

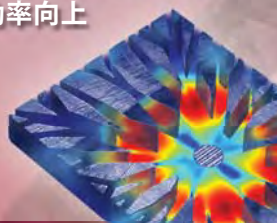
# COMSOL NEWS

2012 - 2013 日本語版



トヨタ HV 車の電子部品の  
冷却効率向上

4



MEMS 素子利用の環境発電機  
の最適化

12



## コクレア社の人工内耳は ゼロからの開発でした

掲載ページ: P8

**KESCO** KEISOKU ENGINEERING SYSTEM  
計測エンジニアリングシステム株式会社

 **COMSOL**

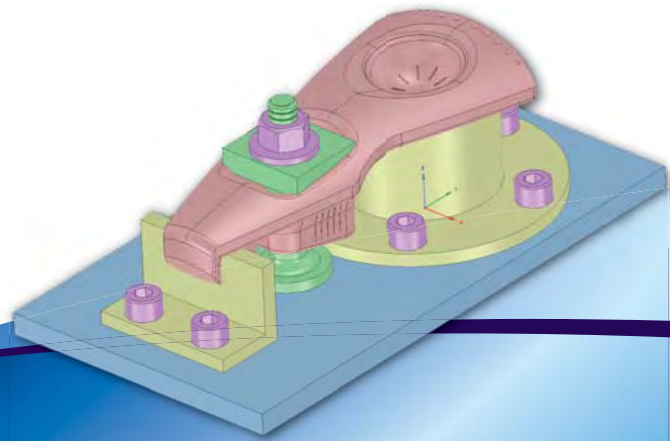
## CADが仕事のジャマをしていないですか？

CAE用モデルを手早く準備したいのに、CADの種々問題がジャマをして作業がスローダウンしていませんか？

SpaceClaim を使えば、前準備よりも、  
本来の解析業務に集中できるようになります。

SpaceClaim は、共通的なCADの問題を解決します。

- >> 他の3DCADシステムのモデルを直接開けます。
- >> 品質が低いモデルを迅速かつ簡単に修復できます。
- >> CAEシステムで活用できるように、CADモデルを最適化できます。
- >> 他の3DCADで他の人が作成したモデルを、あなた自身でCAE用に整えて解析に活用できます。
- >> 従来の3DCADが持つ複雑さに戸惑うことなく、3Dで確実な仕事を行えます。
- >> 真のシミュレーションドリブン開発を行えます。



**SpaceClaim Engineer:**  
パワフルで使い易い3Dを全てのエンジニアに

## Multiphysics Simulation Means Breakthroughs and Productivity

この号では、米国 COMSOL 社から発刊された英文版の COMSOL News 2012 に掲載された記事の中から、翻訳許諾を得られたユーザー事例記事の日本語訳を元に構成しております。特に巻頭に掲載した TOYOTA Research Institute of North America による記事は、今まさに市場を席巻しているハイブリッド車開発の際の隠れたご苦労の一面を語っていただいたものと思います。2012年10月に開催された COMSOL CONFERENCE BOSTON 2012 でも、関係者による、この記事の後日談的な内容のキーノートスピーチがありました。

米国での英語版 2012 発刊から半年のスペインで、COMSOL CONFERENCE TOKYO 2012 の準備と並行して発刊するのは非常にタイトなスケジュールでしたが、お陰様で前号の 1.4 倍に増ページでき、東京でのカンファレンスでより多くの皆様に新鮮な事例記事をお届けできたものと思っております。

本号での日本語版のみのスペシャル記事として、独立行政法人 国立環境研究所環境リスク研究センター 健康リスク研究室で大気中の粒子状物質 (PM) の人体に及ぼす影響を研究されている藤谷雄二先生に特別寄稿をお願いし、「細胞アッセイのためのエアロゾルの動力学解析」というテーマでご執筆いただきました。

今後も継続的に日本語版スペシャル記事を掲載いたしますので、ご意見、ご要望、ご投稿がございましたら、計測エンジニアリングシステム株式会社 営業部 COMSOL News 担当までご連絡ください。

2012年11月  
計測エンジニアリングシステム株式会社

### マルチフィジックス

- 4 数値シミュレーションを用いたトポロジー最適化により、トヨタハイブリッドカー電子部品の冷却効率がさらに向上
- 8 シミュレーションベースデザインを新しい人工内耳で
- 12 モデリングは、自動車タイヤで用いられる圧電環境発電機を最適化
- 15 超音波圧電円盤トランスデューサーの最適化

### 電気・電子

- 18 有限要素解析と電気回路シミュレーションを組み合わせた変流器の設計技術
- 21 脊髄電気刺激装置における痙攣効果のモデリング
- 24 磁束漏洩検査シミュレーション

### 伝熱

- 26 冷却装置のクラスターシミュレーション
- 30 塗装を均質化した加熱工程最適化
- 32 シミュレーション技術は新しいアイデアと発明を生み出す

### 機械・構造

- 35 海中供給パイプラインとケーブル分析
- 37 1つの掘削孔からポンプによる排水と注水

### 流体

- 40 細胞アッセイのためのエアロゾルの動力学解析 (藤谷先生日本語版記事)
- 42 ウォータースクリーンの科学
- 45 数分で光学平面に

### 化学工学

- 48 層流スタティックミキサーのモデリング
- 50 潜水艦：腐食を防止するのか、それとも敵に探知されるか?
- 53 MEMS ベースの細菌検出器開発、マルチフィジックスシミュレーションにより迅速で低価格に

### 電気・電子

- 55 表面プラズモン共鳴

### 掲載した記事の提供元 (アルファベット順、五十音順)

ABB AG	Lahey Clinic	University of Duisburg-Essen/Germany's Technical Centre for Ships and Naval Weapons	独立行政法人 国立環境研究所
AltaSim Technologies	Ruukki Metals Oy	University of Massachusetts Dartmouth, Sunwell Technologies, Inc.	
Cochlear Technology Centre Belgium	Salzgitter Mannesmann Forschung	Veryst Engineering LLC, Nordson EFD	
Esaote S.p.A	Siemens Corporate Technology	Yale University	
Georg-August-University	Toyota Research Institute of North America	Zeeko Ltd	
Intellectual Ventures			
JDR Cables			
Johnson Screens			



### 表紙について

Cochlear 社の開発した「Codacs」埋込型人工内耳システムの電磁界シミュレーション

写真提供: コクレア社

## COMSOL NEWS

日本語版へのご意見、ご希望、ご投稿は、下記へお寄せ下さい。  
計測エンジニアリングシステム株式会社  
営業部 COMSOL News 担当  
〒101-0047 東京都千代田区内神田 1-9-5  
井門内神田ビル 5F  
Tel: 03-5282-7040 / Fax: 03-5282-0808  
E-Mail: [comsol@kesco.co.jp](mailto:comsol@kesco.co.jp)



# 数値シミュレーションを用いたトポロジー最適化により、トヨタハイブリッドカー電子部品の冷却効率がさらに向上

最新の自動車のボンネットを開ければ、エンジン区画内の隙間の存在は過去のものであることが一目で分かる

TECH BRIEFS MEDIA GROUP、CONTRIBUTING EDITOR、GARY DAGASTINE 氏による報告

**自**動車メーカーがエンジン部品の数、大きさ、重さを減らすことができれば、結果として燃費の向上につながります。一つの例として挙げられるのが冷却構造の最適化、つまり高性能ヒートシンク的设计及び開発です。トヨタハイブリッドカーの電気システムにはますます多くのパワーエレクトロニクス部品が使用されており、これらの熱制御に高性能ヒートシンクが必要です。

分析的な設計手法や物理プロトタイプでの試行錯誤にかかる時間と経費を削減するため、米国ミシガン州 Ann Arbor の Toyota Research Institute of North America (TRI-NA) では、次世代ハイブリッドカーに搭載する斬新なヒートシンク的设计、製作、並びに候補となるプロトタイプの試験に、数値シミュレーションとマルチフィジックなトポロジー最適化手法を導入しました。

プロトタイプの一例では、表面を冷却するため、プレート中央に位置する単相ジェット衝突冷却領域と段階的に分岐しつつ一体化した冷却チャンネルを組み合わせました。冷却チャンネルは噴射が衝突する冷却装置中央から放射状に伸びており、プレートにくまなく冷却液を行き渡らせることで、圧力損失を最小限に抑えつつ全体の熱を均等に放射させます。

数値シミュレーションの導入により、TRI-NA Electronics Research Department の Ercan (Eric) Dede 博士とチームのメンバーは、従来の試行錯誤を繰り返す設計アプローチの代わりに最新のシミュレーションツールを使い、冷却チャンネルの最適分岐パターンを自動化した手順で製作することができました。



Toyota Research Institute of North America トポロジー最適化チームのメンバー。  
左から、Ercan Dede 博士 (Principal Scientist)、Jaewook Lee 博士 (Researcher)、Tsuyoshi Nomura 博士 (Sr. Principal Engineer)

Dede 博士によるこの研究は、TRI-NA のミッションであるエネルギー、環境、安全性、移動インフラストラクチャの各分野における最先端研究の一環として行われました。TRI-NA が属する Toyota Technical Center は、Toyota Motor Engineering & Manufacturing North America の一部門として、研究開発、エンジニアリング設計開発、トヨタ北米工場における生産活動の統括を担っています。

TRI-NA の Electronics Research Department では主に、センサー及びアクチュエータ、並びにパワーエレクトロニクスという2つの分野で研究が行われています。同部署が有するリソースには高性能のモデリング・

シミュレーションとプロトタイプ設計ツールがあり、自動車業界の激しい競争で求められる厳しい日程のなか、スタッフによる効果的なソリューションの開発を可能にしています。

## ボンネットの下は「熱い」

トヨタのハイブリッドカーには最先端の電気システムが搭載され、パワーダイオードや絶縁ゲートバイポーラトランジスタ (IGBT) などのパワー半導体が動力変換などの用途に数多く使われています。これらの部品は、電力損失の高い、幅数センチの標準的な平面シリコンデバイスです。



ハイブリッドカーでは、このような電子部品はアルミニウム製のヒートシンク（冷却プレート）に組み付けられており、水とグリコールからなる冷却混合液がプレート内に注入されます。初期の冷却プレート構造の特徴は、プレートの片側に液体導入口、反対側に排出口があり、その間に冷却チャンネルをほぼ直線状に並べ冷却液を流すというものでした。長いチャンネルによる熱伝達は十分ではあるものの、その代償としてプレート全体での圧力損失は著しいものでした。一方、技術開発のロードマップは電力部品が現在の約半分の大きさで同量の電力を消費することを求めており、熱流束の増加が不可欠です。さらに、シリコンデバイスは最高動作温度が 150°C といった温度であるにもかかわらず、より大きな部品の信頼性確保のため、通常は低めの温度環境に置かれます。また、このようなデバイスの果たす役割は自動車システムの電子化が進むにつれさらに重要度を増しています。

これらはすべて、シリコンデバイスの熱管理がこれまで以上に困難になることを意味しています。

より多くの冷却剤がプレート内に注入されるよう冷却プレートを設計し直す、というシンプルな方法は理にかなっていないように思えます。しかし、そのためには冷却剤用のポンプ能力を上げる必要がある一方で、ポンプを内

蔵するエンジン区画の空間には十分な隙間はなく、能力の高い一回り大きなポンプの導入やポンプの追加は困難です。

**「トヨタでは、最適な熱伝達を実現しつつ圧力損失の増加を最小限に抑えるための、冷却プレートのリエンジニアリングを進めることを選びました。」**

この二点がどちらも実現できれば、ポンプ能力を大幅に増強せずとも熱管理の目標が達成できます。

**ジェット衝突という不完全なソリューション**

「多種多様な応用研究に携わる研究者の多くが、ジェット衝突を魅力的な表面冷却法と位置づけています」と Dede 博士は話します。「しかし、ジェット衝突による冷却は噴射口の近接領域での熱放散効率はやいものの、噴出口から離れると最適であるとは言えません。」

熱伝達が一番高い場所は、冷却液の温度が最も低く速度が最も早い、噴射口の近くであるのがその理由です。結果として、熱伝達能力は冷却液がプレートの排出口に到達するまでにほとんど失われてしまいます。

この問題に対する解決策の一つが、領域内の平均的な熱伝達向上のため、ジェット衝突の周辺にチャンネル構造を組み合わせることでした。「圧力損失を最小化するためチャンネルを短くする方法もありますが、直線状の短いチャンネルは私たちの目的のために使うには効率的とは言えません」と Dede 博士は説明します。「私たちが目標としたのは、ジェット衝突とチャンネルによる流れの組合せをベースとし、圧力損失を最小限に抑えつつ熱の大部分を均一に取り除けるよう最適化した分岐チャンネルを持つ冷却プレートでした。」

本研究の核心における数値シミュレーションに、COMSOL Multiphysics の CFD モジュール、伝熱モジュールは欠かせないものでした。また、COMSOL の LiveLink™ for MATLAB® を用いたことで、Dede 博士は冷却プレートポロジの最適化を進めるにあたり、高機能スクリプト言語を用いたマルチフィジックスシミュレーションが可能となりました。

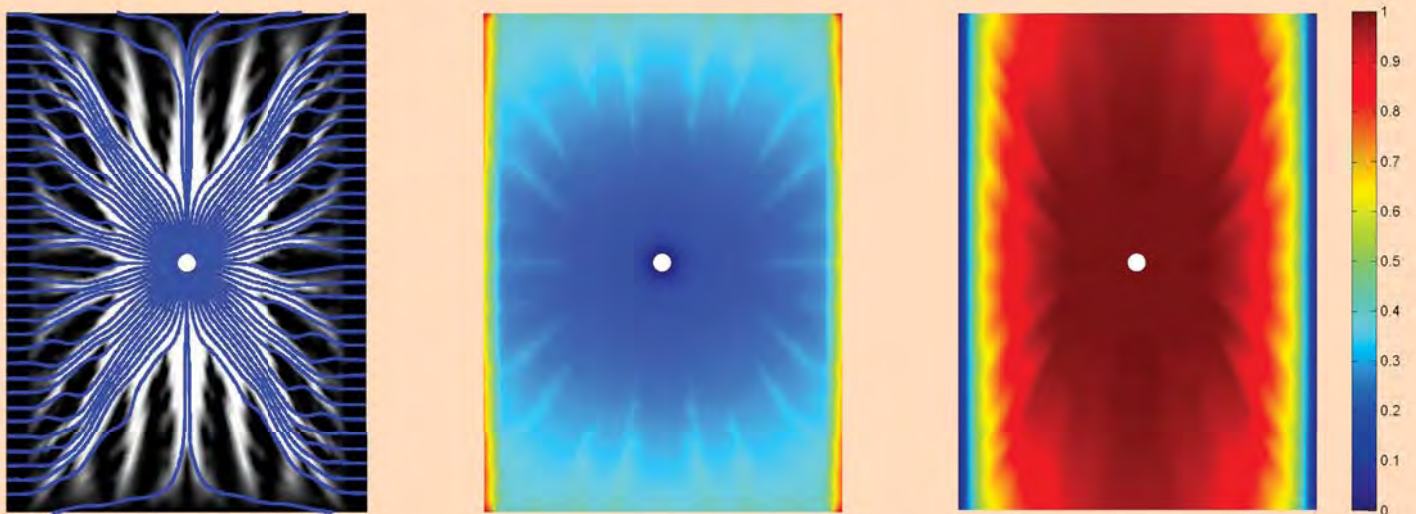


図 1. 最適化した冷却チャンネルポロジによる流体の流線（左、青色）、正規化温度等高線（中央）、正規化圧力等高線（右）。

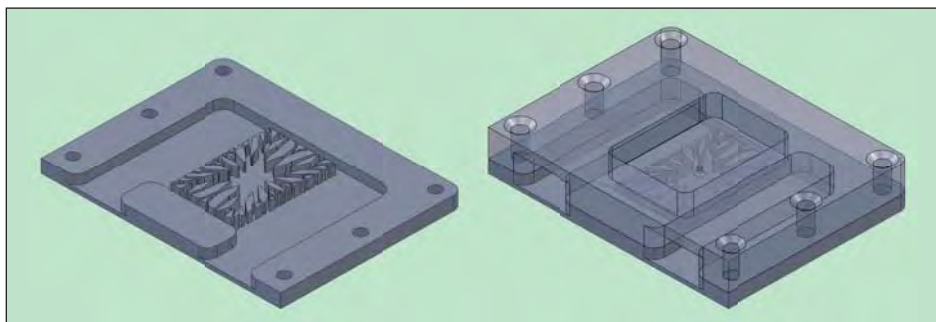


図2. 本研究で得られた段階的マイクロチャンネル冷却プレートの等角投影図。左は噴射プレートなし、右は噴射プレートを分かりやすいよう透明化して示した図。

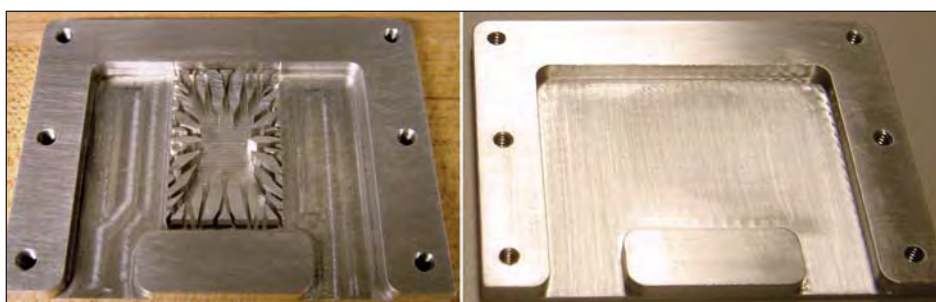


図3. アルミニウム製の冷却プレートプロトタイプ。左は段階的マイクロチャンネルトポロジーあり、右は段階的マイクロチャンネルトポロジーなしのもの。

Dede 博士は、トポロジーが定常状態での対流熱伝導や流体流れといった変数に与える影響を検証しました。この検証では、COMSOLとMATLABを双方向同期通信で行き来し、確立された物質内挿手法や移動漸近法 (Method of Moving Asymptotes, MMA) オプティマイザを用いて冷却チャンネルの配置を確認しました (MMA: 物理構造最適化に用いられる対流の近似法)。

冷却チャンネルのアスペクト比 (高さと幅の比) はきわめて重要な要素ですが、Dede 博士は数値シミュレーションをシンプルにするため薄い3D構造体を想定し、それをさらに「ぺしゃんこ」にしました。第一次のチャンネルトポロジーが得られると、次は冷却チャンネルを区切るフィンの高さの調査を進め、別に進行しているサイズのパラメトリックスタディに取り入れることが可能になります。博士のチームはこれらの研究を別々に進めており、博士の想定はチームに周知されていました。

これらの数値シミュレーションを経て、ついに分岐チャンネル内に流体の流線を持つ最適化チャンネルトポロジーが作成されました (図1)。

冷却チャンネルにより冷却液がプレート全体に効率よく散らばり、チャンネル分岐の複雑性に応じて変化する温度分布と圧力分布が比較的均一化されるため、このフラクタル様のトポロジーが今度は冷却プレートプロトタイプ

設計のガイドとして使われました (図2)。プレートの大きさは約 60 mm × 45 mm と設定され、中央には特定の熱源に適合させるため 25 mm × 15 mm の大きさで冷却ゾーンが設置されています。プレートの台座基板厚は 1 mm と想定されました。

### 現実世界での性能

「トポロジー最適化の手順に COMSOL と MATLAB を取り入れたあとは、これらのソフトで作製した最終チャンネルコンセプトを活用し、COMSOL の LiveLink™ for SolidWorks® によるプロトタイプの設計と評価を行いました」と Dede 博士は話します。「COMSOL にはコンピュータ援用設計ツールとその場でリンク可能という素晴らしい特長があり、圧力

損失と熱伝達を検証するためのさまざまな構造体の SolidWorks へのインポート、COMSOL への再インポートが簡単にできました。」

「これこそがシミュレーションの将来像だと思います。」

CAD ツールをシミュレーションツールにリンクさせることで、迅速で正確な設計サイクルの開発を効率化できるのです」

と Dede 博士は続けます。「必ずしも問題がすべて解決されるわけではありませんが、適切なスタート地点をスピーディに確立し、そこから邁進するための一助となります。」

SolidWorks で得られたデザインを基に、標準的な微細加工技術を用いて2つのアルミニウム製プロトタイプが製作されました。プロトタイプが2つ製作されたのは、ジェット衝突と段階的なマイクロチャンネルを組み合わせた場合の全体としての熱抵抗と圧力損失を、単純な平面プレートでのジェット衝突の場合と比較するためです (図3)。2つのプロトタイプは両面冷却試験装置に組み込まれ、二重構造により超小型パッケージ内での冷却効率アップが可能かどうかの検証が行われました。

2段階マイクロチャンネルの場合、平面プレートの場合よりも平均で 12.8% 電力損失が増えました (図4、左側)。水を冷却剤として用いると非常に高い熱伝達が実際に確認され、結果として熱源の両側が冷却されていました。圧力損失については、2つの冷却プレートで同様の結果となりましたが、流速は2段階マイクロチャンネルの方がわずかに速くなりました (図4、右側)。

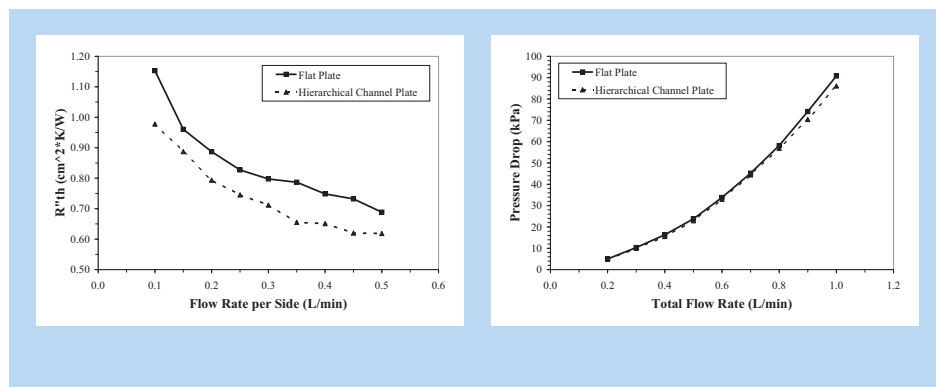


図4. 冷却プレートユニットの熱抵抗(左)と圧力損失(右)の比較。



### 今後の方向性

Dede 博士は、この冷却プレートのコンセプトは CPU のマルチチップ・パッケージに応用できるだけでなく、シングルチップ・パッケージのマルチパス構造での冷却効率向上にも利用可能ではないかと考えています (図 5)。

その方向性を追求するため、Dede 博士は、また別のトポロジー最適化数値シミュレーションを実施し、冷却プレート導入口の、入口 1 つと出口 6 つからなる多岐管の流体流れを検証しました。この多岐管は、流体を多数のマルチパス冷却セルに送り込むことが可能です。図 6 では、液体の流線が速度によって異なる色で示されています。多岐管の曲線状の側面形状は COMSOL を用いた流体流れトポロジー最適化研究により作成されたものであり、研究の目的は多岐管全体での圧力損失を最小限に抑えつつ、それぞれの出口ノズルにおける流速を均衡させることでした。

各ノズルの流速はそれぞれに対し 7% 以内 [the flow rates across all nozzles are within 7 percent of each other]、圧力損失は約 2 kPa であり、これは冷却プレート内の各部位に同量の冷却剤が流れ込むであろうことを意味しています。その結果、冷却プレート全体でのデバイス温度分布が均等になります。

「ここで実施した研究は、このソリューションにおける手順の最初の一巡に過ぎません」と Dede 博士は話します。「将来は、ポンピングの負担 [pumping penalty] をさらに減少できる多岐管の設計といったことにも目を向けたいと考えています。また、立体的な構造の中でも最適に機能するよう、それぞれの冷却セルについて個別のトポロジー最適化を行うことも可能かもしれません。」

ではそのさらに先は? 「これらの手法は、例えば電磁気学や熱ストレスといった他の分野にも応用できます。私たちは、このプロジェ

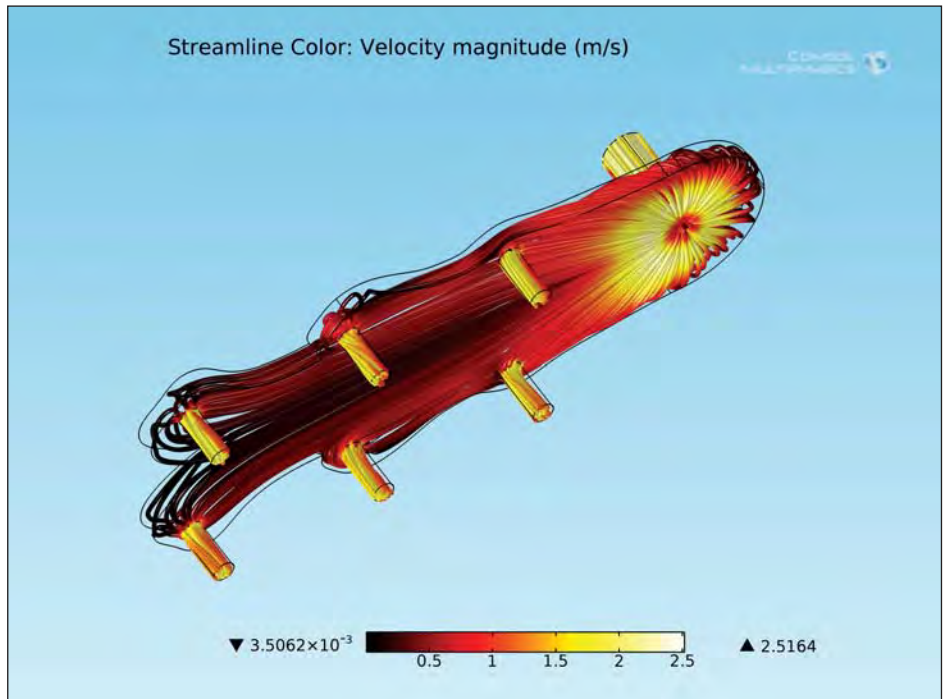


図 6. 流体を多数のマルチパス冷却セルに送り込むための多岐管

クトは数値シミュレーションに基づくトポロジー最適化の、最初のほんの一步だと確信しています」と博士は答えました。

### 詳細について

さらに詳しい情報は、InterPack 2011 (the ASME 2011 Pacific Rim Technical Conference & Exposition on Packaging and Integration of Electronic and Photonic Systems) の会議記録 (Conference Proceedings) に掲載された Ercan M. Dede 博士の論文「Experimental Investigation of the Thermal Performance of a Manifold Hierarchical Microchannel Cold Plate」をご参照ください。

MATLAB は、The MathWorks, Inc. の登録商標です。SolidWorks は Dassault Systèmes SolidWorks Corp. の登録商標です。

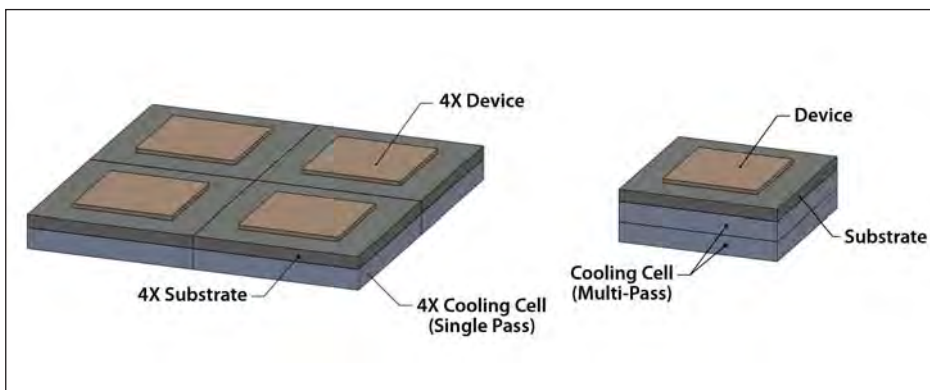


図 5. マルチチップへの応用例 (左)、シングルチップのマルチパス構造 (右)



## シミュレーションベースデザインを 新しい人工内耳で

現在、治療が難しいとされている難聴に対しての新しい治療に大きな期待がよせられています。

COMSOL Multiphysics を使用したコクレア社は、比類ない聴覚蝸牛人工内耳の開発にゼロから取り組んできました。

PAUL SCHREIER 氏による寄稿

**難**聴は決してめずらしい症状ではありません。実際、3億6千万人中、約17%のアメリカ成人が何らかの難聴の症状を持っているとの報告があります。

中等度から重度の難聴の場合は、補聴器を使用して聴力をあげます。

あるレベルを超える難聴の場合は、この従来の補聴器では装着効果が得られない場合もあります。このような場合、骨伝導人工内耳や蝸牛人工内耳のような埋め込み型聴器が治療法の1つとなります。オーストラリアに本社を構えるコクレア社は、この種の人工内耳市場の3/4以上を占め、年間売上げは8億オーストラリアドル以上にのぼります。

コクレア社は、ここ数年間で、100カ国以上、250,000人以上の人々に音を知覚する能力を提供、支援してきました。現在、コクレア社は、より優れた治療の提供に専念しています。2011年、コクレア社は収支の13%をその研究開発に投資しました。ベルギー

のコクレアテクノロジーセンターのCAEエンジニアのPatrik Kennes博士は、以下のように語ります。「最近の開発では、Codacs™と呼ばれる新しい人工内耳、Direct Acoustic Cochlear Implant（ダイレクト聴力蝸牛人工内耳）に重点をおいています。それは、機械的（聴力）刺激を直接蝸牛にある、COMSOL Multiphysics を使用して、私達がゼロから開発したこの人工内耳に送ります。重度の混合性難聴に苦しむ人々への新たな治療を提供する一方で、従来型補聴器では、十分ではなかったそのギャップを埋めることができるようになりました。このユニットは現在臨床試験中であり、フィージビリティ・スタディの結果は有望で、この商品のデザイン方向性及び商品化の可能性は、確実なものとなっています。」

**ワイヤレス人工内耳装置は、  
自然聴覚の経路を再現**

図1. ダイレクト聴覚刺激インプラントシステム、Codacs™。下記は、埋め込まれた部品。



Codacs™と呼ばれるダイレクト聴覚人工内耳（DACI）は、COMSOL Multiphysics を使用して、ゼロから開発した商品です。





「Codacs システムのスタート地点は、B T E (Behind The Ear 耳の裏) です。それは、外耳同様、音を拾い上げる役割をはたします。」と Kennes 博士は語ります。(図 1) その体外装置には、電池、方向聴覚用の 2 つのマイク、デジタル信号処理回路が数個、含まれています。その信号はワイヤレスリンクを介して外耳道の裏、中耳腔内に埋め込まれた装置へ送られます (図 2)。このリンクにより、皮膚下のケーブルが必要ではなくなるだけでなく、電池が不必要なインプラント・ユニットの電源供給を行うことが可能になります。」

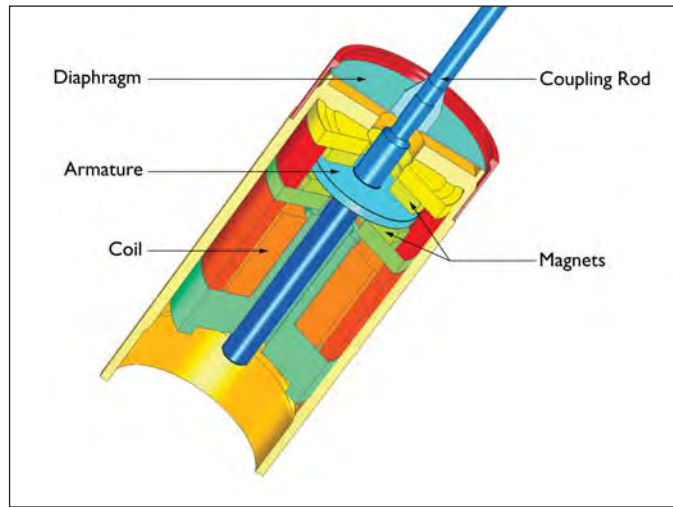


図 2. 中耳腔に埋め込まれる装置

Codacs 装置は、音を大きくするのではなく (従来の補聴器では行われることです)、蝸牛内の圧力波を直接増幅し、刺激します。健常者にとって、この圧力波はアブミ骨底板の振動により作り出されます。圧力振動の結果、蝸牛内の有毛細胞が刺激を受け、聴神経を伝い脳へと伝達される、わずかな電気パルスが発生します。

Codacs システムを使用すると、小型装置は蝸牛内の液体の中で音の高低により異なる圧力波を発生し、難聴の症状にあわせて、機械的に増強された音のエネルギー補填を行います。これを行うため、装置端の人工砧骨は、蝸牛内に突き出る人工アブミ骨に結合さ

れます。ピストン運動のような人工アブミ骨の振動は、蝸牛液体内で振動を引き起こします。これは耳小骨の動きとほぼ同じ動作です。

### 装置設計への挑戦

Codacs 装置は、安定した電機子原理が基になっている電磁変換器です。(図 2) 両極を永久磁石ではさみ中間地点に電機子がある時、両極へ等しく引き合われ、磁力は発生しません (例、バランスがとれた位置)。その中間位置から電機子が動くとき、その両極の磁石までの距離および、それにより発生された力も同等ではなくなります。電機子は 2 つの磁石のうち、より近い磁石に引き付けられます。これは、「負

のバネ剛性」とも呼ばれています。なぜならば、従来のバネ構造とは逆のことが起こっているからです。もしバネを変形すると、バネは本来の位置に戻ってくる傾向があります。Codacs 装置では、バネの復元のように振動版は動き、電機子が磁石に付くのを防いでくれます。

振動版の力と磁石の力の精密平衡は装置が正確に動くためには必要不可欠なものです。例えば、振動版の剛性が低い場合、空隙は崩れ、電機子はどちらかの磁石にくっついてしまいます。コイルに動力が供給されると、両極にある磁石に向け、電機子の動きは誘発され磁場が調整されます。

Kennes 博士は、「私達がこのコンセプトを考えたのは、約 5 年前でした。設計全プロセスという広範囲に渡って、COMSOL を使用してきました。当初のアイデアは振動を発生させる小さな作動装置を作ることに使用する予定で、部品の寸法に関して使用するというアイデアは全くありませんでした。そのため、最初の COMSOL モデルは、多様なコンセプトを単に比較し、商品として実現可能かを検討するための手助けになるためのものでした。」

