

COMSOL NEWS

A MULTIPHYSICS SIMULATION MAGAZINE

Multiphysics シミュレーションが 革新的メカトロニクスを促進

KOSTAL 社が開発

12 ページ

シミュレーションで
信頼性の高い、高性能
電圧切替器を
ABB 社
4 ページ

調理機器産業界へ大革命
Multiphysics と共に
Miele 社
8 ページ



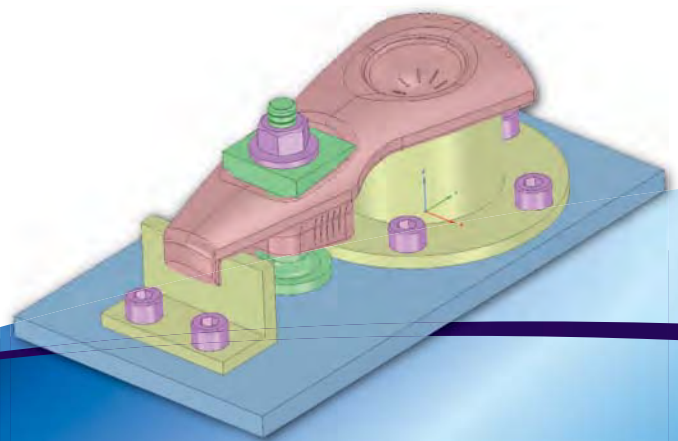
CADが仕事のジャマをしていないですか？

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

シンプルで効率的、
そして正確性。
全てを備える

Multiphysics アプローチ

今回の COMSOL New も例年通り、COMSOL Multiphysics ユーザーのみなさんから期待していること全てが掲載されています。エンジニアや研究者達が携わる幅広い分野での、最適化された設計や実証プロセスにおいて、シミュレーションがどれほど大きな力になっているのかを見聞きすると、私はただただ驚くばかりです。数多くの画期的なアイデアや製品の裏で、人々を魅了するコンセプトや革新的なソリューションのカギとなっているのが、Multiphysics シミュレーションなのです。

みなさんが COMSOL News を読み進めると、ABB 社のエンジニア達がどのようにして、経済的かつ高い信頼性を維持しながら、30 年以上にわたって 100 万回も運用可能な出鉄口切替器を設計できたのか、また、みなさんが自宅でホットケーキから自家製パスタを完璧に調理することが可能な、安全でかつエネルギー効率性の優れた Miele 社製 IH キッキングコンロを、Miele 社がどのように製造したのかを発見することができます。

Multiphysics アプローチのシミュレーションは、メカトロニクスに多大な貢献をしています。

衛星ナビゲーションシステムを使用する時や車の間接照明をつける時、みなさんは、KOSTAL 社により開発された次世代容量センサーに触れているかもしれません。

今年度の COMSOL News には、他にも電気、機械、流体、化学分野など数多くの素晴らしいユーザー例が多数紹介されています。このように大変熱心で知識豊富なユーザーの方たちと連携し合い、素晴らしい学習経験を得たことは大変光栄で、またモデリングとシミュレーションに関して彼らの意見と彼らの経験をご教示頂けたことに深く感謝の意を表します。

みなさんが、新しいコンセプトの研究、より優れた製品開発、もしくはそのプロセスの最適化など、いかなる業務に携わっていても、これらのストーリーを読むと multiphysics シミュレーションは必須で、COMSOL Multiphysics はより賢く仕事をこなす、賢い選択であるということをご理解頂けることと信じております。

それでは、お楽しみください。



Valerio Marra 氏
Technical Marketing Manager
COMSOL, Inc.

日本語版へのご意見は下記へご連絡下さい。
また、日本のユーザー様から COMSOL News 日本語版へのご投稿もお待ちしております。

【スウェーデン COMSOL AB / 米国 COMSOL, Inc. 日本総代理店】
計測エンジニアリングシステム株式会社 COMSOL News 日本語版係
〒101-0047 東京都千代田区内神田 1-9-5 井門内神田ビル 5 階
Tel: 03-5282-7040 / Fax: 03-5282-0808
E-mail: comsol@kesco.co.jp
HP: <http://www.kesco.co.jp/comsol/>

CONTENTS

- 4 高圧静電気学
誘電体の応力シミュレーションが、ABB社のスマートグリッド対応タップ切替器の設計を促進
- 8 誘導加熱
Miele 社、最適化された IH キッキングコンロ開発を Multiphysics シミュレーションで
- 12 センサーおよび無線電力伝送
スイッチングを簡単に
- 14 電気化学
血糖値検査紙のモデリング
- 16 マイクロ波化学
マイクロ波を利用した化学反応と有限要素法によるマイクロ波の可視化
- 18 医療エレクトロニクス
MRI で腫瘍の位置が確認できる癌治療
- 20 伝熱
実際の測定が不可能な時、Multiphysics がその答えを提供
- 26 電気流体力学
Silent Air Cooling : 温度管理の新たなアプローチ
- 28 マイクロ波フィルタ
スパイラル共振器フィルタの分析
- 30 レーザービーム溶接
磁石の力で強力レーザービーム溶接品質の向上
- 34 アンテナ
ステルスアンテナのパターン分析
- 37 地球環境科学
地下を流れる液体の動きを解明する Multiphysics シミュレーション
- 40 マイクロフルイディクス
直線および湾曲したマイクロフルイディクスチャンネルにおける慣性収束のモデリング
- 42 流体構造相互作用
ソナードームの振動分析
- 44 電池
高精度リチウムイオン電池シミュレーション
- 46 計測
温度計の校正の不確実性の原因解明
- 48 Guest Editorial
エンジニアリング分析 : 計算尺からアプリケーションまで



表紙

高級車種のルーフ・モジュールのダミー指と容量センサーとの静電気相互作用シミュレーション

COMSOL NEWS

COMSOL News へのみなさんのご意見をお待ちしております。
comsol@kesco.co.jp

© Copyright 2013 COMSOL. COMSOL News is published by COMSOL, Inc. and its associated companies. COMSOL, COMSOL Multiphysics, Capture the Concept, COMSOL Desktop, and LiveLink are either registered trademarks or trademarks of COMSOL AB. All other trademarks are the property of their respective owners, and COMSOL AB and its subsidiaries and products are not affiliated with, endorsed by, sponsored by, or supported by those trademark owners. For a list of such trademark owners, see <http://www.comsol.com/tm>

誘電体の応力シミュレーションは、 ABB社のスマートグリッド対応タップ切替器の 設計を促進します。

テネシー州アラモで開発されたABB社の新しい負荷時タップ切替器は、電力産業で最も高速で、厳密な装置です。強力なシミュレーション技術と正確な検査は、信頼性が高く、安全なタップ切替器を、より効率的に市場に提供することに役立っています。

Edward Brown 氏による寄稿

何故、電力制御が重要なのでしょうか？
どんな電力源であっても、出力電圧は、負荷電流の増加にともなって低下します。電子機器は、低出力源の場合には、この影響を補正することができます。しかしながら、数千ワットの電力の場合には、異なる種類の制御が必要になります。グリッドに供給される各種の電力源による電圧の大きな不一致は、安定性を損ないます。電気装置の正確な稼働性は電圧の安定性に左右されるため、電力消費者は、電圧の安定性を頼りにしています。エネルギー効率向上への需要が高まっているため、商用電源を制御する市場は拡大しています。変圧器は、信頼性とコスト効率の良い配電が重要な要素となっていますので、かなりのエンジニアリング努力が、これらのスマートグリッド用部品の製作に求められます。テネシー州アラモに拠点を置く変圧器部品専門メーカーであるABB社は、その高電圧試験研究室で、詳細な静電シミュレーションや設計検証を実施し、世界で最高速かつ正確なタップ切替器を開発しました。

タップ切替

超高電圧装置で使われる制御技術はタップ切替です。送電線の規模とコストを最小限に抑えるため、電圧は数百キロボルトにまで高められ、変電所変圧器で消費者が利用可能な電圧まで、電圧を下げます。出力電圧は、1次コイルと2次コイルの巻数の比と入力電圧に比例します。タップ切替器は、入力あるいは出力回路が連結されているポイントを切り替えることで、この比率を変化させます（これは、すなわち、1次コイルに対する2次コイルの比を変化させることです）。

ABB社は、1910年から、大量の電力を制



ABB社テネシー州アラモ施設に設置されている真空リアクタンス負荷時タップ切替器

御するためのタップ切替器を製造してきました。アラモを拠点とする ABB 社の研究開発技術主任の Bill Teising 氏は、最新技術を有する研究チームを率いて、この驚くべき装置をより新しいものにします。彼は、真空リアクタンス負荷時タップ切替器 (VRLTC™) について次のように述べています。「切替のコンセプトは古くから知られているものですが、この VRLTC の設計、操作、測定に採用されているメカトロニクスは斬新なものです。」

タップ切替器の内部構造

VRLTC は 3 つの主要な部品から構成されています。1 番目は実際のタップ切替部品 (スイッチおよび真空遮断機) です。2 番目は軍用定格仕様のデジタル・サーボモータ・ドライブ・システムで、切替部品を稼働させます。サーボ・ドライブ・システムを活用することによって、VRLTC は機械的な制動をかけることなく、毎秒 1 タップ切替を超えるスピードで稼働します。超高速のタップ切替を実現させることで、VRLTC は、緊急需要対応のために、すばやい電力調整を行います。3 番目の部品は、特許を持つタップ・ロジック・モニタリングシステム (TLMS™) と多重絶対位置検出器 (アブソリュートエンコーダー) です。TLMS では、タップ切替の全操作を制御 - 監視 - 管理します。多重絶対位置検出器は、TLMS に対して角度位置データを提供し、信頼性の低いカムスイッチを不要にします。タップ付き巻線を有する高電圧変圧器は、高電圧の絶縁と冷却を同時に行う変圧器油で満たされたタンクに納められています。VRLTC タップ切替器は、変圧器タンクに密着もしくはボルトで固定された、より小型のオイルが満たされたスチールタンクに格納されています。電極は形成エポキシ樹脂障壁ボードによって守られており、一方は変圧器タップに接続され、もう一方は切替装置に接続されています。

VRLTC の真空遮断機は負荷電流を遮断するために用いられ、次のタップ位置に移動す

「切替のコンセプトは古くから知られているものですが、この VRLTC の設計、操作、測定に採用されているメカトロニクスは斬新なものです。」

るための切替メカニズムが機能します。

従来型の負荷時タップ切替器では、真空遮断器がないために、切替は変圧器油の中で起こるアーク放電の原因になります。

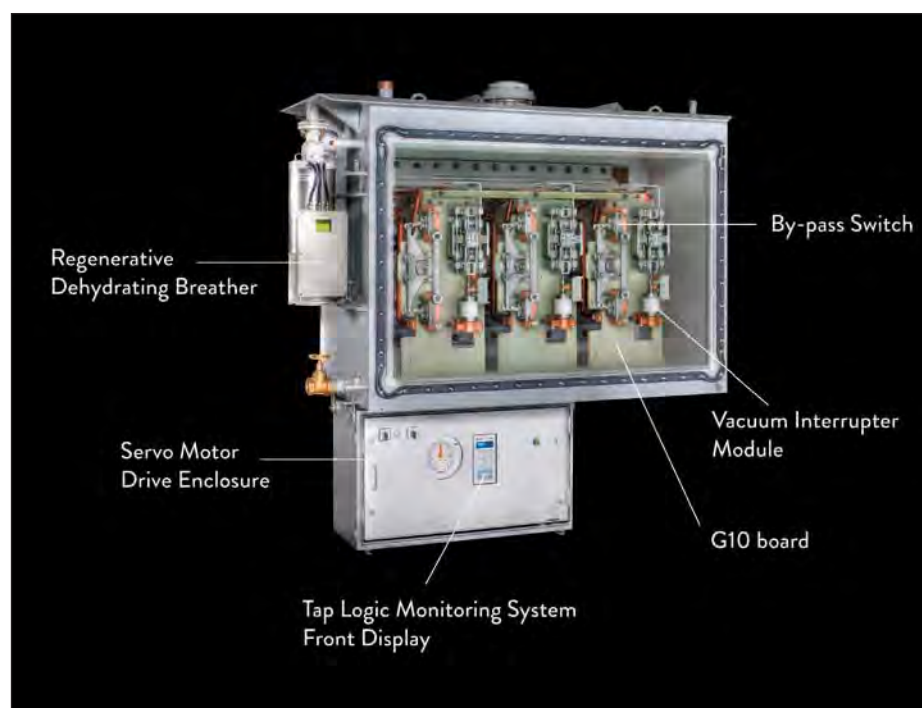


図 1: VRLTC の正面像。切替装置は G10 転換ボードの背後に装着されています。

アーク放電は副産物として、変圧器油を劣化させ、追加的なメンテナンスを必要とします。VRLTC では、アーク放電流は、真空遮断器内に封じ込められます。

この結果、VRLTC は、50 万タップ切替まで検査の必要がありません。VRLTC の正面は図表 1 に表示されています。

タップ切替器絶縁シミュレーション

最も重要な主要なイノベーションは、容易ではありません。結合する電極を保護するエポキシ樹脂障壁ボード、およびスイッチや真空遮断器を保護する G10 ガラスで強化されたエポキシ樹脂ラミネート加工ボード、これらは常に数千ボルトの電圧にさらされるからです。

これらの誘電材料は劣化してはなりません。すなわち、タップ切替器の耐用年数は、高電圧に耐える絶縁材料の性能に大きな影響を受けます。使用開始後、すぐには問題

「破断」または「衝撃破壊」、もう 1 つは絶縁体の正面にわたる破壊、つまり「クリープ破壊」です。表面の破壊は、長期間にわたって生じうるもので、トリーイングと呼ばれる現象をとめない、そこでは表面にそって痕跡の伸びが見られ、やがて絶縁破壊につながります。この種の破壊モードを防止するための設計は非常に難しく、従来の方法では、絶縁材料の厚さと部品の間隔の組み合わせで対処してきました。絶縁材料に関しては経験則に基づき、十分な厚さを確保することです。それでも、将来の作用を予測することは難しいものでした。高電圧設計でのより正確なアプローチは、絶縁部分の内部や表面にかかる電圧ストレスを計算するためにシミュレーションを利用することです。絶縁体と接触している導体の間の電位は、絶縁体材料の中に電場を作りだします (誘電)。この電場の強度は、どの位置でも、電圧差の大きさとその構造の形状に依存します。誘電材料には、それぞれ最大ストレスレベルがあり、このレベルを超えると、電流が流れてしまい、機能しなくなります。これを材料の絶縁耐力といいます。

VRLTC 設計チームは、Creo™ Parametric でこの形状のモデルを作成し、これを COMSOL Multiphysics に取り込むことで、誘電体にかかる応力問題に取り組みました。研究者たちは、電位と誘電特性を定義し、繰り返しシミュレーションを実行して、誘電を介して電力のパターンと大きさを表示することができました。このシミュレーション結果は、誘

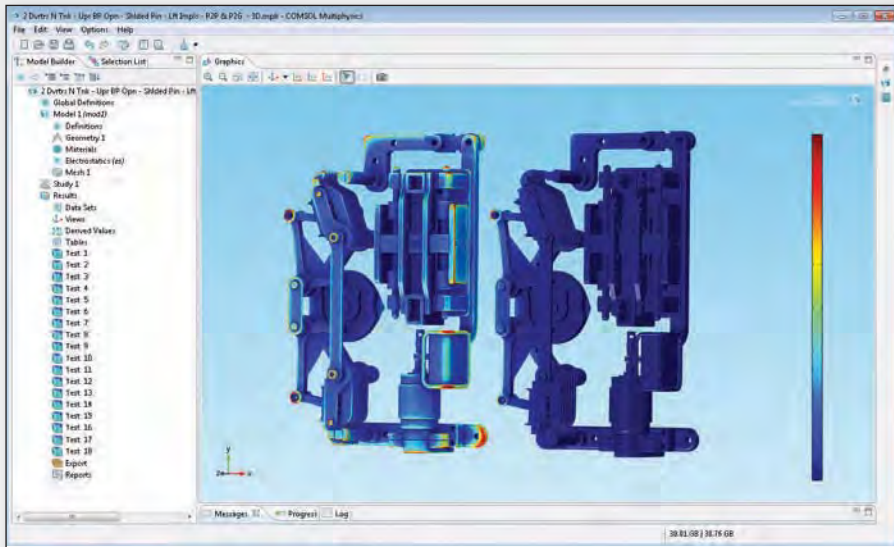


図 2: 2つの近接相にわたって電圧を加えたときの、バイパス・スイッチ（開放位置で表示）および真空遮断器部品の COMSOL Multiphysics を使った誘電体応力シミュレーション。右側の部品は接地されています。

電体応力評価データと比較することができました。このデータは、研究者たちが VRLTC の稼働寿命を正確に予測するために、タップ切替器を製造した長い経験からもたらされたものでした。膨大な CAD 部品—このケースでは 500 点以上—を用いることは、このチームにとって最初の難題となりました。どのように彼らは分析用の複雑な形状を得たのでしょうか？彼らが探していたツールは LiveLink for Creo™ Parametric の中にありました。その双方向リンクを通じて Creo™ Parametric の形状を、COMSOL の形状に同期させ、メッシュ生成へと、途切れることなく移行させることができました。このメッシュから得られた結果を検証した後、Creo™ Parametric に戻り、適切な変更を加えることができました。数回の双方向処理の後、高品質のメッシュに到達し、高性能ワークステーション上において大規模バッチ・シミュレーションを利用することができました。「分析のために、LiveLink for Creo™ Parametric を使用して、膨大な CAD 部品を絶え間なく COMSOL に取り込みます。これによってシミュレーションの設定時間は大幅に削減されました」と Teising 氏は述べています。COMSOL Multiphysics のタップ切替器のジオメトリでは、誘電体応力のシミュレーションに重点が置かれています（図表 2、3、4 参照）。ターミナルバックボード、シャフトドライブ・ベベルギア、タップセレクター、バイパス・スイッチ、真空遮断器など、多くの各種部品が研究されてきました。シミュレーションは、設計上の形状と部品の構成要素の間隔の重要性を裏付けるものです。「こうした大規模シミュレーションを実行することで、私たちは、素早く電場の大きさの形状変更の影響を 3次元空間でビジュアル化することができます」と Teising 氏は述べています。

「私たちは、潜在的な誘電体の故障レベルを確認するために、COMSOL Multiphysics で、テスト電圧を増加させた結果を得ることができます。」と Teising 氏は述べます。

「これらのシミュレーション結果は、ABB 社内の誘電体設計基準として、短期、長期的にわたる変形や穴の大きさが評価されます。スウェーデンのルードビカにある ABB 社の Tommy Larson 氏と誘電体の専門家チームは LTC 製品の安全性と信頼性の標準化のために設計基準を作成しました。

COMSOL は、ルードビカとアラモの設計チームをつなぐ共通のシミュレーションプラットフォームであり、全ての ABB 社の LTC 製品群にわたる基準に整合した共同作業を可能にしています。設計のジオメトリは、COMSOL

Without G10 Modifications



With G10 Modifications

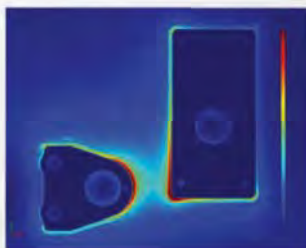
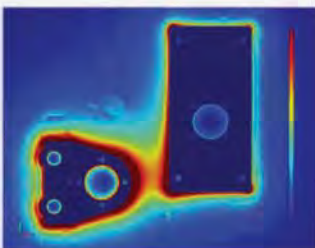


図 3: 切替部品用の取り付け板のある G10 ボードの誘電体応力シミュレーション。タップ切替中に取り付け板の間が高電圧になっています。このシミュレーションのプロットは、G10 ボードの形状の変更を伴う結果と変更を伴わない結果を示しています。これらの変更によって、右側のシミュレーションに示すように、ボード上の誘電体応力が大幅に減少しています。

※ Creo は PTC 社の登録商標です。

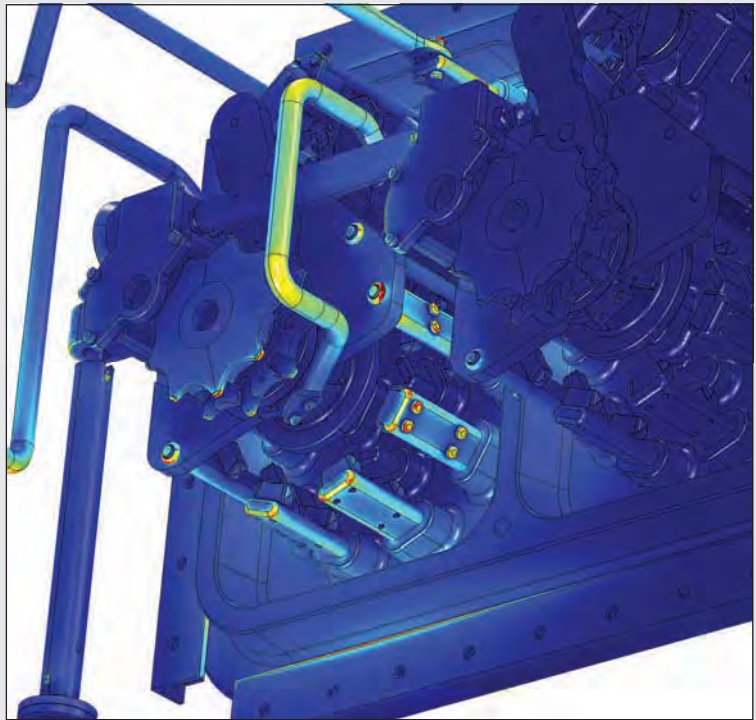
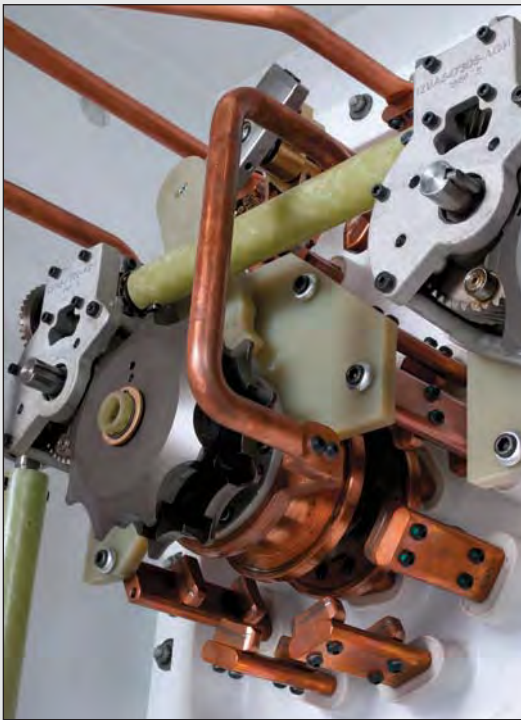


図 4: 上の写真は切替部品を示しています。この視覚化したものは、2つの近接相にわたって電圧を加えたときの切替装置の誘電体応力シミュレーションを示しています。

の結果が ABB 社の設計基準を満たす、あるいは超えるまで、繰り返し行われます。次に、設計の誘電体性能の上限を決定するための誘電性テストが高電圧実験室で実行されます。私たちは、1分間での 60 ヘルツの高電圧テスト - 実際の雷による衝撃とシミュレーションの結果を比較することができます。このデータの相互関係によって、COMSOL は、実験とは矛盾しない結果を提供していることを、私たちは確信しました。私たちは、製品の耐用年数を予想する際に、COMSOL の結果にたよることができるかと確信しています。」と Teising 氏は説明します。

成果

COMSOL のシミュレーションを使うことで、ABB 社の研究チームは、実際のフィールド条件を考慮した綿密な計算に基づくタップ切替器を開発することができました。このシミュレーションによって、研究チームは設計の最適化を実現し、この設備は経済的かつ安全に 30 年以上にわたり百万回の運用が可能です。



VRLTC タップ切替器設計チーム。左から Tommi Paananen 氏（設計エンジニア）、Daivid Geibel 氏（エンジニアリングマネジャー）、Bill Teisingd 氏（開発エンジニアリングスーパーバイザー）。Marten Almkvist 氏、Jon Brasher 氏、Josh Elder 氏、Bob Elick 氏、Chris Whitten 氏などの設計エンジニアたちはこの写真に写っていません。

Miele 社、最適化された IH キッキングコンロ開発を Multiphysics Simulation で。

10 年以上も昔であれば、キッチンコンロの好みを問われた料理長は、迷うことなくガスコンロを選択したことでしょう。しかしながら、家庭用及びプロのシェフ用のコンロを提供している Miele 社は、今日、従来のコンロとは全く別のより優れた IH キッキングヒーターを提供しています。

Alexandra Foley 氏による寄稿

IH キッキングヒーターは、その使用エネルギーの 90% 以上が直接食品調理に関与しており、大変高性能な調理器具として知られています。わずか 50% 程の効率であるガスコンロや電気コンロと比較すると、この数値は極めて素晴らしい数値です。もし従来のコンロより IH キッキングヒーターの方が、最適な効率を維持しつつ、よりの確でより速く調理が可能であれば、そのコンロは調理器具業界で格別な飛躍的進歩となり得るでしょう。

家庭用及び業務用調理器具の世界的リーダーである Miele 社にとって、そのような

IH キッキングヒーターを開発することは、まさに使命なのです。Miele 社と Cie. KG 社との共同研究所である mieletec FH Bielefeld の研究者たちとドイツの Applied Sciences Bielefeld 大学の研究者たちは、この IH キッキングヒーター開発にあたり、検証、実証、改善、そして最適化のためにシミュレーション及び multiphysics アプローチを活用しました。

Mieletec 社の共同創業者で、scientific director の Christian Schröder 氏は、Miele 社のモットーである「immer besser」に沿って、研究に直結したシミュレーションを使用

し、調理向け最適化コンロ開発を手掛けてきました。このドイツ語のモットーは「常により良いものを」という意味で、Miele 社はこのモットーを基に、長期的に使用可能で、機能的な素晴らしい商品を開発し続けてきました。Miele 社の Innovation Department 部長で、Mieletec 社の共同創業者及び scientific director である Holger Ernt 氏は、「mieletec 研究所開発商品に、大変満足しています」と語っています。「Mieletec 社は、従来のガスコンロよりもよりの確で、なおかつエネルギー効率が優れた商品を開発することができました。」

IH キッキングヒーター — 決して鍋から噴きこぼれない

「見つめる鍋は煮え立たない(待つ身は長い) このフレーズを作った人は、きっと一度も IH キッキングヒーターを使用したことがないのでしょう。お湯を沸かすのに、10 分から 15 分程かかるガスコンロや電気コンロと比べ、IH キッキングヒーターはわずか数分でお湯を沸かすことができます。これは、従来の過熱技術とは全く異なる、誘導加熱技術を使用することで実現することが出来ます。

IH キッキングヒーターは、コンロ表面にのっている鍋を加熱します。

これは、従来のガスや電気コンロと同じ機能のように聞こえますが、実は、全く異なるプロセスなのです。IH キッキングヒーターでは、コンロの表面を熱するのではなく、鍋自体を加熱します。(図 1 参照)「コンロ上に熱が広がるのではなく、鍋の中のみが熱せられて、IH コンロ表面は手で触っても大丈夫なほど温度は低いのです。」と Schröder 氏は説明します。「従来のコンロでは熱はレンジ表面全体に広がり、伝熱の仕組みを活用して鍋を熱しているのです。」

IH キッキングヒーターの原理は、誘導加



図 1 : 鍋の中の水は沸騰していますが、コンロの表面温度は高くなっていません。実際、コンロ上の氷はほとんど融けていません。

熱効果がベースになっています。最初に鍋はコンロ表面下にある銅コイルの上に置かれます。交流電流 (AC) が銅コイルを通り過ぎる時、鍋の金属の内部に電流を誘導する磁場を発生させます。渦電流と呼ばれるその誘導された電流は、ジュール加熱効果により鍋を熱します。その後、鍋の中身は最初に伝熱により、そして次に対流により熱せられます。

当初、IH クッキングヒーターは試行錯誤をしながら使う器具として開発されたものでした。その開発において研究者たちは、研究最初の周波数、コイルサイズ、出力数値を予測するにあたり、彼ら自身の経験を基に決めました。その結果は、最高のパフォーマンスが出るまで繰り返し変更し続け、この形が最終的なデザインになりました。しかしながら、このプロセスは費用と時間がかかると同時に、エンジニアたちにとって、システム内で何が起きているのか十分な情報がなく、またこのプロセスは本当に最適化されているのだろうかという疑問が残るものでした。

「シミュレーションでは、実際の実験では入手できない明確なデータを取得可能です。」と Schröder 氏は語ります。「シミュレーションを使用することで、コイル内や鍋の内側で何が起きているのか理解可能となり、最適化にとって必要な情報が明確になります。」

