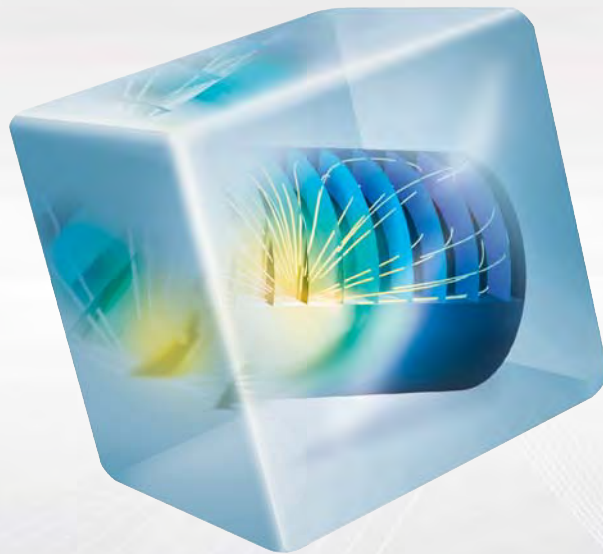


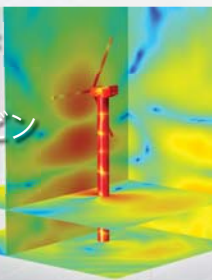
# COMSOL NEWS

2012 SUMMER 日本語版



**エネルギー:**

低騒音  
風力タービン  
Page 22



**環境流体工学:**

湖沼の  
水環境  
再生実験  
Page 27



【ISSMO/Springer賞受賞記念特別寄稿】  
新しいトポロジー最適化手法の開発  
とマルチフィジクス問題への展開

山田崇恭 (京都大学) Page 6~7

## COMSOL News 2012 日本語版を お届けします!

COMSOL Multiphysicsを日本国内にてご利用いただいているユーザの皆様、大変お待たせして申し訳ございませんでした。ユーザ事例集「COMSOL News 2012」日本語版が出来上がりましたのでお届けいたします。

この号では、米国COMSOL社から発刊された英文版のCOMSOL News 2010および2011に掲載された記事の中から抽出した記事の日本語訳を元に構成しております。COMSOL News 2011では英文の抄訳版だった立命館大学・吉岡修哉先生の記事「COMSOLを活用する湖沼の水環境再生実験」を、吉岡先生のご監修のもと、日本語の全文を掲載しました。

さらに、日本語版のみのスペシャル記事として、ISSMO(構造最適化国際学会)から35歳未満の若手研究者に授与されるSpringer賞を、2010年に日本人研究者として初めて受賞し、2011年の世界大会で表彰を受けた京都大学・山田崇恭先生に特別寄稿をお願いし、「新しいトポロジー最適化手法の開発とマルチフィジクス問題への展開」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を刊行いたしますので、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6月  
計測エンジニアリングシステム株式会社

### マルチフィジクス

- 3 燃焼中のロウソクのマルチフィジクス分析
- 4 容量結合プラズマ(CCP)分析
- 5 蚊捕獲装置の開発
- 5 バッテリーの異なる物理的プロセス

### ISSMO/Springer賞受賞記念 特別寄稿

- 6 新しいトポロジー最適化手法の開発とマルチフィジクス問題への展開

### コンシューマ向け製品 (家庭用品)

- 8 シミュレーションがより優れた家庭用品開発の手助けに

### 製造

- 11 最小限のエネルギーで最高の溶接を、モデリングで検証

### 音響

- 14 COMSOL音響モジュールを用いた超低周波音伝播の有限要素モデリング

### 磁気

- 18 CERNの世界最大の超伝導磁石の冷却

### エネルギー

- 20 燃焼モデルの必要性
- 22 低騒音風力タービン
- 25 海底エネルギーの採取

### 環境流体工学

- 27 COMSOLを活用する湖沼の水環境再生実験

### 医療

- 30 ポリマーの混合が作り出す、独自の一体成型医療用インプラント
- 34 MEMS(マイクロマシン)装置の飛躍的進歩による、血液粘性の簡単で正確な測定

### 食品

- 38 COMSOLはシェフの国際的料理コンテスト受賞に役立つ

### コンテンツ提供ご協力

AltaSim Technologies	Riello Burners
Commissariat à l'énergie atomique	U.S. Army Engineer Research and Development Center (Geotechnical and Structures Laboratory)
Continuum Blue	Veryst Engineering
Ecole Nationale Supérieure de Techniques Avancées	Xi Engineering Consultants
Microvix	京都大学
NOFIMA	立命館大学
Procter & Gamble (Italy)	

## COMSOL NEWS

2012日本語版  
Summer Edition

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

[comsol@kesco.co.jp](mailto:comsol@kesco.co.jp)

©2012 COMSOL. COMSOL, COMSOL Multiphysics and LiveLink are either registered trademarks or trademarks of COMSOL AB. AutoCAD and Inventor are registered trademarks of Autodesk, Inc., in the USA and other countries. LiveLink for AutoCAD and LiveLink for Inventor are not affiliated with, endorsed by, sponsored by, or supported by Autodesk, Inc., and/or its affiliates and/or subsidiaries. MATLAB is a registered trademark of The Mathworks, Inc. Pro/ENGINEER and Creo are trademarks or registered trademarks of Parametric Technology Corporation or its subsidiaries in the U.S. and in other countries. SolidWorks is a registered trademark of Dassault Systèmes SolidWorks Corp. CATIA is a registered trademark of Dassault Systèmes. SpaceClaim is a registered trademark of SpaceClaim Corporation.

