

COMSOL NEWS

マルチフィジックスシミュレーションマガジン

潮力を利用する

シミュレーションによるタービン設計は海の生き物を守る

PAGE 26



シミュレーションによる、生産性、革新性、そしてグリーンエンジニアリングの向上

今回の COMSOL News では、マルチフィジックスモデリング、シミュレーションアプリを活用している12の組織をご紹介します。

新製品の開発、生産性の向上、将来の成長のために、設計ワークフローにモデリングを導入している研究開発チームのユースケースをいくつかご紹介しています。例えば、Dolby Laboratories 社では、モデリングと計測を組み合わせて、超薄型スピーカーによる真に臨場感のあるオーディオ体験の実現を目指しています。NKT 社の電源ケーブルのシミュレーションに関する記事では、物理的なテストに莫大な費用と時間がかかる場合でのコストを削減して開発を迅速化するためのバーチャルテストの価値について説明しています。Physixfactor 社は、シミュレーションを利用して、海の潮の流れを利用した持続可能な水力発電のための水車の設計を行いました。

また、シミュレーションアプリの作成と展開に関する記事も掲載されています。COMSOL Multiphysics® のユーザーは、独自のシミュレーションツールを構築し、大勢の人が利用できるようにしています。例えば、Mahindra 社の自動車用アプリ、L-A acoustics 社のオーディオ製品設計、Plastometrex 社の材料試験アプリおよび機器、ニュージャージー工科大学の遠隔学習用バーチャルラボなどがあります。

今号の COMSOL ニュースをどうぞお楽しみください!

Brianne Christopher
COMSOL, Inc.

COMSOL コミュニティと交流する

BLOG comsol.com/blogs

FORUM comsol.com/forum

LinkedIn™ linkedin.com/company/comsol-inc

Facebook® facebook.com/multiphysics

Twitter® [@COMSOL_Inc](http://twitter.com/@COMSOL_Inc)

COMSOL ニュースに関するご意見をお待ちしております。
info@comsol.comまでご連絡ください。

© 2021 COMSOL. COMSOL, COMSOL Multiphysics, Capture the Concept, COMSOL Desktop, COMSOL Server, COMSOL Compiler, LiveLink は、COMSOL AB の登録商標または商標です。その他すべての商標はそれぞれの所有者の財産であり、COMSOL AB とその子会社および製品は、それらの商標所有者と提携しておらず、支援を受けておらず、資金提供を受けていません。このような商標権者の一覧については、www.comsol.com/trademarksをご覧ください。

LinkedIn は、LinkedIn およびその関連会社の米国および/または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



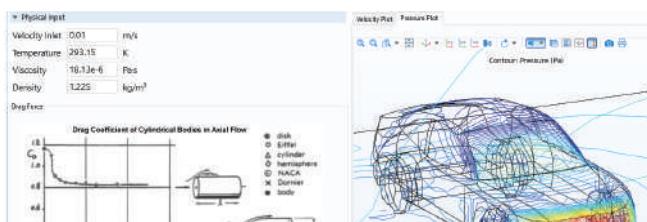
シミュレーションによる製品開発

- 4** ホームエンターテインメントシステム用の超薄型 Dolby Atmos® 対応スピーカー技術の開発
Dolby Laboratories, California, USA
- 10** 高電圧ケーブルの装甲損失の3Dモデリング
NKT, Sweden
- 24** リードレス心臓ペースメーカーの人体通信の調査
MicroPort CRM, France



設計の最適化

- 17** 冷凍冷却技術のための熱交換器設計の最適化
thermofin GmbH, Germany
- 26** Darrieus 水車での発電, 魚の保護
Physixfactor, Netherlands
- 38** マルチフィジックスシミュレーションによるガス流れデバイスのスマートソリューションの設計
Raychem RPG, India



シミュレーションの民主化

- 7** シミュレーションアプリケーションを用いた遠隔教育の学生へのラボコースの提供
New Jersey Institute of Technology, New Jersey, USA
- 14** シミュレーションアプリによる自動車製品開発の促進
Mahindra & Mahindra Limited, India
- 30** 音の光景: スピーカーの性能に対する筐体設計の影響
L-Acoustics, France



研究スポットライト

- 20** 都市の中心部を緑化: 庭の柵の中に設置された都市の屋上排水システム
TL-Engineering, Denmark
- 34** 音響力モフラーのための蛾の羽の振動音響特性の解析
University of Bristol, United Kingdom
- 41** 高性能タンクステン材料のCVDプロセスの最適化
Forschungszentrum Jülich GmbH, Germany

ゲスト論説

- 44** アプリは検証, 検査, 認証業界のデジタル化を支える
By James Dean, Plastometrex, United Kingdom

Dolby Laboratories, California, USA

ホームエンターテインメント システム用の超薄型 DOLBY ATMOS® 対応スピーカー技 術の開発

3次元(3D)サラウンドサウンド技術は、消費者にプレミアムで完全に没入型のオーディオ体験を提供します。この技術の開発をリードしているのが、米国カリフォルニア州サンフランシスコに本社を置くDolby Laboratories社です。最近では、音響シミュレーションを駆使して、テレビ用の革新的な3Dサラウンドサウンド技術を開発しています。

RACHEL KEATLEY 著

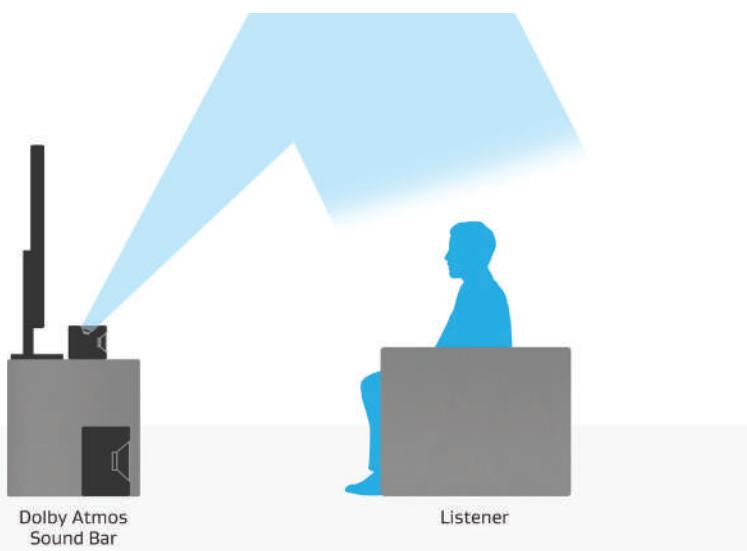


図1 従来の(大きなフォームファクターの)ハイチャンネルスピーカー。

雨滴が頭上の木の葉に落ちます。遠くでオオハシが鳴き、枝のざわめきが左耳に響きます。横を見ると、ジャガーがあなたを見つめていることに気づきます。アマゾンの熱帯雨林をトレッキングしているように聞こえるかもしれません、実際にはあなたはリビングルームに座って映画を見ているのです。3Dサラウンドサウンドは、画面上のストーリーにユーザーを完全に包み込む最適なサウンドスケープを作成することにより、ホームエンターテインメントの体験を強化します。

デジタルの世界と現実の世界が融合し続けるにつれて、より多くの消費者が、ホームエンターテインメントシステムにこの種の印象的でリアルなオーディオ体験を期待しています。革新的なオーディオシステムと技術の大手開発者であるDolby Laboratoriesは、Dolby Atmos®オーディオフォーマットを通じて、3D多次元オーディオ技術を家庭へと導入し始めています。

2014年、Dolby Laboratoriesはホームシアターシステム向けに Dolby Atmos® 対応スピーカー(DAES)技術を導入し、後にこの技術を

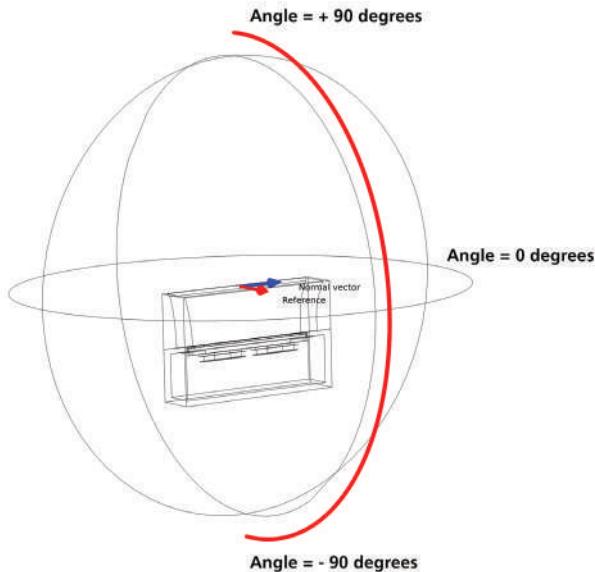


図 2 音響反射板を内蔵したスリムハイツスピーカー: 指向性評価面。

サウンドバー製品向けに拡張しました。現在、彼らはテレビ用のDAES技術を開発して、没入型ホームオーディオ技術の可能性の限界を押し広げています。

» DOLBY ATMOS® 対応スピーカーの科学

図1で示しているように、リアルな頭上の音を再現するために、DAES技術は上向きに発射するスピーカー設計を採用して音を上向きに放射し、天井で反射します。これらのスピーカーには知覚フィルタリングが適用され、仰

最新の家電製品を頻繁にチェックしていると、テレビが年々滑らかで薄くなっていることに気づくかもしれません。スリムなフォームファクターのテレビ設計の制約により、テレビ用のDAESを設計することは困難です。なぜでしょう？それはテレビのデザインがよりコンパクトになるにつれて、境界面に密接に結合されている上向きに発射するスピーカーの振動板に利用できる形状と領域が、テレビの厚さによって制限され、狭いハイチャンネル天井画像を作成するからです。

角感が増幅されます。これにより、消費者は、スピーカーの物理的な位置ではなく、天井の反射点として音の発生位置を認識できるのです。「従来のテレビスピーカーをお持ちの場合は、テレビから目の前でスピーカーの音が聞こえます。Dolby Atmos®対応のテレビスピーカーを使用すると、天井から頭上の音が聞こえます」と、Dolby Laboratoriesの上級音響システムおよびトランステューサーエンジニアであるLakshminikanth Tippuraju氏は述べています。

» 超薄型テレビスピーカーの設計上の課題

Tippuraju氏によると、リスナーの典型的な位置の周りに大きなスイートスポットカバレッジを提供できるスリムなDolby Atmos®対応のテレビスピーカーを設計することが重要な課題となります。「スイートスポットカバレッジエリアとは、天井のハイチャンネル画像を一貫して知覚できる領域のことです。スイートスポットのカバレッジエリアから離れると、天井の画像が損なわれます」とTippuraju氏は説明します。

現代のテレビに組み込むのに十分な薄さがあり、広いスイートスポットカバレッジを提供するDAESを設計するために、Dolby Laboratoriesは音響シミュレーションに目を向けました。Tippuraju氏は、シミュレーション技術の主な利点は、実際の物理プロトタイプを作成してテストする前に、新しいスピーカーデザインのパフォーマンスを評価できることであり、貴重な時間とリソースを節約できると考えています。

» 音響FEMおよびBEM解析

Tippuraju氏は、COMSOL Multiphysics®シミュレーションソフトウェアの音響モデリングを使用して、スイートスポットカバレッジを最適化するためのいくつかの異なる上向きに発射するスピーカーのデザインコンセプトを検討しました。

「当初、私たちは2インチの厚さのスピーカーを作りました」とTippuraju氏は言います。(一般的なサウンドバーの厚さは約5インチ、つまり12.7センチメートルです)。「全体的にはかなり没入感がありますが、さらにデザインの競争力を高めたいと考えました」。さらなる市場調査を行った後、Tippuraju氏と彼のチームは、厚さ1インチのDAESを開発することを決定しました。極薄の設計上の制約を

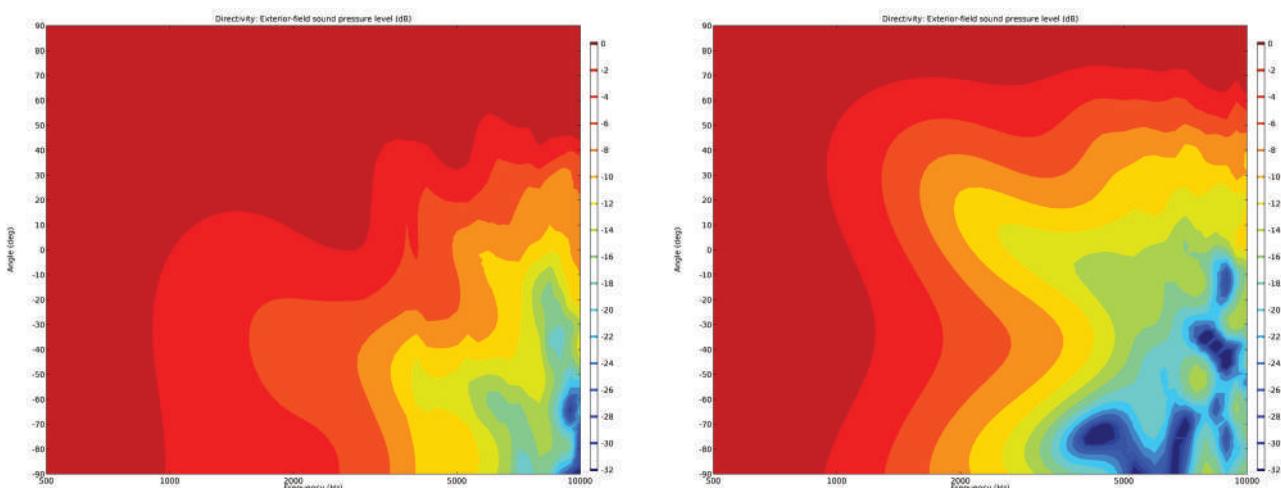


図 3 リフレクターが統合されたスリムハイツスピーカー(左)とリフレクターなしの従来のスリムハイツスピーカー(右)のシミュレートされた垂直面指向性の比較。ここで、リフレクター付きのスピーカーの方が天井反射のカバレッジが広いことがわかります。

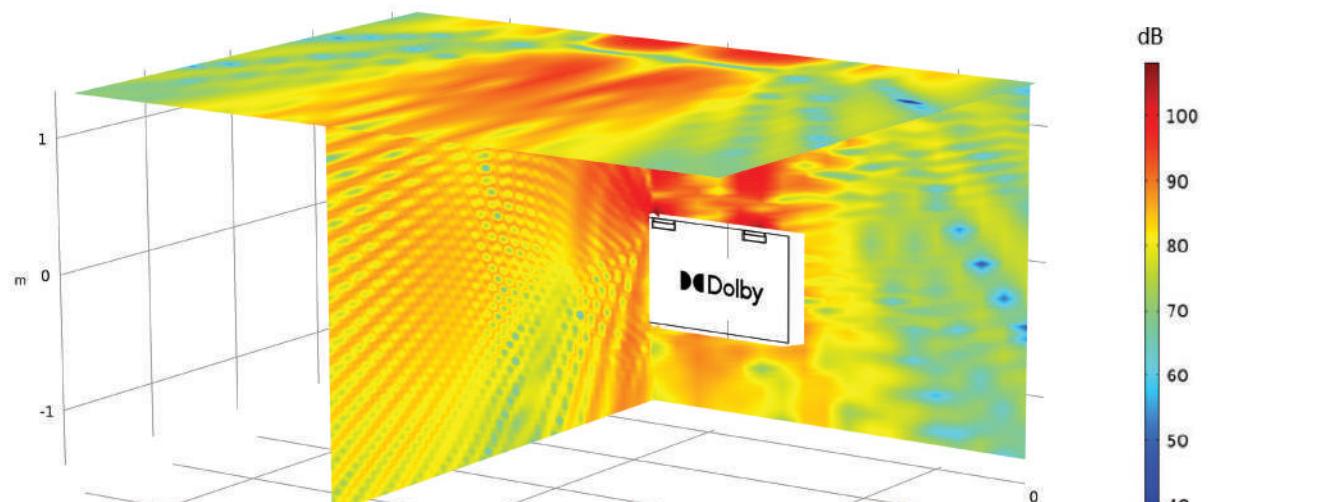


図 4 COMSOL Multiphysics® の10kHzでのSPL分布を示すマルチスライスプロット。

満たすために、彼らは極薄のマイクロトランステューサー(90ミリメートル×15ミリメートル)をスピーカーの設計に組み込みました。さらに、音響リフレクターをスピーカーの設計に追加して、音響エネルギーを天井に向かって効率的に再分配することで、同時にスピーカーのスイートスポットカバレッジエリアを改善することにも成功しました。

ソフトウェアの音響有限要素法(FEM)と境界要素法(BEM)機能を使い、Tipparaju 氏は音響反射器のトポロジを最適化して非対称放射パターンを作成し、天井方向(0度から+90度)に沿ったエネルギー分布を最大化し、図2に示してあるように、リスナーへの直接音(0度

から-90度)を十分に減衰させました。

次に、自由音場の垂直面の指向性に基づいて音響反射器トポロジを最適化するために、FEM 解析を実行しました。さらに、BEM 解析により、テレビパネルの統合制約と天井反射を考慮して、音響反射器の指向性応答の利点を数値的に評価しました。「視聴者の位置の周りに均一な高さのチャネルカバレッジがあることを確認したかったのです。」と Tipparaju 氏は述べます。Tipparaju 氏によると、シミュレーションで天井に沿った音圧分布を評価できることは、最適な左右のスピーカーモジュールの間隔とトランステューサーのアーキテクチャを決定するのに役立つため、非常に価値があります。

彼らのシミュレーションで、Dolby Laboratories はさまざまな天井高の境界条件を考慮に入れます。「米国では、通常の天井の高さは約8~12フィートであり、これらのさまざまな条件でのスピーカーの応答を評価します」と Tipparaju 氏は説明します。

» 近接場スキャナーによる結果の検証

シミュレーション結果に基づいて、音響反射器が統合されたスリムハイチャンネルスピーカーの物理的なプロトタイプがテストと検証のために作成されました。

FEM 解析の自由音圧の結果は、「Klippel 近接場スキャナー(NFS)測定システムの実験結果で検証されました。「近接場スキャナーを使用する利点は、任意の空間または任意の部屋で高速 3D 無響音響測定を実行できることです。」と Tipparaju 氏は言います。

全体として、Dolby Laboratories は、統合された音響リフレクターがスリムハイチャンネルスピーカーの没入感を大幅に向上させることができると判断できました。Dolby Laboratories は、テレビのプレミアムで没入型のオーディオ体験さらに強化するために、

現在、サイドファイアサラウンドテレビスピーカーの音響反射器技術の拡張に取り組んでいます。

» 没入型オーディオ技術の未来

「私たちのチームの主な目標は、さまざまな音響ハードウェアシステムと技術を開発することです。これにより、さまざまな家電製品での Dolby Atmos® の採用を増やすことができます」と Tipparaju 氏は述べています。将来的には、Dolby はスマートスピーカーおよびワイヤレススピーカー市場向けに Dolby Atmos® 対応スピーカー技術を開発する予定です。

Tipparaju 氏は、これは興味深い取り組みになると予想しています。マイクアレイと追加のスピーカーを含むよりコンパクトなフォームファクターを綿密に使用していく必要があるからです。彼はシミュレーションの助けを借りて、このタイプのシステムへの没入感を向上させるハードウェアソリューションを開発することを計画しています。◎

謝辞

Lakshmikanth Tipparaju は、このプロジェクトを支援してくださったマネージャーの John Stewart, Enhanced Consumer Devices Innovation チーム内の同僚、および Dolby 内の Atmos テレビ 製品マネージメントチームに感謝します。



図 5 極薄マイクロトランステューサー(左)と厚さ1インチの極薄DAES(右)のプロトタイプ。



Lakshmikanth Tipparaju, 音響システムおよびトランステューサー担当シニアエンジニア, Dolby Laboratories

New Jersey Institute of Technology, New Jersey, USA

シミュレーションアプリケーションによる遠隔教育の学生へのラボ授業の提供

RACHEL KEATLEY 著

ニュージャージー工科大学で、1人の教授とその学生が、世界中の工学およびラボの授業で使用できる15のシミュレーションアプリケーションを設計しました。

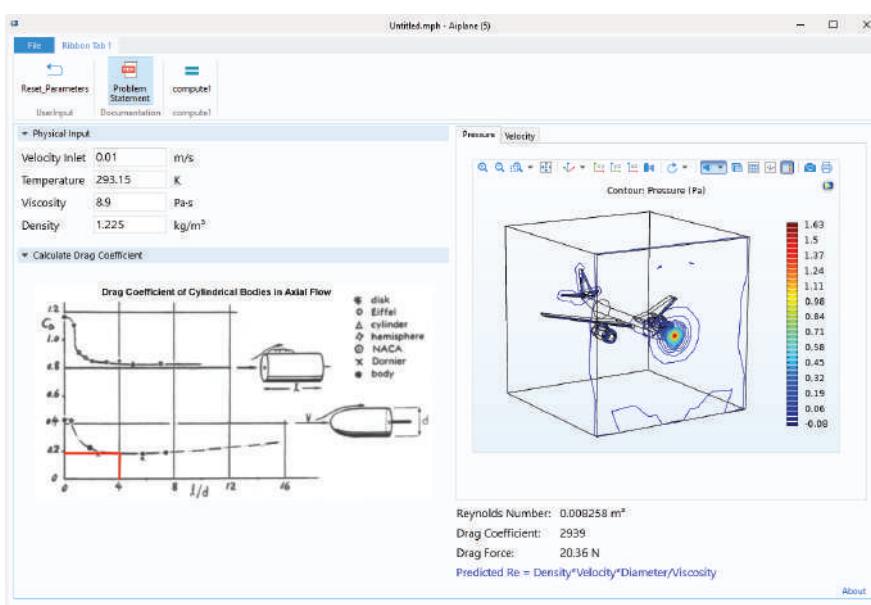


図 1 Voronov 氏と彼の学生によって設計された、飛行機の周りの抗力係数を計算するシミュレーションアプリの例。学生は、アプリの結果をラウンドノーズシリンダーの抗力係数プロットと比較できます。

人間の平均的な注意力は、金魚よりも短い。このような統計を聞いたことがあるかもしれません、はたしてこれは本当なのでしょうか? この示唆に富む洞察は2015年頃の何百もの見出しに登場しましたが、懷疑論者は納得していませんでした。この主張には欠陥があります。多くの研究者が述べるように、人間の注意力は複雑すぎて、時間の長さという単位に拘束してしまうことは不可能なのです(参照1)。

人間の注意力は実際には金魚のそれに匹敵するものではないかもしれません、これまで以上に多くのデジタルコンテンツが利用可能である世の中で、人々の注意の向け方は変化しています。聴衆を魅了し、楽しませ、従事させ続けるためには、魅惑的な話をしなければなりません。特に、教師、講師、教授は、授業中に、50分から90分ほど学生を集中させなければならないため、このスキルを磨くことは特に重要です。

多くの教育者にとって、2020年3月にコロナウイルスの急速な感染拡大により学校(さらに世界まで)が閉鎖され、多くの大学の授業がオンラインに移行したため、学生の注意を引くことがさらに困難になりました。ニュージャージー工科大学(NJIT)で、化学および生物医学工学の准教授であるRoman Voronov氏は、学生がどこに拠点を置いていても、NJITの教授が基本的な工学概念とラボ授業を魅力的な方

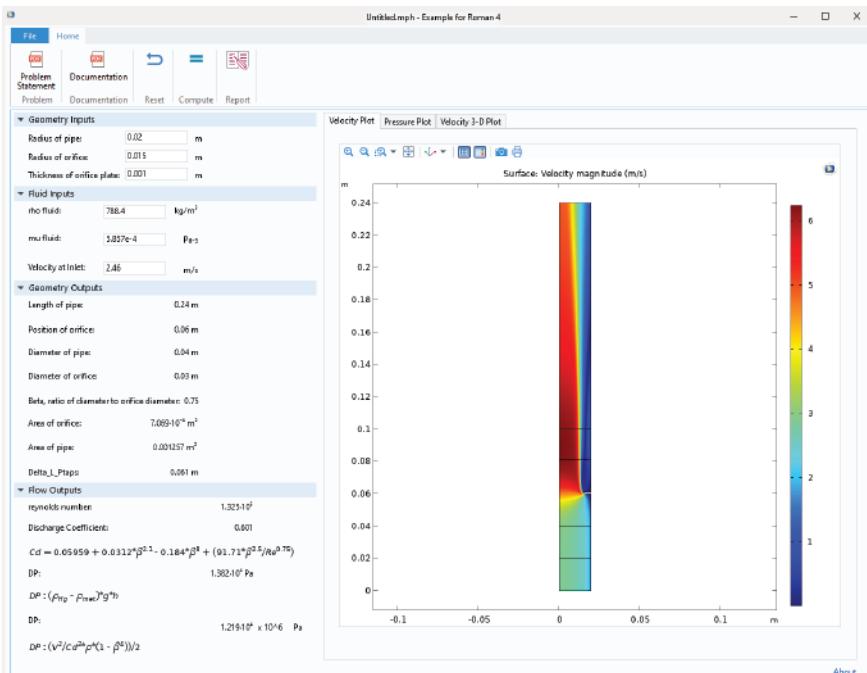


図2 オリフィス流量計アプリの画像

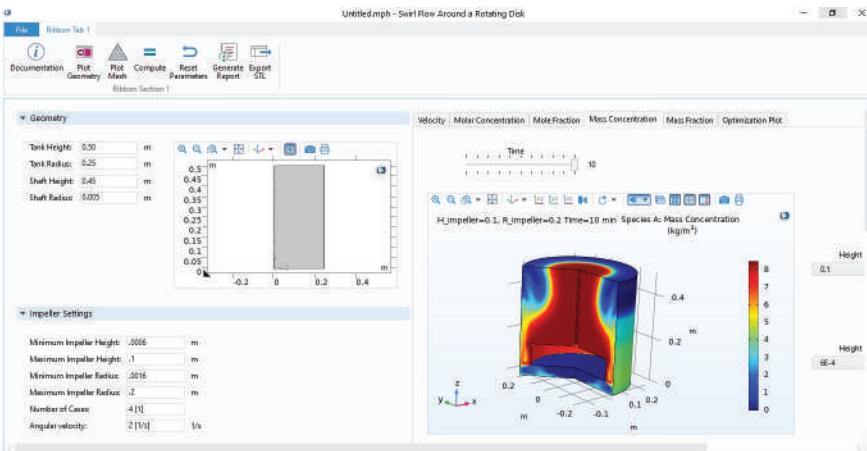


図3 インペラーアンペラーアプリの画像。アプリは、学生がシミュレーション結果を検証するためにラボで使用できる3Dプリントインペラーアプリケーションを生成します。

法で遠隔的に教えるのに役立つ15の使いやすいシミュレーションアプリケーションを設計しました。

» 教室内(および教室外)でのシミュレーション

Roman Voronov 氏は、輸送現象、熱および物質移動、およびプロセスシミュレーションの手法に関する授業を担当しています。「私の熱および物質移動授業では、プロジェクトで使用するために、数値シミュレーションソフトウェアで