Schröder 氏と mieletec 研究所の研究チームは、COMSOL Multiphysics 及び Miele 社の CAD ジオメトリを使用して、コンロ開発上での最適条件にたどり着くことが出来ました。Schröder 氏は、「基本的に私たちはシステム全体をシミュレーションすることができ、コンロのエネルギー効率を改善することができました。」シミュレーションの正確性はとても高く、COMSOL Multiphysics で得た結果にて最適化可能となりました。その為、最初のプロトタイプが作成された時、それがどのように動作するのか、すでに明確でした。

設計チャレンジャーコンロ上で鍋が歌って、動く時

コイルで誘導された磁場により、設計上で大変興味深い課題が生まれました。「その中の最大の課題は、渦電流が鍋の中を流動している時に鍋が音を発するというものでした。」と Schröder 氏は説明します。「電流は、甲高いノイズを発生し、それを除去することは難解です。」そのノイズを除去する唯一の方法は、交流電流の周波数やコイルの形状

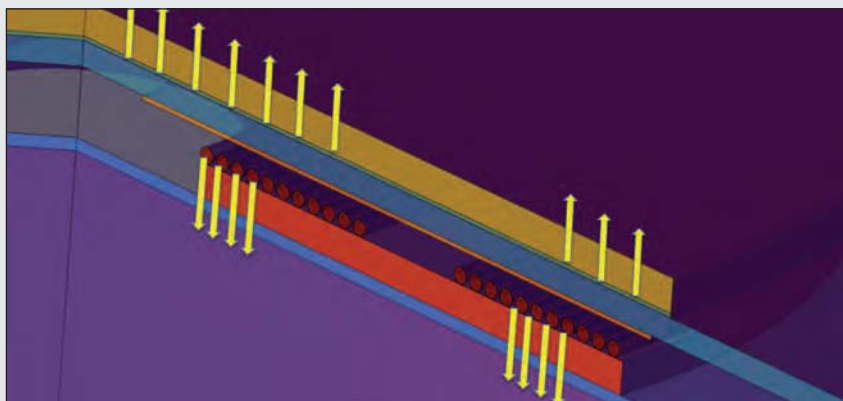


図 2 : IH クッキングヒーターと鍋のシミュレーションジオメトリ
重要な要素 (下から上): アルミニウム (青)、フェライト (赤)、巻き銅コイル (茶)、マイカ (オレンジ)、ガラス・セラミック (青緑)、メタル鍋 (深黄緑)、コンロ-鍋間の誘導システムにおけるローレンツ力も表示されている (黄色の矢印)



図 3 : テストキャンペーンの設定を行っている科学者スタッフ Werner Klose 氏 (左)、Mikhail Tolstykh 氏 (右) コンロの表面をはがした状態のため、コンロ内部の仕組みを確認することができます。

を調整することです。それにより、発生ノイズを人の耳がひろうことができる音よりも高音にすることが可能なのです。」

例えば、ドイツでは、一般家庭のコンセント差し込み口の電圧は、220V・50Hzが主流です。AC/ACコンバーターを利用し、コイル内の電流の周波数を調整して、鍋から発生するノイズが人間の耳では感知できない周波数まで増加させることができます。Schröder氏は、「シミュレーションを活用して、電流の周波数の動きを知り、ノイズを最小限に

低い周波数に変化し可聴範囲内の異なるノイズが発生してしまう可能性があるからです。(図2参照)

IHクッキングヒータープロセスは、COMSOL Multiphysicsを使用し、AC/DCモジュールと伝熱モジュールを組み合わせてシミュレーションしました。コンロと鍋の間に実際に何が起きているのか正確な情報を得るために、電磁気と同時に伝熱を解き、その測定稼働条件を最適化しました。「この時点において、これは全メーカーが直面してい

た磁場と相互的に作用しあいこの現象は起こります。もし磁場がお互いを消し合わなければ、力が生じてコンロのいたるところを鍋は動き回ってしまうでしょう。

Schröder氏は、「コンロのサイズ、形、そしてどのような素材が適しているのかを知る必要がありました。全ては材料科学に要約されます。」Schröder氏と彼のチーム(図3参照)は、シミュレーションを使用して、それぞれ異なる素材が、チームの設計、特に熱や磁場の動作に与える影響を研究し、さらに理解を深めることができました。この理解により、料理に最適な電力を提供しつつも鍋が静止するコイルの設計をすることができました。

「私たちは、多孔質媒体フローが含まれる自然対流伝熱シミュレーションとも連携しなくてはなりませんでした。真のマルチフィジックスです。」

抑えるコイルのデザインを構築することができるのです。」mieletec研究所は、周波数を30kHzまで増加し、コンロを最適化することに成功し、人間の耳ではノイズが殆ど聞こえない、静かなIHクッキングヒーターを完成させることができました。なぜ、殆ど聞こえない、という表現なのでしょう?それは、たとえ動作周波数が可聴範囲ではないとしても、磁気歪みのような現象によって、より

る問題です。」Schröderは続けます。「ですが、将来的には、完全にサイレントなIHクッキングヒーターを製造したいと願っています。」

さらに器具によって発生した磁力が新たな問題を引き起こします。IHクッキングヒーターは、常磁性金属で製造されているためコンロ上に置かれた鍋が動く原因となる磁場との相互作用が働いてしまいます。鍋の中の渦電流が磁場を作り、コンロによって発生し

試作品シミュレーションとの比較

試作品をテストした時、mieletec研究所はその結果にとっても感動しました。Schröder氏は、「本当に信じられないほどです。」と語ります。「シミュレーションにより予測された結果は、試作品が表示した数値とほぼ同じものであり、この結果は他のソフトウェアでは殆ど起こり得ないことです。」これらの結果例は、図4、5に示されています。

このシミュレーションを使用することで、試作品の稼働結果をかなり正確に把握することができるため、mieletec研究所では開発時間の大幅削減と最終設計に至るまでの実験回数

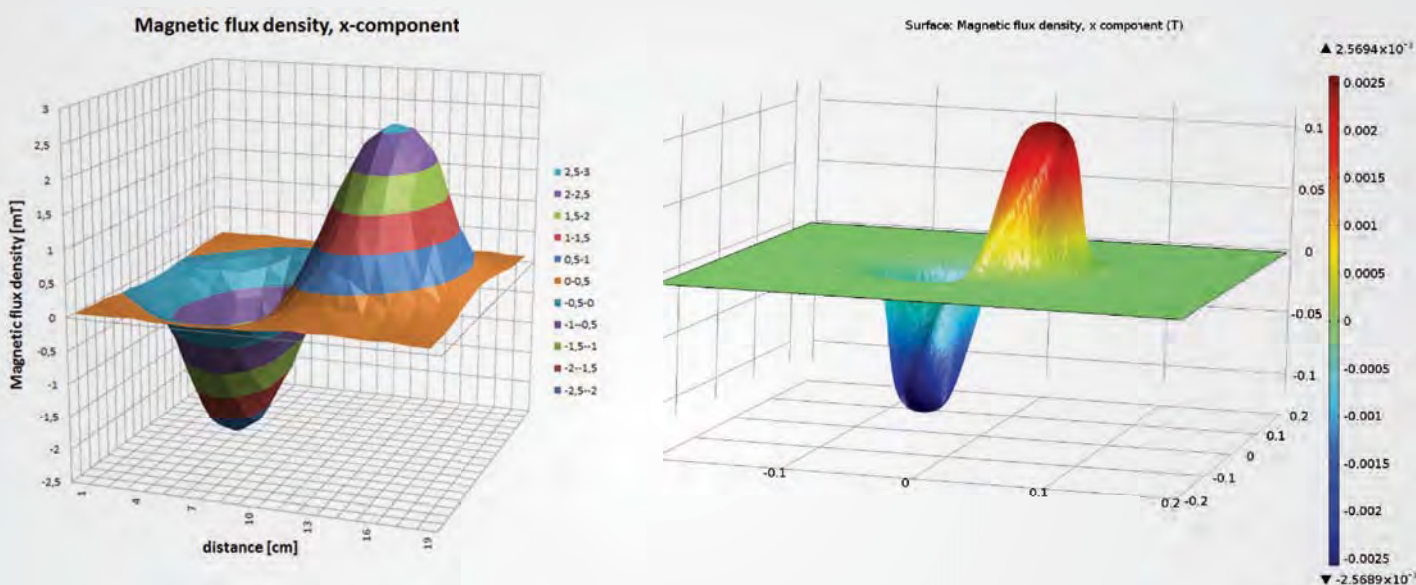


図4. 特別設計コンロ用、磁束密度のx成分。測定値(左)とシミュレーション(右)は、ほぼ同数値。



新しい対流式オープンの前で mieletec FH Bielefeld 研究所の科学委員会のメンバー
左から Christian Schroder 氏, Sonja Schoning 氏, Holger Ernst 氏

を約 80% 削減することが出来ました。

IH クッキングヒーターの調理が均一であるかをテストするため、mieletec 研究所が選んだ調理はホットケーキであり、調理中のフライパン表面全体に広がる熱の分布を測定、評価しました。「もしホットケーキがある一部、焦げていたり、他の部分で加熱不十分だったりする場合、コンロは効果的だとは言えません。」と Schröder 氏は説明します。「均一された色で全体が加熱されているホットケーキが欲しいですね。」信頼あるドイツの Stiftung Warentest 社のランキング (www.test.de) では、Miele 社のコンロは、エネルギー効率性では最高ランクを受けましたが、さらに重要なことに、そのクッキングヒーターではとても美味しく美しい茶色のホットケーキが焼けると評価されました。

従来の電化製品のシミュレーション

Mieletec 社では、対流式オープンのような他の調理製品においてもシミュレーションを使用しています。この適用例の中で、最適化されたオープン開発時にとても重要となるものは、材料の完全理解とマルチフィジックスの総合作用です。最適化設計を確立するため、水で飽和された多孔質石がオープンの中に設置されました。その後数日間で、オープンの加熱率とエネルギー効率を評価するために様々な熱サイクルを実験しました。

Schröder 氏は、「多孔質媒体フローが含まれる自然対流伝熱シミュレーションとも連携しなくてはなりません。これは、真のマルチフィジックスを持つこととなります。」と語り

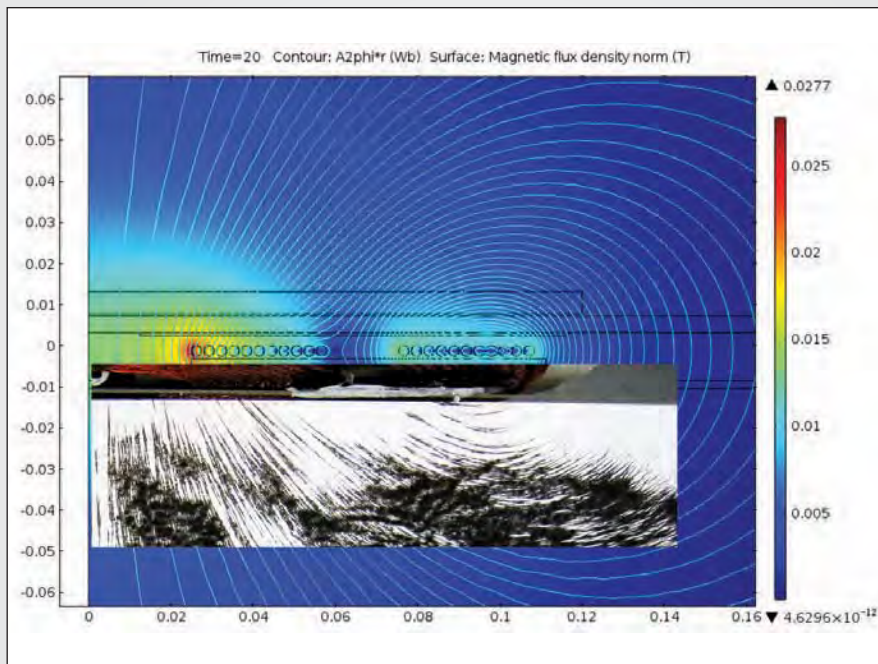


図 5. COMSOL Multiphysics の結果 (磁束密度基準) と実験フィールドラインの比較。シミュレーションは正確で試作品を作成する前に他のコイル設計もテスト可能。

ます。「実際のセンサーでは測定不可能な石の高温度もそのシミュレーションでは測定可能でした。」シミュレーションにより、私たちは設計の理解をより深めることができました。」と彼は続けます。実際の実験には数日間かかってしまうものも、シミュレーションではわずか数時間で結果が出ます。貴重な時間と研究資源の節約へとつながります。私たちのオープンが熱効率ランキングで最高ランクを受賞したのは言うまでもないでしょう。」

どこにおいても調理ができるというコンロです。そのコンロは自動的に鍋の位置を感知し、その鍋の場所に適したコイルをオンにし、その料理に適した熱力を調整します。

この調理器具の最新デザインは、調理器具産業に大改革をもたらしています。より安全でより熱効率の良いコンロがどの家庭にも、そしてプロのシェフにも利用可能なのです。Ernst 氏は、「私たちはこれからも mieletec 研究所が、設計プロセスの促進のために

「実験の中でのテストは数日間かかってしまうものも、シミュレーションではわずか数時間で結果が出ます。」

家庭用電気器具の未来

シミュレーションを活用し、より向上した熱効率と、mieletec 研究所はさらによりよい料理体験を得るオープンを設計、提供することができました。次のステップは、磁気歪みや材料の老朽化のような項目にも効果を持つ複雑な multiphysics を含んだ IH クッキングシステム全体をより深く追求し理解することです。Mieletec 社はマルチコイル IH クッキングコンロと呼ばれている次世代コンロの開発にも着手しています。これは従来のようにキッチンレンジ内部で所定のコンロで区切られておらず、使用者が鍋をキッチンコンロの上の

COMSOL Multiphysics を使用し、最先端技術の製品を提供し続けることを期待しています。」と語りました。

スイッチングを簡単に

熱、電磁気、容量のセンサーのシミュレーションは、KOSTAL 社の製品開発で中心的な役割を担っています。同社は、世界の主要な自動車メーカーの全てに車載用のスイッチングモジュールを供給しています。

執筆者 JENNIFER HAND氏

技術者ではない私の友人たちは、一見単純な製品でも多くの技術が使われていることに驚いています」とKOSTAL 社でシミュレーションを活用して、技術開発や品質管理を行っているシニアマネジャーの Matthias Richwin 氏は語っています。「彼らは、自動車の内部に使われている全てのスイッチには、多くの専門分野にわたるエンジニアチームが関わっているという事実と等しく興味を持っています」このような興味を持つのは Richwin 氏の友人だけではないでしょう。ドライバーは、スイッチの開発努力を知らずに、どこでもヘッドライトを点灯し、ワイパーを回します。しかし、凍りつく冬から蒸し暑い夏、どんよりした雨の日、明るい晴天の下で、スイッチは、自動車が寿命を迎えるまで、絶えず機能することを求められています。

電氣的スイッチの 60 年

KOSTAL グループの自動車電気システム部は、60年にわたり、スタイル、安全性、スペースの節約など、利用者の便宜のためのイノベーションの推進力となってきました。同社がハンドルによる方向指示スイッチを販売し、統合機能押しボタンを生み出した初期の時期から、同社は幅広い分野で特許を取得してきました。主要製品には、ハンドル軸、中央コンソール、ルーフ・モジュールシステムなどがあります。顧客は、BMW、ダイムラー、フォード、フォルクスワーゲングループなどがあります。

Richwin 氏は、シミュレーションが、なぜ KOSTAL 社の設計プロセスで不可欠な要素になったのかを次のように説明しています。「私たちは、機械設計用の FEA ソフトウェアのような専門ツールを持っていますが、熱シミュレーションがますます必要になり、電磁気シミュレーションが期待されています。それで私は、いくつかの選択肢を調査しました。私たちは、COMSOL Multiphysics を選択しました。なぜならば、はるかに優れたユーザーインターフェースを持ち、私たちが使っている



図 1 LED 照明のある代表的なプレミアム自動車のルーフ・モジュール

CAD や電気設計、製造アプリケーションとの統合を実現できたからです。2009年に私たちは、ルーフ・モジュールの熱シミュレーションのソフトウェアの利用を開始しました。

「シミュレーションは、今や KOSTAL 社の新製品開発に深く浸透しています。シミュレーションは、共通の設計作業とみなされており、3分野における重要な鍵となっています。

照明効率と熱放散

最近の自動車の内部照明は複雑で高度です。ドアが開いたときに点灯するルームライトは、さらに進化しています。高級自動車のルーフ・モジュール（図 1 参照）は、盗難防止装置やサテライトナビゲーションシステム、さらに環境照明のような追加装備なども内蔵する可能性が高いと思います。Richwin 氏は次のように述べています。「この業界では、伝統的な電球から LED 表示へと変わりました。「LED は電力の消費が少ないので極めて効率的ですが、LED が放散する熱の

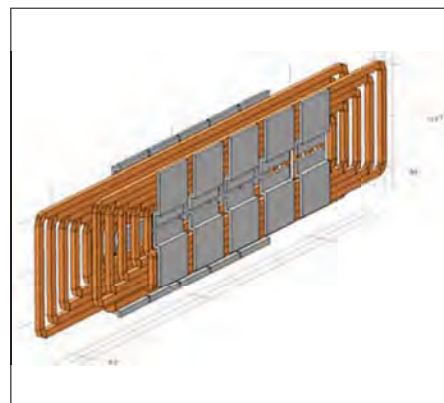


図 2 3 キロワット電気出力で約 95% のシステム効率を持ち、誘導電荷に対して数値的に最適化されたコイルバネ

90% がルーフモジュールのプリント回路基板 (PCB) の中に入ります。私たちは、熱の作用を予測し、性能を最大化するために、COMSOL Multiphysics を使い、この特殊な課題に取り組みました。以前には組み立てとテストを行わなければならなかったのです

が、今では、簡単に性能を予測することができるようになりました。例えば、お客様に対して、ルーフ・モジュールが、どんな環境下でも最適の明るさで機能することを簡単に示すことができるようになってきました。」

クリーンで便利な自動バッテリー充電

電気自動車の欠点の1つは、定期的な充電の必要性であり、一般的に充電には7～8時間かかります。従って、1昼夜充電を忘れると、移動できなくなります。このため、KOSTAL社のチームは、電気歯ブラシのコン

に COMSOL Multiphysics を用いました。このオプションとは、車体下部にコイルが組み込まれた接地板や、ナンバープレートの背面に置かれ、コイルが組み込まれた側面上の器具のようなものです。シミュレーションなしに、このタイプの製品を開発することは絶対にできなかったと思います。」

スマートフォンの期待

Richwin氏は、変わりやすい入力に対して、複雑で耐水性に乏しい機械的なスイッチの使用を最小限にするという、もうひとつの



左から Daniel Klagges 氏、Ingolf Munster 氏、Mathias Richwin 氏

やハンドクリームのような物質の可能性を考慮しなければなりません。それから、指が表面に接触していないけれど、数センチメートル内にある、実際に接触している、あるいはその組み合わせによって近づくかどうか、感度のレベルを決定しなければなりません。それは、センサーが最初に指の接近を検知し、それから接触を表示するということです。」

このためには、センサー皮膜をできる限り薄く作ることです。そのためには、このチームが、ちょうど1ミリの厚さのプラスチック表面から、信頼でき、かつ予測どおりの性能を見出す必要があります。シミュレーションは、プリント基板(図3参照)上に位置するセンサーの容量を最適化することによって感度を最大化するために用いられます。KOSTALグループは新表面素材も開発中です。例えば、誘電性構造がより柔軟性を高めて信頼性を増すように印刷可能なプラスチック薄膜の開発があります。

シミュレーションはイノベーションを促進する

Richwin氏は次のように述べています。「COMSOL Multiphysicsは、技術的なコンセプトの実行可能性を非常に素早くチェックでき、開発段階で、製品の品質、構造安定性、コストを最適化します。また、多くのプロトタイプを削減することで費用の節約もできます。しかし、誘導電力伝送や容量センサー設計のような革新的な分野では、シミュレーションは欠くことのできないものとなっています。なぜならば、その他の方法ではおそらく、費用や時間がかかると考えられるからです。」

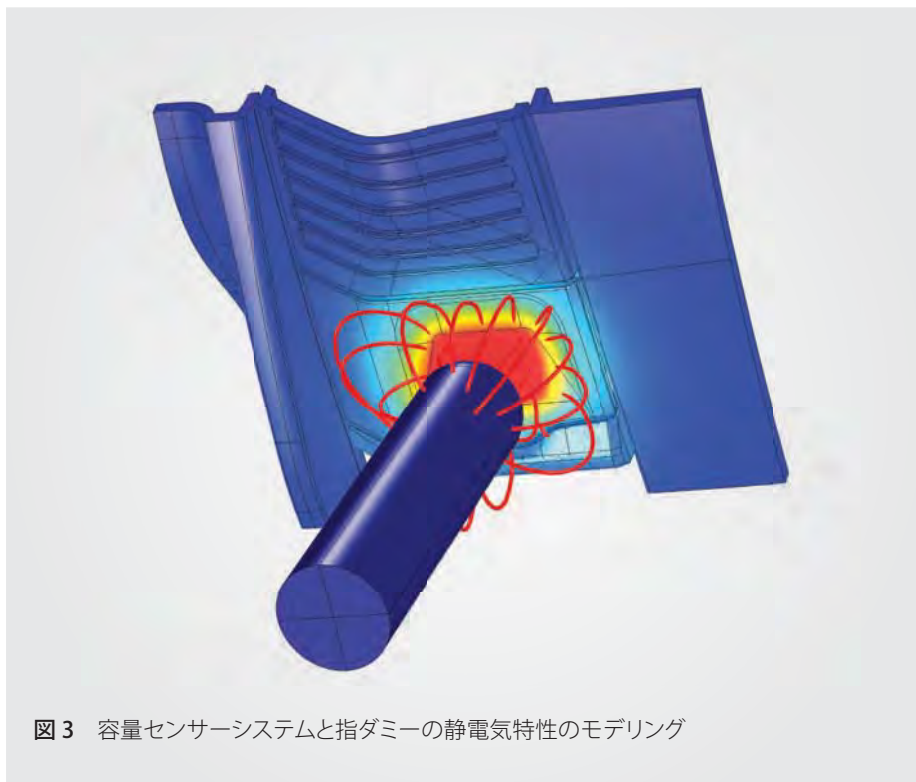


図3 容量センサーシステムと指ダミーの静電気特性のモデリング

セプトを発展させました。「このアイデアは、ケーブルを使って車に充電するのではなく、車を充電システムへ移動することで充電を行うというものです。歯ブラシ用の充電器と同様に、端子がありません。」このアイデアは、安定性、安全性、快適性など、あらゆるレベルで利点があります。ドライバーは、毎日毎晩、同じ場所に駐車するだけでよく、ケーブルを取り出したり、その接続を考える必要はありません。「もし、変圧器が2つに区切られていて、この2つの部分が離れているならば、効率的ではないにしても、変圧器はケーブルが無くても誘導電力伝送によって機能するであろうと考えて研究を行いました」と Richwin氏はコメントしています。「私たちの仕事は、それぞれの側のコイルを最適化することでした。従って、この最終製品は、ケーブルを使うシステムと同じくらい効率的にしたいと思いました。私たちは、さまざまなオプションの電磁シミュレーション(図2参照)

産業界のトレンドについても引用しています。同時にスマートフォンやタブレットを利用している顧客は、今や自動車でも同様のタッチパッド形式のセンサーを望んでいます。しかし、こうした技術を車に転用することは、簡単ではありません。スマートフォンとのやりとりは、完全にビジュアルで、ユーザーは画面を見なければなりません。しかしながら、車では、ドライバーが運転から気を逸らすことはあってはならないことです。従って、ユーザーの動作は、なにも見ずに行えなければなりません。」

さらに、車内にはドライバーのためのインターフェースが多くあり、車の環境は複雑です。場所や気象により、極端な温度や湿度、埃などは、自動車部品にさらなる問題をもたらします。

Richwin氏によれば、容量センサーには、さまざまな課題があります。「私たちは、多くの異なる大きさの指腹や指先、さらに手袋

血糖値検査紙のモデリング

Lifescan Scotland 社は製品開発と製品最適化に Multiphysics を使用

Gary Dagastine氏による寄稿

糖尿病患者の効果的な自己管理のために、血糖自己測定が絶対不可欠です。そのため世界中の糖尿病患者の方たちは毎日、同じルーティンを共有しています。彼らは自分の血液を1滴、検査紙の上に落とし、その紙を測定器に挿入し自分の血糖値を測定します。

しかしながら、自己測定を可能にするこのシンプルで小さなプラスチック製の検査紙には、実際には高度な工学的センサーが必要だということはあまり知られていません。正確性、使い勝手の良さ、製造可能性、価格に関して商業的ゴールを達成しなくてはならないことはもちろんですが、医療製品としてますます厳しくなる規制基準を満たすことも必要です。

Lifescan Scotland 社は、世界市場に向けた血糖値モニタリングキットの開発、製造を行っています。Inverness に所在し、Johnson & Johnson のファミリー企業でもある Lifescan Scotland 社の製品研究、開発施設は糖尿病分野に携わる人たちにとって、世界の卓越した研究拠点として知られています。

この企業の取扱製品に含まれているものは、血糖値測定システムとして知名度が高い OneTouch® ブランド測定器、その測定器使用時に必要な特殊な検査紙、糖尿病管理ソフトウェア、コントロールソリューション及び穿刺装置を含んでいます。(図1参照)

Lifescan Scotland 社の研究者達は、現在のものや新しいバイオセンサーの開発を行うために COMSOL Multiphysics を約3年間使用してきました。

複雑な電気化学センサーの稼働方法

Lifescan Scotland 社の検査紙はプラスチックの回路基板、2つの炭素系電極（それぞれ作用電極と対電極と呼ばれています）、薄く乾燥した試薬層、そして血液が付着したところは毛細血管容積から成り立っています。

概念的には、血液は乾燥した試薬と混ざり、水和し、化学物質を作る酵素反応が起こります。この結果は血液中のブドウ糖量と比例します。

検査紙が測定器に挿入されると、電池式測定器は検査紙の作用電極を分極します。一時的な電気信号を発生する酸化プロセス



図1：OneTouch® 測定器と試験紙での検査

が始まり、この信号強度は酸化化学生成物の量と比例するという特徴を持っています。その後、ユーザーの信号強度を数値に変換するというアルゴリズムを適用します。

解析解を使えない場合で

歴史的に、Lifescan Scotland 社の研究者達は製品設計の際、解析的手法に信頼をおいています。研究主幹の Stephen Mackintosh 氏は「私たちは、簡略されたジオメトリ、試薬、境界条件の仮定を使用して偏微分方程式 (PDEs) を計算します。主任研究員の Manuel Alvarez-Icaza 氏、Steve Blythe 氏、Marco Cardosi 氏は、これらの当初のモデリングアプローチを数多く作り上げてきました。最近の業務では、これらのモデリングを複数の化学種、化学的相互作用、全ての電気化学を含んだモデリングへと拡張しました。

しかしながら、このアプローチは主変数を含む解析解を生み出しますが、最先端プロダクト設計に最適なものではありません。なぜならば、簡易化された仮定には重要な詳細化学反応を考慮しないからです。「私達のゴールはより早く結果を出し、より安価な製造コストで、さらに厳格になりつつある規制基準を満たす試験紙を開発することです。」と Mackintosh 氏は語ります。「有限で複雑

なジオメトリは、このようなシステムを分析するためには不可欠なものです。そしてこのようなケースでは、解析的構成よりも数値モデルの方がより有益なのです。」

「私は一般的な数値の偏微分方程式 (PDE) 解法を使用し、より複雑なシミュレーションを組み立てることによって、さらなる進展を得ることができました。」しかし、複数種の相互作用を迅速にそして正確に計算することが可能でしたが、電気化学的要素がまだ不足しているために、根本的なソースコードを使い続けることは困難でした。

その基本的な物理は複雑で、酵素触媒による化学反応動力学のみカエリス・メンテン式と測定器の電池供給電位に加えて濃度依存電位変化を理解するための Butler-Volmer 解説の両方が組み合わせられた質量拡散のフィックの法則との連動が必要でした。

質量拡散は特に考慮すべき重要な事項です。「シミュレーション内の拡散種は多数あり、ブドウ糖との反応はその一例です。」と Mackintosh 氏は語ります。「注意をしなくてはならないことは、血液サンプルの特異性によって、それらの拡散係数は微妙に異なり、複雑になる可能性があるということです。」(図2参照)

「そのため、私達は製品を開発する際にいくつかの点を考慮する必要があります。酵素・基質反応、電流密度、酸化種濃度、そして温度ですが、それぞれの制限数値の特徴を考慮する必要があります。しかし従来の解析方法でこれらを正確に行う事は不可能でした。」と彼は続けます。

Multiphysics アプローチからの恩恵

数学者である Mackintosh 氏は、COMSOL Multiphysics を活用し、有益に稼働するモデルを開発する事ができました。Mackintosh 氏は、「研究開発グループの他の科学者たちはこのモデルに重要な科学的背景知識を提供してくれました。特に Staff Scientist の Jamie Rodgers 氏の電気化学専門知識は計

