これらの救済策は組み込み機能として利用できます。波動光学モジュールのビームエンベロープインターフェースは、ビームエンベロープ定式化で作成され、ARコーティングとして使用できる遷移境界条件を含んでいます。したがって、完全波動レンズシミュレーション (図2) は、ビームエンベロープインターフェースと遷移境界条件の組み合わせを使用することにより、簡単に可能になります。低開口率レンズをシミュレートすることは簡単ですが、高開口率レンズのシミュレーションは、より細かいメッシュが必要であるため、計算量が多くなります。十分に強力なコンピューターを

使用すれば、高開口率レンズシミュレーションも可能です。

マルチコンポーネント光学系の完全波動シミュレーションは、以前は手の届かないものでした。しかし、ここで概説した方法を使用すれば、すなわちARコーティングのアプローチが適用可能であれば、レンズやその他の光学部品を含む光学系全体をシミュレートできます。さらに、完全波動シミュレーションにより複雑屈折解析が可能になるため、レンズだけでなく、液晶やレンズを含む第二高調波発生 (SHG) 光学系のシミュレーションにも使用できます。この方法で実行される完全波動シミュレーションは、レンズ解析の範囲と深さを拡張します。◎

原文はLaser Focus World, 56巻, 36-38頁に英語で掲載。Endeavor Business Media, LLCのご厚意により転載。この資料の英語以外の言語への翻訳は英語を読まない一般の人々の便宜を図るためだけに意図されており、そのような翻訳は正確でない可能性があります。Endeavor Business Media, LLCは、翻訳の誤り、見落とし、または曖昧さについて一切の責任を負わないものとします。個人または団体が翻訳された内容に依存した利用をする場合は自己の責任で行ってください。

Delft University of Technology, Netherlands

数値モデリングによる環境にやさしいアノードベーキングプロセスの設計

オランダのデルフト工科大学の研究者は、マルチフィジックスシミュレーションを使用して、アノード製造会社であるAluchemieと共同で環境に優しいアノードベーキングプロセスを設計しています。

RACHEL KEATLEY 著



図1 ALUCHEMIE のアノードベーキング炉。

地球の地殻で3番目に豊富な元素であるアルミニウムは、昨夜の夕食の残り物を乗せたホイールから、世界中を移動する飛行機の胴体まで、あらゆるものに含まれています。アルミニウムを使用してこのようなさまざまなアイテムを製造する前に、ホール・エルー法で製錬および抽出されます。このプロセス中に、地球環境に優しいアノードを使用して、アルミニウムが豊富な岩石であるボーキサイトからアルミニウムが除去されます。ホール・エルー法で効果を発揮するには、グリーンアノードの反応性が低く、強度と導電率が高い必要があります。これらの品質を得るには、アノードをバークする必要があります。

デルフト工科大学(TUデルフト)の博士課程の学生であるPrajakta Nakate氏は、アノードベーキングプロセスの設計を研究している研

究チームの一員です。このプロジェクトは、オランダのカーボンアノードベーキング会社である Aluchemie と共同で行われています。アルミニウム生産を増やすためのアノードベーキングプロセスを理解して最適化するために、チームは数値シミュレーションに目を向けました。

▶▶ シェフが使用するようなアノードベーキングプロセス

ケーキを焼くとき、適切な濃度、食感、風味を得るために、さまざまな材料が必要です。アノードベーキングプロセスは、ケーキを焼くようなものだと考えてみてください。ただし、材料は、乱流、燃焼プロセス、共役熱伝達、放射などのマルチフィジックス現象です。そして、焼き上がったペストリーの代わりに、最終製品は、アルミニウム抽出のためのホール・エルー法で使用されるアノードです。「このプロジェクトはマルチフィジックスの問題なので、興味を持っていました」と Nakate 氏は語ります。ケーキを焼くのと異なり、アノードベーキングプロセスは、均一な熱、エネルギー使用量の削減、燃焼中の煤の形成の減少など、複数の目標の達成を試みます。