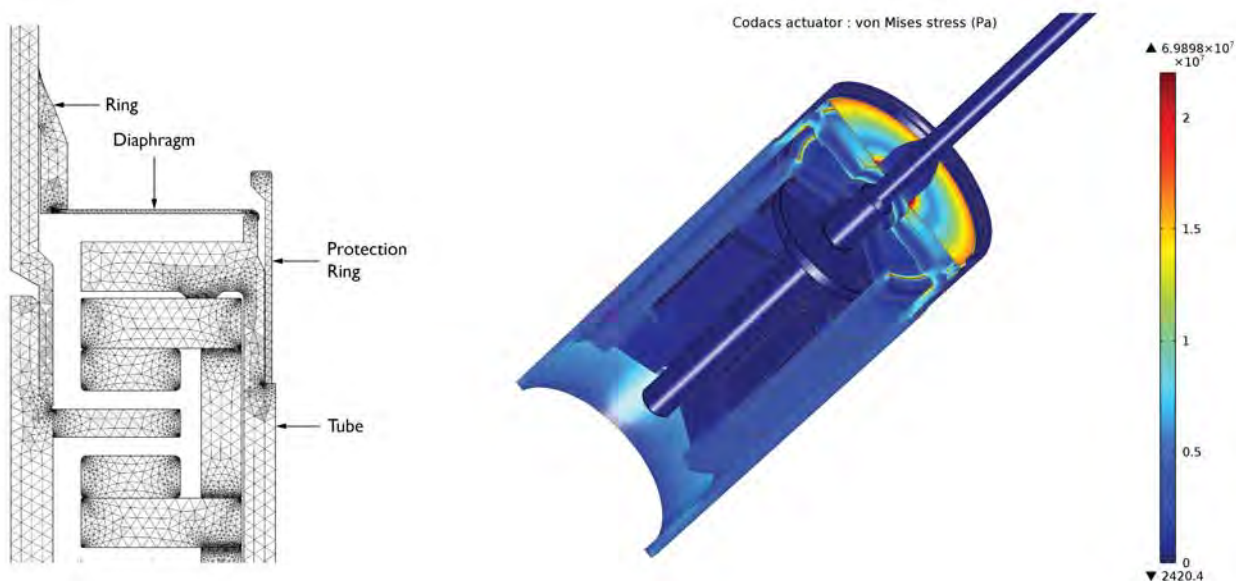


図 3. ミーゼス圧力を分析する構造モデル 最適な振動版の厚さを確認

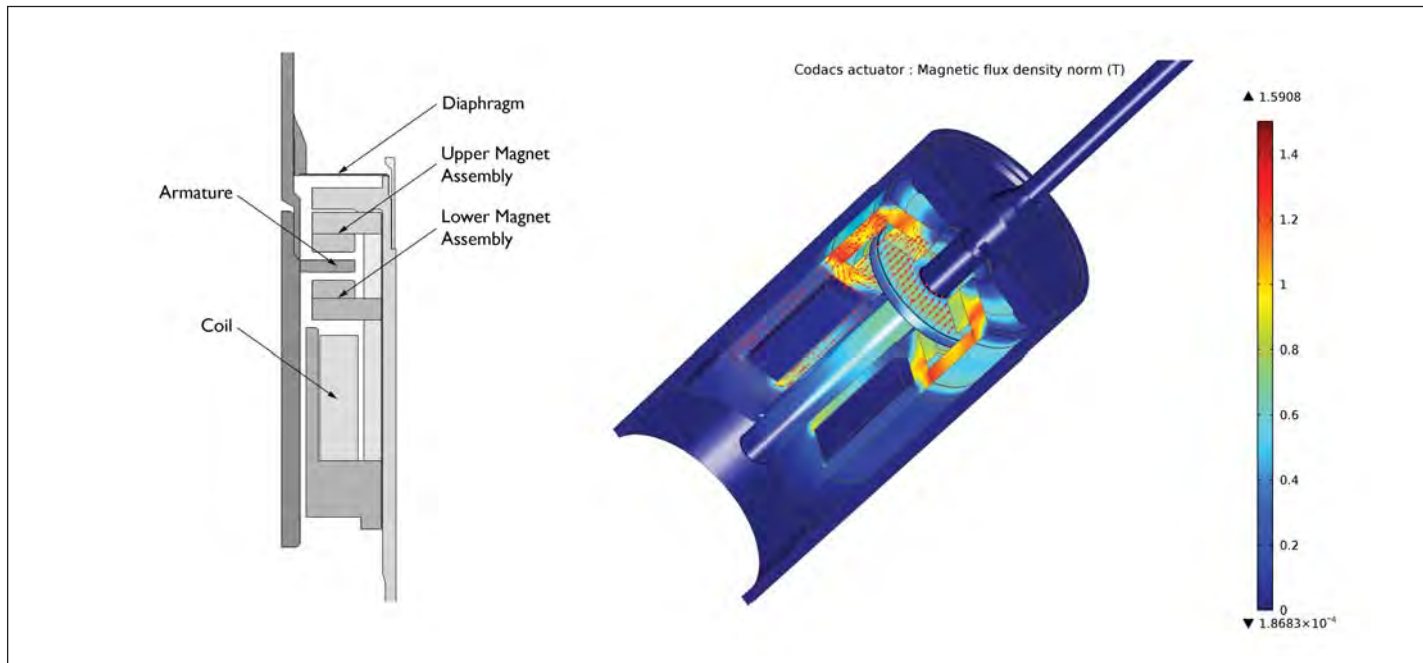


図4. 調整された装置の中の電磁場を研究するための3Dモデル

コンセプト決定後、研究員達は、実物サイズや形を検討する試作定義段階へと着手しました。設計者達が注意すべき要素は多数ありました。特に、乳様の腔の中は限られたスペースしかないため、最大許容サイズには細心の注意が必要でした（長さ4ミリ以上15ミリ以下）。装置は、人間の耳が持つ周波数特性と類似なものではなくてはなりません。（共振周波数は約1 kHz）消費電力に関しても頭に入れておく必要がありました。また人間の組織と接触がある全ての装置部品は生体適合性がある物、または、密封されたカプセルの中に保存されている物でなくてはなりません。

#### 重要な要素：電機子

複数機能を兼ね備えたチタニウム振動板は、重要な要素の1つです。

調整パラメータは重要な項目の1つです。その厚さ（実際にはわずか50マイクロン以下）があまり薄すぎると、使用が制限されてしまうほど損傷を受けやすくなり、密閉性を失ってしまいます。一方で、振動板が厚すぎると装置の剛性が増してしまいます。構造安定性（ロバスト性）と剛性のバランスは、厚さの特性を鑑み、構造力学分析により解決されます。この設計段階の時点では、装置部品の材料応力は確定されています。ミーゼス圧力プロット（図3右側イメージ）では、棒が軸方向に動くときに振動板にかかる圧力を示しています。（例、装置が稼働中の場合）；それ以外の圧力に関しては、装置組立工程中に適合部品には事前に負荷を加えておきます。例えば、上部の磁石アセンブリの着色リングエリアは、チューブの反対側にも磁石アセンブリが設

けられません。ここで鍵となるパラメータは、磁気の強度と空隙です。磁気回路のレイアウト最適化のためには部品の磁束密度の計算が必要となり、Kennes博士は、そのためにAC/DCモジュールを使用しました。磁束ラインプロット中の主要磁束は永久磁石です。（磁石組の上部と下部により作られた短いループ）コイルが作動する時、追加磁束は生成されます（シャフト内及びコイルアセンブリ内の磁束）その後、電機子の磁力は変更され、装置が起動します。

チームにとって、パラメータスタジオは、とても便利なものでした。それにより電機子の位置、コイルの流れ、電機子に対応する力の数値を確定することができます。データ結果はフォースマップ上に自動的に収集され、エクスポートも容易に可能です。

**「COMSOL 使用により、時間の節約を実現する事ができました。試行錯誤が必須で高コストな設計アプローチに関しては、適切な部品サイズ決定を決定するために数多くの試作品は必要不可欠ですが、その作業の時間と手間を省く事ができました。」**

それは連結棒のラジアル軸受の様に、また電機子動作用復元スプリングの様に作動しなければなりません。それと同時にその装置を密閉することは不可欠で、なおかつ生体適合性も必要です。厚さは、装置のスプリング剛性を大きく左右するため、厚さ

置されているという接触エリアを示しています（COMSOLのモデル接触対）。

振動板の厚みが確定されると、それに伴う装置の機械的剛性も確定されます。装置全体の軸方向剛性をより低くするために、電磁石アセンブリの磁力剛性数値は正確でなけれ

#### オールインワンパッケージ

チームメンバーが一番感動した事は、COMSOLでは数多くの研究が可能だということです。構造、音響、電磁場、圧電物質などを全て1つのパッケージで研究に取り組むことができます。1つのあるモデルでCOMSOLを使用した場合、例えばその後全く別の物理を使用したとしても、他のモデルを最初から設定し直す必要がないのです。

必要な部分を追加、移動させると、物理も変わり、2～3のステップを行うと、新たなケーススタディが完成してしまいます。



「COMSOL の使用により、時間の節約を実現する事ができました。試行錯誤が必須で高コストな設計アプローチに関しては、適切な部品サイズを決定するために数多くの試作品は必要不可欠ですが、その作業の時間と手間を省く事ができました。

モデリングで算出された概算を使用しても、ソフトウェアでは、その装置を上手に調整することができます。この装置の精度には厳密さが要求されるため、専門的サプライヤーたちが試作品用の一部品を完成させるのでさえ、リードタイムに数週間要することになります。COMSOL 無しでは、わずか5つの試作品の作成作業だけで半年かかってしまうでしょう。そのため、開発プロセスも明らかに遅れてしまいます。」と Kennes 博士は、まとめました。

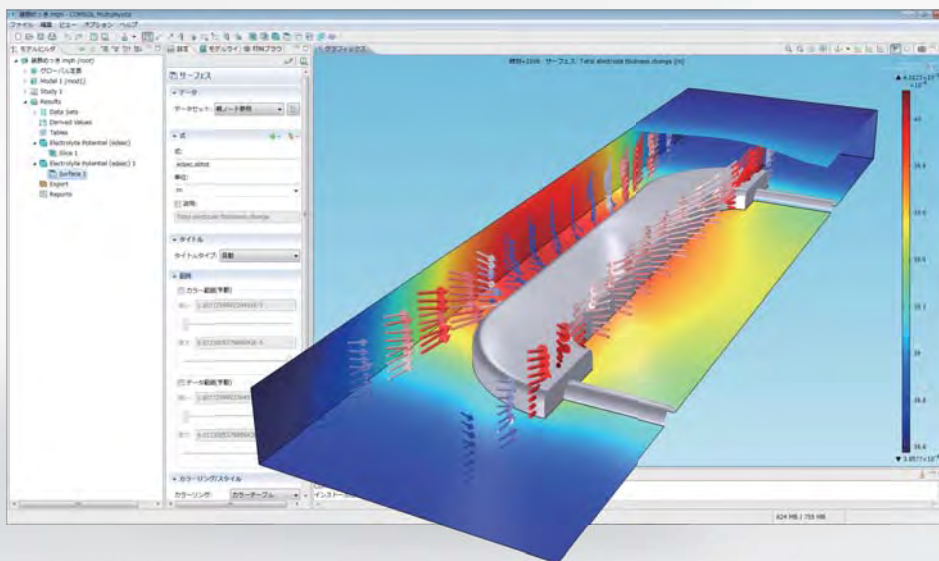


## 研究者について

Patrik Kennes 博士は 2007 年 1 月からベルギーのココレアテクノロジーセンターにて、CAE エンジニアとして勤務しています。博士はここで初めて COMSOL Multiphysics を構造計算用として使用しました。

現在、彼はそのソフトウェアを電磁場、音響、圧電、温度など様々な計算に活用しています。それ以前に、彼はテネコオートモティブにて、連続的制御電子サスペンションシステムの部署の研究エンジニアとして勤務していました。ベルギー、ルーベンにあるカトリック大学にて理学博士及びバイオエンジニアの博士号を取得しました。

研究論文をご覧になりたい方は、  
下記まで。  
[www.comsol.com/papers/2598/](http://www.comsol.com/papers/2598/)



### 装飾電気めっき

この例では、陰極に置いた家具部品に溶解金属をめっき装飾し、陽極は平面のまま溶解します。図で示しているのは、陰極での堆積層の厚さと、同様に陽極表面の溶解のパターンです。モデルは、陽極と陰極のために完全なバトラー・フォルマー動力学と二次電流分布を想定しています。

COMSOL Multiphysics®は、設計に影響する重要な現象を正確なシミュレーションで再現する手段を提供します。キーポイントは、現実の世界に存在するすべての物理現象を考慮できる**マルチフィジックス機能**です。まずは COMSOL Multiphysics®の700種にもおよぶ実例をご覧いただける無料サンプルCDをご請求ください。

<http://www.kesco.co.jp/comsol/reqdoc.html>

 **COMSOL**

<http://www.comsol.com>

**KESCO** KEISOKU ENGINEERING SYSTEM  
計測エンジニアリングシステム株式会社  
<http://www.kesco.co.jp>



## モデリングは、自動車タイヤで用いられる 圧電環境発電機を最適化

シーメンス社は、タイヤ空気圧監視システムに電力を供給するために設計された MEMS（微小電気機械システム）発電機の中のカンチレバーの費用効率を最適化するため、流体構造相互作用シミュレーションを活用しています。

執筆者 JENNIFER HAND 氏

シーメンス社の INGO KUEHNE 博士および ALEXANDER FREY 博士による共同執筆

バッテリーと電線をなくすことは、広い分野で研究課題となっています。エネルギー自立システムを求めて、環境発電が大きな注目を集めてきました。このアイデアを微細レベルの動作と組合せ、それが「もし実現したならば」とのシナリオさえも注目されるようになっていきます。

「私たちの最終目標は、できるだけ小型で、強力な電力を、様々な条件下でシステムに十分に供給する MEMS 発電機を設計することである。」

ミュンヘンにあるシーメンス社技術センターの研究者は、環境発電 MEMS（微小電気機械システム；Micro Electro-Mechanical System）の開発に強い関心を持っていました。Ingo Kuehne 博士は次のように述べています。

「私たちの責務は広範囲に及び、特定の製品開発よりも、未来の基盤技術の開発に向けられています。もちろん私たちの研究の価値を実証することも重要です。ドイツ本社と協力して、明らかにビジネスチャンスのある応用技術に重点的に取り組むことを決定しました。私たちの最終目標は、できるだけ小型で、強力な電力を、様々な条件下でシステムに十分に供給する MEMS 発電機を設計することです。」

彼らは、移動によって駆動する、革新的なタイヤ空気圧監視システム (TPMS; Tire Pressure Monitoring System) のための、微小発電機の設計に着手しました。

TPMS は、これまでバッテリーによって電力が供給されるため、車輪リム上に取り付けられることが多いです。バッテリーが不要であれば、このシステムは、タイヤ内部に設置され、空気圧以外のものも計測することができます (図 1)。このことで、温度、抵抗、磨耗、トルクを監視し、最適なトラッキングやエンジン制御を支援できます。そして、全て

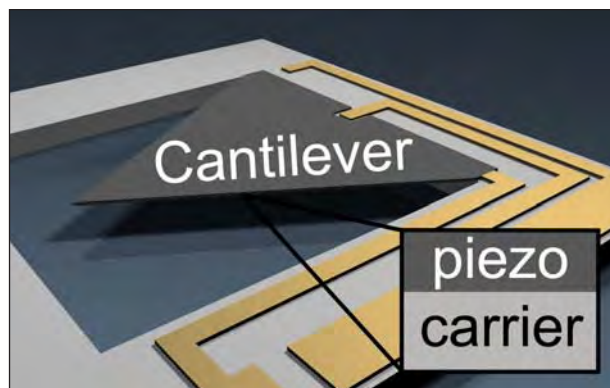


図 2. 圧電MEMS環境発電機の概略図。カンチレバーは、2種類の素材から作られ、電気エネルギーは、カンチレバーから回路を通して伝達されます

この重要なデータを無線で伝達することができます。これはまた、保守が不要であり、低コストで環境にも優しいシステムです。

しかし、タイヤ内部にこの装置を設置するためには、重力加速度 2,500g まで耐えられるように極めて頑丈に組み立てなければなりません。さらに、タイヤのバランスを維持するために、軽量化が図られる必要があり、その耐用年数はタイヤと同じ最低 8 年でなければなりません。

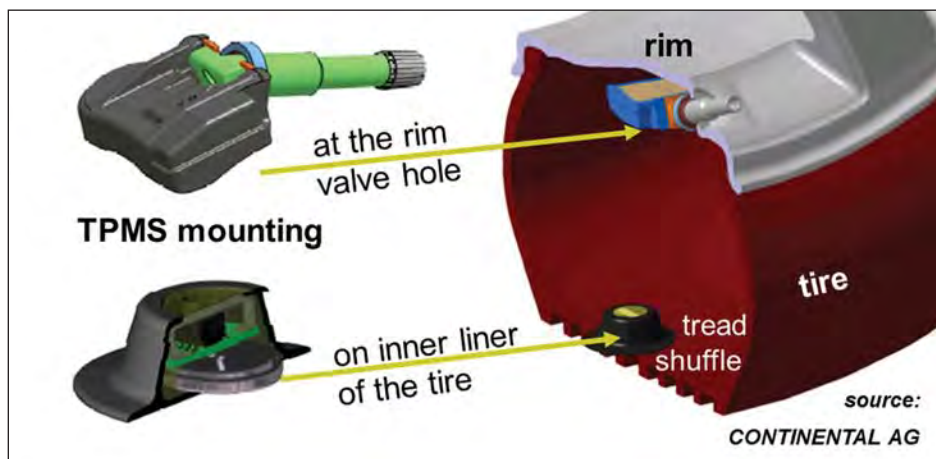


図 1. TPMS取り付け位置オプション リム上またはタイヤの内側

### 機械的応力から電気エネルギーへ

タイヤ内部の一点に設置されることで、圧電微小発電装置は、タイヤの特定部分が接地するたびに生み出される圧力から発電できるようになります。このカンチレバーは、自己偏向する圧電性セラミック素材の薄膜とシリコンキャリア層を組合せて、設計されたものです。これらの素材は、力学的に安定性を有し、取り出された力学的エネルギーを保存します (図 2)。

私たちのチームは、スプリング荷重圧電カンチレバーを三角形のデザインに決定しました。

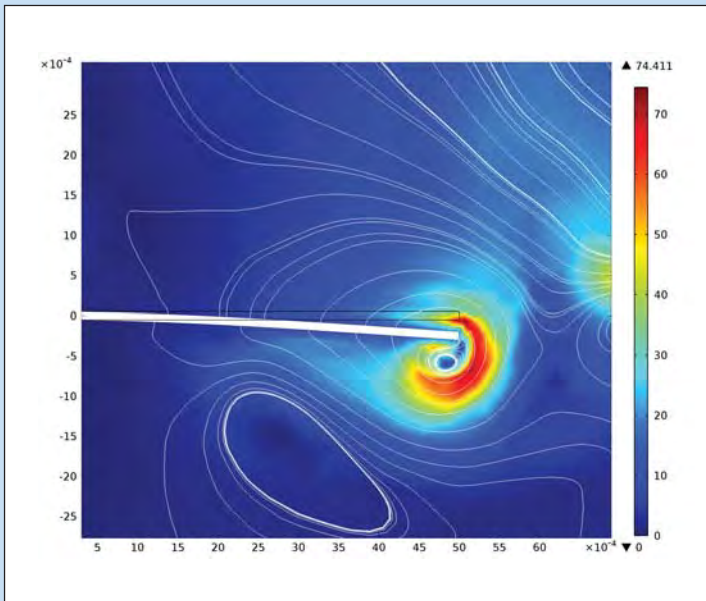


図3. 機械的なカンチレバーのエネルギーを、周辺ガスの不規則な運動エネルギーに送り込むことで生じる流速場を示す2次元流体構造連成 (Fluid-Structure Interaction) シミュレーション

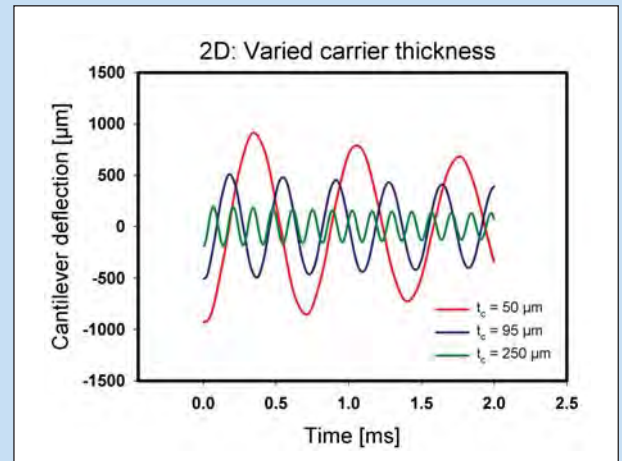
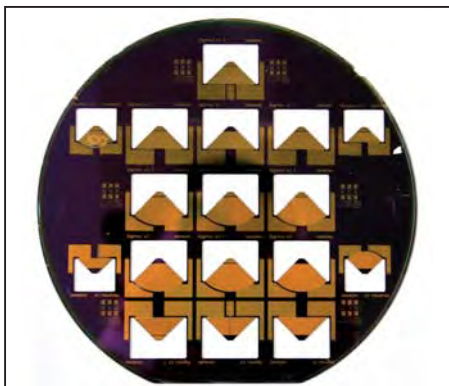


図4. 多様なキャリアの厚さで1パルごとのカンチレバーの偏向に関する2次元流体構造連成 (Fluid-Structure Interaction)



MEMS 環境発電機の試作品設計で利用されるウェハーの1つ

このような形状にすることで、表面方向に均一の応力分布が可能となります。Alexander Frey 博士は次のようにコメントしています。「一般的なカンチレバーの構造は、かなり質量があり、先端部分に集中的に重量がかかり重くなっています。通常の周波数でカンチレバーに起動信号を継続して送る従来型の方法では、これで良いかもしれません。しかし、私たちが扱っている高いエネルギーを生み出す力 (ダイナミックフォース) では、こうした起動手法を用いることができません。私たちは、非従来のアプローチを採用し、質量とその集中を避けなければなりません。減衰がより決定的な意味を持つので、このことは、もっと深刻な問題となります。」

シーメンス社チームの大きな課題は、減衰を最小限に抑えるために、どのようにカンチ

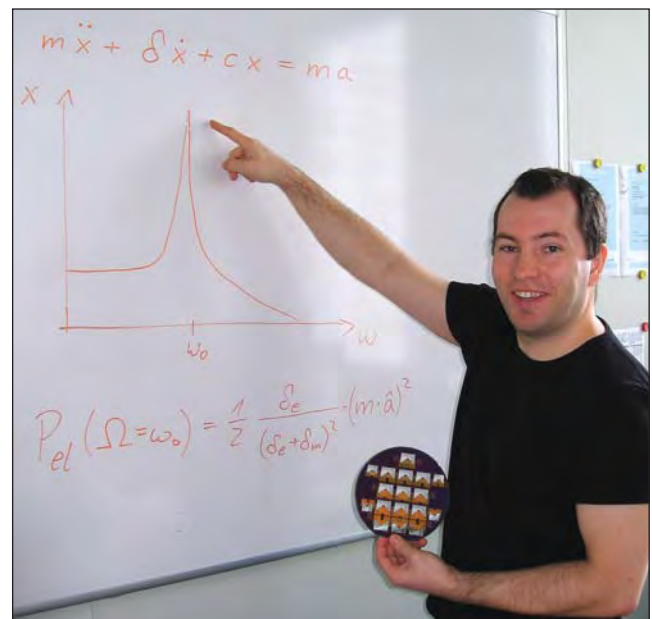
レバーの構造を最適化するかという点にあります。

空気制動が支配的であり、空気力学的な形状が重要なパラメータになると考えられました。カンチレバー部分は 100 ミリ平方メートルに限られており、そのうえ、層の厚さが自由に変更できる設計パラメータでなければなりません。「私たちは、こうしたパラメータの適切な数値を見出す必要がありました。従って、機械的振動ができるだけ長く継続し、可能な限りこの機械的エネルギーの多くを電気領域に移転することを確認したいと考えていました。正に私たちは、最適な構造を決定するため、また、十分なエネルギーが生成されることを確かめるために、数値ツールを必要としていました」と Alexander Frey 博士は述べています。

### 流体と構造：影響を受けやすい関係

このチームは、機械的エネルギーの周辺空気への伝播が重要であると認識し、最初にカンチレバーの流体構造連成 (Fluid Structure Interaction -FSI) 解析を行いました。

Kuehne 博士は次のように説明しました。「私たちは最初に定常シミュレーションから始め、この結果、いくつかの初期値を得ることができました。次に時間依存解析により、様々な物理的効果を調べることができ、カンチレバーの減衰における周辺空気の影響を理解することができました。」 (図3および4)



MEMS 環境発電機の試作品の生産で使用されるウェハーの1枚を持つIngo Kuehne博士

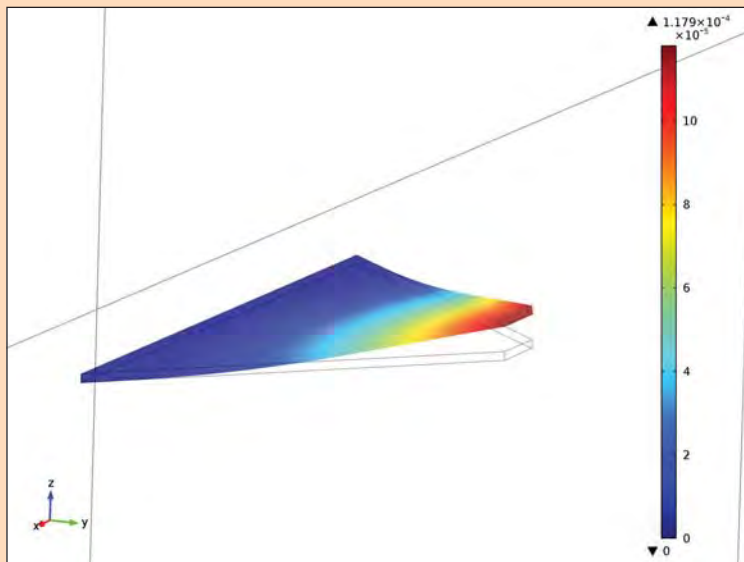


図5. 三角形カンチレバーの偏向を示す。3次元(3D)流体構造連成 (Fluid-Structure Interaction) シミュレーション

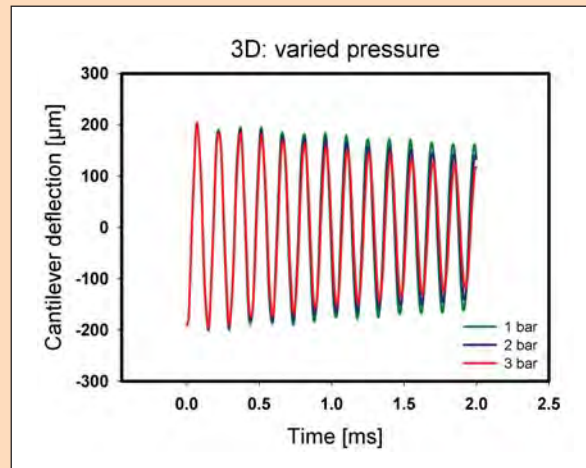


図6. 250マイクロメートルの厚さを持つキャリアーでのガス圧力に応じたカンチレバーの偏向に関する3次元(3D)流体構造連成 (Fluid-Structure Interaction)

このチームのメンバーは、3次元流体-ソリッド連成解析 (FSI; Fluid-Solid Interaction) シミュレーションを実行し、外部圧力とキャリアーの厚さに対応したカンチレバーの偏向の検証を進めました (図5 および6)。それぞれの厚さごとの最初の偏向で必要とされる最大応力を求めました。そのとき、Frey 博士は次のように報告しています。「カンチレバーの厚さが増加すると、MEMS 発電機の減衰作用に改善が

## カンチレバーの大きさや形状の最適化

見られることを定量的に確認しました。」

「私たちは、COMSOL Multiphysics シミュレーションソフトウェアを利用することで、この構造の作用を数値的に説明し、その結果、この研究所で実験を行うには、どのようにすれば良いかを学ぶことができました。」と Kuehne 博士は述べています。

シミュレーション結果を実験結果と比較するためには、カンチレバーが定期的に励起され、発電された圧電物質の電圧が記録されていないとなりません。

「この程度の時間で、COMSOL Multiphysics の中で 2,000 種類までのプロトタイプのパフォーマンスのシミュレーションを簡単に実行することができます。」

「実際のテストとシミュレーションを比較すると、全体的な減衰作用は、実際にかかなり高くなるということがあきらかになりました。これは物質に内在する損失のためにエネルギーが失われていると明確に説明したのです。こうした内部減衰と認識された数値を推定し、補正率を考慮に入れた後に、同じ結果に到達しました。このことで、私たちの COMSOL によるシミュレーションプロセスが信頼できるものであり、様々なパラメータ数値を使ってカンチレバーのパフォーマンスを調べることができることを再確認しました。」その後、このチームは、システム構成要素およびシステム統合の最適化へと移行することができました (図7)。

COMSOL の利用は、実物のプロトタイプの開発にとって重要でした。Kuehne 博士によると、一般的に 25 枚までのウェハーが 1 ロットとして構成される 1 つの技術的な実行に 3 人で 4 ヶ月を要するといえます。

「1 回の実行で、レイアウトにもよりますが、通常、2 つの完全なプロトタイプができます。テストには更に 2 ヶ月かかります。具体的に言いますと、高額なクリーンルーム設備は、6 ヶ月間にわたる 1 つのプロトタイプの実行で 10 万ユーロの開発コストがかかります。それにひきかえ、2 次元シミュレーションでは、数時間、3 次元シミュレーションでは、数日で測定することが可能です。この程度の時間で、COMSOL Multiphysics の中でパフォーマンスを簡単にシミュレーションすることができます。」

Frey 博士は、次のように結論づけています。「COMSOL と数値モデルのオプションがなければ、膨大な時間と費用のかかる多数の実物をつくらなければならないだろう。そうせずに、私たちは、MEMS の設計を最適化するプロセスを進めることができるようになりました。」

## 研究報告

[www.comsol.com/papers/11860/](http://www.comsol.com/papers/11860/)

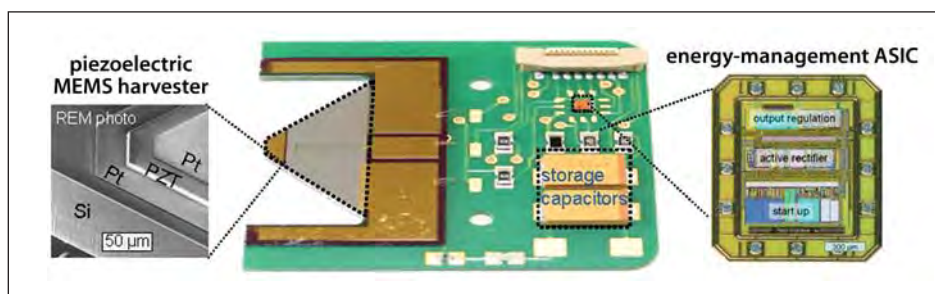


図7. 圧電MEMS環境発電モデルと周辺システムのプロトタイプ



## 超音波圧電円板トランスデューサーの最適化

プローブの発展により、超音波画像診断装置の設計技術が進歩している。COMSOL Multiphysicsのおかげで、エサオテ社は、これらの装置の性能（周波数帯域幅やステアリング性能など）を、どのように改善するかを研究することができるようになりました。

執筆者 LORENZO SPICCI氏 MARCO CATI氏 エサオテ社 R&D 部

**医**療用超音波画像診断装置は大きな進歩が見られ、より詳細な診断情報が提供されるようになった。最新の超音波検査技術や信号処理の発展のおかげで、検出感度、帯域幅、視界など重要なパラメータが大きく増加しました。特に帯域幅は重要です。多くの様々な周波数帯域をカバーすることで、より高画質となり、診断力が向上しました。また、このことにより、医師は、僅かなプローブ（体に置かれた携帯用装置の名称）で済ませられるようになってきました。小型化により、費用効率のよい超音波装置が数多くの応用分野に設置され、病院全体もしくは専門診療に活用されています（図1）。

プローブの設計技術は、新たな発展を遂げています。最終画像の画質は、プローブ製造で用いられる材料やそれらの相互作用の理解と密接な関係があります。

これは正に、イタリアのフローレンスにあるエサオテ社の多くの研究者たちが鋭意努力してきたことです。この企業の主要な業務は、超音波画像診断装置の製造と販売です。同社は1,350人の従業員を有し、その内の20%がR&Dに従事しており、年間世界売上高は3億ユーロを超えています。

### 材料モデル

超音波トランスデューサー（図2）には、特殊な材料が使われ、特殊な機械と約30ミクロンのレイヤーとを一体化するプロセスを経て製造されます。

「数多くのプロトタイプ completion に1年かかるものを、COMSOLモデルでは1ヵ月で結果が得られます。」

このことは、多数のプロトタイプをテストするために多くのコストがかかることを意味しています。さらに、測定あるいは理論的モデルによって扱うことができない疑問にも答えなければなりません。多くの場合、材料のサプライヤー自身がしばしば知らない情報を私たちは必要としています。



図1. MyLabOne(左)などの超音波診断システムの性能は皮膚上におかれたプローブ(右)に大きく左右されます。

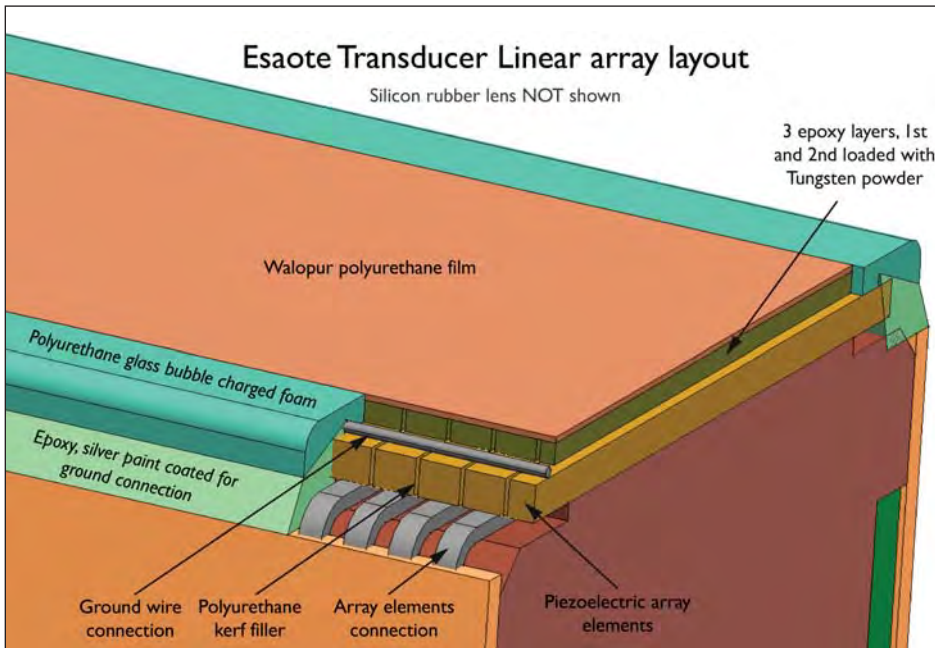


図 2. 複雑な形状と非常に特殊な材料の使用によって、超音波プローブの最適化は、挑戦的なモデリング作業になります。

なぜならば、サプライヤーは、通常、私たちが必要とする詳細レベルで、これらプローブの音響特性を考慮しているわけではありません。私たちは、サプライヤーよりも、その材料について、もっと知っていると言えます。

しかし、シミュレーションモデルでは、材料と作用の両方の変化を調べることができます。COMSOL Multiphysics は、専用の構造-音響相互作用で、これを簡単に実現でき、また他の物理連成などを含めることも可能となりました。

私たちが実験しているのは、プローブ内部のメカニカルレイヤが、どのように帯域幅に影響を与えるかという点です。私たちは、製造工程の多くの側面を変更することができます。また、セラミック層の厚さのような形状が、私たちの目的に最適であるかどうかを簡単にチェックできます。さらに、このモデルでは、指向性やビームステアリング機能のような重要な特性のシミュレーションも可能です。これらの特性を最適化する方法を見いだした時点で、製造部門に対して、しかるべく製品を変更することや、プローブ設計技術に関するいくつかの特性を変更することを要求します。

私たちの最初のモデル（図 3）は、材料特性の鮮明な画像を提供するので、トランスデューサーの性能の効果などを簡単に把握できます。

これには、圧電材料やトランスデューサーの製造段階で検討される重要な要素の研究、すなわち電気インピーダンスと遠距離場圧力レベルのシミュレーションによる研究が含まれています（図 4）。

また、このシミュレーションには、圧電セラミック円盤の前面のマッチング層も含まれています。この層は重要です。なぜならば、最大出力を伝達するためにインピーダンスがマッチングしていなければならない電気システムと同じように、圧電円盤からの音響出力を人体へ伝達する際にも同じことが言えるからです。音響インピーダンスの単位はレイリー (Mrayls) です。この場合、セラミック材料は高い音響インピーダンス (30 レイリー) を持っているが、生物材料は低い値 (1.5 レイリー) を示します。

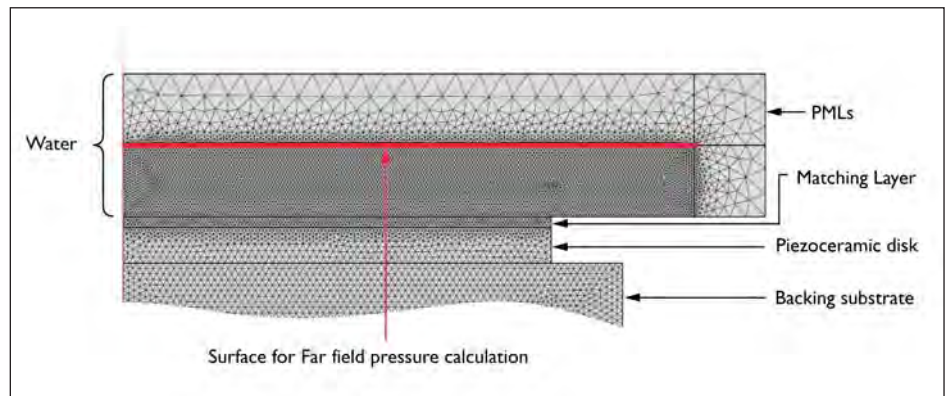


図 3. 基盤および前面マッチング層がある場合のトランスデューサーの指向性および最終遠距離場圧力のシミュレーションで使われるモデル

弾性、圧電性、誘電性物質の特性は、トランスデューサーの性質を決定する上で、全て同様に重要であることを見出しました。このことは、これらのパラメータは、完全なプローブの全体モデルの中で単純化されないことを意味します。テスト計測とシミュレーション結果は、全ての周波数帯にわたって一致しており、そこでは共振と反共振周波数が約 3% の許容誤差の範囲で、お互いに適合しています。この結果、私たちは、このタイプのアプリケーションをモデル化するために使用した技術を信頼することができました。