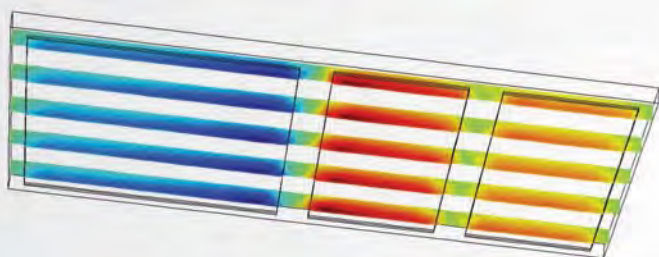


図2：3Dスライスプロット 作用電極及び対電極の両方共に、簡易化された試験紙チャンバー内での血液拡散種濃度を表示

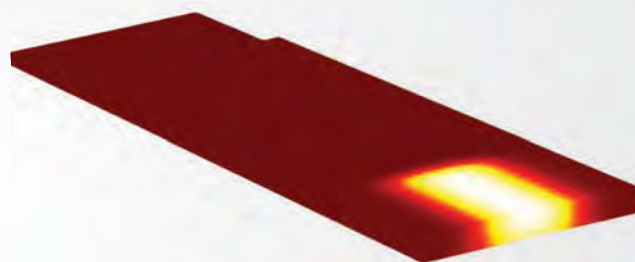


図3：試験紙についての血液からの熱消失の研究(温度分布の表示)

り知れないものでした。」と語ります。

COMSOL Multiphysics には、その能力を更に高める複数のモジュールがあります。Mackintosh 氏、モデリング及びシミュレーションチームが一番頻繁に使用したモジュールは伝熱モジュールで、熱分配を研究するために使用しました(図3参照)。またバッテリー&燃料電池モジュールは、電気化学反応の詳細な展開研究に活用しました。これらのモジュールでは、COMSOL Multiphysics に含まれる他の性能と自由な組み合わせが実現出来ます。質量拡散を研究するために希釈化学種輸送を、またユーザー定義の境界条件を拡張するために PDE インターフェイスを適用しました。

それぞれの電極 - 電解液境界近傍で追加された改良ノードとともに、そのチームはソフトウェアのフィジクス制御されたメッシュの設定を介して自動メッシュ生成を行いまし

た。「1 滴の血液から血液チャンバーに充填している親水性のプロセスを研究し私たちのモデルを拡張するために、マイクロフルイドクスモジュールの活用も考慮しています」と Mackintosh 氏は語りました。

この業務の成功を基に、Inverness lab 全体で、COMSOL Multiphysics の使用が広がりました。Senior Algorithm Engineer の Adam Craggs 氏は、必要な IT インフラを大きな原動力として活用しました。モデリングの使用経験がないユーザーにもこれらの素晴らしいツールアクセスを可能にするため、Craggs 氏は特別な GUI (グラフィカルユーザーインターフェイス) を LiveLink™ for MATLAB で作成しています。

一方で、コンピュータ側では、Craggs 氏は、数多くの実行中モデルをシェアするために Apple Mac Pro® コンピュータを実装し、重要な課題をより早く解決するために COMSOL

Client/Server モードを活用しました。

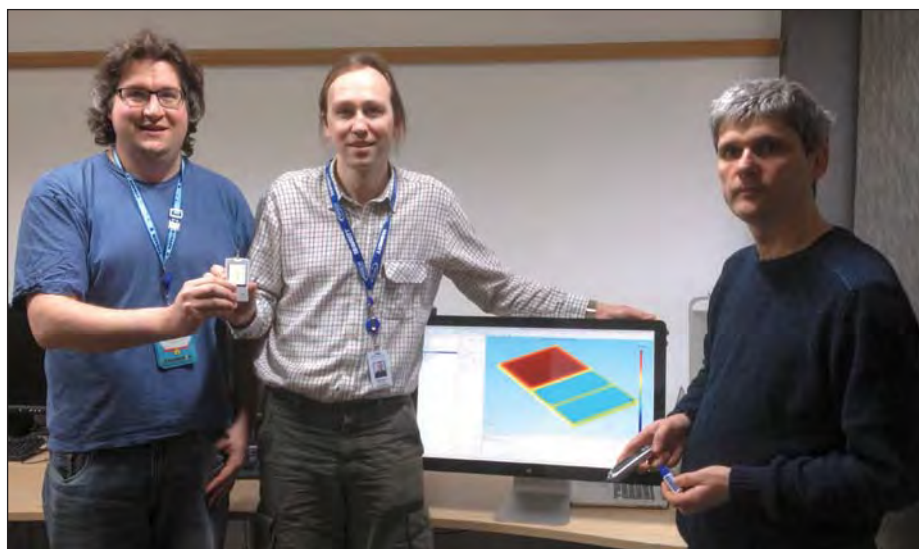
より素晴らしい製品開発のために

COMSOL Multiphysics は、デバイスの化学と形状の費用効率における最適化条件確立の大きな助けとなっています、と Mackintosh 氏は説明します。「レイアウト変更の度に、またソフトウェアにより算出された詳細の濃度勾配と共に、被分析物濃度と電流信号の間の相互関係の結果により、信号の特徴と設計変更の重要性を理解することができます。」

「私達は COMSOL Multiphysics を使用して、血中ブドウ糖センサー数値を確立し改善しました。

この COMSOL Multiphysics では、代替案チャンバージオメトリは試薬構成のモデルベースの試作品を早急に作成することも可能です。」と Mackintosh 氏は語ります。「実際に私たちのモデルから得た結果のいくつかは、製造変更を行う上で自在に対応可能だということを証明しています。それは、未来の製品開発に貢献するでしょう。」

「シミュレーションの結果は、現在のシステムや試作品を使用した実験結果と一致しています。」と Mackintosh 氏は説明します。「もちろん、そのようなモデルは一般に市場に出回るような医療器装置の安全や有効性の最終決定には決してなりません、将来の製品設計及び最適化にはとても有益なツールなのです。」



Lifescan Scotland 社の研究開発グループメンバー。左から Senior Algorithm Engineer の Adam Craggs 氏; Senior Scientist の Stephen Mackintosh 氏;そして Staff Scientist の Jamie Rodgers 氏。

マイクロ波を利用した化学反応と有限要素法解析によるマイクロ波の可視化

望月 大・和田 雄二（東京工業大学大学院理工学研究科）

省エネルギー社会実現に向けて

エネルギーや資源などを効率的に利用したもののづくりを目指す省エネルギー社会の構築は、人類が持続的に発展していく上でとても重要です。我が国の主要産業である化学産業は、最大にエネルギーを消費している産業部門のひとつであり、更なる省エネルギー化に向け、多くの取り組みが行われております。化学プロセスの中でも、特に吸熱・高温型の反応はエネルギー多消費型のプロセスとして省エネ対策の上で大きな課題となっていますが、従来技術の延長線上には解決への展望は開けず、全く新しい発想に基づいた省エネ対策が必要であります。

マイクロ波は、光や赤外線のような電磁波の一種であり、携帯電話などの通信手段のほかに、物質にエネルギーを供給し、加熱するものです。マイクロ波は、電気ヒーターや熱風などの通常の加熱方法とは違い、物質を直接加熱することができます。その結果、マイクロ波は、物質を選択的に加熱できるといった特長を示すことが知られております。この物質を直接かつ選択的に加熱する方法を化学反応に利用することで、省エネルギー化学産業の創出が期待できます。

マイクロ波化学

1986年、GedyeらとGiguereらによって

化学反応におけるマイクロ波加熱の反応促進効果が初めて報告されて以来、マイクロ波を用いた化学反応の研究が盛んに行われるようになってきました。(図1) これらの論文では、マイクロ波を使用した場合の反応が通常の加熱方法に比べ、反応時間の大幅な短縮、収率や選択率が向上する等の興味ある事実が報告されています。このような現象はマイクロ波の特殊効果によって引き起こされると考えられています。

しかし、マイクロ波の特殊効果については未だに不明な部分が多く、特殊効果を化学プロセスに応用していくためには、正確な化学実験を行い、検証を重ねていく必要があります。特に、マイクロ波加熱と通常加熱を比較する上で、温度測定は非常に重要な問題です。過去にマイクロ波特殊効果が報告された化学反応のいくつかを正確な温度測定を行って検証したところ、特殊効果が消失してしまいました。すなわち、マイクロ波特殊効果の検証を行う場合には、反応系内の温度分布を十分に意識して行う必要があります。

マイクロ波分布の可視化

マイクロ波特殊効果を検証するためには、マイクロ波反応系内の温度分布をマクロスケールで均一に制御する必要があります。そのためには、反応系内のマイクロ波分布を

把握し、制御にフィードバックしなければなりません。そして、マイクロ波の分布を把握するには、有限要素法を用いた電磁界シミュレーションは不可欠なツールとなります。我々は、マイクロ波を用いた化学反応へ有限要素法を用いた電界シミュレーションを導入することにより、マイクロ波分布と温度分布とを検証しました。

2.45GHz 半導体式発振機を使用し、インピーダンス整合器でマッチングをとり、触媒存在箇所でマイクロ波を均一に照射するため、楕円型マイクロ波反応チャンバーを用いました。(図2) 楕円チャンバー内を有限要素法によりシミュレーションした結果を図3に示します。楕円チャンバーのアンテナからマイクロ波が発振され、触媒層に効果的に照射されていることが分かりました。また、触媒層に導入された電力は、触媒層上面および下面部にややかたよがりがあるものの、中心部には均一に分布していることも分かりました。このような結果は、本照射系がマイクロ波化学反応に適していることを保障するものであります。

マイクロ波特殊効果のモデル反応

マイクロ波特殊効果を検証するモデル反応として、気体-固体反応におけるメタノール分解反応に着目しました。メタノール分解の

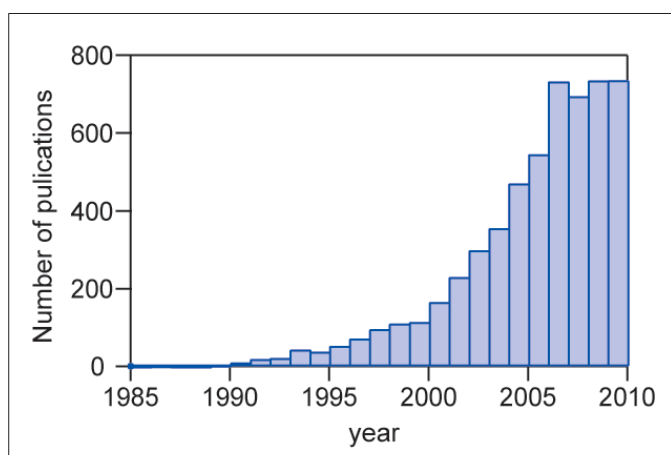


図1 マイクロ波を利用した有機合成に関する論文数の推移 (Web of Science, keyword "microwave," , research field "organic")

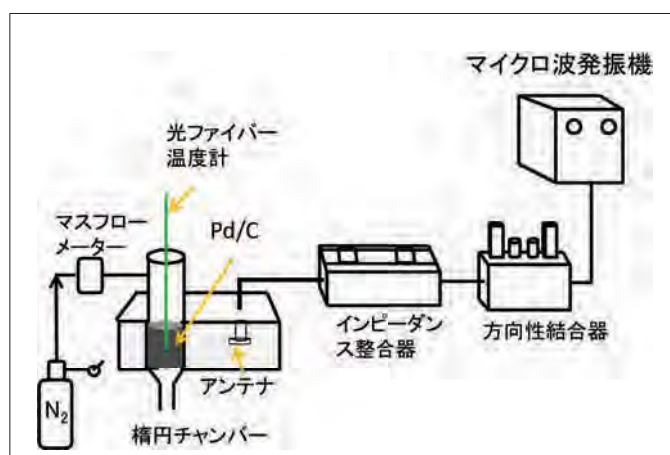


図2 マイクロ波気体-固体化学反応装置図

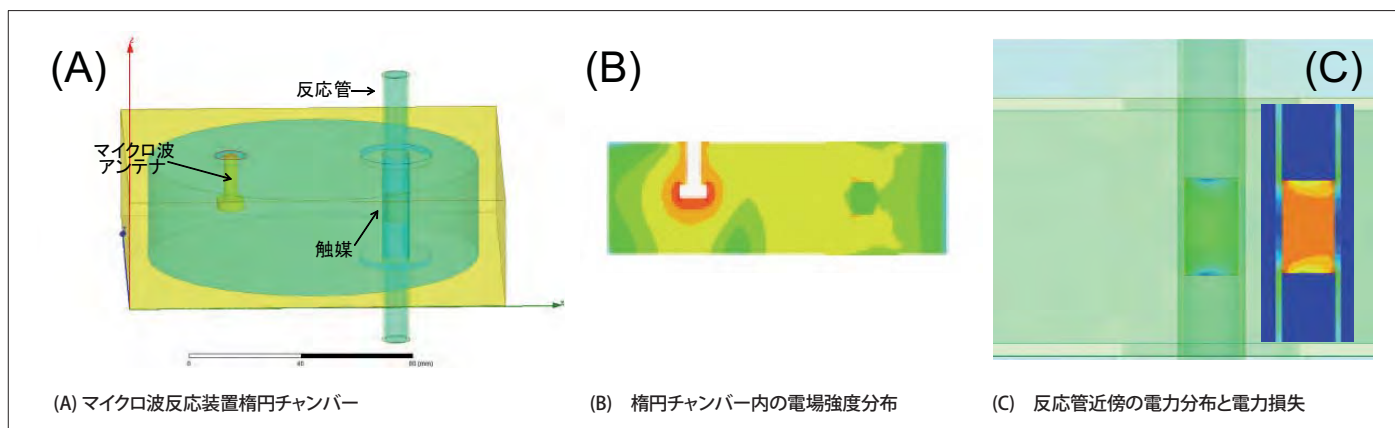


図3 有限要素法を用いたシミュレーション結果

気-固反応は、固体触媒表面において一次で反応が進むため速度解析がしやすく、かつ吸熱反応であるためマイクロ波加熱による影響を受けやすいと予測されることから、マイクロ波効果を検証するモデル反応として有効であります。さらに均一なマイクロ波照射を確認するため、ファイバー温度計による反応管内の多点測定を行いました。

各測定位置の温度(図4)において、触媒層垂直方向の温度は上段が低くなっていたものの、中段、下段の温度はほぼ同じに観測されました。上段の温度が低下しているのは反応のキャリアガス(N₂ガス)が上段から流入するため冷却されたことが原因です。中段、下段の温度差が最大6.1℃となり、通常加熱と比較できる均一な温度分布を得ることができました。

マイクロ波加熱、通常加熱で行ったときの接触時間とメタノール分解により生成した水素の生成速度の結果(図5)から、マイクロ波加熱の反応速度定数は通常加熱に対し

約3倍となっていることが分かります。この結果からメタノール分解反応におけるマイクロ波効果を確認することができました。

現実の測定系では図3Cの上部から連続的に気体を流し込むフロー型になっており、マイクロ波、伝熱、化学反応、流体のマルチフィジックス解析が必須です。現在、COMSOL Multiphysicsを活用し、そのような系の数値解析を行っており、より現実的な系についてマイクロ波効果を検討できるようになってきております。

マイクロ波化学の今後の進展

マイクロ波化学は、正確な実験による学術的な研究結果に加え、実用化に必要な要素として、反応装置の大規模化などの展開が必要になっています。大規模化には、電磁波の挙動を理解し、装置を設計していく必要が高まっていくことでしょう。大規模設計のために、有限要素法によるシミュレーションは、さらに大きく貢献することになるでしょう。

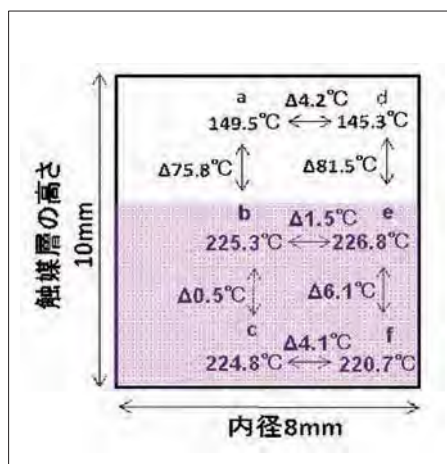


図4 反応管触媒層の温度分布測定結果

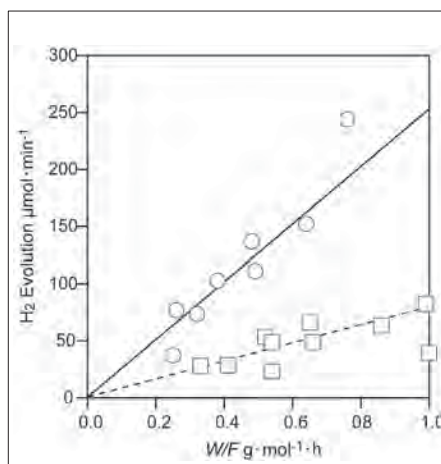


図5 メタノール分解反応による水素生成速度の比較:マイクロ波加熱(○)、電気炉加熱(□)



望月 大 (もちづき だい)
東京工業大学大学院理工学研究科助教
2006年早稲田大学大学院理工学研究科応用化学専攻博士後期課程修了



和田 雄二 (わだ ゆうじ)
東京工業大学大学院理工学研究科教授
1982年東京工業大学大学院理工学研究科化学工学専攻博士後期課程修了

MRI の追跡による癌治療

カナダの Cross Cancer Institute のチームでは、極めて精確な放射線治療を可能にするため、磁気共鳴画像診断法の優れた特性と直線粒子加速器のパワーを組み合わせ、これまでの不可能の壁を見事に打ち破るプロジェクトに取り組んでいます。

Jennifer Handによる報告

癌の放射線治療では、腫瘍を狙った照射の精度に大きな不確実性がともなうのが現実です。磁気共鳴画像診断法 (MRI) を軟組織内の腫瘍の正確な位置同定に用いれば有用ではありますが、直線粒子加速器 (Linac) による放射線治療とは完全に切り離して実施する必要があります—MRI と Linac は互いに相容れない技術を用いているためです。MRI のスキャナは、画像描出のため、患者から発せられる極めて微小な高周波信号をとらえる必要があります。しかし、Linac は電気的な必要性から極めて大きな高周波信号を発生し、微小な信号の受信を妨げてしまいます。また、X線照射で癌細胞を破壊するためには、Linac が発生させる電子を正確に腫瘍に当てる必要がありますが、MRI の漂遊磁場は電子の進む方向をそらせ、Linac の機能を損ねてしまいます。

この二つのシステムを組み合わせることができれば、治療中いつでも腫瘍の位置を正確に特定できる理想的な治療法になり、呼吸により動いてしまう胸部や腹部の腫瘍には特に有用です。つい最近までこれ

は不可能だと思われてきましたが、今では、カナダの Edmonton にある Cross Cancer Institute のチームにより不可能ではないことが証明されました。

挑戦、また挑戦

同じ Edmonton にある University of Alberta の Professor Gino Fallone は、この問題に取り組む特別チームを 2005 年に立ち上げました。以後、彼とそのチームは克服不可能と思われていた障壁を打破してきました。2008 年には完全に機能するヘッドの試作機 (図 1) を製作し、概念実証を達成しました。「Linac MR プロジェクトには、いくら強調しても誇張になることはないほど多様な技術的、物理的課題があります」と Fallone 氏は話します。「私たちは、MRI システム、Linac、両者の最適な組合せ、それにできあがった新しい設備を設置する部屋まで、設計を考える必要がありました。」

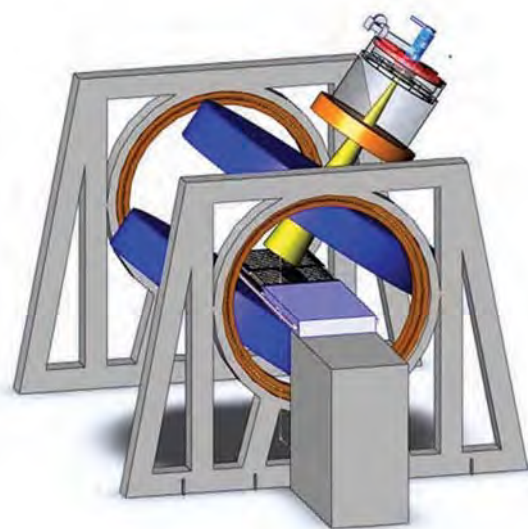


図 1: Linac MR システムの構造

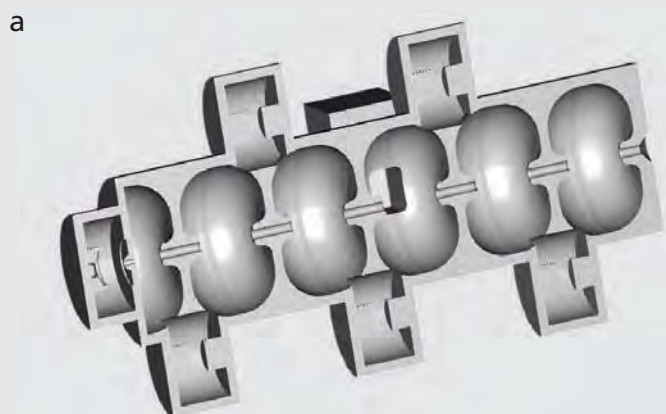
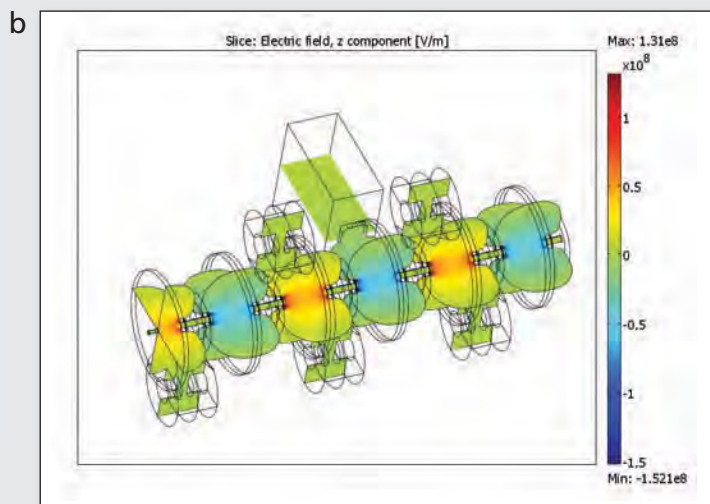


図 2: 短くなった 10 MeV 導波管の断面図 (a) および電場分布 (b)



MRIと組み合わせたリアルタイムの照射を臨床利用にまで持ちこむためには、シミュレーションが果たす役割は極めて重要で、チームのメンバーは2006年からCOMSOL Multiphysicsを活用しています。

「静磁場シミュレーションを用いた初期のプロジェクトの一つでは、MRIの磁場からLinacを保護する方法の確立を目指しました」と、チームメンバーの一人でありUniversity of AlbertaのAssociate ProfessorであるStephen Steciw氏は話します。「この問題が解決したので、次にMRIスキャナの構造のシミュレーションや最適化といった他の課題に取り組みました。MRIスキャナには、X線ビームが通る穴を内蔵させなければなりません。LinacがMRIの周りを回転したときの画像品質への影響はすでに調査済みでした。そこで、角度ごとの場の不均一性とそれを回避するさまざまな方法を検討しました。そして、この問題がLinacとスキャナが一つのシステムとして同時に動くよう設計することで解決することを、私たちは実証したのです。」

Linacを保護する

Linacの保護については、地球の磁場レベルである0.5 Gaussまでの保護が当初の目標でした。これを達成するため、シールドに使う鉄板のサイズは、当初厚さ5 cm、縦200 cm、横200 cm、と設定されました。プロジェクトに参加当時、医学物理学のPhD課程の学生であったJoel St. Aubin氏はこのエピソードについて次のように話しています。「COMSOL Multiphysicsを使ったことでLinacの磁場への耐性を検証することができ、シールドのサイズを半径30 cm、厚さ6 cmにまで小さくできました。新しいシールドの重さは当初のものと比較して3分の1以下となり、技術設計の観点からずっと実用的になりました。また、新しいシールドはMRIの場の不均一性を3分の1以下に顕著に改善し、これは歪みのないMRI画像を得るには重要です。」このようなLinacの受動保護に加え、チームでは、反磁場の電磁シミュレーションを実施し、Linacの能動的な保護も検討しました。

短い導波管でも高いエネルギー

「Linac MRでは10メガ電子ボルト (MeV) の電子ビームを生成させたいと考えていました」とSteciw氏は説明します(図2)。「そのためには、現在選択可能なサイズの中か

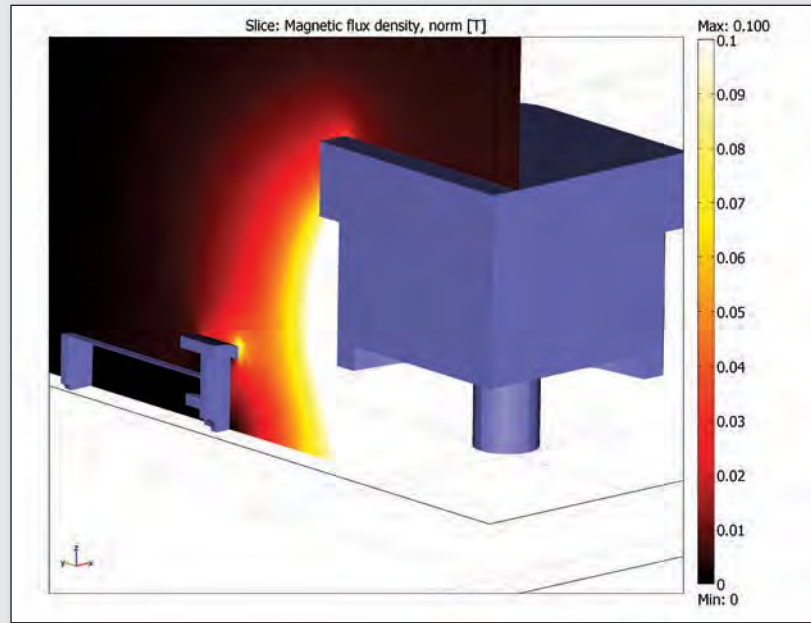
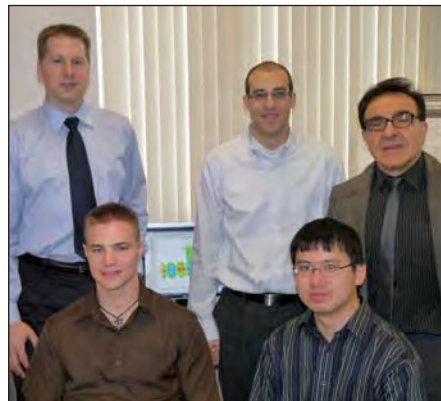


図3: Linac MRの垂直方向の受動保護 (磁場線は電子の軌道に対して垂直)

ら、実際には22 MeVの電子を生成でき、長さが150 cmある導波管を購入することになるのですが、これは私たちが必要とするよりも強力かつ長すぎました。長さは70 cm必要と見積もっていましたが、COMSOL Multiphysicsを使ったところ、導波管の長さを30 cmにまで小さくできることがわかりました。現在、私たちは新しいS周波帯導波管の設計を進めています。長さを短くできたのは非常に重要です。というのも、Linac MRの設置に向けて現在建築中の部屋を相当に小さくできるからです。」COMSOL Multiphysicsはこの特殊な部屋に磁気的な保護が必要かどうかの検証にも使われました(図3)。その結果、必要であることが判明



後列: Stephen Steciw氏、Joel St. Aubin氏、Gino Fallone氏、前列: Devin Baillie氏、Dan Michael Santos氏

し、さらなるシミュレーションにより特殊な鉄製ライニングの厚さが決定されました。全身用Linac MRの第一号機の製作が現在この部屋の中で進められており、2016年までには一般利用が可能になる見込みです。

精確に狙い撃つ

この試作機は、Linac MRの重要な構成品に関する技術の基礎研究に用いられており、チームは現在、Linac MRを治験用医療機器として臨床試験でヒトに用いるための政府の許可を得るため、必要な申請文書の準備をしています。「COMSOL Multiphysicsは、私たちのこの重要な研究を可能にしている、極めて実用的で便利なツールです」とFallone氏は話します。「癌患者は現在、腫瘍周辺一帯への照射を受けなければならない、内臓の中には、視認が困難であるため治療が特に難しいものもあります。Linac MRは放射線治療を変えようとしています。」

実際の測定が不可能な時、 Multiphysics がその答えを提供してくれます。

高炉内のある特定の過程においては、高温により実際の測定が不可能になります。TRB 社では、高炉内の実際の温度を得るため、高炉ルーランナーの実際の外側温度情報活用と共にシミュレーションを使用しています。

Terres Réfractaires du Boulonnais (TRB)社、Simon Chiartano氏による寄稿

溶融金属が 1500°C 近くまで達する高炉では、従業員の労働環境と製造設備を安全に保つため、ありとあらゆる全ての予防対策を取らなければならない環境にあります。潜在的危険性を伴っている作業の1つは、溶融金属がまず出鉄口からランナーを通り、ス

ラグとの分離場所まで移動する場面です。もしそれが無防備にむき出しになっていたとしたら、溶融金属ははねて、オペレーター及び機械類はかなり危険な状態にさらされるでしょう。製造工程が一時停止してしまうかもしれません。

跳ね上がりを抑えるため、また安全対策のため、ランナーセクションにはルーフが設置されています。その内側の材料はコンクリートで、外側は鋳鉄で製造されています。この裏張り材料はとても重要で、その裏張りなしでは、跳ねた溶融金属はすぐに溶けて鋳鉄に穴をあけてしまうでしょう。

コンクリートの裏張り素材は、腐食、浸食及び熱衝撃を考慮に入れて製造されています。ルーランナーの一般的な寿命は1か月で、その期間が経過すると再度新しく裏地をつける必要があります。高炉1機には、複数、時には4個の出鉄口があります。TRB社には数百という高炉があるので、全般的な安全を維持する一方で、可能な限り経済的な設計をする方が有益となることは確実です。

ランナー設計に関しては、その中で実際にどんなことが起こっているのかを正確に測定することが不可能だったため、昔からおおざっぱな科学として扱われてきました。今までは試行錯誤しながらルーフの裏張りコンク

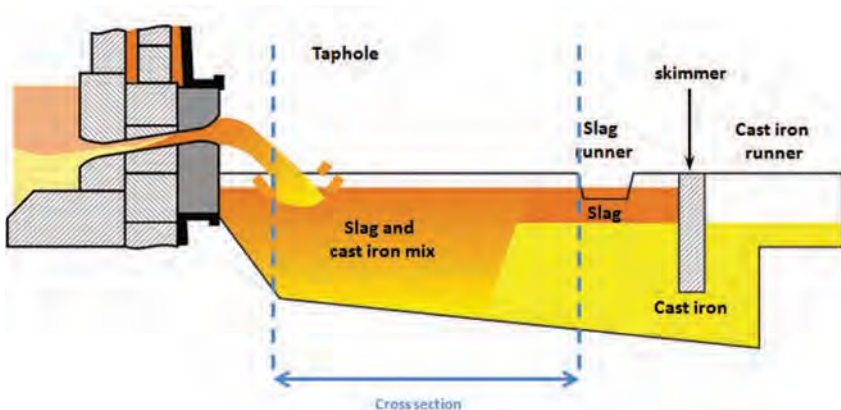


図1：溶融金属が高炉から出てくる（左）スラグが鋳鉄と分離されるランナーを通過（右）。上記中央部、COMSOL Multiphysics を使用して研究された横断面部分を表示（図2参照）

「私たちは内部にセンサーを設置することができません。なぜならば、そのセンサーは高熱と飛び散る熔融金属に接触してしまいます。それによりこの高価な機器は破壊されてしまいます。」

リートを選んできました。ルーフの裏張りとしては最適なコンクリートの種類なのではないかと推測され、最適な厚さだと思われたコンクリートが使用されてきました。

もし裏張りが即座にダメージを受けてしまった場合は、ただ単に新しい組み合わせを試みて張り替えただけでした。この組み合わせは、裏張りが接触している高熱を考慮して決定したものでした。しかしながら、私たちは今までこの内部温度に関してほぼ無知な状態でした。300度? 1000度? でしょうか? 全く分かりませんでした。私たちは内部にセンサーを設置することができません。なぜならば、そのセンサーは高熱と飛び散る熔融金属に接触してしまいます。それによりこの高価な機器は破壊されてしまうからです。その代わりに私たちは COMSOL Multiphysics シミュレーションの伝熱モジュールを使用し始めました。

オープン予熱

通常の運転状態下で、熔融金属は、室温でランナー内には入ってくることはありません。そのため、私たちのシミュレーションの第一段階は、500℃のガスバーナーで予熱されたランナー使用という設定でのシミュレ

ーションでした。このモデルでは、今後の全研究で重要な役割を果たす 2D ジオメトリの断面図が作成されました (図 2 参照)。この図では、2色の茶色が表示されていますが、これは、2種類の異なるコンクリートを示しています。一方のコンクリートは熔融金属と接触するため、流体、腐食、熱衝撃に対して耐久性が必要になります。このモデルでは、唯一、この内層のコンクリートのみを考察しています。そして2種類目のコンクリートは熔融金属との接触はなく、機械的なフレームとしてのコンクリートです。コンクリート上の予熱の影響を研究する時点で、私たちは熱伝導のみをシミュレーション設定し、空気対流やガスバーナーによる固定温度予測などは設定に含みませんでした。その結果は、さらなる研究への出発点となりました。

ルーフ下の空気は動いているのか?