このアノードベーキングプロセスは大量のエネルギーを消費し、窒素酸化物(NOx)などの環境に危険な排出物を放出します。この有毒ガスは一般的な大気汚染物質であり、スモッグや酸性雨を形成することがあります。Nakate 氏の研究は、アノードベーキングプロセス中に放出されるNOxを削減して、プロセスが環境に及ぼす悪影響を制限することに焦点を当てています。「環境研究の話になると、化学プロセスが常に非難されます。それ

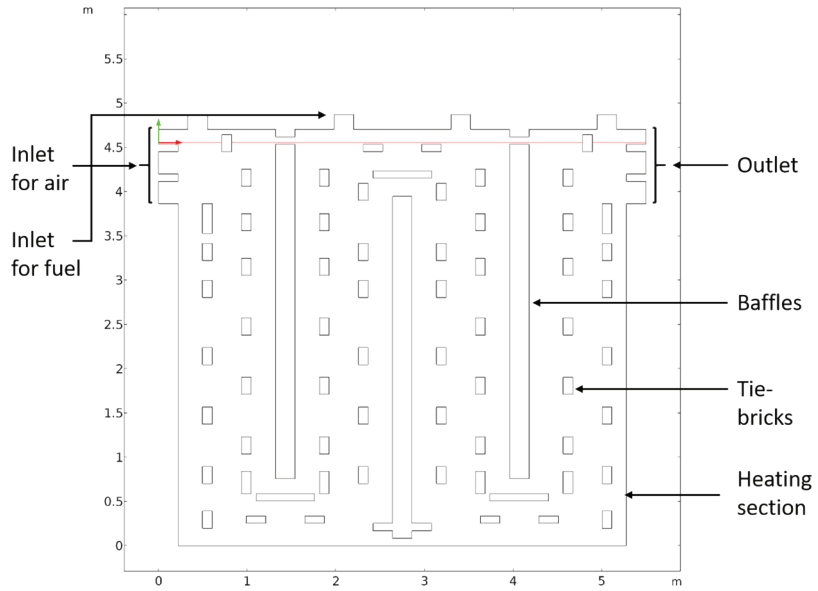


図2 COMSOL MULTIPHYSICS® でモデル化されたアノードベーキング炉の境界に沿ったジオメトリ(炉の最も重要な部分は、水平の赤い線の下です。)

が、アノードベーキングプロセスの最適化に取り組み、環境への影響を最小限に抑えるように私を動機付けた理由です」と Nakate 氏は述べています。

アノードベーキング中のNOxの形成を減らすためには、最初にプロセスに含まれる全てのパラメーターを理解することが重要です。「これら全てを理解するには、より洗練されたアプローチが必要であり、これらのパラメーターを理解するための数学的モデルを使用することが最良の選択です」と Nakate 氏はいいます。

▶▶ 数値モデリング:理想的なアノードベーキングプロセスを設計するための秘密の材料

デルフト工科大学と提携する前に、Aluchemie は試行錯誤を繰り返してアノードベーキング炉(図1)を最適化しようとしましたが、この方法には時間がかかりました。「このプロジェクトの最も重要な部分は、アノードベーキングプロセスの問題領域を特定することです。これはシミュレーションでのみ可能だと思います」と Nakate 氏は述べています。アノードベーキングプロセスのモデリングに関しては、