更に、バックング回路基盤を調査することにより、このパラメータが電気インピーダンス応答に大きく影響を与えることもまた発見しました。

この最初のモデルで私たちは、計算時間とメモリーを削減するために PML を使用しました。私たちのトランスデューサーのために、遠距離場領域での圧力を研究することが重要であり、シミュレーションによる遠距離場領域の圧力が、水タンク内の深さ 30 センチに設置された薄膜ハイドロホンを使用した測定結果と比較されました。生物組織は、水とよく似た音響作用を持ち、しばしばテスト標準として用いられます。私たちは、最大振幅周波数で 5% 以内の差異、対応する振幅で 1 デシベル以下の差であることを確認しました。

### 完全なプローブのモデル化

プローブ材料のシミュレーションで COMSOL がどれほど有効に機能するかを確認してきましたが、私たちの次のモデルでは、非常に複雑な形状と運転構造を持つ実際のプローブまでその範囲を拡大しました。



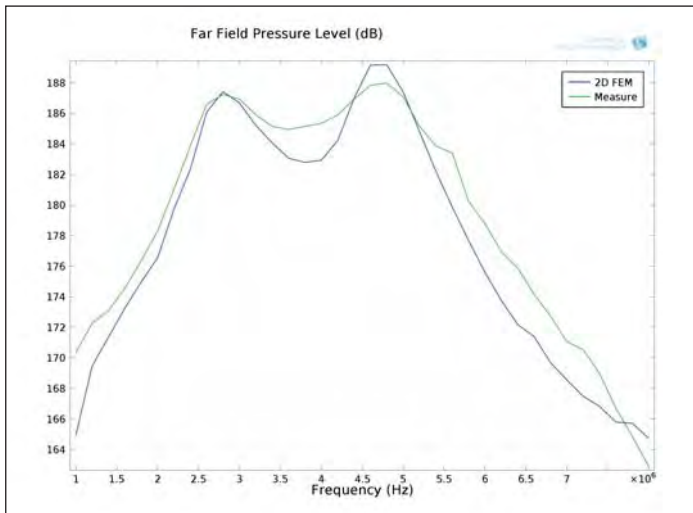


図4. 最初のモデル(図3)の遠距離場圧力レベル(デシベル)。実験結果とモデル結果が十分に一致しており、モデリング技術の信頼性が高い。

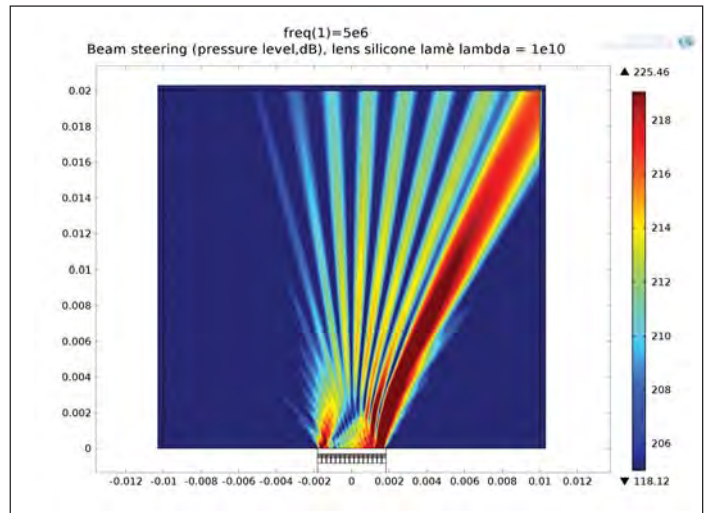


図5. シリコンレンズによって、どのように超音波ビームが進行し、方向づけられるかを示すCOMSOLモデル

それは、245 ミクロンピッチで 144 個の圧電素子からなる 5 メガヘルツの広帯域の線形配列プローブのシミュレーションでした。このトランスデューサーの設計は、特殊な圧電複合材料、硬質ゴムバッキング基盤、4つの音響マッチング層、シリコンゴムレンズで構築されました。私たちはまた、ビームの焦点調整とステアリングの研究から始めたので、シリコンゴムレンズの特性を十分に特定することができました(図5)。

さらなる研究は、どのように効果的に COMSOL モデルと KLM モデル (KLM Krimholtz, Leedom, Matthaei) ベースとし

た等価回路モデルを一体化させることによって、このモデルを拡大しうるかについて検証することでした。KLM 手法とともに伝送線路マッチング理論を用いて、一定の満足できるプローブ性能を引き出すマッチング層の音響インピーダンスと厚さの値を決定することができるようになりました。プローブの一定の入力仕様(感度、帯域幅)で、KLM シミュレーションを実行し、(簡単に COMSOL 幾何図形に組み込まれている) 4つのマッチング層の最適な厚さを計算し、(ヤング率とポアソン比に変換された) 音響インピーダンスを計算することが可能となりました。

KLM モデルは、マッチング積層を設計するために、より簡単で、より早く、より効率的なツールであることが証明されました。このモデルは COMSOL により実行され、結果として、設計技術の改善につながりました。

#### 著者の追記

この研究はパリで行われた COMSOL CONFERENCE 2010 で発表され、最優秀研究論文賞を受賞しました。この論文は、[www.comsol.com/papers/10141/](http://www.comsol.com/papers/10141/) からダウンロードできます。

### 執筆者の紹介

Lorenzo Spicci 氏(右)は、イタリアフローレンスのエサオテ社に材料エンジニアおよび圧電トランスデューサー設計者として10年間勤務しています。彼は、フローレンスのフィレンツェ大学で「優秀な成績」で学位を取得し、その後、米ジョージワシントン大学で応用物理の修士を取得しました。

Marco Cati 氏(左)は、イタリアフローレンスのエサオテ・バイオメディカ社の R&D 部門に 2005 年に入社し、超音波および磁気共鳴装置に関する EMC (電磁両立性) の設計および試験業務に従事します。彼は、ローレンス大学を優秀な成績で大学を卒業し、同大学から電子工学で表彰されました。後に同大学で電子工学博士号を取得しました。2001 年から Cati 博士は、イタリアの認定機関 ACCREDIA の検査技師として勤務しています。





# 有限要素解析と電気回路シミュレーションを組み合わせた変流器の設計技術

電気回路 SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) モデルと一体化された熱および電磁気の有限要素解析を利用する変流器の過渡シミュレーションは、ABB 社のセンサー技術開発の基礎となっています。

執筆者 JENNIFER HAND 氏

**高**機能磁気センサーとアクチュエータの設計技術は、周囲の状況に対応した部品と電磁気相互作用の完全な理解が必要です。電気変流器とセンサーは、配電管理システムにおける電流の測定のために使われており、この2次巻線は、通常、2次側で小さなインピーダンスを確保し、電流誤差を低減し、高電圧を避けるために、短絡(ショート)に近い状態で作動しています。しかし、実際の世界では、材料の特性、詳細な設計、動的荷重(ダイナミックローディング)などいろいろな相互作用があるため、理想的な状態から乖離が常に存在すると考えられます。

「外部電源や抵抗が変流器鉄心のような磁気サブシステムと相互に作用しあっている中では、有限要素解析 (FEA ; Finite Element Analysis) が強力な調査方法です。FEA は、こうした鉄心の過渡特性や生成された磁束密度分布を描き出します。

また、FEA は、考慮する必要がある温度依存性材料特性の効果と自己発熱も解析します。特に部品の形状が複雑で、その作用が簡単に予測できない場合には、FEA は特に重要です。」ドイツのラーデンプルク ABB 研究センターで産業用センサー技術に特化した研究を進める、センサー基礎科学者 Rolf Disselnkotter 博士は述べています。



Rolf Disselnkotter博士、産業用センサー技術に特化したセンサー基礎科学者 ドイツ ラーデンプルク ABB 研究センター

「私たちは、さまざまな設計パラメータが性能にどんな影響を与えるかを研究しています。このことで、ABB 社は磁気センサーやアクチュエータその他の磁気部品の将来の開発に応用できる知識を蓄積しています。」

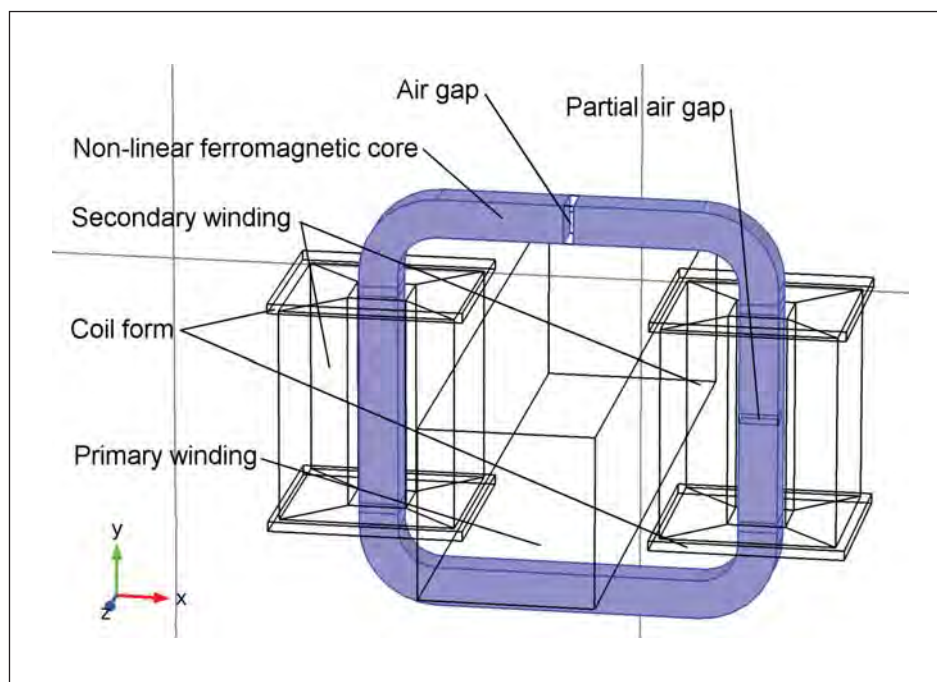


図1. 青色の強磁性体の鉄心を持つ3次元の変流器のジオメトリ



Disselnkötter 博士は、ドレスデン大学の技術者とともに研究に従事しており、3年間にわたり COMSOL Multiphysics を使ったモデリング技術の開発を行っています。「私たちは、さまざまな設計パラメータが性能にどんな影響を与えるかを研究しています。このことで、ABB 社は磁気センサーやアクチュエータその他の磁気部品の将来の開発に応用できる知識を蓄積しています。」

異なる物理的性質の連成（カップリング）は、このモデルの基本的な課題の一つであるが、このモデルは、既に3次元ジオメトリや磁気的非線形解析および過渡解析を連結しています。「私たちは、いくつかの特性を併せ持つと考えられる先進的モデルへと研究を進めています。」

### 相互作用の理解

図1は、このチームの最新テストモデルの幾何図形を示したもので、外部電気回路モデルと結合された変流器の過渡有限要素解析を可能とするものです。Disselnkötter 博士は次のように説明します。

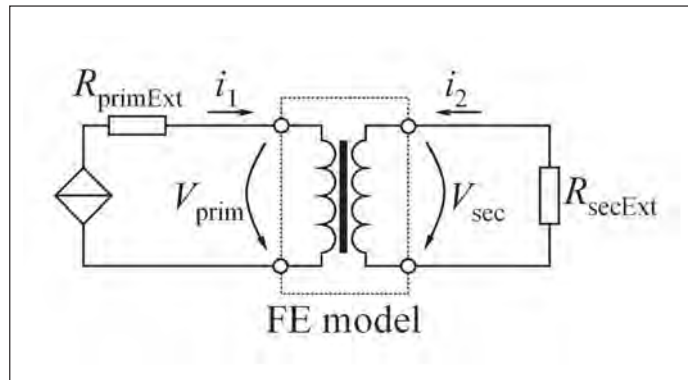


図2. 変流器の有限要素モデルと連結された1次および2次の電気回路

「私たちは、ジオメトリの設計変更、材料特性、1次電流分布、温度や電気回路が、電流測定の精度に、どのような影響を及ぼすかについて関心を持っています。簡単な修正や後の最適化処理を可能とするため、パラメータに基づく3次元モデルの幾何図形を利用します。なぜならば、この変流器モデルを意図的に『不完全』にする潜在的な問題があることを強調したかったからです。それゆえ、このモデルには小さなエアギャップが設けてあります。これで私たちは、これらの効果を知ることができます。」

右側と上部に意図的に作られたエアギャップは別にして、これは、2個のコイルボビンに配列される単数の1次巻線（バルク・バスバー）と複数の2次巻線とを持つ一般的な変流器です。

この磁気システムは、アンペールの回路法則およびファラデーの電磁誘導の法則によって説明されます。磁心材料としては、流束密度  $B$  と  $H = f(|B|) \cdot |B|$  形式の磁場  $H$  との間の非線形関係が想定されます。このため、電気信号の正確なモデリングは、時間依存シミュレーションが必要である。さらに、このエアギャップは、非対称の形状をもたらし、1次および2次巻線の間で不完全な連成（カップリング）の原因となります。

### 電気回路モデルとの統合

図2は変流器の有限要素モデルがどのように電気回路モデルと統合され、1次側で正弦波電流源、2次側での外部負荷抵抗器と、それぞれどのように連結されたかを示しています。「私たちは、SPICEのネットリストとしてこれをインポートするよりも、COMSOL Multiphysics で提供される所定の部品から電気回路を構築しました。次に磁気モデルとの連成（カップリング）が、変流器の両側の電流と電圧の方程式を使って、実行されました」と Disselnkötter 博士は述べています。

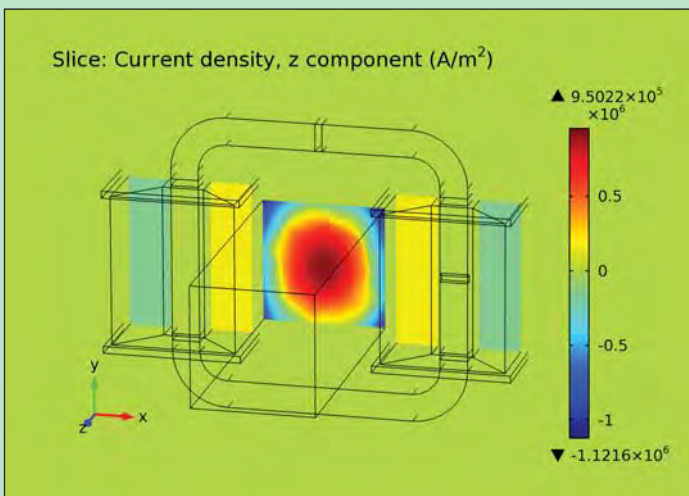


図3. 1次導体における表皮効果を持つ電流通過領域での総電流密度のz成分のシミュレーション ( $i_{1peak} = 1000 \text{ A}$ ,  $R_{secExt} = 20 \Omega$ ,  $t = 0.23 \text{ s}$ ).

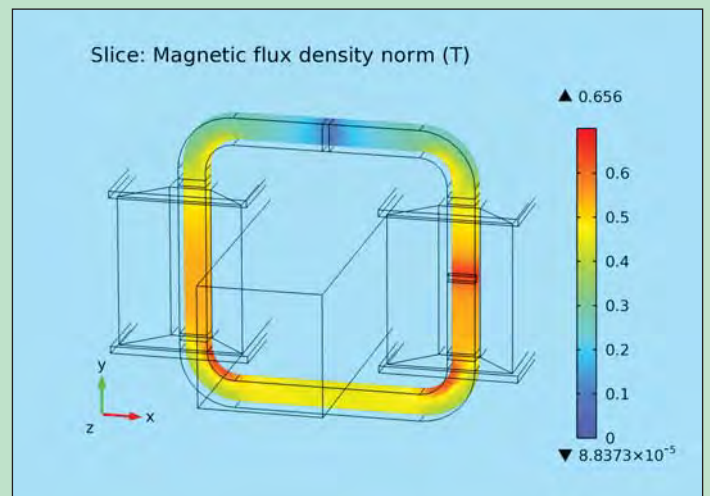


図4. 強磁性体変流器鉄心の中心面における磁束密度ノルムのシミュレーション ( $i_{1peak} = 1000 \text{ A}$ ,  $R_{secExt} = 20 \Omega$ ,  $t = 0.23 \text{ s}$ ).



### 渦電流

電気損失および磁場分布は、ともに、この導電体の中の電流密度分布によって決定されます。高周波の交流電流は、変化する磁場を誘導し、この結果、電場が生じます。このため、このチームでは、導電体の中で発生し、その結果、電流分布を変えることになる渦電流をモデル化したいと考えました。Disselnkotter博士は次のように述べています。「これをモデル化することは少しやっかいです。なぜならば、電気回路と連結する必要があるのは、外部電流ではなく、その結果生じる総電流だからです。私たちのモデルの1次バスバーのようなバルク導体の総電流は、渦電流の反作用のために、より低くなります。そこで、私たちは、1次総電流が、既に述べた正弦波経時変化の結果として生じることを確認するために、グローバル方程式アプローチを利用しました。」

このように、このモデルは、1次伝導体内の空間依存性および時間依存性の渦電流密度を算出し、その結果として磁心の流束密度分布が得られます(図3および4)。「このことは、私たちにとって理想的でない変流器がもたらす電流誤差や損失の正確な計算にはとても重要なことです(図5)。」

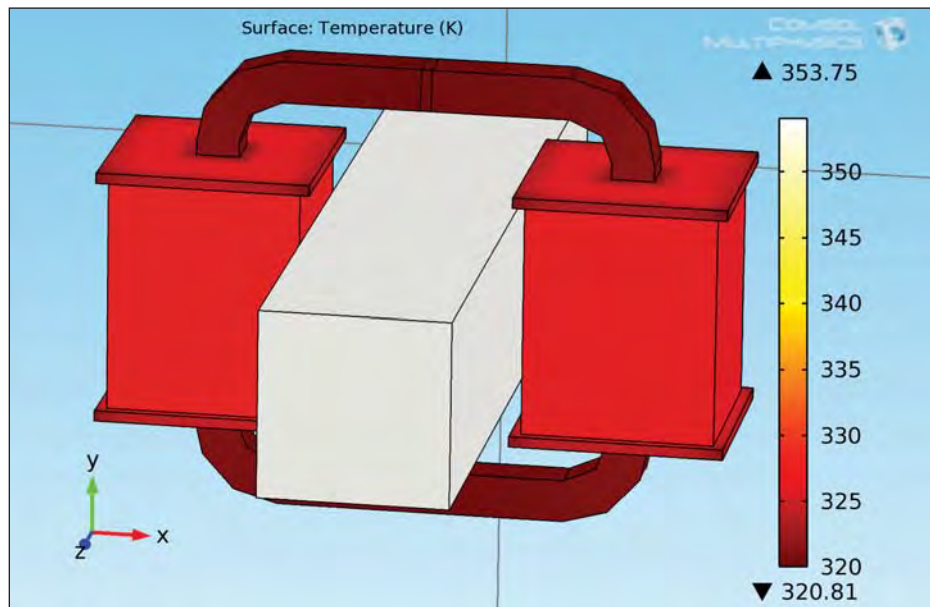


図6. 固体表面の定常温度場シミュレーション ( $i_{1peak} = 1000 \text{ A}$ ,  $R_{secExt} = 20 \Omega$ ,  $T_{amb} = 300 \text{ K}$ ).

### 過渡 - 電磁気シミュレーション

COMSOL Multiphysics はまた、熱モデルの構築にも活用されました。このモデルでは、対流係数を使って、使用されている固体材料の内部の熱伝導と表面の外部対流の両方を計算に入れています。

一般的に電磁材料の特性は、温度依存性があり、自己発熱も考慮されなければなりません。この結果、電磁有限要素モデルは、組立部品の熱有限要素モデルと完全に連結しました。

しかし、ほとんどのアプリケーションでは、電磁モデルと熱モデルの時間的尺度はまったく異なっています。従って、このチームは、この2つのモデルのソリューションを交互に反復して適用することを決定しました。均一な温度領域が、電磁モデルの最初の時間依存研究ステップの入力データとして用いられました。3回程度のシミュレーション実行期間後に、熱モデルへの新たな入力データとして、時間平均局所出力損失密度が得られました。続く熱シミュレーションでは、新たな温度領域が計算され、電磁モデルへ返送されました。このソリューションは、5回の繰り返しループで収束し、図6で示される温度領域に到達しました。また、図3から5に表示された結果は、温度分布による影響も受けていました。

このチームはこの研究を継続しています。「私たちは、より正確な情報を把握し、変流器鉄心の積層効果やコイルの異方性構造の効果など、より詳細なデータを収集する必要があります。さまざまなモデルを検証するために、実物の電磁部品での実測値をシミュレーション結果と比較する計画を立てています。最終的には、私たちのモデルを信頼することができることを確認し、これを設計プロセスの最適化に利用したいと思っています。」

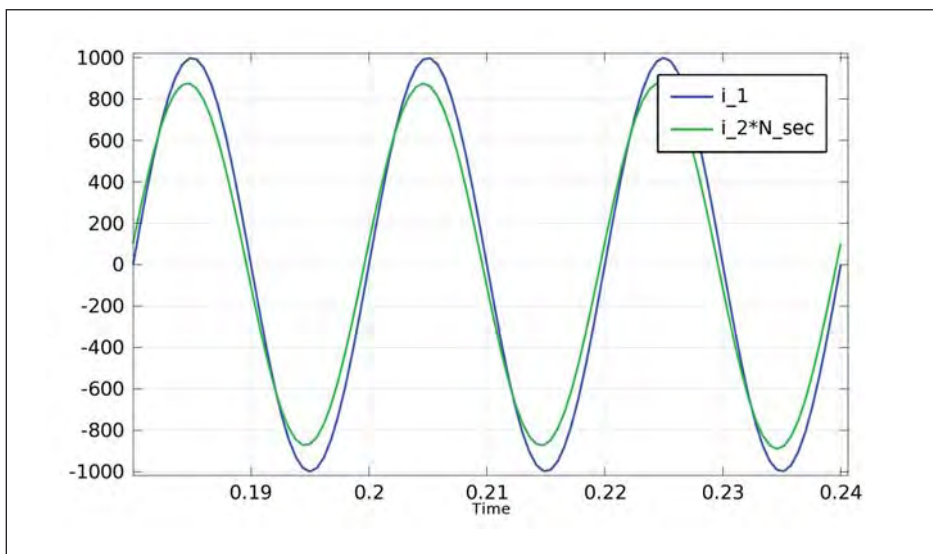


図5. 1次電気回路  $i_1$  および 2次電気回路  $i_2 \times N_2$  のシミュレーションは、鉄心内のエアギャップのために不完全な変流器の連結(カップリング)を示す ( $i_{1peak} = 1000 \text{ A}$ ,  $R_{secExt} = 25 \Omega$ ).

### 研究報告

[www.comsol.com/papers/8233/](http://www.comsol.com/papers/8233/)



# 脊髄電気刺激装置における癬痕効果のモデリング

シミュレーションによって医師は、埋込型電極が、どのように背痛と脚痛を治癒するのかを知ることができるようになりました

1960年代から脊髄電気刺激（SCS; spinal cord stimulation）が、慢性的な背痛と脚痛を和らげるために利用されるようになりました。この手法は、脊髄に直接、電位を当てるために使用されるいくつかの電極を外科的に埋め込む処置を伴うものです（図1）。年間約3万件の手術が行われています。

「私たちは、過去に行われてきた、いかなるものよりも、はるかに洗練された形状にすることを決定しました。」

しかし、まだ、この作用については正確に理解されていません。SCSは、なんらかの形で人間の痛みの伝達回路を妨げます。これまでの15年間にわたり、研究者は、電気刺激の効用に関してより詳細な研究を進め始めていました。この方法の魅力は、長期間にわたる薬物治療に伴う多くの副作用がなく、有益な結果が得られることが知られている点にあります。

この治療と関連のある現象の1つは、数年にわたり効果が持続することにあるが、時間の経過とともに、この電気刺激は、一般的に再プログラムされ、当初のパラメータを変更しなければなりません。電極が埋め込まれた後、早ければ4から6週間後には、電極と接触する部分やその周辺組織で癬痕が発生します。逆説的ですが、このことが電極をしっかりとした適切な位置に固定するパドルの役割を果たすと同時に、この装置の電気的特性を変更することになるので、この電気刺激は再プログラムされなければなりません。この再プログラミングは一般的に試行錯誤を繰り返します。

この現象に関する研究は Jeffrey Arle 博士と Jay Shils 氏および Kris Carlson 教授によって進められました。

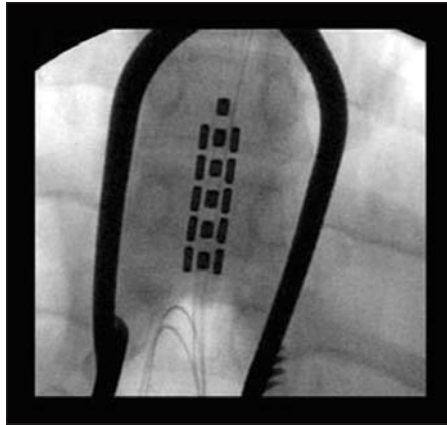


図1. 慢性的な背痛の治療のために脊髄上に設置された電気刺激電極配列のX線画像

Jeffrey Arle 博士は、計算論的神経科学の学位を持つ神経外科医であり、Jay Shils 博士は電気工学と計算論的神経生理学に関する経験を持ち、Kris Carlson 教授は、プログラミングに関する専門知識を有し、Shils 博士と同様に COMSOL ソフトウェア利用の専門家です。彼らは全員、マサチューセッツ州バーリントンの Lahey クリニックで神経調節グループに勤務しています

彼らは、比較的抵抗の高い癬痕組織で埋込まれた電極で想定されるインピーダンスが変わり、同様に電場分布パターンが変わるとの仮説に基づく研究を行っていました。3次元数学的モデルは、これらの変化を正確に予測し、電気刺激パターンの正確な修正を定義するために利用できることを証明することが彼らのテーマでした。これにより、この治療でしばしば観測されている性能の低下を食い止めることができると考えられました。

## モデリング

彼らは、広範囲にわたる以前の取り組みをもとに、脊髄分節の正確な測定、ニュートロン数の推定、それぞれのタイプの数に関する膨大なデータを保存していました。彼らはまた、白質（軸索 - 脊椎の中のニュートロンからの信号を脳に伝達する「配線すること」）に関する詳細な公開情報を利用することができました。計画では、このデータをデジタルデータベースとして保存し、アクセスや操作を可能とするものでした。このデータベースは、その後、脊髄の3次元モデルを構築するために利用されたが、それは過去に行われていたどれよりもより正確でした。

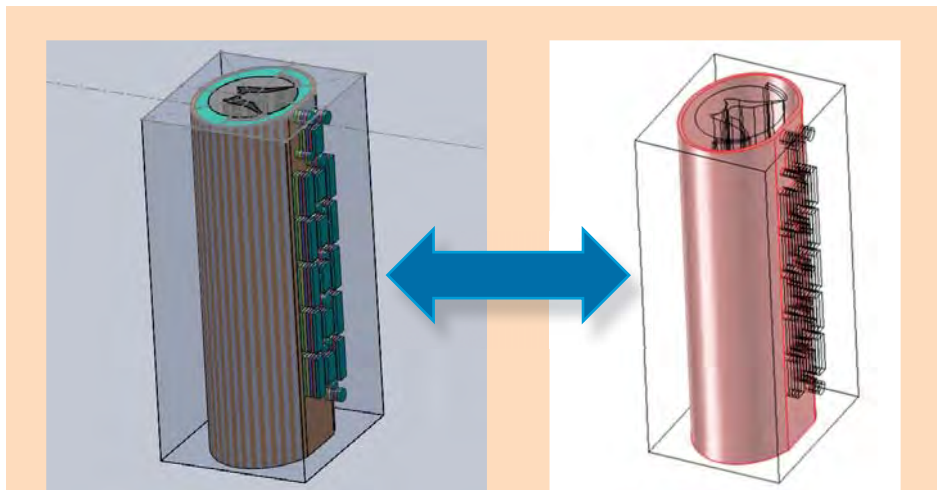


図2. COMSOL Multiphysicsにインポートされ、SolidWorks(左)で生成されたジオメトリは、これまでのこの種のモデルでは最も多くの部分から成るモデルを作り出しています。医療装置企業によるほとんどの作業は2次元でおこなわれています。Laheyクリニックが作った3次元モデルは、癬痕と電極の $4^{32}(10^{19})$ 立体配置が可能な構造を持っています。



このモデルの基本構造は、SolidWorksのCADプラットフォームで使って作られました。SolidWorksモデルは、SCSが直面する重要な問題のいくつかを解決するためにCOMSOL Multiphysicsにインポートすることができます(図2)。「COMSOLのこの優れた特徴は、SolidWorksからCADをインポートできるだけでなく、その後、ボタンひとつで、これらをジオメトリに変換することができ、これらの変換は、どんな設定や材料特性をも失うことなしに、COMSOLモデルで表現されます。SolidWorks用LiveLinkは、実際にプロセスの合理化に役立ちました」とCarlson教授は述べました。

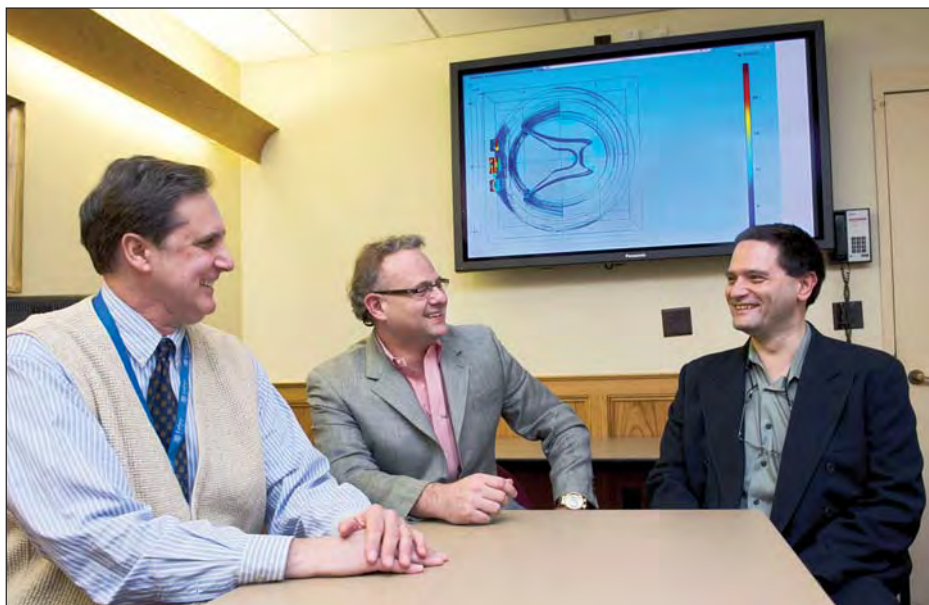
### コンピュータの活用

この特別プロジェクトの目標は、瘢痕の形成が、どの程度、電極と軸索との間の電場分布に影響を及ぼすのかを実験することでした。これはとても重要です。なぜならば、脊髄を流れている軸索(白質)は、活性化しているかないかにかかわらず、電気的刺激の長さに基づいており、電位勾配によって支配されています。痛みをつかさどる信号を脳に伝達するのは、この軸索であり、このことは重要な意味を持っています。

**「彼らは、脊髄の中で実際に刺激を受けているものを正確に知らなければなりませんでした。—それこそがCOMSOLソフトウェアの役立つところでした。」**

埋込まれた電極は、どのようにして痛みの治療を行うのかを研究することが私たちの目標でした。そこで、この研究プロセスの一環として、脊髄の回路および、この回路における電気の影響をモデル化した。この段階に到達するために、「電極自体から発生する電場と、これらが通過する組織特性の全てをモデル化する(Arle博士)」ために、脊髄の中で実際に刺激を受けるものを正確に把握しなければならなかった—それこそがCOMSOLソフトウェアの役立つところでした。

脊髄は脳脊髄液(CSF; cerebrospinal fluid)の中で基本的に浮遊しています。CSFは硬膜(Dura)と呼ばれるチューブのような薄膜で覆われています。



脊髄電気刺激モデル結果について議論する、左からKris Carlson教授、Jeffrey Arle,博士、Jay Shils博士。全員がマサチューセッツ州バーリントンの神経調節グループに勤務しています。

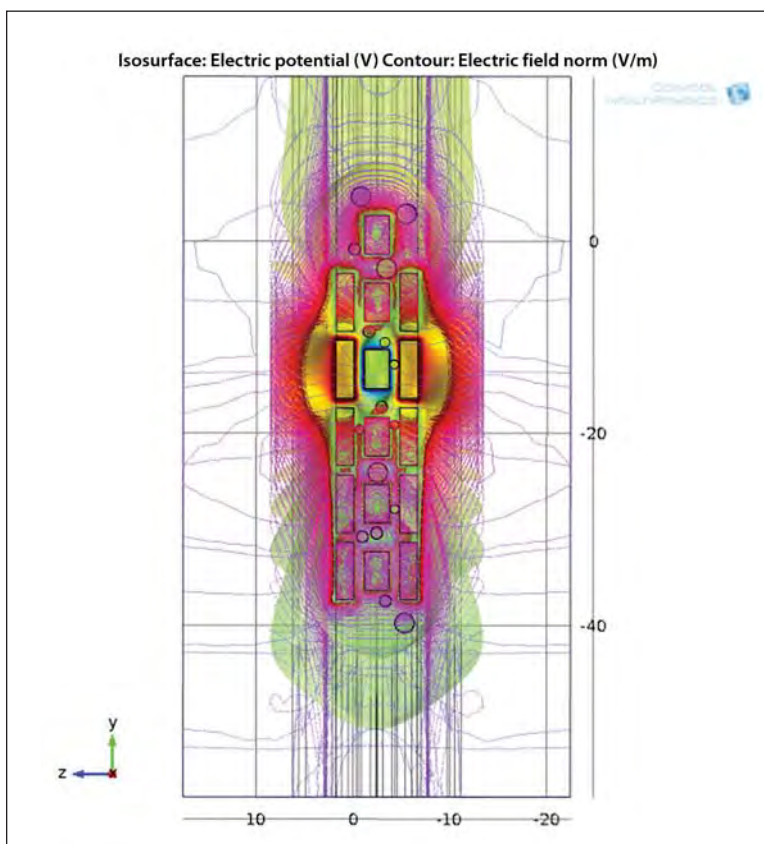


図3. 瘢痕のある脊髄上の刺激装置配列の表示。電場の等電位線および等高線。瘢痕の導電率は、当初、細胞組織の導電率で設定され、陽極(赤)は、陰極(青)領域を、不要な領域から中心の目標に向かって適切に遮断しています。

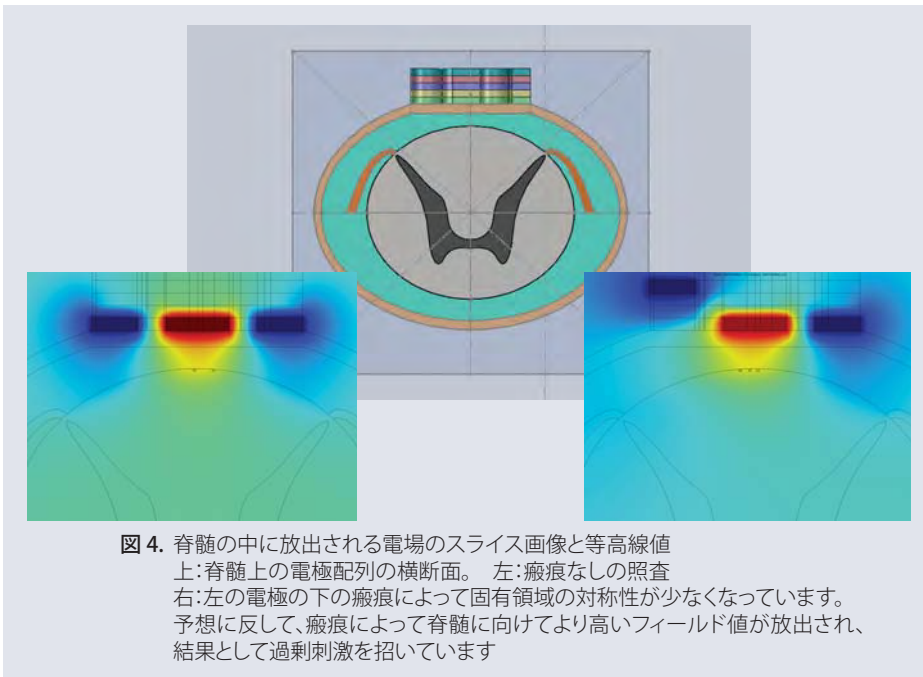


図 4. 脊髄の中に放出される電場のスライス画像と等高線値  
上: 脊髄上の電極配列の横断面。左: 瘢痕なしの照査  
右: 左の電極の下の瘢痕によって固有領域の対称性が少なくなっています。  
予想に反して、瘢痕によって脊髄に向けてより高いフィールド値が放出され、  
結果として過剰刺激を招いています