先ほど記載した通り、予熱シミュレーションの次の段階は、高炉内の熔融金属が最初に流し出され、ランナーに送られてくる箇所での研究です。この時点で、私たちはルーフ下の空気の温度情報を得、時間経過とともにその温度変化を確認しました。高炉内で熔融金属がランナーを通過する様子を 75 分

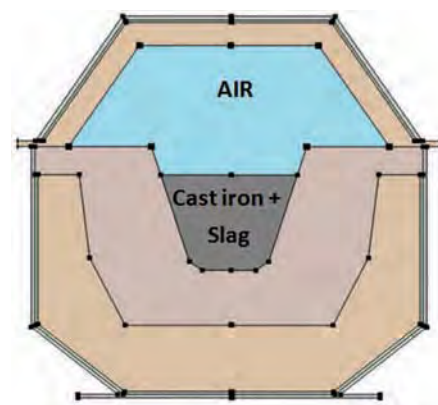


図 2: ルーフランナーの 2D ジオメトリ。熔融金属は、コンクリート裏張りとは接触し、外部は鑄鉄。

間、このモデルで研究しました。ここでは、空気の自然対流と共に固形成分表面に接触することによる熱移動を組み合わせてみました。モデルでは、液体が接している壁が金属温度 (1500℃) と同じ温度に達するまでに 300 秒かかりました。一度私たちがこの状況に達すると、図 3 で表示されたようにレイヤーを通して伝熱はゆっくりと進みました。

興味深いことに、約 500 秒間、空気プロファイルはほぼ静止状態でした (図 4 参照)。この事実はその先のモデリング段階にとって、とても重要な役割を果たすことになります。具体的には、私たちは、特に重要な情報、空気の流れの影響などを含ませずに、これらの段階を単純化しました。

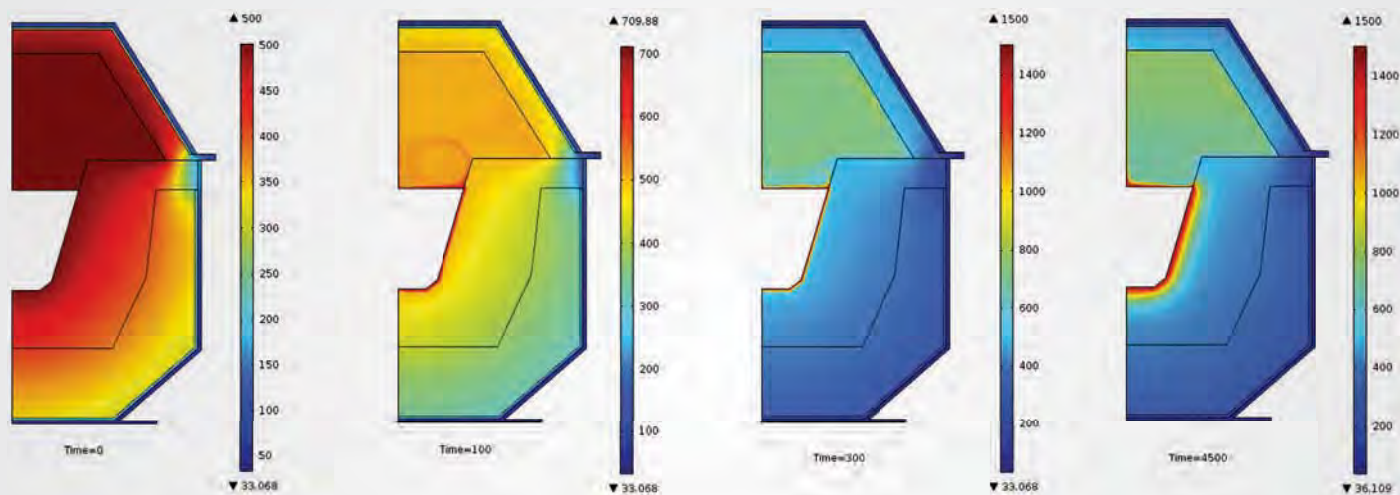


図 3: 300 秒後のシミュレーション結果。正確に 1500℃に達した時の状況で、主に伝熱により生じた熱移動を表示。

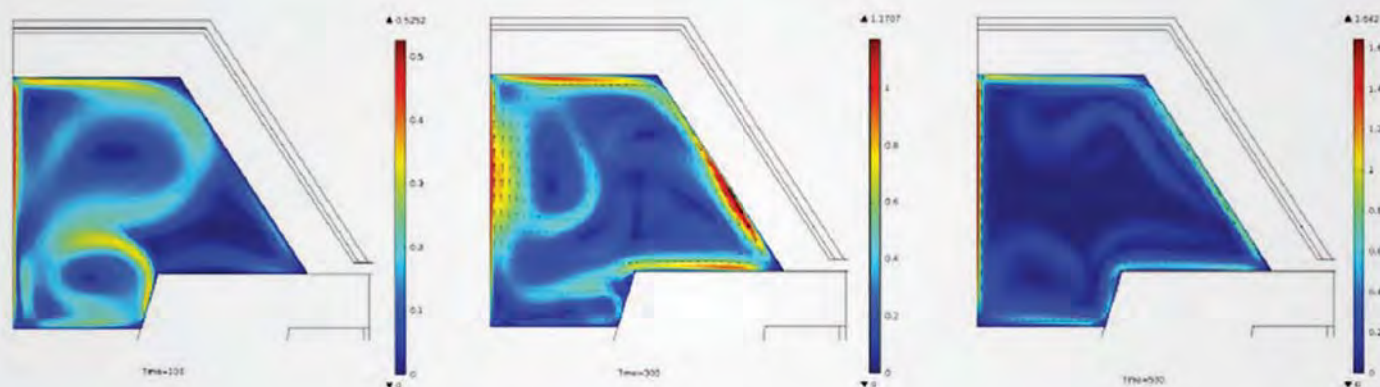


図4：最初の出銑口内のシミュレーション COMSOL Multiphysics シミュレーションでは、500秒後におけるルーフランナー下の空気はほぼ静止状態を示す。

7日間の熱サイクルのシミュレーション

しかしながら、最初の出銑口内の研究では、ランナー全体を熱する場面で時間不足となり、そのため、最終的なゴールである、実際に検証可能な結果を得ることができませんでした。高炉内の実際の様子を理解するという段階に近づくため、次の段階シミュレーションでは、75分間、熔融金属がランナーを流れ続ける状態を維持し、そしてその後75分間は流れを静止させるというサイクルを作り、このサイクルを7日間続けるというシミュレーションを行いました。先ほど記述した通り、この段階では、空気対流は含まれません。ここでの温度設定は、1つ手前の段階で確定

された温度での空気が存在していると見なされた内部の壁の温度で設定を行いました。

しかしながら、ここまでの段階で、私たちはある、1つの仮定にたどり着き、その仮定は結果に影響を及ぼすため、モデリングの改良を検討していました。事前段階のモデリングでは、裏張りに面している空気温度を500°Cに設定しました。しかし、金属がランナーを通過していない時は、裏張り部分の温度は、即座に金属温度の1500°Cから私たちが設定した500°Cに変化するわけではありません。しかし、私たちは前回のシミュレーション同様、大きな相違点を持ちながらも、次のシミュレーション段階へと進みました。溶

融金属が通過しているとき、液体が接触している裏張りは1500°Cに触れていて、金属が通過していない時は、500°C設定という代わりに、熱的に絶縁されたという状態を設定しました。

このランナー通過と通過無し、を繰り返したシミュレーションを24時間モデルで研究しました。その結果は図5に示されます。

トレース6は熔融金属に接している空気温度（上部、点線ライン）設定レベルは1500°C。熔融金属に接する事が無い場合は、空気温度は、約750°Cにまで下がります（下部、点線ライン）。その温度は、前回のモデリングで設定した500°Cよりも明らかに高温

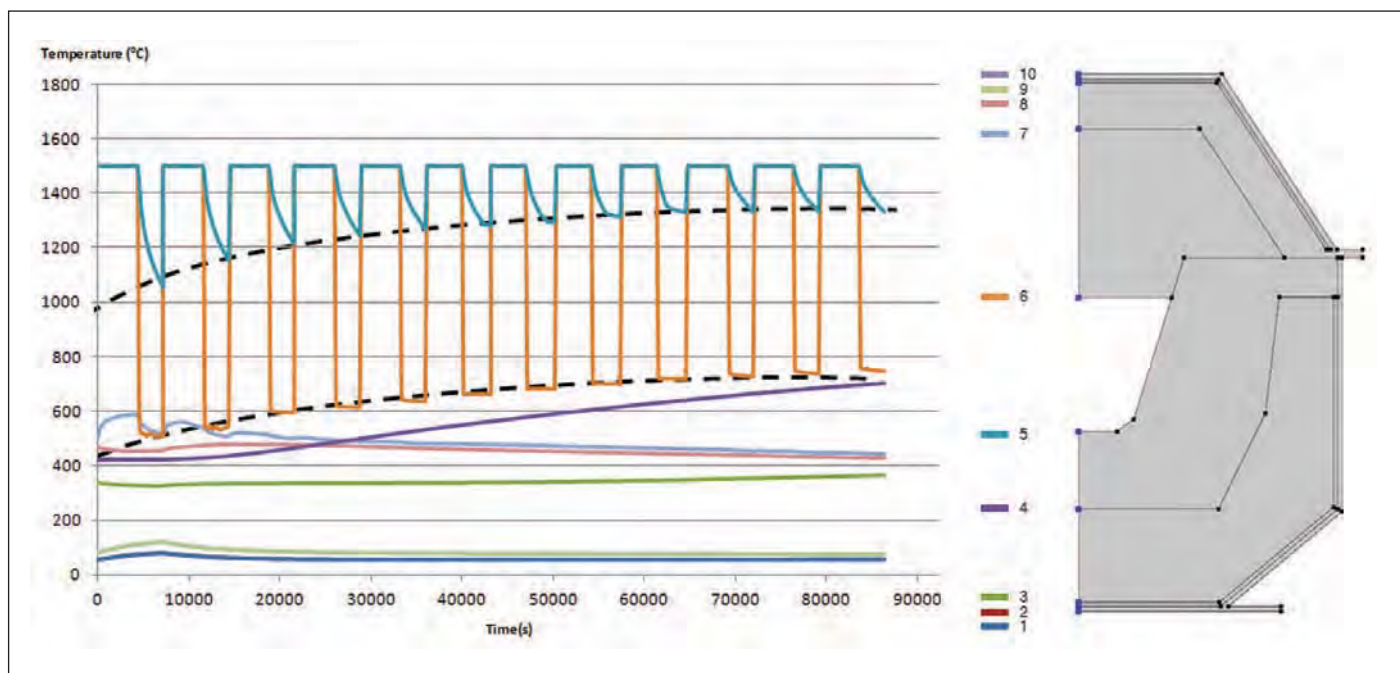


図5：24時間シミュレーションの結果 トレース6と7は、それぞれ、熔融金属に接している空気温度と内部裏張りの上部を示している。

だということが確認できます。トレース7では、上部の内部裏張りに接している空気温度を示しています。そして24時間後からは、その温度は約430℃で横ばいが続いています。

最終的には、丸々1週間かけて、鋳鉄の外郭構造の外側の温度が最終的にはどれくらいまで達するのか、研究を行いました。シミュ

にイメージ技術を使用しました。(図7参照) その蓋を開ける時、内部温度は急激に下がり、その為、稼働中の内部の実際温度はもっと高温だということを認識しました。

図7では、最高温度は300℃です。この数値は私たちに自信を抱かせてくれました。なぜならば、私たちが行ったシミュレーションで

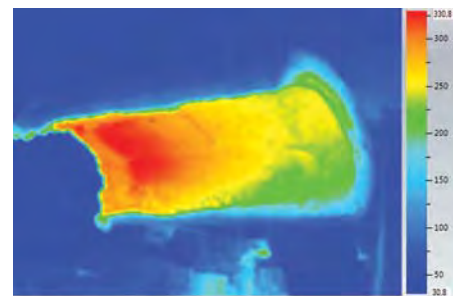


図7:ルーフランナー内部のサーモグラム(上) 同じ角度からの標準写真(下)

「シミュレーションのおかげで、私たちは10度差以内で正確な計算に達することが出来ました。」

レーション時間を適切に確定するため、1段階前のシミュレーション終了時に取得した空気温度を設定することで、この作業を簡素化しました。図5でも示している通り、内部空気温度は基本的に安定しているためこの数値は効果的なものです。同様に、図6内の結果にあるように液体に接触している温度も設定しました。そしてこの作業は6日間繰返され、外殻は約80℃に達することを確認しました。

シミュレーションによってルーフランナーの最適化を確認

モデリングを確認するため、実際のルーフランナーの温度イメージ写真を撮影しました。(図6参照) その温度は76℃で、モデリングとほぼ一致していました。次にルーフランナーを開け、ライナーの温度を測定するため

は、その温度(図5のトレース7)は430℃ですが、温度は約100℃ほど低下するだろうと推測されるため、私たちの目的には十分正確な数値でした。この温度がこの後どう変化するのか、それ以前は全く分かりませんでした。今ではシミュレーションにより、10℃以内という正確な計算に達することが出来ました。このシミュレーションにより、ルーフランナー内部変化の理解はかなり深まりました。

蓋の内側の温度は400℃~500℃間だということを知ったときは、かなり驚きました。私たちは、その温度はもっと高温だろうと推測していました。コンクリートライナーはとても厚みがありましたが、シミュレーションの結果、今まで、その厚みに期待を寄せすぎていたことを学びました。

未だ、ルーフ内の摩耗メカニズムを完全

に理解してはいませんが、シミュレーションにより素晴らしい洞察をすることが可能となりました。ルーフランナーのコンクリートの厚さを薄くしても問題ないという確証を得ることもできました。ライナーを薄くすることにより、将来的にルーフランナーにかかる材料コスト削減に加えて、その薄さにより操作しやすくなり、生産速度向上にもつながります。

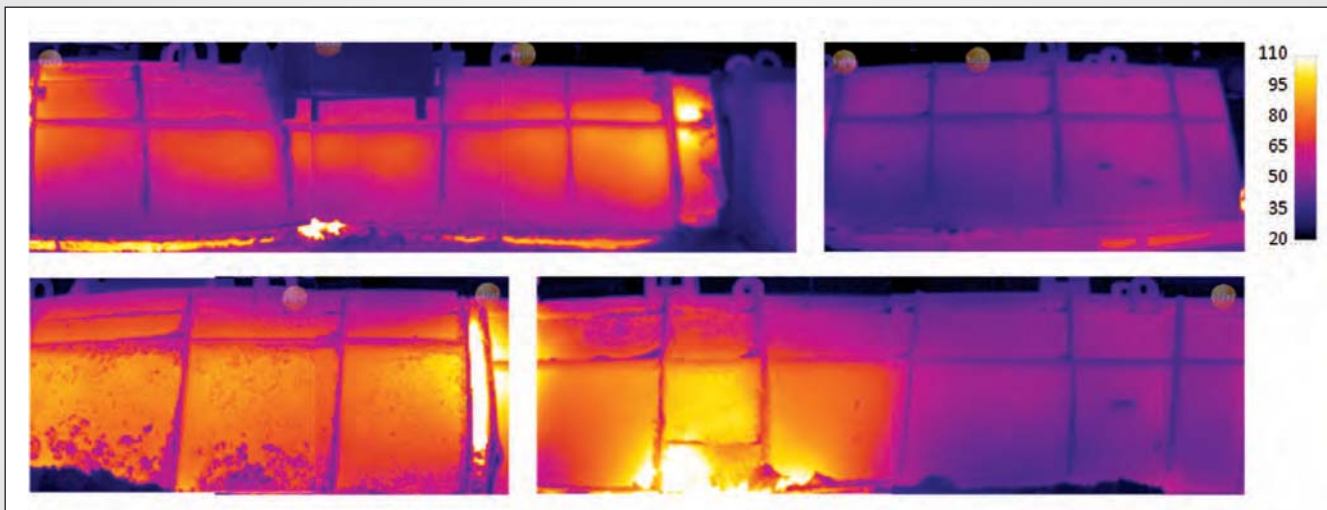


図6: 実際のルーフランナーのサーモグラム

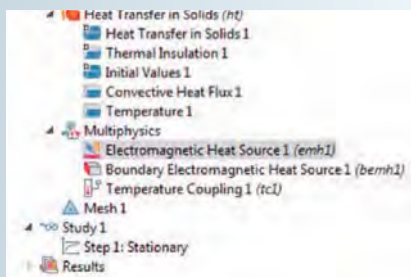
～マルチフィジッ

COMSOL Multiphysics ver. 4.4 には、新製品ミキサーモ
詳しくは弊社 Web をご覧ください!

Product Update

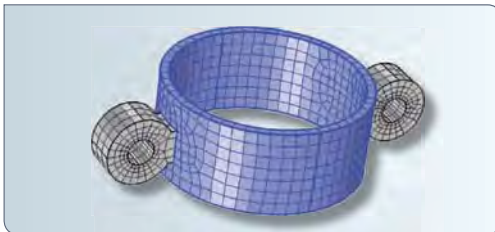
マルチフィジックスワークフロー

ワークフロー改善のための新しい「マルチフィジックスノード」を実装しました。設定された全てのフィジックスを独立したフィジックスインターフェースとして見ることが可能です。マルチフィジックスモデリングを単一フィジックスの設定から開始できます。



メッシュとジオメトリ

ワークプレーン情報が改良され、ジオメトリサブシーケンスには If-Else 構文が追加されるなど、様々な機能が強化されています。またメッシュには NASTRAN 形式メッシュのエクスポートなどの機能強化を行いました。



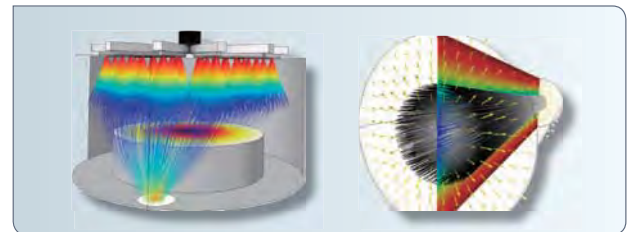
| COMSOL M | | | |
|----------|----------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| 電磁気・光学系 | AC/DC モジュール | 機械・構造系 | 伝熱 モジュール |
| | RF モジュール | | 構造力学 モジュール |
| | 波動光学 モジュール | | 非線形構造材料 モジュール ^{※1} |
| MEMS | MEMS モジュール | ジオメカニクス モジュール ^{※2} | CFD モジュール |
| | プラズマ モジュール | 疲労 モジュール ^{※2} | マイクロ流体 モジュール |
| | 半導体 モジュール | マルチボディダイナミクス モジュール ^{※2} | 地下水流 モジュール |
| | | 音響 モジュール | 分子流 モジュール |

New! New マークの製品はバ

※1. 非線形構造材料モジュールは、構造力学または MEMS 各モジュールのいずれかとの併用が必要です。
 ※2. ジオメカニクスモジュール、疲労モジュール、マルチボディダイナミクスモジュールは、CFD モジュールとの併用が必要です。
 ※3. ミキサーモジュールは、CFD モジュールとの併用が必要です。

粒子トレーシングモジュール

粒子 - 場と流体 - 粒子の相互作用の計算効率の向上と共に、必要となるモデル粒子を大幅削減しました。また円錐内の解放粒子の初期速度の設定が可能になり、ジェットやスプレーで流入する粒子シミュレーションがより容易になりました。



COMSOLの進化論～

モジュールの追加と、数多くの改良が加えられています。

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

Multiphysics®

| | | | |
|---------------|--------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|
| 反応工学 モジュール | 汎用 最適化 モジュール | インターフェース LiveLink™ for MATLAB® | LiveLink™ for Microsoft Excel® |
| 燃料電池 モジュール | 材料 ライブラリ | CAD インポート モジュール | ECAD インポート モジュール |
| 燃焼 モジュール | 粒子トレーシング モジュール | LiveLink™ for SolidWorks® | LiveLink™ for SpaceClaim® |
| 腐食 モジュール | | LiveLink™ for Inventor® | LiveLink™ for AutoCAD® |
| 気化学 モジュール | | LiveLink™ for Creo™ Parametric | LiveLink™ for Pro/ENGINEER® |
| | | LiveLink™ for Solid Edge® | File Import for CATIA® V5 |

バージョン 4.4 で追加された新製品です。

併用が必要です。
いずれも構造力学モジュールとの併用が必要です。

New in COMSOL Multiphysics®

ミキサーモジュール

製薬、化学、食品産業において、ミキサーの動作を理解し、設計し、制御するためのモジュールです。回転する機器内の層流や乱流の反応流 (完全な移動メッシュのサポート、凍結ローターへのアプローチ、自由表面、既製アプリケーションの添付) に対応しています。本品は CFD モジュールへのアドオンです。



※本モジュールは CFD モジュールと併用するアドオンです。



Windows 版の画面例

Mac OS X 版の画面例

Windows ライクなリボン形式 インターフェースの採用

Windows 版は Microsoft Office 2010 等で採用されているリボン形式のインターフェースを導入、機能がより分かりやすくなり、作業性と作業効率が改善されました。

Windows 以外の OS においても、機能のアイコンをウインドウ上方にツールバー形式で集約して、Windows 版同様に作業性と作業効率の改善が図られています。

Silent Air Cooling : 温度管理の新たなアプローチ

Tessera Technologies 社の多くの専門分野にわたるチームは Ultrabook の冷却用に、まったく新しいシステムを開発するため、シミュレーションを活用してきました。

執筆者 JENNIFER HAND氏

列車内での読書に使用する薄くて軽いタブレットは、エンターテインメント、説明、コミュニケーションに不可欠となっています。しかし、重要なデータの取り扱いには、より大きな装置の処理能力が必要であり、静かな動作に慣れているタブレットのユーザーが、ノートブックや、もっと薄い Ultrabook に向かうとき、最初に気になるのは、…騒音です。

最適な性能の基本的条件は、電子機器からの熱を除去することであり、これは必須のことからです。携帯用コンピュータにとって、このことは、今日までに小型の機械的なファンによって実現してきました。「薄型」Ultrabook に望まれるのは、一般的なファン装置が 10 ミリ以下の高さに収められることです。空隙とケーシングのための許容される全体は 2~3 ミリで、実際のファンブレードの大きさは僅か数ミリ程度にすぎず、これはファンが有効に機能する限界に近づいています。最新のファンには、5 ミリ以下の空間で動くものもありますが、性能は著しく低下します。なぜならば、より小さいブレードは、1 回の回転で生じる空気が少なくなるので、より早い回転が必要となるため、騒音が発生するのです。実際のところ、顧客の騒音の許容範囲が、さらに低下してきたちょうどそのとき、エンジニアは、ファンの技術を改良することがほとんどできなくなっていました。

2001 年にワシントン大学の学生だった Nels Jewell-Larsen 氏は、この分野の研究の必要性を認識し、開発計画を開始しまし

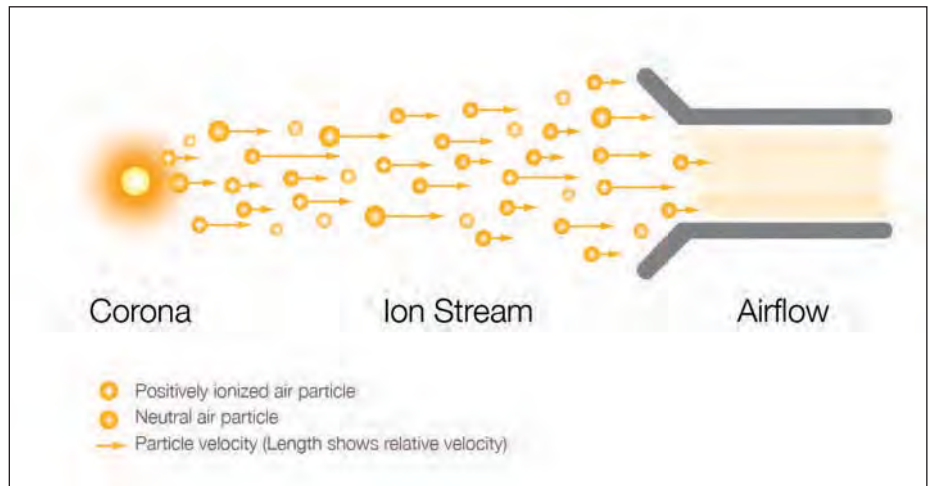


図 1: Silent Air Cooling™ の動作原理

た。ロータリーファンに替わる静かなファンの開発は、このときから彼の主要な業務となりました。過去 5 年間、彼は Tessera Technologies 社で専門家の開発努力の先頭に立つシニア・プログラムマネージャーとなっていました。