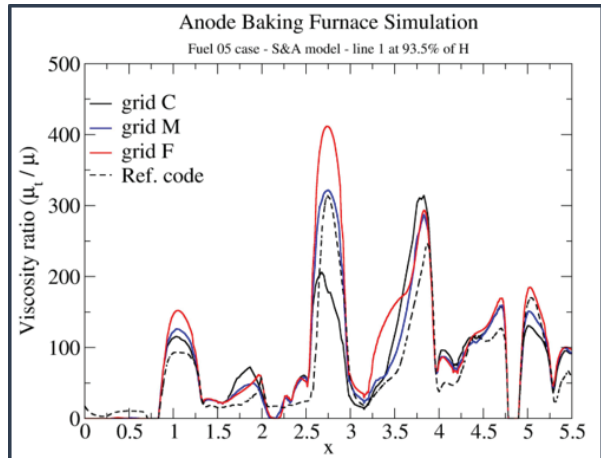
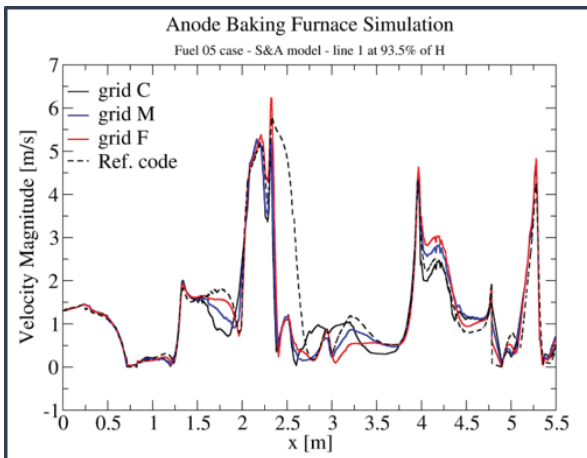


図3 COMSOL MULTIPHYSICS® とIB RAPTORコードのシミュレーション結果の比較。速度(左)および粘性率(右)。

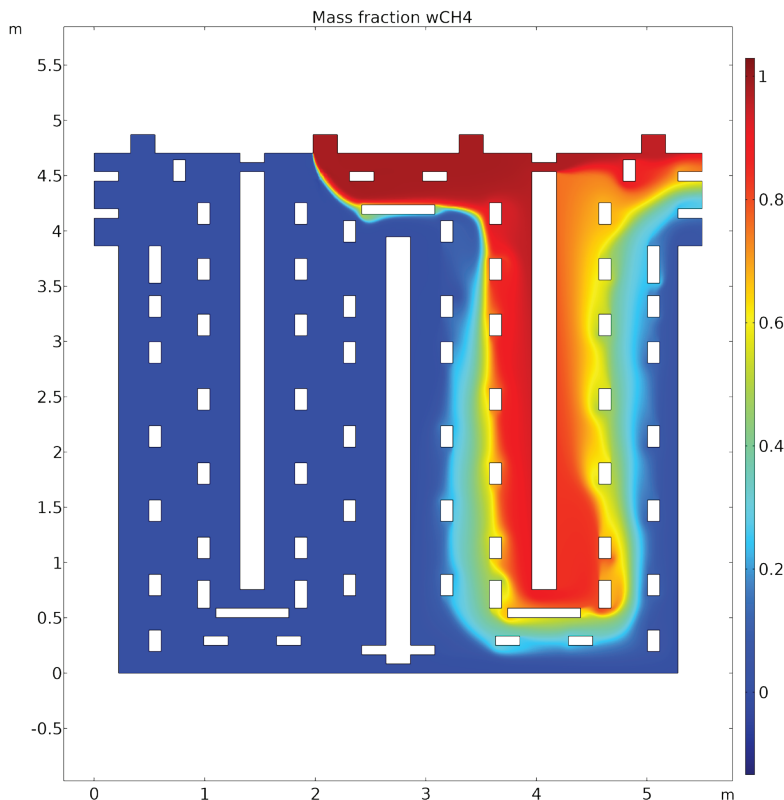


図4 反応性乱流流れモデル中のCH4質量分率。

デルフト工科大学の研究チームは、この特定のプロジェクトに不可欠なマルチフィジクス環境を提供する、COMSOL Multiphysics® ソフトウェアを使用しました。

研究者らは、2つのモデルを使用してアノードベーキングプロセスを解析しました。最初のモデルは炉内の空気と燃料(メタン)の非反応性乱流で、2番目のモデルは炉内の放射を伴う反応性流れです。また、2番目のモデルは最初のモデルの続きでした。アノードベーキングプロセスに関連する複数の物理現象は、これらの数値モデルの基礎を形成する一連の数式に変換されるモデルで説明されています。