電気刺激電極は、硬くて電氣的抵抗のある硬膜の外側に設置されます。さまざまな物質は、それぞれ非常に異なった導電率があり、硬膜の伝導率は低く、CSF の伝導率は 2 桁ほど高いです。

電氣的環境を研究するために、このチームは COMSOL Multiphysics を利用して、脊髄、硬膜、脳脊髄液、硬膜外組織、傷痕組織、刺激装置である電極などの有限要素モデルを作成しました。

このシステムの勾配は、これらさまざまな物質の関連する伝導率によって影響を受けます。

正確なモデルが求められる理由の 1 つは、電位場が脊髄の長さによって変化する点にあります。ある時点では、ニューロンで活性化電位を生成するために、十分に高い電位勾配が得られない可能性もあるが、0.5 ミリから 1 ミリ離れれば、限界勾配を得られる場合もあります。こうした変化は、さまざまな理由で生じます。つまり、電極の形状には違いがあります。物質は均一でなく、例えば、硬膜それ自体は、この器官のいたるところで均一ではないかもしれません。あるいは、この器官のある部分では、他の部分よりも高い抵抗を示す瘢痕のような物質もあります。また、脊髄のさまざまな部分では脳脊髄液にばらつきがあります。

「SolidWorks と COMSOL を一緒に利用することで、SolidWorks でジオメトリを非常に簡単に変更することができ、COMSOL で導電率と誘電率における変化結果を研究すること

ができます。このシミュレーション出力結果は、社内のニューロン・ネットワークのモデルに様々な方法で接続されます。この結果、活性電位が脊髄の中で発生する場所のより正確な理解につながり、また、いくつかの複雑さを考えると、ある部分での小さな変化が、エネルギー勾配に実際に替わりうることを明らかにすることができて良かったと思います」と Shils 博士は述べました。

Carlson 教授は、このチームが、この研究の中でどれほどシミュレーションを活用していたかについて次のように説明しました。「私たちは、過去に作成したいかなるものよりもはるかに洗練された形状にすることを決定しました。2 次元とは対極にある 3 次元にすることだけでなく、さらに正確な脊髄の分析結果を追求しました。このモデルでは、全ての物質のパラメータを設定し、主に導電率、次に物理特性を扱い、さまざまな電極の電圧、パルス幅、周波数などを変更しました。2 人の医師が 1 年ほど前に意図した瘢痕に関する研究のために、私たちは信じられないほど洗練された形状を手にいれました。脊椎の表面に散らばった 64 種類の瘢痕と 64 箇所の電極があり、それぞれ COMSOL の中で非常に簡単に扱うことができます。もう 1 つの大きな特徴は、シミュレーションを実行した後、膨大な量の後処理が機能することにあります。

COMSOL のグラフィック機能では、あらゆる種類のフィルタリング基準を実行でき、またデータをエクスポートして、この目的のために専用ツールで、さらなる後処理を実行することもできます。」

Arle 博士は次のように述べました。「瘢痕組織の形状により、電場状態が変化します。多くの場合、プログラマーは、この瘢痕がまったく同じように見えることを知らないまま、患者に対して最良の治療を施すために、電気刺激装置をあちこちに移動しようとしています。今、このモデルにほんのすこしだけ追加することによって、瘢痕の形状に起因する電場のゆがみを理解できるようになります (図 4)。」

プログラミングが的確であれば、すぐに痛みを和らげる上で、素晴らしい効果があることを、この手法は証明しています。

Shils 博士は次のように述べました。「COMSOL Multiphysics で行っていることを理解することが特に重要です。あなたが使用しているものの物理現象を理解しなければなりません。つまり、なぜ、あなたは他のモデルではなく、このモデルを使っているのかという点です。あなたが選択したメッシング方法は、COMSOL が常に高い柔軟性と正確さを提供していますが、この解析にとって極めて重要な部分です。正確な要素を選択し、それから優位性のあるものを見つけ出します。次の段階では、適切な方程式、始点、メッシングを選択します。メッシュ精度は特に重要で、多くの活性化が見られる軸索の曲線の周辺は重要です。メッシュ解像度が不適切であると、電場と勾配の主な特質を見失うことになります。」

### 次の目標は何か?

このグループでは、神経線維が神経回路シミュレーションソフトウェアの中で刺激を受けたことを示す COMSOL データをインポートすることによって、どのように SCS が痛みを緩和するかを解明しようとしています。Arle 博士は、このプロジェクトに関する彼の意見を次のように要約しました。「人体構造および生理システムにおける生体システムでは、多くで行われてきた応用技術関係のプロジェクトに比べて、それほど大規模な研究は行われてきませんでした。生体構造、生理学、神経科学を理解し、これを徐々に数学や物理まで拡大することが必要です。人々は、こうしたアプローチが必要であることを認識し、私たちの研究を正確に理解しはじめています。」

## 磁束漏洩検査シミュレーション

Salzgitter Mannesmann Forschung 社は、シミュレーションを活用して、電磁気検査の中でスチールパイプの性質を評価し、隠れた欠陥の診断プロセスを改善しています。

執筆者 Jennifer Hand 氏

**修**理するか、それとも作り直すべきか? 巨大なスチールパイプに亀裂が発見されたとき、この亀裂がどの程度悪いのかという疑問に対して重点的に取り組まなければなりません。安全が最優先の検討課題であることは言うまでもありません。また、多額のユーロ支出やプロジェクト納期もまた大きな問題ですが、最も緊急に必要なものは詳細な情報です。これは、大型部品の製造業、特に高圧あるいは高温の下での製造を目的とする製造業にとって、珍しくない普通の課題です。

「最終目標は、私たちが亀裂の形や大きさを正確に評価できるようにするため、さまざまな亀裂の形状や大きさが、どのように測定信号に影響を及ぼしているかをシミュレーションすることです。」

品質検査は、スチールの全ての製造工程で行われています。最も一般的な非破壊検査 (NDT: non-destructive testing) 手法は磁束漏洩検査であり、これはスチールチューブの一部を磁気化するものです。

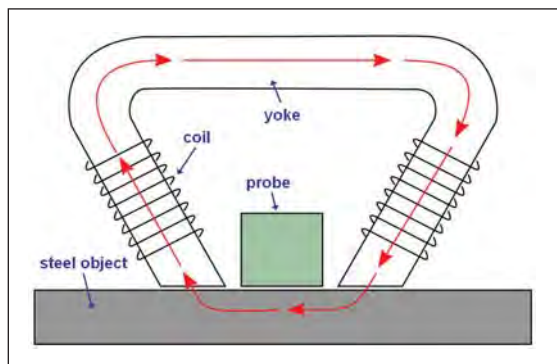


図 1. 磁束漏洩検査システムの概略図。



図 2. 検査作業中:ヨークはオレンジ色のボックスの後ろのプラスチックの中に組み込まれており、スチールパイプが回転しているとき、このボックスはスチールパイプにそって、表面の 1 ミリ上を動きます。

ここで検討される検査システムは、馬蹄形で、両端の周囲を包まれたコイルを持つヨークで構成されています。コイルに流された 3 キロヘルツの交流電流は、薄い磁場を生成します。そして、2つのコイルの間の磁束漏洩が、磁場測定用の器具 (ホールプローブ) で測定され、スチールパイプの中の磁束の断絶により亀裂の可能性を示します (図 1 および図 2)。

高感度磁場センサーは、表面付近の亀裂の正確で簡単な検出が可能ですが、その形状や大きさ、その関係性に関する正確な確認は、測定される信号の正しい評価に依存しています。

Salzgitter グループだけでなく、外部顧客の Vallourec & Mannesmann 社向けにも試験方法を開発している Salzgitter Mannesmann Forschung 社 (SZMF) の 研 究 員 Oliver Nemiz 氏と Till Schmitte 氏は、亀裂の特徴に関して、より鮮明な画像を得るために、有限要素法 (FEM) シミュレーションを利用することができると考えました。

「私たちは、直径 500 - 600 ミリ、肉厚 50 ミリ以内、長さ 12 メートルのスチールパイプを対象にしています。最終目標は、私たちが亀裂の形や大きさを正確に評価できるようにするため、さまざまな亀裂の形状や大きさが、どのように測定信号に影響を及ぼしているかをシミュレーションすることです。これはまた、私たちの誤った認識を理解する上で手助けになるとと思います」と Nemiz 氏は説明しています。

### モデル検査システム

このシミュレーションモデルは、COMSOL Multiphysics AC/DC モジュールで作成され、高さ 10 ミリ、幅 115 ミリの長方形のスチールの特徴をもっていました。Nemiz 氏と Schmitte 氏は、このモデルの演算時間は長くなると予期されたので、2次元断面モデルを作成しました。このモデルでは、コイルを通過する電流は、幾何平面に対して直角に交わります。



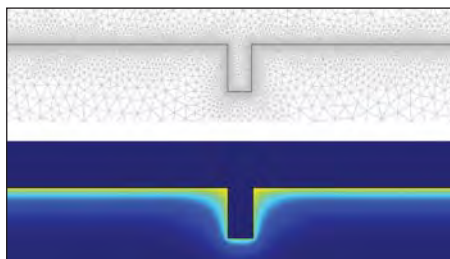


図3. このメッシュは、対象となるスチールの上表面の薄い磁気層を正確に解析します。

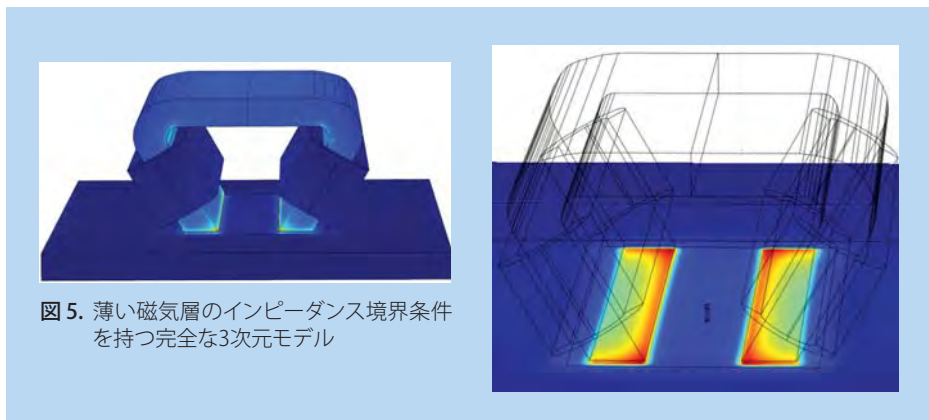


図5. 薄い磁気層のインピーダンス境界条件を持つ完全な3次元モデル

高周波数の電流は、0.46ミリの表皮効果を持つ非常に薄い磁場を形成するとき、鮮明なメッシュは、表面領域で特に重要となります。(図3)

理論上存在する亀裂、つまり補修が可能な幅や深さ、角度のあるノッチ（V字形の切れ込み）の形状や位置は、MATLAB® スクリプトによってパラメータ化できます。水平面で対象のスチールにそってスキャンする時のヨークの移動は、ノッチの位置上で輪を描いて動くことにより、このモデルのシミュレーションが行われる。図4は、さまざまなノッチ幅でシミュレーションされた信号を示しています。

2次元システムでは、完全に対称性のある亀裂だけを明らかにすることができた。従って、次の段階では3次元モデルを設定することになりました。しかし、境界付近で表皮効果を説明する高密度メッシュは、約2千万自由度 (DOFs) となり、非常に長い計算時間が必要になると考えられます。この事態を避けるために、研究者たちは、対称性を利用して、モデルの大きさを4分の1まで縮小し、境界付近にいくつかのスイープメッシュを加えました。

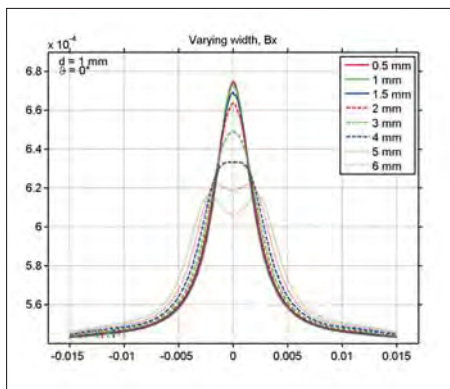


図4. さまざまなノッチ幅で結果として生じる磁束密度のx成分

計算は470万 DOFsで行われましたが、これらの修正でも、対称性のあるノッチを調査することができたに過ぎませんでした。

「このため、私たちは、表皮効果を考慮して、インピーダンス境界条件を適用することを決めました」と Nemitz 氏は述べています。こう言いながらも、この導電率の容積がモデル化される必要はありません。このスチールの厚さが、表皮の厚さの4倍以上あれば、近似値が有効です。「このスチールが表皮の厚さの21倍であることを考えれば、この手法は有効であり、スチールの表面だけがメッシュ化されていれば良かったので、私たちは、このモデルを170万 DOFsまで減少させました。これにより、完全な3次元幾何図形が実現され、任意のノッチを定義することも可能となりました。」(図5)

このモデルを有効にするため、シミュレーションデータは、いろいろな深さにあるノッチを含む検査用スチールパイプの測定データと比較されました。この結果は、信号と非常に高い相互関係が見られました。

### この成果と関連性のあるフレームワークの開発

「COMSOL Multiphysics の利用によって、私たちは、磁束漏洩 (MFL; Magnetic Flux Leakage) 検査システムからの信号を分析することができるようになり、その重要性を理解しました」と Nemitz 氏は述べています。

「実際に、私たちが分析できた多数の欠陥の詳細な調査には、多くの時間と費用がかかった。私たちは、非常に多くの検査用パイプをつくり、検査しなければならなかった。最後に、いろいろな形のノッチの特徴のある1本の検査用パイプだけが測定され、シミュレーションデータと比較された。」

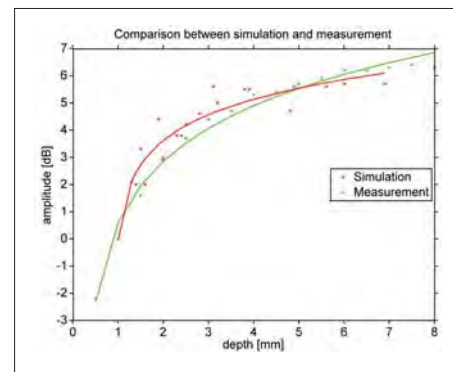


図6. シミュレーション結果と測定データとの比較。2つの曲線は完全に一致しています。

Schmitte 氏は次のように結論を述べています。「私たちは、引き続き結果を調査しているので、いろいろな形の亀裂からの信号の理解を深め、これらの関連性を評価するための音波関連フレームワークを開発しようとしています。現在、私たちは、信号の一部が遮られ、これが結果にどのような影響を及ぼすかを見出すために、この信号の帯域通過フィルタリングを行っています。また、非線形物質特性に基づくヒステリシス効果にも取り組むつもりです。」

### 研究報告

[www.comsol.com/papers/8692/](http://www.comsol.com/papers/8692/)

※ MATLAB は MathWorks 社の登録商標です。

## 冷却装置のクラスターシミュレーション

痛みやすい商品輸送のために必要不可欠で、環境に優しい冷却システムの開発において、HPC（超高速情報通信）の COMSOL Multiphysics は多大な貢献をしました。

執筆者 マサチューセッツ州立大学ダートマス校、メカニカルエンジニアリング部の STEPHEN CODYER 氏と MEHDI RAESSI 氏（コレスポンディングオーサー）、および SUNWELL TECHNOLOGIES, INC. 社の VLADIMIR GOLDSTEIN 氏、JESSICA CURRIE 氏

**化**石燃料に関連する環境やエネルギー問題は、効率的で経済的実現可能な“緑化”や環境に優しいシステム開発の火つけ役となりました。そのため、環境へより大きな影響を及ぼす可能性が高いエネルギー集約産業に注目することは、最も効果的なアプローチです。そのエネルギー消費産業の上位5つの中には、食糧輸送を含む食糧部門（EIA エネルギー情報局）があり、全体の20%の温室効果ガスを排出しています。（Tassou et al. 2009 参照）

食品輸送用の冷蔵自動車（冷蔵トラックなど）は、冷却ユニットを稼働させるために、従来のディーゼルエンジンを使用し、その大部分をそのエンジンに頼ってきました。これらの冷却ユニットは冷却効果が低いだけではなく、冷蔵自動車エンジンからの排出ガスのうち、温室効果ガス排出量が占める割合は約40%にもなります。（Tassou et al., 2009）固定冷蔵庫と比較して、その輸送冷却システムの低効率の最大の理由は、稼働状態が広範囲で、かつスペースと重量が制限されているということです。近年、食品市場への要求が高まると同時に、エネルギー消費と排出規制が厳しくなり、食品産業への圧力はますます強固なものになりつつあります。特に食品輸送部門は、環境への取組と排出量の削減にせまられています。そのため、クリーンエネルギー技術に比重を置いた冷却システムの開発は必要不可欠であり、従来のディーゼルエンジンを使用して稼働していた冷却システムとは根本的に異なるものでなくてはなりません。

可変状態の氷スリラー（Deepchill™）の製造、貯蔵、輸送を手がける世界的リーダーであるサンウェルテクノロジー社は、Deepchill™ 熱電池のみを使用した冷却ユニットを開発しました。その冷却ユニットのサイズは、小さなボックスサイズからトレーラートラックサイズまで多様にあります。

Deepchill™ 熱電池は充電式で、冷却ユニットを必要な設定温度で48時間、持続可能な設計になっています。

Deepchill™の製造は、オフピーク電気で稼働する高性能施設にて行われ、その施設にて製造、貯蔵（充電所）されることで、環境へ



Deepchill™ 冷却液は100%リサイクル可能で、環境に優しい液体です。

の影響を最小限に抑えています。環境への影響をより抑えるために、これらの施設で使用する電気は、風力やソーラーなどのような再生可能資源により供給されています。それに加えて、冷却液（Deepchill™）は、環境に無害で安全な水と塩から生成されているため、100%リサイクル可能で、環境にも優しい液体です。

### 熱と液体のシミュレーション

マサチューセッツ州立大学ダートマス校のコンピューターショナル・マルチフェーズ・フロー・グループは、Deepchill™ 熱電池技術開発過程で、COMSOL Multiphysics を活用しています。これは、サンウェル社の実験成果をあげるために必要不可欠なシミュレーションサポートです。冷却システムのサイズは巨大で高価格なため、通常のシミュレーション作業は時間がかかることはもちろんですが、特に最初の設計段階では時間がかかるため、一般的に、シミュレーション実行は難しいとされていますが、一方でこのコンピュータによるシミュレーションは有益で、コスト効率が高

いため、シミュレーションを用いて実験を補い、活用しています。COMSOL Multiphysics は、冷却システム内の熱伝導、流体力学シミュレーションに使用されました。マサチューセッツ州立大学ダートマス校では、COMSOL Multiphysics を同校の超高速情報通信（HPC）クラスター上で実装し、高精度の3Dメッシュモデル解析を行いました。完了までの時間は素晴らしい結果で、正確性は高まり、解析結果からは理解をより深めることができました。

2Dの線対称から3Dにバージョンアップされた COMSOL Multiphysics モデルは、システム上の熱負荷、ある一定のドメインでの平均温度と最高温度、絶縁性能及び自然対流などの詳細設計条件の研究に用いられました。そして上記の詳細条件は、解析プロセス中、及び/あるいは、最終的な結果セクションにて計測されました。

### HPC クラスターシミュレーション

高性能なメッシュ表示可能な大規模なシミュレーションは、それゆえに高度なメモリが必要となり、COMSOL のダイレクトソルバ MUMPS 分散型メモリが搭載されている、マサチューセッツ州立大学ダートマス校の超高速情報通信（HPC）クラスターに移行されました。一般的な HPC クラスターシミュレーションの場合、各々に8つのプロセッサコアが付随する1~3つノードを活用しますが、完了するまで半日から1週間かかってしまいます。その完了までの時間は、例えば、流体力学や熱伝導などのような、使用物理の複雑さや、最長48時間持続使用可能なシミュレーションもありますが、その持続可能時間にも関連しています。

**「マサチューセッツ州立大学ダートマス校では、COMSOL Multiphysics を同校の超高速情報通信（HPC）クラスター上で実装し、高精度の3Dメッシュモデル解析を行いました。完了までの時間は短縮され、正確性は高まり、解析結果からは理解をより深めることができました。」**



HPC クラスターシミュレーションの大部分は、クラスターシンプルバッチ処理を作成することにより、端末を介します。例えば、一般的なコマンドは下記のフォーマットのような形です。

```
comsol -clustersimple batch -nn [A]
[-mpirsh ssh] -inputfile [file.mph] -outputfile
[file_results.mph]
```

A に、スレッド番号を、-mpirsh に、使用するネットワークシステムのシステムを入力します。そして、file.mph 及び file\_results.mph は、COMSOL Multiphysics のモデルファイルで、最終的にはそれが各々、分析結果ファイルとなります。最新の進捗状況は、-batchlog [logfile.log] コマンドを介して、ログファイルにレポートされます。そして前述のコマンドラインの末尾に追加して使用します。最新のイテレーション数タイムステップなど (COMSOL Multiphysics GUI 内のログタブ同様) は、レポートされます。

シミュレーション実行中、最新データを読み取り解析する状況下では、ワークステーションから HPC クラスターまでのインターアクティブ・セッションが使用されます。例えば、スレッドの数のような、同類の平行・コンピューティング・パラメータは、Study > Job Configurations > Cluster Computing タブで設定できます。最終的には、HPC クラスターの高い計算能力が付随された、ワークステーション・シミュレーションと同等レベルの GUI が提供されます。

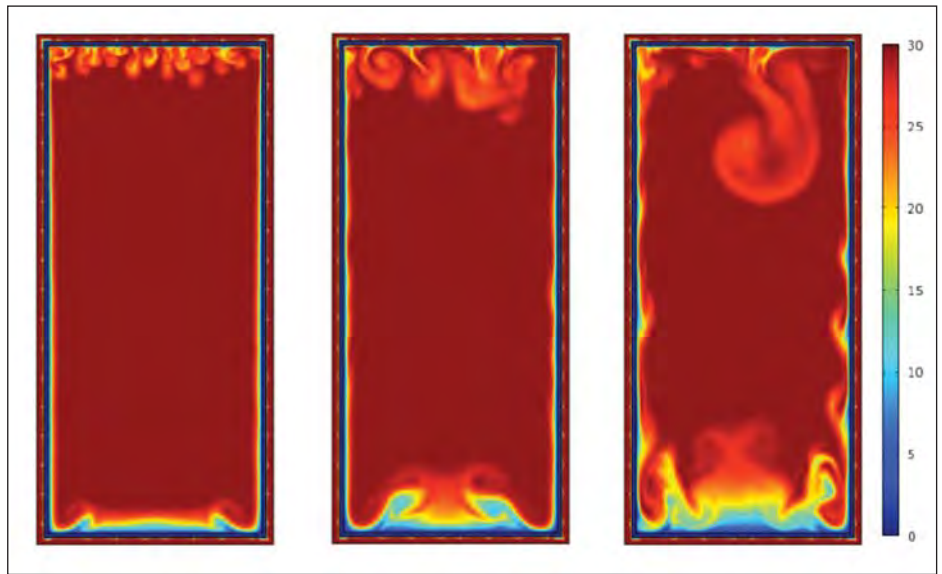


図 1. Deepchill™ 熱電池を使用した冷却ユニットの冷却中の自然対流と温度分布。(左から右:t=5, 8 及び 12 秒)

### 結果

図 1 は、Deepchill™ 熱電池により冷却された冷却ユニットの二次元 COMSOL Multiphysics シミュレーションを表しています。最初のユニット温度は 30°C で、熱電池は 0°C でした。シミュレーションでは、その表面上にレイリー・テイラー不安定性が見られます。図に示されたように、不安定性は拡大し、結合し (中間イメージ)、そして大きなマッシュルーム型の流体構造 (右側イメージ) を生成します。側壁での空気の自然対流は、明瞭です。

このプロジェクトでの COMSOL Multiphysics シミュレーションはマサチューセッツ州立大学ダートマス校の科学コンピューティング・HPC クラスターグループにて実装されました。

HPC クラスターは 72 ノードを含み、それぞれ 2 つの Intel Xeon (quad-core) E5620 2.4 GHz プロセッサと 24GB の DDR3 ECC1333 MHz RAM が含まれます。HPC クラスターには、60 Nvidia Tesla M2050 GPUs が使用されています。ノードは、10m IBM Optical QDR InfiniBand QSFP Cable を使用した Mellanox ConnectX-2 VPI Single-port QSFP QDR IB/10GbE PCIE 2.0 HCA と接続され、64-bit Red Hat Enterprise Linux distribution version 5.5. を実行しました。COMSOL Multiphysics version 4.2 を使用しました。

### 参照

Energy Information Administration. "Annual Energy Outlook." Department of Energy, 2010.  
Tassou et al. "Food transport refrigeration — Approaches to reduce energy consumption." Applied Thermal Engineering (2009): 1467-1477.



冷却装置研究チーム  
(左から): Mehdi Raessi氏, Stephen Codyer氏, Jessica Currie氏, and Vladimir Goldstein氏.



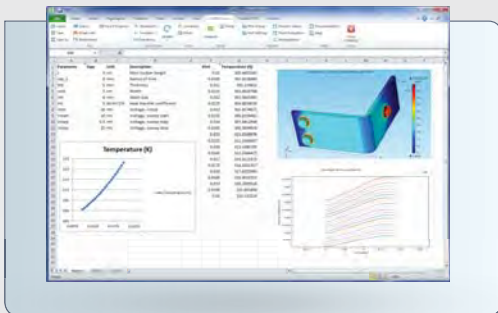
# ～デザイン実現の進化論～

COMSOL Multiphysics 4.3a には、新たな  
パラメータ最適化、そしてクラウドコン  
詳しくは弊社 Web をご覧ください!

## New Products

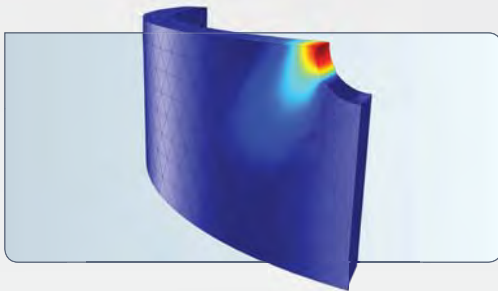
### LiveLink™ for Microsoft Excel®

COMSOL Multiphysics のシミュレーション機能を、Microsoft Excel 2010 (Windows 版) のリボンに付加されたタブから起動できます。モデルのパラメータと寸法はスプレッドシートから制御でき、自動的に COMSOL Multiphysics 上のモデルが更新されます。



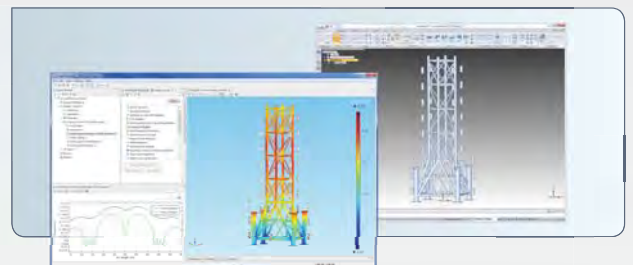
### 疲労モジュール (Fatigue Module)

ストレスやひずみ評価に基づいて高サイクル (応力) および低サイクル (歪み) に対応した疲労解析方法を提供します。非線形構造材料モジュールとの連携も可能です。※本モジュールは構造力学モジュールと併用するアドオンです



### LiveLink™ for Solid Edge®

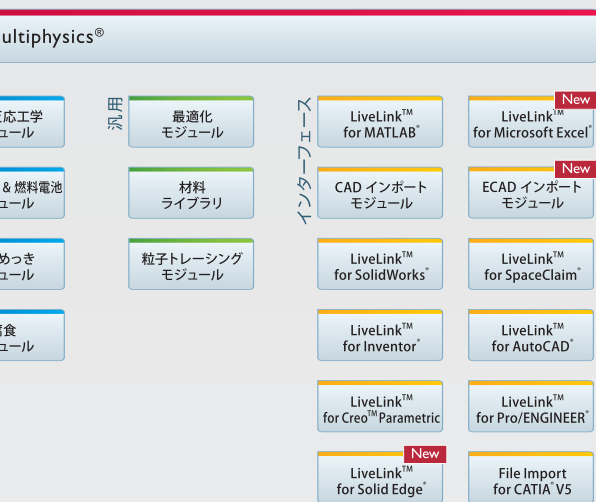
Siemens PLM Software 社製 CAD 「Solid Edge®」との双方向連携用モジュールです。他の LiveLink 製品同様、同期機能による CAD とシミュレーションのスムーズな連携を実現します。



# デスクトップからクラウドまで

LiveLink™ 製品、CAD インポート 製品、  
コンピューティング対応が追加されました。

<http://www.kesco.co.jp/comsol/>



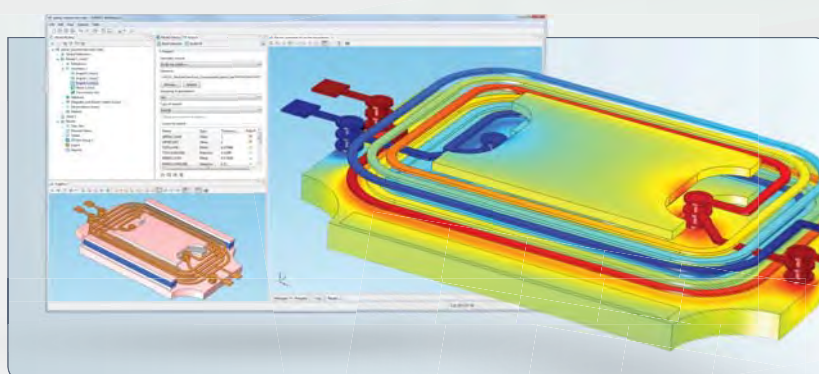
## New in COMSOL Multiphysics®

### Cloud Computing

商用公開クラウドコンピューティング環境「Amazon Elastic Compute Cloud™ (Amazon EC2™)」に対応しました。これにより、フローティングネットワークライセンス (FNL) をお持ちのお客様は、ハイエンドのクラウドコンピューティング環境を従量課金方式で利用することができます。

### Parameter Optimization

新たに3種類の最適化方法が追加され、ユーザーは、これらの最適化方法を任意のモデルに適用できます。COMSOL Multiphysics で直接に作成したモデル、または任意の LiveLink 製品のリンクを通じて生成されたモデルに関し、CAD モデルに含まれる1つまたは複数の形状寸法を最適化できます。また最適化の制御パラメータは、形状だけでなく、入力として用いられる任意のパラメータを用いることも可能です。



### ECAD インポートモジュール

本モジュールは GDS II、NETEX-G、ODB++ の各ファイル形式に対応しており、インポートの際に自動的に 3D 形状モデルの自動変換を行うことができます。

本モジュールで新たに提供された各種ツールにより、セル、ネット、およびレイヤーのサブセットを選択してインポートしたり、レイヤー厚の編集、締結ワイヤーの形状の制御、誘電領域の特定などを簡単に行うことができるようになりました。

 COMSOL

**KESCO** KEISOKU ENGINEERING SYSTEM  
計測エンジニアリングシステム株式会社

www.kesco.co.jp Tel 03-5282-7040 Fax 03-5282-0808

## 塗装を均質化した加熱工程最適化

製品処理量の増加、品質の向上と均質化につながった Ruukki Metals 社の色塗装工程最適化

RUUKKI METALS 社、MIKA JUDIN 氏による寄稿

**圧**延金属への塗料塗布においては、変色や、塗装を貫通する破損（例えば、過熱や、時には煮沸により生じる穴）が生じないように塗装が行われることが重要です。また、塗装により、最終製品が高い耐候性と長い耐用年数を持つものにならなければなりません。もう一つの目標は、無駄を排除し、工程処理量と生産率を向上させることです。このような見地から、私は COMSOL Multiphysics を使い、表面塗装された屋根材、外装材、パネル材用の加熱／塗料乾燥炉の最適運用の一助となるモデルを作成しました。

**「COMSOL Multiphysics を使い、表面塗装された屋根材、外装材、パネル材用の加熱／塗料乾燥炉の最適運用の一助となるモデルを作成しました。」**

Rautaruukki Oyj は、金属ベースの部品や装置を建築業界及び機械工業界に供給しています。およそ 30 ヶ国で事業を展開しており、2011 年の年間売上高は約 30 億ユーロでした。同社の一部門であり Hämeenlinna に拠点を置く Ruukki Metals 社では、屋根材などの建築材料や家電製品に用いる耐候性鉄素材を製造しています。Ruukki Metals 社のその他の製品ラインアップとしては、土木機械の掘削機バケットや刃先に用いる耐候性鉄材、採鉱機械やコンクリートミキサー、木材加工機械に用いる摩耗部品などがあります。また、当社の高い硬度を持つ鉄材は、各種の乗り物、輸送用装置、ダンプ車の車体、リフト装置の支柱、コンテナなどに利用されています。

### 屋根用金属板の塗装

当社の製品は屋根材用の金属板にも用いられており、このような製品の場合、建築請負業者やビルオーナーは、色（濃淡の度合い、光沢、再現性）が適切であるか、耐久性に優れているかという点を特に気にします。当社の屋根材用金属板の色塗装工程は、二つの炉と複数の炉区域からなる装置を用います（図 1）。現在、金属板はこの装置を 1 分あたり 45 ～ 90 メーターの速度で進みます。塗装工程に入る金属帯板はすでに亜鉛合金で覆われており、その表面に塗料が塗布されます。

炉の設定値（さまざまな段階における温度や金属が炉の中を進む速度）は、基材、組成、厚さ、塗料の種類により大きく変わってきます（図 2）。私たちは、適切な設定値を迅速に決定し入力するためのツールを探し続けてきました。私は以前、乾燥工程での熱曲線を計算するための、微分方程式に基づく数学モデルを作成しました。しかし、内部での熱伝達を正しく見積もることができず、炉内の温度差を一定に保つために必要な時間を予測するためには別個に計算を行うしかありませんでした。

私はまず、COMSOL Multiphysics を使い、乾燥工程における塗料の熱伝導を、3D モデルを使って割り出しました。その後、そのデータを使い炉での乾燥過程全体のモデリングを行いました。ジオメトリの観点で言うとシンプルなモデルではありますが、私たちが調査している複数層における物理現象は、そのモデルに熱伝達、液体から気体への相変化（水分の蒸発）、液体から固体への相変化（塗料の色素が、色などのすべての特性を保持したまま固体に変化）を含んでおり、極めて複雑

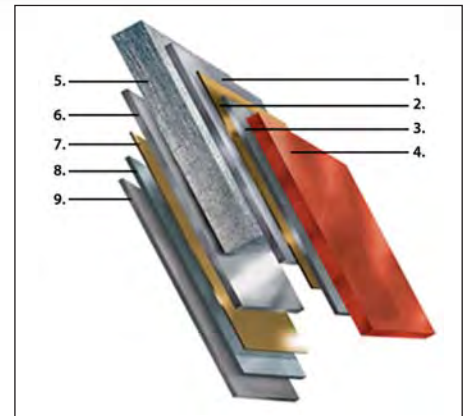


図 2. 標準的な屋根用板の層。1: 亜鉛層、2: 不動態化層、3: 下塗り、4: 塗装膜、5: 金属板、6: 亜鉛層、7: 不動態化層、8: 下塗り、9: 保護塗膜

なものになり得ます。工程での設定値を決定するため、亜鉛塗装された鉄材の両側での、時間に相関した熱分布をこのモデルで計算します。私たちが知りたいのは、いくつもの層の塗料で覆われた鉄の帯板の温度分布です。（図 3）。このモデルで、煮沸や黄変などの不具合に弱い塗膜が生じる原因の解明も試みています。さらに、乾燥工程における重要なパラメータを特定し確認することもできます。