そこでは、Ken Honer 氏が部門長でした。「私たちは、世界で最高のチームを作りました」と Jewell-Larsen 氏は言っています。「私たちは、材料科学、機械および電気に関する設計、温度管理、大量生産などの分野の専門家を招聘しました。「私たちは、私のオリジナルのアイデアを実際の製品へと発展させてきました。この製品は、初期の大学の実験室のプロトタイプを超えて、飛躍的に進歩を遂げています。

この結果、Tessera Technologies 社は、進歩した技術に基づく新製品の Tessera Silent Air Cooling™ を発売しました。

回転ブレード不要

「恐らく最初に注目すべきことは、Silent Air Cooling は、空気を動かすために回転ブレードを使わないので、ファンではないということです。これは、まったく異なったコンセプトで、空気の流れを生み出すために電場と荷電した空気を使います。電気流体力学はこれまでこのような方法で実行されたことはありませんでした。」と Jewell-Larsen 氏は言います。この技術は、外気中の窒素分子を荷電させ、押し出す電場に依存しています。すなわち、これらは、空気中の他の分子

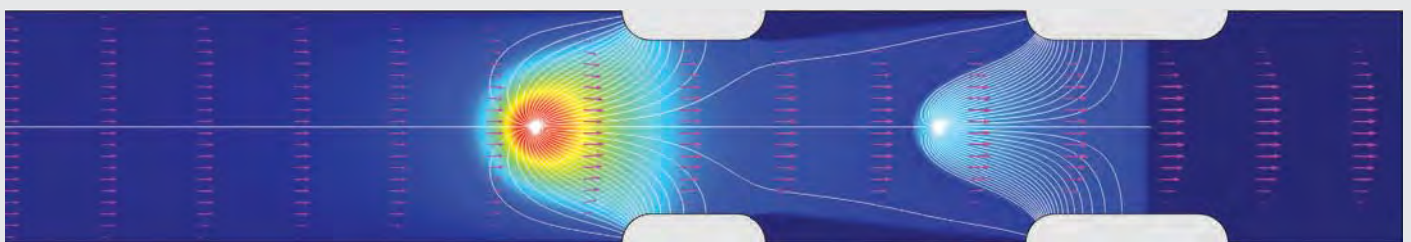


図 2: 2段階の Silent Air Cooling の空気の動きのマルチフィジックスプロット図。白い線で示された空間電荷磁束線を持つ表面マップ（赤色は、より高い空間電荷密度を示す）としての空間電荷密度。気流速度は矢印で示し、矢印の長さは、速度を直線的に計測したものだ。



図 3：鉛筆と比較した Silent Air Cooling の大きさ

と衝突し、運動量を移転することで、層流のたゆまぬ流れを作り出します。これには、2つの電極間の電圧の使用などがあり、プラスに帯電した窒素イオンを生み出す電極の1つの付近で、非常に高い電場を生成します。生成されたイオンは、第2の電極へと押し出され、一定の圧力源を生成します（図1参照）。「この電場は、時間とともに変化することがないので、圧力波が発生しません。従って、実際に音が発生しません。」 Silent Air Cooling (SAC) は、騒音が出ないことに加えて、回転ファンブレードが不要で、その上下に吸排気空間が必要ありませんので、4 mm以下の非常に薄い空間に取り付けることができます。

「シミュレーションは、私たちの製品開発の中心にあります。なぜなら、このチームは、静電気、荷電の発生と輸送、流体力学、伝熱などを考慮する必要があるからです（図2参照）。私たちは、ニッチな分野で研究しており、これを始めたときは、この目的に適應したシミュレーションソフトウェアはありませんでした。そこで私たちは、いくつかの提案

を検討しました」と Jewell - Larsen 氏はコメントしています。「私たちは、一時、特注のソフトウェアも検討しました。そのとき、構造的に柔軟性があることを理由に COMSOL Multiphysics を使い始めました。」

熱解析エンジニアリーダーの Gustavo Joseph 氏は、このことを詳しく説明しています。「多くのソフトウェアパッケージは、流体あるいは静電気力の動きを単独で簡単にシミュレーションすることができません。シミュレーションが非常に難しいのは、イオンの生成、イオンの電場への輸送、必要な冷却

「シミュレーションは、私たちの製品開発の中心にあります。なぜなら、このチームは、静電気、荷電の発生と移動、流体力学、熱伝導などを考慮する必要があるからです。」

流をもたらす空気分子で発生する力です。COMSOL Multiphysics は、全て私たち自身の方程式を作成し、これを既存の流体力学や静電解析と連成することができる、唯一の民生用 (COTS) ソフトウェアです。」

Joseph 氏 と Jewell - Larsen 氏 は、COMSOL Multiphysics を使って、新技術のコアエンジンを設計し、このチームによって「Blower(送風機)」と命名されました。「主な目標は、冷却のために圧力と空気の流れを最大化することでした。従って、私たちは

様々な幾何図形や材料をシミュレーションし、これらのパラメータの最適化を図りました。COMSOL Multiphysics で、この送風機の主要な技術を設計した後、その他のシステムを設計するために、これを CAD ソフトウェアに移植しました。」

最終結果は、15 デシベル以下で稼働し、信頼性が高く、コンパクトな機器 (図3) となりました。これはヒアリングの平均的な基準値を下回っていました。追加的な特徴としては、自動クリーニングシステムなどがあり、ベアリングがないので、このシステムのメンテ

ナンスは簡単です。Tessera 社は、この分野で 140 件以上の特許を取得し、2012 年の後半には試作品の製造に着手しました。対象とする市場は、携帯用コンピュータ機器のサプライヤーで、Tessera 社は、この技術のライセンス供与を望む企業と協力しております。

静かでパワフル

「タブレットは携帯可能で静かです。Ultrabook は、強力、高機能、薄いですが、騒音ができます。これまで、パワーがあり、完全に携帯が可能で、静かな機器はありませんでした。Jewell - Larsen 氏は断言します。「今はそれがあります。私たちは、この技術が Ultrabook で使われていることを実証してきました（図4参照）。そして、私たちの目標は、できるだけ多くの機器にこの技術を取り入れ、設計者が、ますます薄くなるフォームファクターを自由に作成できるようにすることです。この技術は、ユーザーに対して、本当にプラスの衝撃を与えることになるでしょう。」

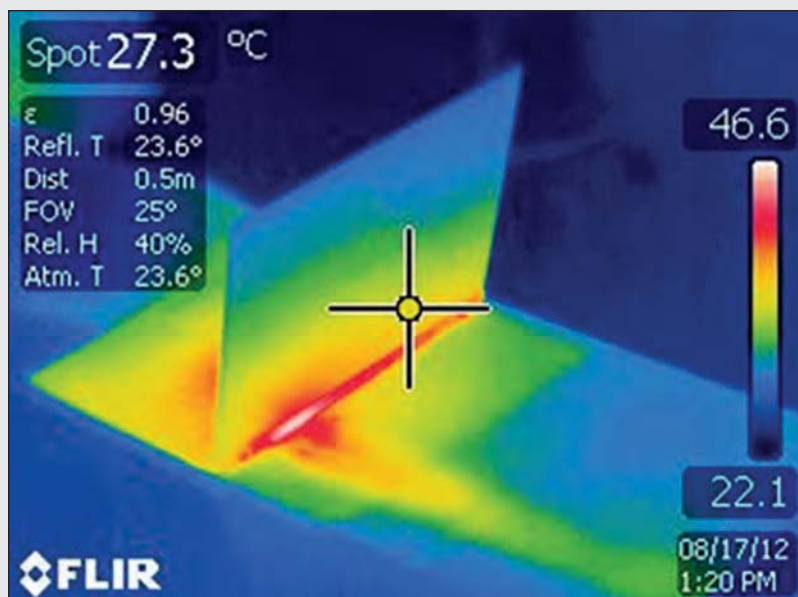


図 4：Silent Air Cooling の空気の動きによって色づけされた Ultrabook のサーモグラム

スパイラル共振器フィルタの分析

小型化と同時に、日々、性能改善が求められるもの
～最新式ワイヤレスシステムでの最新フィルタ設計の向上

AltaSim Technologies社、Sergei P. Yushanov氏、Jeffrey S. Crompton氏、Kyle C. Koppenhoefer氏による寄稿

ワイヤレスシステムへのさらなる最新化要求が高まる中、性能基準、複数の同時操作、その両方を同時に満たす最新設計の導入が必要とされています。高速データ転送レートシステムの実現にはマイクロ波フィルタの革新的な設計の進歩が不可欠です。そのフィルタは、更に小型化されたワイヤレスシステム内での複数フィルタの一体化の実現が必要となっています。さらに、フィルタのバンドパス周波数と品質係数は、システムジオメトリ及びトポロジーの制限内でおさまらなければなりません。スパイラル共振器フィルタを従来のリング共振器と比較してみると、その小型化は顕著で、それによりある1つのオプションが生じています。スパイラル共振器の配列に関して、プリント基板上で直接製造が可能となり、その特徴的な応答から最少容量で収まるように設計が可能です。

これらの機器操作の特性を明らかにするため、高周波信号とこの機器との相互作用定義を示す散乱行列 (S 行列) と呼ばれる数学的構造が使用されます。その信号は反射し、他のポートへと移り、熱あるいは電磁放射を介して消失します。S 行列はこれらの各信号パスを表現します。

この S 行列の順番は $n \times n$ で、この時 n は、システム内のポートの数を表します。そして散乱での「 S_{ij} 」が表しているのは、「 j 」は入力ポートを表し、「 i 」は出力ポートを表します。ポート1上入力用のポート1から反映された信号率を S_{11} は定義し、 S_{21} はポート1

の信号からポート2への反応を定義します。

スパイラル共振器シミュレーション

スパイラル共振器を使用した小型化マイクロストリップフィルタ (図1参照) は、共振周波数 7.2 GHz (Lim et al.) を発生するようにデザインされました。

COMSOL Multiphysics を使用して、モデリング設定を行いました (図2参照)。その中でマイクロストラップラインが示しているのは、誘電体基板の表面にある完全導体 (PEC) で、接地の役目を果たすこの基板下部表面には他の PEC があります。2つの集中ポートは小さな四角形で設定され、接地の PEC 表面と各ポートのマイクロストリップラインをつなぐ役目をもっています。放射界の反射を避け、モデルドメインの小型化を図るために、

散乱境界 (SBC) 表面によって区切られた小さな空気領域が追加されます。誘電体基板を含むモデリングは、比誘電率を使用して定義されました。

図3では、周波数帯域内と帯域を超えた実験結果とシミュレーション結果が示されています。 S_{11} は、ポート1上の入力で、ポート1から反射された信号率を表現し、 S_{21} は、ポート1での信号に対するポート2での反応を表しています。

送信信号と反射信号のシミュレーション結果は実験結果とほぼ同値になりました。必要な遮断周波数以外の周波数の遮断のデモンストレーションも行いました。基準面 $|S_{21}| = -10$ dB における共振器周波数は 7.2 GHz で、除去帯域の帯域幅は 0.5 GHz (7.1-7.6 GHz) です。阻止帯域 ($S_{21} > -50$ dB) は、急勾配

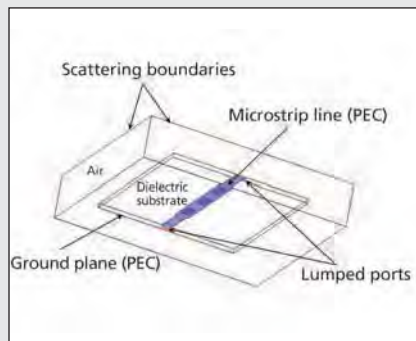


図2：帯域除去フィルタのモデル。可視化のために、複数の外側部品は、はずされた状態で表示。

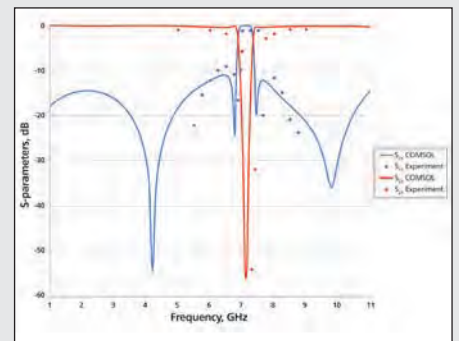


図3：帯域除去スパイラル共振器フィルタの周波数応答。COMSOL シミュレーションと実験測定値 (Lim et al.) との比較。

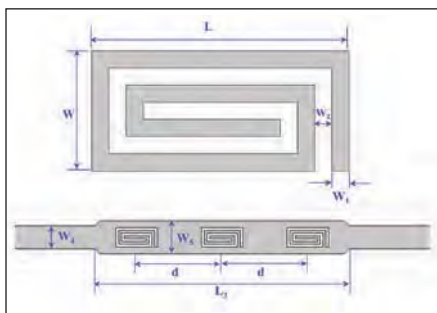


図1：長方形タイプのスパイラル共振器上のマイクロストラップフィルタは、マイクロストラップの中央ライン上にエッチングされている。

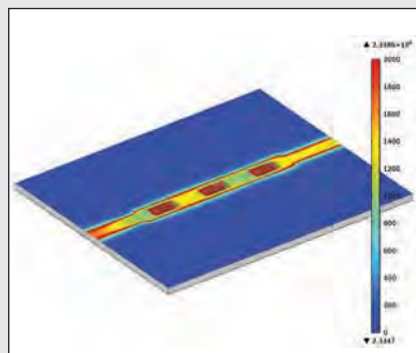
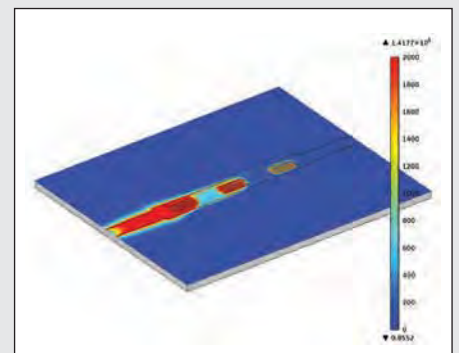


図4：電場 (左) と共振周波数 (右)



の遮断周波数と共振周波数にて発生され、平坦なバンドパス ($S_{21} < 1.2$ dB) が確認できます。それが示していることは、提示されたスパイラルフィルタ設計は低挿入損失で、そのため、回路が統合される際、その送信信号効率は制限されます。

以下の電場分布と共振周波数により、そのデータは可視化されています。(図4参照)

共振周波数以下には、その機器を介して送信されたハイレベル信号が表示されています。7.2 GHzの共鳴周波数では、ハイレベル信号は弱まり、そのため、明示された信号選択性レベルは、フィルタ設計により発展しました。

フラクタル・スパイラル共振器 帯域除去フィルタ

図5に示されたフラクタル・スパイラル共振器は Palandoken 氏と Henke 氏により開発されました。

このフィルタは2つのミニサイズの人工導電性磁気メタマテリアル単位セルから構成されており、2つの同心ヒルベルトフラクタル曲線が直接連結されています。オペレーションは、供給ラインと直接連結されている2つの電氣的に構成されたフラクタル・スパイラル共振器がもとになっています。送信 (S_{21}) と反射 (S_{11}) 損失のシミュレーション結果は図6に示しています。選択されたフィルタは100 dB/GHzで、3 dBのリファレンス挿入損失です。

フラクタルスパイラス共振器により進化された電場分布は図7に紹介しています。共振周波数以下の信号はフィルタを介して通ることが可能で、共振時、極端に低いレベルの信号送信とともに、信号は非常に弱くなります。

まとめ

スパイラル共振フィルタの性能は COMSOL Multiphysic を使用して分析され、実験データとほぼ同値であることが証明されています。7.2 GHzの共振周波数を備えたスパイラル共振フィルタベースの小型マイクロストラップは、高性能な低挿入損失及び規定の周波数帯域以上の明確な遮断周波数を示しています。1.3 GHz以下の共振周波数で動作するフラクタルスパイラル共振器は2つの磁気メタマテリアル単位セルから構成されており、100 dB/GHzでの高性能選択性を示します。

このタイプの分析を行うことにより、製造前他のフィルタ設計の性能評価や動作回路内の統合など作業を拡張して行うことが可能です。

参考文献

Ho Lim, Jong-Hyuk Lee, Sang-Ho Lim, Dong-Hoon Shin, and Noh-Hoon Myung, Proceedings of Asia-Pacific Microwave Conference 2007.

M. Palandöken, H. Henke, "Applied Electromagnetics Conference", p. 1-4, 2009.



図5：メカマテリアル・フラクタルスパイラル共振器のジオメトリ：2つのフラクタル共振器は、供給ラインに沿って線対称関係にある。

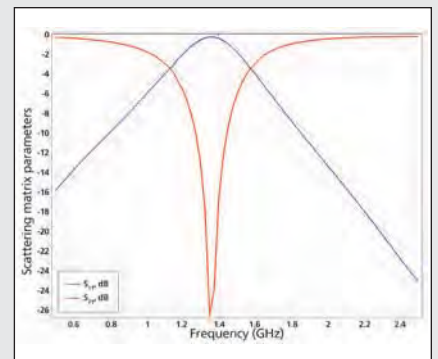


図6：フラクタル・スパイラル共振器の反射及び送信パラメータ

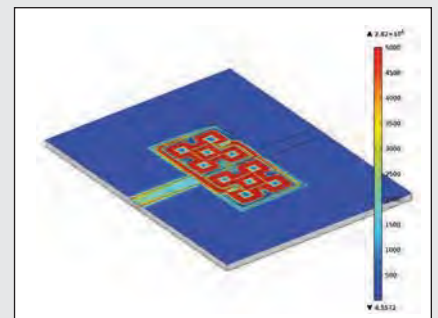
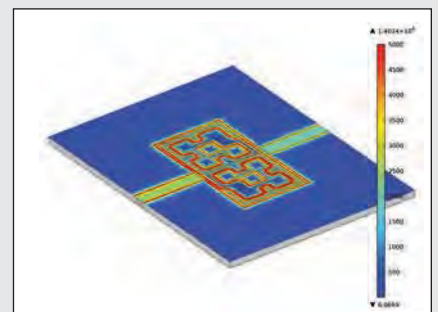
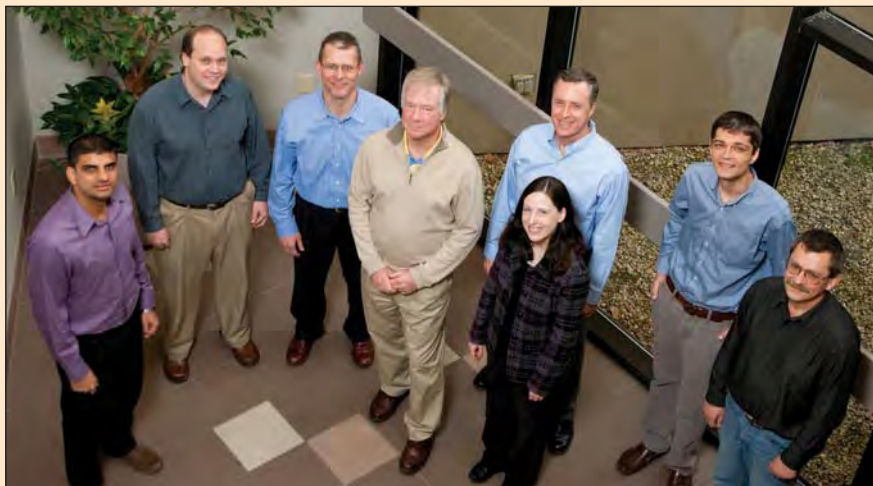


図7：共振周波数以下の周波数の電場（上）、共振周波数での電場（下）



AltaSim Technologies 社のチームメンバー

磁石の力で強力レーザービーム溶接品質の向上を

研究者達は、レーザービーム溶接品質の磁場効果の安定化を調査しています。シミュレーションにより、研究者たちは最適な磁場を確認することが可能です。

BAM Federal Institute for Materials Research and Testing
Marcel Bachman氏, Vjaceslav Avilov氏, Andrey Gumenyuk氏、
及びMichael Rethmeier氏による寄稿

Photo courtesy of BAM

船から原子炉容器まで全ての金属構造物の建造において最重要となる操作は、溶接です。溶接が失敗した時、建造物全体が失敗となることもしばしばあります。溶接の品質に対する期待は、さらに高いものとなっています。溶接のような局所熱源を利用

キーホールの作成

強力レーザービーム溶接では、最強度レーザー光量が当たっている微小加工金属部分にて気化が発生します。この深溶込み溶接では、その金属の加工点に「キーホール」と呼ばれる垂直キャビティが作られます。この

レーザービームに沿って動きます。溶けた金属は、そのキーホール近辺に流れ出て、その道筋を固めていきます。これにより、深く、広い溶接が形成され、その内部は統一された構造になっています。

アルミニウムの深溶け込み溶接でよく知られている問題は、アルミニウムは低粘度のため、溶け方が極めて動的になるということです。高い熱伝導性の性質も合わせて、とても幅が広い溶融池が形成されます。飛び散ってしまった結果その溶融表面は不安定になります。溶けた金属からの溶滴放出によりアンダーフィル、刻み目、へこみ、ブローホールや噴出などをもたらし、これらは全て、溶融機械的性質に有害影響を及ぼします。もし加工素材が不足している場合、不足溶接部分を覆うアーク溶接を含め、溶接後の処置が必要になります。処置を施すことで表面品質の評価基準となる外見上の溶接部分は、きれいに見えるようになります。加えて、表面が滑らかな溶接部分は 食品産業のような場

「この溶接工程は極めて複雑ですが、COMSOL Multiphysics のおかげで、私たちは正確な結果を得ることが出来ました。」

するプロセスでは、ある程度の歪みが発生することは多々あります。極めて厚みがある金属部品の溶接プロセスは、本質的には決して安定しているとは言えず、外部の力無しでは、管理が難しくなっています。

プロセスでは、金属は溶け、同時に蒸発が発生します。消散蒸発は、溶けた金属圧力に影響を及ぼし、部分的にはそれを、変位し、置き換えます。一方で、その素材は溶け続けます。その結果出来上がるのは、深く、広く、蒸発で満たされた穴、もしくは溶けた金属で囲まれたキーホールが形成されます。溶接ジョイントに沿ってレーザービームが進むと、そのキーホールも加工金属上をそのレー



Marcel Bachmann 氏、ベルリンにある BAM German Federal Institute Materials Research and Testing の研究者。レーザービーム溶接機の前で。

所で使用する機械には、とても重要です。溶接部分が粗く、表面がでこぼこしている部分はバクテリアの隠れ場所になってしまいます。

制御されていない溶接過程の影響は、溶接ビードから加速された溶滴に及びます。これらの溶滴はそのプロセスを「汚して」しまい、また溶接が冷却後、素材の不足状態を招いてしまいます。次に、マランゴニ効果により不均一な溶接に仕上がってしまい、加工対象物への圧力や歪みの原因となりえます。溶融池の一部は表面張力と電磁力の下で動き、加工材料の不均一な広がりや溶融池内の異なる凝固速度を誘発してしまいます。一度ビードが凝固すると、それは不均一な素材で構成されます。不均一な広がり方、不均一な冷却時間が原因です。

溶解速度の減速

そのような影響を緩和することは可能でしょうか？ドイツの研究財団である BAM は、それらのために多種多様な方法を研究しています。この特別なケースでは、レーザー溶接プロセスに定常磁界を印加しています。COMSOL Multiphysics を使用することによって、溶接の均一性を高めるために必要な磁場分布を決定しました。

特に私たちが求めているのは、マランゴニ効果を下げることです。表面上では、レーザービームが金属を溶接している加工点はとても高温になり、溶接部分から離れた箇所の温度

は急速に下がります。

その高温の勾配が、温度依存表面張力（マランゴニ効果）のために、金属の流れが溶融池の中間から外部境界へと流れます。私たちの目標は、完璧な溶接です。そのためには、この流れを抑制する必要があります。融池の表面の広がりよりも、エネルギーは深さに集中します。

完璧な溶接は平行な側壁で形成され、同時に深いところで凝固が起こり始めます。外部の力が加からない実際の溶接では、ワイングラスのような形になります（図 1 a 参照）。前部分が凝固し、強力な湾曲が起こっています。加工対象物にはかなりの圧力がかかり、それが冷却されると比較的大きな歪みが生じます。しかしながら、静磁界が溶接方向とは直角に存在する場合、溶接はより均一な形に形成され、V 字に近づき始めます（図 1 b-d）。これは、目指すべき形により近づいてきています。

溶接の形を変形させる性能は、Hartmann 効果によるものです。特に、熔融金属のような導電性液体にとって、磁場は、本来の溶融の流れ方向とは逆方向に働くローレンツ力をつくる電流を誘発します。この効果をモデリングするために、伝熱、流体工学、電磁気学を 3D でシミュレートし、CFD モジュールと AC/DC モジュールを使用しました。まず初めに私たちは、ローレンツ力を算出するため、磁場をモデリングします。その後、これらの結果は、溶融池内の乱流速度と圧力を計算するための体積力として活用されます。これにより私たちは、事前に行った乱流シミュレーションから得た速度場の伝熱を確認することが可能になります。もちろん、温度は材料特性に影響を及ぼします。そのため、私たちは一度元に戻り、ローレンツ力を再計算します。正確で首尾一貫した定常解を得られるシミュレーション段階まで、このサイクルは繰り返され、すなわち、関連した全ての物理が成立するまで繰り返されるのです。

このモデルを検証するため、私たちは磁石を含むケースと含まないケースで実際の溶接を行い、それらを切断し、マク

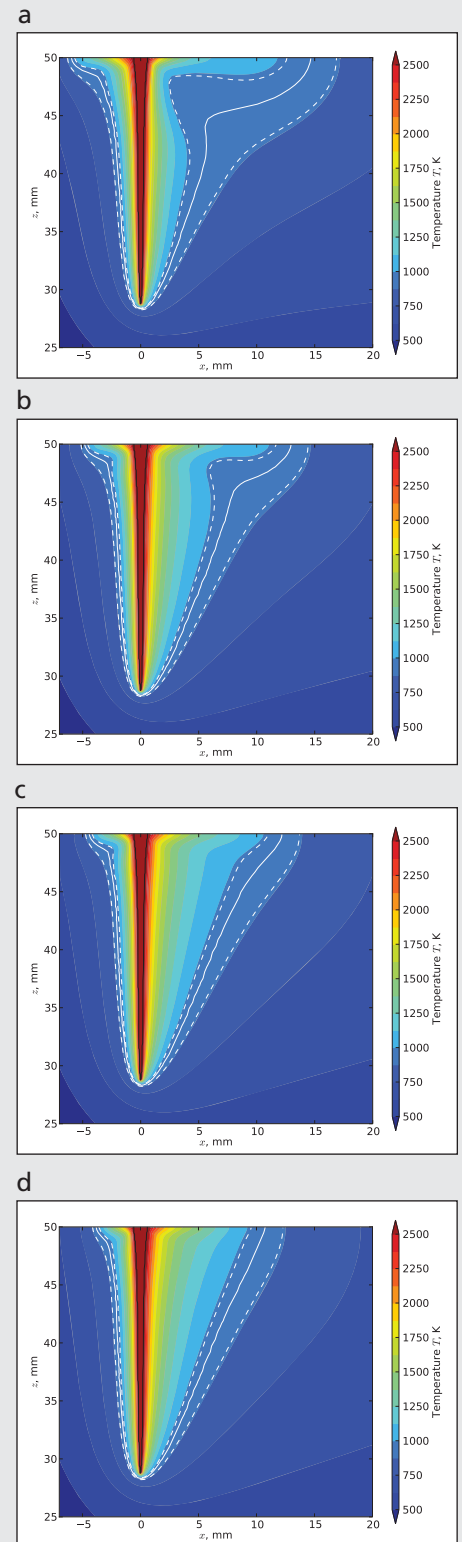


図 1：磁場が発生していない状態の溶接温度の対称断面図です。ワイングラスのような形を表しています。磁場の追加により (b = 0.50 T, c = 1 T and d = 2 T)、その形は少しずつ V 字に変化していきます。

口横断面を研磨しました。その後、シミュレーション結果を組み合わせて、素晴らしく一致した結果をしています。(図2) この溶接プロセスは極めて複雑ですが、COMSOL Multiphysicsのおかげで、私たちは、正確な結果を得ることができています。

私の考えでは、COMSOLの利点は、その操作のしやすさ、ジオメトリ組立やメッシュの作成しやすさ、そして、既定のマルチフィジックスモジュールの性能の良さです。言うまでもなく、手動でのチューニングオプションやケース毎のモディフィケーションが搭載していることも利点です。例えば、これらには、実験データ点列や解析方程式が由来する温度依存性の材料特性のようなものが含まれます。重力効果や融解潜熱を含み固相にある速度モデリングのためのソース項を使用しています。これらは全て、計算を行うために考慮すべき項目になりえます。

全ての物理分野からの数値が容易に取得入手できるそのソフトウェアの性能にも大変喜ばしく思いました。たとえば、溶融池内で発生している体積力がローレンツ力だと、わずかにワンクリックでわかります。これはわず