# 燃焼中のろうソクのマルチフィジックス分析

下記のソリューション手法は燃焼中の炎に関係した温度分布を予測する様々な用途に適用されています。

AltaSim Technologies社(米国オハイオ州コロンブス)

1 50年以上前、Faraday氏は、燃焼中のろうソクの現象における最初の総合的研究を行いました。ガスが互いに拡散する割合によって進行する複雑な燃焼作用は、炎の中で高い非線形の温度解析結果を生み出します。炎の局所温度は1400℃を超え、熱伝導は、放射、伝導、対流から構成されています。ろうソクの低い溶解ポイント、炎が燃焼する前に、毛細管流動を通じて大量に移動することができる芯の近くで、局部相変化をもたらします。全体として正確に基礎物理からろうソクの作用をモデル化するいくつかの試みは、膨大な作業となり、多くの問題解決のための手腕が要求されません。

AltaSim Technologies社は、COMSOL Multiphysics ver3.5解析ソフトウェアを、一般化されている方法と組み合わせ、燃焼中のろうソクの計算モデルを開発しました。これらのモデルは、安定してろうソクが燃焼する間の熱伝導と流体の分析に焦点を当てたものです。

熱伝導の解析は、伝導、対流、放射を組合せたものです。ろうソクの炎からの放射はこのモデルに含まれ、このモデルを利用して、放射するガス量と、非局所的に結び付けられる炎の放射表面を定義します。この表面からの発散される放射は、炎の中の温度分布によって決定され、従って、炎中のガスは、この放射のために冷却されます。計算の必要性を減らすため、プルーム(煙)の複雑で、動的性質は、時間平均近似値を生成するために、人工的な拡散を使って計算されました。液体の熔融ろうの中の熱伝導は、水平方向の対流を説明するために、異方性熱伝導率を使ってモデル化されました。

図1は、半分が燃えた3本芯のろうソクのアプローチを使って、流速領域の予測を示し、明らかに、炎から流れ出て広がりを示しています。熔融ろうの中、およびろうソク容器の中の予測される温度分布(図2)は、実験と比べて遜色ない結果となっています。

これらの結果は、燃焼中の固体と液体の接点の位置の分析、ろうソクおよびその周囲の環境における温度分布の分析に利用できます。

これらの数値解析手法は、燃焼する炎に関連する温度分布を予測する様々な用途に適用されています。温度と流れの分布は、ろうソク容器内の炎の位置に大きく左右され、容器の形状や容器内のろうソクの高さにも影響を受けます。ろうソクの炎のすぐ外側の対流や熱伝導で、近くの物体への熱の伝導を予測することができます。

## 協力者に対する謝意

この研究は、AltaSim Technologies社(米国オハイオ州コロンブス)のL.T.Gritter, S.P. Yushanov, J.S.Crompton, K.C. KoppenhoferがCOMSOL Multiphysicsを活用して実行したものです。詳しくは下記を参照してください。

<http://info.hotims.com/28057-152>

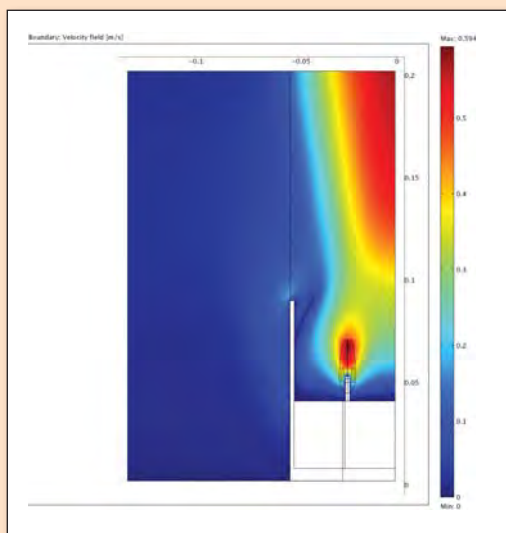


図1 ろうソク容器の半分の高さで燃焼するろうソク周囲の流速分布図

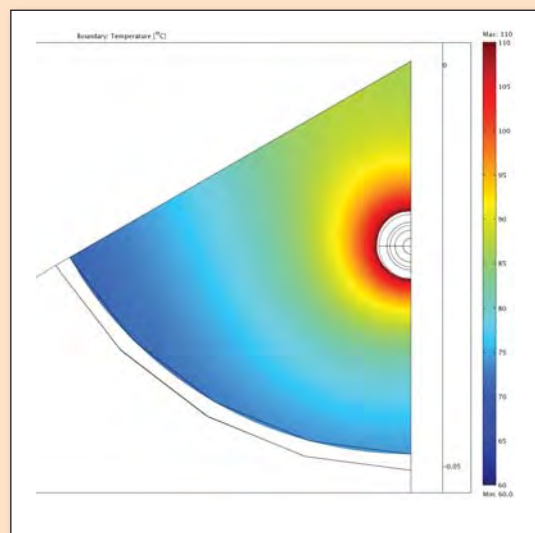


図2 燃焼中の熔融ろうの表面温度(6分の1対称モデル)

## 容量結合プラズマ (CCP) 分析

マルチフィジックスシミュレーションは新CCP製造技術の開発支援のために活用できます。

AltaSim Technologies社(米国オハイオ州コロンブス)