どちらのモデルにも同じジオメトリ(炉の加熱ゾーンからの2Dセクション)が含まれています(図2)。Nakate氏によると、複雑なジオメトリを扱う作業が、このプロジェクトの最も困難な側面の1つでした。炉のジオメトリには、炉の各セクションに3つのバップルと約60~70個の組レンガが含まれています。「レンガを異なる組に交換すると、炉内の流れが変化し、アノードベーキングプロセスの化学種の分布と温度に影響します」とNakate氏は言います。組レンガと

バップルは、炉の排気が放出される炉の煙道壁に構造的強度を与えます。

▶▶ 非反応性および反応性の乱流モデル

非反応性乱流モデルに取り組む際に、Nakate氏とチームは2つの乱流モデル(Spalart-Allmarasモデルとk-εモデル)をシミュレートして比較しました。これらのモデルは両方とも、特にアノードベーキングの分析に関して、独自の利点があります。

チームは、別のシミュレーション環境を介して提供された IB Raptorコードを使用して、Spalart-Allmarasモデルによって生成された流れ場の結果を検証しました。「IB Raptorコードは主に流れソルバーです。流体シミュレーション専用のソフトウェアで結果を検証したかったのです」とNakate氏は説明します。COMSOL Multiphysics と IB Raptorコードは、炉内で同様の速度と粘度の流れの結果を出しました(図3)。

研究チームは、COMSOL Multiphysicsのアノード製品である化学反応工学モジュールと伝熱モジュールをそれぞれ使用して、メタン(CH₄)の単一ステップ燃焼反応と、関与媒体で

「このプロジェクトの最も難しい部分はアノードベーキングプロセスの持つ問題範囲を認識することですが、それはシミュレーションによってのみ知ることができます」

— PRAJAKTA NAKATE, TU DELFT

の放射を含む熱伝達を追加することで最初のモデルを拡張しました。放射を伴う反応性流れモデルのシミュレーション結果は、妥当な結果を出しました(図4)。これにより、NO_x炉の理解と最適化をさらに進めるために、モデルをさらに改善することができます。

▶▶ アノードベーキング解析のための新しいモデルの開発

シミュレーションにより、デルフト工科大学のチームとNakate氏は、アノードベーキング炉の重要な領域を解析および特定することができました。これは、炉のサイズが大きいため、実験だけでは不可能でした。「バーナーを外して赤外線カメラで写真を撮ることで炉を上から見ることができますが、炉内の実際の温度や化学種の分布を見ることができるのはシミュレーションだけです」とNakate氏は言います。

将来の研究として、デルフト工科大学チームは現在、アノードベーキングプロセスの2Dモデルを3D過渡モデルに拡張することに取り組んでいます。彼らはまた、新しいモデルで燃焼を徹底的に解析することを計画しています。これは、アノードベーキングプロセスでのNO_x削減についてさらに学ぶのに役立ちます。アノードベーキングプロセスの主要な物理現象である輻射も、拡張モデルでさらに解析されます。

Nakate氏は、自身の個人的な目標について、「産業に直接適用され、環境にプラスの影響を与えるプロジェクトに取り組みたかった」と語ります。したがって、Aluchemie と共同でアノードベーキングプロセスを研究することは、彼女の目標の完璧な組み合わせでした。得られた知識により、デルフト工科大学チームとNakate氏は、研究を継続し、シミュレーションを使用して最適化されたアノードベーキングプロセスを設計する新しい方法を見つけることができると確信しています。◎