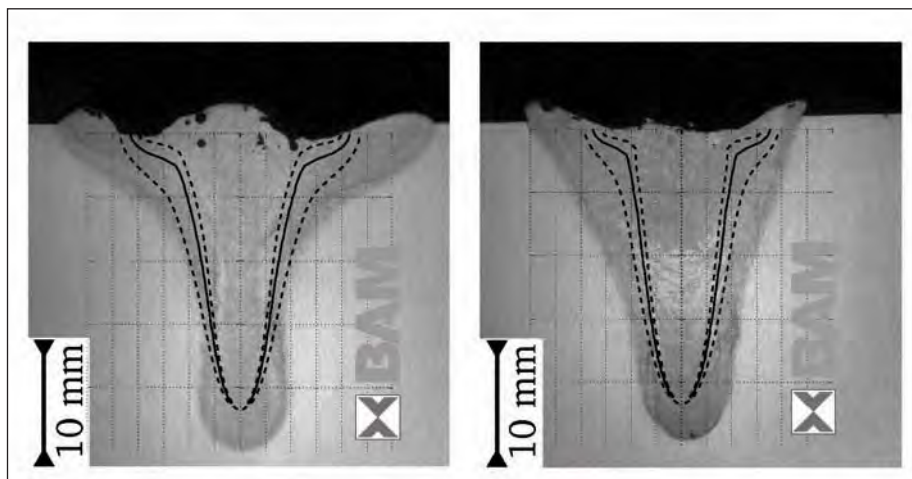


図2: COMSOL Multiphysics での結果を使用しての実際の溶接写真、16 kW でのレーザーパワーで、0.5 m/min の溶接速度で達した結果を重ねたもの。左のイメージは、磁場に力が加わっていない写真で、ウィングラスの形の結果を示す。右のイメージは $B = 0.5 \text{ T}$ のケースで、左側のウィングラスの形と比較して、サイドラインは直線的でよりV字の溶接を示している。

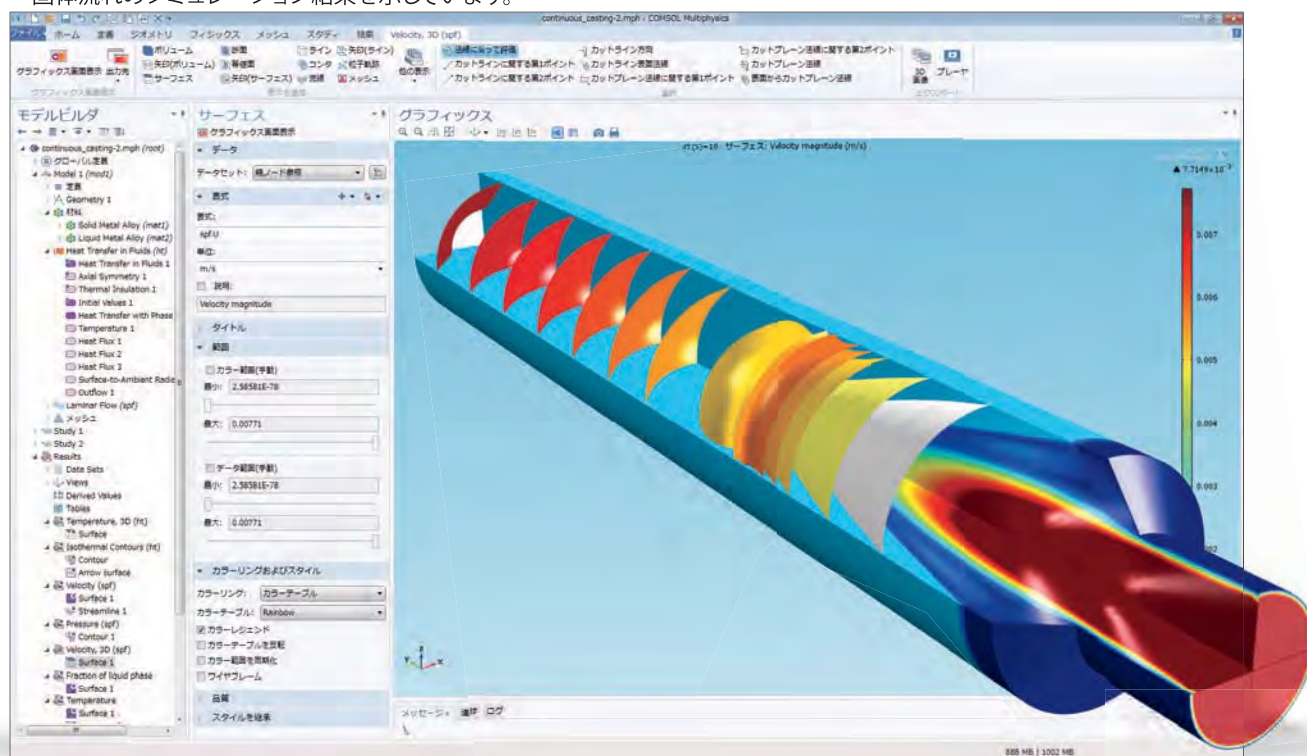
か1例にすぎず、このことは、現在行っている全ての、また将来私たちが必要としている全てのマルチフィジックスの連成に該当することなのです。

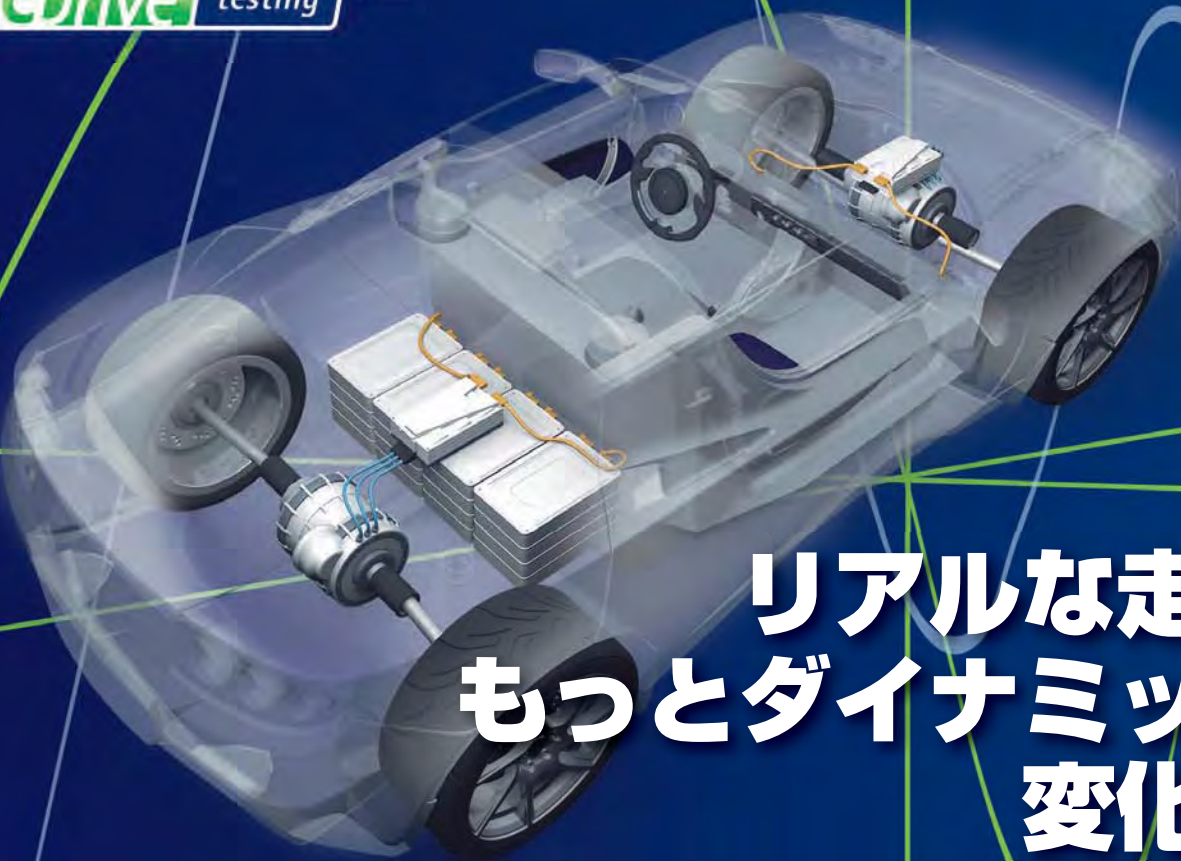
COMSOL Multiphysics シミュレーションのおかげで、特に重要な効果を特定することができ、そして今、それに対する対策を理解することが出来ました。次のステップは、

ここで得た知識をいかに大規模スケールで実践するかということです。どのような磁場が溶接プロセスの質を向上するかを特定し、そして全溶接プロセスを再定義するために、より進んだ実験を行うことになるでしょう。

連続 casting

下図は、熱輸送と、溶融物から固体への変相を伴う流体-固体流れのシミュレーション結果を示しています。





リアルな走行は もっとダイナミックに 変化する

革新のバッテリー・電動モータ評価システム

電動モータからの出力トルク・回転数と電源、インバータの電圧を一つのシステムで同期観測

- 計測信号を高速サンプリングで全部逃さずに保存
- ダイナミックに変化する電圧も、最大±1000V、最大2MS/sの高速サンプリングで直接取り込み、全データを保存
- HBMのトルクセンサを直接接続し、トルク・回転数を直接取り込み（トルクはノイズに強いHBM標準形式の周波数信号）
- 全ての信号を1台のPCの同一画面でリアルタイムに表示、同時に分析
- 電圧、電流、トルク、回転数データから、最小1/2電流サイクル毎にパワー演算が可能

eDriveを支えるのは、世界最高クラスのトルク計測技術と、高分解能DAQ

T12シリーズ

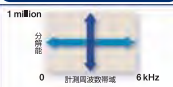


高精度トルクセンサ

ヒステリシスを含む
非直線性 0.01%

HBMのトルクセンサは、各国の計量研究所にも基準器として採用されています

高分解能・高応答性



安全性



柔軟性



効率性



高速サンプリング、高速データストリーミング 現場使用に最適なタッチパネル型DAQ



チャンネル間総線、最大18chの±1000V入力が可能

最大96ch（メインフレーム間同期で最大4500ch）の信号入力、200MB/sの高速データストリーミング、リアルタイム演算表示や収集データの再生が可能



ステルスアンテナのパターン分析

RF フィルタとして機能する周波数選択性表面 (FSS) は、幾何学的オブジェクトパターンから成り立っているアンテナのレーダ反射断面積縮小に貢献しています。それは文字通り何干という可能性があり、その可能性を1つ1つ実際にテストするには莫大な時間を有してしまいます。しかしながら、シミュレーションを使用すれば、わずか数分で見込みのある候補のみに絞り込むことが可能となります。

イタリア、Altran社、Francesca De Vita氏、Simone Di Marco氏、Fabio Costa氏、Paolo Turchi氏による寄稿

約 30年もの間、Altran グループはイノベーション及びハイテクエンジニアリング、コンサルティングのグローバルリーダーとして努めてきています。彼らは製造全般の戦略的計画から、航空宇宙、自動車、エネルギー、鉄道、金融、ヘルスケア、そして通信分野における中心的存在として、プロジェクト開発の全てのステージにて様々なサービスを提供し続けてきました。

弱点—アンテナ

私たちのチームは、主に航空宇宙と防衛分野にて日々努力を続けています。アンテナの設置と共にレーダ反射断面積予測やレーダ監視の研究に関連したプロジェクトに携わり、開発してきました。そのうちの1プロジェクトは、近年開発された防衛技術で最大の飛躍として紹介されています—レーダ探知を回避するステルス航空機と船舶です。表面に、エネルギーをソースから反

射して遠ざける表面形状やレーダ吸収材の使用など複数の技術を組み合わせた結果、その成果が生まれました。しかしながら、もし船体や機体のアンテナが適切に機能する場合、それを完全に隠すことは不可能です。その結果、機体は巨大なレーダ反射断面積 (RCS) を保持した残留物として残り、またレーダ不可視性というシステム全体を根底から覆す恐れもあります。

RCS は入射波の周波数と偏波により確定します。電磁波がターゲットに入射すると、電流はターゲット中に誘導され、ターゲットからの二次放射が散乱波を発生させます。散乱フィールドは、入射波が発射されたソースの場所にまっすぐ反射し、これが、レーダの原理となります。反射された波のピークは、標準的なアンテナゲインとピーク有効表面積に関連しています。アンテナの設計者は通常、アンテナゲインを最大化しようと試みますが、このケースでは、皮肉なことに、RCS を縮小

するためには、彼らが通常行っていることと全く逆のこと、具体的にはアンテナゲインを減少することをしなくてはいけないのです。

この問題の解決法の1つは、周波数選択性表面を活用することです。それはパターン化された成形孔もしくは回路基板表面から生成されており、基本的にパスバンドフィルタで製造されています。例えば、通信士が送受信中、その対象となる周波数レンジの中でのアンテナは通常通り稼働している場合、他の周波数では、散乱された入射波よりは FSS は吸収しやすいのです。

通常、アンテナはレドームと呼ばれる保護容器の中に格納されています。航空機に関しては、先端部分に格納されていることが多いです。もしそのレドームが FSS のような素材で製造されていたとしたら、オペレーティング周波数以外の全ての周波数は、その RCS では削減されます。

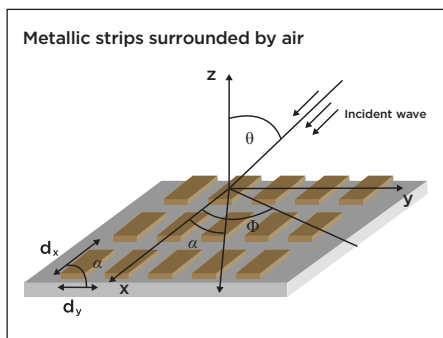


図1：周波数選択表面 (FSS) の一例。FSS は一連の金属片で構成されている。

フィルタとしての形状パターン

選択された表面の周波数は、通常、任意形状で周期的に配列された金属モデルから構成されます。金属網内にはパッチに似た開口部があります。(図1参照) FSSのパフォーマンスはその形状、厚み、回路基板の選択、及び個要素間の位相整合に関連します。私たちは、ある特定の帯域幅における共鳴周波数と物理的構造に注目し続けてきました。

COMSOL Multiphysics は、これらの研究において計り知れないほど貴重なツールです。

図1で示した通り、FSSは一連の幾何オブジェクトで構成されています。数多くのオブジェクト例を使って波長の観点から考えてみると、FSSは電氣的にかなり大きくなります。コンピュータの計算能力と時間を考慮し、表面全体のシミュレーションを行うとなると、これはかなり煩雑で費用がかかる作業になります。幸運にも、周期的境界条件 (PBC) 特性上のこの問題に対しても、COMSOL Multiphysics はとても貴重な答えを持っています。単一セル・ユニットのシミュレーションが実装可能で、これによりプロセス内の時間削減が実現します。この特性が提供しているのは、電磁場の持続性です。そのため、オブジェクト配

「いかなる形でも対応可能というこの性能は、このソフトウェアの素晴らしさを際立たせてくれます。そして価値ある結果を効果的に導く、素晴らしいサポートをしてくれます。」

列全体をシミュレートしても、同じ結果を得ることが出来ます。

私たちが感銘を受けたことは、既定のジオメトリの性質の研究に必要なレベルの正確性を維持しつつ、PBC下で可能な限りの時間とメモリを削減することが出来たということです。誘導体基板を含まないシンプルな構成にお

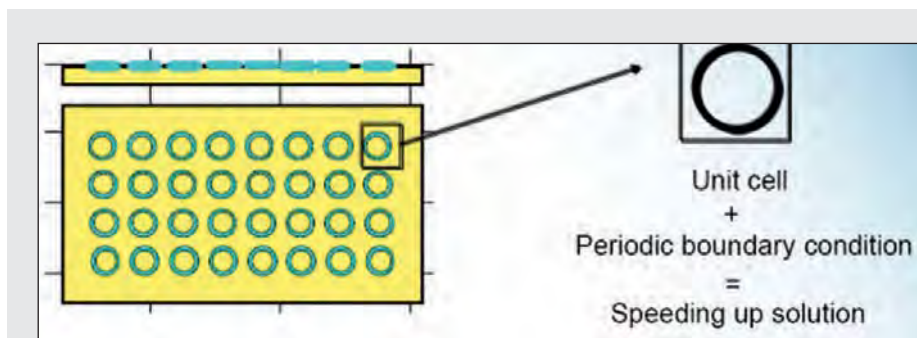


図2：COMSOLからのPBC機能。1ユニットセルのシミュレーションにより、FSSの研究は急速にスピードアップする。

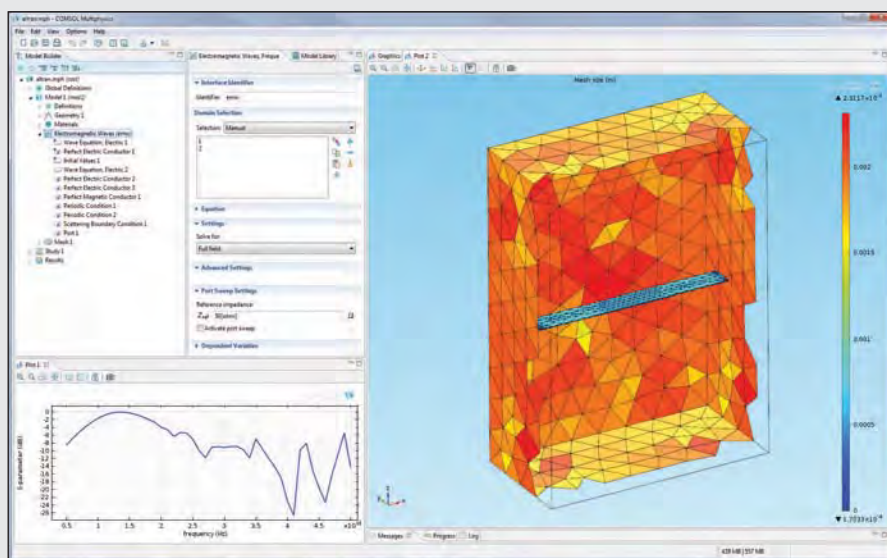


図3：FSSベースの金属片アレイのシンプルな例。メッシュジオメトリ (右) 周波数カーブ (左下) DB上でのS11パラメータ。約40GHzでの共鳴を 10^{10} スケールで表示。その低下は最大送信電力に反応しています。

けるシミュレーション時間は1/100に削減されました。広範囲にわたる電氣的構造にとって、その削減時間は1/1000に値するといえるでしょう。

図3(左上)は、FSSの一例で、空気に囲まれた状態のシンプルな金属片から製造されています。シミュレーションメッシュは1

つの金属片から作られています。40GHz領域内バンドパスを備えた周波数プロット(右)が確認できます。

シミュレーションを効果的にするために、私たちは最初に文献内ですでに研究されたケースを分析してみることにしました。シミュレーション操作方法を学ぶためにCOMSOL

Multiphysicsにてすでに認知されている結果を入力しました。次のステップとして、これと同様の有効なシミュレーションと他のタイプのFSSモデリングを試みると同時にジオメトリ、素材を変更し、これらの変更がFSSパフォーマンスにどのように影響を与えるのかを評価しました。

私たちは、多種多様な単純な形状、サイズの周波数の応答とそれがどのように表面分布しているのかを研究するため、このソフトウェアを使用しました。また、補完的反応を含め、2つの構造物を使用してより複雑な設計を作成することも可能です。例えば、このような方法で、複数の共振周波数設計も作成可能です。いかなる形でも対応可能というこの性能は、このソフトウェアの素晴らしさを際立たせてくれます。そして価値ある結果を効果的に導く、素晴らしいサポートをしてくれます。



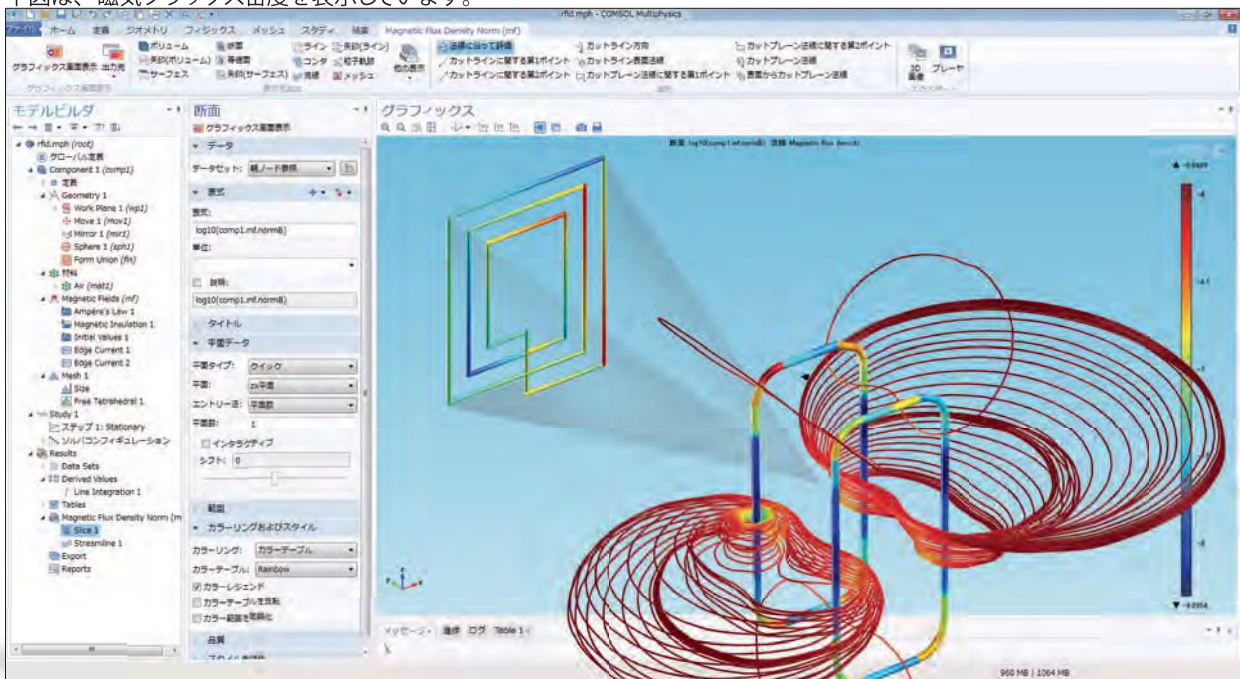
Altran 社 シミュレーションチーム：左から Fabio Costa 氏、Simone Di Marco 氏、Francesca De Vita 氏、Paolo Turchi 氏。

他の選択肢として挙げられているものは、実際に FSS 用として多様な形で製造され、物理的にテストされていますが、これには、より多額の費用と時間を有します。たった数分間モデリングするだけで得られたそのパターンによってさらに詳細を調査すべきかを判断することができます。

今、新たにスタートした作業は、誘電体基板の効果を含めたモデリングです。加えて、今後、私たちが直面するであろう課題、セルサイズの最大ユニットのような制限が生じる問題解決へのサポートとなる、最適化アルゴリズム作業を近々始められるということに期待をしています。

RFID タグ

RFID システムは PCB アンテナ (左) と、より大きなリーダー・アンテナ (右) で、タグまたはトランスポンダーで構成されています。このモデルでは対象となる周波数が低いので AC/DC モジュールを利用し、タグ中の IC 回路を起動する電磁界を計算しています。下図は、磁気フラックス密度を表示しています。



地下を流れる液体の動きを追跡する Multiphysics シミュレーション

Colorado School of Mines の地球物理学者たちは、Multiphysics シミュレーションを活用し、地下流体経路をたどる方法を確認し、地下構造と動力を理解しています。

1つの潜在的可能性：非在来型天然ガスや石油抽出で使用される水圧破碎用流動経路をたどること。

Gary Dagastine氏による寄稿

地球物理学者たちは地下構造や検知された事象を研究し、地震活動地点から地表へ伝わる音響波の分析を行います。これらの音響波は、地震のような自然現象から生じる地球活動、地質学的特徴調査のために意図的に引き起こされる地下爆発、そして透過性を高める目的が起因の強固な構造の水圧破碎などから生じます。

音響波は、長距離を移動することが可能ですが、構造上の特徴認識上では、大きな制限があります。その波は直接特定することは不可能ですが、間隙水と呼ばれる液体の流れがその波を介することでその経路が判明します。しかしながら、Colorado School of Mines の革新的な研究によると、地震現象に関連して起こる電磁気障害がこの制限された情報を提供してくれるのではないかと考えています。

音響波に関する限りでは、電磁波は伝播しません。しかし数値的マルチフィジックスシミュレーションを使用した理論モデルと室内実験においては、間隙水を追跡、特定することが可能だということを示しています。私たちが現在理解している地下の世界よりも、より包括的な見解を得るため、ロシアと日本の研究者達による草分け的研究をもとに新技術を使用しました。これは新たな音響や電磁気分析への扉を開くこととなります。

地震電氣的性能のおかげで、断層テクトニクスと活火山に沿って起こる浅発地震をより正確に監視することが可能になります。水圧破碎による斬新なエネルギー資源の安全開発のため、また事前に使用された石油貯留層のなかにある原油のより効果的な二次回収ができるので、より素晴らしい道具へと変化しつつあります。

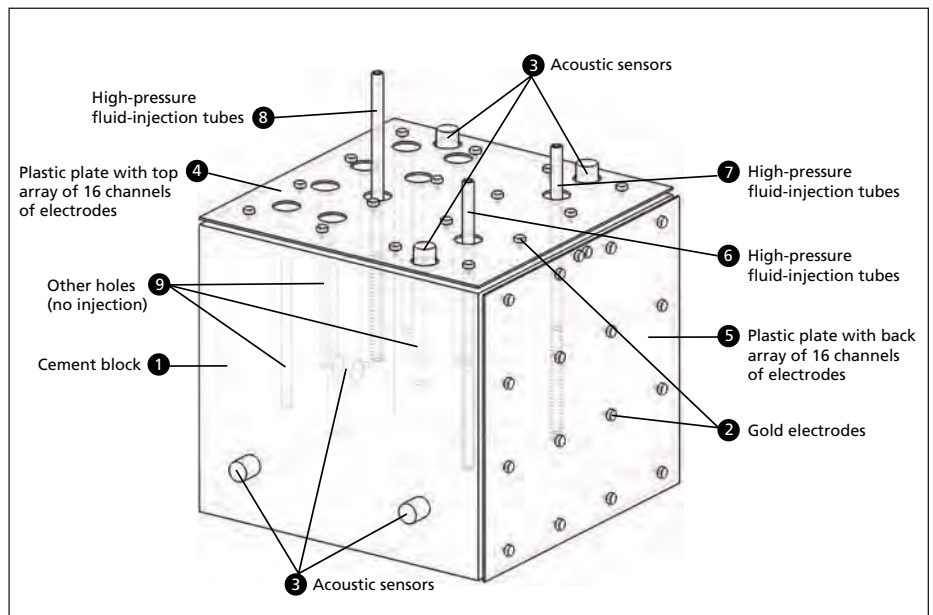


図1：水圧破碎実験で使用したセメントブロック (1)セメントブロック (2)金製電極 (3)音響センサー (4)16チャンネルの電極が配列してあるプラスチックプレート蓋 (5)16チャンネルの電極が配列してあるプラスチックプレート版 (6 - 8) 高圧液体注入チューブ (9) 穴 (注入無)

水圧破碎は特に、その技術の使用機会が増えている今、大変タイムリーで重要な問題です。地下のガスや石油抽出のために低透過性の泥岩層を水圧破碎する必要があり、液体は高圧で地面に注入されます。水圧破碎用の液体が進路情報を知ることは不可欠です。その理解により破碎プロセスが最適化され、浅部帯水層との混入を避けることができます。

地球電場からの信号

地表下の電磁気かく乱は、鉱物の表面にある電荷のメッシュ不足が原因で生じます。この不足分は、間隙水内の過剰電荷によって補われます。過剰電荷を含んだ間隙水の流れによって、電流密度は変化します (1 m² 当たり約数ミリアンペア)。

その電流は、水が通過する形状により左右

されるため、電気信号をベースに有用な推測がたてられます。この電気信号は地表上及び / 或いは掘削孔内に位置する電極ネットワークによって検知されます。

「この方法は、脳波検査 (EEG) ととてもよく似ています。EEG の中で、電気信号は、ニューロンの接触部分シナプスで発生し、頭皮にて記録されます。EEG は脳の働きを理解する上でキーとなる方法です。」と地球物理学、evolving branch of geophysics 所属の最先端研究者、André Revil 氏は語ります。「もしあなたの頭の中に電極が組み込まれていたとしたら、脳内の興味がある場所の電気の動きを監視し、推測を立てることもできます。私たちはこれとまさに同じことを地下で行おうとしています。」

Revil 氏は、地質鉱物エンジニアリング分野では、世界のトップ大学である Colorado

School of Mines の地球物理学の准教授であり、フランスにある Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) の教職員でもあります。このプロジェクトに携わっている彼のチームメンバーには、学生の Harry Mahardika 氏があります。彼はモデリング担当で大きな進展をあげました。マルチフィジックスソフトウェアで逆モデリングも担当しています。Allan Haas 氏は、実験調査リーダーです。Marios Karaoulis 氏は、研究員で、Revil 氏と共にこのプロジェクトを監督しています。