プラズマは、互いに影響しあい、外部から加えられた電磁場と関係を持つ電子、イオン、ニュートロンから構成されています。薄膜フィルムのプラズマエッチング加工や沈着は、先端微細電子装置の製造にとって重要なプロセスです。これらのプロセスは、容量結合プラズマ (CCP) を共通して利用しています。その中でプラズマは、2つ以上の電極間の部分の振動電場を用いて起動され、継続維持されます。一般的に容量結合プラズマは、10~100MHzの範囲の周波数で発生するが、いくつかの応用では、より低い周波数で稼動することが可能です。この形態では、電子と原子あるいは分子との衝突によって、また電極間のイオン衝撃に起因する2次電子放出によって自由電子が生成されます。プラズマのマルチフィジックス特性は、数値シミュレーションの大きな課題です。

CCPの分析は、プラズマシースの存在やプラズマの動的性質、そして周期的安定状態に近づくために必要な多数のRFサイク

ルのために、更に難しい課題となっています。プラズマへの励起電力は極めて非線形であり、プラズマシースの電場の強い傾斜のために、十分に微細なメッシュが用いられないと、数値的な不安定を招く恐れがあります。また一般的なCCP化学反応装置には、非物理的なイオン流束をもたらす、大量の局所電場を引き起こす可能性の高い鋭角の箇所があります。

AltaSim Technologies社は、COMSOL Multiphysicsを活用して、マックスウェルケースと非マックスウェルケースのために、線対称のCCP反応における低周波RF放出1次元および2次元シミュレーションを実行してきました。

電子輸送特性とタウンゼント係数は、プラズマの数値解析のための前処理ステップとしてボルツマン2項近似を使って計算されます。イオン密度は、非マックスウェルプラズマの1次元シミュレーションとして、図1に示される。2次元でのマックスウェルプラズマケースのプラズマの動きを解析す

るための拡張モデルは図2および図3に示されます。このシミュレーションは、プラズマのマルチフィジックス特性を組み込み、その結果、新しいCCP処理技術の開発を支援するために利用することが可能です。

### 協力者に対する謝意

この研究は、AltaSim Technologies社(米国オハイオ州コロンブス)のL.T.Gritter、S.P. Yushanov、J.S.Crompton、K.C. KoppenhoeferがCOMSOL Multiphysicsを活用して実行したものです。

詳しくは下記を参照してください。

<http://info.hotims.com/28057-153>

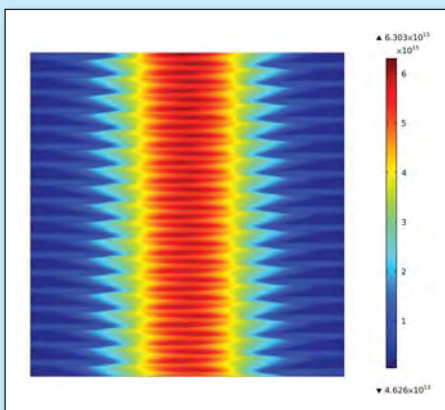


図1 時間の関数としてイオン数密度を示す容量結合プラズマ (CCP) の1次元シミュレーションプロセス

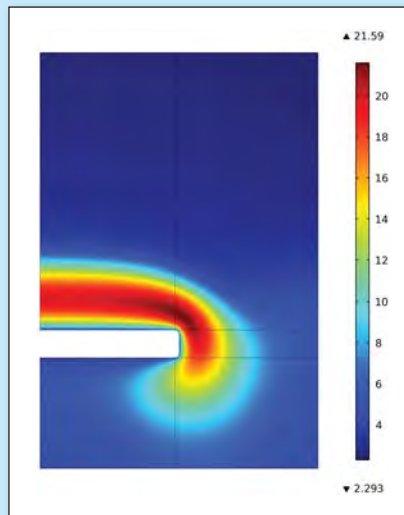


図2 容量結合プラズマ (CCP) の2次元シミュレーションプロセスからシース領域における電子温度

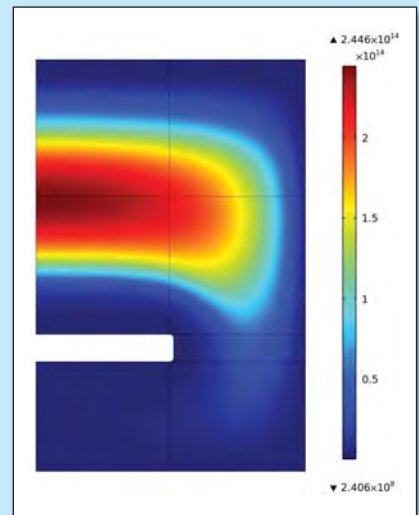


図3 容量結合プラズマ (CCP) の2次元シミュレーションプロセスからプラズマにおける電子密度

## 蚊捕獲装置の開発

Jeffrey Crompton, Sergei Yushanov, Kyle Koppenhoefer (AltaSim Technologies社・米国オハイオ州コロンブス)、および Tom Kruer (Gizmotech社・米国ケンタッキー州エッジウッド)

5歳以下の子供たちが年間100万人、言い換えると30秒毎にマラリアによって、命を落としています。その影響を受けている国々の経済は、犠牲者の数と共に年間、数百万USドルの損失を被り、貧困の負のスパイラルに陥る事になります。

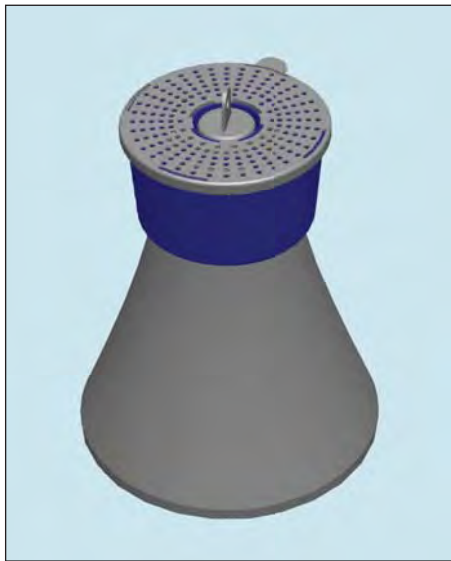


図1 ソーラーパッシブな蚊捕獲装置

このマラリア拡大を防ぐため、AltaSim Technologies社とGizmotech社は共同で、発展途上国内でも使用できる手ごろな価格、かつ効果的な蚊捕獲装置を開発しています。