あるCOMSOL Multiphysics® ソフトウェアを学生に紹介したいと思いました。COMSOL® で1つの問題を解くとすぐに、誰もが次のように言いました。「何が起こっているのかを実際に視覚的に見ることができるので、とても簡単に理解できる」と、Voronov 氏は述べています。

さらに Voronov 氏は、学生たちに高度な計算ツールを紹介することが重要だと考えています。これは、社会に出てからの強みとなるからです。「単なる楽しみではありません。このような技術の使い方を知っていることは、結

果的に卒業後も使えるスキルになるのです」と Voronov 氏は言います。

Voronov 氏は、シミュレーション技術が自身の学生に与えたプラスの影響を目の当たりにし、遠隔教育という概念が一般的な用語になる前から、世界中の学生や教育者がそのようなツールにアクセスしやすくなれたと考えていました。

» 学生のためのシミュレーションアプリのライブラリ

2020年を通して、Voronov 氏と彼の学生は協力しながら、いくつかのスタンドアロンで実行可能なシミュレーションアプリのライブラリを作成しました。彼らは、COMSOL Multiphysics® のツールである「アプリケーションビルダー」を使用してこれらの使いやすいアプリを作成し、モデルから直感的なユーザーインターフェースを構築し、アプリの設計者が表示する入力と出力を決定できるようにしました。それぞれのアプリは、COMSOL Compiler™ デブロイメント製品を使用してスタンドアロン実行可能ファイルにコンパイルされ、追加のソフトウェアライセンスを管理することなく、アプリを簡単に分配できました。この1年間のプロジェクトは、化学工学における計算ツールの使用を促進する非営利団体である Computer Aids for Chemical Engineering (CACHE) によって資金提供を受けました。

当初、Voronov 氏は、教授が基本的なエンジニアリングの概念を紹介する際に、視覚的な教材として使用できるアプリを設計することを計画していました。しかし、コロナウイルスの発生後、プロジェクトの方向が変わりました。化学工学ラボを担当していた NJIT の教授たちは、授業が完全にオンラインに移行したこと、それまでラボで行っていた実験をモデル化するアプリの必要性を感じていました。そのようなアプリは、実際のラボ授業での作業を補うものであり、場合によっては完全に代替するものになると彼らは考えていました。

教授が授業でモデル化する必要のあるラボ機器の種類について調べた後、Voronov 氏と彼の学生たちは、シミュレーションアプリを形にする作業に取り掛かりました。

» 3つの専用アプリを探る

CACHE プロジェクトの完了後、Roman Voronov 氏と彼の学生たちは15のシミュレーションアプリケーションを設計しました(参照2)。アプリのいくつかは、NJIT の特定の工学授業やラボで使用するように設計されていますが、基本的な化学工学プロセスを研究している人ならおそらく誰にとっても興味深いものです。

ラボ授業でのシミュレーション技術の重要性について、Voronov 氏は次のように述べています。「ラボでは、学生は実験をしたり、

指示された通りに行動できますが、シミュレーションのように、実験で起こっている物理的プロセスを理解しているとは限りません。Voronov 氏と彼の学生が作成したアプリの1つは、パイプ内の圧縮性流体の流れをシミュレートするために使用できます。

「オリフィス流量計」アプリは、NJIT の化学生工学のラボ授業で、学生が流体の流れの実験を行うために特別に作成されたものです。実験では、学生は長さの異なるパイプの複数の場所での圧力損失を測定しなければなりませんでした。この実験をモデルにしたアプリを使用して、学生はパイプのジオメトリを変更し、流体入力を調整して、これが結果にどのように影響するかを確認することができます。アプリには、3D 速度プロットと圧力プロットが搭載されており、学生はプロセス内で発生する物理現象を可視化することができます。

インペラー反応器アプリを使用することで、学生は回転する円盤状のインペラーを備えた非触媒バッチ反応器で2つの化学種間の反応をシミュレートすることができます。このアプリでは、インペラーの寸法を変えることで、バッチ反応器のモル濃度、モルと質量分率、および質量濃度にどのような影響があるかをることができます。(バッチ反応器は、ファインケミカル、製薬、食品業界などの分野でさまざまな製品を開発するためによく使用されます。)さらに、アプリは、パラメトリックスイープを使用してインペラーをモデル化する方

法についても説明しています。「結果が最適なインペラーの形状とサイズを示してくれる、という考えです」とVoronov 氏は述べています。シミュレーション結果に基づいて、学生は3D プリント用のインペラーの CAD ファイルを作成することができます。次に、インペラーパーツを印刷して、実際にどのように機能するかを確認できます。

Voronov 氏が NJIT の流体力学の授業用に設計した車周りの流れアプリは、車の周りを通過する気流をモデル化します。例えば、充填層、ろ過装置、熱交換器などを設計する場合、流体が浸漬された物体上をどのように流れるかを理解することが重要です。アプリを使用することで、学生は車の上の空気の勾配分布を圧力プロットで、車の上を通過する空気の流れを速度プロットで解析することができます。

ここに記載されているすべてのアプリと他の12個のアプリは、ニュージャージー工科大学のウェブサイトからアクセスできます(参考3)。(アプリを実行するには、アプリユーザーノードのオペレーティングシステムに COMSOL Runtime™ を無料でインストールする必要があります。)

» 受賞を受けたアプリ

NJIT の Roman Voronov 氏の学生の多くは、キャリアの中でシミュレーションを使用し続けており、中では賞を受賞している学生もいます。例えば、2020年に NJIT を卒業し、Voronov 氏

の元学生の一人である Vasilios Halkias 氏は、2020 NAFEMS 学生賞を受賞したアプリを開発しました(参照4)。受賞したアプリは、管状フローリアクターでの物質移動、熱伝導、および反応速度をシミュレートするものです。管状流反応器は、さまざまな化学物質ベースのアプリケーションの設計において重要です。

Voronov 氏は、シミュレーションアプリケーションの使用は、教育において、遠隔学習やハイブリッド学習を超えて、更なる役割を持つことになるとを考えています。「シミュレーションアプリを使うことで、学生は自分がテストしているシステムの内部で何が起こっているのかを本質的に理解することができると思います。これまでとは異なる視点で、多くのことを理解できるようになります」と述べています。◎

参考文献

1. S. Maybin, "Busting the attention span myth," BBC News, 2017.
2. "Development of Computational-Based Tools and Modules for Chemical Engineering Education," Computer Aids for Chemical Engineering, 2020.
3. R. Voronov, "COMSOL Apps," New Jersey Institute of Technology, 2020. <https://web.njit.edu/~rvoronov/comsol-apps/>
4. R. Tara, "Unable to Take Lab Course to Graduate, Student Turns to Simulation," Engineering.com, 2020.

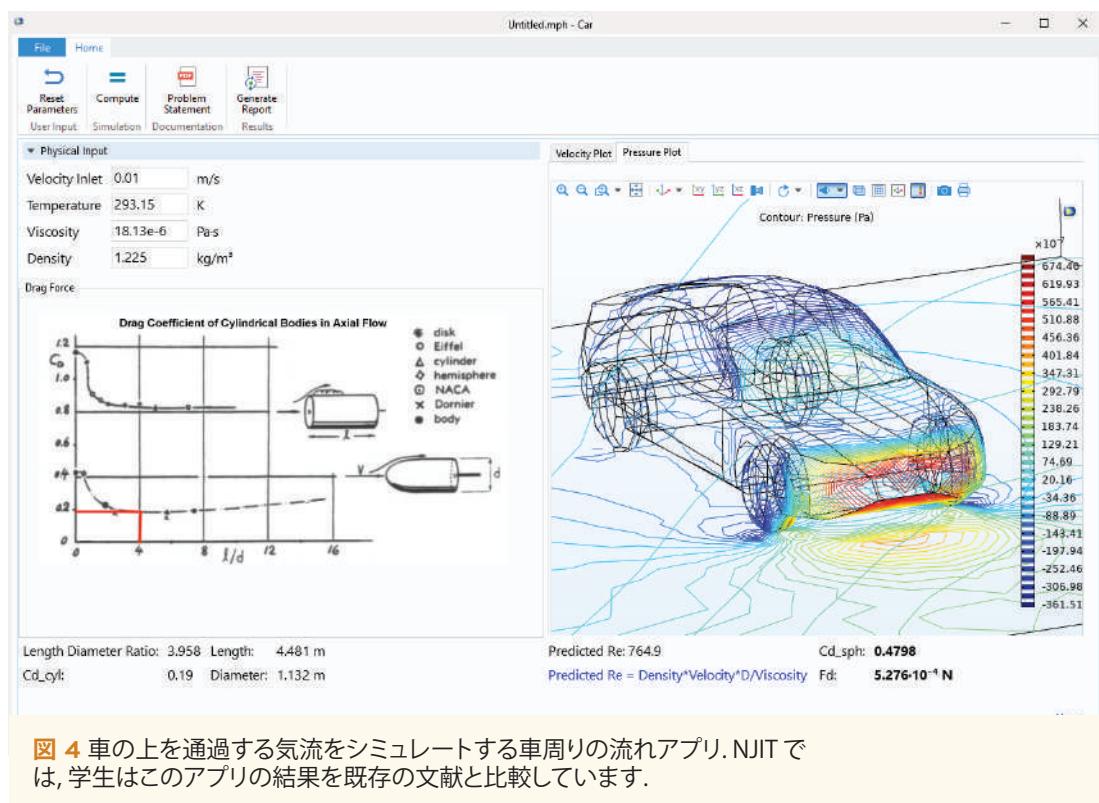


図 4 車の上を通過する気流をシミュレートする車周りの流れアプリ。NJIT では、学生はこのアプリの結果を既存の文献と比較しています。

NKT, Sweden

高電圧ケーブル の装甲損失の 3D モデリング

BRIANNE CHRISTOPHER 著

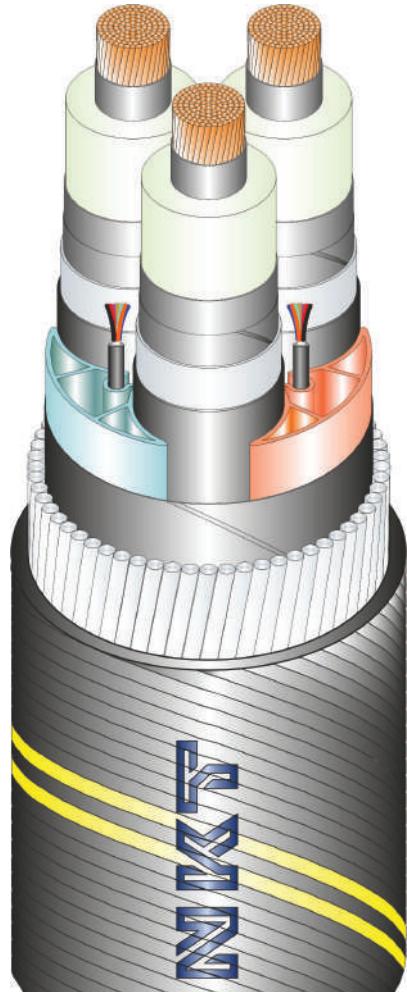


図 1 高電圧ケーブルは世界を結びます。一方で、維持費や解析の難しさも指摘されています。画像提供: NKT.

スウェーデンのカールス・クローナにある NKT 社では、数値モデルを用いて電磁場を解析し、3D ケーブル設計における装甲損失を算出しています。また、シミュレーションによる設計解析を確実に行うために、モーデリング結果を実験的な測定で検証しています。

電線やケーブルは、数千億ドル規模の世界的な産業を構成しています。実際、Infinium Global Research 社の報告によると、ケーブル市場は2025年までに2,200億ドルに達すると予測されています(参照1)。急成長しているケーブル業界の収益の大部分は、設置、保守、開発によるものです。例えば、ノルウェーとオランダの電力網を結ぶ共同ケーブルプロジェクト NorNed ケーブルの敷設費用は、2008年の時点での約6億ユーロ(約7億USドル)でした(参照2)。このような大規模なケーブルの修理や交換が必要になると、費用もかかります。2010年に開催された海底ケーブル会議 SubOptic の報告書によると、海底ケーブルの修理には1日あたり1万2,000ドル以上、1プロジェクト当たり100万ドル以上の費用がかかると試算されています(参照3)。このように、ケーブルのコストは非常に大きいため、投資効果を得るには何年もかかります。

大規模なプロジェクトへの投資であることに加えて、ケーブルは実験的にテストすることも要求されます(図1)。実際、世界的なケーブルメーカーである NKT 社が研究しているケーブルは、長年にわたって実験的にテストされてきましたが、かなりの時間とリソースがかかります。「ケーブルの損失は測定するのが難しいのです」と NKT 社のシニア解析エンジニアである Ola Thyrvin 氏は言います。

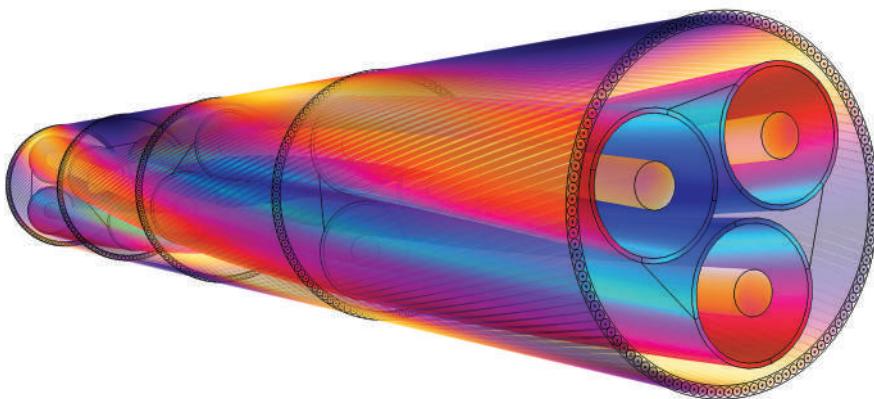


図 2 シミュレーションソフトウェアCOMSOL Multiphysics®でモデル化された3Dケーブル.

この点で役立つツールがあります。それは、電磁気モデリングです。スウェーデンのカールスクローナにある NKT 社のチームはこれを用い、ケーブルの設計を仮想的にテストし、ケーブルのパラメーターの違いが装甲損失に与える影響を可視化し、さまざまな設置条件におけるケーブルの性能を予測することができます(

図2)。ケーブルのコストが高騰している現在、設計者はシミュレーションによってケーブルの損失を解析し、必要な導体サイズを小さくすることで、ケーブルのコストを削減することができます。しかし、設計が完了して販売された後、製造されるまではケーブルを測定することができないため、設計者はモデリングツールが必要な解析を実行し、正しい結果を得られること

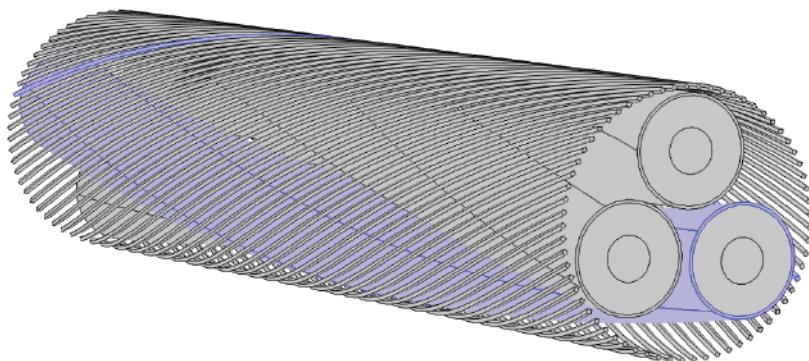


図 3 装甲海底ケーブルの基本構造である、主導体、スクリーン、装甲を含む3Dケーブルモデルのジオメトリ。

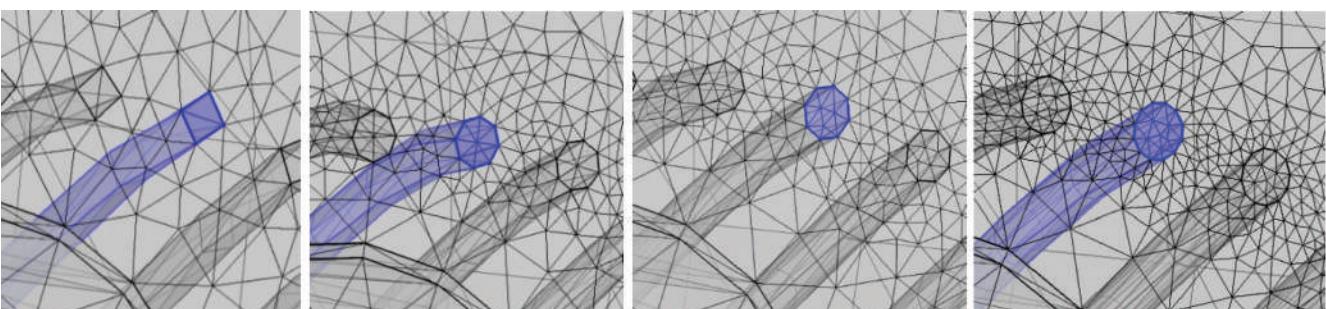


図 4 ケーブルモデルのメッシュ度の違い(左から右に向かって線径あたり1~4個のメッシュ要素)。

に絶対的な自信を持つ必要があるのです。

» ケーブルモデリング の制限を回避する

ケーブルの設計をテストする際に問題となるのは、規格が少し古いということです。実際、IEEE や IEC のケーブル規格の中には、約 80~100 年前に導出された解析式を、手計算ができるように簡略化して使っているものがあります。この 10 年間で、いくつかの出版物で、規格の公式が装甲損失を過大評価していることを示す測定結果が発表されました。いくつかのケースでは、損失が IEC 規格の値の約 50% になっています。ケーブルが流すことのできる電流は、導体温度の最大許容値によって制限されるため、損失を減らすことで、導体サイズを小さくすることができます。導体サイズが小さくなれば、高価な金属である銅やアルミニウムの使用量を減らすことができ、ケーブルプロジェクトのコスト削減につながります。

10 年前に開発された方法で装甲損失を正確に測定することは可能ですが、それにはケーブルが必要です。高圧の洋上風力発電所用ケーブルはほとんどが特注品なので、プロジェクトが売れて製造が始まる前にテストすることはできず、入札の段階ですでにケーブルを設計する必要があるのです。数値解析の導入により、ケーブルや装甲ワイヤーの研究は容易になりましたが、まだ多くの課題が残っていました。実際、ケーブルの 3D モデルが初めて作られたのは 10 年足らず前のことです。さらに言えば、この種のモデルは、つい最近までスーパーコンピューターで実行するのに数日から数週間かかっていました。しかし、コンピューターのハードウェアとモデリング技術の両方が進歩したことで、ケーブルの設計と解析はより迅速かつ容易になり、堅牢性も向上しました。例えば、以前はスーパーコンピューターが必要だったケーブルモデルが、今では標準的なノートパソコンでも数分で実行できるようになりました。これらの機能強化により、NKT 社の研究に新たな可能性が生まれました。

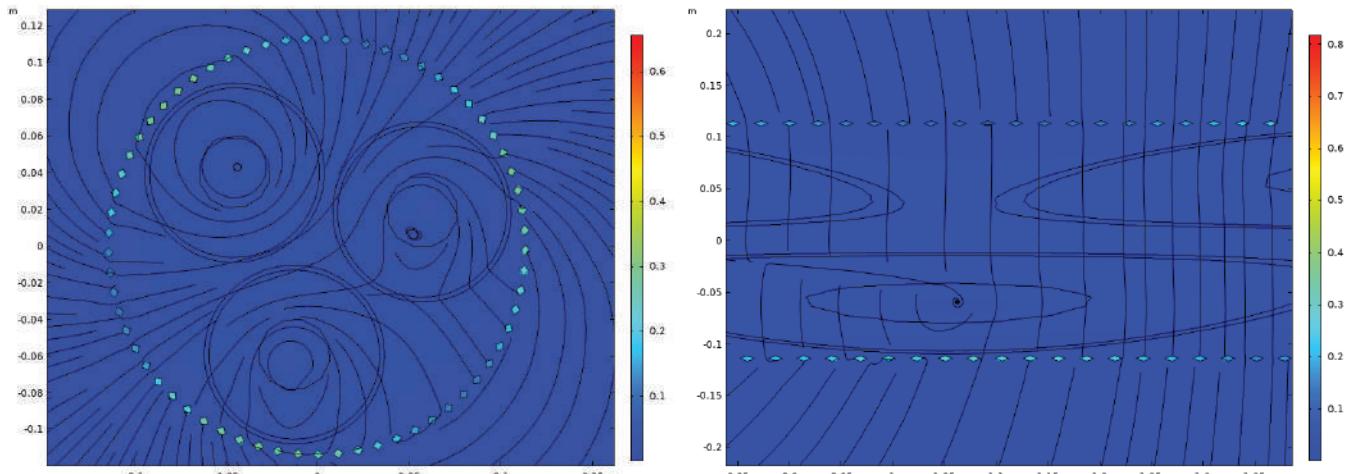


図 5 3D磁束の可視化では、断面図(左)面図(右)の2つの異なるビューに対して、磁力線がケーブルの構造をどのように通過するかを示しています。

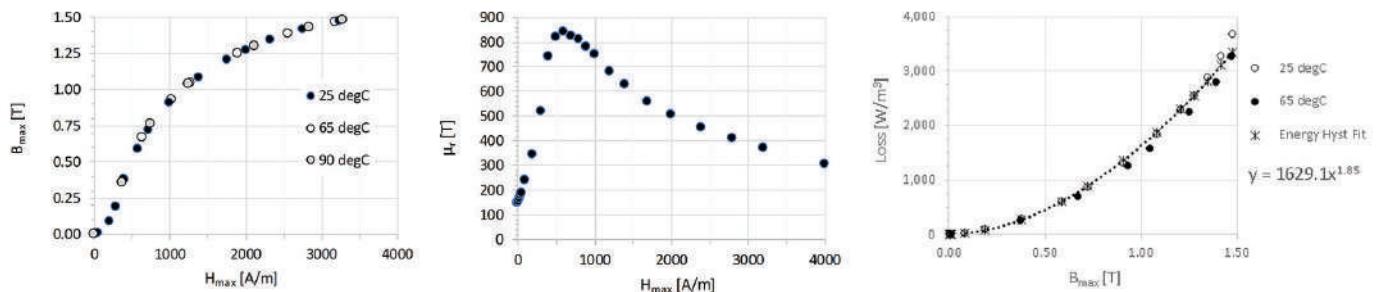


図 6 ヒステリシス曲線から算出したケーブルの磁気特性。

» 装甲ケーブルの3D モデリング

NKT社では、ケーブルの電気的なシミュレーションや、温度分布とそれに伴う損失の計算などを行っています。装甲ケーブルでは、磁性鋼の装甲の損失を計算するのは困難です。これは、能動導体と受動導体の複雑な相互作用に加え、非線形の材料特性(ヒステリシス)や温度依存性があるためです。さらに、装甲ケーブルのモデル(図3)のジオメトリには、装甲ワイヤーとの間の狭い隙間のような小さくして詳細な特徴が含まれているため、メッシュ要素の数が多くなり、計算時間が長くなり、必要なメモリ容量も増えてしまいます。これらの課題を解決するために、NKT社は、ケーブルモデル(図4)のメッシュを粗くしても、高透磁率でヒステリシス損失の大きい強磁性軟鋼の非線形磁気挙動を正確に記述できるかどうかを検討しました。

そこでグループは、シミュレーションソフトウェア COMSOL Multiphysics®と、ケーブル解析に特化したアドオン AC/DC モジュールに目を向けました。このソフトウェアでは、装甲ケーブルの3D モデリングを行い、磁場の解析や装甲の損失を計算することができます(図5)。ケーブルのモデリングにかかる計算コストの

話に戻ると、Ola Thyrvin 氏は、COMSOL®ソフトウェアの機能の中で特に役に立ったものを挙げています。モデルのサイズを小さくすることで、このアプリケーション分野に特有の計算時間とメモリの必要量を削減するとともに、関連する物理現象をすべてモデルに取り込むことができました。「このモデルでは、1本の導体と1本の装甲ワイヤーが再び出会うままでを表現する必要があります」と Thyrvin 氏は言います。もう一つのメモリ節約型モデリング手法は、無限要素の使用です。これにより、必要なメッシュとメモリを制限しつつ、モデリング領域にケーブル周囲の十分な量の空気を含めることができます。

» パフォーマンスの向上、正確な計算

NKT社チームのモデリング手法は、主に3つの段階で構成されています。まず、事前定義された電流駆動のモデルを構築します。この電流は、ケーブルのインピーダンスや温度変化の影響を受けず、システムの負荷によって制御されます。次に、チームは渦電流損失を、事前定義された温度で装甲ワイヤーを流れる局所電流によって引き起こされる損失として計算しまし

た。その結果、渦電流損失は、装甲ワイヤーの外周、相導体に近いワイヤー部分のスクリーニング電流に支配されることがわかりました。最後に、B場の関数を装甲ワイヤーの体積で積分することにより、磁気ヒステリシス損失を計算します(図6)。

2019年に開催された、第10回絶縁電源ケーブルに関する国際会議(参照4)でのNKT社の論文 "測定によって検証された3Dでの装甲損失の高速モデリング" では、精度を大きく損なわずに性能を向上させる方法をさらに示しています。まず、装甲の表皮深さを求解しなくても、適切な幾何学的補正係数と適合した材料パラメーターを用いれば、現実的な損失値を計算することが可能であることを発見しました。典型的には、IEC規格が提供するものよりも現実的であり、いくつかのケースでは、測定精度の範囲内に収まっています。

さらに、粗いメッシュでモデルを実行しながらも、局所的なHではなく装甲ワイヤーの平均的なH場のみを考慮することで、実験的に得られた材料データにフィットした一様な実在のμ値を使用しています。したがって、透磁率は非線形や虚数ではありません。それどころか、