このチームは、コロラド大学の Unconventional Natural Gas Institute (UNGI) の一員でもあります。UNGI は、非在来型天然ガス、包括的炭層メタン、高气密性砂、シェールガス、ガス水和物など、全ての分野においての研究開発、促進の中心的リーダーとして活動しています。UNGI は7つの学部や11研究所、共同企業体からの支援を受け、急成長を続

ける分野である臨界質量を専門として成長しています。

順問題と逆問題

「私たちは水圧破碎が地震性エネルギーと電磁エネルギーの両方を発するということを発見しました。このような活動と関連して起きる電気的活動は似ているのではないかという仮説を立てました。」と Revil 氏は語ります。「これを行うために、私たちはラッキング事象をシミュレートするため、また理論地震気象図と電気記録図を作成するために COMSOL Multiphysics を使用しました。私たちは MATLAB® と COMSOL を組み合わせ、また MATLAB® の LiveLink のおかげで、数多くの順問題と逆問題の組み合わせを試みる事が出来ました。

「COMSOL のおかげでかなりの時間を削減することが可能となりました。水圧方程式

のような不可欠な基本的物理方程式は全てソフトウェアで定義されていたため、その解を求めるために私たちが必死に時間を割く必要はありませんでした。」

順問題では、シミュレーションされた水圧破碎への対応を作り、一方の逆モデリングでは、それとは反対の事象を行いました。逆シミュレーションでは、総合的なセンサデータから得た水圧破碎の全ての起こり得るパラメータを計算しました。順問題と逆問題との結果での差は、繰り返される調整の中で小さくなり、一致するまで繰り返されました。

次のステップでは、これらの数値が実際の対応とどれほど同値なのかを決めることでした。チームは研究所内で行える実験を設計しました。高圧環境下、塩水中に多孔質の立体形のセメントを入れ、膨張させることにより繰り返し水圧破碎しました。その目的は、電気信号が受動的に記録される可能性があ

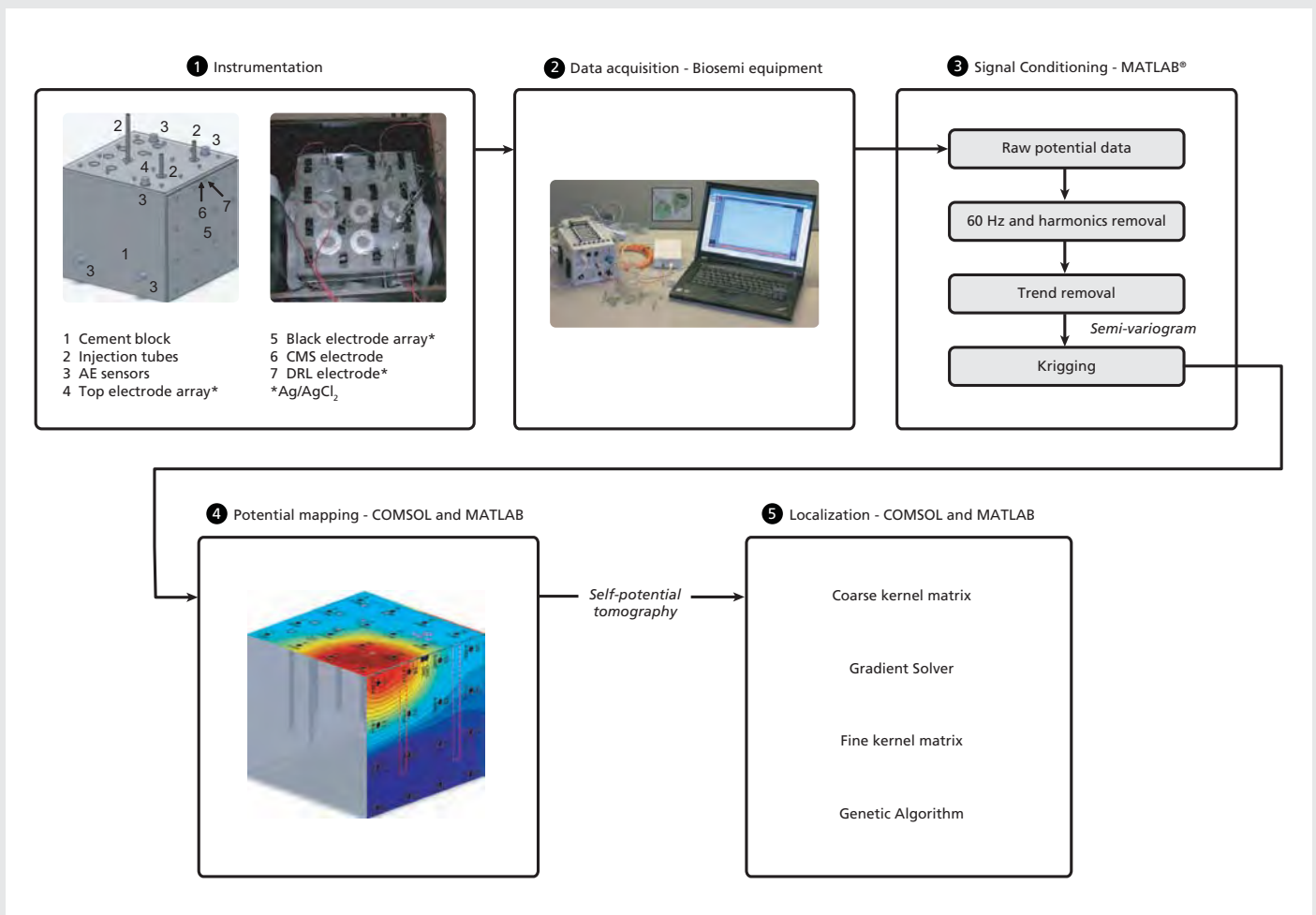


図2：電気データプロセスのフローチャート (1) 穴があいているセメントブロック装置 (2) データ取得システム (3) 生データの信号状況 (4) 通常のクリグging使用の電圧レスポンス図 (地球統計学的推測)、 (5) ブロックでの原因物質の特定

るのかどうか、そして長時間かけた実際の液体の漏えいが起こる場所の正確な位置を電気信号でさかのぼることが可能かどうかを確認するためでした。30.5 × 30.5 × 27.5 cm 立方体上に、直径 10 mm の複数の穴あるいは「鉱泉」をドリルで開けました (図 1 参照)。

その「鉱泉」穴をふさぐ様々な方法が試されました。鉱泉ケーシングのシミュレート用として、外径 9.5 mm のステンレス鋼チューブで穴をふさぎました。その立方体には、電圧測定用の 32 の非極性銀/塩化銀電極が、ブロックの上部と 1 面にそれぞれ 16 ずつ備えられており、それに加えて、3 つの面に音響センサーが装着されていました。

シミュレーションを実証した実験

テスト中、密封された穴から漏えいしている液体に反応して電気信号は検知され、音響センサーと液体圧力が変化して破碎しました。

「私たちは、これらの漏えいの位置を正確に確認するための電気データを逆算するために 2 段階プロセスを取りました。」と Revil 氏は説明しました。「最初に私たちは、ブロック上の任意な場所、任意な時間の電流密度ソースを検証するために最小二乗法をあてはめました。その後、電流密度のソース位置を改善するために、遺伝的アルゴリズム、もしくはサンプリングを使用しました。」

「その逆変換の結果は、問題となっている鉱泉穴の位置に関しては素晴らしいほどに一致していましたし、鉱泉穴周辺の音響センサーに関しても同等の結果でした。」と彼は説明しました。「受動的に記録された電気信号は、漏えい時に鉱泉穴から流れる液体の監視用として使用することが可能だということを証明しました。」また、水圧擾乱を含むほかの様々なアプリケーションで起こる液体の流れを監視するときにも使用することが可能だということを示唆しました。」

次のステップ：実地試験

次のステップは、この技術をさらに研究するため、数メートルから数キロにわたる規模での実地試験を行うことです。もし全てがうまく進んだとしたら、帯水層監視システムや安全システム開発のような重要な問題に対するの念願の解決策が手の届くところまできて

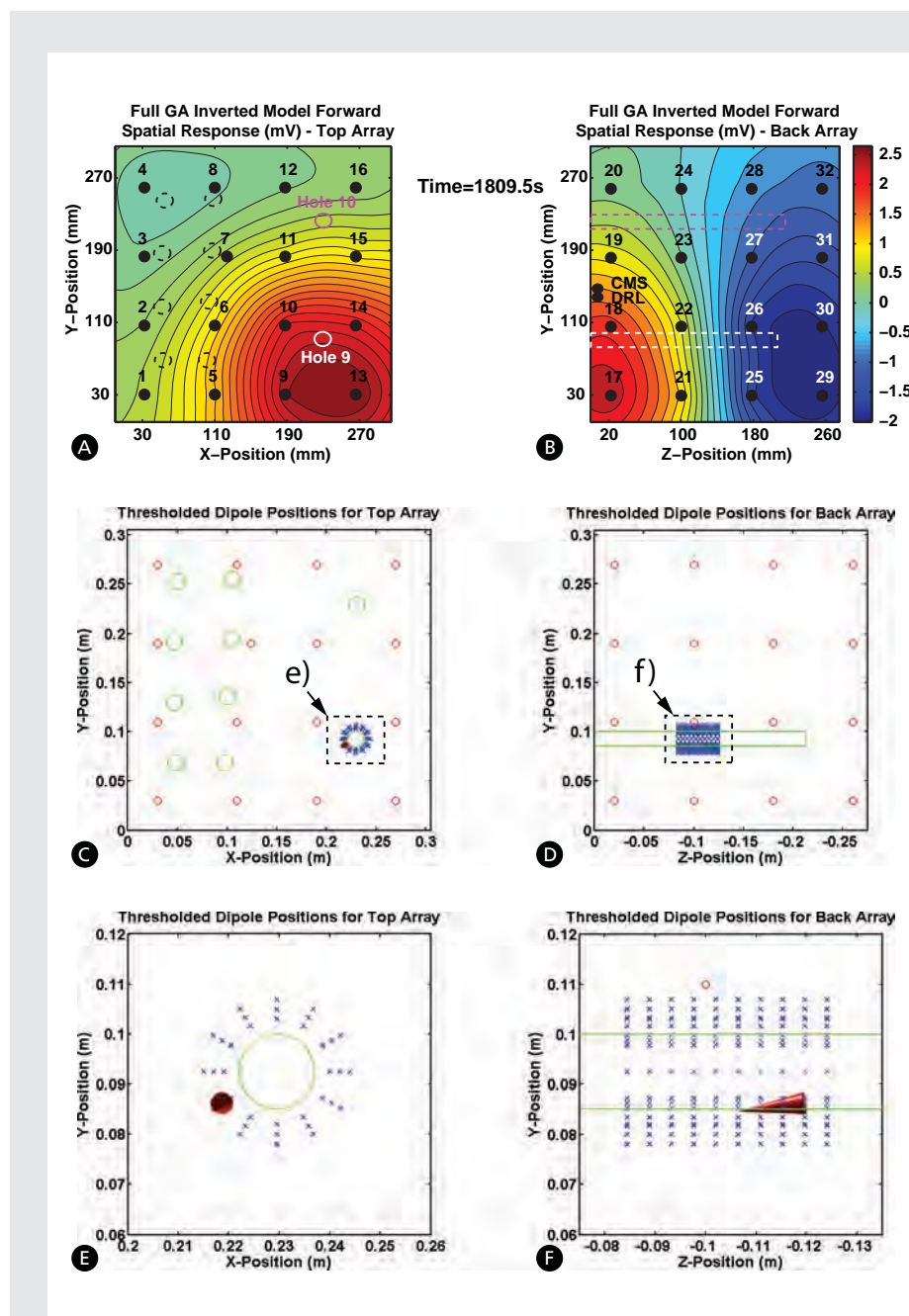


図 3：1 事象 (A と B) における双極子の前進モデル電圧分布、コンクリートブロック (C と D) における双極子空間的位置、双極子のクローズアップ (E と F)、垂直配向から外れた双極子モーメントを示す。

いるということです。また、古く、ふさがってしまい、放置された鉱泉の安全評価方法のより良い方法も見つかる可能性や、岩石を流れる液体の動きを研究し、粉碎された岩石システム特性も確認されることさえ可能かもしれません。

Revil 氏は、「最終目標は、圧力がかかった時の電気データ、解析能力が組み合わさった音響波データを結びつけることです。」「このレベルのデータ融合は、未だかつて

実現されたことはありません。」と説明しました。「この分野でのプロジェクトを進めることができること、それは、この上なくワクワクする時間です。」と Revil 氏は語りました。

直線および湾曲したマイクロfluidクス チャンネルにおける収束のモデリング

Massachusetts General Hospital と Veryst 社の研究者は、慣性収束に関するマイクロfluidクスのプロセスを研究するために、マルチフィジックス解析を利用しています。

執筆者 Massachusetts General Hospital Biomemes Resource CenterのJOSEPH MARTEL氏、MEHMT TONER氏
およびVeryst Engineering,社のNAGI ELABBASI氏、JORGEN BERGSTROM

多くの医療処置や実験において、目的細胞を分離することは、将来の分析のために必要です。マイクロfluidクスは、こうした実験を行う方法を根本的に大きく変えてきました。目的細胞を分離・濃縮するための最も有望なマイクロfluidクス技術の1つは、慣性収束と呼ばれています。この慣性収束の現象は、当初1960年代に発見され、新たな有用性が見いだされました。それは、マイクロfluidクス、特に生物医療装置の設計であり、最近では、血液サンプルから癌を発見する装置で重要な役割を担うようになっています。この現象は、層流の中に存在する懸濁粒子が、チャンネル断面で、平衡の位置まで自発的に移動するという特徴があります。チャンネルのジオメトリを変更することによって、さまざまな大きさの粒子の平衡位置を制御することが可能です。

この現象は、この粒子のレイノルズ数(ReP)がほぼ1に等しくなったときに起こり、2つの力の均衡により決定されます。これらの2つの力とは、チャンネルの壁に向かう、せん断勾配揚力と壁から離れようとする壁相互作用力です。この2つの力のバランスが平衡位置を決定します(図1参照)。矩形断面を持つ直線チャンネルでは、図2Aに示すように、チャンネルの長い面の中心に1組の平衡がつけられます。チャンネルに湾曲を追加することで、粒子にかかる力に変化が生じ、平衡位置が変わります。このチャンネルにわたって派生的な横軸の流れが、起こります。これは、チャンネルの中心で、より早く流体

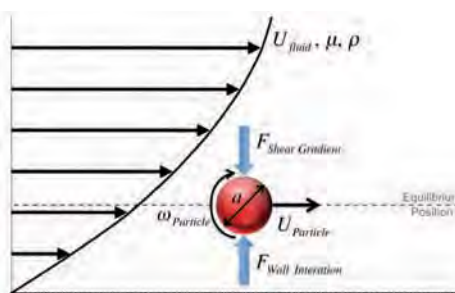


図1: マイクロチャンネルの中の粒子へ作用する基本的な力

は動くという推進力によるものです。

これにより、粒子上にけん引力が誘発され、図2Bに描かれているように、平衡位置は調整されます。この派生的な流れの強さは、チャンネルの湾曲に依存し、無次元ディーン数(De)で特性が示されます。湾曲したチャンネルの流れにおける粒子の平衡位置は、結果的に、チャンネルの大きさ、粒子サイズ、粒子とチャンネルのレイノルズ数およびディーン数の要素で決まります。

CFD (数値流体力学) モデル

私たちは、流れとジオメトリのパラメータを用いて、粒子の平衡位置とその変化の度合

いを予測するために、COMSOL MultiphysicsのCFDモデルを開発しました。

このモデルを単純化し、解決時間を短縮するために、分析を2つの段階に分けて行いました。第1段階では、粒子を含めないCFD問題を解決しました。この結果、直線チャンネルでは、ハーゲン・ポアズイユ流れ解、湾曲チャンネルではディーン流れ解を導きだしました。次に私たちは、CFDドメイン空間として表される粒子を持つ第2のCFDモデルの入り口境界の解析を実装しました。粒子の移動と回転の動きを構成する適切な壁移動条件も有しています。両方のCFDモデルは、流れとジオメトリパラメータ効果を容易に解析するためにパラメータ化されました。

この粒子の反作用の力と動きは、CFDソリューションによって計算され、粒子の移動と回転の速度成分を更新するために利用されます。この目的を達成するため、私たちは、直線速度および角速度に関して、この粒子の均衡を特定する広範囲な常微分方程式(ODEs)を設定しました。

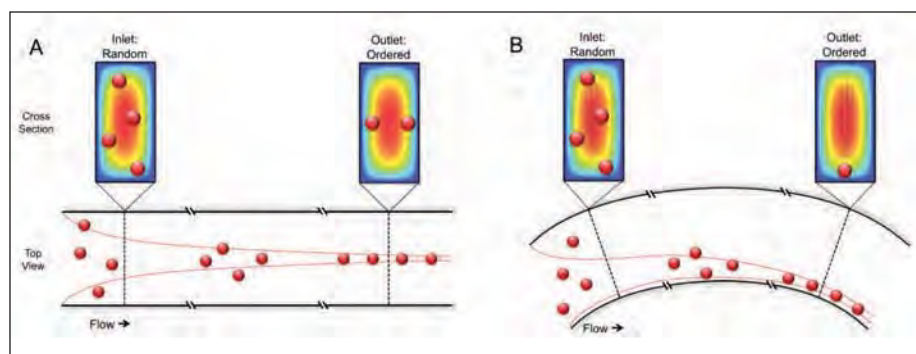


図2: 直線(A)と湾曲(B)チャンネルにおける慣性収束の効果。横断面イメージに示されるように、粒子は無作為に取り入れられていますが、慣性収束のために配列されるようになります。

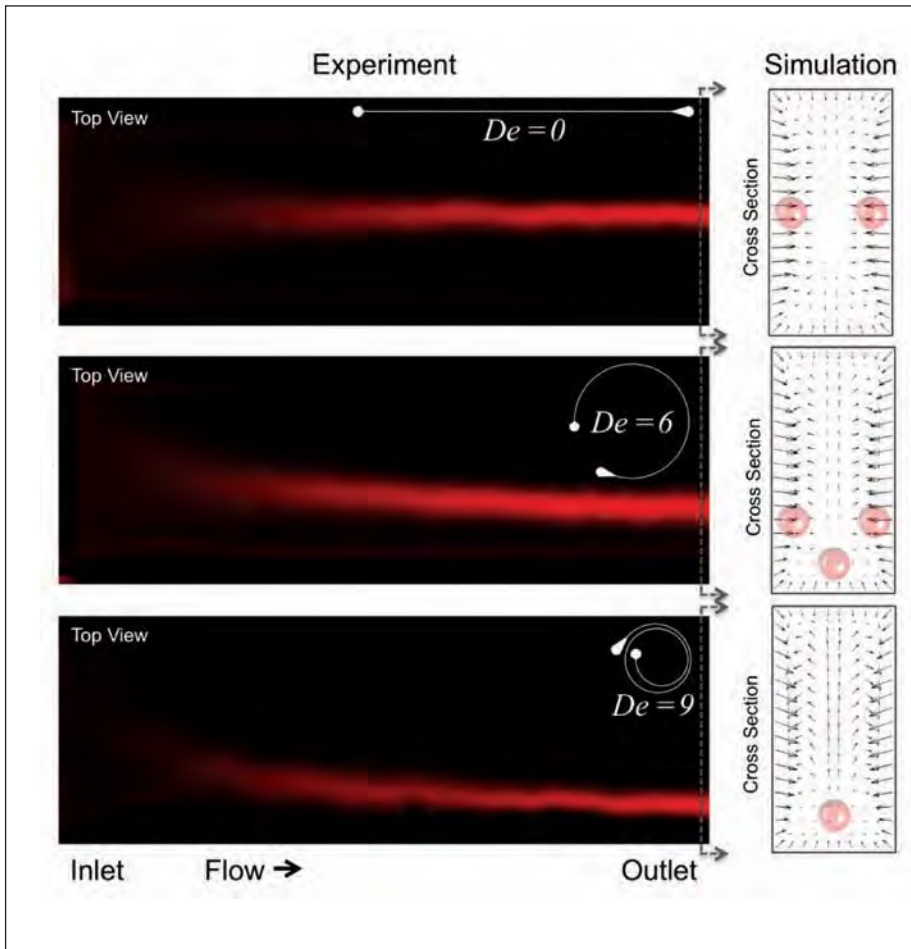


図 3: チャンネルの間の粒子分布を示すマイクロチャンネルの縦断面図の実験用蛍光顕微鏡画像 (左)。横断面プロット (右) はシミュレーションによる粒子の合力を示しています。シミュレーションによる平衡位置は、粒子によって示され、実験結果と完全に一致しています。このデータは、異なる湾曲の 3 台のマイクロフレイクシス装置で、同じレイノルズ数が示されています。この装置の湾曲は、蛍光画像の上部右端に見られるはめ込み図に示されています。

COMSOL Multiphysics は、これらの広範囲な方程式を、流体力学方程式と同時に解決することができます。これにより、ソリューションプロセスを飛躍的に加速します。ヤコビアン行列における流体変数と広域変数の結合項を自動的に評価する COMSOL Multiphysics 特有の機能を用いることで、解決に要する時間はさらに改善します。

周辺の流体と平衡状態にある粒子の回転および移動速度を見だした後、この横軸の慣性揚力が計算されます。次に私たちは、ディーン流れの効果を加え、最初のモデルで得られた粒子上のストーク抵抗とディーン流速を推定することができました。

標準的な粒子のトレースは適用できないので、ここで述べたアプローチが慣性収束を予測するために必要であることを認識することは、とても重要です。例えば、直線チャン

ネルでは、標準的な粒子のトレースは、横断面の特定位置に挿入された、中立的に浮揚する粒子が、その位置にとどまっているであろうことを予測します。粒子が存在しないことで得られる流量条件に対して、慣性収束に影響を与える力や動きと関連した一般的な解析方程式はありません。しかし、私たちは、上記の CFD ソリューションに基づいて粒子に作用する力や動きの式を導きだしました。

次に私たちは、COMSOL Multiphysics の粒子トレース機能を使って、ユーザー定義の力と動きの方程式として導き出された式を適用することによって、粒子の動き、回転、慣性収束などを予測することができました。

検証と結果

このモデルは、50 平方マイクロメートルの横断面チャンネルにおける直線チャンネルの

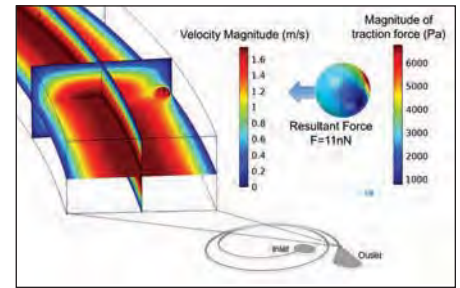


図 4: 特定の非平衡位置の粒子の速度分析結果 (左) および面力 (右)

流れ用実証されたソリューションに対して、最初に検証が行われました。このケースでは、平衡する粒子の位置は、正方形のそれぞれの面の中心にあり、レイノルズ数 20 で、直径 10 マイクロメートルの粒子が壁から 10 マイクロメートル離れていると考えられます。

次に、高さ 50 マイクロメートル、幅 100 マイクロメートル、長さ 4 センチメートルの直線および湾曲チャンネルの両方に対して、CFD モデル予測と実験による測定結果とを比較しました。図 3 は、チャンネルのレイノルズ数 100 で 3 つのディーン数; 0,6,9 (このチャンネルはディーン数がゼロのとき直線になる) における、実験結果とシミュレーション結果を示しています。それぞれのケースで、蛍光線顕微鏡を使って集められたチャンネルの長さに沿った粒子分布、およびハイライト表示されている平衡位置 (合力 = 0) を持つ断面に対して計算された力場を表示しています。この 3 つのケースで、シミュレーション結果は、実験による測定と完全に一致しており、平衡位置は、チャンネルの湾曲に依存していることを説明しています。図 4 は、チャンネル内の速度と、チャンネル / 粒子形状における粒子上の面力を示しています。ここでは、力は壁 - 粒子反応により影響を受けています。COMSOL Multiphysics における設計変更を即座に、また繰り返し行える機能と、機器の操作上の包括的理論を構築できる機能は、実験時間を短縮できるとともに、救命診断装置の設計に寄与し、最適化を実現することになるでしょう。

ソナードームの振動分析

イタリアの船舶模型水槽会社のINSEAN社の科学者は、自己雑音を減らすために、簡便なシミュレーションモデルを使って、ソナーシステムを収納する球状船首における乱流境界層流の影響の計算方法を開発してきました。

執筆者 JENNIFER HAND氏

球状船首、すなわち船首の喫水線の下にあって前につきでた球状の部分は、巨大な船舶の標準的な設計の特徴になっています。この部分は、最大能力に近いスピードで長距離を運航するとき、波の抵抗を大幅に和らげます。

最近では、さまざまなタイプのソナーシステムを設置するために、この球状船首が使われる傾向になっていますが、構造的な振動が、ソナードームの中のトランスデューサーアレイの機能に影響を及ぼすような問題が起きています。特に、乱流境界層 (TBL) から生じる圧力変動や、速度勾配と、その結果として生じるせん断応力の大きさが、層流の中の場合よりも高くなる場所での流体の薄い層が、船舶に搭載されているセンサーに対する自生雑音の大きな原因の1つと考えられています。従って、INSEAN社チームは研究に着手しました。

縮尺モデルのテスト

INSEAN社の研究者 Francesca Magionesi氏は次のように説明します。「壁の圧力変動に関して最も多く行われている研究は、複雑な湾曲上の水の自由な流れを考慮せずに、単純な形状と理想的な流れの条件を使って行われてきました。そこで、私たちの最初の目標は、球状船首にかかる乱流境界層によって引き起こされる壁の圧力変動の周波数スペクトルを理解することでした。」

このことは、INSEAN社の2台の水槽実験用タンクの1台の中で、壁の圧力変動の特性を明らかにするために、固定された球状船首の大型模型を作り、実験を行うことでした。「これは、構造上の湾曲と流体負荷の効果をj得るためだけではなく、縮小された圧力変換器を使って、圧力変動のより高い周波

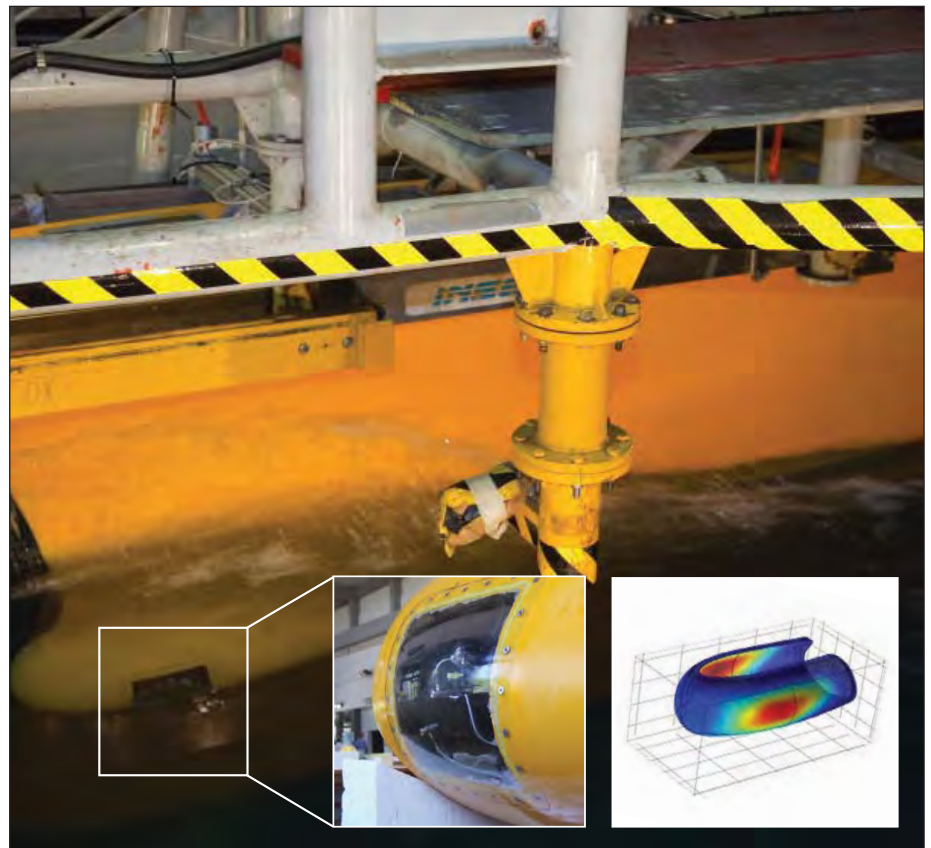


図1: 球状船首の8分の1の縮尺モデルでの実験キャンペーン。球状船首の一部は、加速度計が設置されている上部が、透明素材で置き換えられています(中央下)。このシミュレーションは、システムの構造応答を示しています(右下)。