小さなコーン型の罟は人間の汗から抽出した誘引物質と安価な相変化ワックスの組み合わせで出来ています。日中、ワックスは太陽エネルギーを吸収し、夜、人体温度の熱が放出され、それにより誘引物質は蒸発します。これにより、人が寝ている状態とよく似た匂い、湿気、および体温の状況が作られます。蚊はコーンに誘惑され、そして罟にかかってしまいます。

AltaSim Technologies社はCOMSOL Multiphysicsを使用し、罟の中の液体の流れや熱分布を解析し、その後、蚊を誘惑するための温度と流速を最適化しました。

分析的アプローチにより迅速な技術的検証を確保することができ、製造、及び使用する以前にデザインを最適化することができます。

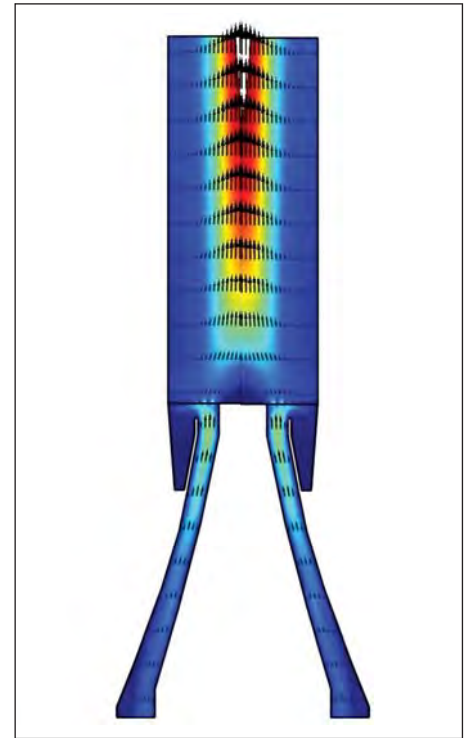


図2 蚊捕獲装置内の対流フロー

## バッテリーの異なる物理的プロセス

Ed Fontes (COMSOL社・米国マサチューセッツ州)

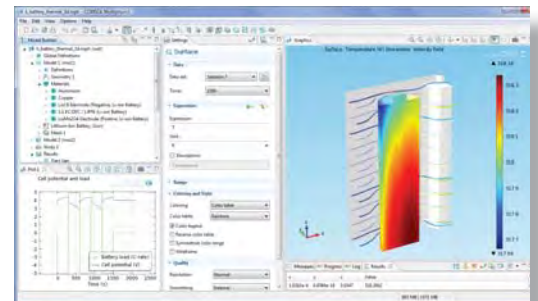
バッテリーのどの部分を研究、設計あるいは改良したいかによって、多くの異なる物理的プロセスが検討され、モデル化される必要があるでしょう。

バッテリーの第一の目的は、利用可能な電気エネルギーを生産することであるので、そのモデルは、多分、電力量の保存を検討しなければならないでしょう。これには、電流コレクターや電極マトリックスを通じて流れる電子と、電解液やセパレーター、薄膜を通してイオンとして運ばれる電荷があります。電気回路が完全であることを確認するためには、これらの2つの輸送メカニズムの間の界面で、電子の移動が必要となります。これは電極で生じる電気化学反応を通して起きます。これらは、電気化学動的パラメータに加えて、電極表面における電位や反応

物質や生成物の濃度に左右されます。

これらの電気化学作用もまた、バッテリー物質収支の説明に不可欠であり、電気エネルギーを供給できる化学物質の量に不可欠なものです。物質収支もまた、電解液の中で生じるあらゆる化学反応と同様に、電極表面のイオン移動、対流、拡散を通じた化学種の輸送を考慮する必要があります。

バッテリーにおける主要な設計要素は熱にどのように反応するかということです。この熱は、バッテリーがハイブリッド車のモーター近くに設置されているような場合には、その稼働環境からもたらされ、電気回路の中のジュール熱や化学反応熱の中で生み



出されます。これらは全て、エネルギーバランスとして説明される必要があり、熱応力に関する冷却用空気の流速のような操作パラメータを決定することに役立ちます。

# 【特別寄稿】新しいトポロジー最適化手法の開発とマルチフィジックス問題への展開

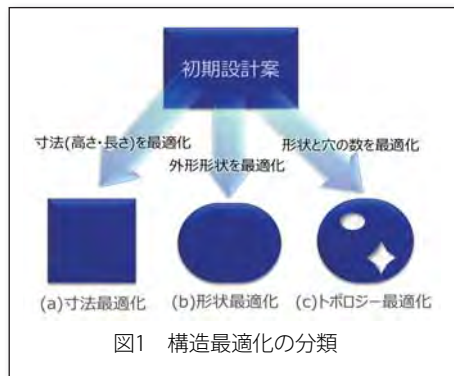
ISSMO/Springer賞  
受賞記念

—フェーズフィールド法の考え方とレベルセット法に基づく方法論の提案—

山田崇恭 (京都大学大学院工学研究科 機械理工学専攻 助教・博士(工学))