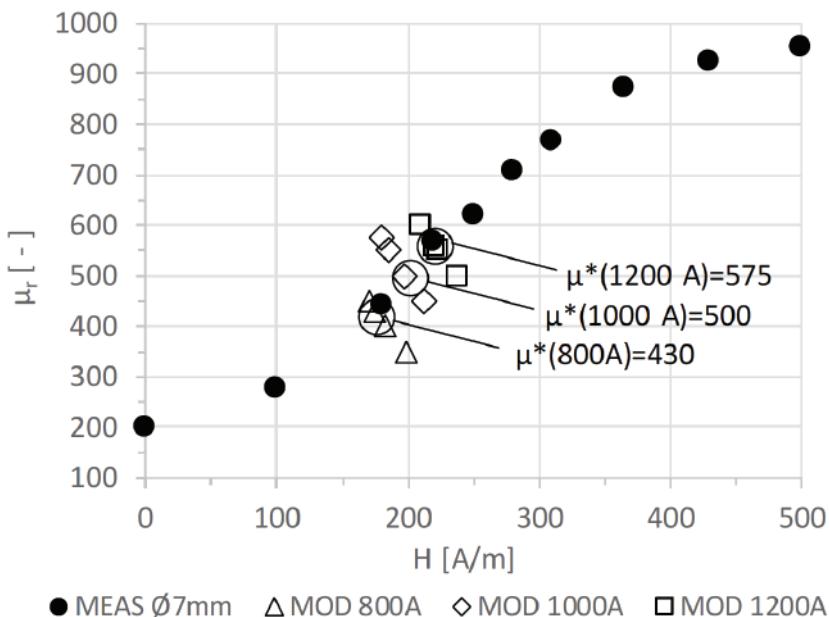


図 7 ケーブル設計における3つの異なる電流に対するモデル化された μ (Have)と、装甲ワイヤーの測定された μ -H 曲線。

ケーブルの特定の動作点を考慮して、平均的な装甲ワイヤーのH場の正しい値に設定されています。解が得られれば、ポスト処理として損失を後から計算することができます。これは、測定からある電場強度で得られる損失が正確にわかっているからです。そのため、彼らのモデルでは、ヒステリシス損失は、ケーブルの電圧応答や電流応答とは電気的にリンクしていないません。

正しい実効透磁率を得るために、チームは

モデル化された各電流に対して異なる μ 値で3Dモデルを実行しました。また、粗いメッシュを使用した場合の装甲ワイヤーの断面積の減少を考慮して、各解からH値を計算し、平均しました。そして、 μ 値と平均H値を測定した $\mu(H)$ 線の曲線にプロットしました。その結果、 μ 値が大きいほど平均H値が小さくなり、逆に μ 値が小さいほど平均H値が小さくなることがわかりました。最終的には、測定した曲線との交点から、ケーブルの動作点における

正しい実効値を求めました(図7)。

» ケーブルモデルの結果の検証

どんなにモデル化しても、その結果が現実のデバイスの物理的特性を正確に表していないければ意味がありません。Thryvin 氏らは、ケーブル解析のシミュレーション結果が正確であることを確認するために、既存のケーブルデータを用いて検証を行いました。ケーブルの装甲損失を計算すると、モデル化された結果は、実験的にケーブルから測定された損失の3%以内に収まっていることが分かりました(図8)。これだけでも素晴らしいことですが、この結果は、モデル化するケーブルの種類に応じた IEC 規格(総損失が測定値と比べて10~30%異なる)よりも実際には精度が高いものです。

» ケーブル解析の信頼性を高める

3D ケーブルモデルの検証結果によって、NKT 社はシミュレーションがケーブル設計を検討する上で信頼できる方法であることがわかりました。この知識は、NKT 社にとって非常に大きな効果をもたらしました。一つは、事前に検証された結果に基づいてシミュレーションが正確であることを確認しているため、毎回測定値と比較することなく、自信を持ってケーブルを検討できることです。今では、測定する代わりに、シミュレーションすることができます。作る前にシミュレーションすることはできますが、作る前に測定することはできません。現在、NKT 社はシミュレーションソフトウェアを使用して、シミュレーション解析に基づいて、製造前にケーブル損失の大きさを把握することができます。◎

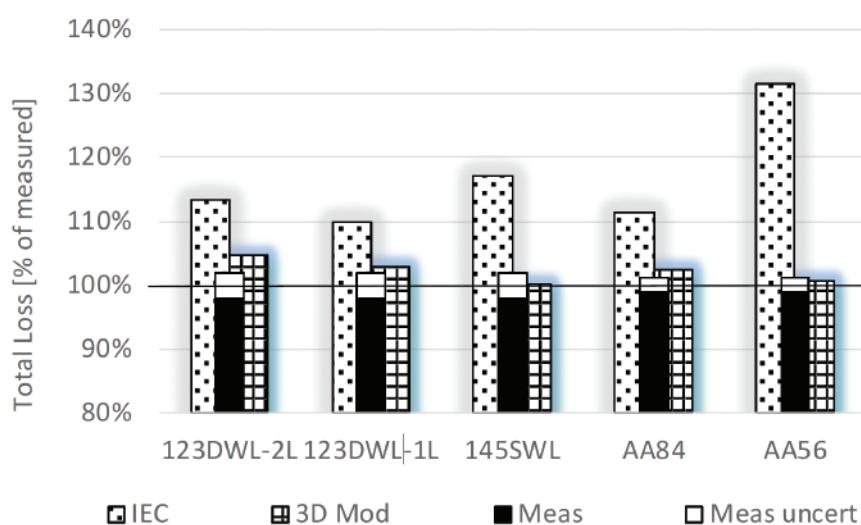


図 8 5つのケーブル設計において、測定され、損失をモデル化された、検証 IEC 結果。

参考文献

1. "Wire and Cable Market (Type - Wire, and Cable; Voltage Type - Low Voltage, Medium Voltage, and High and Extra High Voltage; Applications - Power Transmission and Distribution, Transport, Data Transmission, Infrastructure): Global Industry Analysis, Trends, Size, Share and Forecasts to 2024", Infinium Global Research, 2020.
2. M. Ardelean and P. Minnebo, "HVDC submarine power cables in the world", Institute for Energy and Transport, pp. 50–51, 2017.
3. G. White, "Insurance and Risks in the Underground Cable World", SubOptic, 2013.
4. D. Willen, C. Thidemann, et al., "Fast Modelling of Armour Losses in 3D Validated by Measurements", 10th International Conference on Insulated Power Cables, C7-4, 2019.

Mahindra & Mahindra Limited, India

シミュレーションアプリで自動車製品開発を推進

Mahindra & Mahindra Limited (M&M) 製品開発部門では、シミュレーションアプリによって製造、設計、CAE（コンピュータ支援型エンジニアリング）チームのコラボレーションを促進しながら、製品開発のライフサイクルを加速させています。2018年には、M&M が開発ワークフローにアプリを導入することで有望な効果を確認したことを記事にしましたが、今回は近年の結果を見ていきたいと思います。

ADITI KARANDIKAR 著

製品開発は一刻を争うプロセスであり、インドの自動車業界における多国籍 OEM 企業である Mahindra & Mahindra Limited (M&M) のような自動車関連企業は、製品開発のライフサイクルを短縮し、競合他社よりも優位に立つための革新的なアプローチを常に模索しています。シミュレーションは、試作品への依存度を低減し、製品の市場投入までの時間を短縮することで、この取り組みにおいて重要な役割を果たしています。

しかし、シミュレーションを導入しても、製品設計には多くの時間がかかります。設計者は、新しいコンセプトを素早く評価することを求められますが、解析の複雑さが要求されるため、それが不可能な場合もあります。設計チームは、CAE チームの評価を受けた後、CAE の結果に基づいて設計を修正し、再び CAE エキスパートの検証を待ちます。これらの反復作業

は、最終的な設計が得られるまで続きます。

その結果、設計の最終段階までに必要な反復回数に応じて、車両部品によっては設計リードタイムが数ヶ月に及ぶこともあります。さらに、設計の反復間の CAE 解析に時間がかかるため、CAE エキスパートは、組織内の複数の部門にまたがる中間的な設計評価をこなす必要があります。

COMSOL Multiphysics® のようなシミュレーションソフトウェアには、アプリケーションビルダーが搭載されているため、専門家でなくともシミュレーションの力を利用することができ、M&M 社のような企業がこのボトルネックを解消するのに役立っています。M&M 社のメソッド開発チームは、設計、試験、騒音、振動、ハーフェンス (NVH) 解析など、さまざまな分野のチームで使用されている 20 近いシミュレーションアプリケーション（アプリ）を開発しました。これら

のアプリケーションは、COMSOL Server™ と COMSOL Compiler™ の両方を使用して組織内に展開されています。

これらのアプリを利用することで、設計チームはエンジニアリング解析ツールにアクセスできるようになり、コンセプト段階から新しい設計の検証に積極的に参加できるようになります。CAE の専門家とより効率的に協力することができます。その結果、ロバスト設計に到達するまでの反復作業が最小限に抑えられ、CAE チームは他のプロジェクトに時間を割くことができるのです。

» シミュレーションアプリのメリット

M&M 社チームは、アプリを使用することで、コンセプトの評価や最終決定がより容易になることを発見しました。アプリを使えば、デザイナーはさまざまな設計を自分で試し、設定された基準に基づ

いて客観的にランク付けすることができます。アプリのパラメトリックな性質は、様々な設計オプションを迅速に評価するための利便性と柔軟性を提供し、詳細な 3D 解析を行うよりも所要時間を短縮することができます。

アプリは、CAD が使えるかどうかに依存しないため、設計がコンセプト段階にあるときに特に有効です。以前は、CAD チームによる設計レイアウトの提供によってプロセスが制約され、設計のリードタイムがさらに長くなっていました。ここでアプリを導入することで、設計評価をより早く開始できるようになりました。詳細な CAD が入手できない場合、アプリは出発点として使用できるのです。いくつかのアイデアが評価され、CAD は最終候補の設計に対してのみ準備されます。

例えば、筐体コンセプト設計アプリでは、NVH 解析を行いながら、振動の基本周波数や曲げ、ね



図 1 CAE エキスパートは、多くの場合、複数のプロジェクトで設計の反復を行う必要があります。

じり剛性などの主要な指標をより速く評価することができます。アプリのユーザーは、境界条件やメッシュを手動で追加する必要がなく、アプリが自動的にやってくれます。これにより、同じ設計サイクルでより多くのコンセプト設計を評価できるようになったのです。

もう一つの重要な点は、コンセプト設計の可視化です。以前のプロセスでは、設計者は時間のかかるツールを使用したり、他のチームに依存して自分の変更が結果的に設計に与える影響を観察したりしていたため、直感的な修正を提案することが難しくなっていました。アプリを使用することで、設計者はさまざまな設計を可視化し、主要なパラメータを変更した場合の結果の設計への影響を確認することができます。これにより、M&M 社のチームは、設計コンセプトの実現可能性について、より多くの情報に基づいた判断を下すことができます。これは、スタビライザーバーアプリで示されています。このアプリでは、様々な設計コンセプトを迅速に評価するために、簡略化されたモ

ーダル解析を実行できます。

さらに、シミュレーションアプリのユーザーフレンドリーなインターフェースにより、M&M 社全体で非常に簡単かつ便利に導入することができました。COMSOL Server™ を利用して、各チームのマシンのウェブブラウザーからアプリを起動できるため、設計プロセスに簡単にアクセスできます。さらに、組み込みのレポート機能を使ってポスト処理を行い、結果を共有することで、チーム間のコラボレーションがより容易になります。

また、アプリは COMSOL Compiler™ を用いてスタンドアロンの実行可能ファイルに変換することができ、アプリのユーザーは COMSOL Multiphysics® や COMSOL Server™ のライセンスがなくてもシミュレーションを実行することができるため、アプリへのアクセスが容易になります。

» 製品開発の効率化

M&M 社チームが設計プロセスにアプリを導入して得られた最も顕著なメリットは、アプリを使用して作成された初期の設計が

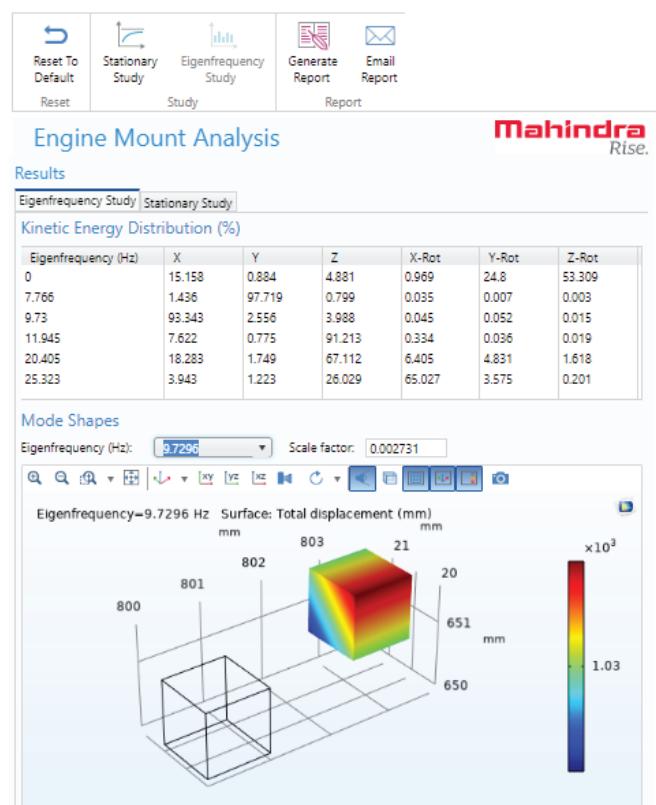


図 2 パラメトリックアプリの一例: エンジンマウント解析アプリ。画像提供: Mahindra & Mahindra Limited.

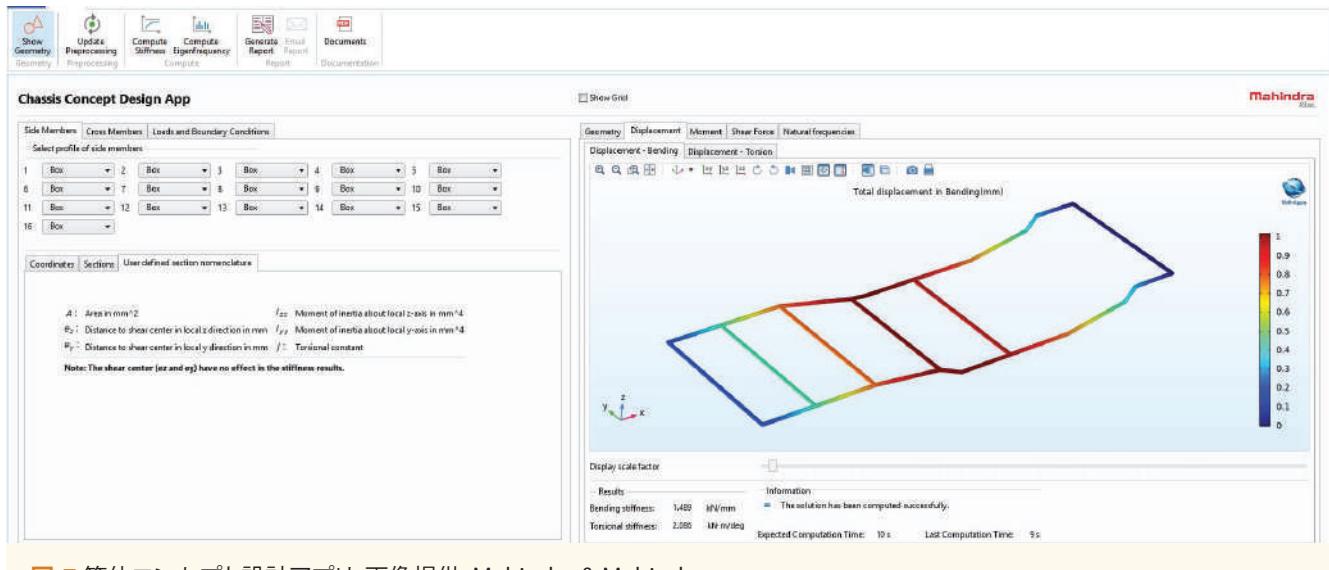


図3 筐体コンセプト設計アプリ。画像提供: Mahindra & Mahindra.

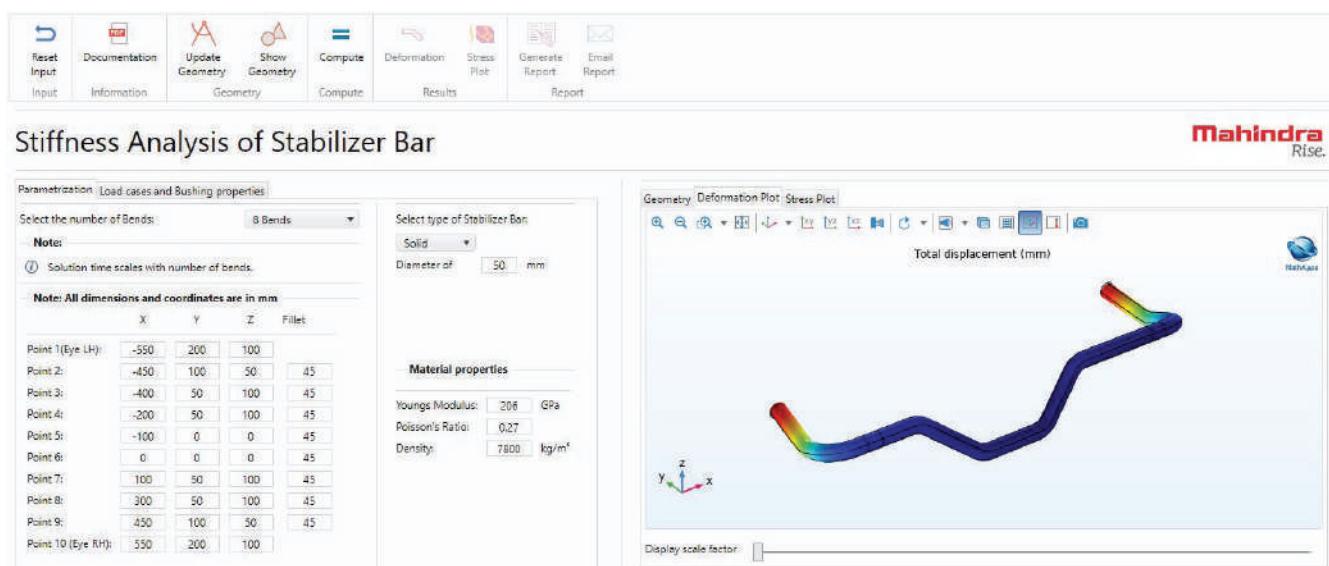


図4 モーダル解析用スタビライザーバーアプリ。画像提供: Mahindra & Mahindra Limited.

より望ましい結果に近いため、設計の最終決定までの反復回数が大幅に減少したことです。また、設計評価の前倒しにより、最低限の要件を満たした成熟した設計がCAEチームに引き継がれ、最終的な評価が行われるようになりました。軽量化や目標重量に合わせた部品設計などの重要なプロジェクトも、コンセプト段階から設計チームが推進することができます。

プロセスの変更によりコンセプト設計の数が増えたことで、設

計の最終決定までの時間が短縮され、結果的に時間とコストの両方を削減することができました。設計チームは、提案された設計を評価するためのツールを手に入れたことで、今後のプロジェクトや現行のプロジェクトで革新的な設計を生み出すことが可能になりました。これにより、M&M社の様々なチームからより多くのイノベーションが生まれています。

► その先にあるもの

M&M社では、コンパイルされた

アプリを使用することで、組織全体でシミュレーションを真に民主化することができました。自動車のさまざまなコンポーネントの設計にシミュレーションアプリを導入して成功を収めたM&M社チームは、今後もこの勢いを維持していく予定です。M&M社チームは、コンセプト設計を最適に評価するために、既存のアプリにさらに多くのロードケースと評価基準を組み込むことを計画しています。より新しく、より厳しい設計目標をアプリに反映させること

で、結果として得られる設計が最終的に期待される設計に一歩近づきます。また、関連する最適化パラメーターを含めることで、これらのアプリの効果をさらに高めることができます。◎

thermofin GmbH, Germany

冷凍および冷却技術のための熱交換器設計の最適化

屋内のスキー場を冷やす、立派な古城に空調を提供する、または消費財を冷やして冷凍する—これらのシナリオは全て熱交換器技術を必要とします。thermofin GmbHは、マルチフィジックスシミュレーションを使用して、熱交換器デバイスがさまざまなクライアントのニーズに合わせて最適化されるようにします。

RACHEL KEATLEY 著



図 1 thermofin® 热交換器は、プラストフリーザー、ハイブリッドコンデンサー、ガスクーラー(図を参照)などのさまざまなデバイスで使用されています。

2018年には、米国だけで推定9,340万トン(1億300万トン)の食料が浪費されました。これは平均サイズのシロナガスクジラの体重60万頭を超えていました(参照1)。食品廃棄物の大部分は最終的に埋め立て地に運ばれ、そこで分解してメタンを生成します。米国食品医薬品局(FDA)は、食品廃棄物が埋め立て地の材料の最大の割合を占めるとさえ報告しています(参照2)。食品はライフサイクルのどの段階でも浪費される可能性があるため、消費者と食品業界は同様に、この問題を軽減するための解決策を認識することが重要です。産業レベルで食品廃棄物を削減するのに役立つ1つの方法は、消費財が顧客の家に届く前に適切に保管されていることを確認することです。

熱交換器の大手メーカーであるthermofin GmbHは、この解決法の実現を支援する技術を設計しています。彼らの熱交換器は、世界中の商業および工業ビルの

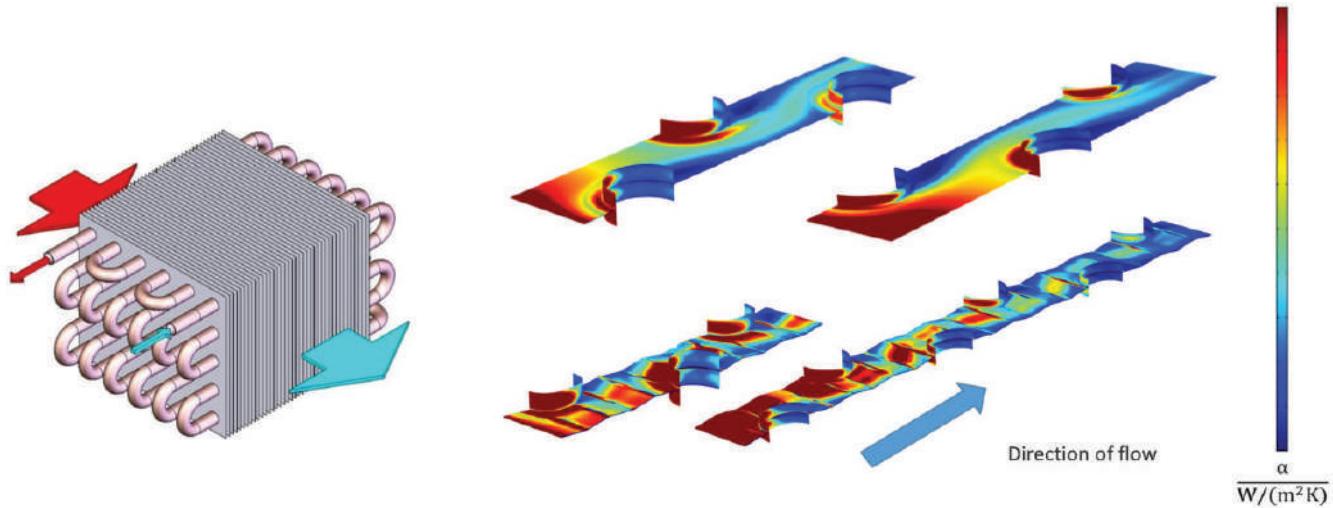


図 2 左: thermofin® 热交換器のジオメトリ。大きな矢印は空気の流れを表し、小さな矢印は冷媒の流れを表します。また、赤と青の色は温度変化を示します。たとえば、空気の流れは入口(赤)で熱く、出口(青)で冷たくなります。右: thermofin® 热交換器には、さまざまな材料特性と間隔要件のスラットまたはフィンが含まれています。これらのスラットがどのように機能するかをよりよく理解するために、thermofin GmbH はシミュレーションを使用して流れの方向を解析します。

空調および冷凍システムで使用されています。彼らのデバイスは、スーパーマーケット、冷蔵施設、アイスアリーナ、発電所などで見つけることができます。thermofin GmbH の熱力学開発エンジニアである Julius Heik 氏は、シミュレーションを実行して、熱交換器が特定のユースケースとクライアントのニーズに最適化されるようにしています。

シミュレーションをするときに Heik 氏の最も気に入っているところは何でしょう？それは、実際の測定を行う前に知識を得ることができるところです。

» 最適化された熱交換器の設計

2002年の設立以来、thermofin GmbH は6人の従業員から500人以上に拡大し、いくつかの大間に生産拠点を置いています。彼らの信頼度が高い熱交換器は、冷凍および空調業界で人気のある選択肢となっています。

熱交換器は一見単純な概念のように見えますが、実際には設計が非常に難しいことがあります。製品を冷却する上での重要なタスクは、不要な熱を取り除き、生鮮食品から熱エネルギーを抽出することです。ここで、冷凍サイクルの冷媒が動き始めます。冷媒相を液体状態から蒸気状態に変えることにより、熱交換器は周囲の周囲から熱を取り除きます。次に、この熱を別の熱交換器に移す必要があります。2番目の熱交換器は、このエネルギーを外部環境に放出します。

超臨界 CO₂ 冷凍サイクルでは、いわゆるガスクーラーが熱交換器内の冷媒を冷却します。Heik 氏によると、一般的な熱交換器、特にガス冷却器の設計にはかなりの困難が伴います。より良い、より省エネの冷凍サイクルを目指すとき、よく設計された熱交換器の設計が重要となってきます。

多くの冷却システムと同様に、ガスクーラーは環境への直接的な影響を最小限に抑えるように設計されているため、自然冷媒の CO₂ を使用します。たとえば、スーパーマーケット部門では、CO₂ は無害ガス（安全グループ A1）に分類されているため、現在ほとんど独占的に使用されています。ただし、その特性により、20~25°C を超える気温、いわゆる超臨界範囲で熱を放散する必要があります。そのため、これらのシステムは温度差が大きく、さまざまな回路で構成されており、さまざま

な材料で構成されています。シミュレーションを使用して、Heik 氏はこれらのデバイスの気流と材料特性を効率的かつ同時に解析することができます。

インナーフィン付きチューブの設計は、熱交換器を開発する際に問題を提します。これらのチューブは、熱交換器で高温の流体を低温の流体に、またはその逆に変換するために使用されます。これらのフィン付きチューブの配置、直径、材質（アンモニアを使用する場合はステンレス鋼が必要）、およびフィン間隔はすべて、使用する熱交換器のタイプによって異なります。「これらのチューブがどのように機能するかについての測定データは多くありません。」と Heik 氏は述べています。シミュレーションを使用することで、彼は、複数のチューブジオメトリをモデル化し、それらの内部および外部の熱伝達能力を解析することにより、フィン付きチューブが熱交換器の設計にどのように影響するかをよりよく理解できます。最高のパフォーマンスを提供するフィン付きチューブのジオメトリは、社内の実験ステーションで構築およびテストされています。「計算と結果が同じか類似しているかを確認し、産業用ラインに最適なチュ