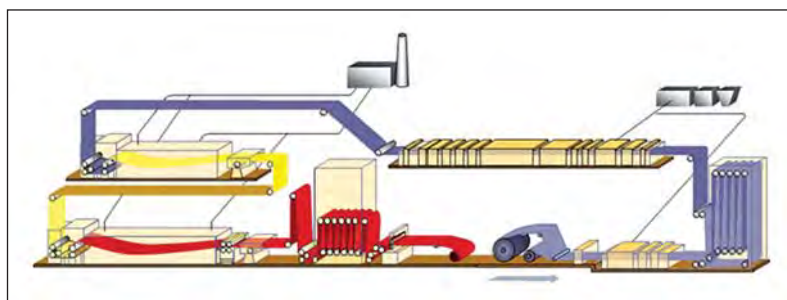


図 1. 色塗装工程の概略図。帯板を黄色で示したエリアで塗装が、赤で示したエリアで乾燥が行われる。

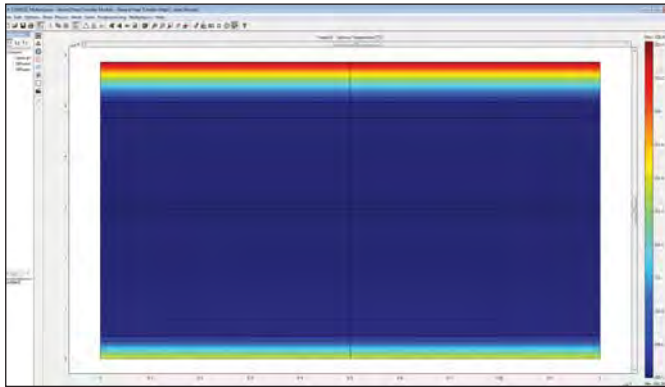


図3. 乾燥開始から10秒後の、素材断面の温度分布

### 作業員の作業を楽に

塗装工程の稼働中、作業員はこのような設定値を新しい素材や塗装が出てくるたびに一つ一つ変更しなければならず、この作業は頻繁に発生します。寸法や、密度・溶媒特性といった素材特性、塗料の拡散パラメータなどの変更は、時間がかかるうえに間違いが起りやすく、入力しなければならない項目の数は43以上に上ります。これらの設定値がCOMSOLのモデルに必要なため、私たちはMATLAB®を使い、COMSOLを用いたシミュレーションのためのユーザーインターフェースを作りました(図4)。

作業員は、素材の種類、厚さなどの生産計画で規定された値を、ユーザーインターフェースの入力欄とプルダウンメニューを使って設定することができます。設定後は、このアプリケーションが、使用される素材の特性が保存されている中央データベースで検索を行い、モデルに特性を取り込みます。モデル

を起動すると、具体的などのパラメータをどれだけの値で変更する必要があるのかが、作業員に分かるかたちで表示されます。このモデルを使えば、最大可能加熱速度、ピオ数(本体内部での熱伝導と表面から離れる熱対流の比較)、帯板と鉄の間の最大温度差など、乾燥工程の重要なパラメータを決定することが可能です。層の厚さや、比熱、熱伝導、密度、溶媒パラメータの設定をさまざまに変更して装置のパフォーマンスを見積もることができるのです。解析を行うことで、乾燥炉の設定を微調整できるようになり、塗料の特性に変更が必要な場合に、塗料メーカーにフィードバックを返せるようになりました。

このモデルを使うと、塗装済み材料の(上から下までの)温度分布を0.1~0.2秒間隔で計算することができます。また、厚さがたった数マイクロメートルのものも含め、あらゆる層の温度分布が確認できます。さらに、モデルを用いて新しい塗装のテストを行い、その結果を以前の塗装と比較し、不具合なく工程を稼働させることが可能かどうかを検証することもできます。

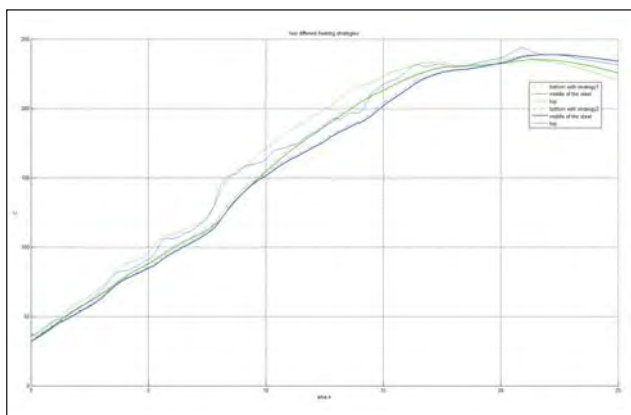


図4. COMSOL Multiphysicsで計算した、時間(秒)経過にともなう素材中心部(太線)、表面最上部(細線)、表面最下部(破線)の温度(°C)変化。緑の線は工程での標準入力値、青の線は調整後の値から算出されたもの。

「現在私たちは、このプロセスを自動化し、作業員が手入力せずとも工程の機械に直接組み込むことが可能かどうか検証を進めているところです。」

を起動すると、具体的などのパラメータをどれだけの値で変更する必要があるのかが、作業員に分かるかたちで表示されます。

このモデルを使えば、最大可能加熱速度、ピ

### 品質を高くかつ均等に

作業の観点においても、利点は数多くありました。製造機械は複数のシフトで稼働されており、作業員一人一人が機械を最良のかたちで稼働させる自分なりの方法を持っています。その結果、製品の均質性を高め、同一レベルの高い品質をすべてのシフトで確保することには関心が寄せられていました。このソフトウェアを使えば、作業員全員がすべての製品[grade]について最適化された同一のパラメータを適用することができ、再現性、高品質につながります。さらに、新しい製品に合わせて工程を変更するための時間が短縮され、製品を増やすことが可能になりました。電力消費が非常に大きい乾燥炉の使用が最適化されるため、節電にもなります。

塗装工程の最適化はさらにもう一步進むかもしれません。現在私たちは、このプロセスを自動化し、作業員が手入力せずとも工程の機械に直接組み込むことが可能かどうか検証を進めているところです。

※MATLAB は The MathWorks 社の登録商標です。

### 執筆者の紹介

Mika Judin 氏は1999年にRautaruukki Oyに入社し、既存の数値モデルの最適化や、冷却圧延、焼き戻し、垂鉛めつき等さまざまなラインに関する新規数値モデルの作成に主に従事しています。Judin氏はUniversity of OuluのDepartment of Process Engineeringで学位を取り、Chemical EngineeringのMSc(修士号)を取得しています。



## シミュレーション技術は新しいアイデアと発明を生み出す

シミュレーションを基礎とした技術設計は、期待通りに機能するマイクロチャンネル熱交換器の最初のプロトタイプを作成することに役立ちました。

執筆者 Cathleen Lambertson 氏 Tech Briefs Media Group 編集者

2000年に設立された、Intellectual Venture社(略称IV社、ワシントン州ベルビュー)は、世界最大の知的財産を所有する発明ビジネスの世界的な最先端企業です。IV社は、発明品を創造するために、創作に自ら従事し、また発明品を購入し、発明事業に共同での取り組み、その後、これらの発明品を、さまざまなライセンス契約や提携関係を通じて、この事業で成功をおさめてきました。IV社は、健康管理(ヘルスケア)、医療器具、半導体、情報技術、ソフトウェア、金融サービス、製造業などさまざまな技術分野の発明プロセスで、専門知識と資本の両方に投資をおこなう企業です。2008年、IV社は、世界中で新しいアイデアを生み出すために、発明を促進する経済の活性化と整備を実現する同社のミッションを推進するため、新製品および試作品に関する研究所を立ち上げました。

Intellectual Ventures 研究所(略称IVL)は、物理学者、工学者、化学者、生物学者、医師など異なった専門分野にまたがる研究者を採用し、さまざまな分野で先端技術ソリューションの開発、発明、発展を追求しています。IVLの工学プログラムマネージャーのOzgur E. Yildirim教授によれば、シミュレーションと解析は、当初からこの研究所の研究開発(R&D)の基盤となっているといいます。

「私たちがIV社の下で支援するこの研究所と広範なR&Dは、極めて多くの専門分野にわたっています。シミュレーションの種類は、概して、非常に大規模な疫学モデル、原子炉用中性子工学モデル、電磁気学のための優れた連続体モデル、構造解析、熱解析、流体解析、輸送現象などに及んでいます」とYildirim博士は述べました。

**「私たちがIV社の下で支援するこの研究所と広範なR&Dは、極めて多くの専門分野にわたっています。」**

### IVLにおけるシミュレーション

IVLの開発プロセスは、その多くをモデリングとシミュレーションに依存しています。これは、実験では結果を得るまでに長い時間がかかるのと単純な理由によるものです。このことは、疫学的モデルや中性子学的モデルのような分野に特に当てはまります。さらに、モデリングとシミュレーションにより、実験では簡単ではないと思われる多様で、独特の物事の本質を見ることが出来ます。

加えて、より伝統的なハードウェアの研究開発において、IVLの研究者は、プロトタイプ開発や直接の実験を、モデリングやシミュレーションと密接かつ繰り返して使用し、設計の方向性を示し、実験的観察を読み取り、サイクルタイムを短縮し、そして、総合的に理解を深めています。

IVLのプロジェクトのほとんど全ては、何等かのモデリングと解析を利用しています。

Yildirim博士によれば、これらの大半は、有限要素分析(FEA)にふさわしいテーマであるといいます。これこそが、COMSOL MultiphysicsがIVAで広範に利用されている理由です。例えば、COMSOLは、TerraPower原子炉の概念設計、ワクチン配給用パッシブ保冷装置、マラリアの媒介の抑制にレーザーを使用する「フォトニック・フェンス」、新ビームステアリング衛星アンテナなどのプロジェクトに利用されています。またCOMSOLは、IVLの最先端の料理科学研究にさえも活用されています。かなり新しい研究分野である料理物理は、食品科学の物理的、数学的解析の集合です。

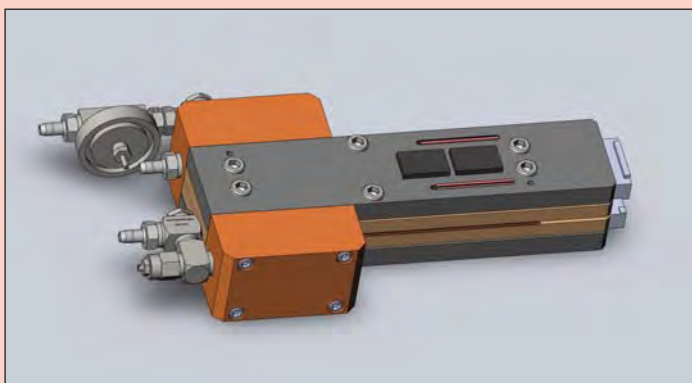
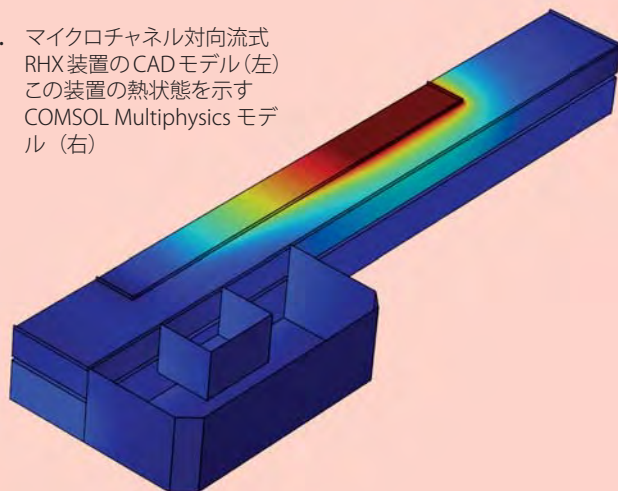


図1. マイクロチャンネル対向流式RHX装置のCADモデル(左) この装置の熱状態を示すCOMSOL Multiphysicsモデル(右)





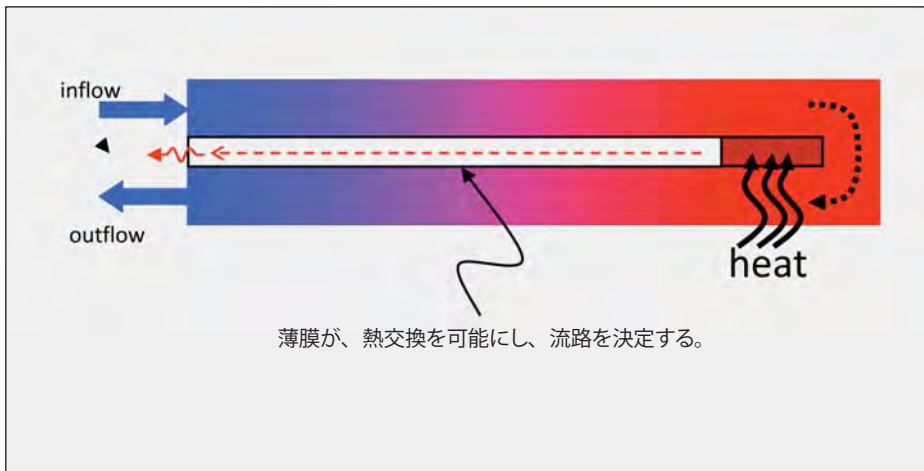


図 2. マイクロチャネル対向流式 RHX 装置内の 1 個のループ状の流れの配置図。定常状態に近づくと、非常に高い再生効率のために、少量の加熱でも、この装置の温度プロファイルを維持するのに十分です。

この素晴らしいプロジェクトは、現代主義者の料理と呼ばれる非伝統的な「料理本」として最近注目を集めました。

最近、Yildirim 博士と彼のチームは、COMSOL Multiphysics を利用して、例外的に高い熱回収効率を持つ液体流を熱処理するために、新しいマイクロチャネル対向流式再生熱交換器 (RHX) の設計および開発技術をモデル化しました (図 1)。「COMSOL は、多くのものを可視化し、シミュレーションによる物理現象の精度を上げる最先端の計算ツールです。これは、ユーザーが、科学者、数学者、エンジニアを一度にこなすことを可能にするもので、ブラックボックス・モデリング・ツールをはるかに超える唯一のものです」と Yildirim 博士は述べました。

### RHX の説明

RHX は、熱交換器の 1 つの型式であり、同じ流体が、冷却する流体と冷却される流体の両方に使われるもので、この装置から排出される熱流体は、この装置に戻る流体を「再生」(加熱) するため、その熱を放出するというものです (図 2)。RHX は多くの場合、高温装置として見なされ、この装置の流体の一部は、主な処理招致から分離され、次の処理装置のために反対方向に戻されます。主要な処理装置から分離された流体は、エネルギー (熱) を持っているため、主要装置から離れた流体からの熱は、外部冷媒で冷却されずに、循環する流体を再生 (再加熱) するために利用されます。

そして、熱エネルギーのほとんどが再生されるので、この処理装置のために、エネルギーの大幅な純節約になります。例えば、一般的な RHX は、80% から 90% に近い熱効率があり、こうした流体の流れに関連する熱エネルギーのほとんど全てが伝達されます。

さまざまな流体を扱う応用技術には RHX の機能が含まれています。Yildirim 博士によると、RHX は、微生物や酵素を熱によって不活性化するため、流動食や製剤過程で有用であるといえます。また、これは、液体のポリマーゼ連鎖反応のように、生化学反応のために管理された温度サイクルを達成するためにも有効です。

### マイクロ・モデリング

「大型」RHX 装置は、かなり前から使われていたのに対して、より小さなマイクロチャネルに相当するものは、ごく最近になって注目されるようになった分野です。「大型 RHX 装置は、ほとんど工業施設の一部に統合されたものであり、資本集約的です。マイクロチャネル RHX は、より小さい規模で同じ機能を果たします。

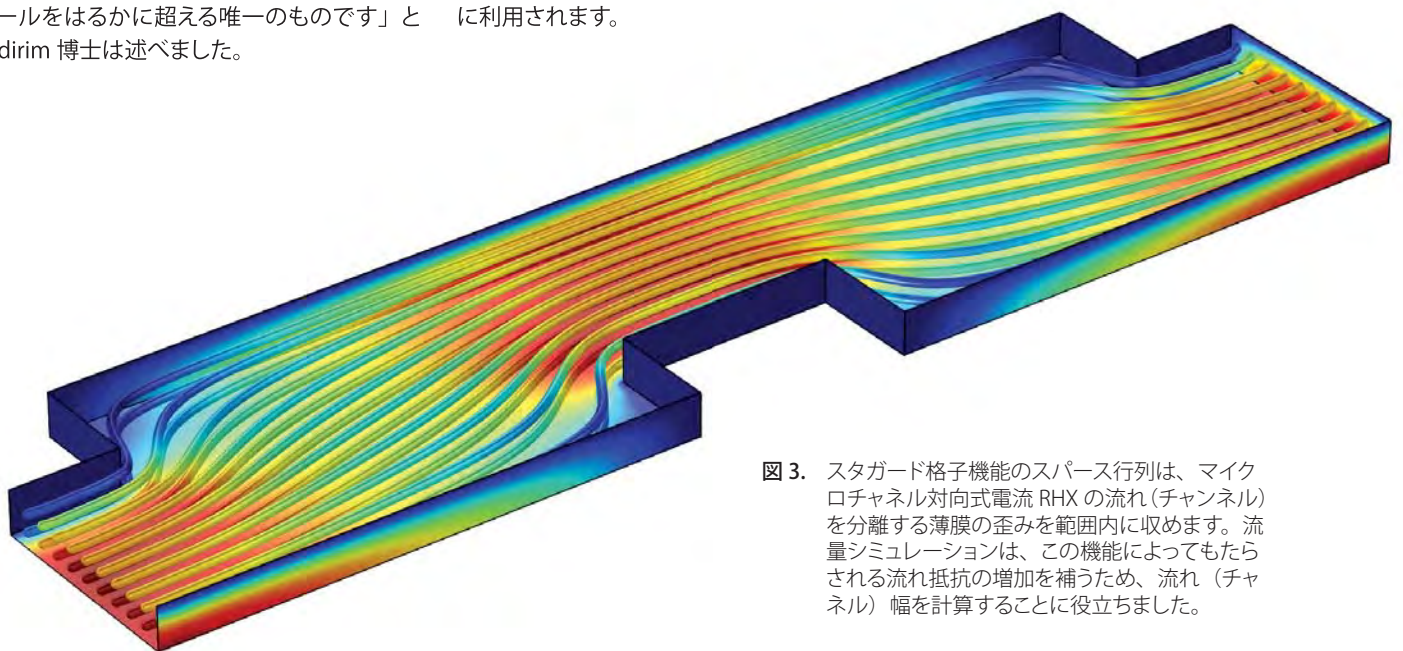


図 3. スタガード格子機能のスパース行列は、マイクロチャネル対向式電流 RHX の流れ (チャンネル) を分離する薄膜の歪みを範囲内に収めます。流量シミュレーションは、この機能によってもたらされる流れ抵抗の増加を補うため、流れ (チャンネル) 幅を計算することに役立ちました。

従って、マイクロチャンネル RHX は、この装置の設置面積が小さく、プロセスの流れの量が小さいところの応用分野として、新たに開拓される可能性が高いと思います」と Yildirim 博士は説明しました。例えば、マイクロチャンネル RHX 装置は、大規模な設備や大量の電力供給に接続せずに少ない液体量を取扱う必要があるようなモジュラー応用システムで有効だと考えられます。加えて、マイクロチャンネル RHX は、大規模システムにはない方法で簡単に拡張が可能です。「この装置は、多くのインフラを必要としない小規模工場で、その業務が卓上もしくは作業場内で実行可能であることを想定しています」と彼は付け加えました。

IVL チームによって開発された最新のマイクロチャンネル対向流式 RHX システムは、例外的に高い熱回収効率で液流体を熱処理する設計になっています。「マイクロチャンネル RHX システムは、その応用分野で研究が進んでいないため、長期にわたり綿密な計画に基づいて開発され、また、多くの基礎を最初の原理からやり直す必要があるような伝統的な熱交換器に関して利用可能な大量の技術知識基盤には、必ずしも頼ることができません。幸運にも COMSOL は、簡単に楽しみながらこれを実行することができます」と Yildirim 博士は述べました。

基本的な装置のアーキテクチャーを配置した後、の装置の性能に関する第 1 次設計変数の効果を調査するために、COMSOL が主要な解析ツールとして利用されました。

## 「これは COMSOL の最大の強みの 1 つマルチフィジックスです。無条件で制限のない物理特性カップリングが可能になります。」

Yildirim 博士は次のように説明した。最も重要で、興味深い性能特性は、熱交換（再生）効率、すなわち熱が最初に伝導された後に熱流から再回収された少量の熱エネルギーである。この熱エネルギーは、この装置の所要電力を満たし、圧力損失 / 流量率関係に影響を及ぼすと同時に、ポンプ排水にも利用される。COMSOL は、この装置の構造的安定性を詳細に研究するためにも利用された（図 3）。



Ozgur Yildirim 博士（左）と Zihong Guo 博士は、最新のマイクロチャンネル対向流式 RHX チームの主要メンバーである。両博士が手にしているのは、この装置のプロトタイプです。

COMSOL は、最初のプロトタイプが製作・テストされた後の実験結果を読み取るためにも有効でした。「これが COMSOL 最大の強みの 1 つマルチフィジックスです。無条件で制限のない物理特性カップリングが可能になります」と Yildirim 博士は述べました。

加えて、実際のプロトタイプの作成の段階では、内在する温度と圧力に耐えるように設定された適切な材料の選別などの課題があり、また、機能的な装置に組み立てるためのプロトタイプ処理の選択などの課題が生じます。

### 優位性

シミュレーションを基礎とする技術設計アプローチの活用により、概して期待どおりに機能する最初のプロトタイプが完成しました。このマイクロチャンネル RHX システムのプロトタイプ設計技術は、室内温度から、沸騰を避けるために圧力を加えて約 130°C まで温度を上げ、自然放熱することによって元にもどし、98% 近い再生エネルギーを超低エネルギー熱処理装置でコンパクトに回収することで、その水流熱処理能力が明らかにされました。このコンセプトは、直ぐに証明され、その後の設計の繰り返しは最小限に抑えられました。「このプロジェクト期間中に、私は、偏微分方程式を根拠として、やみくもに、全てのことを解決しようとするよりもむしろ、COMSOL の機能の優位性を全て生かして、分析的に物理特性の重要な要素を描きだし、コンピューターで取り出して、調べたい物理特性の要素だけに絞って重点的に取り組みました。この結果、大幅にスピードアップ化され、モデリングと解析の非常に迅速な利用が可能となりました」と Yildirim 博士は説明しました。「もっと言えば、COMSOL が持つ様々な種類の物理特性を連成（カップリング）する機能もまた、同様に大変役立つものでした。」

### 研究報告

[www.comsol.com/papers/10786/](http://www.comsol.com/papers/10786/)

「このように COMSOL を利用して基本的な物理現象を研究しなければならなかっただけでなく、機能的なプロトタイプを作成する実行可能な方法を見出すために、大量のハードウェア処理と組立処理を実行しなければならなりません。これには、接着剤技術や熱パイア技術、またフォトリソグラフィ技術の研究などもありました。私たちは、プロトタイプ作業で総合的に COMSOL を使いました」と Yildirim 博士は述べた。



An umbilical cable on a drum ready to be placed on a ship for laying.

## 海中供給パイプラインとケーブル分析

JDR は、シミュレーションを使用して物理試験及び完全な応力解析を行い、その結果を顧客に提供する事が可能になりました。コストは半分で、通常の5倍のデータをこなすシミュレーション活用という選択は、今や誰もが知っている選択の一つとなっています。

執筆者 JENNIFER HAND 氏

**海**外の石油及びガス業界にとっては、深  
海圧、風と波の力、荒れた海底、それら全てを考慮して、様々な予測を立てて海中ケーブルの設計に取り組む必要があります。供給パイプラインシステムとして知られ、そのシステム内で重要になるのが、保護力、水圧制御、電気信号、光ファイバー、化学薬品注入リンクなどです。これらの供給パイプラインは極めて耐久性があり、特に海底での、厳しい環境の中でねじれ、屈曲、そして軸方向荷重にも耐えることが出来なくてはなりません。これらの厳しい状況に加えて、船のデッキ面積ぎりぎり一杯のサイズで設計されているリールで、繰り返り巻き取られたり、巻きだされる作業にも耐えられなくてはなりません。供給パイプラインは長いので、頑丈で重量もあります。そのため、操作は困難になる場合もあります。そのため、このケーブルの物理的テストは、面倒で費用がかかってしまいます。JDR 社にてデザイン・オートメーション・エンジニアの Tim Poole 氏は、JDR 社の製品を試験し、製品分析をする責任者です。JDR では、石油及びガスなどの再生可能エネルギー分野で広範囲にわたり使用される海中パワーケーブル、供給パイプラインシステム、リールを特注、製造しています。

「その特性、疲労、パフォーマンスをより理解するために、供給パイプラインの一般的な疲労体制は、疲労が高い用具である滑車を 100,000 回使用し、その耐性を試験しました。1 日、約 6000 回のテストを行い、追加で他の必要なテストも行います。これをこなすには、最低 1ヶ月はかかり、その費用は、必要な設備などをあわせると、\$30,000 から \$50,000 はかかってしまいます。

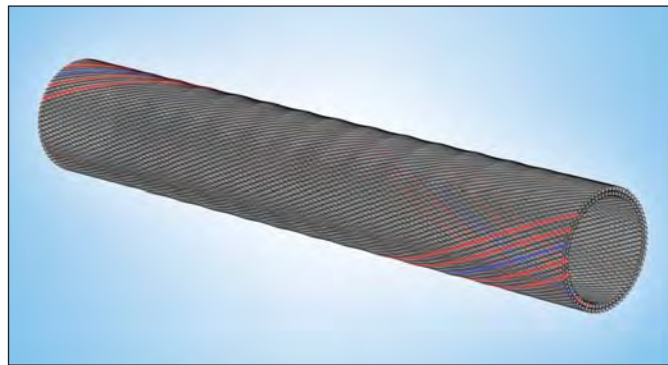


図 1. 個別外装ワイヤの複数の接触点を持ち、反時計方向の重構造外装。船上へ積荷されるドラム状に巻かれた供給パイプラインケーブル

確実に要件を満たし、製品の性質と反応を予測することは極めて重要です。そのため、物理テストは、極めて重要な一方ですが、制限もあります。時間とコスト以外にも問題があり、その状況を 100%再現する事が不可能だということです。」と彼は語ります。

JDR 社はすでに、海外の海洋産業専門パッケージ・デザインである OrcaFlex を使用していました。船体、ケーブル、海底、天候、海水、水源など全てで構成されるシステム全体をグローバル分析することができます。2009 年に改訂された、新たな ISO 基準では、供給パイプライン分析に新たな仕様が追加され、JDR 社では、局部応力と熱解析を加えた分析を開始しました。

しかしながら、供給パイプラインのこの分析は極めて複雑で、あらたな課題をもたらしました。「一般的に、パイプラインは複数層のワイヤから成り、ワイヤの内部はらせん形状で複数の接触点があります。アラミド（ケブラー）編組で、その編組構造が複雑なために分析が難しい合成物質だといわれています。」と Poole 氏は説明します。そのため、JDR 社は COMSOL 社のコンサルタント会社である Continuum Blue 社に専門的アシスタントを依頼する事にしました。

### 複数の接触点を持つらせん状ワイヤ

Continuum Blue 社の Mark Yeoman 博士は、以下のように語ります。「私達の原点は、材料仕様書を含む 2次元のケーブル横断面でした。懸念事項は、ケーブル横断面が各層内、50 ~ 60 外装ワイヤを含んだ 2重外装構造に



「COMSOL と s analysis の素晴らしさは多種多様なケーブル設計に対して、数々の荷重条件での研究が出来るオプションがあることです。そしてその結果をわずかな時間で比較可能なことです。」

なっており、各層はそれぞれ、他層とは反対方向の長さに沿ってねじれているという点でした。内部構造と接触している屈曲と軸方向の重荷状況を反映しているモデルが作成されました。そのモデルには、反転している外装ワイヤの接続面も含まれています。ケーブルラインに沿って高い設置圧が起こり、全ての設置面では強いストレスがかかるという結果を3,000以上の局所にて得ることができました。」(図1. 参照)

Continuum Blue 社の解決策は、特注モデルもしくはカスタマイズされたプログラムを作成する事でした。JDR 社は、Livelink™ for MATLAB® を使用して、COMSOL ケーブルモデルを作成し、3D ケーブル構造を容易に迅速に確認する事ができました。MATLAB コードには、最先端材料特性及び、Continuum Blue 社の材料の詳細データベースが追加され、カスタマイズされた接触部分を定義するためにこれらのプロパティと接触分析を行うために必要なパラメータを用います。全てのデータは、COMSOL Multiphysics にインポートされ、そして解析が行われ、問題解決へと

導かれます。ワイヤは表面スライドと分析された純曲げや純引張、あるいは両方が連結されたもの間を移動し、接触対としてモデル作成されました。

Yeoman 博士によると、COMSOL Multiphysics による解析の素晴らしさは多種多様なケーブル設計に対して、数々の荷重条件での研究が出来るオプションがあることです。そしてその結果をわずかな時間で比較可能なことです。

「最初の設計、2次元製図からあらゆる問題解決に必要な3D ケーブルモデルを作成するために要する期間はわずか2日間です。そしてそこからはCOMSOLに委ねられ、査定されるべき多種多様な荷重条件を解析します。私達は7~8

種類の異なるタイプの分析を行います。例えば、異なる軸の荷重条件や多様な半径屈曲などがあげられます。これにより、JDR 社は、多様な設計シナリオの査定が可能になります。ストレス、歪み、接触分析プロット、使用期間、保存期間を考慮したケーブルの耐用期間など総合的な分析が可能になります。

テストと製造を含むコスト削減にもつながり、ケーブル改良へと大きく貢献しました。(図3)」と Yeoman 博士は語ります。

### 低コストでより多くの情報を

Poole 氏は「このアプローチを初めて試みた時、素晴らしく功を奏しました。」そのモデルは明瞭で、ローカル応力分

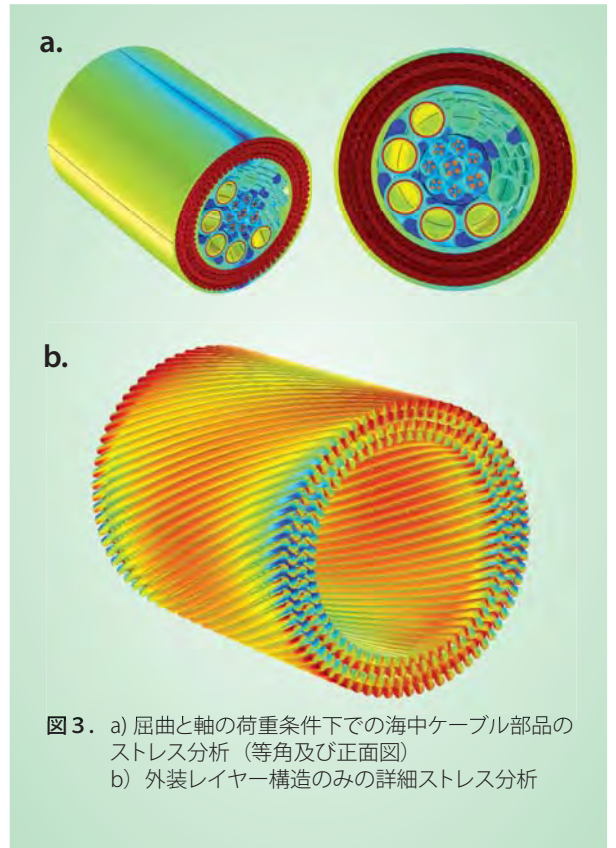


図3. a) 屈曲と軸の荷重条件下での海中ケーブル部品のストレス分析 (等角及び正面図)  
b) 外装レイヤー構造のみの詳細ストレス分析

析は信頼性があり、私達の OrcaFlex モデルの有用性を高めてくれました。」と語ります。

JDR 社は現在、製品向上に向け、Continuum Blue 社と共同で経営をしています。JDR 社は 多重内部反転構造の海中ケーブル構造を分析し、また最大で、6つ保護層を簡単に分析することができるようになりました。かつて10週間もかかっていた最初のプロジェクトも、現在では2週間という短期間に短縮され、得るデータは5倍にもなりました。「COMSOL を使用して供給パイプラインの疲労特性分析を得ることが出来ただけではなく、熱的特性も分析することが出来ました。」

物理テストのわずかが半分のコストで分析結果を得ることが可能です。JDR 社の顧客の一部は、物理テストを選択しますが、大部分の顧客は、大域的と局所的な分析のコンビネーションを選択します。「私達は、ただ単純にお客様に選択肢をご提供しているだけです。今後は COMSOL 使用拡大を予定しています。そうすることで、お客様により多くの情報を提供することが可能になるからです。」と Poole 氏は語りました。

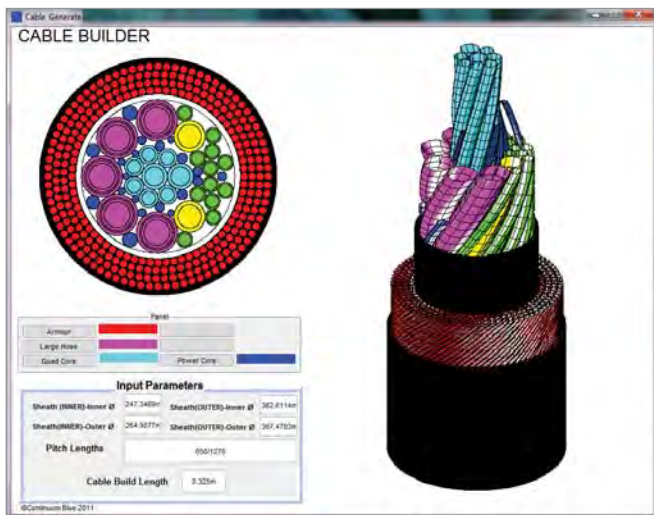


図2. カスタマイズされたケーブル・ビルディング (Cable Building) コードの画面。ケーブル・クロス・セクション (Cable Cross Section) の図式解説 (左上) インput・パラメータ (左下) セクションナル・3D 構造 (右)  
海中ケーブルの着色部分は、下記に示します。  
外装レイヤー (赤)、ホースタイプ：高圧力 (オレンジ)、中圧力 (黄色)、低圧力 (緑)、パワー用クアドコア構造とデータトランスミッション (シアン) フィラー成分 (青)



## 1つの掘削孔からポンプによる排水と注水

Dusensauginfiltration(DSI)[ドイツ語]は「nozzle-suction-infiltration ノズル吸引浸透」と訳されるが、これは水を最初の位置から運搬する際のエネルギー、コスト、環境リスクなどを抑える脱水技術です。モデリングは、この新しい応用技術が、何故、どのように機能するのかを、理解するために用いられます。

執筆者：JENNIFER HAND 氏

共同執筆者 MARTIN SAUTER 教授、YULAN JIN 博士課程大学院生、EKKEHARD HOLZBECHER 准教授 GEORG-AUGUST 大学

**地**下水は多くの場合、建設もしくは採掘現場を乾燥させるために、より低い位置に下げられる必要があります。「水位低下」を実現するものと知られている伝統的な手法は、水を（ポンプにより）汲み上げ、それをこの場所から離れた地表、もしくは池などに排出します。

「私たちは、ドイツで行われている現場実験にそってモデル化をしているので、この結果を計測されたデータと比較することができます。」

この手法は、環境に悪影響を及ぼします。それぞれの現場における地域の生態系が破壊され、地盤沈下もしくは地表水汚染や土壌荒廃などの原因となる可能性があります。さらに加えて、水の輸送と廃棄にコストがかかります。