近年、自動車や航空機等の産業製品の開発基盤として、コンピューターが積極的に導入され、開発期間の大幅な短縮が可能となりました。例えば、数値シミュレーションによる性能評価を行うことにより、試作試験回数的大幅な削減が可能になりました。このような背景の中、コンピューターによる高度な設計支援技術(CAE: Computer Aided Engineering)の開発は益々重要な課題であると言えます。

CAE技術の発展と共に、性能の向上を目指した設計案の改善が積極的に図られるようになり、その極限を目指す技術である構造最適化が注目を集めています。構造最適化とは、設計者の勘と経験に基づく試行錯誤に頼らずに、力学的・数学的根拠に基づいて、構造物の最適な形状を自動的に求める方法です。その方法は、設計自由度の観点から、図1に示す3つの方法(寸法最適化、形状最適化、トポロジー最適化)に大別されます。



中でもトポロジー最適化は、設計対象物の寸法や外形形状だけではなく、穴の数などのトポロジー(形状形態)をも変更可能な最も設計自由度の高い構造最適化手法になります。

トポロジー最適化の基本的な考え方は、構造最適化問題の材料分布問題への置き換えです。これは、ディスプレイの描画方法に似ています。例えば、図2に示すように、ディスプレイに表示される文字を、ピクセルのONとOFFによって表現することができます。さらに、このピクセルのONとOFFを切り替えることで異なる文字を表現できます。



このような考え方に基づき、トポロジー最適化では、構造最適化問題を最適な材料配置問題として定式化します。その代表的な方法として、均質化設計法と密度法があります。これらの方法では、明示的な物体境界が存在せず、物体と空洞の中間状態を許容した最適構造を求める方法です。そのため、得られた設計解を設計案として直接適用することができない問題を持ちます。そして、明示的な境界が存在しないことに起因して、設計する物体の境界上に、陽に境界条件を与えることができないため、適用できる構造最適化問題が限られている問題を持ちます。

このような課題を本質的に解決する方法として、レベルセット法に基づく構造最適化法がいくつか提案されています。レベルセット法は、レベルセット関数と呼ばれるスカラー関数の等位面により境界を陰的に表現する方法であるため、定式上、明確な境界が存在します。実際には、レベルセット関数値から、連続な材料分布へと補間し、レベルセット関数に関する設計感度を適用する方法が多く用いられ、その場合は、密度法と比較して、数値計算上の相違点がなくなります。しかしながら、レベルセット法に基づく方法は、厳密に境界を取り扱う方法へと拡張が可能なが重要であると言えます。すなわち、厳密に境界を取り扱う場合においては、設計感度の取り扱いが本質的に異なるため、全く異なる新しいアプローチであると言えます。例えば、境界のみを離散化した場合[1]、密度法では領域内部の設計感度が存在しないため、本質的に適用することが不可

能です。それに対して、レベルセット法に基づく方法では、解析的に設計感度を導出することにより、トポロジー最適化法を構築することができます。

私の研究グループでは、レベルセット法による形状表現と、フェーズフィールド法の界面エネルギーの表現方法に着目し、新たな方法論を提案しました[2]。この方法では、解析的に導出される設計感度を適用しているため、解析方法や境界の取り扱いに依存せず、統一的に最適化アルゴリズムを構築することが可能です。そして、導入した仮想的な界面エネルギーの寄与の度合い(正規化係数)を設定することにより、最適構造の幾何学的複雑さの制御をも可能とします。(図3)

この方法論を振動問題(図4)、メカニズムの創成設計(図5)、熱問題(図6)[3]、電磁メタマテリアル(図7)[4]等の多くの最適設計問題に展開しました。

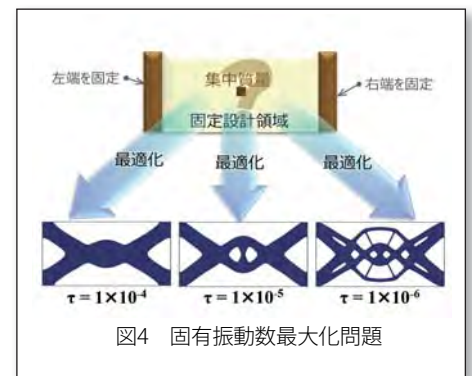
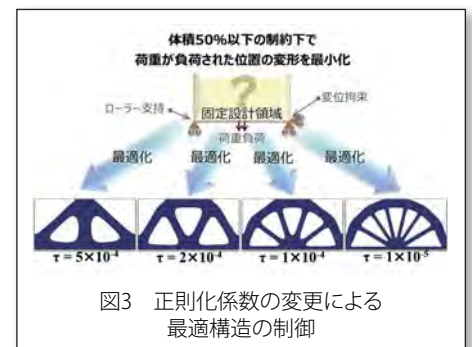