ーブを採用します。」と Heik 氏は言います。

» 冷蔵室シミュレーション

熱交換器技術のシミュレーションの実行に加えて、thermofin GmbH は顧客の冷蔵倉庫もシミュレートします。ある特定のプロジェクトでは、顧客から、肉を保管する複数のロボットマシンを含む肉保管室の設計について相談を受けました。この保管室では、肉は室温で持ち込まれ、別の冷蔵室に運ばれる前に冷却する必要があります。「肉がロボット機械から落ちないように、部屋の風速が高すぎないことが重要でした。一方、部屋の全ての部分が同じまたは同じくらいの量の空気を取り込むことが非常に重要でした。」と Heik 氏は述べています。

このような冷蔵シミュレーションを実行する場合、温度分布、気流分布、相対湿度、隣接する熱負荷、自然対流など、考慮する必要のあるいくつかの基準があります。当初、thermofin GmbH は、保管室内に均一な量の空気を分配するために、顧客は5つの熱交換器を使用する必要があると考えていました。

5台のデバイスで部屋をシミュレートした後、Heik 氏はある問

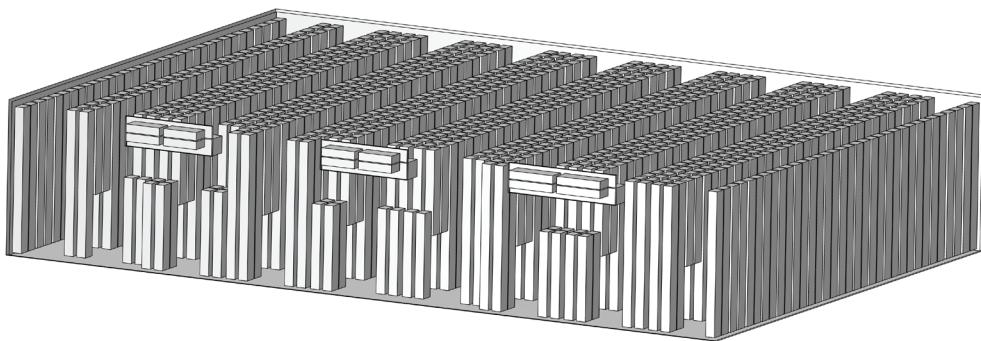


図 3 冷蔵倉庫のジオメトリ。コールドレイクの原理によって、冷たい空気が床に向かって導入され、そこで密度差によって広がって部屋の反対側に上昇し、屋根の高さで再び引き込まれるように空気が分配されています。このモデルでは、フォークリフトの通路がある収納ラックの高い積み上げ密度を考慮しています。

題に気づきました。「空気の逆流が部分的に中間天井にバイパスされるだろう。」とHeik 氏は言います。この問題を解決するためには、Heik 氏は部屋の空気誘導路をシミュレートしました。これにより、スムーズな逆流が確保され、最終的に部屋の渦の量が減少しました。thermofin GmbH のアドバイス通り、顧客は最終的に5台のthermofin® ユニットを使用し、空気誘導路を備えた保管室を建設しました。Heik 氏によると、顧客は結果に満足しており、ありがとうございました。

» 熱交換器技術の未来

thermofin GmbH がグローバルに拡大し続けるにつれて、革新的なシミュレーション作業の計画も拡大し続けています。「将来の研究計画では、新しいフィンのジオメトリの熱交換器を設計したいと考えています。」と Heik 氏は言います。このような変更を行うには、熱交換器のチューブの直径を拡張する必要があります。この変更を正常に実装するには、thermofin GmbH はまず、これらのチューブの間隔を空けるための最適な方法を見つける必要があります。「新しいフィンのジオメトリについては、自分で製作するためのツールを購入する前に、それをシミュレートする必要があります。」と Heik 氏は述べています。このような変更は、熱交換器設計の熱伝達機能を強化するのに役立つと思われます。◎

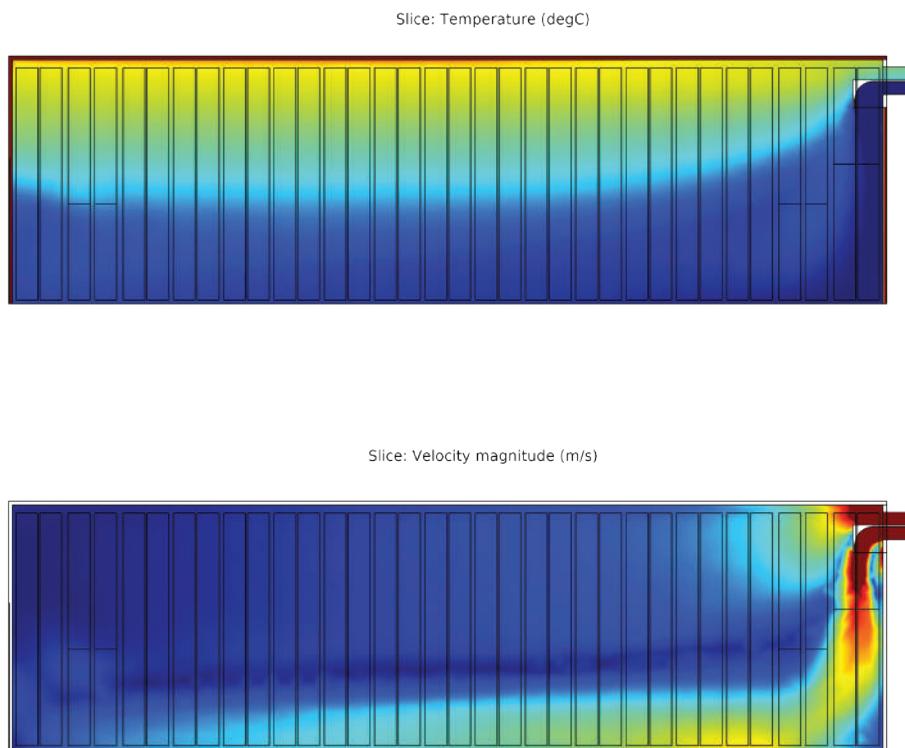


図 4 冷蔵倉庫の温度分布(上)と気流の速度分布(下)のシミュレーション。

参考文献

1. "2018 Wasted Food Report", United States Environmental Protection Agency, 2020
2. "Food Loss and Waste", United States Food and Drug Administration, 2020

TL-Engineering, Denmark

都市の中心部を緑化: 庭園のフェンス内に設置された都市の屋上の排水システム

ALAN PETRILLO 著

コペンハーゲンにある柳の枝でできた立派なフェンスには秘密があります。それは、近くのアパートの屋根から集めた雨水を流すための持続可能な都市排水システム(SUDS)なのです。シミュレーションを駆使した共同設計により、このインフラストラクチャーは、近所の庭を保護し、騒音を軽減し、頻繁に降る雨で都市の排水システムが溢れるのを防ぐ、都市のアメニティとなりました。

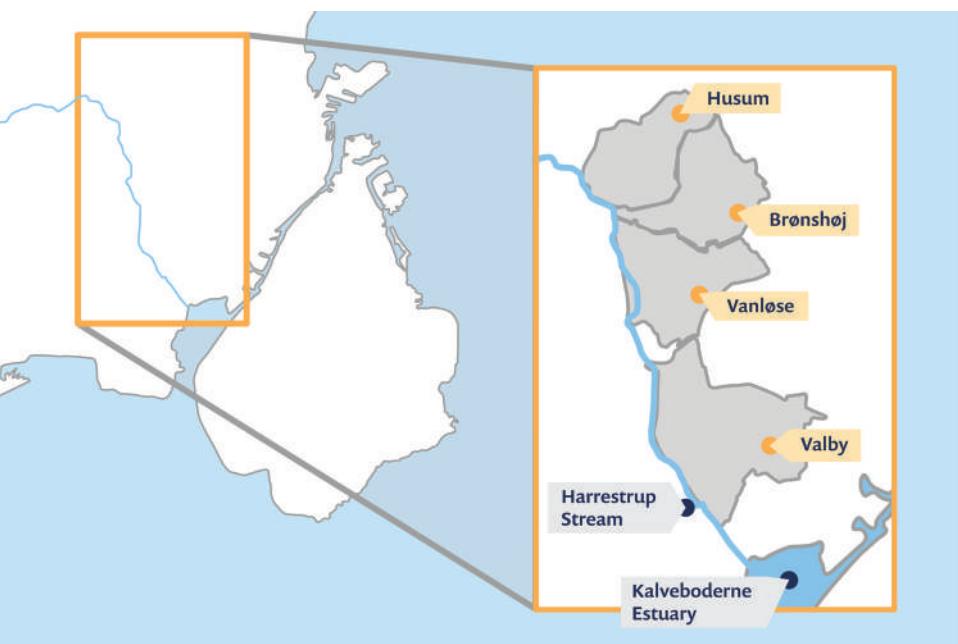


図1 デンマークの航空写真。挿入図は、人口約10万人の地域を示しています。この地域では、雨水の流出により、年間約200件の合流式下水道のオーバーフローが発生し、港に流れるカルベボーデン河口に流れ込んでいます。

コペンハーゲン大学の景観設計、計画の教授であるMarina Bergen Jensen氏は、「都市の緑地は貴重です。」と言います。そしてそれらは、しばしばストレスにさらされています。自然の美しさや静けさのオアシスとしての役割を期待する一方で、大気の質、騒音、排水の管理を、放置されがちなこれらの土地に私たちが求めています。この重要な都市空間を最大限に活用するためにJensen教授は、新しいタイプのインフラを開発するプロジェクトを主導しました。それは、コペンハーゲンの人口密度の高い地域を保護し、強化するための木材を使用したグリーンスクリーンで、近隣の屋根から流出する雨水を分散させるための独創的なシステムです。

都市のグリーンスクリーンは、都市そのものと同じように、複数の目的のためのさまざまな要素の魅力的な組み合わせです。そして都市の生活と同じように、さまざまな人々や組織がそれぞれの才能を發揮して作り上げたものです。エンジニア、建築家、そして市民の関係者からなるチームがJensen教授のビジョンをもとにより住みやすく、持続可能な都市を目指しました。このコンセプトは、人々が貴重な生活空間を建物や車、インフラと共有しているすべてのコミュニティに役

立つでしょう。

» 都市生活についてのホリスティックかつ人間的な視点

意外かもしれません、Jensen 教授の博士課程の教育は、建築や都市の分野ではありませんでした。「私の専門は土壤科学と水の化学で、土壤、水、植物、微生物の相互作用を研究していました」と彼女は述べています。「しかし、都市部は私の研究分野となっており、今はプランナーや景観設計者と一緒に仕事をしています。私の仕事は、都市生活についてのホリスティックかつ人間的な視点から成り立っています。」

コペンハーゲン(図1)の場合、この視点は、密集した開発地域で頻繁に降る雨を考慮しなければなりません。都市部の雨水のほとんどは、土壤に浸透することなく、屋上や道路などの不透水性のハードスケープと呼ばれる表面に落ちます。この水は通常、雨水管に集められるため、大雨が降ると下水処理システムを圧迫し、時には雨と廃水が混ざった水が街中に溢れてしまうこともあります。このようなリスクに対処するために、Jensen 教授とその同僚たちは持続可能な都市排水システム(SUDS)の開発に取り組んでいます。

「コペンハーゲンの雨水流出の少なくとも50%は屋根からの流出と推定されます。その水のほとんどは都市の下水道に流れ込みますが、そのようにする必要はありません。」と Jensen 教授は説明します。「自然のプロセスを真似して、より多くの水を地中に浸透させたり、蒸発させたりすることができます。」

» 屋根から屋根に雨水を運ぶ

2013年にコペンハーゲンのある密集した地域で、政府主導のイニシアチブの一環として、学際的なチームが SUDS プログラムの開発を開始しました。彼らが提案したのは、屋上の雨どいや桶から雨水を回収するソリューションでした。しかし、そこから先は、従来の都市排水システムとは全く異なります。雨水が下水道に流れ込むのではなく、重力をを利用して、自立した壁構造の上部に雨水を押し上げる仕組みとなっています。つまり、建物の屋根から取り除かれた水は別の屋根の上に堆積するということです。なぜでしょうか?

この直感に反するプロセスの目的は蒸発です。水たまりの水がやがて乾くように、このシステムを流れる水のほとんどは蒸発するのです(図3)。都市型グリーンスクリーン構造は、水を地面の上に保持し、そこで蒸発作用によって水を拡散させる、一種の垂直な水たまりとして機能します。

重力によって構造体の上部に押し上げられた雨水は、穴の開いた桶に沿って流れます。一部の水は雨桶から蒸発し、一部はスクリーンの本体に流れ落ち、そこで繊維状のミネラルウールのブロックに吸収されます。この岩石

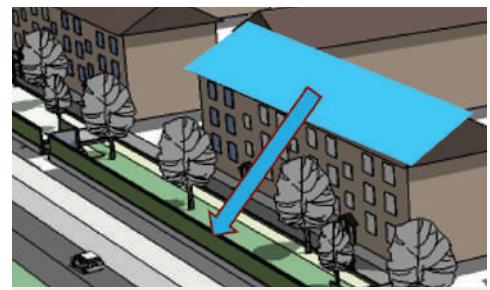
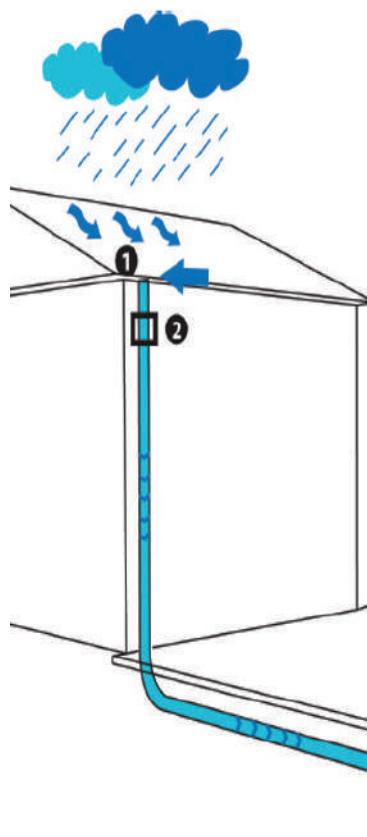


図 2 コペンハーゲンの集合住宅に提案されたSUDSの一環としての雨水の経路。建物の屋上に設置された水を通り沿いの防音壁の中に隠された蒸発システムに隠しパイプが運びます。画像提供: Emilia Danuta Lausen, Marina Bergen Jensen.

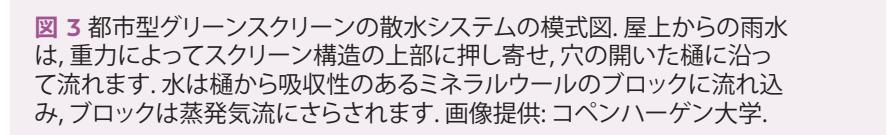


図 3 都市型グリーンスクリーンの散水システムの模式図。屋上からの雨水は、重力によってスクリーン構造の上部に押し寄せ、穴の開いた桶に沿って流れます。水は桶から吸収性のあるミネラルウールのブロックに流れ込み、ブロックは蒸発気流にさらされます。画像提供: コペンハーゲン大学。

系の素材は、北欧で保温断熱材としてよく使用されているものです。都市のグリーンスクリーンでは、スポンジのように屋根からの水を受け、徐々に空気中に放出していきます。大雨でミネラルウールブロックが完全に飽和状態になると、構造体の底から水が放出されます。この余分な水は土で満たされたチャンバーに取り込まれ、つる性植物などの装飾品を灌漑するのに役立ちます。生物多様性(昆虫、鳥など)を支える緑豊かな植生を保護するため、植物が計画に取り入れられました。

「この構造は、なるべくスペースを取らずにできるだけ水を分散させるように設計されています。」と、都市型グリーンスクリーンのプロジェクトに携わっており、水管管理を専門とする土木技術者の Kristoffer Ulbak 氏は述べています。

「水の問題だけではなく、それ以外の解決策にもなると私たちを考えました。騒音防止の役割を果たし、道路からの粒子状汚染物質を吸収する可能性もあります。」と彼は言います。また、蒸発作用は、都市が周辺の地域よりも著しく暖かくなるという都市のヒートアイランド



図 4 デンマークの高速道路に設置されたPilebygの防音壁。

現象を軽減することができます。

» 墙ではなくフェンスを: 都市の隣人間の仕切りの必要

このような機能的なニーズに応えると同時に、デザインチームは、Jensen 教授が言うホリスティックかつ人間的な視点を考慮する必要がありました。ゆっくりと蒸発する水で満たされた、

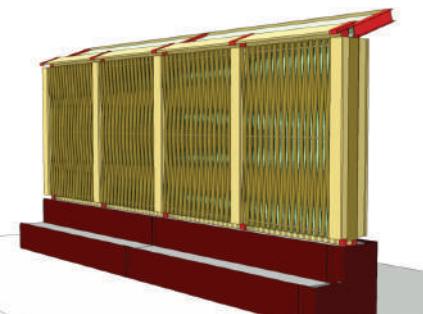


図 5 都市型グリーンスクリーンの最終デザインを示す図。スチール製のフレーミングと構造フレームが、柳の葉で覆われたミネラルウールのブロックと、屋根と樋のアセンブリを支えています。画像提供: TL-Engineering.

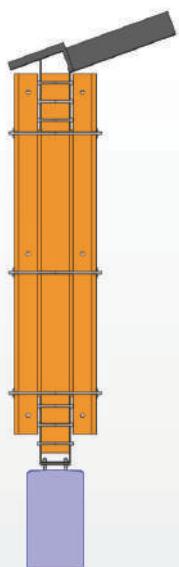


図 6 都市型グリーンスクリーンモデルのジオメトリ。画像提供: TL-Engineering.

強固で高い壁は、機能的な利点はあっても、前庭に置きたいと思う人は少ないでしょう。「プロジェクトの初期段階で、住民とのミーティングを行いました。」とJensen教授は説明します。彼らの中には、(スクリーンが)自分たちのコミュニティを刑務所のようにしてしまうのではないかと心配する人もいました。

住民の方々の悩みは、地域の家具はインフラだけとしてではなく、建築物として成り立たなければならないということを思い出させてくれました。この点を考慮して、都市型グリーンスクリーンのスチールフレームやミネラルウールのブロックはほとんど見えません。金属や石材の壁ではなく、木製のフェンスのように見えます。また、このスクリーンには腰掛けられる

ベンチや草原の植物が植えられています。2つの窓は通りに面していて、スクリーンの両端にある窓は、歩行者が通過する際に角を曲がった先の様子を確認できるように安全性を確保しています。魅力的で構造的に健全でありながら水管の目標を達成するこの設計を達成することは、プロジェクトチームにとってかなり大きな課題でした。

「私は土木技師です。」とUlbak氏は言います。「水の蒸発についてはよく知っています。しかし、私たちは他の問題にも取り組まなければなりませんでした。会議で、ガラスの壁を作るのは本当に大丈夫なのか」と聞く人もいました。通りが見えなくなることを気にしていたのです。しかし、このプロジェクトの概要是水を分散させる壁を作ることでしたが、ガラスから多くの水を蒸発させることはできません。「これが、私たちが直面していくつかの障害です。一歩進むごとに、よりよい解決策を求めて何ヶ月ものやりとりをしていました。」

» 排水設備を隠すための柳の棟

この時点で、コンサルティング構造エンジニアシミュレーションのスペシャリストであるTL Engineering社のTim Larsen氏がプロジェクトに加わりました。彼のインフラプロジェクトでの経験とスキルのおかげで、チームはグリーンスクリーンの複数の課題を解決することができました。「私がプロジェクトに参加した当初は、さまざまなアイデアが出されていました。私が見た建築図面は、風が吹けば倒れるようなデザインでした。」とLarsen氏は振り返ります。「私は完全なスチール構造を提案しましたが、それはコミュニティには受け入れられないと言われました。そこで私が提案したのがPilebygへ相談することでした。」

Pilebygは、デンマーク語で柳と建物を意味する言葉を組み合わせた名前で、30年以上にわたり柳の木を使って革新的な構造物を作っていました。プロセスとしては、幹が比較的均一な曲線になるようにを栽培します。その後採れた幹を、鉄やほかの木材でできた支持枠に織ります。特別な処理により、柳の下地は何十年も持ちこたえることができ、構造体を保護すると同時に、景観にも貢献するのです。「古い木を醜いとは言わないでしょう。」とPilebyg社の共同オーナーであり、今回のグリーンスクリーンプロジェクトのプロジェクトマネージャーであるVibe Gro氏は述べています。「私たちが提供するのは、美しく年を重ねるファサードです。」

» 設計、構築プロセスをシミュレーションがサポート

デンマークの高速道路では、Pilebygと呼ばれる防音壁がおなじみになっています。しかし、Pilebygにとって、排水、蒸発システムを隠したフェンスを作るプロジェクトは初の挑戦でした。複数の素材と機能を組み合わせ、頑丈で調和のとれた構造を作るために、

土木工学の修士号を持つTim Larsen氏はCOMSOL Multiphysics®を使ってシミュレーションを行いました(図5)。

「面白いことに、Timはプロジェクト開始時には参加していませんでしたが、実行可能なソリューションにたどりつくためには彼の作業が不可欠でした。」とUlbak氏は述べます。Ulbak氏はシミュレーションの使用は、おもちゃを作るための説明書を見るようなものだと説明します。プロジェクト関係者はシミュレーション結果を見て、プロジェクトのすべてのピースがどのように組み合わされているかを知ることができます。

Tim Larsen氏はシミュレーションを使って、構造物がコペンハーゲンの気候に適しているかを確認しました(図6-7)。マルチフィジックス解析によって、風圧、多孔質の外装を流れる水、コアのミネラルウールを浸す水によって生じる様々な荷重に耐えられることが確認できました。

「このような構造物には多くの材料が使われており、小さな変化が大きな影響を与えます。」とLarsen氏は言います。「上に少し張り出しているだけでは大したことがないように見えますが、そこに水が溜まると、特に風が吹いているときには大きな曲げモーメントが発生します。」と説明しています。

プロジェクトが完成に近づくにつれ、COMSOLモデルの画像が他の関係者と共有されるようになりました。建設を担う作業員に提供された回路図は、資金提供してくれた団体に説明するのにも役立ちました。「シミュレーションは解析ツールであると同時に、設計上の議論をサポートしてくれるものもありました。」とKristoffer Ulbak氏は述べています。

» グリーンスクリーンを増やすための種まき

約6年の開発期間を経て開発された都市型グリーンスクリーンは2019年にコペンハーゲンに設置されました(図8)。完成した構造体は、(ガラス製の壁を望んでいた人も含めて)設計に携わったすべての人の優先事項を満たしています。縦に並んだ一連の窓は、柳で覆われた表面に視覚的な切れ目を与え、コミュニティの安全性を確保するための目になっています。

これまでのところ、構造物は湿気を分散させ、交通騒音を静めることに成功しています(図9)。「通りからスクリーンの住宅側に移動すると、まるで楽園にいるようです。」とJensen教授は言います。様々な関係者の反応はポジティブなものでした。しかし、COVID-19の世界的な流行などにより、構造物を詳細に見るのは難しくなってしまいます。Jensen教授は、彼女の学者としての視点にふさわしく、成功したと宣言する前にもっと研究したいと考えています。

「私たちは、住宅側の空気の質の方が良いと思っており、蒸発冷却により、都市のヒートアイランド現象が緩和されるはずだと考えています。これを確認するためには、より多くのテスト

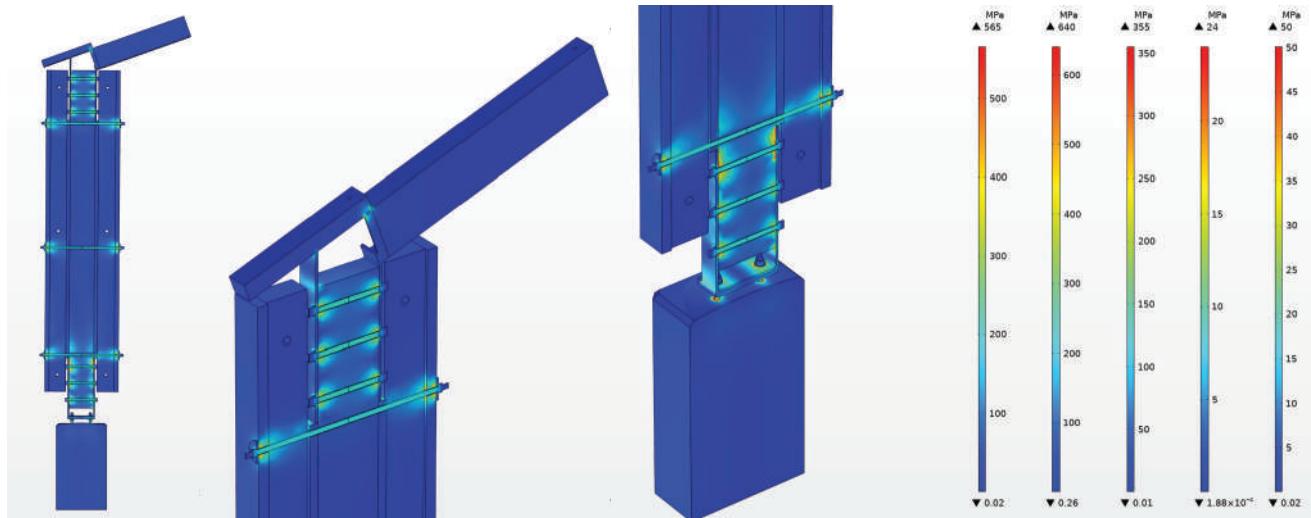


図 7 都市型スクリーンの応力解析の結果. モデル画像提供: TL-Engineering.