もし、この水が地表に戻す前に処理される必要がある場合には、更に費用が増加します。

対照的に、ノズル吸引浸透（DSI）は、地下水面近くの地下水を汲み上げ、同じ掘削孔の深い位置に注入する方法です。

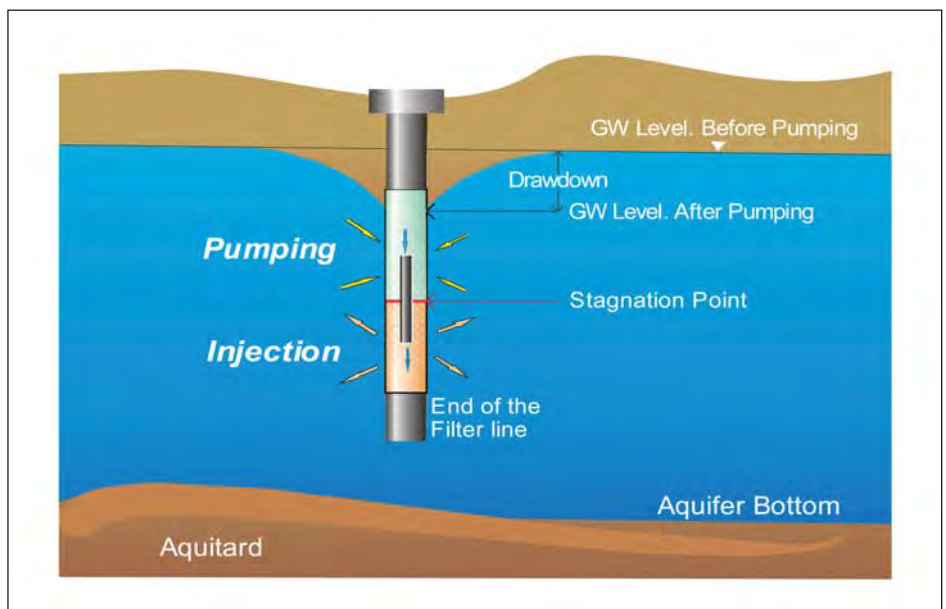


図1. 掘削孔の汲み上げ（ポンプ排水）と浸透（注入）の概念図

このことで、水が少しも持ち上げられることがないので、この場所から離れたところに水を輸送することが回避され、また地盤低下を抑える効果が得られます。実際には、掘削孔は、2つの部分に分けられます。上部は、汲

み上げ区域です。

下部は再注入領域です。これら2つの部分は、通常、（流体を遮断する）パッカーで分離されています（図1）。

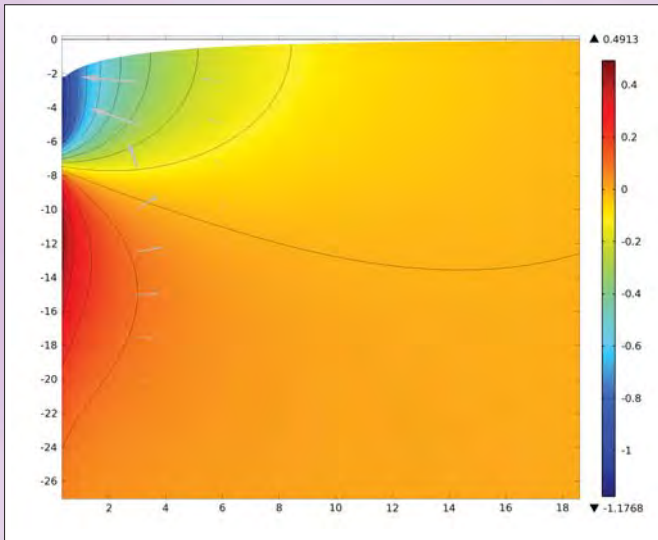


図2. 2次元鉛直断面図モデル出力例  
表示されているのは、滞水層の中の水頭（カラー  
プロット）および歪みと流速場（矢印プロット）です。

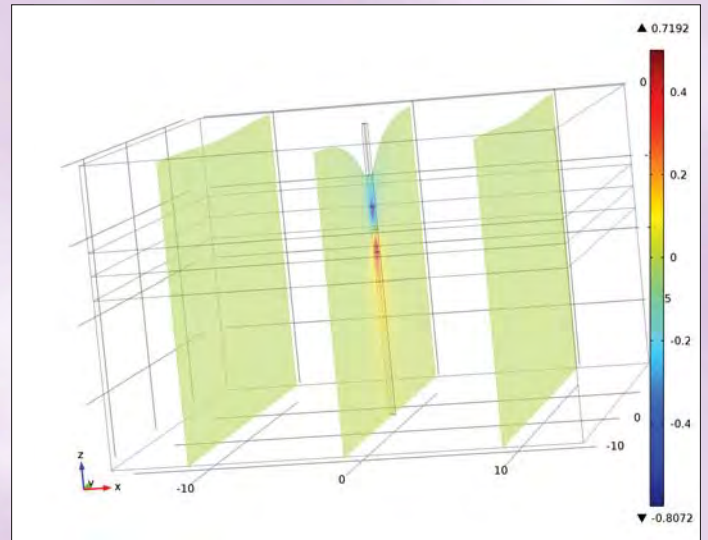


図3. 水頭圧分析結果（カラープロット）と掘削孔の歪みを  
示す3次元モデル出力の断面図

井戸に関する水力学の専門家である Werner Wils 氏は、2000 年以降、彼の会社で JSISWW (Jet Suction Infiltration System Werner Wils, ジェット吸引浸透) として知られている手法をうまく活用してきました。これは、ドイツやオランダで非常に注目されており、そこでは、このシステムの使用権を与えられた企業があります。また、ベトナムや中国でも利用されています。実際の実験でも成功例が見られるが、まだ完全に理解されているわけではありません。どんな条件で、この技術が機能するのか、どんな状況の中で機能しないのか明らかではないのです。この課題は、この技術を科学的に検証することであり、ゲッチンゲン Georg-August) 大学で検証されています。

ゲッチンゲン大学応用地質学部は、Martin Sauter 博士が中心となり、水文地質学分野での研究に注力しており、ドイツの脱水装置企業 Holscher Wasserbau 社と DSI プロジェクト組織の中で共同研究を進めています。このプロジェクトはドイツ環境財団 (DBU) から財政支援を受けています。

「私たちの役割は、この手法による成果を説明することであり、その優位性と限界を理解することです。どのような状況の中でこれが最良の形で機能するかを認識することです」と、この研究チームを率いる Ekkehard Holzbecher 准教授は述べています。博士課程の大学院生 Yulan Jin 氏は、COMSOL Multiphysics 内で 2 次元および 3 次元モデルを用いるシミュレーションの責任者です。彼女

は目標について次のように述べています。「私たちは、ドイツで行われている現場実験にそってモデル化をしているので、計測されたデータと結果を比較することができます。私たちは、境界条件の変更に対する、このシステムの反応を正確に予測したいと思います。」

### 基本原理の証明

圧力（すなわち水頭圧）と帯水層の歪みを解決するモデルが 2 次元で設定され、図 2 はその典型的な結果を示している。この水頭圧が、掘削孔の上部（青色表示）で低下するとき、上方境界の水位低下が生じ、ここが地下水面を示す。このことによって、例えば、水が下部に注入されたとしても、水位低下は帯水層の中で起こるとの基本原則が証明されます。

次に同じ状況が、周囲の地下水の流れを考慮して、3 次元でモデル化されました。円柱で示される掘削孔は、深さに依存する抽出速度もしくは注入速度が織り込まれ、数学的モデルで放出量と吸収量として記述されました。

図 3 に描かれたテストケースの結果として、2 次元モデルと同様の水位低下現象が明白に見られました。「私たちは、COMSOL Multiphysics のパラメトリックスweep機能を利用して、抽出速度を一定に保ちながら、さまざまな浸透速度に重点的に取り組む幅広い研究を行いました」と Jin 氏は説明します。「このことで、私たちは、古典的な手法と比較することができるようになりました。古典的な手法とは、水がポンプで汲み上げ（抽出）られるが、浸透は行わないものです。抽出速

「私たちは、COMSOL Multiphysics のパラメトリックスweep機能を利用して、抽出速度を一定に保ちながら、さまざまな浸透速度に重点的に取り組む幅広い研究を行いました。」

度と浸透速度がイコールであるとき、DSI 技術では、ポンプによる汲み上げだけの従来型技術による水位低下率の半分程度にとどまることが分かりました。

水位低下がまだ起こっているとき、水が現場から取り除かれていれば、より管理しやすいのです。」これは、図 4 に描かれており、井戸から離れた地下水面にそって水頭圧の変化が、さまざまな浸透速度に対して表示されています。

今までのところ、数値シミュレーション結果は、現場での測定データと同じ傾向を示している。Jin は次のように言います。「シミュレーションは、なぜ、どのように、いつ DSI が機能するのかを教えてください。例えば、DSI は、主に砂と砂利から成る浸透性の帯水層だけに適用できることを知りました。大量の広域地下水は、浸透速度に大きな影響を与えるものとして重要であることを発見しました。さらに、帯水層の透水係数の異質性が重要な役割をしています。特に、地下水の流れ

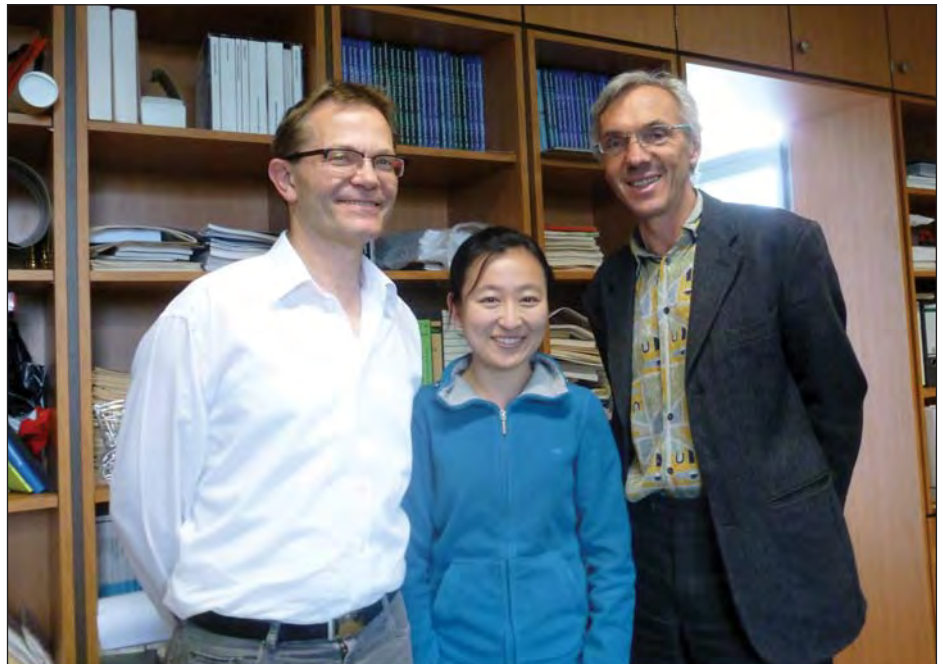


は、季節によって変化するように、帯水層の中の異なる層の相対的透水係数に従っても変化することも考慮しなければなりません。1つの問題は、掘削孔の下部に注入された水が、この処理の過程で、局所的な迂回路あるいは短絡回路（ショート）を作りだすかも知れないことです。こうした全ての状況は、モデリングアプローチを使って検証されます。」

### 明確なガイドラインの作成

廃鉱山のすぐ近くで、DSIが使われる場所があります。Jinの説明によると、「古い鉱山に近いために地下水が家の地下室に流入するような根本的な問題に対処しています。」

「ここでは、隙間の多い帯水層のため、どんな従来型の排水方法にも適しません。なぜならばポンプによる汲み上げが絶え間なく行われなければならないからです。」 Jinは、現場実験から得られたデータを入手し、3次元モデルに新しいパラメータを追加しています。この結果、モデルの能力が拡張され、適用可能な全ての実変数が反映されます。「注入が行われる地点でのノズルの大きさ、流速、対応する圧力すべてが組み合わされなければならないことが明らかです。従って、私たちは、もっと複雑で、異質の条件に向かって研究を進めています。また、1か所に複数ある掘削孔の状況についても調べています。」



(左から) Martin Sauter 教授、Yulan Jin 大学院生、Ekkehard Holzbecher 博士・准教授

この大学のチームは、DSI手法が、いくつかの制限がありながらも、機能することを証明し、今、その最適化に向けて重点的に取り組んでいます。Jimは次のように結論づけます。「DSIには多くの優位な点があります。しかし、たとえ経験のある専門家がDSIを利用する際

でも、どこを掘削し、何本の掘削孔が必要かを解明するために、数日間にわたる試行錯誤が必要なのです。シミュレーションを通じて、現場での作業時間と労力を節約し、この手法を効果的に指導し、うまく反復利用できるような明確なガイドラインを作成することができます。」

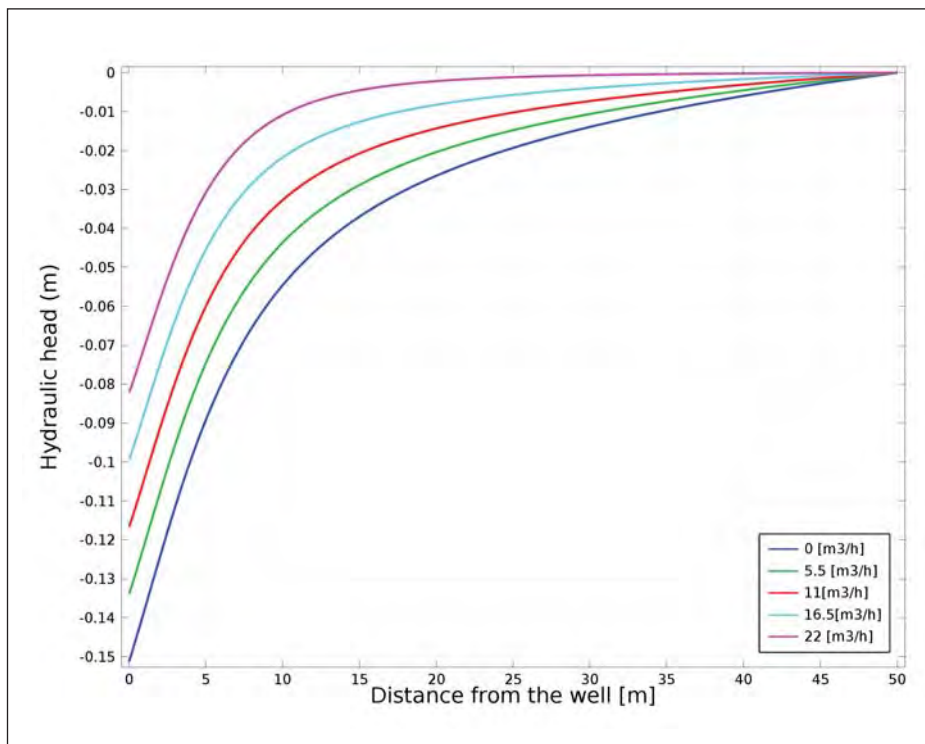


図 4. 浸透速度の増加にともなう水位低下の減少

### 研究報告

[www.comsol.com/papers/11083/](http://www.comsol.com/papers/11083/)

# 細胞アッセイのためのエアロゾルの動力学解析

～エアロゾル工学と毒性学の架け橋～

執筆者 独立行政法人 国立環境研究所 環境リスク研究センター 藤谷雄二

**大**気中には空気などのガス状物質だけでなく粒子状物質 (PM) も含まれています。PM は太陽光を散乱吸収したり、雲核としての働きを通して気候に影響をおよぼしています。一方、都市大気中の PM は視程に影響をおよぼしたり、ヒトの健康に悪影響をおよぼします。PM は呼吸時に空気とともに体内に取り込まれ、取り込まれた PM の一部は体内に沈着し、そのことが場合によっては健康影響のきっかけとなります。

**「現在の日本の PM に関する環境基準は、粒径区分に応じて粒径  $10\mu\text{m}$  以下で規定される浮遊粒子状物質と粒径  $2.5\mu\text{m}$  以下で規定される PM<sub>2.5</sub> があり、いずれも単位空気あたりの PM 質量で規定されています。」**

ここ数年、さらに小さな粒径  $100\text{nm}$  以下のナノスケールの PM (ナノ粒子) が健康影響の観点から注目されています。環境中においてナノ粒子は質量濃度にはほとんど寄与しませんが、個数濃度としては大変多く存在します。

その上、ヒトが吸入すると肺の奥にある肺胞領域においては粒径  $20\text{nm}$  の PM が最も沈着しやすい [1] ため、個数としてみた場合のナノ粒子の曝露量は、より大きな PM に比べて圧倒的に多くなります。環境中では、自動車が主なナノ粒子の発生源ですが、特に冬季の汚染がひどい幹線道路沿いでは、一時間あたりにヒトの肺胞に沈着する PM 個数は計算上ですが  $10^{11}$  個 [2] にもなります。また、意図的に生成されたナノの次元を持つ工業ナノ材料も、労働環境中に飛散して気相中の PM になり得ますが、作業者が吸入曝露される可能性があります [3]。肺胞に沈着したナノ粒子は細胞壁を通過し、血液に乗って他の臓器に移行するという報告 [4, 5] や、それが元で全身性の炎症につながる可能性 [6] が指摘されています。

**「ナノ粒子の健康影響は粒径が小さいことが問題なのか、個数や比表面積が大きいことが問題なのか、あるいは化学成分が問題なのか、どの要因でナノ粒子の毒性が決まるのかははっきりしないため社会の不安があります。」**

PM の吸入経路による健康影響の評価は環境基準と同様に質量基準で行われることが多かったのですが、ナノ粒子の特徴を考えると、ナノ粒子の影響評価は質量基準だけでなく、個数基準や表面積基準でも行う必要があります。規制や基準が制定される場合には、その値の根拠が必要になりますので、ナノ粒子の健康影響に関する知見を積み重ねる必要があります。

吸入経路のナノ粒子を含めた PM の影響評価の最も正統な方法は、ヒトや実験動物を用いた吸入曝露実験により評価する方法であり、粒子濃度や粒径、成分を把握した上で吸入させて影響を見ます。吸入曝露実験を行うためには大きな施設が必要なことや、もともと、ヒトに曝露するには倫理的に問題がありますし、動物愛護の観点からも極力動物を使った実験は控えるべきです。そこで、スクリーニングの位置づけで培養細胞を用いた評価手法があります。細胞を用いた影響評価法としては、PM をフィルター等に捕集して溶媒で処理し、その溶液を細胞に添加する場合 (ここでは溶液曝露法と呼びます) と気液界面を利用して直接 PM のまま細胞に曝露する気液界面細胞曝露手法があります [7]。

溶液曝露法の場合、例えば工業ナノ材料のように、溶媒に不溶性の PM の場合は、溶媒に分散した状態だと細胞に接触せず、曝露したことになりません [7]。また、ナノ粒子のように粒径自体や個数が PM の毒性にとって重要な情報かもしれない場合に PM が溶媒に溶けてしまえば、その情報が失われてしまいます。

**「一方、気液界面細胞曝露手法の場合はヒトの肺の中と同様の現象により培養細胞に対する PM の沈着が可能となり、現実的な曝露ができるという利点があります。」**

図 1 に気液界面曝露部分の写真を示しますが、メンブレンの下から培地を供給してメンブレン上に細胞を培養します。その細胞の上には気相に接しており、PM の直接曝露が可能です。このような利点もありますが、PM の細胞に対する沈着効率が定量的に明らかになっていないため、PM の曝露量と細胞の応答の関係 (用量反応関係) が得られないという問題がありました。

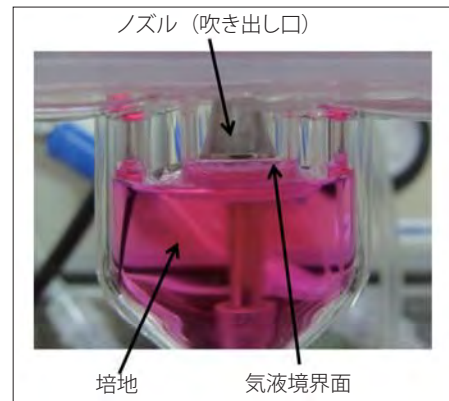


図 1. 気液界面曝露部分

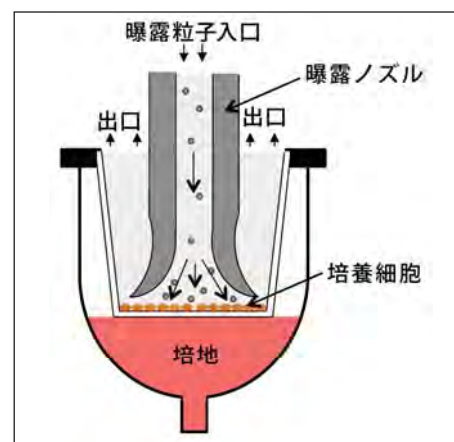


図 2. 気液界面細胞曝露部分の模式的な断面図

そこで我々は気液界面細胞曝露装置内の細胞への粒径別の PM の沈着効率をシミュレーションと実測の両面から評価しています。

図 2 に気液界面細胞曝露部分の模式的な断面図を示します。この半分の領域を対象として COMSOL Multiphysics version 4.1 を使用して系内の空気の流れ速度場を求めました (図 3 右)。

流体上の PM の軌跡は Fortran コードにより、PM に作用する抗力、重力、拡散力を考慮して計算しました。PM を含んだ空気はノズル内を通り上部から導入され、気液境界をかすめて脇から抜けていきます。空気の流線 (白色の線) および流線上からスタートした粒径  $100\text{nm}$  球

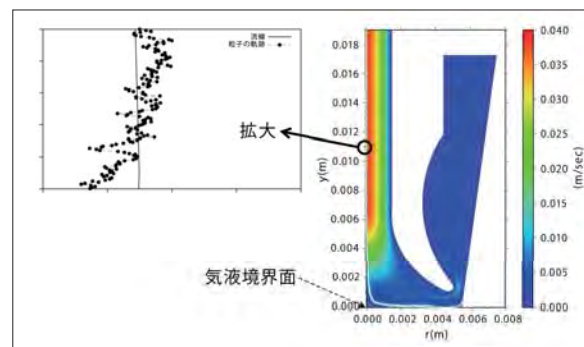


図 3. COMSOL Multiphysics による速度場解析



形粒子の軌跡（水色の線）を一例として示します。PMは平均的には流線に沿って移動しますが、PMにも重力、気体の抗力、ブラウン運動などの力が働きますので、ランダムに動きながら流線から外れます（拡大図）。最終的にはこのPMは流線から外れて $r = 0.004\text{ m}$ 付近で細胞が培養されている気液境界面に沈着しています。ブラウン運動のランダムな要素があるので、同じ場所から何度も繰り返しスタートさせて評価します。さらに様々な初期位置のPMについて同様に軌跡を求めて、気液境界面に到達するか評価し、沈着効率を算出します。シミュレーションは文献値 [8, 9] の再現および実測との比較のためにそれぞれ行いました。実測は既知の粒径の球形粒子を気相中に飛散させて、単一の粒径、無帯電、既知の個数濃度に調整した上で気液細胞曝露装置に導入して気液境界面に沈着させます。沈着した球形粒子の個数を透過型電子顕微鏡を用いて数え（図4）、その沈着数と曝露中に系に流入した粒子数から沈着効率を算出します。粒径によりPMに作用する力の大きさが異なるため、以上のことを様々な粒径のPMについて評価しました。

図5に気液界面細胞曝露装置内のPMの沈着効率の計算結果を示します。沈着効率がU字型になっていますが、拡散沈着が卓越する小粒径側と重力沈降が卓越する大粒径側で高く、両者の効果が小さい中間の粒径において沈着効率が低下していると考えられ、妥当な結果が得られました。沈着効率の計算値 ( $\eta_T$  Simulation) そのものに関しては、 $\eta_T$  Reference (文献値との比較 (Tippe [8], Desantes [9])、球形粒子を用いた実測 (実測)) と比較して結果を確認しました (図6)。図中の数値は粒径を表します。図中の斜線は1:1直線ですが、おむね両者が一致したことが確認されました。

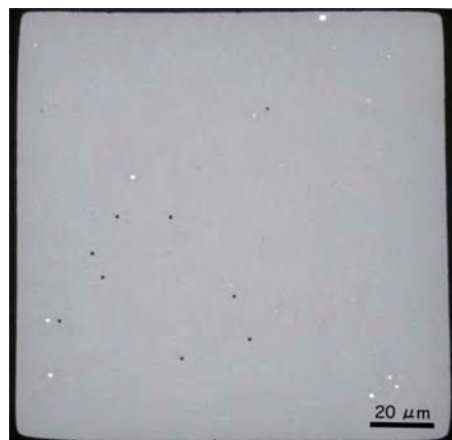


図4. 球形粒子の透過型電子顕微鏡写真

**「実測で得られている値がシミュレーションで再現できることが確認されました。引き続き他の粒径についても実測例を増やして両者を比較していくことと、シミュレーションを中心に、最も効率的な曝露条件の最適化を行う予定です。」**

また、今回は実測とシミュレーションの比較を主眼としたため、球形粒子を計算および実測対象としました。実際には例えばディーゼル排気粒子の葡萄の房状のPMや工業ナノ材料の一種であるカーボンナノチューブの繊維状のPMのように、非球形PMがほとんどです。それらのようなPMについても同様に評価していく必要があります。

なお、この研究は菅谷裕氏、橋口真宜氏、古山昭子氏、平野靖史郎氏、高見昭憲氏のご協力のもと行われているものです。

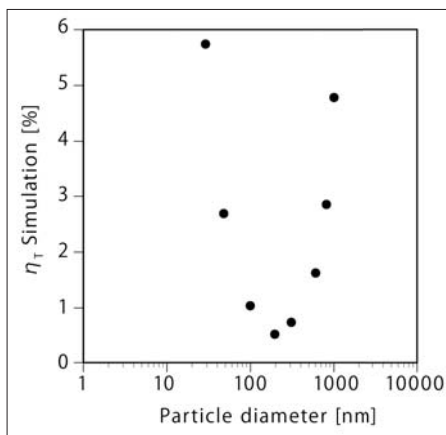


図5. PMの沈着効率の計算結果

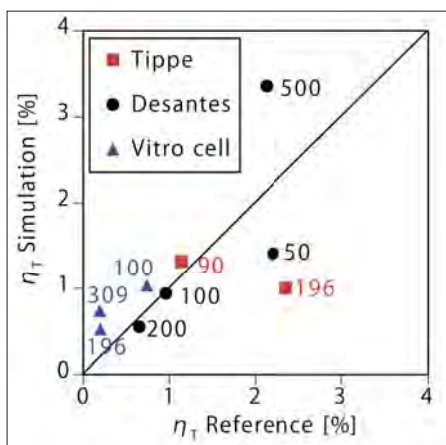


図6. 沈着効率の計算結果と文献値、実測値の比較

【参考文献一覧】

[1] ICRP. Human respiratory tract model for radiological protection, Oxford, Pergamon Press (1994)  
 [2] Y. Fujitani, P. Kumar, K. Tamura, A. Fushimi, S. Hasegawa, K. Takahashi, K. Tanabe, S. Kobayashi and S. Hirano, Seasonal differences of the atmospheric particle size distribution in a metropolitan area in Japan, Sci. Total Environ. 437: 339-347 (2012)  
 [3] P. Biswas and C. Y. Wu, 2005 Critical Review: Nanoparticles and the environment, J. Air Waste Manage., 55: 708-746 (2005)  
 [4] S. Takenaka, E. Karg, C. Roth, H. Schulz, A. Ziesenis, U. Heinzmann, P. Schramel and J. Heyder, Pulmonary and systemic distribution of inhaled ultrafine silver particles in rats. Environ. Health Persp., 109: 547-551 (2001)  
 [5] G. Oberdorster, Z. Sharp, V. Atudorei, A. Elder, R. Gelein, A. Lunts, W. Kreyling and C. Cox, Extrapulmonary translocation of ultrafine carbon particles following whole-body inhalation exposure of rats. J. Toxicol. Env. Heal. A, 65: 1531-1543 (2002)  
 [6] R. J. Delfino, N. Staimer, T. Tjoa, M. Arhami, A. Polidori, D. L. Gillen, S. C. George, M. M. Shafer, J. J. Schauer and C. Sioutas, Associations of Primary and Secondary Organic Aerosols With Airway and Systemic Inflammation in an Elderly Panel Cohort. Epidemiology, 21: 892-902 (2010)  
 [7] H. R. Paur, F. R. Cassee, J. Teeguarden, H. Fissan, S. Diabate, M. Aufderheide, W. G. Kreyling, O. Hanninen, G. Kasper, M. Riediker, B. Rothen-Rutishauser and O. Schmid, In-vitro cell exposure studies for the assessment of nanoparticle toxicity in the lung-A dialog between aerosol science and biology. J. Aerosol Sci., 42: 668-692 (2011)  
 [8] A. Tippe, U. Heinzmann and C. Roth, Deposition of fine and ultrafine aerosol particles during exposure at the air/cell interface, J. Aerosol Sci., 33: 207-218 (2002)  
 [9] J. M. Desantes, X. Margot, A. Gil and E. Fuentes, Computational study on the deposition of ultrafine particles from Diesel exhaust aerosol, J. Aerosol Sci., 37: 1750-1769 (2006)

執筆者の紹介

藤谷雄二先生 (ふじたに ゆうじ、独立行政法人 国立環境研究所 (NIES) 環境リスク研究センター 任期付研究員、博士 (工学)) は、1999年に北海道大学工学部衛生工学科を卒業され、2001年北海道大学大学院工学研究科環境資源工学専攻修士課程修了、2004年同専攻博士後期課程修了の後、2004年4月国立環境研究所に入所されました。なお、国立環境研究所は2001年4月より環境省管轄の独立行政法人として活動しています。

内外の学会でご活躍中で、既に3度の受賞経験をお持ちの藤谷先生が第29回エアロゾル科学・技術研究討論会 (2012年8月開催) にて発表された「細胞曝露装置内における粒子沈着率の評価」が、若手ポスターセッションの中から優れた発表に授与される「ベストポスター賞」に選ばれました。

ご発表内容が私共の健康不安解決への道標として注目すべきテーマと考えましたので、お忙しい中をお願いして、ご執筆いただきました。

## ウォータースクリーンの科学

取水口スクリーンのカスタム設計は、液体と機械的シミュレーションを使用することで、開発コスト削減を可能に。

執筆者 TECH BRIEFS MEDIA GROUP 社、寄稿編集者、EDWARD BROWN 氏

**水**資源は私達の生活と生命に関わる必要不可欠なものです。私達が通常使用している水は公共水道システムから得る水、もしくは井戸や天然泉から直接得る水です。湖、河川や海の場合は、例えそれが食用利用ではない場合でも、その水を使用前に処理する必要があります。発電所や産業プロセスの冷却用あるいは蒸気用にて使用する水には、ポンプ、バルブ、パイプや他の機械部品などの詰まり防止のため、破片混入を未然に防ぐ必要があります。

Johnson Screens 社は、水中の魚や生物に害を与えることなく、破片混入を防ぐためのスチールスクリーン製造を手掛ける最も経験豊富な製造会社です。これらのスクリーンには多種多様なアプリケーションがあり、今までの業績の中では、炭化水素処理業界、建築業界、パルプと水生産、鉱業、及び食品加工業などで活躍した例が多数あります。

### 複雑化の要因

ワイヤスクリーンに関しては、複雑なことではないのではないか、またはウォータースクリーンと窓のスクリーン（網戸）ではそんなに差異はないのではないかと思われるかもしれませんが、しかしこの2種類には大きな違いがあります。

ウォータースクリーンの最初の課題は、水流がスムーズに通るスクリーンサイズで、その一方で破片が残るサイズでなくてはなりません。



図1. ユニークなV字型ワイヤ構造詰まりを防ぎます。



図2. Johnson Screen 社の Ehrich Shaw 氏と小規模の取水口スクリーン

新たな課題は、破片が最初の段階でスクリーン上に残った場合、水流スピードが遅くなり、時間がかかってしまいます。更に、水中の生物や環境への影響にも配慮が必要なため、水流はゆっくり、スムーズでそして一定でなくてはなりません。この装置には可動部分がなく、全て受動でなくてはならないという部分が、最大の課題になります。魚や他の生物達を守るため、「わな」になってはいけません。言い換えると、装置はスクリーンに付属されているけれども、「取り込み」をしてはいけません。スクリーンの方に引き寄せられるようにしなくてはならないのです。

### 解決策

Johnson Screens 社が発明したユニークなV字ワイヤ（図1参照）は、表面は平らで水面にあり、側面は中心に向けて先細になり、V字になっています。

この装置には多数のメリットがあります。粒子との接触点はわずか2箇所です。スクリーンの壁の間は水流場所では広がっているため、粒子が割り込むということはありません。スクリーンの外部表面はとても平らでスムーズなため、野生生物や他の用具などが上部分を通過しても擦り傷を作る事もなく、安全です。

この取水口スクリーンは、円形状の支持構造物の両隣にあり、ワイヤを円形状に取り付けるために、特注機械により製造されます。ワイヤが支持構造物と接触しているポイントは抵抗溶接されています。ゆがみを防止し、凸凹な溝を許容範囲内にするために、溶接プロセス中は温度を下げる必要があります。水槽内で組立冷却します。設計上では、ワイヤ間のスペースは目標を達成するために不可欠なものです。最終組立は、技術と溶接工の腕にかかっています。

### 構造

スクリーンは、可動装置ではなく、受動装置として必要な達成すべき構造基準や流量があり、設計がとても重要になります。スクリーンの基本的構造要素は、ドラム型で、その周りをワイヤでらせん状に巻かれたものです。一般的に、スペースや吊り上げる場所が限られている場合はシングルドラム型が用いられます。ほとんどのアプリケーションでは、T字型スクリーンが用いられます。2つのドラムが中央ではめ込まれ合体します。

ワイヤ設計の後に鍵となるシステム・コンポーネントは、内部のパイプを開けた時の流動性改良剤です。これは、1999年に開発され、



その後、30年以上も間、改良され続けて特許権を得ました。通常は2重ですが、多重のパイプ流動性改良剤です。その構造とサイズは、流速度が受動制御可能なものになっています。(図3)

3番目の主要コンポーネントはHydroburst™ 逆流システムです。システムを停止させることなく、圧縮空気により一気にワイヤを清掃することができます。

### 鍵となる設計要因

各スクリーンは全て、瓦礫破片、水源の乱流、スクリーン配置場所、特に深さなどのあらゆる特徴を十分に考慮した特殊なアプリケーション仕様の特注デザインです。固形微粒子は水流では不可視ですが、この固形微粒子はユーザーの給水からは、スクリーンの力により効果的に取り除かなければなりません。水流速度に関しては、通過する固形微粒子が受ける影響が、最低限に抑えられるような速度でなくてはなりません。その速度は、ゆっくりでかつ、定速維持を行った場合、またスクリーン表面上を一定速度で保った場合に実現されます。

スクリーンからの距離は、努力範囲と呼ばれ、環境に影響を及ぼすため、出来る限り小規模に抑える必要があります。流動性改良剤の設計は、通常、この努力範囲をスクリーンの半径以下で作成できるようにします。

### ワイヤ設計

理論上、ワイヤサイズは0.02インチから0.191インチ(0.5~4.9mm)の間になります。そのワイヤは、構造上の特徴、例えば、深さに耐える力があるものや衝撃負荷に耐えられ

## 「各スクリーンは特定のアプリケーションに合わせた特注設計です。」

るものなど、をベースに選択する必要があります。その一方で、予期された水流には十分なオープンエリアの提供が必要です。

スクリーンは最大限許容範囲の流速を十分に考慮に入れた設計にしなくてはなりません。水が通る時に安全な速度で、魚がスクリーンにかからず、わなや取り込みの影響も最低限になるように設計します。通常は生物学の専門家に決定していただきます。スクリーン内の水流の容量は、オープンエリアに許容内平均速度を掛けた数によって計算されます。

### 流動性改良剤

オープンパイプ流動性改良剤はスクリーンを通る流速をコントロールします。最初のデザインであるシングルパイプ設計と比較すると、現在の2重同心設計は改良が施され、20~30%小さな取水口スクリーンでも同じ流量速度の水をスクリーンすることが可能です。スクリーン表面上の加速度は、取水口内部にある複数の同心チューブのサイズや配置などに関連します。スクリーン表面のオープンエリアは小さいため、水流加速には局所的のみ影響します。そのため、流動性改良剤がほぼすべてを管理しているといえます。

流量カーブ(図4参照)が示しているのは、スクリーンの長さに沿った速度で、ごく一般的なものですが、オリジナルのシングルフロー流動性改良剤と新しい2重パイプ設計(同じ場所、周囲のもの)を比較しました。端から端まで直線であることが、理想的なプロフィー

ルです。理想的なプロフィールからどれくらい離れてしまっているかは、ピーク速度の平均比率の比較で判明します。(理想的なケースを1.とした場合)より小さなスクリーンで、その比率が高ければ高いほど、より高い流動速度に達成できます。より小さなスクリーンでは努力範囲は狭いのですが、一般的にはより経済的に実行可能です。なぜならば、より小さなスクリーンの方が、水使用ポイントと接触するパイプはより小さいものになるからです。

### COMSOL Multiphysics モデリング

各スクリーンの詳細は特定のアプリケーション用に設計が必要です。設計は流体力学と構造力学を考慮する必要があります。これはCOMSOL Multiphysicsが、得意とする完璧な課題です。これらの多様な要素の相互作用をモデリングする能力を十分に発揮する事ができます。