図5 コンプライアントメカニズムの最適設計

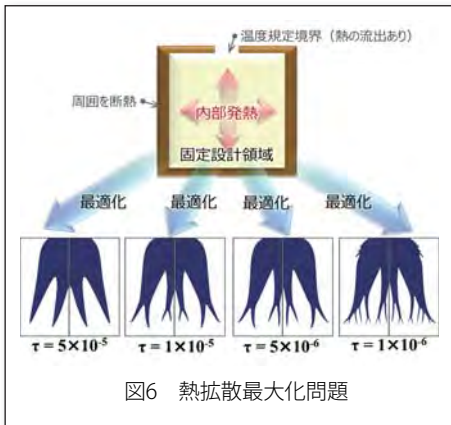


図6 熱拡散最大化問題

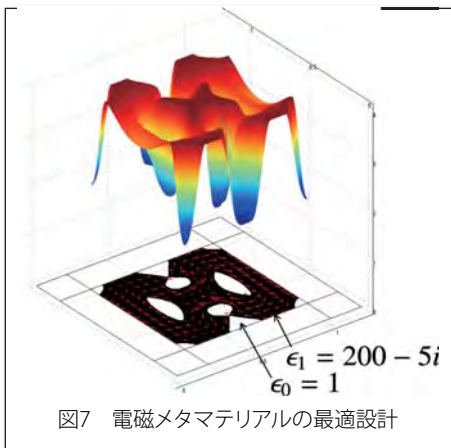


図7 電磁メタマテリアルの最適設計

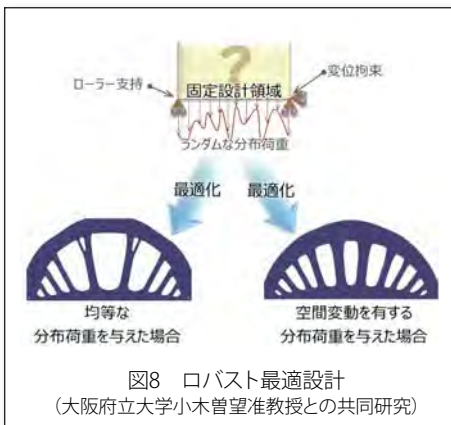


図8 ロバスト最適設計  
(大阪府立大学小木曾望准教授との共同研究)

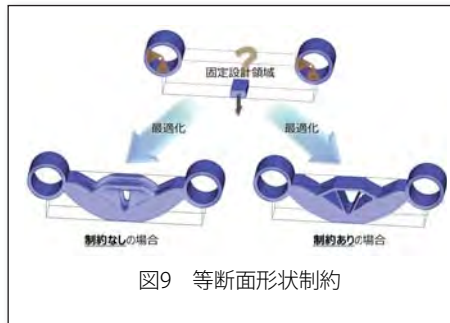


図9 等断面形状制約



図10 射出成形機用高性能取出口ロボット

さらには、ロバスト最適設計法への拡張(図8)[5]、製造条件から要求される幾何学的制約を考慮した拡張(図9)も行いました。

また、京都大学西脇研究室と株式会社ユーシン精機様との共同研究により、射出成形機用高性能取出口ロボットの開発に本最適化手法を適用しました(図10)。その結果、同社従来機種に比べてロボット総重量を13%削減することに成功し、軽量化に伴うロボット動作の高速化により、取り出しに必要なサイクル時間を11%削減することができました。

今後の展望として、ナノスケールにおける構造最適化、非定常混相流に対する構造最適化、マルチスケール構造最適化等の新たな領域へ挑戦していきたいと思ひます。

### 参考文献

- [1] T. Matsumoto et al. CMES, Vol. 78, No.2, pp. 77-94.
- [2] T. Yamada et al., Comput. Meth. Appl. Mech. Eng., Vol.199, No.45-48, pp.2876-2891, (2010). DOI: 10.1016/j.cma.2010.05.013
- [3] T. Yamada et al., J. of Mechanical Design, Vol.133, No.3,(2011). DOI: 10.1115/1.4003684
- [4] M. Otomori et al., Comput. Meth. Appl. Mech. Eng., (2012). DOI: 10.1016/j.cma.2012.04.022
- [5] 植田他, 日本機械学会論文集(C編), (2012) No.2011-JCR-1132

### 執筆者について

山田崇恭(やまたたかゆき)  
京都大学大学院工学研究科機械理工学専攻助教。博士(工学)。2007年京都大学工学部物理工学科卒業。2008年京都大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻修士課程修了。2010年同博士後期課程修了。名古屋大学大学院工学研究科機械理工学専攻助教を経て現職。  
ISSMO/Springer Prize、日本機械学会賞(論文)等の著名な学術賞を11件受賞。

### 特別寄稿について

本稿をご執筆いただいた山田崇恭先生は、2009年に開催されたISSMO (International Society for Structural and Multidisciplinary Optimization・構造最適化国際学会)の国際大会WCSMO 2009にて発表された「A New Level Set-Based Topology Optimization Method Using a Fictitious Interface Energy Model Based on Phase Field Method Concepts」という表題の論文で、日本人研究者として初めてISSMOの「Springer賞」を受賞されました。

山田崇恭先生の受賞発表は、ISSMOのAnnouncementページにて「Announcing Awardee of ISSMO/Springer Prize 2009」(2010年4月21日付)という件名で掲載されております。

ISSMO(構造最適化国際学会)Webサイト:  
<http://issmo.net>

この賞は35歳以下の若手研究者のみが受賞することができるもので、2年に1回開催される国際大会WCSMOにて発表した論文をISSMOの選考委員会が審査し、1回の大会にあたり1名のみ受賞することができる、大変名誉ある賞です。

山田崇恭先生は、平素のご研究にあたって、京都大学にて所属されている西脇眞二教授の研究室の皆様と共にCOMSOL Multiphysics®をご利用いただいております。今回そのご縁から、Springer賞受賞記念、およびご研究成果の紹介として、お忙しい中を特別にお時間を頂戴し、ご寄稿いただきました。



# シミュレーションがより優れた家庭用品開発の手助けに

家庭用品の製造及び輸送にかかる時間短縮と経費削減は、モデリングにより実現可能に。

VINCENZO GUIDA (PROCTER & GAMBLE社・イタリア ポメツィア)