図 8 2019年(左)と2020年に完成した都市型グリーンスクリーンの断面図. 縦長のガラス窓と、スクリーンと建物の間に自生する植物が出現していることにご注目ください。

が必要です。」と彼女は言います。「また、認識の問題もあります。人々がどのようにこの空間を利用しているのかをモニターして、毎日この構造物と共に生活する住民にインタビューしたいと考えています。」

このプロジェクトは、今後のフォローアップを待っているところですが、すでにグリーンスクリーンが受け入れられていることを示す証拠があります。それは、未だ落書きがされていないということです。Vibe Gro 氏は驚きません。「私

たちの構造物は荒らされることの多い場所に設置することが多いですが、たとえ構造物の一部でも、人々は木の周りでは違う行動をとるようです」と彼女は言います。「騒音問題を解決するための雨水ソリューションでもあり、人々が安心して暮らせる構造物にもなっています。デンマーク語では、「一撃で二匹のハエを殺す!」と言います。◎

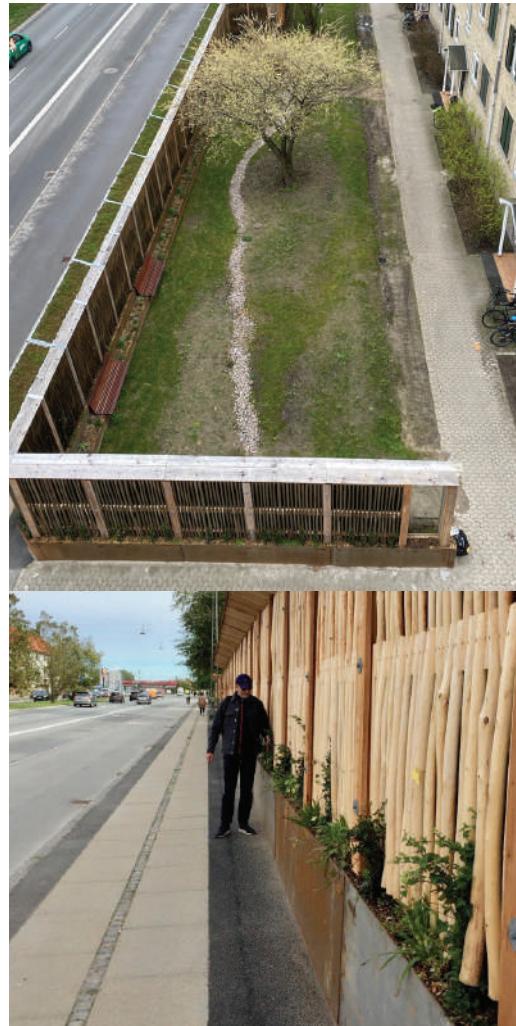


図 9 完成した構造体の俯瞰図と、都市型グリーンスクリーンのストリートサイドビュー。

MicroPort CRM, France

リードレス心臓ペースメーカーの体外通信の検討

リードレス心臓ペースメーカー (LCP) は、心拍管理のための最先端技術となっています。MicroPort CRM 社では、数値シミュレーションを用いて、多ノードの LCP システム間の通信を最適化しています。

DIXITA PATEL 著

近年のペースメーカー技術は、電子機器の改良や電池の小型化などにより、リードレス心臓ペースメーカー (LCP) の開発を可能にしています。LCP は、発電機と電極が一体化したカプセル型のシステムで、故障の原因となるポケット型や経静脈型のリード線を必要としません。現在市販されている LCP は、心臓の1ヵ所でペースを上げるものですが、单室以上の刺激が必要な患者には、マルチノード LCP システム (図1) を使用することができます。マルチノード LCP システムが正常に機能するためには、植え込まれたすべての機器間の同期が必要です。しかし、標準的に使用されている通信技術では、消費電力やサイズの面で制約があり、適さない場合があります。

システムと通信をより効率的にするために、MicroPort CRM 社の研究者は、ガルバニック体外通信 (IBC) を用いてシミュレーションを行い、これらの設計上の課題を調査しています。IBC はデバイス間の通信を促進するために、電力に最適化されたソリューションを提供し、マルチノード LCP システムの同期化に貢献します。

» LCP アプリケーション用体内通信トランシーバー

体内通信 (Intrabody Communication: IBC) は、

電極ペアを用いて体組織を介してインパルスを送信し、その信号を受信する第2の電極ペアに送る近距離通信方式です。この方法は、超低消費電力で動作し、ペーシングに使用する電極が通信用の電界も提供するため、追加のアンテナは必要ありません。

MicroPort CRM 社の電子技術者である Mirko Maldari 氏のチームは、このようなタイプの通信チャネルの特性をさらに高めるための新しい方法を提案しました。「IBC では、(コイルやアンテナの代わりに) 電極を使って通信するので、消費電力とサイズの両方を最適化することができます」と Maldari 氏は述べています。今回の研究では、図1に示すように、心臓の右心房と右心室に埋め込まれた2つのカプセルからなるシステムを用いて、生体内での研究が行われました。さらに、COMSOL Multiphysics® ソフトウェアを用いてチャネルの減衰を測定し、組織内でどの程度の電力が散逸するかを推定しました。

» シミュレーションによる IBC パスロスの解析

MicroPort 社のチームは、電子設計自動化企業である Synopsys Inc. と共同で Synopsys Simpleware™ ソフトウェアを使用し、COMSOL Multiphysics® ソフトウェアにインポート可能な

人間の胴体のモデルを開発しました (図3)。このモデルは、IT'S 財団チューリッヒが検証したヒトのファントム、具体的には34歳の男性を表現した Duke モデルをベースにしています。

臓器、筋肉、骨、軟部組織、軟骨を含む幾何学的モデルを作成しました。COMSOL Multiphysics® にインポートした後、心筋と血液を区別するために、心臓の部屋の近似版を構築しました。Maldari 氏は次のように述べています。「心筋と血液は電気的特性が異なるので、これらの特徴を含めることは、私のアプリケーションにとって重要でした。」その後、COMSOL Multiphysics® を用いて2つの同一の LCP カプセルを設計し、心腔内チャネルの減衰レベルを推定しました。

カプセルは2つの異なる向きで調査し、いずれもチャネル距離は9 cmでした。シミュレーションは、COMSOL Multiphysics® のアドオン製品である AC/DC モジュールの電流インターフェースを用いた準静力学的アプローチで行い、40 kHz から 20 MHz の周波数範囲でチャネルの減衰を計算しました。図4の結果は、ワーストケースシナリオ (垂直) とベストケースシナリオ (平行) の右心房 (RA) カプセルの位置を示しています。ベストケースのシナリオでは、受信ダイポールにかかる差動電圧が高くなっています。両シナリオの減衰レベルを図5

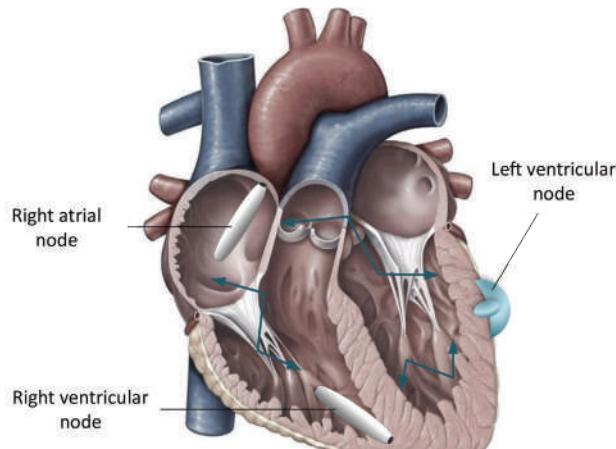


図 1 2つのカプセルを埋め込んだマルチノード LCP システム、心臓の図は Pearson Education, Inc, New York, New York の許可を得て、改変して転載しています。

図 2 IBC チャンネル研究用の LCP プロトタイプ。

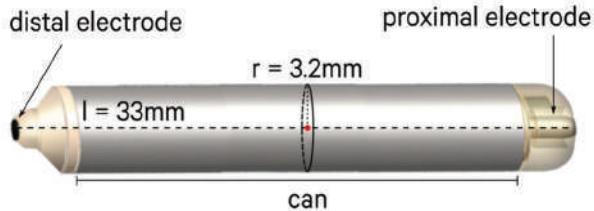


図 3
COMSOL Multiphysics® にインポートされたトルソーの CAD モデル(左)と断面図(右)。

に示しますが、その差は約11 dBです。40 kHzから20 MHzまでは、どちらのケースでも減衰量が5 dBほど減少しています。この結果から、Maldari 氏とそのチームは、カプセルの相対的な位置と向きがチャネルの減衰に強く影響することを確認できました。

Micro Port 社にとっては、プロトタイプを準備する前に、減衰レベルを見積もることが重要でした。「研究者や科学者として、我々は動物実験の量を減らそうとしています、シミュレーションによってそれが可能になりました。」と Maldari 氏は述べています。「シミュレーションはそれを可能してくれました。シミュレーションは、生体組織内の信号の挙動を、実験的に調べる前に推定するための強力なツールです。シミュレーションを利用してすることで、ガルバニック IBC 通信の正確なモデルを定義し、

LCP システム用のトランシーバーを最適化することができました。」

» IBC の今後の計画

MicroPort 社では、今後さらに研究を進め、電極サイズや双極子の長さなどの特定の入力パラメーターが、より完全な電界パラメーターセットに与える影響を調査する予定です。そうすれば、拡張期と収縮期の間の減衰の違いを指摘するのに役立つでしょう。現在、研究者たちは、LCP の同期を目的とした超低消費電力の受信機の設計に取り組んでいます。この新しい受信機は、二室型ペースメーカーに画期的な革新をもたらす可能性があります。◎

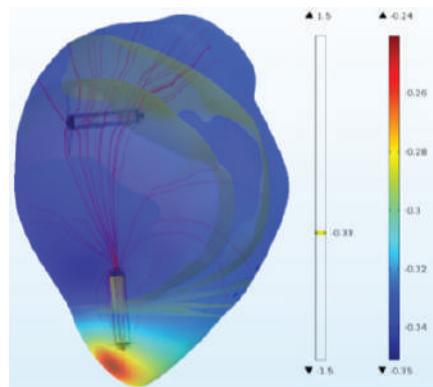


図 4 最悪のケース(左)と最良のケース(右)のRAカプセルの位置。

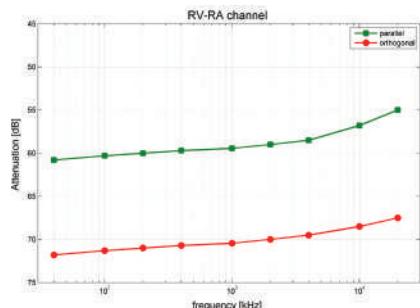


図 5 両シナリオの心腔内チャネルの減衰レベル。

Physixfactor, Netherlands

電力をつくり, DARRIEUS 水力タービンで魚を保護

オランダでは、沿岸部の洪水対策として、潮力発電にも利用できる構造物を採用しています。国やヨーロッパの厳しい規制により、魚の通り道として本質的に安全な新しいタービン設計が求められています。Water2Energy 社の依頼を受けた Physixfactor 社は、シミュレーションを利用して、Darrieus 風力タービンを水用に改良しました。従来の水力発電用タービンと比較して、Water2Energy 社の垂直軸設計では魚の死亡率が20%から1%未満に減少することが実験で示されました。

ALAN PETRILLO 著

「ここオランダは海にとても近いんです」と Helger van Halewijn 氏は言い、自分の控えめな表現に苦笑します。「北海(Noordzee)とオランダ人は切っても切れない関係にあります。この親密で波乱に満ちた関係から、オランダの人々は回復力と柔軟性を学んできました。水と戦うのではなく、警戒心を持って休戦協定を結ぶことが賢明だとされてきたのです。オランダの有名な風景である堤防、運河、ボルダーは、海を止めるのではなく、水の流れを管理可能なもの、そして有用なものに変えているのです。」

この臨機応変さは、現代のオランダのインフラプロジェクトや、それを実現する人々の中にも息づいています。「私たちは、堤防を洪水対策に利用するだけではありません。堤防は洪水対策だけでなく、エネルギー需要や魚類・環境保護にも利用できます」と、エンジニアリングデザインコンサルタント会社 Physixfactor のディレクターである Van Halewijn 氏は言います。オランダの Water2Energy 社は、これらの目標を達成するために、Van Halewijn 氏に治水構造物に使用する垂直軸水車(VAWT)のモデリングを依頼しました。Van Halewijn 氏は、マルチフィジックスシミュレーションを用いて、Water2Energy 社の VAWT を最適化し、海の生物への影響を最小限に抑えながら、より多くの電力を生み出すことに成功しました。

この潮力発電プロジェクトは、技術的には近代的であり、環境保護を重視していますが、そのルーツは脆弱な(しかし慎重に守られている)オランダの土壌に深く根ざしています。

» ゼーラントとデルタワークス: 不安定な場所を守るために

オランダで最も海に近い、そして最も海の影響を受けている地域といえば、名前に海が付いているゼーラント州ではないでしょうか。オランダ最西端に位置し、人口が最も少ないこの州は、スヘルド川、ムーズ

川、ライン川が北海に流れ込む三角州でもあります。ゼーラント州の総面積の3分の1以上が水域です。ゼーラント州のモットーであるラテン語の*luctor etemergo*(私は闘い、そして現れる)は、ゼーラント州の紋章に描かれているライオンが波間から立ち上がる様子を表しています。

ゼーラント州はオランダの中でも北海の暴風雨に非常に弱く、1953年に発生した暴風雨 Watersnoodramp はこの地域を永久に変えてしまいました。風、潮、高潮の組み合せにより、海面が平均よりも4メートル以上上昇し、堤防が決壊して16万5000ヘクタールの土地が浸水しました。1800人以上が死亡し、何万人もの人々が避難を余儀なくされました。オランダはこれに対応して、三角州地帯全体にダムや堤防などの高度なシステムを構築しました。

しかし、オランダの伝統である Deltawerken(デルタワークス)は、海と陸を完全に遮断するもので

はありませんでした。周期的な暴風雨に対する防御の必要性と、漁業やベルギーのロッテルダムやアントワープの主要港への河川アクセスなど、この地域の日常的なニーズとのバランスを取る必要がありました。そこでデルタワークスは、固定された堤防と、高潮の脅威にさらされたときにのみ閉鎖される半開放型の構造を組み合わせました。

» フィードバックループ: デルタワークスの優先順位の変化

このような大規模で複雑なプロジェクトから予想されるように、デルタワークスの建設は何十年にもわたって行われてきました(図1)。プロジェクトの優先事項は、開始から70年以上の間進化し続けています。暴風雨からの保護とともに、デルタワークスは地域の生態系を変化させてきましたが、それは必ずしも良い方向ではありませんでした。「このプロジェクトが設計された1950

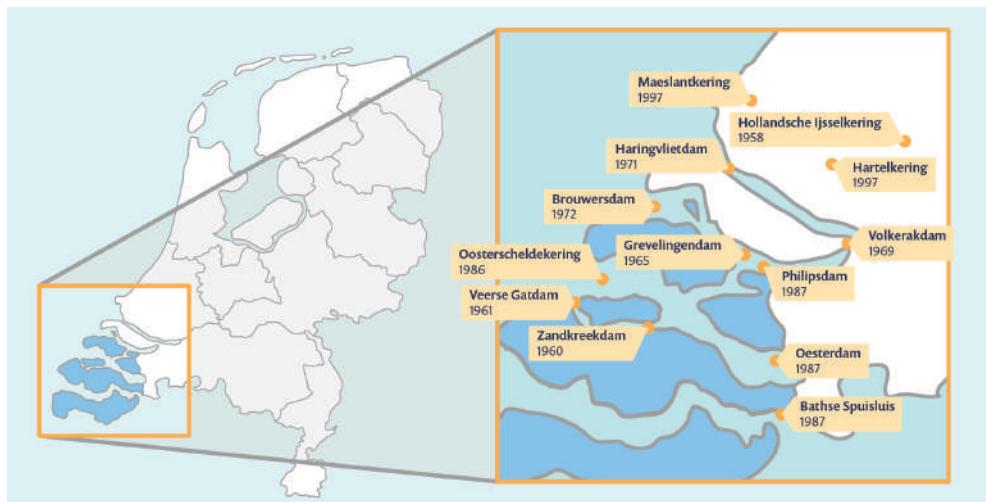


図1 オランダ、ゼーラント州とその主要な治水施設を強調した図。オランダ、ゼーラント州の原図出典はTUBS, CC BY-SA 3.0, Wikimedia Commonsより。原著には修正が加えられています。

～60年代には、まったく新しいものでした。このようなタイプの水道は世界でも例がありませんでした。」とVan Halewijn氏は説明します。「環境への配慮は今のようなものではありませんでした。」

前述のセミオープナーバリア以外にも、当初のデルタワークスでは、いくつかの河口を塞ぐダムが設置されていました。これにより、塩分を含んだ海水と河川からの淡水との間に新たな境界ができました。ダムの後ろでは、それまで潮の流れを受けていた場所が淡水の湖になっていました。「今となっては、それが間違いだとわかります。」とVan Halewijn氏は言います。1970年代以降、多くのダムには水門が設置されています。この水門は、平常時は開いていて、嵐の時だけ閉めるという制御された通路です。ダムの背後にある盆地に潮の満ち引きを再現することで、水門はカキやムール貝などの沿岸の生物が好む塩分濃度の高い環境を取り戻したのです。

» ENCOREとWATER2ENERGY: 傷つきやすい場所からの再生可能エネルギー

ゼーラント州の状況は異常ですが、気候変動による海面上昇は世界中の沿岸地域を脅かしています。何世紀にもわたって海と折り合いをつけてきたオランダのインフラ整備のノウハウは、これまで以上に世界的な意味を持つようになっています。このような背景から、オランダが「Energizing Coastal Regions with Offshore Renewable Energy (ENCORE)」のような国境を越えた取り組みを主導していることは驚くことではありません。

ENCOREは、Interreg 2 Seas プログラムの資金提供を受け、海洋再生可能エネルギーの専門家であるMET/SUPPORT社が主導する共同プロジェクトで、北海地域の気候変動に対する脆弱性と、エネルギー生産源としての可能性を認識しています。英国、フランス、ベルギー、オランダのパートナーが参加するこのプロジェクトでは、2050年までに欧州のエネルギー需要の25%を海洋再生可能エネルギーで賄うことができるとしています。参加している3社は、洋上太陽光発電、波力発電技術、河川用タービンの開発を行っています。3社目のWater2Energy社は、デルタワークスの水門を流れる潮の流れから電力を生産しようとしています。

» DARRIEUSローター: 風車を水に適応させる

水の動きが激しい場所は、水力発電に適した環境のように思えます。しかし、潮力を利用するのは簡単なようで、際には多くの課題があり

ます。従来の水力発電技術(図2)は、デルタワークスの水門への設置には適していません。「水車の設計で最も一般的なのは、カプラン型のローターです。これは、船のプロペラのようなものです。非常に高速で回転するため、ダムの水門のような狭い場所に設置すると、魚などの海の生き物にダメージを与える可能性があります。」と述べています。そこでWater2Energy社は、Darrieus型ローターを採用した垂直軸型水車(VAWT)を開発しました(図3)。

1926年に風力発電機用のDarrieusローターの特許を得たGorges Jean Marie Darrieusにちなんで名付けられたこのデザインは、水辺での使用にもメリットがあります。Water2Energy社の見解では、Darrieusローターの最も大きな利点は、その開放的な構造と動きが、カプランタイプのローターに比べて魚への危険性がはるかに少ないことです。ENCOREプロジェクトの野心的な発電目標を達成できるのか? 生態系への影響を最小限に抑えながら最大限の発電量を確保するために、Darrieusの設計に特有の多くの課題を解決しなければなりません。

» 流れに身を任せて: タービンブレードの自己最



図2 カプランタービンローターの一例。画像提供: Reinraum, CC0, Wikimedia Commonsより。

適化による迎え角の確保

Water2Energy社の潮力発電タービンにおいて、最も重要な設計上の決定事項は、ローターの垂直ブレードの最適化でした(図4)。Van Halewijn氏は、ブレードのデザインとその角度を調整するメカニズムの両方をテストして改良することで、2つの技術的課題に取り組みました。まず、Darrieusローターは、水が絶え間なく流れれる環境であっても、必ずしも自力で始動するわけではありません。2つ目の課題は、ダムの水門のような密閉された通路に設置された回転タービンは、屋外や水中で自由に回転するタービンよりも乱流の影響を受けます。

この2つの課題は、タービンブレードの迎え角を連続的に調整することで解決できます。Darrieusローターのブレードは、水流に対して正しい向きであれば、非常に低い水流でも動き出します。問題は、ブレードを動かすのに最適な角度は、タービンがすでに動いている状態では効率が悪いということです。同様に、ブレードの角度を最適化して筐体の壁をスムーズに通過できるようにしても、ブレードが他の回転点にあるときにはその角度は非効率的になります。Van Halewijn氏は、COMSOL Multiphysics®ソフトウェアを使用して、ブレードの位置の違いが性能に及ぼす影響をモデル化しました。

「これまででは、この用途に最適な設計ソリューションはありませんでした。

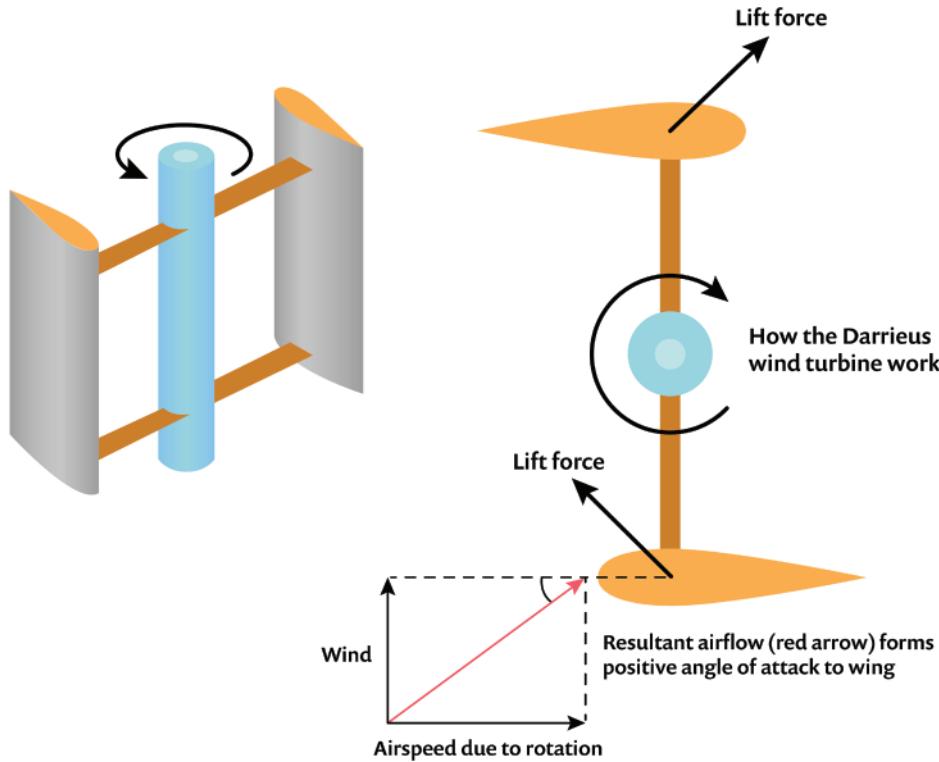


図 3 Darrieus ローターの模式図。画像提供: Saperaud~commonswiki, CC BY-SA 3.0, Wikimedia Commons より。原著には修正が加えられています。



図 4 Water2Energy 社の水車の設計図。縦型ブレードを含むロータ機構(白で表示)。

明しています。私は数学を売っているわけではありません。シミュレーションを使えば、試行錯誤を繰り返すことなく、プロジェクトを正しい方向に進めることができます。私が提供しているのは、物理学の健全な原理に基づいた、より良い意思決定なのです。」と Van Halewijn 氏は述べています。

「ブレードのプロファイルをモデル化した後、水路の壁を通過する動きのシミュレーションを行いました(図5, 6)。そのためには、ブレードの表面のメッシュを調整して、360度の回転をすべて考慮しなければなりませんでした。」と Van Halewijn 氏は説明します。「また、設計段階では、発電量を最大化するために、ソフトウェアに特別な注記を加えることができました。もちろん、魚がタービンを通過する様子をシミュレーションして、試作品のテストでも海の生物に害を与えないことを納得してもらわなければなりませんでした。

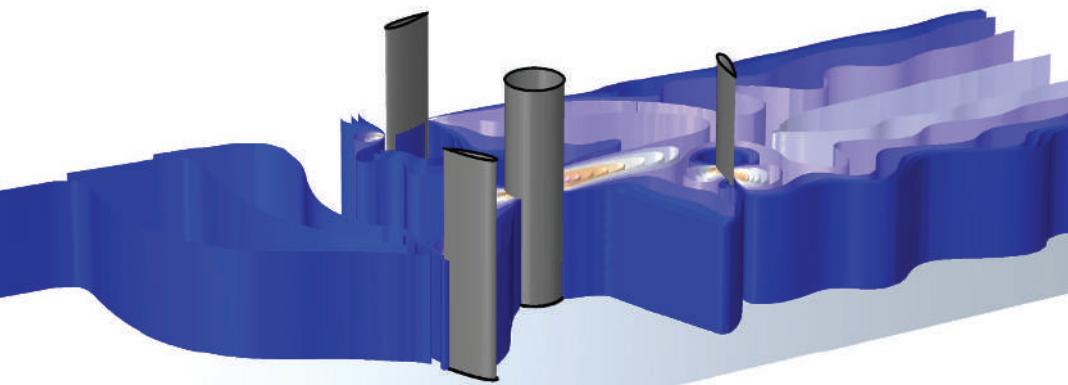


図 5 Water2Energy 社の水車を流れる流体の流れ。

んでした。Water2Energy 社にはいくつかのアイデアがありました。シミュレーションを行うことで、さらに優れたソリューションを得ることができました。」と Van Halewijn 氏は言います。「最適なアプローチを示すために、ソフトウェアでいくつかのアイデアをテストすることができました。」とも述べています。

そのために Van Halewijn 氏は、タービンのブレードを1枚だけモデル化して、最適な迎え角を求めました。タービンブレード周辺の乱流をモデル化するために、彼は COMSOL® ソフトウェアで流体の様々な計算方法を試しました。標準的な $k-\epsilon$ モデルは、この問題にはあまり適しておらず、最適な出力を得ることができませんでした。SST モデルと呼ばれるモデルは、自由流れ中の $k-\epsilon$ モデルと壁の近くの $k-\omega$ モデルを組み合わせたもので、良好な結果が得られましたが、モデル

の収束に時間がかかりすぎました。そのため、 $k-\omega$ モデルは、プロジェクトのニーズと計算資源のバランスがとれたモデルとなりました。

タービンブレード周りの乱流をモデル化した後、Van Halewijn 氏はプロジェクトに最適なブレード形状を見つけ出しました。「私はいつも、シミュレーションソフトウェアは研究開発のための意思決定ツールであるとお客様に説

» 効率的で魚にも優しい: ライブテストで新設計の可能性を確認

Water2Energy 社は、デルタワーブスの水門内で、調整羽根式 VAWT 機構のライブテストを行いました(図7)。テストの結果、出力面では、再設計されたタービンが既存の固定翼の設計を40%以上上回ることが実証されました。