Johnson Screens社のアプリケーション、製品開発のマネージャであるMichael Ekholm氏は「これらスクリーンの設計開発は決して予想外な結果ではありません。スクリーン周辺とスクリーン上の流量パターンを正確に予想する能力が必要です。(図5参照)この研究の中では、COMSOLのようなモデルツールを使用することにより、私たちは多様な方法を活用することができました。必要条件と流量能力を変更すると、層流状態と乱流状態の間でも変化が生じます。直径とスクリーンの長さのアスペクト比、流動性能の最適化、3重流動性改良剤のような新機能追加などのような変更でも、このモデルを使用して実装可能です。社内モデリングツールとして使用したCOMSOLは、コンサルティング及び分析

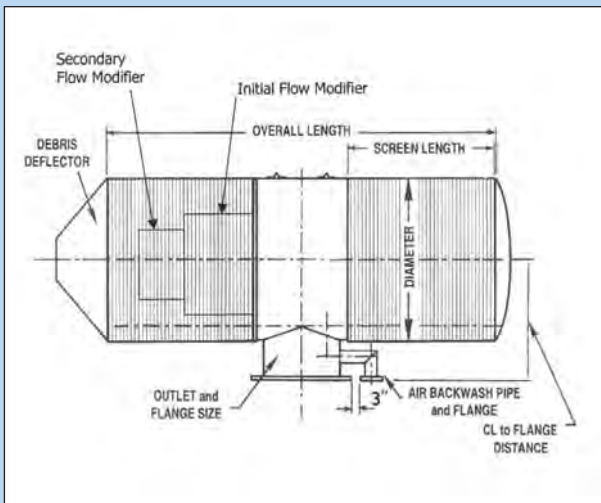


図3. スクリーンアセンブリのキーコンポーネント

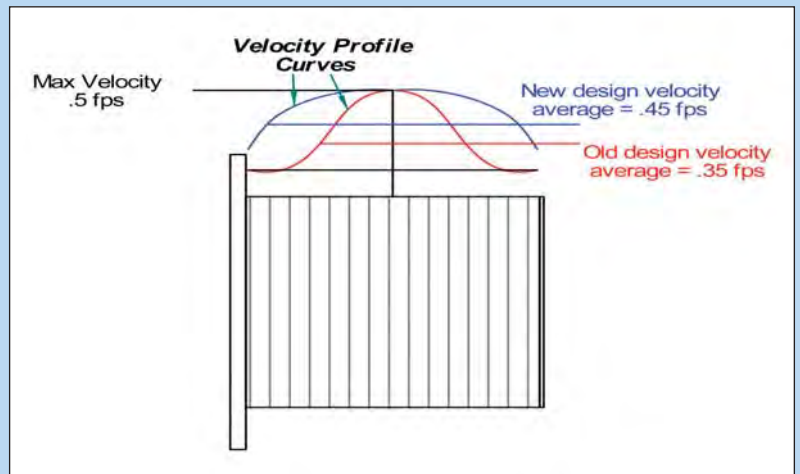


図4. 2重パイプとシングルパイプデザインの流速分配の比較

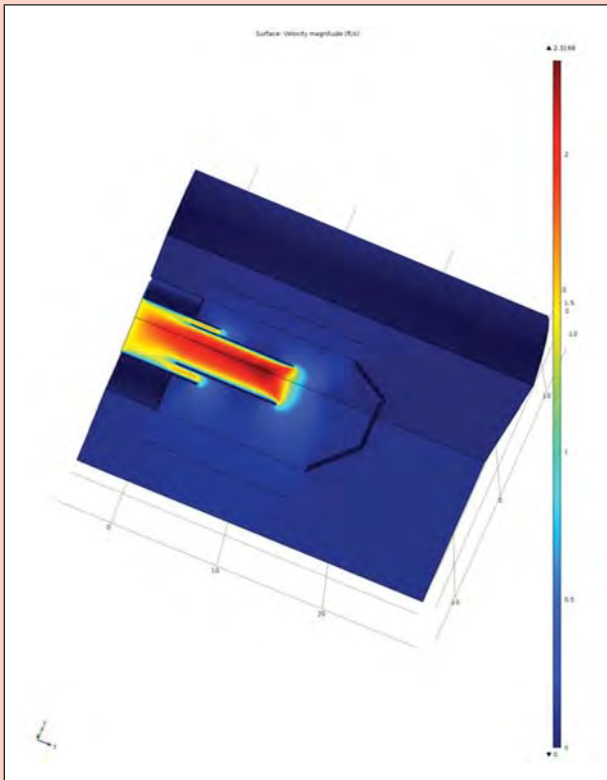
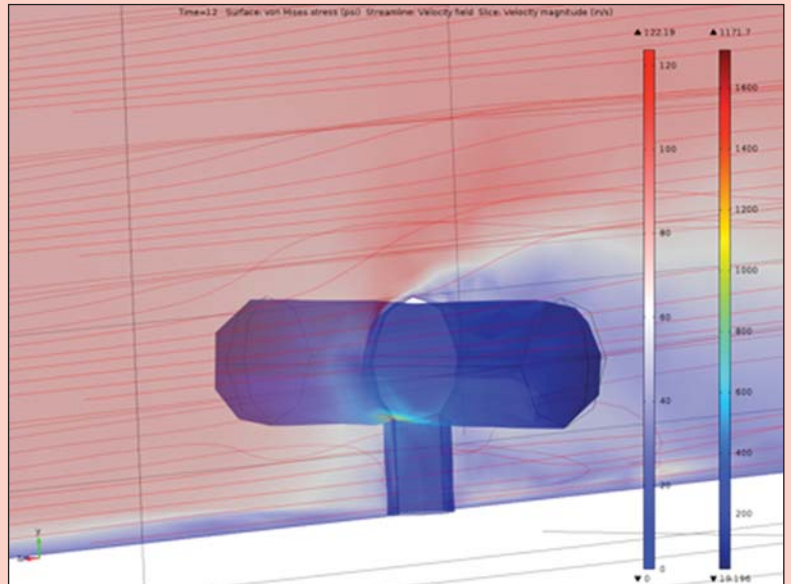


図5. マルチフィジックスモデルの速度分布  
2重パイプ流動性改良剤では、スクリーン外部の流量が最も低く、スクリーン内部の流量は最も高い数値

図6. 流量と構造圧力による波荷荷から起こる影響のマルチフィジックスモデル



費用削減に大きく貢献しました。」と語ります。それは設計上での貢献だけではありません。Ekholm氏はこう説明します。「ソフトウェアに搭載されている広範囲にわたるグラフ作成や図解などの問題解決能力により結果は予測可能で、それらは許可及び承諾書類には絶対不可欠な報告です。」

### 波負荷

波負荷とは、特にモデリングにはつきものの課題です。波負荷とはスクリーン上の水の動きの循環波動に対することで、速度と圧力だけでなく、作用角にも影響を与えます。COMSOL内蔵、時間依存解法、および循環機能は、この問題を解決するためには理想的な機能です。波負荷により発生する構造的な問題のモデリングにマルチフィジックスソフトウェアを用います。この波モデルの計算流体力学分析から得た負荷の結果は、取水口のシェル/プレート構造モデルに適用されます。応力集中の鍵となるエリアを調査することで、設計応力がかかっているかどうか確認、再考察することが可能です。また水の波がいかなる疲労問題を引き起こすかどうかというような、波循環負荷テストすることも可能です。(図6)

### ハイドロバースト空気逆流システム

受けタンク内、水の表面上で起こる空気の小な爆発により、スクリーンは定期的に清掃されます。スクリーン表面上の気流速度は速すぎず、しかし破片などをスクリーン上から移動させるには十分な速度が必要なため、タイミングと気流速度は計算されなければなりません。スクリーンから取り除かれた破片は、導入された空気によって水面上に浮きます。水流が速い場合や自然発生が原因で水に影響があった時に水流に紛れてしまった場合のみ、魚はスクリーンから移動されます。摩擦機や他の機械の場合は機械が直接、魚に接触してしまうため、魚を傷つけてしまいます。「スクリーンからの空気の膨張は、興味深いものです。このケースモデルの場合は、隣接したスクリーンへ流れるかどうかを確認することができます。」

「社内モデリングツールとして使用したCOMSOLは、コンサルティング及び分析費用削減に大きく貢献しました。」

COMSOLを使用することにより、空気の膨張や隣接スクリーンへの流量(努力範囲)などの、実際起こりえる状況を把握することができます。」とEkholm氏は語ります。

### COMSOL Multiphysicsの多様な使い方

マルチフィジックスはこのような独特のアプリケーションの初期設計に使用されるだけでなく、液体、気体、顧客デザインの多様なアプリケーションなど複雑な相互作用の場合でも使用可能です。その結果の正確性は、これまでのテストにより証明されています。そのため、実際に行う物理的モデリングの必要性は消滅しています。



## 数分で光学平面に

今まで手仕上げで最終加工を行ってきた超精密光学部品は、Zeeko 社の液体ジェット研磨機 (FJP) のモデリングを活用することで、ほんのわずかな時間で完了する高品質な機械プロセスを用いた方法に置き換えることが可能になりました。

執筆者 JENNIFER HAND 氏

**宇**宙望遠鏡、整形外科ジョイントおよびデジタルカメラなどのような高品質製品のスライス加工、研削、研磨そして最終加工に関しては、ガラスや金属へは直接的、鋳物へは間接的応用を含む数多くの精密プロセスが含まれています。いかなる方法が用いられても、鍵となる必要条件は変わらず、完全にスムーズな表面とわずか数ナノメートルという精度の高い球状型が必要とされます。今まではコンポーネントを手作業で行うという選択肢しかない場合もありましたが、それには多大な時間を要し、また重労働でもありました。

### より効果的な方法の模索

Zeeko Ltd 社はイギリスに本社を構える技術会社であり、研磨機、矯正機の製造をてがけています。その超高精度な研磨機ソリューションは、ハワイに設置されているヨーロッパの超大型望遠鏡や 30 m 望遠鏡の開発で用いられています。Zeeko 社の Anthony Beaucamp 博士は、手作業よりも、より高品質に仕上げることができる新しい技術の模索について以下のように語っています。「ノズルから研磨粒子と水との混合液が、加工対象物に向けて出てくるこれらの液体ジェット研磨機の将来性にはとても興味を持っていました。これには極めて重要な利点があります。生成された設置面積は 1 ミリメートル以下だということ、そして様々な素材で加工可能だということです。以前に行った加工プロセスでついた



図 2. Zeeko 社のインテリジェンスロボット研磨機 FJP ツールの配置と圧力は、Zeeko 7 アキシス CNC (Computer Numerical Control: コンピュータ数値制御) のツールコントローラにより管理されます。

機械加工の痕跡を消す事も可能ですし、工具摩耗に関しても全く問題はありません。」

しかしながら、光学部品に関して、極めて重要な問題がありました。多くのグループによる研究にもかかわらず、FJP を使用した最終結果は、常に波になってしまうという極めて重要な問題がありました。

「小サイズの波は一般的には許容範囲です。

しかし、ある一定の中、高空間周波数では、光分散、光学屈曲、あるいは回折を引き起こしてしまいます。」と Beaucamp 氏は語ります。

「残念ながら、FJP によって磨かれた表面は、通常、波形のような 10nm Ra 以上の特徴が残ってしまいます。-この数値は

高すぎです。」と Beaucamp 氏は続けます。Ra (粗度平均) は表面上の測定マップの算術平均値を表します。

この問題は 1990 年代後半から問題点として認識されてきており、Beaucamp 博士はこの問題点の解決策を見つけることに強い決意をもっています。2010 年、Zeeko 社は日本の中部大学に研究センターを設け、FJP 技術を搭載した CNC 機械をインストールしました。(図 2. 参照)

計測エンジニアリングシステム株式会社 (東京) からのサポートを得ながら、Beaucamp 博士と大学研究チームは計算流体力学 (CFD) モデルの開発に取り組み始め、FJP の数多くの特徴の研究を実行しました。特に液体、空気、痕跡、其々の研磨粒子の軌跡間のインタフェースのシミュレーションに興味を持っていました。COMSOL Multiphysics のモデリングの結果と実際の機械性能を比較することができます。「私達の目的は、1nm Ra に出来る限り近づけることです。」

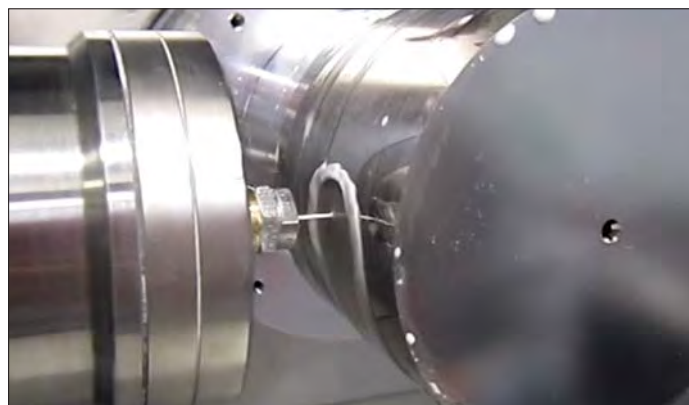


図 1. X 線ミラーの複製用の非球面ダイスの液体ジェット研磨 [www.comsol.com/video/337/](http://www.comsol.com/video/337/) にて映像をご覧いただけます。

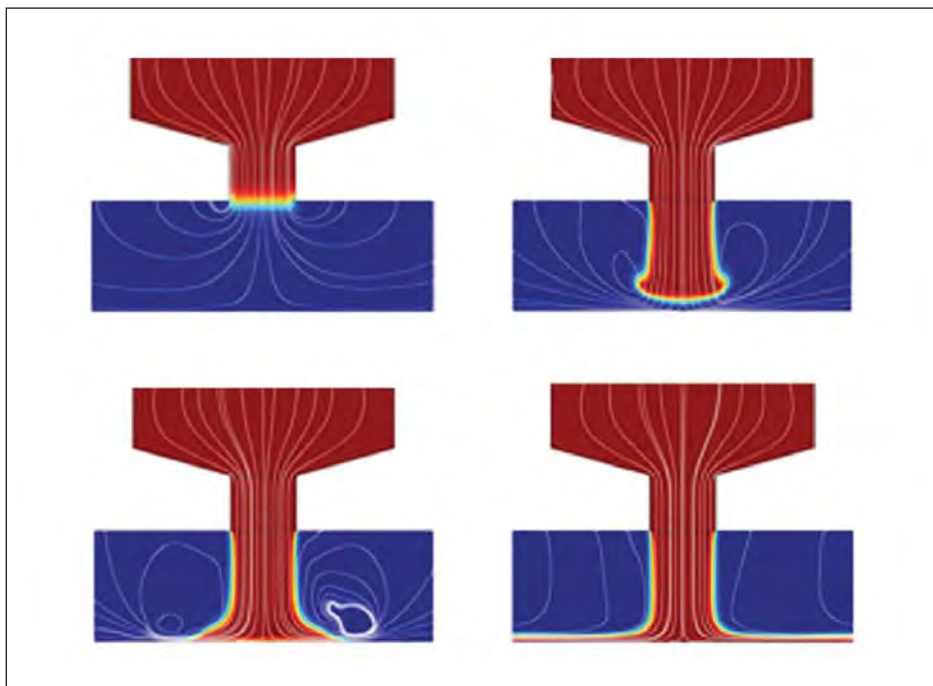


図3. シミュレーションスナップショット：スラリー（赤）、空気（青）、スチームライン（白）

### マルチフェーズ・モデリング

「FJPでは、ジェットはわずかなスポットを作成し、そのスポットは表面上を移動します。」Beaucamp博士は説明します。「その光学エリアをカバーしている極めて細いレーザーパスをスポットが通ります。」

この動作中、ポンプシステムはジェット圧力に影響を及ぼし、それが波形の原因のポンプとトラッキングの結合になります。境界条件設定に関して、ノズルからの衝突流量の中で

の共振周波数を理解し、この周波数の変化がいかに機械に影響を与えるのかがとても重要です。」

最初のステージは時間依存下での液体状況とノズルからの流量、表面への衝撃、そして流れ込む様子のモデル作成です。レベル設定と一緒に K-乱流モデルを使用したシミュレーション、液体-空気インタフェースをモデリングするための位相場方法、および一連の時間的スナップショットの作成など、シミュレーショ

ンには様々な機能がついています。(図3)

さらに、スラリー内の粒子が“混入される”、或いはその粒子が液体流線をたどっているとは、チームは仮定したくはありませんでした。そのため、実際の粒子の軌道はシミュレーションにて確認することができました(図4)。Beaucamp博士は、薬品同様、粒子の影響力を考慮するため、ニュートン式を用いたParticle Tracing Module(粒子追跡モジュール)を活用しました。100nmサイズ以上の粒子のみが浸透可能な境界層をこのモデルでは表示する事ができます。それが示していることは、除去モードは延性(例:伸縮素材)でなければならないということです。それは粒子エネルギーが、表面のわずかな小さなスペースからすばやく消えてしまうからです。引っかき傷や、こすり取るような永久的な損傷の明白な証拠がないため、実験的に確認されました。

このモデルに対する信頼のもと、Beaucamp博士は、スラリーデリバリー・システム内の圧力不安定性が主原因で起こる波形の最適化のために、モデルを使用し始めました。ノズルは、当初、高圧力の隔壁ポンプと振動吸収材から作成されていました。この結果、圧力ドリフトは高まり(図5青線)、注入圧力安定性を向上させるために、チームはシステムへ低圧力フィードインポンプの追加とインバータパワーポンプへの圧力計接続を行いました。これにより、フィードバック管理ループが全体的な圧力安定性を向上し、平均圧力ドリフトを修正することが実証されました(図5赤いカーブ)。

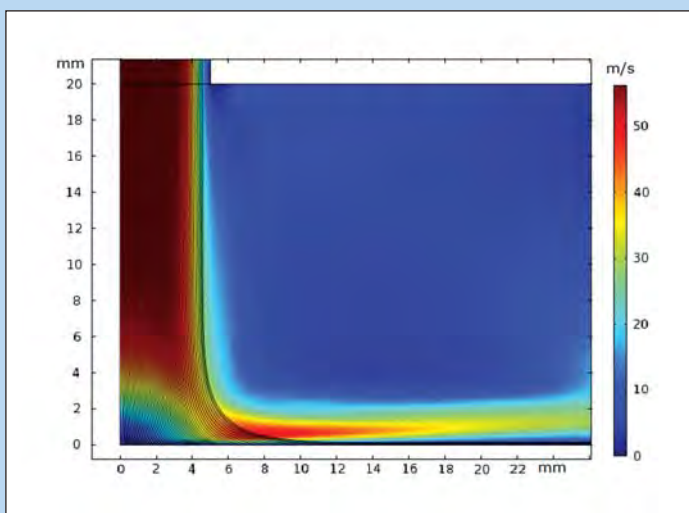


図4. 粒子の動き(黒) 液体速度 m/s (カラースケール)  
この図では、境界層(濃い青)を表示。

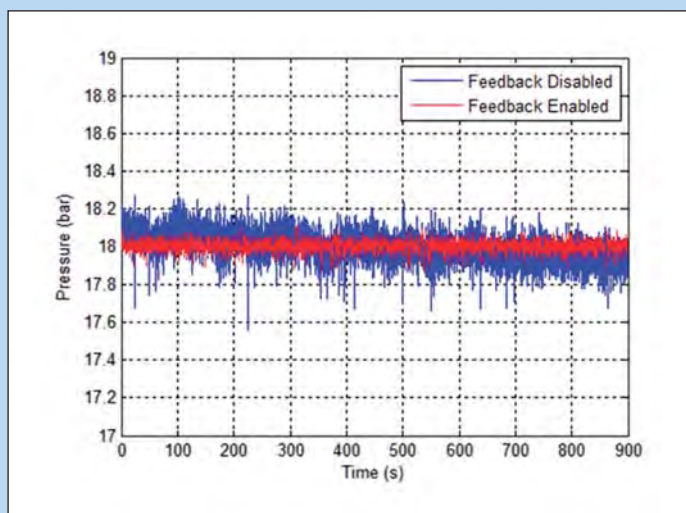


図5. 安定した圧力フィードバックループ有(赤色カーブ)  
安定した圧力フィードバックループ無(青色カーブ)  
圧力ドリフトを基本的に無効にするフィードバックループを使用

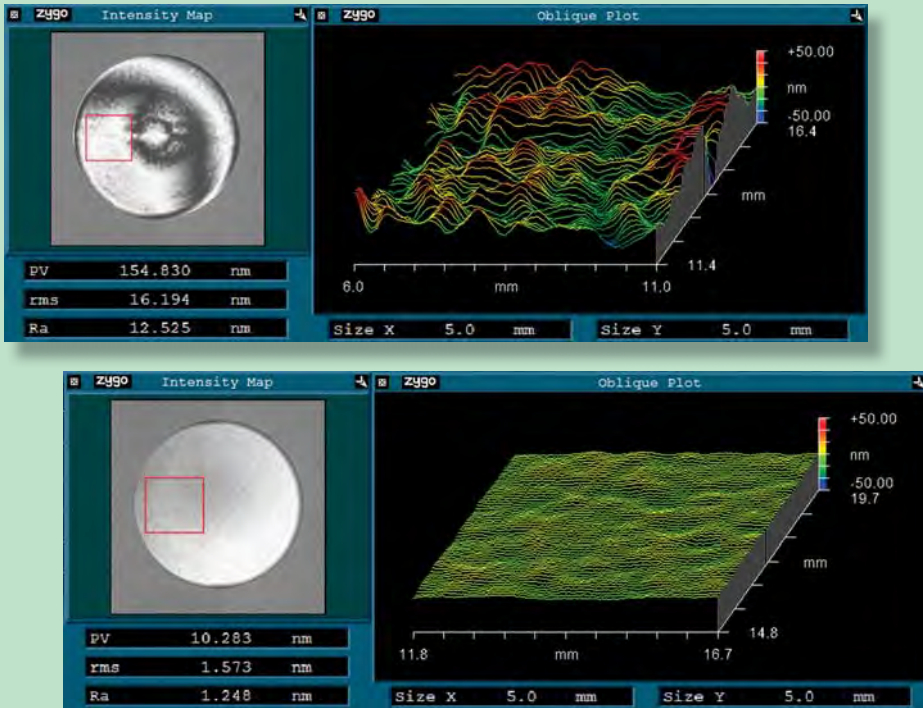


図6. BK7 ガラスの 5.5 mm エリアの表面粗さ 最適化前(上) 最適化後(下)  
最適化実装により Ra は 12.5nm から 1.2nm に減少しました。一方でフリンジマップの比較(左)は波型が完全に消えていることを証明しています。



図7. 新しい統合システム。  
研究で用いられた研究室装置の  
4分の1以下の設置面積を持つ

図5で示された結果から Beaucamp 博士が予測出来た事は、ポンプにより課され、フーリエ変換解析を用いた圧力変動には根本的なパターンがあるということでした。ここでは、異なる状態でのスラリーシステムを特徴づけ、COMSOL モデル内でこれらの圧力パターンを追加することが出来ました。その後、多様なノズルサイズ、スタンドオフ距離とスラリータイプを用いたスラリーデリバリー・システム用の最適条件算出のためにモデルは使用さ

#### モデルからメカニカルセットアップへ

一度、モデルが最適化状態で操作可能になると、Beaucamp 博士のチームは、自らの方法の信頼性を高めるため、比較実験を行いました。光学グレードの溶解シリカガラスウィンドウをオリジナルの方法と、その後、最適化されたスラリーデリバリーシステムコンディションで、研磨し、実験しました。表面の粗さは光学プロファイラーと白色光干渉計を用いて計測されました。Zygo Corporation

#### 1日から10分へ

Beaucamp 博士と彼のチームは、彼らが求めていた結果を得ると、それらをすぐに工業的応用へと移行しました(図7)。Zeeko社は、研究装置の生産バージョンを開発し、日本で販売を開始しました。

日本と韓国の多数の製造企業では、現在、光学金型最終加工の段階で、Zeeko社の技術を使用しています。「1日以上かかっていた手仕上げ作業は、今では、わずか10分で終了します。」と Beaucamp 博士は説明します。「これは私達の顧客にも大きなメリットになります。より素晴らしい品質の商品を提供し、その一方でコストは削減されています。この突破口が見つかるまで、彼らが頼りにしていたものは、素晴らしく鍛錬された光学職人の方たちによる手作業での研磨技術でした。そしてその技術は、機械にはたやすく真似できるものではありませんでした。」と Beaucamp 博士は語ります。

### 「1日以上かかっていた手仕上げ作業は、今では、わずか10分で終了します。」

れました。パラメータスイープは実装され、除去設置面積内の変動は抽出され、解析されました。このような変動内動向及びモデル内の他の結果を試験することで、機械加工された部品の種類や材料の種類にもよりますが、Beaucamp 博士は、多数の最適実装状態を推薦することができるようになりました。

社のソフトウェアを用いて、Ra 値および粗さのプロットや強度は計測されました(図6)「私達の期待通り、非最適化システムでは 5.5mm エリア (12.5 nm Ra) 以上の大量の波が見られた一方で、最適化システム (1.2 nmRa) では、非常に改善されました。」と彼は語ります。

#### 論文

[www.comsol.com/papers/12495/](http://www.comsol.com/papers/12495/)

# 層流スタティックミキサーのモデリング

## 正確な CFD モデリングを用いたスタティックミキサー最適化 ～ Veryst Engineering 社・Nordson EFD 社での活用事例

VERYST ENGINEERING 社 NAGI ELABBASI 氏、XIAOHU LIU 氏、及び STUART BROWN 氏、  
並びに NORDSON EFD 社 MIKE VIDAL 氏、及び MATTHEW PAPPALARD 氏による寄稿

**層**状粘性液体の静的混合は、製薬から生物医学、消費財、石油化学製品まで、幅広い業界で産業利用されています。しかし、従来の CFD（数値流体力学）法を用いた層状粘性液体のモデリングは容易ではありません。Veryst Engineering 社では、Nordson EFD 社と協同し、このような装置のモデル化、さらに改良、最適化のための最善策を模索しました。

スタティックミキサーは低コストかつ正確な装置であり、多種多様な液体をさまざまな混合比で混合させることができます。混合材料となる液体は粘性の非常に高いものが多く、層流混合における分子拡散は極端に少ないため、機械的に混合させなければなりません。拡散度が顕著に高いガスの混合に用いられる乱流混合とは対照的です。今回研究対象となった層流液体ミキサーには、流れを分割し再混合させるためのエレメントが複数用いられており、これらのエレメントにより液体が外側の境界層から離れるように流れが転換し、また、らせん状のエレメントにより流れが引き延ばされ折りたたまれます。スタティックミキサーの流出口で、混合前の液体材料の高濃度の塊がなく、全体的に均一であれば、混合品質が高いことになります。図 1 は Nordson EFD 社の使い捨てスタティックミキサーで、建築業、工業、自動車産業で接合や修復に用いられる接着剤を混合します。



図 1. 使い捨てスタティックミキサー (Nordson EFD 社提供)

スタティックミキサーを理解し最適化するためには、正確な CFD モデリングが有用です。しかし、CFD モデリングに二つの位相を持たせることは、数値的拡散が生じるためそれ自体が不可能であり、言い換えれば実際の混合過程を反映しない計算処理上の成果物ではありません。数値的拡散は、メッシュの精緻化、柔軟性向上 [less stabilization] などの数値的

手法により減少させることが可能です。ただし、数値的拡散は、層流の静的混合でみられる分子拡散の極端な起こりにくさに常に大きく影響します。

### CFD、粒子追跡、そして混合品質

Veryst Engineering 社は、Nordson EFD 社との協同により層流スタティックミキサーのシミュレーションのための新しいモデリングツールを開発しました。私たちは COMSOL Multiphysics を利用して総合的な混合性能の CFD 解析を行い、全体的な流れのパターン及び圧力損失を予測します (図 2)。その後、流線データ及び無質量での粒子追跡データの二つのデータから個別に解析を行い、数値的拡散なしに流体の粒子の軌跡を追います。図 3 は Nordson EFD 社製ミキサーのさまざまな断面における速度等高線、図 4 は粒子追跡の中間時点での結果を示しています。図 4 では、二つのポアンカレ断面も見えており、粒子がミキサーの特定の平面を横切る位置が示されています。これらのモデルの検証には、この CFD ソリューションで用いたメッシュの収束性解析と、流線及び粒子追跡に適用するための最適な時間刻み及び粒子濃度の解析も含まれています。この段階で私たちは、ミキサー内の非常に細い流れを解くために必要な流線が相当な数に上ることに気づきました。また、粒子トレーシングモジュールを用

図 2. スタティックミキサーの流体ジオメトリと注入条件

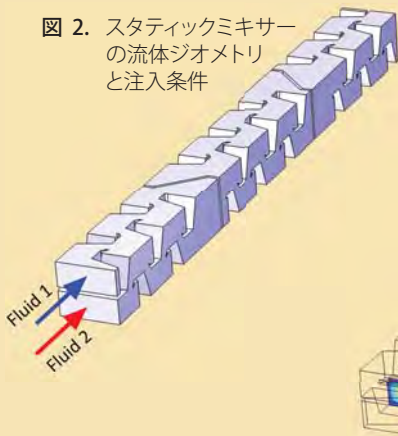


図 3. ミキサーのさまざまな断面における速度等高線

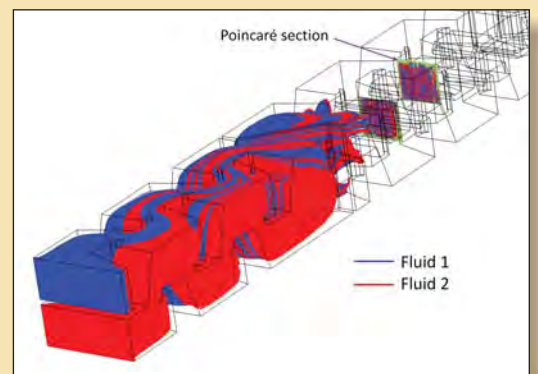
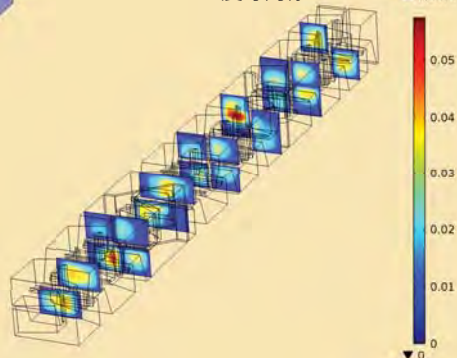


図 4. 粒子追跡の中間時点での結果。良質の混合が発生し始めている、ポアンカレ断面も示されている。



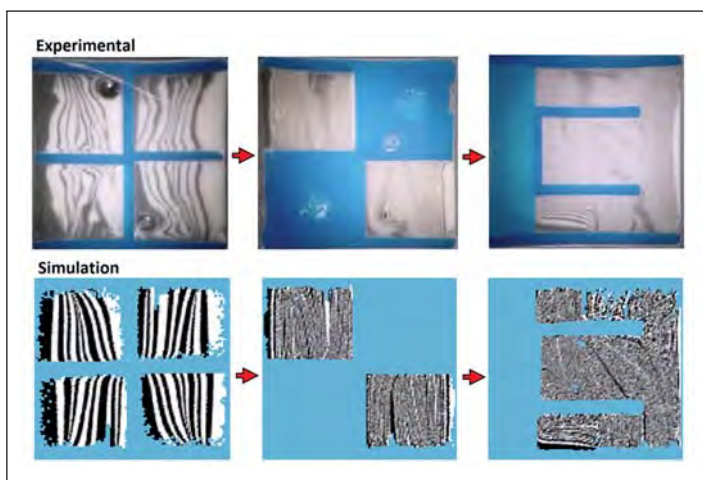


図 5. ミキサー前半部分の三つの断面における、実験データと混合の数値予測の比較。

いと、粒子追跡に必要な計算時間が明らかに短縮されることも分かりました。

流線データ及び粒子追跡データは、COMSOL からエクスポートし、二つの基準で混合品質を割り出す新に開発された独自アルゴリズムに用います。基準の一つは CoV (変量係数) という定量値であり、1 が混合なし、0 が完全な混合を意味します。ここでの「完全な混合」は、ユーザーが設定する尺度 [length scale] との比較で判定されます。二つ目の基準は、ポアンカレ断面に類似した、ミキサーの連続断面図です (図 4)。これらの断面図は、全体的な CoV 解析では明確に知ることのできない、一つの材料の局所での細かい流れを確認するのに役立ちます。また、混合の画像を集め重ね合わせて動画化することができます。

### 信頼できるシミュレーション結果

このモデリングツールを検証するため、私たちはシミュレーションの結果と、Nordson EFD 社による二つのエポキシ樹脂材料 (白色の化合物と黒色の化合物) を使った目的設定 [targeted] 混合実験の結果との比較を行いました。二つの材料は混合すると固体化します。固体化ののち、ミキサーは約 40 の断面に薄く切り分けられ、混合品質の視覚的評価が行われました。

Veryst 社では、流線データと粒子追跡データを用いて、実験結果との比較が可能な断面画像を生成しました。ミキサーの断面図は均等サイズのセルに分けられ、各セルはそのセルを横切る流線又は粒子に応じて、四つの状

## 「実験結果とシミュレーション結果は全体的に極めてよく整合することが分かりました。」

態のどれかとなることとしました。四つの状態とは、(i) 材料 1 (黒で表示)、(ii) 材料 2 (白で表示)、(iii) 良好な混合 (グレーで表示)、(iv) データなし、です。流れのない区域や環流区域にあるセルは、データなしの状態になります [cells receive no

data]。データの無い区域の数を減らすため、ミキサーの (開始部分だけでなく) さまざまな部位が開始点となる粒子追跡の軌跡を生成します。

図 5 は、また別の Nordson EFD 社製ミキサーに関する、ミキサー前半部分の三つの断面における実験データと数値予測の比較です。実験データで青くなっている部分は混合エレメントです。実験での黒と白のエポキシ樹脂の流入角度は、混合エレメントに到達する前の隔離が不十分であったため微妙に異なり、シミュレーションでも同様としました。これはミキサー内のさまざまな断面における黒と白のエポキシ樹脂の分布に影響を及ぼします。しかし、液体の流入角度が混合品質に及

ぼす影響は重要ではないことが知られています。混合が起こらない領域や液体の細かい流れの確認において、実験結果とシミュレーション結果は全体的に極めてよく整合することが分かりました。

### ミキサーの最適設計

CFD シミュレーション、粒子追跡、そしてデータプロセス用アルゴリズムは、ミキサー内での流れのパターンを、単に実験のみによる理解を超えて知るために価値のあるツールです。このツールは、Nordson EFD 社で製造するミキサーの最適設計に役立っています。Veryst Engineering 社と Nordson EFD 社は、開発したツールをさらに改良し、また、他のミキサーのジオメトリ、性質が大きく異なる液体の混合、非ニュートン流体混合に応用するため、協同を続けています。

## 会社案内

### Veryst Engineering, LLC

Veryst Engineering 社は、テクノロジーと製造の接点における高品質なエンジニアリングサービス及びコンサルティングサービスを提供しています。当社は「知識的基盤によるエンジニアリング (Engineering Through the Fundamentals)」をミッションとし、実用的かつ有用な結果を導き出すために、力学、物理学、製造法、計算処理の堅固な知識的基盤を活用しています。当社のコンサルタントは、教師の経験から精力的な著作物発表、産業界での経験、研究まで、多岐にわたる経歴を有しています。Veryst Engineering 社は COMSOL 公認コンサルタント (COMSOL Certified Consultant) です。

### Nordson EFD

Nordson EFD 社は、接着剤、封止剤、潤滑剤など、ほぼすべての製造工程で用いられるアセンブリー用液剤を正確に一定の量で供給する精密システムの製造において、世界をリードしています。スタティックミキサーのほか、Nordson EFD 社の 2K 製品ラインにはパッケージングシステムや、エポキシ剤、ウレタン剤、シリコン剤、アクリル剤などの反応性 2 液接着剤・封止剤用計量混合バルブなどが揃っています。Nordson EFD 社の製品は、30ヶ国以上で展開される販売網を通じてご購入いただけます。



KaiKo Photo 2016

## 潜水艦：腐食を防止するのか、それとも敵に探知されるか？

コーティングを施された船体、プロペラが誘発する変調、潜水艦の水中の電位のシグネチャ（痕跡）の間の電気化学相互作用の数値分析は、ステルス性の安全を最適化するために用いられます。