**P**rocter & Gamble社内のファブリック・ホームケア部(Fabric and Home Care Division)のR&Dプロセスデザインエンジニアという私の役割は、大量の洗濯洗剤と乾燥機添加剤製造において、信頼かつ製造プロセスの費用効率が高いものをデザインする事です。化学的、物理的性質の両方を持ち、複雑な多成分混合物である家庭用品を正確に製造するには、詳細工程が必要です。

家庭用品はとても複雑で、数多くの困難な工学的問題を引き起こす異常性質というものにも直面しています。

モデリングツールの使用は容易で、正確な結果を即座に提供してくれます。またそれは新商品を効率よく、迅速に開発する上で必要不可欠なものです。

洗剤は合成物のため、複数の物理が関連しており、カスタマイズされたモデリング開発が必要となります。それは、質量、エネルギー、運動量収支を扱うため特殊な構成関係が使用可能なもので、市販のモデリングソフトウェアの中では一般的に見られる事はありません。モデリングを迅速に開発し、構成方程式を試し、実験結果とモジュールを比較する、これは全てCOMSOLが提供するものです。また高速収束アルゴリズムを識別したり、コードを書きだしたりということに自分の時間をとられることなく、物理を正確に解くことに自分の時間を費やすことができます。

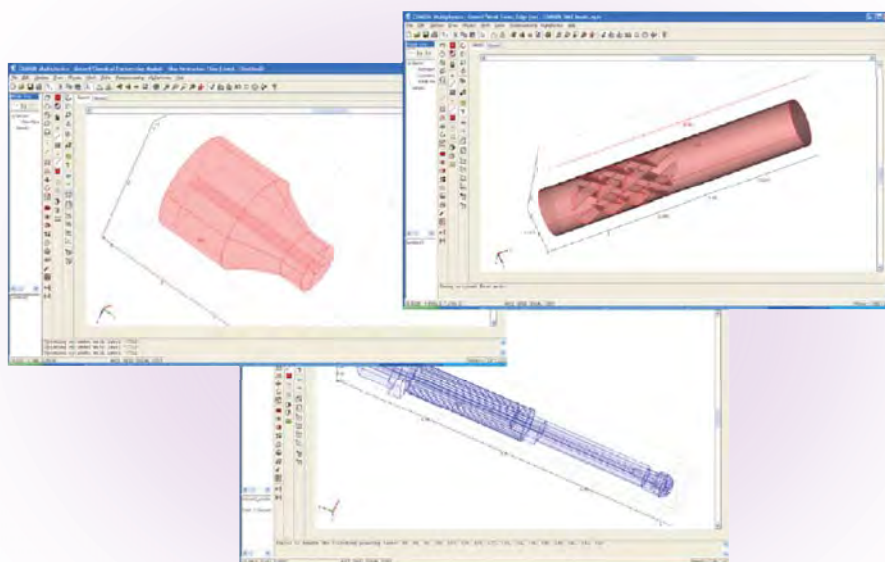


図1 液体洗剤の製造プロセス上の成分形状

## 商品にストレス、圧力を加えない

最初の研究では、構造化された液体洗剤の圧力工程について実験してみました。

高アスペクト比モデリングの結果、液体洗剤の中には流動的、物理的性質構造の液体のものもあり、微小な棒状結晶構造粒子が大きく関係しています。液体洗剤を適切に製造するために、その化学成分だけではなく微細構造の管理も必要不可欠になります。

結晶は、マトリックス内で均質的に分散さ

れ、必要であれば、順応されます。

これらの結晶により、製品にゲル構造が起こります。必要な流動的性質を生み出し、経年劣化を防いで製品を保存します。

製造過程中、微細構造はせん断履歴によって管理することが可能です。せん断力は静的あるいは動的混合物、ポンプ、ノズル、あるいはパイプに応用されます。

材料を追加し、混ぜ合わせる過程同様、これら全てのプロセスは異なる流れの中で、フローを分裂したり、再結合したりします。原料が練りこまれてから、ビンに入れられるような完成品になるまでの間に、せん断力は必要不可欠です。しかしながら、圧力が強すぎると製品の微細構造に対して弊害を及ぼします。

せん断を行って過ぎてしまうとゲル構造を破壊してしまうことになります。

行いすぎにより、製品は物理的に分離され、寿命を短くしてしまい、製品は不適切な厚みになりやすいです。消費者はせん断されすぎた製品は、扱いにくく、外見も好ましく思わないようです。

製品への歪みを避けるため、製造過程での圧力は定量化する必要があります。それに

「モデリングを迅速に開発し、構成方程式を解き、実験結果とモジュールを比較する、これは全てCOMSOLが提供するものです。また高速収束アルゴリズムを識別したり、コードを書きだしたりということに自分の時間をとられることなく、物理を正確に解くことに自分の時間を費やすことができます。」



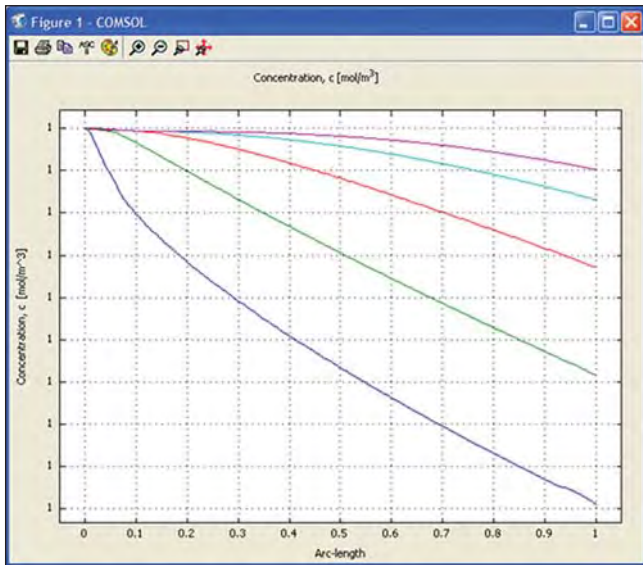


図2 様々な流量率におけるパイプの構造因子プロット

より、微細構造分析中にその影響を予想する事が可能になります。

この情報は Procter & Gamble社サイズのみキサー、ポンプ、パイプラインの手助けになるのと同様に、混合装置、梱包、ノズル、マニホールドや他の要素の過程で、圧力低下を計算する時に使用されます。