Darrieus ローターは、海洋生物を保護しながら、潮流を電気に変えることができるることを証

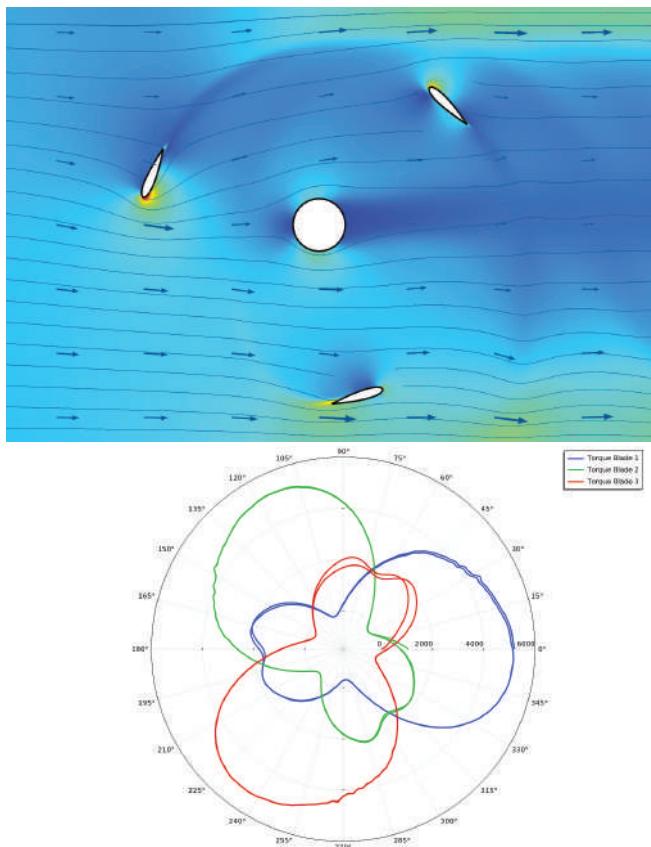


図 6 タービンブレード周りの流れ(上)とトルク(下)のプロット。

明しました。カプランローターを使用するタービンでは、通常、それを通過する魚の最大20%が高速回転するブレードによって殺されます。Water2Energy 社のタービンは、死亡率を1%未満に減らしました。水門に設置されたカメラは、マスが安全に通り過ぎて泳ぐときに、垂直調整ブレードが意図したとおりに機能していることを鮮明に示しています。

Water2Energy 社は、デザインの有効性を確認し、現在その可能性を商業化するために取り組んでいます。Climate Power Plant Zeeland というコンソーシアムが、ゼーラント州のグレーベリンエンダムに潮力発電所を建設することを提案しています。Water2Energy 社製のタービンを最大6基、合計1.6 MW の出力で、推定1000世帯分の電力を発電するソリューションを提案しています。

» 評的でありながら実用的な、海の隆起への取り組み

Van Halewijn 氏は、潮力発電タービンプロジェクトの詳細を喜んで話してくれましたが、より広い視野で見ることも忘れていません。「この話はシミュレーションだけではありません。」と彼は言います。「この話は単なるシミュレーションの話ではなく、現代の私たちが直面している問題と照らし合わせる必要があります。」

このように考えると、小さな国の小さな企業が行っているこの仕事の大変な意義が見えてきます。それが北海の嵐のような巨大なものであれ、潮に乗って安全に泳ぐマスのような小さなものであれ、私たちが自然の力と交渉できるかどうかに、世界の幸福がかかっているのかもしれません。Van Halewijn 氏は、「私たちは Win-Win の状況を探しています。」と語っています。◎



図 7 実機テストを間近に控えたWater2Energy 社の水力タービンプロトタイプ。

プロジェクトについて

ENCORE プロジェクトの目的は、4つの沖合再生可能エネルギー技術(波力エネルギー変換器、潮流、川流タービン、沖合浮体式ソーラー)を構造的かつ共同的なプロセスで推進し、Interreg 2 Seas 地域と輸出機会に焦点を当てて、島、港、河口、沖合構造物のための沖合エネルギーソリューションの加速的な導入を促進するためのオープンソースのツールとサービスを開発することにあります。

ENCORE プロジェクトは、Interreg 2 Seas プログラム 2014-2020 から資金提供を受けており、歐州地域開発基金から補助金契約 No 2S08-004 で共同出資されています。また、南ホーランド州、北ホーランド州、ゼーラント州からも資金援助を受けています。

主なパートナーでありコーディネーターである MET/SUPPORT には、ヨーロッパ4カ国のプロジェクトパートナーが参加しています。Water2Energy (オランダ)、EEL Energy (フランス)、Oceans of Energy (オランダ)、Teamwork Technology (オランダ)、Dutch Marine Energy Centre (DMEC)、European Marine Energy Centre (イギリス)、Artelia (フランス)、Bureau Veritas (フランス)、Ghent University (ベルギー)、Inyanga (イギリス)、Deftiq (オランダ)。

L-Acoustics, France

音の姿: エンクロージャーの設計がスピーカーの性能に与える影響を明らかにする

アリーナやコンサートホールの音響システムを手がけるL-Acoustics社. バスレフ型スピーカーの進化を加速させるために、エンクロージャーとベントがスピーカーの音響出力と品質に与える影響をシミュレートしました。

ALAN PETRILLO 著

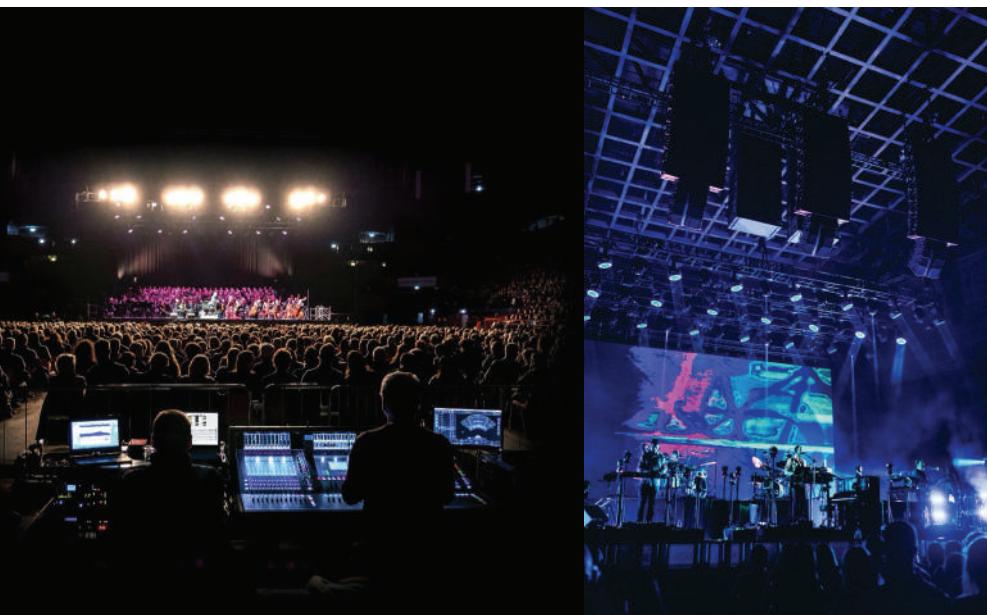


図 1 L-Acousticsは多くのイベント会場で高品質なサウンドを提供しています。

ライブイベントは、観客がショーの一部であるかのように感じられるとき、最も印象深いものとなります。シンフォニー、オペラ、フットボールの試合、音楽フェスティバルなど、どのようなイベントであっても、観客のエネルギーがパフォーマンスと融合して一つのパワフルな体験となるはずです。観客と心を通わせることはすべてのパフォーマーの目標ですが、もちろん彼らだけでそれを行うことはできません。

私たちが会場で見たり聞いたりするものは、舞台係や舞台デザイナーなど、多くの隠れた人々の手によってもたらされています。そして、私たちの目がステージやセットに集中しているときでさえ、私たちが見ることができないかもしれない多くの必要な機器があります—そう、私たちは聞いています。

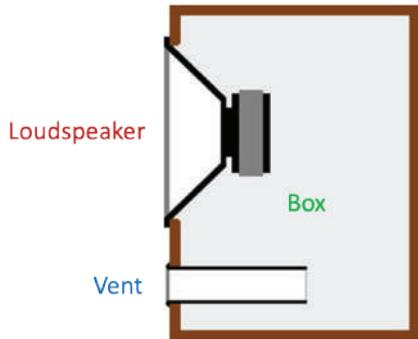


図 2 バスレフ型スピーカーの図



図 3 音響損失測定のための屋外測定セットアップ。矢印はマイクロホンの位置を示す。

L-Acousticsはライブパフォーマンスの聴覚的なパワーを伝えることに専念するグローバル企業です。一般的なコンサートファンやスポーツファンはL-Acousticsのことを知らないかもしれません、同社のラウドスピーカー、アンプ、シグナルプロセッサーからの音を聞いたことがあるでしょう。フランスを拠点とするL-Acousticsは、世界80カ国、10,000以上の会場にサウンドシステムを提供しており、世界トップ20の音楽フェスティバルの半数で同社の機器が使われています。

卓越したパフォーマンスは技術への絶え間ない努力に根ざしています。L-Acousticsはこれらの多様なパフォーマンス空間に調和するように、常に製品を磨き上げ、改良し続けなければなりません。例えば、スピーカーのエンクロージャーのサイズや形状は音質に大きな影響を与える可能性があります。観客がパフォーマンスの音に没頭できるように、L-Acousticsのエンジニアはシミュレーションを用いて、エンクロージャーやイベントの設計が音響出力とリニアリティに与える影響を明らかにします。

ライブの演奏者が音楽を生み出す正確な

物理的動きを見せてくれるように、マルチフィジックスシミュレーションにより、L-Acousticsはバスレフ型スピーカユニットの音を形成する力を「見る」ことができます。

» 音をレーザーのように：L-ACOUSTICSのビジョン

カリフォルニアのハリウッドボウルから日本のさくらホールまで、多くの著名な会場で、40年に満たない会社のサウンドシステムが採用されていることに驚かれるかもしれません。物理学者のChristian Heil氏が1984年に設立したL-Acoustics社は、1992年にラインソースアレイ技術「V-DOSC」を発表し、瞬く間にプロ用スピーカーシステムのグローバルスタンダードとなりました。ラインソースアレイは、レーザーが光を照射するのと同じように、焦点を鋭く絞り制御された音を投射します。レーザーの潜在的なパワーはその精度と切り離すことができませんが、これはスピーカーにも当てはまります。

「私たちは可能な限り線形動作するラウドスピーカーエンクロージャーを作りたいのです」。L-Acoustics社の音響研究責任者である

Yoachim Horyn氏は述べています。「私たちは、意図した周波数ではない、または、より高い周波数または高調波で放出されるエネルギーをすべて取り除こうとします。入力パワーをいくら増やしても、結果として得られる音は同じで、音が大きくなるだけでよいのです」。歪みは問題の一部に過ぎません。非線形動作は、放出する周波数での出力全体にわたる損失とともに発生する可能性があります。

スピーカードライバー自体の設計に加え、ハウ징またはエンクロージャーの設計は、そのパフォーマンスにおいて重要な役割を果たします。例えば、バスレフ型のエンクロージャーにはヘルムホルツ共鳴器と呼ばれるベントが設けられています。スピーカーハウ징の内容積を外気と接続することで、エンクロージャー内で放出されて失われるエネルギーの一部を回収することができます。これにより出力は向上しますが、乱流が発生してスピーカーの出力が歪んだり、最大で数dBの重大な音響損失が発生したりする可能性があります。このようなリスクはありますが、共鳴機の潜在的な利点は、巨大な空間を音で満たすことを目指す

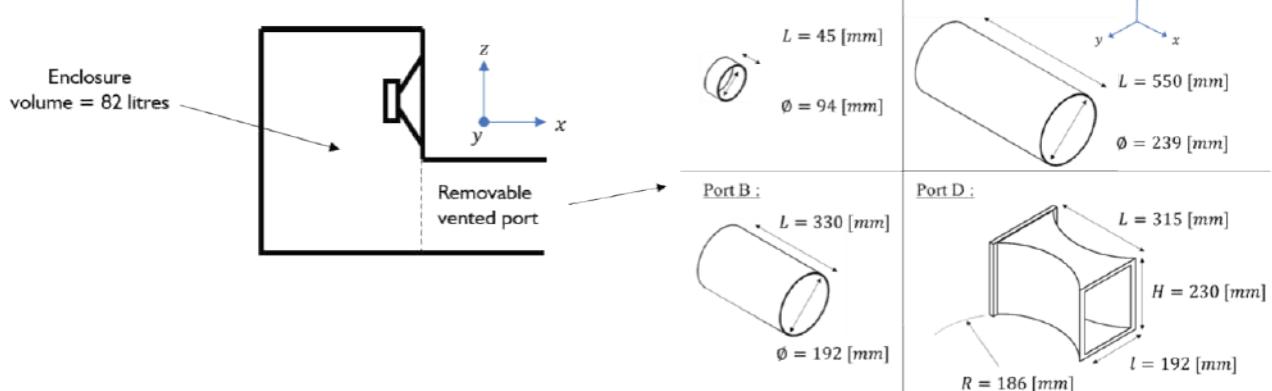


図 4 ポートを備えた実験用ベンチレーションエンクロージャ（左）とテスト用にシミュレートした4つのベントデザイン（右）の図

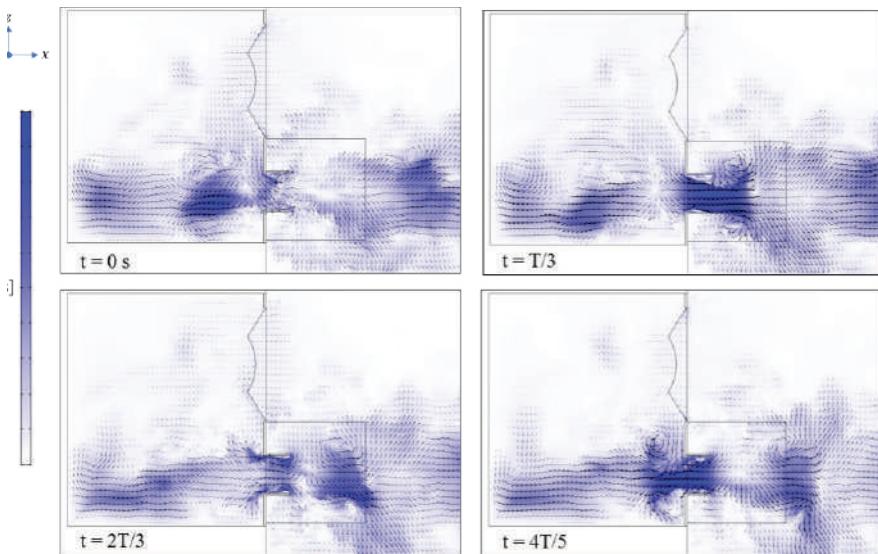


図 5 ベント設計ごとの一定時間における共振時の振幅速度

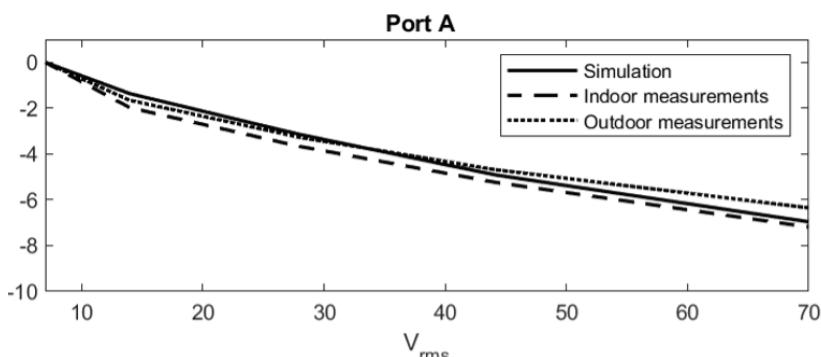


図 6 設計したポートを取り付けたエンクロージャーの音響損失をシミュレーションで予測した結果と、物理的なプロトタイプの測定結果を比較。

L-Acousticsにとって重要なツールとなります。

「私たちのラウドスピーカーは非常に高い出力レベルで動作する必要があります」。Horyn氏のチームの音響エンジニアであるYves Pene氏は言います。「誤った設計の共鳴器は、乱流によって潜在的な出力の最大半分を失う可能性があるため、ベントが効率的に機能するように設計することが非常に重要です」。

» 木を切り、粘土をこね、スピーカーに煙を吹き込む

「ここ年前、ベントの設計とテストは開発チームにとって課題でした」とHoryn氏は説明します。「高いレベルで空気が変位する機能を備えたエンクロージャーによって生じる損失の量を、正確に予測する方法はありませんでした」。このため、エンクロージャーや共鳴器の

に、木製プロトタイプを作つてテストしなければなりませんでした。場合によっては、粘土を使ってベントの開口部や内部通気経路の形状をただちに変更することもありました。これは時間がかかるうえ、完成した物理プロトタイプでさえ、必要なデータのすべてを得ることはできません。

「音響損失や音響歪みの測定は興味深いものですが、それだけではどこに問題があるのかわからないことがあります」とHoryn氏は言います。「時には、エンクロージャーの一部やベントの一部など、思いもよらないところから問題が発生することがあるため、木製モデルでは、問題がどこにあるのかを正確に示すことはできません」。L-Acousticsのチームはこの問題を回避するための興味深い方法を考え出しました。「過去に行ったことがあるのですが、ボックスのパネルの一部を透明にし、ス

ピーカーに煙を吹き込み、乱流を確認できるようにしました」とHoryn氏は言います。

透明パネルは物理モデルをより役立つものにする可能性がありますが、プロトタイピングのプロセスは依然として大きな時間のロスとなっていました。「モックアップを設計および製作する場合、図面を引いてから実際に試すまでに数週間かかります」とHoryn氏は説明します。「また、私たちの設計にたどり着くまでに何度も作り直さなければならないこともあります」。

» 現在および将来のプロジェクトのためのシミュレーション

L-Acousticsチームの取り組みを木工作業ではなく音響工学に集中させるために、Yves Pene氏はマルチフィジックスシミュレーションに目を向けました。2020年にAudio Engineering Societyで発表された研究論文(参考1)で説明されているように、彼の目的は、与えられたラウドスピーカー、エンクロージャー容積、ポート設計、を備えたベントポートシステムにおける非線形音響損失をモデル化して予測することでした。このシミュレーションには、ラウドスピーカードライバーの動きと、乱流とそれに関連する現象を含む流体の動き、これら相互の影響が組み込まれています。Pene氏は特定のスピーカーとエンクロージャーに対する4つの異なるスピーカーベント設計(図4)の効果をテストするためのモデルを開発しました。

このシミュレーション結果を検証するために、取り外し可能なベントを備えたスピーカー・エンクロージャーで実験を行いました。この実験では、シミュレーションの予測と非常によく一致する結果が得られました。予測された音響損失の値は、実際の試験の実測値と比べて1dB未満の差しかありませんでした。「私たちはこの結果に非常に満足しています」とPene氏は言います。

Pene氏のシミュレーションプロジェクトの成功によりプロトタイプだけでは得られなかつた知見が得られました。L-Acousticsの研究開発ワークフローにシミュレーションを導入することで、今後もさらなる効果が期待できます。チームの研究報告書で説明されているように、シミュレーションではエンクロージャーとベント設計を一体化した全体モデルに対する詳細な速度と渦度のマッピングが提供されます。これにより、モデル化されたサーフェスの各部分がどのように乱流を発生させ、全体の音質に影響を与えるかについてのデータを得られます。この詳細な情報により、チームがこれまで考慮していなかった歪みの原因が明らかになりました。

例えば、流体の動きのマッピングでは、エンクロージャー内におけるベントの位置が全体の流れに予想外に大きな影響を与えることがわかりました。このことから、ベントの形状だ

ベントを調整するたび

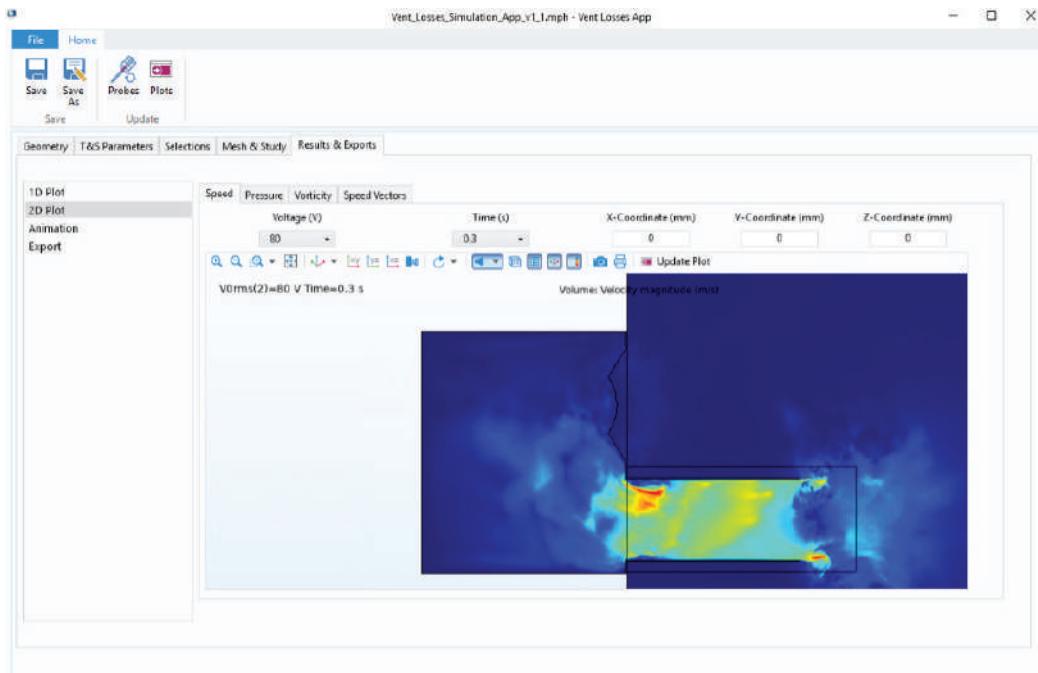


図 7 L-AcousticsのR&Dチームのシミュレーションアプリケーション。

けではなく、その配置にももっと注意を払うべきだと考えました。シミュレーションによってチームはこの新しい方向性を見つけ出し、さらなる研究と改良につなげていきました。

シミュレーションを導入する前、

L-Acousticsのエンジニアは物理モデルのテスト結果を見るまでに数週間を要していました。つまり、最終的には使用されないデザインのモデリングに多くの時間が費やされていました。

現在、Horyn氏の説明によれば「シミュレーションは開発チームが日々アイデアをテストするために使用しています。プロトタイプを作成する前に新設計の効率を予測できます」。Pene氏はさらに「今では試作品を作ればすぐに正しく動作すると確信できるようになりました」とも述べています。

» L-ACOUSTICSのシミュレーションでより多くのエンジニアに力を与える

「アプリ構築機能は、リーズナブルなコストでより多くの人にシミュレーションを使用してもらうことができるため、非常に便利です。」

— YOACHIM HORYN, L-ACOUSTICS

Yves Pene氏がバスレフの設計にシミュレーションを活用することで、このプロジェクト以外にもチーム全体にメリットがもたらされています。音響研究の仕事の一部は、開発したツールを開発チームが効率的に使用できることを確認することです。COMSOL Multiphysics®に搭載されているアプリケーションビルダーを用いると、チームはモデルから特化したユーザーインターフェースを構築することができ、それを会社全体に広く配布できます。「アプリケーションビルダーの使用頻度はますます高まっています」とHoryn氏は言います。「このプロジェクトの最後に音響工学チームがYves氏のマルチフィジックスモデルをベースにしたシンプルなアプリケーションを作成しました。他の必要な値はすでに用意されているので、ユーザーはプロジェクトに必要な特定のパラメーターだけを定義します」。

このアプリケーションはCOMSOL Server™デプロイメント製品を介して他のチームメンバーに配布され、ユーザーは自分でアクセスしシミュレーションを実行できます。Horyn氏によれば、「アプリ構築機能はリーズナブルなコストでシミュレーションを使用する人を増やすことができるため、非常に便利です」。

» 練習、練習、練習：パフォーマンスの飽くなき追求

最高のプロフェッショナルサウンドシステムは、「見る」のではなく「聞く」ものです。しかし、音楽を聴いている人と演奏者が一体となって

いるようなライブ感は、マイクやアンプ、シグナルプロセッサー、そして音で観客を包み込むスピーカーなど、目に見えない多くの人の努力とその専門的なツールによって実現できるものです。L-Acousticsの音響エンジニアは、ミュージシャンと同様に、優れたパフォーマンスは絶え間ない練習の上に成り立っていることを知っています、常にもっとできることがあると考えています。Yoachim Horyn氏とYves Pene氏は、設計の解析にシミュレーションを導入し、現在はさらなる改良のためにシミュレーションを使用しています。「素晴らしいことがおこる」◎



L-Acoustics 社の Yoachim Horyn 氏(左)と Yves Pene 氏(右)。

参考文献

- Pene, Y., Horyn, and C. Combet, "Non-linear acoustic losses prediction in vented loudspeaker using computational fluid dynamic simulation", Audio Engineering Society, no. 10359, 2020.