数成分を捉えなければならないために、扱いにくいものでした」と Magionesi氏は報告しています。こうした困難な状況にもかかわらず、このチームは、球状船首のさまざまな場所で壁の圧力変動を計測し、オートおよびクロススペクトル密度に関して流体負荷をモデル化することができました。

次の実験で研究者は、球状船首の一部を弾力性のある細長い素材(透明なポリメタクリル酸メチル PMMA、熱可塑性物質)に置き換え、その構造応答を得ました(図1参照)。

次に、このチームは、物理的実験結果を再現するためにシミュレーションに取り掛か

りました。

「乱流境界層負荷に対して弾力性のある構造の動的応答を評価するためには、構造コードを加味して、流量の直接数値シミュレーションを使用することが通常必要となります」と Magionesi氏は説明しています。「しかし、実際の海軍用に特有の、この高いレイノルズ数は、極めて大きな計算時間とメモリを必要とするため、このアプローチを不可能にしています。それゆえ、私たちは、流体と構造物の間の弱結合に基づき、この流体負荷の単純化された式を開発しました。このことは、構造物の振動が、流体の励起や単純な流体

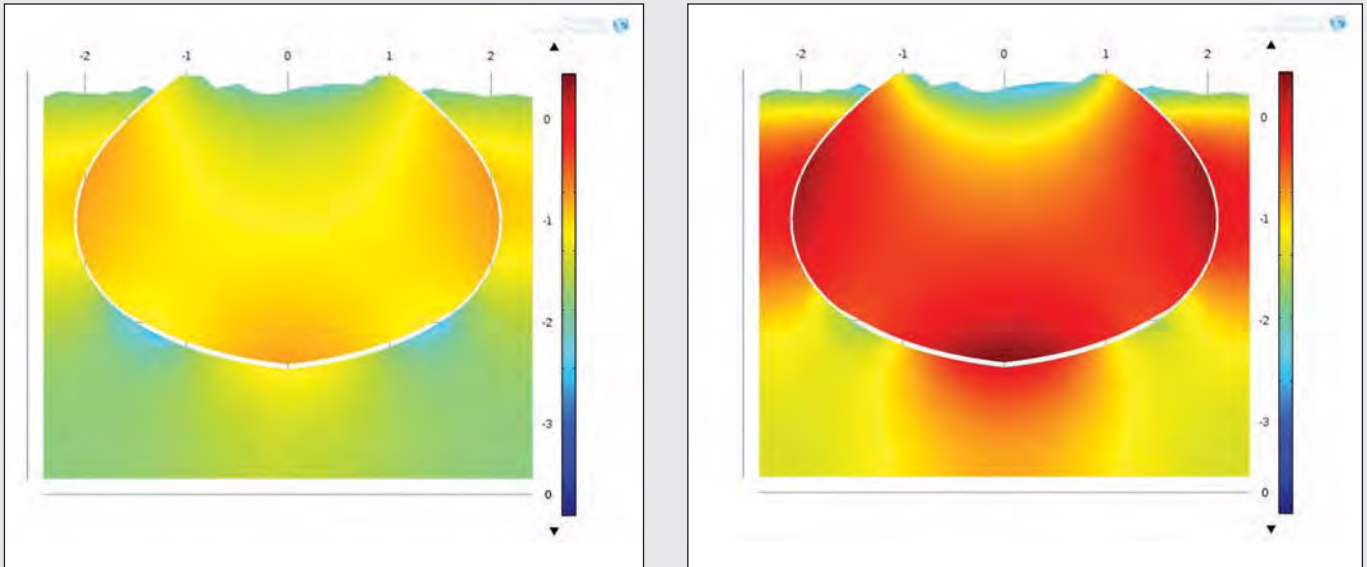


図 2: 15 ノット (左) および 30 ノット (右) の巡航速度での 3D 球状船首シミュレーションの断面における音圧レベル

負荷式には影響しないだろうと推定に基づいております。このように私たちは、縮小モデルのレベルで、この実験的、数値的手法を実証しました。」

実物大でのシミュレーション

次の段階は、COMSOL Multiphysics の中で実物大モデルを作ることでした。これは、球状船首に使われている複合材料の複雑性を考慮することです。レイノルズ平均ナビエ・ストークス方程式を解くコードの社内開発プログラムにより、このチームは、小型モデル

COMSOL Multiphysics へ送ることが可能になりました」と Magionesi 氏は説明しています。「なぜならば、このデータは、特定の場所、特にパウ壁の厚さに関して、その品質を改善しなければならない有限要素解析のために開発していなかったからです。私たちは、COMSOL Multiphysics の中で直接小さな変更を実行する柔軟性に本当に感謝しています。私たちがこのソフトウェアを気に入ったもうひとつの理由は、1つの統合パッケージの中で、数多くの物理現象を分析する機能にあります。パウの構造と相互作用する水流によつ

複雑なシステムの使いやすいツール

Magionesi 氏によると、最も重要な成果は、乱流境界層負荷によって引き起こされる雑音や振動を、実物大で、すなわち、高レイノルズ数で、評価できる使いやすいツールにあったといいます。「しかし、私たちは、乱流境界層の励起を捉える実験を、小型モデルで行わねばなりませんでした」と彼女は反省しています。

「私たちは、また、材料のパラメトリック特性を解明するために COMSOL Multiphysics を利用しました。これらの材料の特性を変化させることによって、ソナーセンサーを越えて、球状船首自体の設計へと私たちのツールの範囲を拡張したので、抵抗や振動レベルまで取り組むことができましたのです。私たちは、この研究によって、設計段階で、球状船首・ソナーシステムの広範な最適化を達成するための総合的なツールを開発することができました。今、私たちの目標は、このツールを他の分析の側面から研究し、他の分野で使えるようにすることです。

「船首の構造と相互作用する水流によって引き起こされる雑音と振動を予測するために、私たちは、構造物、流体、音響などの領域を使って、さまざまな速度で実験を行いました。」

で計測された壁の圧力変動を再度拡大し、比較的低コストで実物大の励起を得ることができました。これらのデータは、COMSOL Multiphysics への入力として使用され、数値モデルにおける圧力負荷として挿入されました (図 2 参照)。

「Livelink™ for Pro/ENGINEER によって、球状船首のさまざまな部分の CAD データを

で引き起こされる雑音と振動を予測するために、私たちは、構造物、流体、音響などの領域を使って、さまざまな速度で実験を行いました。直接、支配方程式を挿入できる条件が与えられていることはとても重要でした。」

その後、このチームは、COMSOL Multiphysics Livelink™ for MATLAB を使って、MATLAB へ自家製のソフトウェアを移動しました。

高精度リチウムイオン電池シミュレーション

電池は、多くの物理現象と関係し、温度に大きな影響を受けるため、本質的に非線形です。COMSOL Multiphysics シミュレーションは、この方程式を変更し、電池モデルを単純化して、こうした非線形の問題解決法を示します。

執筆者 フランス原子力・代替エネルギー委員会(CEA) MIKAEL CUGNET氏

携帯電話やハイブリッド/電気自動車あるいは航空機であれ、電池は、現代生活には欠くことのできないものといっても過言ではないでしょう。電池の性能を評価する従来の方法は、特にリチウムイオン電池のように高度な化学的構造を持つ電池の場合、研究者へのより効率的に最大限利用するために必要な情報提供は十分ではありません。従って、研究者は、シミュレーションを使用し、これを頼りにしています。なぜならば、シミュレーションにより、セル内部で生じていることを理解し、より安全で信頼性が高い電池の設計情報を得ることが可能だからです。

これまで主に利用されてきた EIS および ECM 手法

自動車には、電池の保護や自動車走行距離の予測、さらにドライビング条件による走行距離予測の変更を行うために、電池管理システム (BMS) が組み込まれています。BMS は、電気化学的インピーダンス分光法 (EIS) に基づいた回路モデルを使用します。EIS は、電池の特性を明らかにするために広範囲に利用されている技術です。EIS を理解することで、電子的構成要素モデル (ECM) を構築することができます。ECM は、直列と並列の両方で接続される抵抗とコンデンサーから構成されています (図 1 右側参照)。ECM の研究から得られた結果で (図 1 左側参照)、電池の内部抵抗を決定し、次にどれくらいのエネルギーが供給できるかを決定できます。すなわち、自動車を推進するには十分か、非常口をライトアップするには十分か、あるいは、携帯電話の電力供給には十分かということを決定します。使用済み電池から追加情報を得ようとする人もいますが、消費された電池で正確な研究を行うことは、当然のことながら難しいのです。

ECM を使うことで、セル内で起こっているさまざまな現象に関連した成分値が得られます。

しかし、等価回路モデルにおける電子的構成要素の有意性と、電池の特性を明らかにする物理方程式との間には隔たりがあります。私たちのケースでは、ECM は、電極活性材料抵抗、反応速度、特定電気容量 (キャパシタンス)、拡散係数のような重要なセル特性に関する情報を、なにも提供してくれません。しかし、私たちは、マルチフィジックスモデルからこうした情報を得ることができます。

現実的なマルチフィジックスシミュレーション

等価回路モデルを使った研究よりもむしろ、私たち INES は、LifePO4/Li 半電池の物理現象に基づくモデルを作成することに決定しました。そこで作成されたものは、インピーダンス対周波数の関係を示すプロット図と同様なものでした。検証のために、このモデル結果と EIS の測定結果を比較することができました。このモデルは、より高い安全性と信頼性を有する電池の設計に活用可能で、非常に多くの情報を私たちにもたらしました。

私は電池の反応を支配する方程式を熟知しています。そのため、完全なパラメータ制御ができ、かつシミュレーションからより深い知識が得られる COMSOL Multiphysics を使用して、最初から独自のモデルを構築しました。

この物理電池モデルは、ボタン電池の形を

した半電池です (図 2 参照)。電極を分離し、物理的特性の、より正確な評価を得るためには、従来型の電池よりもむしろ、この半電池を研究することが必要でした。つまり、もし私が完全な電池で研究することにしたなら、どちらの電極が、結果として得られたパラメータ値に起因すると考えるべきであるかを分からずに、それぞれの電極で起こる全ての現象を混在して捉えてしまったでしょう。

これに対応するシミュレーションは、実際に 2 つの連結された 1 次元モデルから構成されています (図 3 参照)。最初のモデルは、肉眼で見えるレベルを表しています。これは 2 つの領域から構成されています。この領域は、この作用電極、及びリン酸電極 - リチウム薄膜の間のセパレータで、これらも、対電極として機能しています (図 3 左参照)。2 番目のモデルは、微細レベルを表しており、これは 1 つの領域だけを有し、リン酸の球状粒子をモデル化しています。作用電極の活性物質の主要な構成要素です (図 3 右参照)。

GUI を通じて入力される PDEs で全てが行われる。

この 2 つのモデルは、全て偏微分方程式 (PDEs) だけで作られます。モデルは、電子伝導性固相の電流保存方程式、イオン伝導性

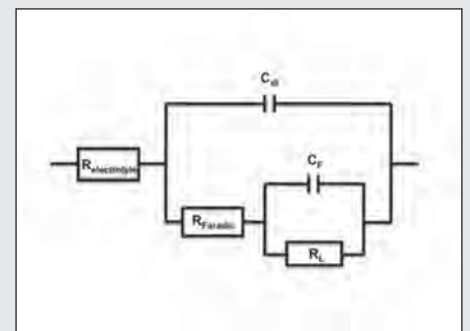
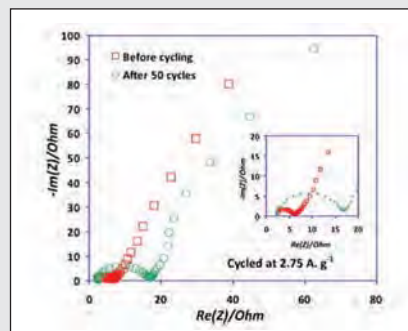


図 1: 電気化学的インピーダンス分光法 (EIS) を使用することで、ミリヘルツからキロヘルツの幅の周波数範囲で、電池の電気抵抗 (インピーダンス) が測定されます。

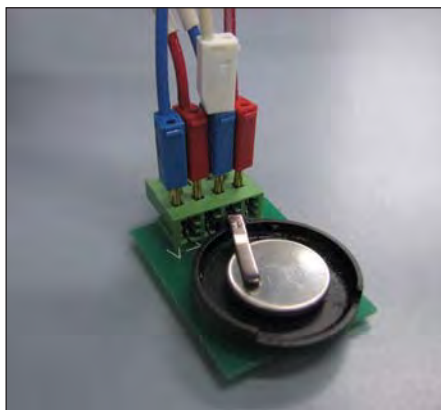


図2: モデリングと検証の基盤として用いられる半電池

液相の電流保存方程式、そして、LiPF₆(六フッ化リン酸リチウム)塩における物質平衡を、それぞれ使います。次に、これらの3つの方程式は、微細なモデル方程式に連結します。これは、粒子内の還元されたリチウム種の固体拡散の特性を示すフィックの法則です。

全モデル方程式は、時間依存性があり、それゆえに、この方程式から直接、インピーダンスを得ることはできません。それを得るためには、それらが線形であると仮定しなければならないのですが、これらの方程式は実際には非線形、非定常のため、行うことができませんでした。次に私は、さまざまな周波数の正弦波でこのシステムを加振したとき、どのように物理的応答を示すのかをシミュレーションしたいと考えました。このように、それぞれの正弦波励振周波数で、このモデルを実行し、結果を読み取る必要があります。私は、10 ミリヘルツから 200 キロヘルツまで 10 回ごとに 6 項目を計測し、全シミュレーションの実行に 15 分かかりました。それぞれの周波数ごとに、このモデルを実行するために、私たちは、MATLAB で読み込み可能な M-file として、このモデルを保存しました。次に、私たちは、この結果を加工するために LiveLink for MATLAB を実行し、半電池のフル・インピーダンススペクトルを得ました。

このモデルへの入力、この電池の充電状態を 100%、正弦波励振電圧の大きさ (3.490 ボルトの電池の平衡電位を中心として 7.1 ミリボルト)、励起の周波数 (10 ミリヘルツから 200 キロヘルツまで) を、それぞれ設定しました。

このモデルの出力は、励起電圧、電子伝導性固相の電位、イオン伝導性液相、(微細モデルでの) 固相および (肉眼に見えるモデルでの) 液相におけるリチウムイオン濃度に、それぞれ対応する電池電流です。

電気二重層の重要性

本質的要素を証明する COMSOL Multiphysics の特徴の 1 つは、電気二重層 (EDL) でした。この文献の全てのリチウムイオン電池モデルにおいて、粒子の表面と液体との間の界面に局在している電流密度には、電極反応速度として、バトラー・ボルマー方程式だけが盛り込まれています。この方程式を使用しているにもかかわらず、電荷移動の特性を示す図 4 の左側に、半円が現れていません。なぜならば、このモデルは電荷移動を予測することができないからです。これは、このモデルの全ての PDE が 10 ヘルツより高い周波数で、純抵抗になるように作用するからです。しかし、EDL を追加することで状況が変わります。なぜならば、反応速度式に加えて、容量成分を追加するからです。これは、抵抗と並列接続される蓄電池の特性と多少なりとも類似しています。私は、半電池の中で起こっていることを正確に再現したいと思っていたので、EDL を考慮すべく、PDEs に、この成分を加えました。

図 4 は、特定の周波数で確認できた主要なパラメータの最適値を示しています。最初に、これらの特定の周波数で、私のモデルの感度解析を行いました。インピーダンスにおける私のモデルのパラメータ値の変化の影響を調べたことになりま。

次に、実験データと一致させるために、それぞれの周波数で、特定のパラメータを変更しなければならなかったことに気づきました。最後に、これらの最適値を得るために Optimization Toolbox から提供されている最適化機能を使用し、COMSOL Multiphysics に基づくシミュレーションを加味して、MATLAB プログラムを作成しました。これらの最適値を得ることは重要です。なぜ

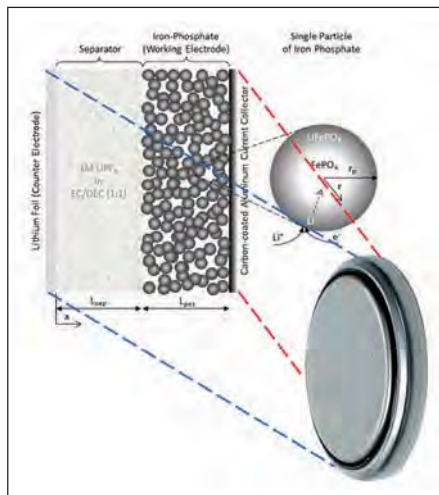


図3: 肉眼で見えるレベル(左)および微細レベル(右)での半電池のモデリング

ならば、活性物質抵抗、反応速度、EDL 電気容量、イオンの拡散性などのような重要な電池特性の値に関する情報を提供するからです。

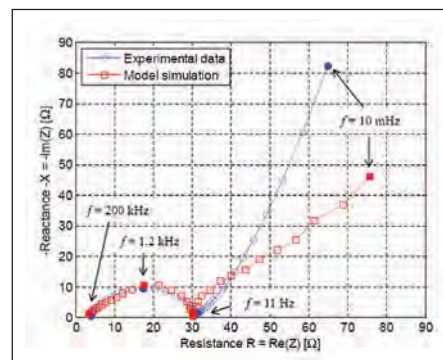


図4: EDL によって、高い周波数でのシミュレーション結果間の完全な一致が実現します。

電池のさらなる理解のための次の一歩を踏み出す

私たちのシミュレーション結果は、重要な物理値を得るために有用です。特に、この段階で、電極で使用した活性物質における電子伝導率の低さを、はっきりと確認することができました。また、この電池の容量性の作用は 10 ヘルツ以上の周波数では決して無視できないこともわかりました。このことは、もし、パルス動作中の電池の作用をモデル化、もしくは特定利用に関する分析結果を得たいと思うならば、EDL は必ず考慮されなければならないことを意味しています。抵抗に関して最も弱い部分は、反応速度から得られる電荷移動抵抗として認識されてきました。

インピーダンス・スペクトルでは、低周波数での曲線が少し (右側に) 外れていることに気がつくかもしれません。これは、活性物質粒子の大きさが、私たちのアプローチでは良く描けていないので、何かが起こっていることを示しています。私たちにとっては、この効果の原因は、まだ明確ではありません。多分、このモデルの中での現象を何か見過ごしているか、あるいは、いくつかのパラメータ値を変更しなければならないのでしょう。これは、私たちの現在の研究の焦点になっています。

温度計の校正の不確実性の原因説明

研究者たちは、温度計センサーの校正の質を高めるため、シミュレーションを使用しています。

JENNIFER HAND氏による報告

温度計には、一般消費財の体温を測定する役割を持つ体温計から、高機能技術が必要な医療、産業テクノロジーや産業プロセスなどの広範囲な用途があります。他の測定装置同様、温度計も1990年国際温度目盛（ITS-90）に基づいて設定する必要があります。

校正プロセス

ITS-90は、複数の定義定点が基準になっており、その定点では、純金属が溶融、凍結して相変化します。この状態変化の中で、金属は温度変化せずに加工熱を吸収或いは放出します。

定点時において、その中で浸された温度計は、実際の温度として参照される温度の安定性を観測します。

イギリスのNational Physical Laboratoryで、接触式温度測定を牽引しているJonathan Pearce氏は、こう説明します。「ITS-90は、白金抵抗温度計と一緒にユーザー間に広まりました。

これは、とても敏感な装置で、マイクロケルビンと同等レベルの精密性で温度を測定することができます。」

白金抵抗温度計は、定点セルを使用して校正しています。一般的には黒鉛坩堝が使用されており、中央に温度計を挿入する溝がある容器です（図1参照）。その容器の中はとても純度が高い素材が入っています。通常、99.9999%の純度です。その中央の溝には、



図1：一般的な定点セルの断面図。黒鉛容器で、金属インゴットが確認できる。温度計挿入箇所の溝が中央にある。

温度計が挿入されるようになっており、下部にある検出要素が定点金属の中に完全に浸されるようになっていきます。

その容器は、その後、高炉の中に設置され、金属は溶融、凍結を調整できるようになっています。

高性能装置にもかかわらず、測定中の温度の不確実性は、1ミリケルビンほどです。

微視的反応の理解をさらに深めるために、Pearce氏はSurrey大学の学生Matthew Large氏と共同でCOMSOL Multiphysicsでの作業に取りかかりました。

形態不安定性をシミュレート

凍結、あるいは凝固は、溶融と比較すると、不確実性が高いようです。例えば、凝固するスピードがエリアによって異なる場合もあり、凝固温度に影響を与えてしまいます。

COMSOL Multiphysicsにて実装したフェーズ・フィールドメソッドを利用したシミュレーションによると、興味深い洞察を含んだ研究

「私たちが最終的に使用した動作モデルは、液体—固体連成インターフェースの時間変化に関連し、熱の影響や質量流量を理解するためには大変強力なモデルです。」

結果を得ることが出来ました。このような状況下で、液体—固体のインターフェースは、決して平面的なものではなく、凍結が進むと、インターフェースに波紋が現れ始めました。これらは、外に突き出始め、セルになります（図2参照）。それらの先端の温度はすぐに低下してしまい、根本との温度差が生じてしまいます。「この正のフィードバック・ループは、大変興味深いものです」とPearce氏は語ります。「このような効果は1960年代には、Mullins氏とSekerka氏により予測はされていましたが、この内容に関して明確な観察が行われたのは、初めてことです。私たちの最大の目的は、

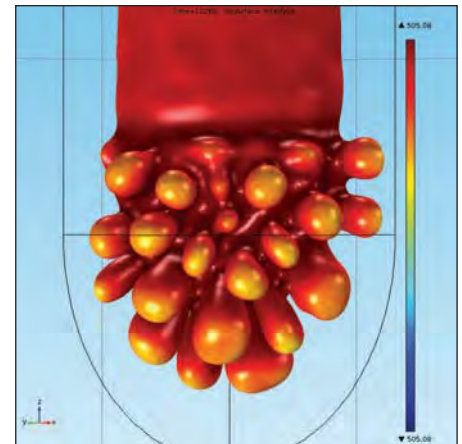


図2：形態的不安定な液体—固体インターフェース

プロセス上に設定されている高炉の影響を研究することにより凝固の様子をシミュレートすることでした。また使用中の実際のセンサーが測定しているものを認識することも目的でした。私たちが最終的に使用した動作モデルは、液体—固体インターフェース発展に関連し、熱の影響や質量流を理解するためには大変強

力なモデルです。」

実験で観察することが難しい、システムの詳細な様子がシミュレーションにより明らかになりました。また、全体的に不確定だった測定に関しても、COMSOLは多大なサポートになりました。

シミュレーションを通して得た情報は、装置の再設計に素晴らしく貢献し、測定精度は大変向上し得るでしょう。

More Information

<http://www.npl.co.uk/temperature-humidity/>



例えば 8 チャンネル

YOKOGAWA は、特色のある計測器のご提供を通じ、お客様の「価値」を高めるお手伝いをしております。

「オシロスコープは4チャンネルまで」が半ば常識とされる中、YOKOGAWAは、4チャンネルを超える測定がもたらす「お客様にとってのメリット」を重視、独自の多チャンネルオシロスコープとしてご提供することを通じて、お客様ご自身の価値を高めていただくお手伝いをしてきました。

2012年10月に発売した最新モデルDLM4000シリーズでは、波形の見やすい12.1型大画面を搭載し、薄型軽量化を実現、測定機能の強化を行いました。

ますます厳しさを増す開発競争を勝ち抜いていただくために…
ユニークなDLM4000の最大8チャンネル高速波形測定がお客様を強力にサポートいたします。

業界唯一 アナログ8チャンネル入力 500MHz周波数帯域
ミックスドシグナルオシロスコープ

DLM4000

製品の詳細情報は Web サイトをご覧ください。
<http://www.yokogawa.com/jp-yimi/>

横河メータ&インスツルメンツの電子計測器・通信測定器



縦型コンパクト
オシロスコープ
DLM2000



絶縁・多チャンネル
超高速メモリアナライザ
DL850



最大 6 系統の同時測定
高精度パワーアナライザ
WT1800



世界最高クラス性能
光スペクトラムアナライザ
AQ6370C



アクセスからメトロ、コアまで
多機能 OTDR
AQ1200



4~20mA 計装信号を
クランプオン測定
GL420

横河メータ&インスツルメンツ株式会社

〒190-8586 東京都立川市栄町6-1-3 立飛ビル2号館 TEL:042-534-1456 FAX:042-534-1438

技術的なご相談は…

●フリーダイヤル:  **0120-137-046**

エンジニアリング分析： 計算尺からアプリケーションまで

OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY、JAMES D. FREELS氏による寄稿

私が学部生だったころ、計算尺のクラスとしては最後の1クラスとなった、計算尺コースを修了しました。

数年後、ある鍵となる出来事のおかげで、私は自分のキャリアとなるコンピュータシミュレーションの道へと進むことが出来ました。原子力技術部の上級レベルでの室内実験では、FORTRAN コンピュータプログラム変更が必要な状況でした。そのプログラムでは、原子炉研究の反発一誘発力の可動域をシミュレートしていました。当時の私たちのコンピュータ環境は、IBM メインフレームコンピュータとパンチカードリーダが連動されたものでした。最終分析段階で、私たちは、実験結果が適合するまで、特定の反応度係数と減衰定数を「変更」していき、それは帯状の記録紙レコーダーから一連のデータとして表示されていきました。今となってはその

ターフェースで接続されています。コンピュータのそれぞれの進化段階にあわせて、現役エンジニアリングアナリスト達はシミュレーションも進化させていたということに大変感銘を受けました。その当時、廊下で以下のような会話をしたことをよく覚えています。「いつデスクトップパソコンで時間依存解析やナビエ・ストークス方程式の解を、それも3Dで得ることが出来るようになるだろうよ。」

その時、あなたがまだ気づいていなかったこと、その「いつか」が「今」という時代だということ。

エンジニアリングキャリアの後半にあたる、最後の数年間、私は幸運にも、COMSOL Multiphysics と出会い、そして熱狂的なファンになりました。同僚が、計算流体力学や CFD リソースとして、COMSOL を説明しようとする時、私は思わず彼らを訂正してしまう

「そして今、私が特に楽しんでいること、それは、老若男女に関係なく、COMSOL利用者をサポートすることです。」

当時のシミュレーションはおおざっぱなコンピュータツールだと思われていますが、その時代でさえも、私にとってシミュレーションはコンピュータで実装される中で最も素晴らしく価値が高いツールだと認識していました。

全日制の大学院時代、コンピュータ端末は飛躍的に進化し、パンチカードは珍しいアンティークとなりました。

音響カプラ、ダイヤルアップモデム、その後、数年が経過し、デスクトップ PC は端末に取って代わられました。しかし、そんな中でも、私たちは未だに、目の前のデスクトップ PC は、より大きなコンピュータへとイン

ほどのファンになっています。その単純な表現は、現実とは全く離れたものだからです。過去に、私は、COMSOL を「エンジニアリング分析のための有限要素法のツールボックス」と説明しました。「COMSOL」をもっと短くて適切な表現で伝えらしたら、「マルチフィジックス・シミュレーションのための高性能プログラミングインターフェース」がぴったりでしょう。これらの幅広い定義でさえ、COMSOL が実装可能な全てのメソッドやアプリケーションを網羅しきれていません。

私は COMSOL の活用と正しい認識のもとで、多大な有益を得ることができていま



JAMES D. FREELS 氏は、Research Reactors Division、Oak Ridge National 研究所、Neutron Science Directorate の上級研究員です。また High Flux Isotope Reactor でも勤務しています。Knoxville にある Tennessee 大学にて、原子核工学専門で理学士 (1977)、理学修士 (1979) を取得後、エンジニアリング化学、機械工学博士号 (1992) を取得しました。主に、コンピュータシミュレーション、計算流体力学、伝熱、過度電流システム分析を専門にしています。COMSOL 及び、有限要素解析に加えて、Linux オペレーティングシステムや関連したソフトウェアに強い関心があり、経験豊富です。

す。なぜならば、私の大学院時代に CFD シミュレーションを含む有限要素法メソッドについてのプロジェクトを研究し、それには COMSOL が大きく貢献したからです。さらに、長年にわたり、エンジニアリング分析の分野で数多くの熱狂的ファンと一緒にチームを組めたことも私にとっては幸運なことでした。COMSOL によく似たコードシステムを構築することが私たちの夢でしたが、残念ながら、その夢を実現することができませんでした。古い諺に、「長いものには巻かれろ」というものがありますが、それはまさに自分に当てはまる諺で、熱意をもって実践したいと思っています。そして今、私が特に楽しんでいること、それは、老若男女に関係なく、COMSOL 利用者をサポートすることです。特に、若いエンジニアリングアナリストたちは、簡単にこの新しいテクノロジーを吸収することができます。

直近の COMSOL カンファレンスでは、「将来は低価格で、問題に特化したフィジックスビルダー・アプリが、将来勝ち残っていくでしょう」とアナウンスされました。計算尺が今では、コレクターのアイテムとなり、ポケット電卓はいつでもどこでも手に入る日用品になっています。COMSOL アプリケーションは、近い未来、多くの現役エンジニアリングアナリスト達が入手し、利用するリソースとなることでしょう。