COVID-19後の世界における医療機器設計の再考

DANIEL SMITH著

COVID-19安全プロトコルの一部として、医療機器の試験、選択の手順、および医療施設へのアクセスが制限されているため、新しい医療技術の導入が妨げられています。業界は、状況が落ち着き、試験が再開できるようにするときのために、新しい技術への切り替えを加速する準備ができています。一例として、デバイス会社は、腫瘍を外科的に標的にするか、細胞への薬物送達を改善するために、電場を印加して細胞膜の透過性を高める可逆的および不可逆的電気穿孔を採用する方向に進んでいます。この手法は、従来のRFアブレーションに固有の欠点のいくつかを除去してくれますが、より高い強度でより短いエネルギーパルスが必要になるため、電力供給系にも課題が生じます。

Emphysysなどの技術開発会社は、この課題に取り組んでいます。当社の科学者とエンジニアは、マルチモーダル、高周波エネルギー生成およびソフトウェア制御システムの専門知識に加えて、設計中のシステムを完全に理解するための高度なシミュレーション機能を備えています。これを数値シミュレーションと組み合わせると、従来の予想よりもはるかに短い時間で、エネルギーベースの医療機器のプロトタイプを迅速に作成できる強力なグループが作成されます。

「シミュレーションによって提供される動作範囲とは、通常、電源が最初の反復で製品のニーズを満たすことができることを意味します。」

当社は、半導体製造業で一般的に使用されているプラズマ源の発電にルーツを持っています。そのため、10ワットから100キロワットの範囲のRFジェネレーター、DCからマイクロ波までの周波数、および閉ループ制御システムで実行される単一および多周波数の正弦波からカスタムパルス波形までの波形を構築してきました。

この組織的な知識は全て、電力要件が通常100ワット未満で、周波数が数百キロヘルツのオーダーである医療機器分野に完全に役立ちます。熟練した技術開発会社は、神経刺激や組織の炭化などの望ましくない影響を最小限に抑える方法で、電気穿孔用の医療機器のカスタム波形を設計できます。私たちは、COMSOL Multiphysics® 内にて専用のフィジックスインターフェースを開発して、この電気穿孔プロセスとデバイス自体をモデル化しました。

微視的(個々の細孔の)モデルと巨視的(ハンドピース全体の)モデルの両方で電気穿孔シミュレーションを実行すると、パルス幅、ピー

ク電力、電流、または電圧、およびパルスがRF信号の場合、周波数の観点から電源の動作ウィンドウを作ることができます。これにより、電源の要件仕様を作成できます。これはエンジニアリングチームが社内で作成します。シミュレーションによって提供される動作ウィンドウは、通常、電源が最初の反復で製品のニーズを満たすことができることを意味します。

さらに、シミュレーションによって、ハンドピースまたは患者アプリケーション自体を最適化して、体重や筋肉密度などの点で人によってわずかに異なるため、患者の特性インピーダンスの広い範囲で機能するようにすることもできます。電源とハンドピースの設計仕様が利用可能になると、電子ボード、制御システム、およびデバイスへのユーザーインターフェースを含むソフトウェアを構築し、システムにシームレスに統合できます。このプロセスの全ての段階を社内で行えるということは、コンセプトから機能プロトタイプに移行するのにかかる時間の点で競争力を与えてくれます。

この一連の機能は、プロジェクトの復旧にも適しています。医療機器の試験がCOVID-19後の通常の状態に戻ると、多くのプロジェクトが予定より大幅に遅れることとなります。Emphysysは、システム設計とプロジェクトのタイムラインの観点から、このようなプロジェクトを軌道に戻す専門知識を持っています。今後は、従来の熱アブレーションではなく、電気穿孔をベースにした新世代の医療機器が登場することを期待しています。会社の方針と多様な従業員のスキルセットにより、私たちは今後数年間でこの業界のトレンドになることでしょう。



著者について

Emphysysのモデリングとシミュレーションの所長であるDaniel Smith氏は、16年間のモデリングとシミュレーションの経験を持ち、COMSOLで北米の開発責任者として12年間勤め、MEMS、プラズマ、マイクロフルイデクス、粒子追跡、光線光学、半導体、および分子流れモジュールの開発を監督してきました。彼は応用数学と数値計算の両方で修士号を取得しています。www.emphysys.com