執筆者：JENNIFER HAND 氏

**海** 水表面下を慎重に航行する能力は、潜水艦に求められる基本的な要素です。そうしなければ、発見される可能性があり、敵と対峙する状況では、海底機雷の作動リスクが非常に高くなります。

従って、多くの研究は、潜水艦などが水面下を航行しているときに、不可壁的に発生する信号の研究に重点的に取り組んできました。これらの信号には、音や磁気の「シグネチャ」が含まれ、最新鋭の探査装置には、特に優れた磁気および音響センサーが

組み込まれています。これに対して潜水艦は、その音源を探知されないように、消音化に多くの努力がなされています。ニッケル合金オーステナイト系ステンレス鋼のような非磁性材料の戦略的な利用により、磁気シグネチャを減らすことができます。

対照的に、腐食作用や腐食防止システムによって作られる水中電位 (UEP: Under Water Potential) シグネチャは、これまで余り注目されてきませんでした。

しかし、UEP センサーを持つ機雷は、既

に標準生産されており、未来の機雷は、この電場をますます利用することになるとの認識が高まっています。このため、ドイツの船舶および海軍兵器技術センター (WTD71) では、Duisburg-Essen 大学の一般理論電気エンジニアリング (ATE: Theoretical Electrical Engineering) 研究所に委託して、潜水艦から発生する UEP シグネチャに関する研究に着手しています。

### 電位および電流密度の分布

大学チームの1人のメンバーとして、エンジニアリングの学位を持つ David Schaefer 氏は、この研究がどのように開始されたかについて次のように説明します。「腐食プロセスや加電流陰極防食 (ICCP; impressed current cathodic protection) システムは、金属部品の腐食を防ぐことを目的とするものですが、これは船体の周囲に電場を持つ電流密度分布をつくりだします。UEPシグネチャは、この原因で生じます。この電場は、海水の伝導率や潜水艦の設計で使用されるさまざまな金属など、環境の条件によって変化します。」船体の UEPシグネチャは、通常、平面上もしくは直線上の電場の値によって決定します (図1)。

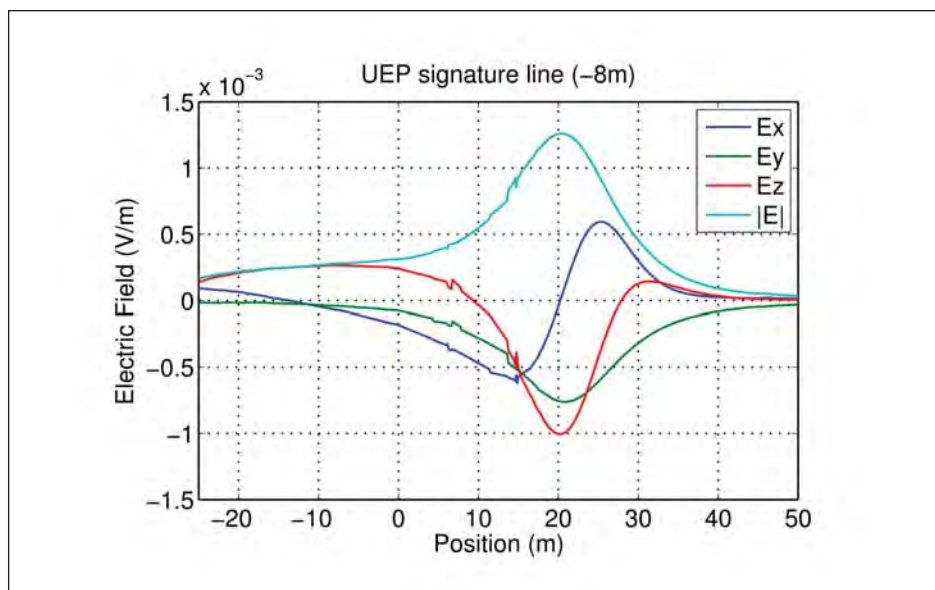


図1. COMSOL Multiphysics でシミュレーションされた単純な潜水艦モデルの直下に置かれた (キールの下8メートル) UEPシグネチャの軸トレース

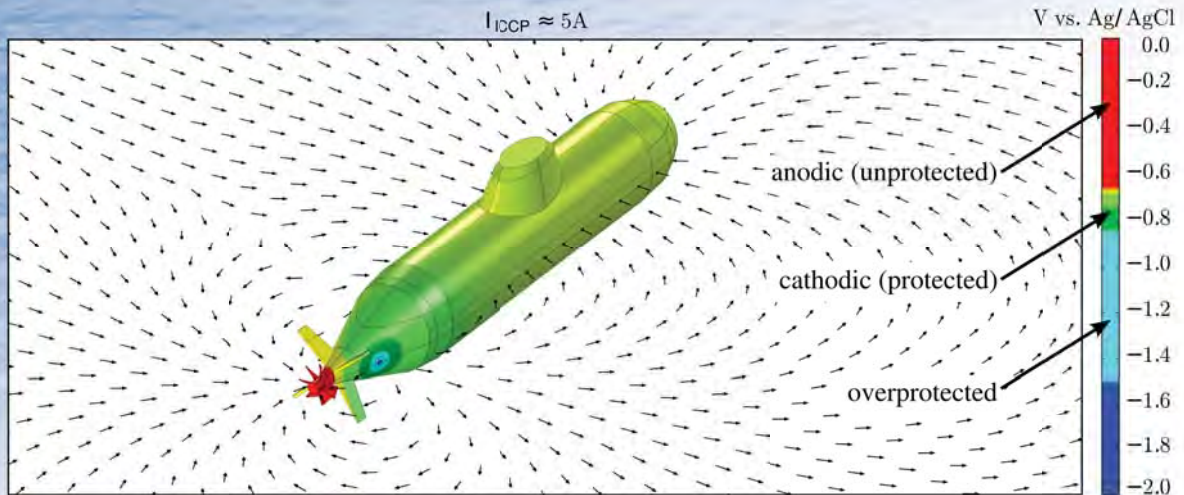


図 2. カソード防食が施されているときの電位分布。矢印は電場の方向を表します。通常の運行条件の下での ICCP 電流は、船全体にわたりカソード状態 ( 緑色 ) を確保するために少し高い値 ( 約  $I_{ICCP}=8A$  ) になると考えられます。このカラーマップはドイツ海軍指令 VG81259 に基づきます。

このチームは、潜水艦全体の腐食に起因する電気化学反応を検討しました。これらは、非線形分極曲線を使ってシミュレーションされ、電解質の中でわずかな電位を生じる電流密度の量を示します。

このチームでは、非全単射作用として分極曲線を指定しなければなりません。なぜならば、このことにより、電気化学的不動態を検討することが可能になったからです。

ドイツの潜水艦の船体に使われているステンレス鋼は、通常、船体表面に酸化層を形成することによって、腐食を防止しま

す。分極曲線における、いわゆる「不動態」は、アノード電位の電流密度の減少によって確認されます。しかし、好ましくない状態、すなわちギャップでの高い酸素勾配の下では、保護層が形成されず、この材料は直ぐに腐食します。このように、「ステンレス」という言葉は、誤解を招く恐れがあります。何故なら、この材料は、腐食に対して完全に強いわけではないので、それゆえに、保護されなければなりません。この理由のため、パトラー・フォルマー式あるいはターフェル式のような共通の近似法によって、電極反応速度論を説明することは不可能でした。

最初のモデル ( 図 2 ) に示すように、このチームは、潜水艦の船体上の電位分布のシミュレーションを行いました。これは、材料が腐食に対して保護されているかどうかを示すものでした。「この ICCP システムは、船体表面をカソード作用点にするもので、図 2 の緑色で図示しています」と Schaefer 氏は述べています。

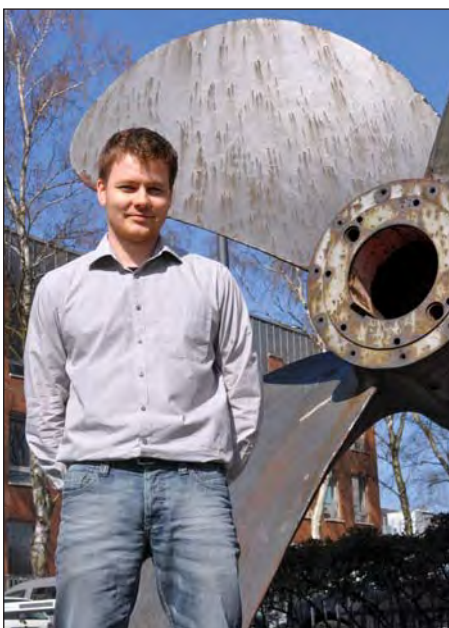
#### 電氣的シグネチャの計算

様々な ICCP の設定のために、船体上の電位分布を規定し、その次のステップで関連する UPE シグネチャを決定します。

「COMSOL で電位分布をシミュレーションするとすぐに、関連した水中の電場を直接求めることができ、対応する UEP シグネチャを知ることができました」と Schaefer 氏は述べました。

**「COMSOL で電位分布をシミュレーションするとすぐに、関連した水中の電場を直接求めることができ、対応する UEP シグネチャを知ることができました。」**

1 つの課題は、回転するプロペラのブレードから生じる移動境界問題でした。プロペラの回転角度は、パラメトリックスweepとして連続的に増加するので、潜水艦のキール下のさまざまな深さにおける最大値電場が求められ、描画で示されました。図 3 は、プロペラブレードの先端の高磁場がどのように電気の近距離場を変調させるかを示しています。この近距離場は、磁場を計測するプロペラから、さらに遠く離れるようになると、急速に減衰します。



腐食したプロペラの前で、エンジニアリングの学位を持つ David Schaefer 氏

ディリクレ境界条件

非線形分極曲線

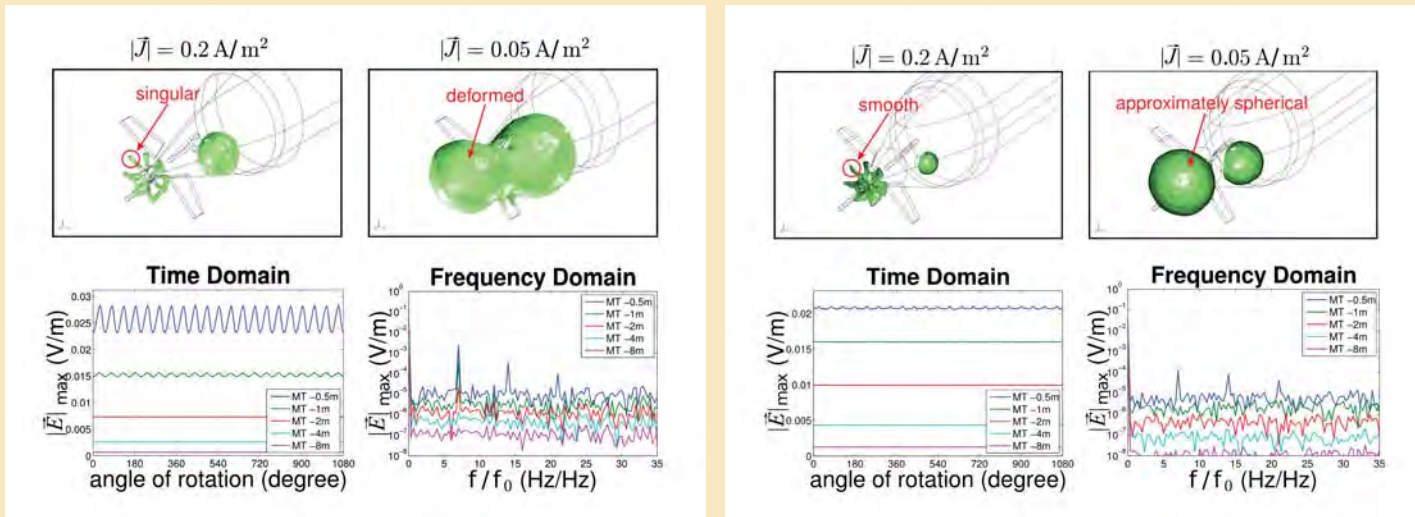


図3. プロペラ回転中の近距離場変調のシミュレーション。ディリクレ境界条件 (左) の簡単な想定では、非線形分極曲線 (右) を用いた境界での電気化学反応の結果よりも、はるかに多くの変調を引き起こします。

原理上どのように電気化学反応が、近距離場の変調に影響を及ぼすかを描き出すために、このチームは、ディリクレ境界条件を用いてシミュレーションを実行しました (図3 左)。

Schaefer 氏によれば、「このスムージング効果は、電子伝導体 (金属) とイオン伝導体 (海水) の間の相互作用における『分極抵抗』の結果である」といいます。また、「この分極抵抗は、急速に、この高い電流

特に、この傾向は、船体に過剰な保護が施されている場合に顕著となります。これは必要以上にカソード化されていることを意味します。従って、ICCP システムがスイッチオフ状態の場合には、UEP シグネチャは、余り強くはないことが明らかに推測されます。

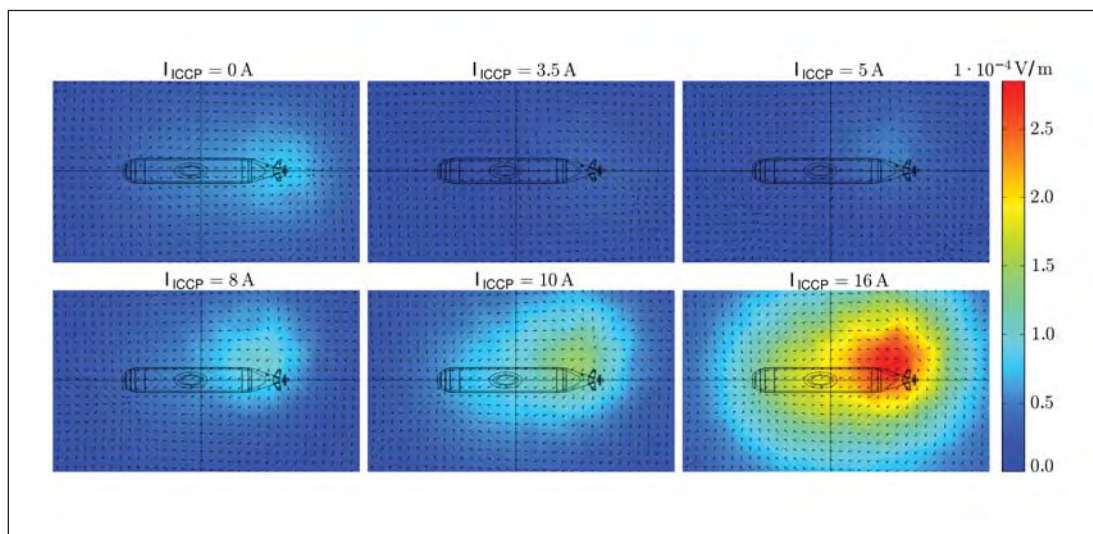


図4. 1キールの下、深さ20メートル (60フィート) における、ICCP システムが出力した様々な電流による電場シグネチャレベル。ICCP の電源が入っていないとき (左上) のシグネチャは、はっきり分かり、3.5 アンペア (中央上) で最適となります。他方で、過剰保護は、大きな UEP シグネチャ (ICCP=16A) をもたらします。

ここでは、電気化学反応は完全に無視される。図3のシミュレーション結果の等値面プロットの比較は、どのように、電気化学反応が、鋭角な電場のピークをなだらかにすることによって、この変調を減らすことができるかをイラスト図で表示しています。

と反対に作用するので、この結果、周囲の水中の電界強度を弱めます。」

#### ICCP の最適な設定

実際の経験では、このシグネチャは、大出力の ICCP 電流でより顕著となります。

図4は、驚いたことに、スイッチオフモード ( $I_{ICCP}=0A$ ) でも、通常の稼働条件 ( $I_{ICCP}=8A$ ) でも、ともに UEP シグネチャの最適化をもたらすものではないことを示しています。その代わりに、最も小さな電場強度は、2つの設定値の間 ( $I_{ICCP}=3.5A$ ) で現れる。この数値はまた、過剰保護が極めて高い場合に、極めて高いシグネチャ ( $I_{ICCP}=16A$ ) となるとの仮説をも確認できます。

「明らかに腐食防止と UEP シグネチャの間に達成されるべきバランスが存在します。特にステルス状態の中では、ICCP の設定変更の結果を理解することが必須となります。さらに、私たちは、ICCP を最適化して、UEP シグネチャを減らすことが可能であることも示してきました。」と Schaefer 氏は結論として述べています。



# MEMS ベースの細菌検出器開発、マルチフィジックスシミュレーションにより迅速で低価格に

2011年「Create the Future Design Contest」での優勝作品は、食品媒介性感染症を削減することを目的とした製品です。

執筆者 TECH BRIEFS メディア グループ 寄稿編集者, GARY DAGASTINE 氏

**食**品媒介性大腸菌やサルモネラ菌によって、年間何千もの感染症が起こっています。それにより、人や動物が死に至り、経済的損害も計り知れません。

歴史上最悪の大腸菌感染症の発生は、昨年夏の夏にドイツを中心に発生し、12カ国以上の国々に被害をもたらし、死者50人、そして4000人以上もの人々が感染症の症状を起こし、数億ユーロにも上る経済的損害をもたらしました。

より精巧で低価格な細菌検出技術があれば、このような発生、被害は避けることが可能でした。一般的に使用されている寒天平板法は、検出までに通常24～48時間ほどかかりかかります。それは、細菌が検出可能コロニーになるまでには、通常そのくらいの時間が必要になるからです。しかしながら、食品は配送され、新鮮な状態で販売されなくてはならないため、その時間は産業界利用としては、あまりにもかかりすぎです。

新たな代替手段ではその時間を短縮することができます。ポリメラーゼ連鎖反応(PCR)試験では、検査はわずか3時間で終了することができましたが、試験あたり50ドルもの費用がかかってしまいました。常用としては、高コストです。

一方で、標準検出器や蛍光イメージング技術では、単独の細菌を検出可能ですが、特殊なラボや独特な手順が必要になる他、価格もより高いものになります。

**「 $\alpha$  スクリーン技術は、発展途上国における伝染病削減のために大きな可能性を秘めています。これらの国々では、資源不足でヘルス・ケアをまかなうことができません。」**

幸運にも、マルチフィジックスシミュレーションソフトウェアサポートと共に開発を進めてきたMEMS(マイクロエレクトロメカニカルシステム)ベースの解決策は、問題解決の糸口となり得ます。現在進行中のプロトタイプ試験での $\alpha$ スクリーン技術は、血液から細菌を分解する新しい方法と細菌を検知す

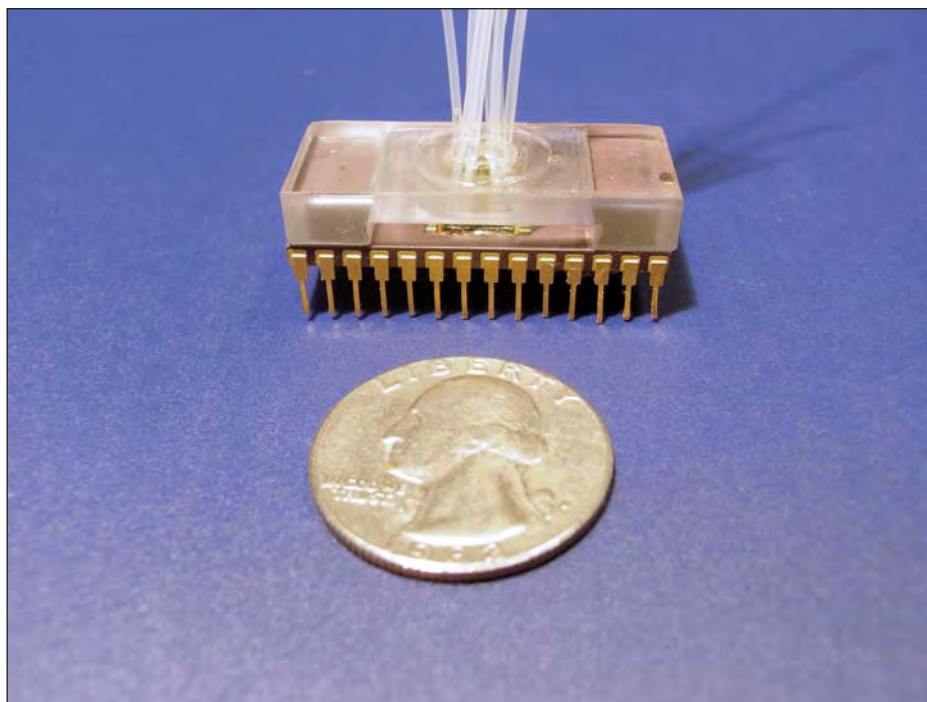


図1.  $\alpha$ スクリーンバクテリア検知システムのプロトタイプ アメリカ25セントコインとの比較

るためのナノスケールセンサーを組み合わせたものです。コインサイズで低価格、使用方法も簡単で、そして使い捨てというこの装置が確証することは、その装置が迅速で正確な細菌検出器だということです。(図1)

この $\alpha$ スクリーンは、有名な2011年度「Create the Future Design Contest」2011

及びTech Briefs Media Groupでした。

$\alpha$ スクリーンは、エール大学、電気工学博士候補のMonika Weber氏及び、Mark Reed博士のナノテクノロジーグループ内で彼女が率いるグループが開発しました。グランド受賞者としてWeber氏は賞金\$20,000を獲得し、それをプロトタイプ開発の支援金として、エール大学へ寄付しました。

Weber氏は、「 $\alpha$ スクリーン技術は、発展途上国における伝染病削減のために大きな可能性を秘めています。これらの国々では、資源不足でヘルス・ケアをまかなうことができません。世界全死亡者数の4%は、細菌が原因の下痢によるものです。迅速で低コストの技術として、 $\alpha$ スクリーンは危機的な世界問題解決への手助けをすることが出来るでしょう。最終目標は、何百とある多種の細菌性疾患を検知することです。」と語ります。

年の優勝作品でもあります。技術革新の奨励や活性化支援のために「NASA Tech Briefs」雑誌の出版社により、2002年にスタートしたこの年行事は、世界中のエンジニア、実業家、そして学生達から7,000点にも及ぶ製品設計アイデアの応募があります。2011年度のコンテスト・メインスポンサーは、COMSOL, PTC,

2011年のCreate the Future Design Contestにて優勝したエール大学のデザインチーム（左から）チームリーダーのMonika Weber氏, Christopher Yerino氏, Hazael Montanaro氏, Kane Siu Lung Lo氏, Mark Reed教授

プロトタイプチーム  
Weber氏, Kara Brower氏(写真なし), Brian Goldstein氏, Phillip McCown氏, Mark Reed教授, Tarek Fahmyアドバイザー



### 使用方法

ナノスケール電界効果トランジスタ (FET) の出現は、液体内のプロテインや他のバイオマーカー解析の新たな方法を導き出しました。

理論的には、システムは設計可能です。特定ターゲットに近いものは FET のゲート電圧が警告します。その結果、ドレイン電流は変動し、ターゲットの存在を信号で伝えます。

しかし、ターゲットは血液のような高イオン液体に含まれているため、実際には、条件を満たした結果の到達は難しく、微量な FET の極低動作電流は、イオンチャージにより簡単に打ちのめされてしまいました。

「私達が開発しているものは、白と赤の血液細胞のような血液コンポーネントと細菌を

分解する方法です。電気双極子モーメントを作成するためのマイクロチャンバー内にある、特定の周波数を発生させるため非対称的に置かれた電極を用います。そして、誘電泳動力を使って、細菌をマイクロチャンネルの中へ移動させ、低イオン溶解の中へ細菌を沈め、濃縮という次のステップのために、トランスポートします」とWeber氏は語ります。

「続いて、装置の検出部分です。細菌選択性と細菌特異性用の細菌 - 特定抗体が備わった FET センサーが機能し、存在する全て、いかなるターゲットでも検出可能です。これらのトランジスタは、アクティブチャンネルのようにナノワイヤを用い、標準的で低コストのセミコンダクタ産業 CMOS 製造技術を用いられて

作成されます。」とWeber氏は説明します。

αスクリーンの全体的な細菌分離部分は、2010年後半から2011年前半にかけて COMSOL Multiphysics を使用してモデリングを行いました。(図2)

一方で、検出部分用のサブコンポーネントはプロトタイプで、現在試験中です。

この装置は、コインほどの大きさで、1テストあたりのコストはわずか\$1です。

「COMSOL 無しでは、このような素晴らしい設計に到達することはなかったでしょう。またテストを実践するにも何年もの月日を要し、それを更に最適化することにも数週間以上必要だったでしょう。」とWeber氏は説明します。「私達はサンプル注入から検出までの全ての過程が含まれた全てのフィジックスをシミュレートしました。全ての力学、全軌跡、とにかく全てが含まれています。」とWeber氏は続けます。

「そして今、私達は COMSOL の最新版を入手し、CAD 相互運用機能を備えた LiveLink™ の使用をととても楽しみにしています。Reed 博士の研究所は、技術計算リソースを拡大しました。これらのオプションが私達の生活に影響を及ぼす事、それは、COMSOL がその環境への浸透をより一層強固なものにするということです。」とWeber氏は語ります。

### 商業化計画

「私達はこの技術の商業化を決定しました。そしてその最初のステップとして、この装置開発をターゲットとし、発展途上国における感染症予防用として、ファンドエージェンシーからの助成金申請書を提出しました。」Weber氏は続けます。

「この装置は、発展途上の国々で診断方法に大革命を起こすという、大きな可能性を秘めていると私達は信じています。そして、私達はそれを実現させると誓います。」とWeber氏は語りました。

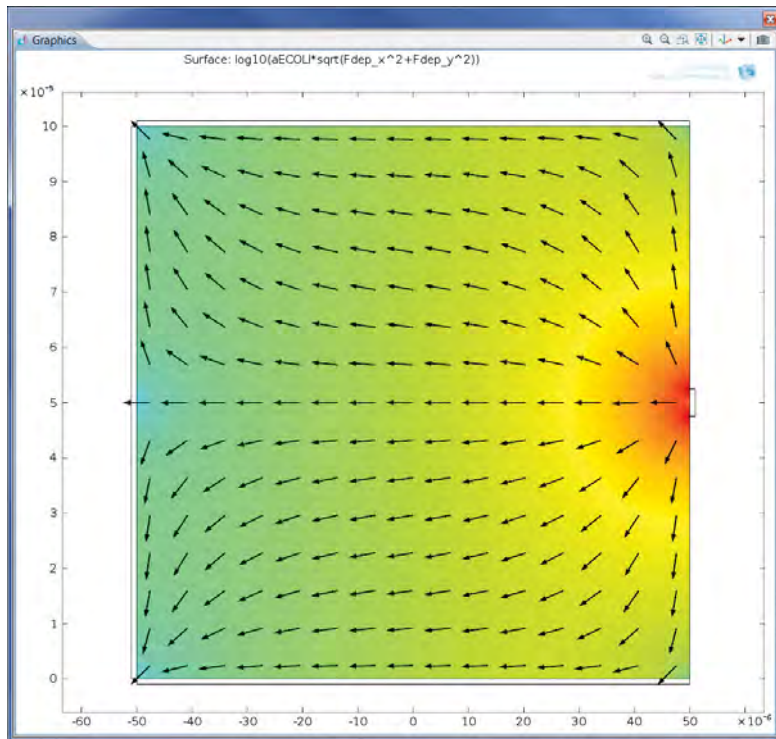


図2. マイクロチャンネル内、病原性大腸菌の誘電泳動力の COMSOL の粒子追跡シミュレーション



# 表面プラズモン共鳴

AltaSim Technologies社、Sergei Yushanov氏、Jeffrey S. Crompton氏(連絡先著者)、  
Luke T. Gritter氏、Kyle C. Koppenhoefer氏による寄稿

**表**面プラズモンとは境界面での電子の集団的な振動であり、誘電関数の実数部の符号が変化する境界面であればあらゆる物質間境界面でみられます。表面プラズモン共鳴 (SPR) は表面における分子吸着の検出に利用できるため、遺伝子分析やDNA検出から、表面での分子の吸着・脱着、表面制御による電解反応、ナノオーダーの光学デバイスやフォトニックデバイスまで、幅広い技術分野で重要な役割を果たしています。

SPR技術は、表面に数十ナノメートル透過する入射光の電磁界成分に基づいています。

励起された価電子の共鳴振動は反射光の強度を減少させ、エバネッセント波と表面プラズモンの間での共鳴エネルギーの転移によりSPRが発生します。共鳴条件は表面に吸着する物質の種類や量の影響を受けるため、表面に関連付けた現象の特徴付けが可能です。

## SPRのモデル

プラズモン励起には二つの典型的な配置があります。一つはKretschmann-Raether配置と呼ばれ、薄い金属膜が誘電体と空気に挟まれており入射波は誘電体側から透過します。もう一つはOtto配置と呼ばれ、誘電体と金属の間に空気の間隙があります。どちらの配置においても、表面プラズモンは金属と誘導体との境界面に沿って伝播します。Kretschmann-Raether配置はより簡便に作製できるものの、固定の誘電ギャップにより測定精度に影響がでる可能性があります。

## 磁場のシミュレーション

SPRの電磁場への影響を見極めるため、これら二つのSPRの配置のCOMSOL Multiphysicsを使った分析が進められています。共鳴角は、実験に用いた配置、及び金属表面に隣接する物質の誘電率のどちらにも敏感に応答していました。このような分析アプローチにより、さまざまな表面や実験的配置がSPR反応に与える影響が明らかになり、表面汚染物質の測定やナノスケールのフォトニックデバイスに必要な商業用技術が開発されているのです。



AltaSim Technologies社のPrincipal、  
Jeffrey Crompton氏とKyle Koppenhoefer氏。

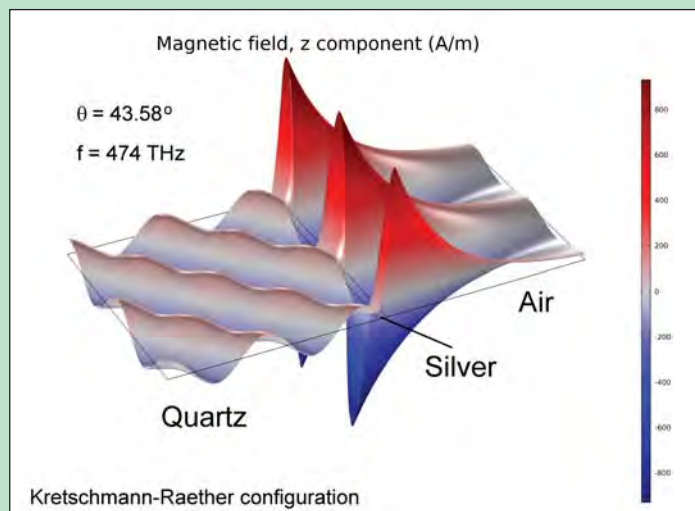


図 1. Kretschmann-Raether配置の共鳴条件における磁場分布

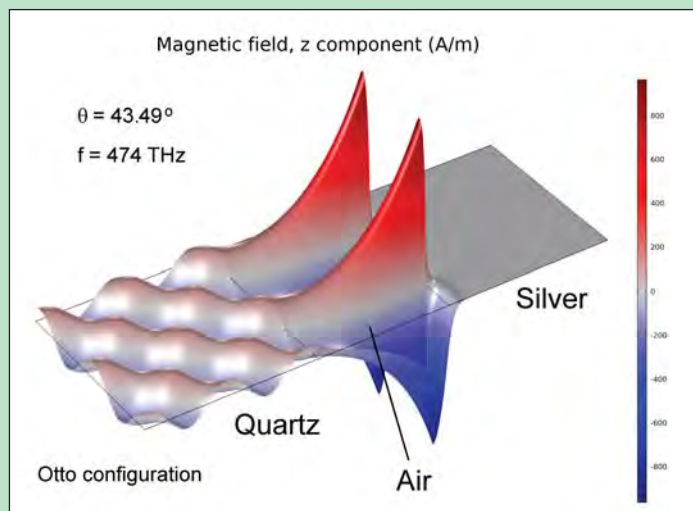
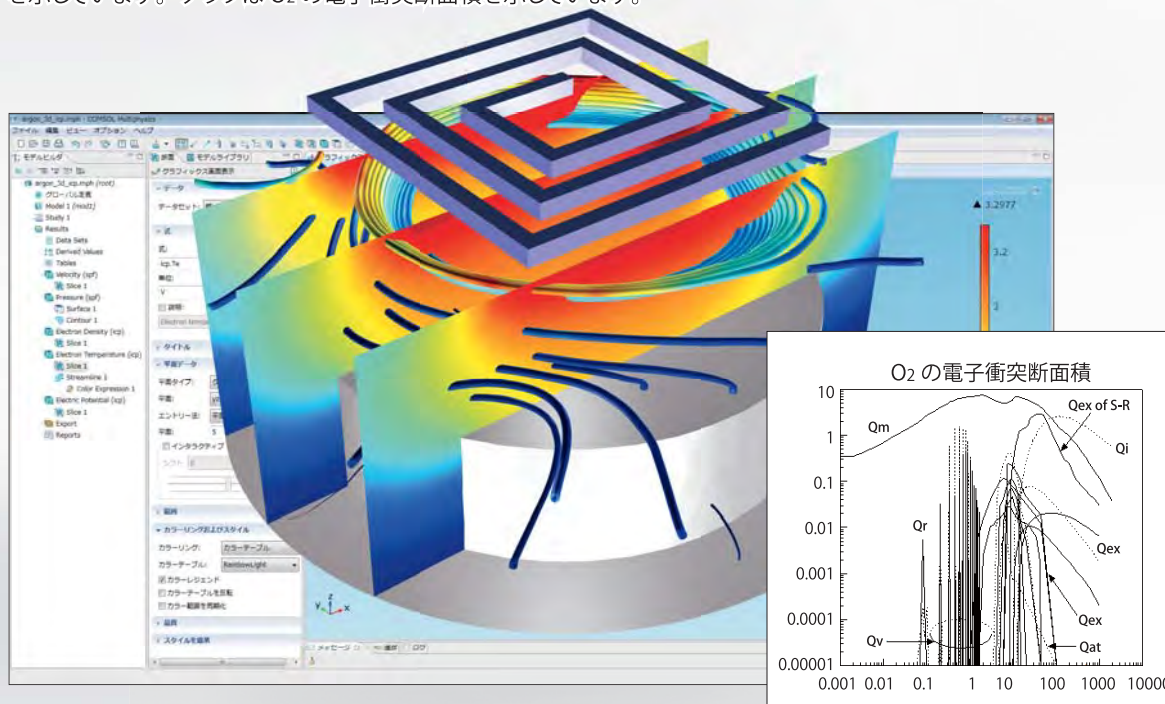


図 2. Otto配置の共鳴条件における磁場分布

### 非対称 ICP 反応器の 3D モデル

この図は、電子エネルギー(断面)と磁気ベクトルポテンシャル(流線)を示しています。グラフは  $O_2$  の電子衝突断面積を示しています。



## ～デザイン実現の進化論～

# COMSOL Multiphysics®

COMSOL Multiphysics®は、設計に影響する重要な現象を正確なシミュレーションで再現する手段を提供します。キーポイントは、現実の世界に存在するすべての物理現象を考慮できるマルチフィジックス機能です。まずはCOMSOL Multiphysics®の700種にもおよぶ実例をご覧いただける無料サンプルCDをご請求ください。

<http://www.kesco.co.jp/comsol/reqdoc.html>

#### Product Suite

##### COMSOL Multiphysics®

##### 汎用

最適化モジュール  
材料ライブラリ  
粒子トレーシングモジュール

##### 流体系

CFD モジュール  
マイクロfluidicsモジュール  
地下水流モジュール  
パイプ流れモジュール

##### 化学系

化学反応工学モジュール  
バッテリー & 燃料電池モジュール  
電気めっきモジュール  
腐食モジュール

##### 電気・電子・通信系

AC/DC モジュール  
RF モジュール  
MEMS モジュール  
プラズマモジュール

##### 機械系

伝熱モジュール  
構造力学モジュール  
非線形構造材料モジュール  
ジオメカニクスモジュール  
音響モジュール  
疲労モジュール

##### インターフェース

CAD インポートモジュール  
ECAD インポートモジュール  
File Import for CATIA® V5

LiveLink™ for SolidWorks®  
LiveLink™ for SpaceClaim®  
LiveLink™ for Pro/ENGINEER®  
LiveLink™ for Creo™ Parametric  
LiveLink™ for Inventor®  
LiveLink™ for AutoCAD®  
LiveLink™ for MATLAB®  
LiveLink™ for Microsoft Excel®  
LiveLink™ for Solid Edge®



<http://www.comsol.com>



計測エンジニアリングシステム株式会社

<http://www.kesco.co.jp/comsol/>

Tel : 03-5282-7040 • Fax : 03-5282-0808