University of Bristol, United Kingdom

音響力モフラーのための蛾 の翼の振動音響特性の調査

特定の蛾は、コウモリのエコーロケーションからそれらを隠す、音響力モフラー特性を示す特別なスケーリングされた翼を持っています。ブリストル大学の研究者は、この効果をモデル化して、動作中の振動音響現象をよりよく理解しようとしました。—他の分野での広帯域音響力モフラーの可能性を確認しました。

BRIANNE CHRISTOPHER 著



図 1 キャベツの木のエンペラーモス (*Bunaea alcinoe*)。画像提供:
Lsodonkey - 自身の作品。CC BY-SA 4.0, Wikimedia Commons より。

地面や木の枝、茂みの葉っぱなどを見ていると、突然それが動いたことがありますか? —多くの昆虫やクモ類は、周囲の環境に溶け込むことで捕食者から身を守る力モフラーとしています。例えば、ランカマキリは、ランの花の繊細なつぼみのような羽を持っています。また、ナナフシとして知られているファスマトニアは、手足が茶色の小枝にそっくりです。

しかし、昆虫の主要な捕食者の1人であるコウモリを避けるためには、このような視覚的な力モフラーは無意味なのです。コウモリは目で見るのではなく、エコーローション(反響音)を利用して餌を探しています。羽で音響力モフラーを行い、コウモリの高度なソナー検知から身を守ることができることがわかったのです。

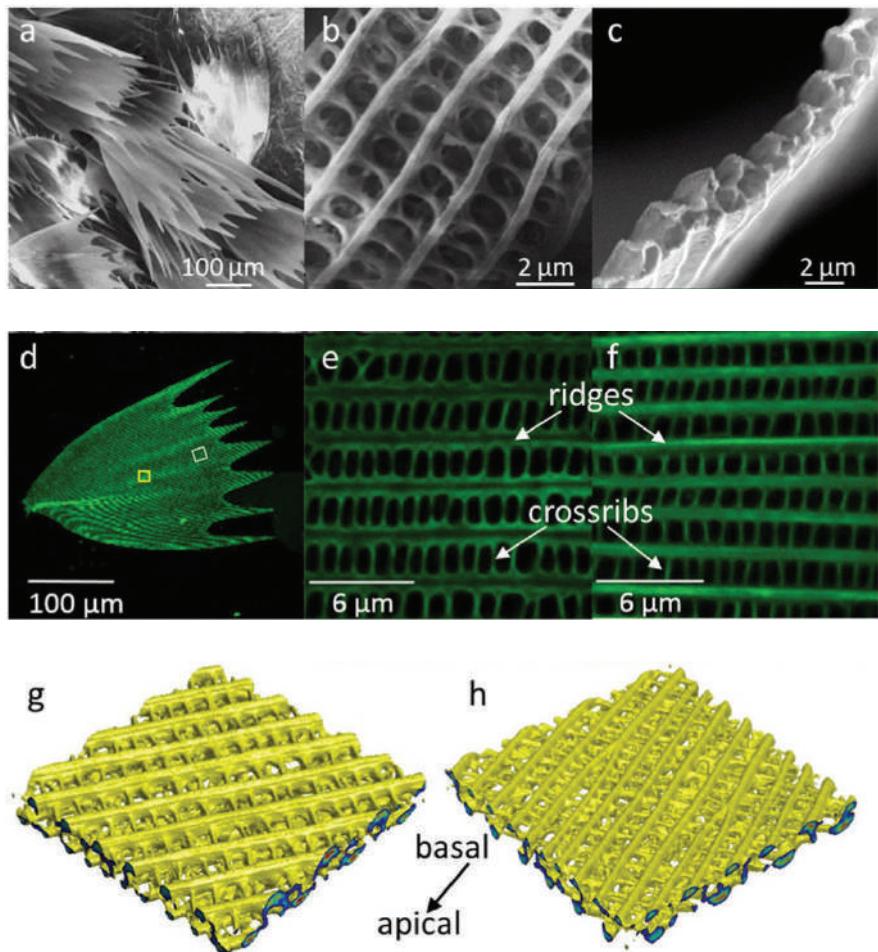


図2 蛾の鱗粉の構造を示すさまざまな図。

ブリストル大学の研究者たちは、数値モデルingueringを用いてこの翼の鱗粉現象を研究し、この音響力モフラーージュ機能を他の分野に応用できる可能性を探りました。

» エコーロケーションとの相性

コウモリは6500万年以上前から蛾を餌として探していました。蛾の中には、コウモリが近づいてきたときの信号を感じできるものもあれば、毒やクリック音で身を守る蛾もいます。キャベツ畑のエンペラーモスは耳が聞こえず、毒も持っていないせんが、無力なわけではありません。より受動的な防衛戦略である音響力モフラーージュ(音響クローキング)に頼っているのです。

蛾はどのようにして音響力モフラーージュ使ってコウモリの攻撃をかわしているのでしょうか?それを知るために、蛾の羽に注目してみましょう。蛾の羽は、グルコースから作られた長鎖ポリマーであるキチンで構成された固体で薄い膜です。硬い翅脈がこれらの

膜を支えています。さらによく見ると、蛾の翼の上面と下面には、屋根の瓦のように鱗粉が重なり合っている部分があり、それぞれの鱗粉は多孔質で、複雑な構造をしています。「この高度に彫刻化された鱗粉構造は、視覚的な信号伝達のために高度に組織化されたナノスケールのフォトニック構造に類似しています。」と、ブリストル大学の研究者であるZhiyuan Shen 氏は述べています。

この蛾の羽の鱗粉の長さは0.25 mm以下で、コウモリが11 kHz~212 kHzの周波数の信号を使って反響定位を行う際の波長の1/10よりも小さいのです(参考文献1)。ブリストル大学の研究者たちは、論文 Biomechanics of a Moth Scale at Ultrasonic Frequencies の中で、蛾の羽は共鳴吸収体として機能する、波長以下の厚さを持つ超薄型吸収体に分類できるという仮説を立てました。この仮説を検証するために、研究グループは、翼の鱗粉の支配的な物理現象を捉え、

蛾の鱗粉が共振時に高い吸収係数を達成できることを示唆しました。そのために、彼らは数値モデルを用いて…

» 高度なイメージング技術と数值シミュレーションの融合

このプロジェクトは、数匹の蛾のサナギから始まり、成虫になるまで実験室で培養されました。その後、蛾の羽のサンプルを採取し、走査型電子顕微鏡(SEM)と共に焦点顕微鏡という2種類の高度なイメージング技術を用いました。走査型電子顕微鏡(SEM)と共に焦点顕微鏡です。SEMでは、蛾の羽の断面を接着剤付きのカーボンタブに取り付け、その上に5 nmの薄い金の層をコーティングしました。鱗粉は高真空モードと可変圧力モードで撮影され、大きくて鮮明な画像を得るために拡大されました。共焦点顕微鏡での撮影では、蛾の鱗粉1枚をグリセロールに浸し、2枚の顕微鏡用スライドで挟んで密封しました。その後、自己蛍光を利用して非常に鮮明な画像を得ました。

蛾の羽の鮮明で高品質な画像が作成されると、研究チームは画像から3Dデータを抽出して3D等価面モデルを作成し、MATLAB®ソフトウェアでSTL形式で保存した後、LiveLink™ for MATLAB®を使用して、COMSOL Multiphysics®シミュレーションソフトウェアにインポートしました。"COMSOL Multiphysics®モデルを使用して、チームは蛾の翼の鱗の理想的な単位セルを特定し、それをパラメータ化して効果的な材料特性を検討しました。

次に、この鱗の振動音響解析を実施する準備が整いました。周期境界条件を使用して、鱗の配列全体ではなく、単一のユニットセルをモデル化することで、計算量とメモリを削減しました。「モデルをいくつかの鱗に単純化し、周期境界条件を使って構造をアレイ状に拡張することができます。実際にアレイモデルを作ると、コンピューターでは処理できないほど大きくなってしまいます。」とShen氏は言います。そこで研究チームは、マクロスケールのFEMモデルを用いて、超音波周波

「COMSOL®は連成問題を得意としています。超音波が鱗構造とどのように結合するかを理解するためには、音響学と固体力学の両方が必要でした。」

— ZHIYUAN SHEN, UNIVERSITY OF BRISTOL

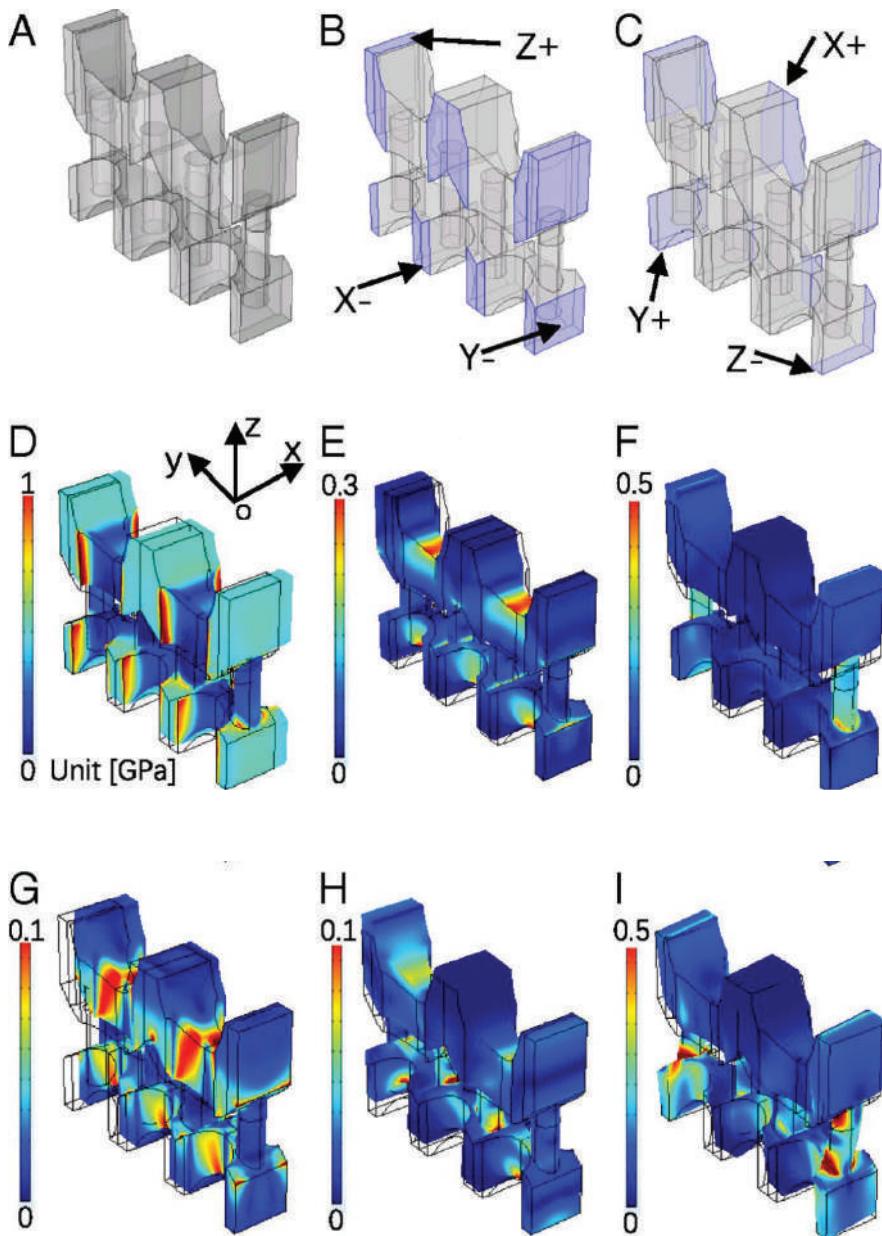


図 3 蛾の鱗の単一ユニットセルのパラメーター化されたモデル.

数における鱗の振動をモデル化し、計算できるようにしました。「COMSOL Multiphysics®は連成問題得意としています。超音波が鱗の構造とどのように結合しているかを理解するためには、音響学と固体力学の両方が必要でした。」とShen 氏は言います。用いて、超音波周波数における鱗の振動をモデル化し、計算できるようにしました。「COMSOL Multiphysics®は連成問題得意としています。超音波が鱗の構造とどのように結合しているかを理解するためには、音響学と固体力学の両方が必要でした。」とShen 氏は言

います。

研究チームはまた、蛾の鱗粉の減衰効果と、そのような鱗粉で構成された蛾の翼全体の超音波特性を分析するために、2つのモデルを作りました。一つ目は、片方の端を完全にクランプした1枚の鱗粉で構成され、二つ目は材料にレイリー減衰を加えて、鱗粉の配列の吸収係数を計算するのに使用しました。

» 計算と測定の比較

計算で得られた蛾の鱗粉の振動が、実際の蛾の鱗粉の挙動とどのように比較されるかを

「蛾の鱗粉を模した材料を作ることができれば、高効率の超音波吸音器などに応用できます。使用する波長の100分の1の厚さしかない材料が見つかれば、音響設計の大きな改善になるでしょう。」

— ZHIYUAN SHEN, UNIVERSITY OF BRISTOL

確認するため、研究チームは次にレーザードップラー振動計 (LDV) に着目し、1枚の鱗粉の振動挙動を明らかにしました。LDVの結果は、第1モードと第3モードの共振の計算値とよく一致し、それぞれ2.9%と1.0%の差しかありませんでした。計算上の共振周波数は28.4, 65.2, 153.1 kHzであるのに対し、LDVの結果は、27.6, 90.8, 152.3 kHzでした。2番目のモードで28%の偏差があるのは、蛾の鱗粉の曲率が単純化されていること、鱗粉の穿孔率が実際には変化するのに一定としてモデル化されていること、LDV測定時の入射音波の不整合などが原因と考えられます。

興味深いのは、蛾の鱗粉の計算されたモードが、コウモリがエコーロケーションに使用するバイオソナーの範囲(通常20~180 kHz)と重なっていることです。これが単なる偶然なのかどうかを確かめるため、研究者たちは、蝶の翼の鱗粉の構造を模したユニットセルで分析を繰り返しました。すると今度は、88.4, 150.9, 406.0 kHzと、コウモリのバイオソナーの範囲外の周波数が検出されました。進化論的には理にかなっています。蛾は夜行性で、コウモリの照準に入ることが多いのに対し、蝶は昼間活動しているので、牙を持つ生物から身を守る必要がないのです。この比較は、蛾が音響的にコウモリから身を守るために進化したのではないかという説を支持するものです。

» 音響力モフラーージュの新たな活用法を探る

この研究プロジェクトは、蛾の鱗粉のバイオメカニクスと振動挙動を数值と実験の両方で評価した初めての試みです。今回の結果は、マルチフィジックスモデリングソフトウェアを用いて蛾の鱗粉の挙動を正確に捉えることができるることを示しており、この分野でのシミュレーション主導の解析をさらに進めるための道筋を示しています。今後、ブリストル大学のチームは、現在の周期モデルを蛾の鱗粉の配

列の完全な3Dモデルに拡張することを目指しています。

この研究は、動物界以外の分野にも大きな影響を与える。蛾の鱗粉の振動音響特性を理解することで、同じ音響迷彩機能を持つ巨視的な構造物の開発に着手することができます。「蛾の鱗粉を模倣した材料を作ることができれば、高効率の超音波吸音材などに応用できます。

もし、使用する波長の100分の1の厚さしかない材料が見つかれば、音響設計の大きな改善になるでしょう」とShen氏は語ります。

将来的には、建物の設計に使用される強化された騒音低減材料や、音響迷彩機能を備えた防衛技術が登場することが期待されます。—このように、自然からインスピレーションを得れば、驚くほどの成果が得られることがわかります。◎

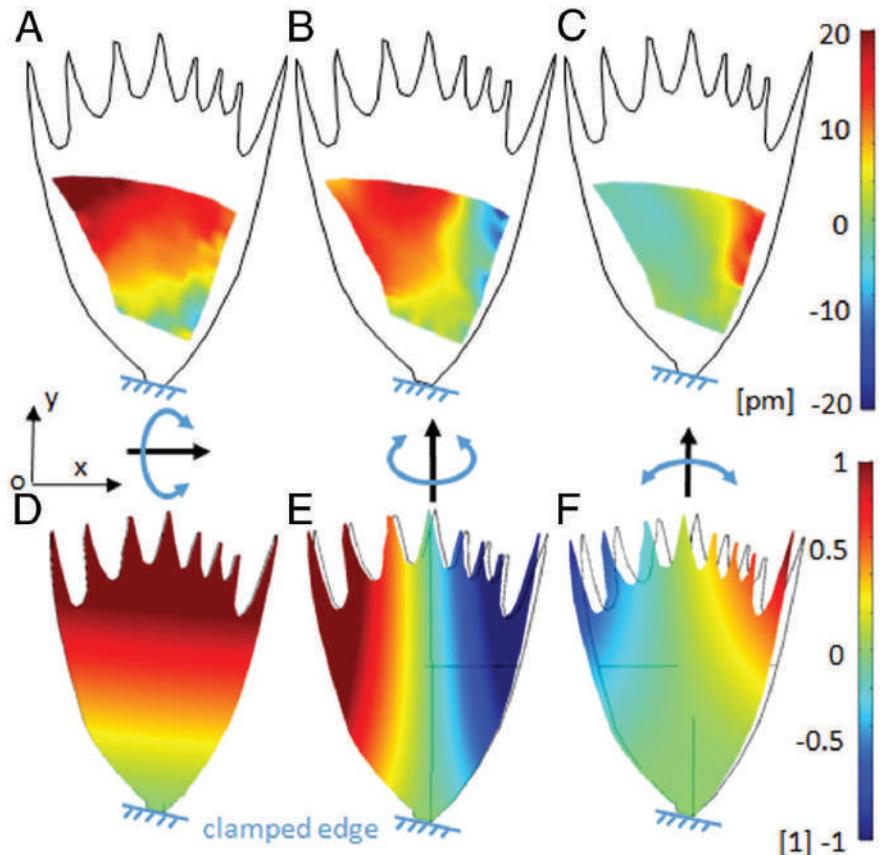


図4 蛾の鱗粉の共振。

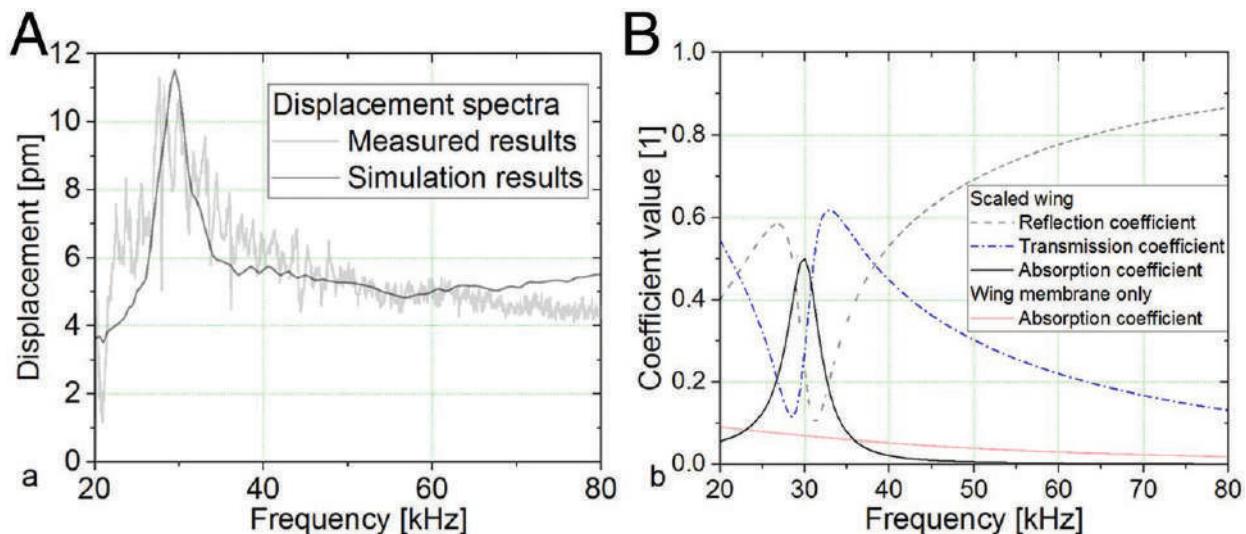


図5 蛾の鱗粉モデルとLDVの測定モードの比較。

参考文献

- G. Jones and M. Holderied, "Bat echolocation calls: adaptation and convergent evolution", Proc Biol Sci., vol. 274(1612), pp. 905–912, 2007.

Raychem RPG, India

マルチフィジックスシミュレーションによるガス流れデバイスのスマートソリューションの設計

インドでは、化石燃料への依存度を減らすために、温室効果ガスの排出量が多い石炭や薪などの燃料ではなく、天然ガスを供給する都市部の家庭が増えることが予想されています。Raychem RPG 社の研究者は、家庭用ガスマーターのさまざまな設計を最適化するために、マルチフィジックスシミュレーションを利用しました。

ADITI KARANDIKAR 著

20世紀、インドのエネルギー事情は化石燃料が中心で、ディーゼル、石油、灯油などが産業用や家庭用の大半に使われていました。インドの農村部では、人口の大部分が調理に石炭や薪、糞などの火を使っていました。しかし、ここ数十年で、インドはよりガスを利用した経済へと移行し、調理や輸送に液化石油ガス (LPG) や圧縮天然ガス (CNG) が広く使われるようになりました。最近では、都市部の多くの家庭でも天然ガスのパイプラインが利用できるようになりました。消費者の家庭に直接、



図 1 ガスマーター。画像提供:Raychem RPG.

中断することなく調理用ガスを供給できるようになりました。この新しい動きに伴い、ガス事業者はガスの消費量を測定する必要があります。どうやって?それは、ガスマーターの使用です。

» ガスマーターの原理

ガスマーター (図1) は、住宅、商業施設、工業施設などで使用される特殊な流量計で、パイプラインを流れる CNG や LPG などの燃料ガスの量を測定します。ガスは圧縮性が高く、温度や圧力の変化に敏感であるため、液体に比べて測定が困難です。ガスマーターは、メーター内を流れるガスの加圧量や質に関係なく、定められた体積を計測します。そのため、実際のガス量を正確に計測するためには、温度や圧力、発熱量などを調整する必要があります。

ガスマーターには、測定するガスの体積流量、想定される流量

の範囲、測定するガスの種類などに応じて、いくつかの異なるデザインのものがあります。ガスマーターの主な種類には、ダイヤフラムメーター、回転式変位計、タービンメーター、超音波流量計、コリオリメーターなどがあります。

Raychem RPG は、インドの家庭用ガスマーターの大手プロバイダーであり、市場シェアの約 80% を占めています。インドのグジャラート州にある Raychem Innovation Centre (RIC) では、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して、ガス流量計の4つの新設計を開発し、コンセプトの策定、最適化、検証を行いました。

» ガス流量計の設計上の課題

現在、インドで販売されているガスマーターには、それぞれ限界があります。例えば、ダイヤフラム式

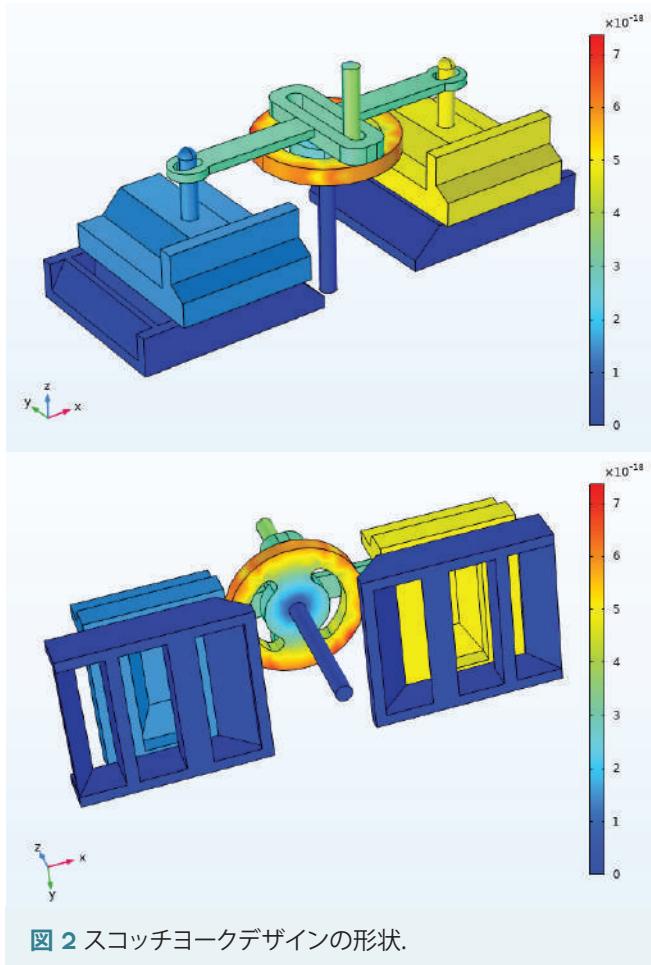


図 2 スコッチヨークデザインの形状。

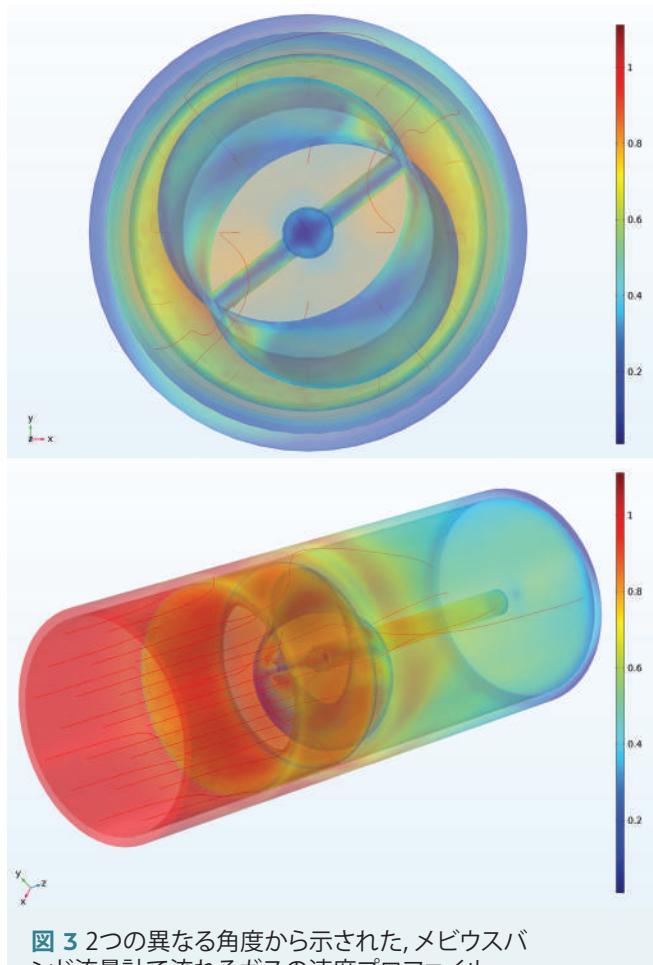


図 3 2つの異なる角度から示された、メビウスバンド流量計で流れるガスの速度プロファイル。

のメーターでは、可動部やダイヤフラムからの漏れが測定誤差の原因となります。一方、回転式変位計やタービンメーターは、35個近い部品を使用しているため、機械的な故障や疲労の可能性が高くなっています。さらに、ガスマーターの筐体サイズは決まっているため、新しいメーターの設計は、与えられた筐体サイズの中に収まらなければなりません。そのため、新しいガスマーターを設計する際には、装置のサイズも重要な基準となります。これらの異なる基準により、最終的な品質テストの段階でこれらのデバイスが承認されるのは難しいことです。実際、不合格率は非常に高くなります。

Ishant Jain 氏が率いる Raychem 社のチームは、ガスマート計の部品数を最小限に抑え、品質試験段階での不合格率を低減することで、これらの機器の総製造コストを削減することに取り組みました。そのために Raychem 社のチームは、COMSOL Multiphysics® ソフトウェアでシミュレーション解析を行いました。

» 4つのガスマーターの設計をシミュレーションで検証

Raychem 社のチームは、問題解決の方法論である TRIZ を用いた設計の最適化と顧客の要求に基づいて、4 つのガスマーターを開発しました。まず、従来のガスマーター設計の有限要素モデルを検証することから始めました。その結果をもとに、提案された設計を評価しました。

» スコッチヨークメカニズムを備えたダイアフラムメーター

新しいガスマーターの1つ目のデザインは、従来のダイヤフラム式を改良したもので、パンタグラフアセンブリをスコッチヨーク機構に変

更することで部品点数を削減しています。

最適化された設計(図2)に到達した後、Raychem 社のチームは、測定の精度と感度を向上させるだけでなく、当初の設計からいくつかの機械部品を取り除くことができました。メーターシステムの部品数は、初期のダイアフラム設計の35個から5~6個へと大幅に削減され、システムの機械的耐久性と完全性が保証されました。

» メビウスバンドタービンメーター

次のデザインは、メビウスの帯状のタービンで構成されており、タービンの回転を利用してガスの流量を測定します。このガスマーターは、メビウスの帯の中を移動するガスの速度を測定することで、ガスの量を計測します。メビウスバンドローターは、その上を通過するガスの流れの邪魔にな

るよう配置されており、それによってシャフトが回転します。シャフトの出力はベルギアシステムに伝達されます。タービンはガスの速度を推し量り、その速度は電子式または機械式のカウンターに機械的に伝達されます。Raychem 社のチームは、COMSOL Multiphysics® のアドオン製品である CFD モジュールとマルチボディダイナミクスモジュールを使用して、乱流ガスの流れ(図3)とタービンに発生する応力とトルをモデル化しました。

ここで重要なことは、メビウスバンド式タービンガスマーターは、ガスの流量が多いときにその性能を発揮するということです。気体の体積は流量で決まるため、圧力損失の少ない流量を測定する場合には、装置の有効性が制限されてしまうのです。この問題を解決するために、Raychem 社は、ある原理に基づいて別の流

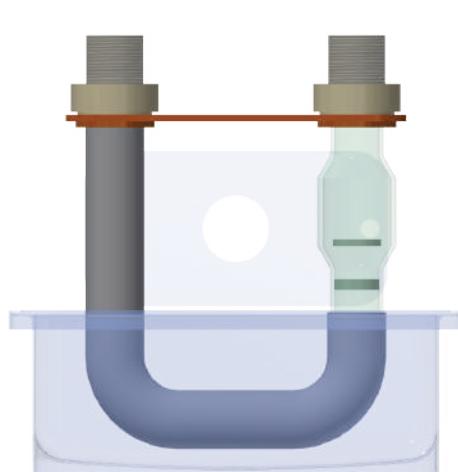


図4 磁気ボール／ディスク流量計の概念(左)と流体によるディスクの動きのシミュレーション(右)。

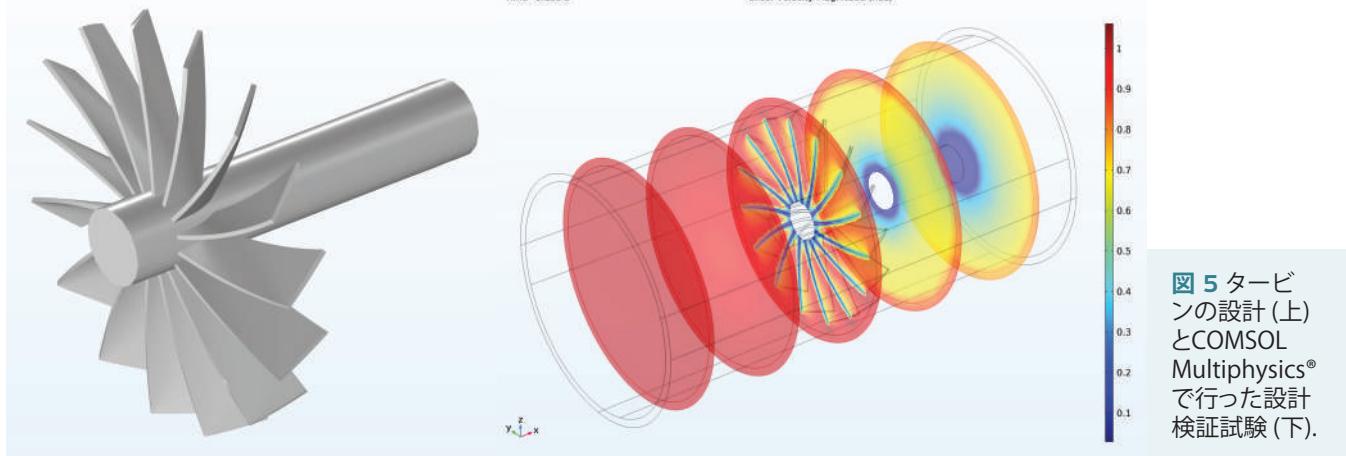
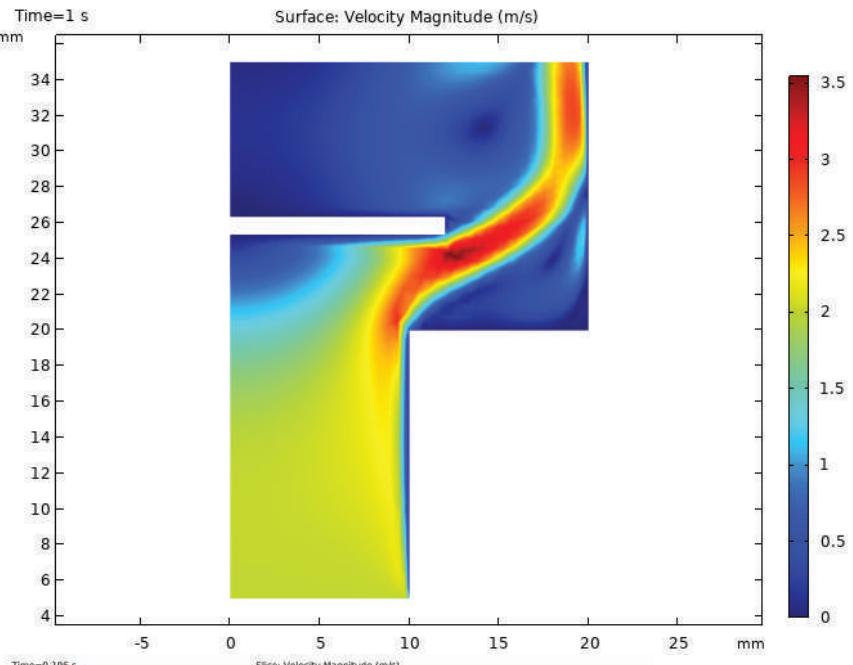


図5 タービンの設計(上)とCOMSOL Multiphysics®で行った設計検証試験(下)。

量計を設計しました。その原理とは、同じ極性の磁石はお互いに反発し合うことです。

» 磁石とボール／ディスクを用いたタービンメーター

3つ目のデザインは、ボールやディスクなどの物体を、磁力で浮くようにパイプの中に配置するものです。パイプ内のガスの流れに乗って物体が浮き上がり、磁気プレートが上昇する高さでガスの流れを計測するのです。この種のメーターは感度が高く、わずかな圧力損失でも計測できます。研究チームは、COMSOL Multiphysics® のアドオンである AC/DC モジュールと CFD モジュールを使用して、磁気特性とデバイスの性能を調べ、最適な設

計にたどり着きました(図4)。今回のケースでは、わずかなガス流量の変化に対しても良好な性能を発揮する高感度デバイスを提案することができました。

» 羽根付きタービンメーター

最終的なデザインもタービンの回転に基づいていますが、異なるタービンのデザインを使用しています。ここでは、固定のガイドベーンとランナーベーンを備えたタービニアセンブリを、障害物としてメイン流路に配置しています(図5)。タービンの回転によって得られたエネルギーは、熱センサーへの通電に使用されるため、この装置は自己通電システムとなっています。ガイドベーンはノズルの役割を果たし、ガスの流れをラ

ンナーベーンに導き、シャフトとベベルギアのペアを回転させます。ガスの流量は、ベベルギアペアの回転に基づいて測定するか、熱センサーを使って温度の低下を測定します。Raychem 社のチームは、COMSOL Multiphysics® の CFD モジュールとマルチボディダイナミクスモジュールを使用して設計を完成させました。このシミュレーション解析により、Raychem 社のチームは、U字型のチューブとセンサーのみを筐体に搭載したスマートエネルギーガスマーターを設計することができ、非常にコンパクトで設置が容易になりました。

» 今後の研究計画

Raychem 社の4つの新しいガス

メーターの設計は、検証されたシミュレーション結果が核となっています。Raychem 社のチームは、家庭用および産業用アプリケーションの要件に適したこれらの流量計の性能に自信を持っています。これらの設計は、生産に向けて最終選考に残っており、またなくインドの都市部の消費者に提供され、家庭に取り付けられたガスマーターの中に直接設置されることになるでしょう。◎

謝辞

Raychem 社のチームは、TRIZ の適用を支援してくれた Tito Kishan 氏と、デザインエンジニアリングを担当した Ganesh Bhowe 氏に感謝します。

Forschungszentrum Jülich GmbH, Germany

高性能タンゲステン材料の CVD プロセスの最適化

BRIANNE CHRISTOPHER 著

高性能核融合炉には高性能材料が必要です。核融合炉ダイバーターで使用されるタンゲステン材料の製造プロセスを最適化するために、ドイツの Forschungszentrum Julich GmbH (FZJ), エネルギー気候研究所、および Max Planck プラズマ物理研究所の研究者はマルチフィジックスモデリングに目を向けました。

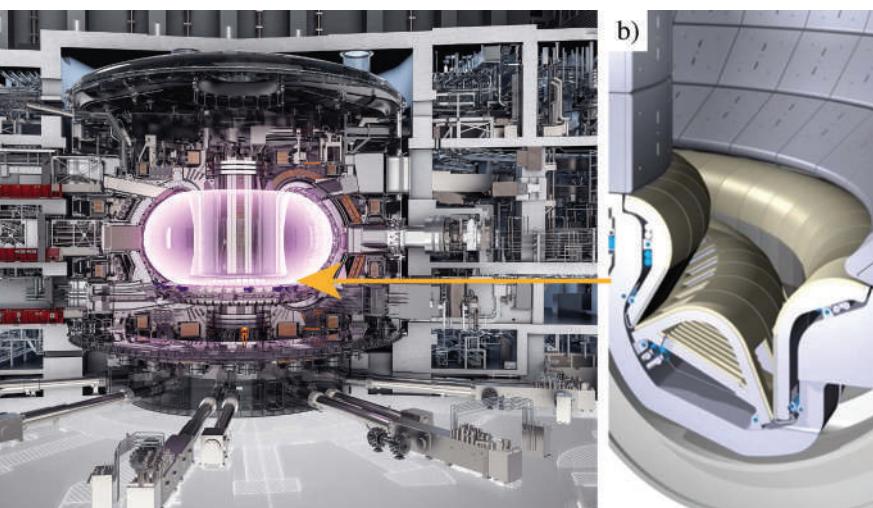


図 1 核融合炉のダイバーター。

核融合力を物理的に可能にするだけでなく、経済的にも可能にするためには、高性能の核融合炉を開発する必要があります。ただし、これらの反応器は、それ自身で高性能の材料を必要とします。例として、反応器の多くの部分の1つであるダイバーターについて考えてみましょう。

ダイバーター(図1)は、灰やその他のプラズマ汚染物質を核融合容器から迂回させます。これらの部品は、原子炉全体で最も過酷な環境に耐えることができなければなりません。では、これらの部品に適した材料は何でしょう？タンゲステンを使用すると、ダイバーターは妥当な動作寿命を保つことができ、巨大な粒子と熱流束、中性子による激しい衝撃、さらにプラズマ侵食と熱サイクルにも耐えることができます。タンゲステンは熱伝導率が高く、ダイバーターの他の材料の選択肢とは異なり、核変換による半減期が長い放射性同位元素を生成したり、水素を過度にトラップしたりすることはありません。

» タンゲステンよりも強く

タンゲステンにも欠点があります。通常もろく、中性子



図 2 CVD 製造装置の外側(上)と内側(下)の図。

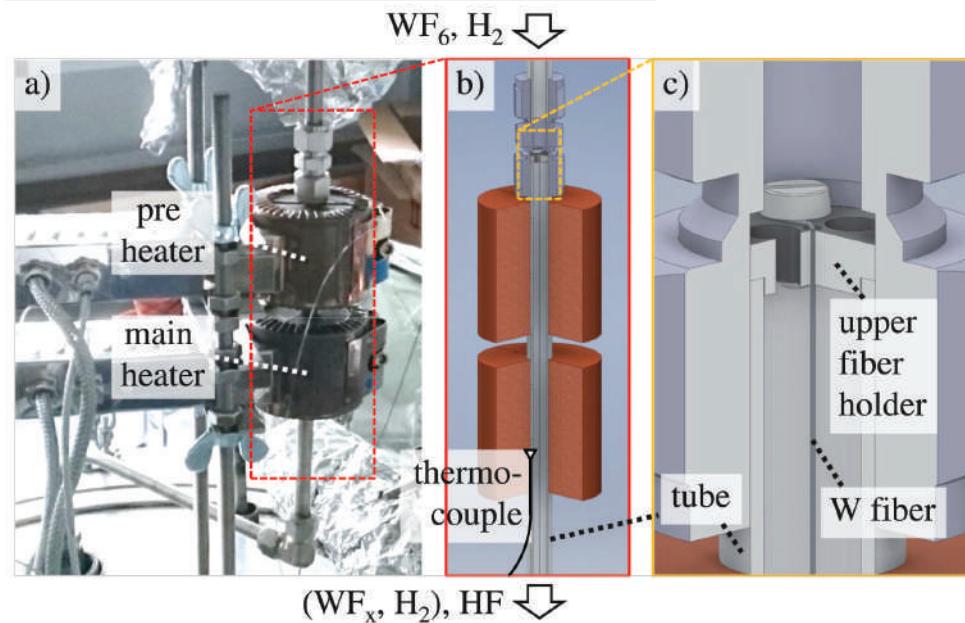
図 3 W_f/W での細孔形成。

図 4 CVD 製造装置の外側(上)と内側(下)の図。

» W_f/W の CVD 生産のための完全なモデルの開発

W_f/W 製造のための CVD プロセスの重要な要素の1つは、タングステンの堆積速度です。これは、関係する温度と分圧に依存します。タングステンの堆積速度は、反応部位の表面温度や分圧など、反応物の形状、ヒーター温度、ガス流量、ガス組成に依存するさまざまなパラメータが関係するため、予測が困難です。

CVD プロセスを予測するための重要な理由の1つは、タングステン材料に細孔が形成されないようにする必要があるためです(図3)。CVD プロセス中、ガスがファイバー基板を通って流れ、タングステンがファイバー間に堆積します。繊維間の領域は、固体Wで満たさるはずです。ただし、一部のガス状領域は、気相の大部分からの経路がW堆積物によって閉じられたり、塞がれたりすると、新しい反応物から分離される可能性があります。つまり、細孔は、それらをタングステンで満たすために必要な反応物にアクセスできないため、プロセス全体を通して細孔のままで止まってしまうということです。材料強度を低下させる細孔形成を低減または回避するために基板のジオメトリおよび CVD プロセスのパラメーターを注意深く調整する必要があります。

FZJ 研究の目標は、Wf/W の気孔率を減らすことでした。このために、FZJ の材料エンジニアである Leonard Raumann 氏は、最初のステップとして W 堆積速度の式を見つける必要がありました。タングステンの CVD に関する既存の文献は物議を醸し、不完全です。なぜなら、タングステンの堆積速度の方程式と値が、研究ごとに互いに矛盾することが多いからです。Raumann 氏は、CVD プロセスの新しい反応速度式を発見し、文献からの小さな断片を全体としてまとめました(参照1)。しかし、どのように?

彼は、非常によく知られている境界条件を使用して、実験的な単纖維設定を設計しました。COMSOL Multiphysics® ソフトウェアとパラメータースタディの助けを借りて、反応速度式を求めました。次に、方程式を使用して、複数のファイバーを

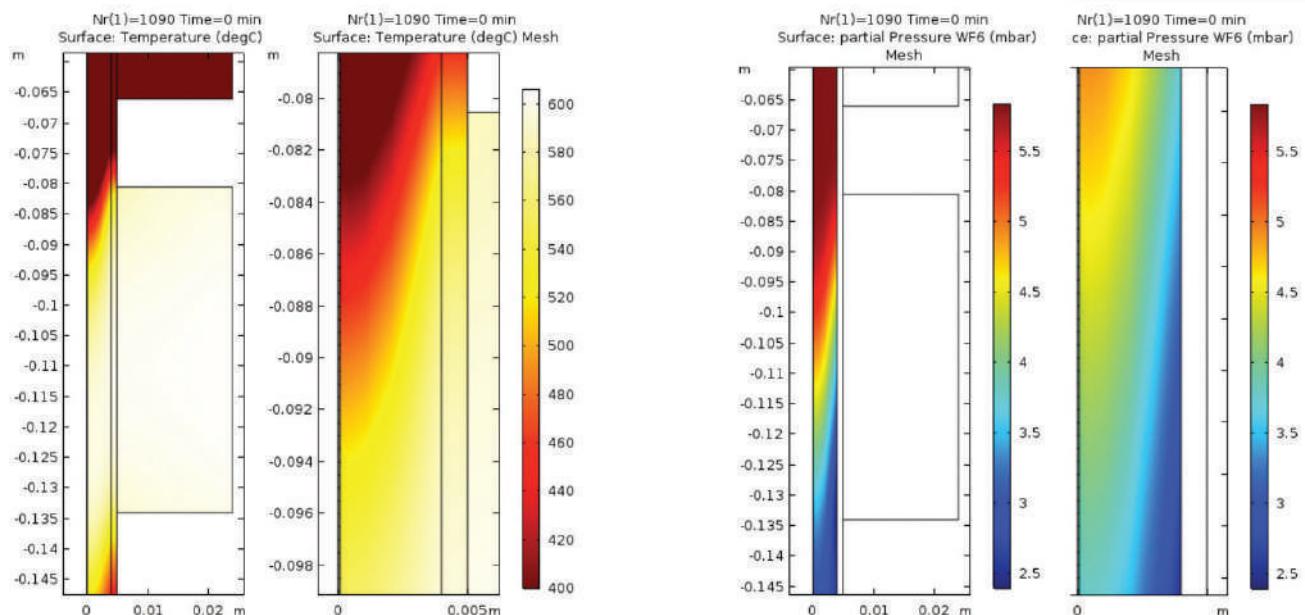


図 5 CVD プロセス中の温度 (左) と分圧 (右). 半径 $r = 0.075$ cm のファイバー表面と $r = 0.4$ cm のチューブ内面.

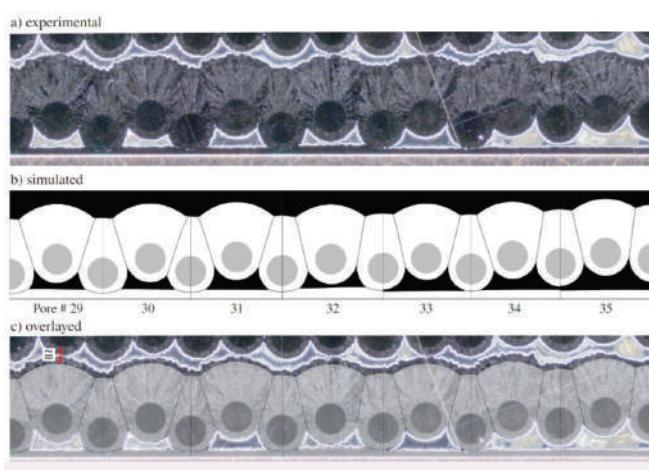


図 6 CVDプロセス中の細孔形成の実験結果 (上), シミュレーション結果 (中央), および両方の結果の重ね合わせ (下).

用したWf/W 生産をモデル化しました. このために, Raumann 氏は COMSOL Multiphysics® を再度適用し, 続いてパラメーターを最適化しました. 結果として得られたパラメーターも実際にうまく適用されました.

» マルチフィジックスモデルの開発と検証

タンゲステンの化学蒸着速度の新しいモデルを開発するための単繊維の設定を図4に示しています. これには, 予熱器とメインヒーターが含まれています. 研究者たちは, タンゲステンがどれだけ速く成長するか, そしてこの成長速度が温度と分圧によってどのように影響を受けるかを見ようとしていました. 次に, 温度とWF6 分圧に応じて, フッ化タンゲステン (WF6) の反応次数を1と0の間で調整しました. このために, 彼らは数値モデリングを使用して, ガス混合物の流体力学, 熱損失の熱伝達, および堆積表面での化学反応の化学と反応速度式を研究しました.

マクロスケールの CVD 反応器モデルは, マイクロスケールの過渡シミュレーションの入力として分圧を返しました. このためには, Raumann 氏は, 複数の隣接する W ファイバー上に成長する W コーティング, および W コーティングの表面間接触と対応する潜在的な細孔形成をモデル化しました. Raumann 氏の論文 (参照1) では, 彼は Wf/W の CVD プロセスの堆積速度, 細孔構造, および相対密度の実験を比較することにより, これらのモデルの検証に成功しました (図 6). 3番目のステップとして, マルチファイバーモデルを CVD プロセスパラメータの最適化に使用して, シミュレートされた (そして後で実験的な) 材料密度の改善に成功しました.

» フュージョンリサーチの拡大

FZJ-IPP チームは現在, 検証済みモデルを3D ジオメトリに適用して, Wf/W 生産をさらに拡大することを計画しています. 彼らは, 1つのコイルが W 繊維 (CVD 基板) を別のコイルに送り, 1つのコイルが結着されておらず, もう1つのコイルがコイル状になって加熱されるという新しいアプローチの開発を目指しています. これにより, チャンバーを閉じた状態で

繊維層のスタッキングを行うことができるため, 1回の CVD プロセスですべての層を堆積できます (この方法で汚染のリスクも低くなります).

タンゲステン繊維強化タンゲステンの製造工程を拡大することは, 核融合エネルギーの新たな可能性を意味します. この研究の以前は, タンゲステン材料の1つの層を生成するのに約5時間かかりましたが, CVD プロセスパラメータを最適化することにより, Wf/W の1つの層の生成にかかる時間はわずか30分です. これは以前より10倍高速です! 核融合炉用の高性能材料の製造プロセスを最適化することにより, 核融合発電が可能であり, コスト効率が高いことを保証できます. ◎

参照

1. L. Raumann, Modeling and validation of chemical vapor deposition for tungsten fiber reinforced tungsten, dissertation, Energy & Environment, Schriften des Forschungszentrums Jülich, 2020.

アプリが支える試験、検査、認証業界のデジタル化

JAMES DEAN 著

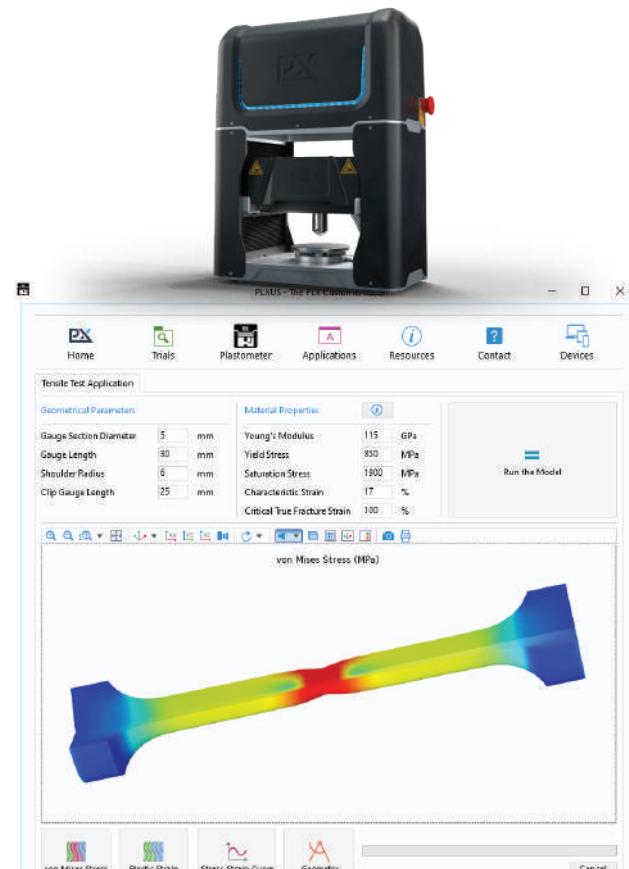
世界のTIC (Testing, Inspection, and Certification) の市場規模は2,500億ドルと推定されています。この市場の成長は発展途上国の急速な経済発展に支えられています。メーカーによるアウトソースサービスモデルの採用が多いこと統一規格に対する要求の高まり、様々な分野で政府による厳格な規制や基準が実施されていることが市場の成長を後押ししています。現在、この分野の多くの企業は、新興の革新的な技術を活用するために、投資や買収戦略を検討しています。例えば、Element Materials Technology 社は、最近、技術主導の投資を支援するために1,000万ドルのイノベーションファンドを設立しました。

この分野での活動は、イノベーション、買収、投資のいずれにおいても、現在ではデジタルを含んでいます。多くの企業が、デリバリーや供給を迅速化するために、デジタル機能の開発、インキュベーション、買収を行っています。多くの企業は、デジタルイノベーションの取り組みやインダストリー4.0の野望に沿ったソリューションやアプリケーションを迅速に提供するために、デジタル機能の構築や買収を行っています。アプリケーションの開発、展開がイノベーションの鍵を握ることが知られています。

シミュレーション主導のイノベーションの好例は、以下のとおりです。英国ケンブリッジにある科学技術企業 Plastometrex 社は、TIC 分野でデジタルツールに支えられた新しい機械試験システムを開発しています。ハードウェアに加えて、ソフトウェアパッケージは機械試験をより早く、より多目的に、そして重要なことにはより多くの情報を得るために設計されています。私たちのソフトウェアパッケージは、機械テストをより早く、より多目的に、そして重要なことに、より多くの洞察を得るために設計されています。これらのソフトウェアは、COMSOL Multiphysics® ソフトウェアと内蔵アプリケーションビルダーを使用して構築しました。

私たちの最初の商用製品であるインデンテーションプラストメーターを2020年11月に発売しました。インデンテーションプラストメーターと呼ばれる技術を用いて、1回の圧痕試験から応力-ひずみ曲線や金属の強度パラメータを3分以内に測定します。この製品は、硬さ試験の手軽さと簡単さ、そして引張試験から得られる意味のある強度情報へのアクセスを、ベンチトップ型の製品で実現しています。この製品は、従来の引張試験がやや煩雑で柔軟性に欠けるという特定の問題を解決します。例えば、引張試験よりも短時間で試験を行うことができます。引張試験片を加工する必要がないからです。また、少量の材料や実際の部品を試験したり、溶接部などの表面の特性をマッピングしたり、付加製造部品の挙動を調べたりすることもできます。ハイスループットテストができるという利点もあります。

COMSOL が提供するデジタルツールによって、プラストメトロックスの進歩は可能になりました。例えば、インデンテーションプラストメーターの基礎となる数学的フレームワークには、逆有限要素解析と最適化手法が含まれていますが、これは COMSOL® ソフトウェアで利用できる機能です。しかし、これらの能力を、パワフルで汎用性の高いカスタムメイドのシミュレーションアプリケーションで展開できるかどうかが、当社の初期の成功の基盤となっています。当社の新製品開発にも COMSOL のデジタルシミュレーションツールを活用して、世界のTIC市場に参入し、近代化を図り、競争力を維持していきます。



シミュレーションアプリケーションの例と Plastometrex 社の Indentation Plastometer (挿入図)。



著者について

James Dean は、ロンドンのインペリアルカレッジで材料科学の学士号、クランフィールド大学でガスティング工学の修士号、ケンブリッジ大学で材料科学の博士号を取得しています。ケンブリッジのキャベンティッシュ研究所にある材料科学のための計算方法における博士トレーニングセンターの元コーディネーターであり、シニアティーチングアソシエイトもあります。2021年1月に売却された COMSOL 認定コンサルタントである Double Precision Consultancy の創設者。また、lastometrex 社の共同設立者であり、同社の CEO でもあります。