この情報を入手するために、せん断強度機能としての分析動力を表現する擬似的構造要因の定義づけが要求される合成物モデルを作成しました。

図1はモデリング済み装置の形状を示します。図2は、様々な流量におけるパイプの弧の長さに沿った構造因子プロットを表示しています。パイプから製品が流れる時、微細構造分析で示すようにその因子は低下します。この結果をふまえ、エンジニア達は“10%以上の構造体を破壊する事なしに、パイプはどれくらい長く使用可能なのか”などという質問の答えを探しながら、デザイン因子を修正します。

製品構造は年月と共に変化するため、エンジニアにはNavier-Stokes(ナビエ・ストークス)のようなスタンダードな流量の方程式は使用することができません。

COMSOLを実装する前、私たちのエンジニアは、物理的な実験を行い、その実験結果を使用することがほとんどでした。流体力学及びせん断圧力をモデル化するために、時々有限要素ソフトウェアを使用していましたが、これらの特性を構造分析へは連結する事ができませんでした。

モデリングの専門家ではない私自身が、自分自身で物理の独特な合成に比較的迅速に取り組むことができたのはCOMSOLのおかげです。

「モデリングの専門家ではない私自身が、自分自身で物理の独特な合成に比較的迅速に取り組むことができたのはCOMSOLのおかげです。」

その利益はとても意義深いものです。例えば、試験的生産工程及び運転パラメータ用のパイロットプラントを手配すると、通常、時間的には1週間ほど、費用は数千万ユーロかかります。しかし、COMSOLモデル使用の場合、1時間以内に工程デザインを調べ、分析することが可能です。またこのモデル

リングは、ある特定に提案されているプロセスに関して、懐疑的な人々にとっても効果的だということもわかりました。

繰り返し実験を行い、その結果を彼らに示す事ができます。実際の実験と比較して、モデリング結果が実際ものとても近いということを実証したところ、彼らは今まで以上に結果をととても真剣に受け入れてくれるようになりました。

### 発熱を避ける

COMSOL使用の第2の例としては、乾燥機添加剤の熱暴走分解を避けることがあげられます。これは製造後の保管および配送期間中に起こることで、店頭販売前に起こってしまいます。ある製品の熱暴走が起ってしまう場合、その製品の有効性は失われ、販売する事が出来なくなります。その結果、何百万ユーロが無駄になってしまうことになりました。

Ariel Stain Remover社の乾燥機添加剤(アメリカではTideのブランド名で製品販売を行っています)のケースを考えてみましょう。乾燥機添加剤には、時間とともに外熱によって自然に分解されてしまう過炭酸ナトリウムを含む漂白成分が含まれています。

もしこの製品がかなりの高温な場所で大量に保管されたとしたら、この分解熱は温度上昇を誘発し、分解率は指数関数的に高くなってしまいます。これが熱暴走です。

一言でまとめると、この問題は、生成熱は量に比例し、消散熱は表面積に比例します。その物質が保管される時のベストなシナリオは、その熱平衡に達することです。

しかしながら、その物質が、たとえ大きな容器1つに保管されたとしても、多数の小さな容器で保管されたとしても、その保存方法に関係なく、その保管された物質の量が増加すると、表面積/量の率は低下し、必然的に熱暴走を引き起こす事になります。製造環境において、不適切な空調の結果、火災を引き起こすというような危険な状況を導いてしまいます。

消費者用梱包では火災は発生しませんが、しかし、問題は製品の活性度が下がり、品質が落ちてしまうことです。熱暴走の可能性を考慮すると、特に空調状況が優れない倉庫に製品が保管される場合や高温気候地域に配送される場合は、パレット上における

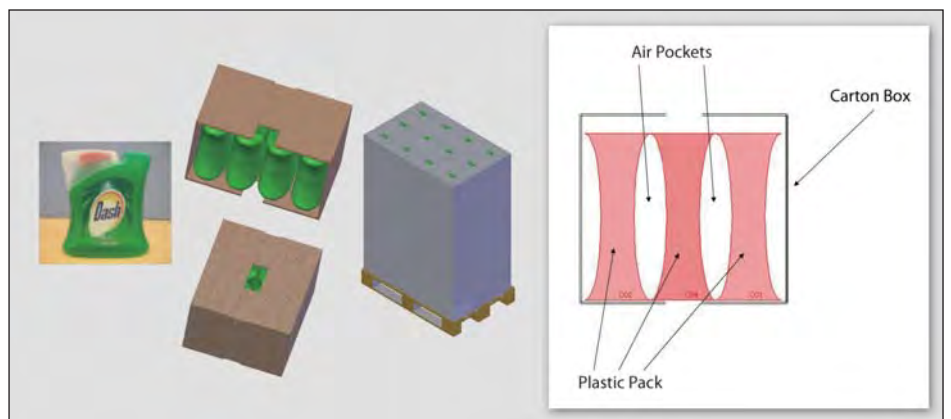


図3 (左)消費者用紙パックに梱包され、パレット上に置かれたもの。熱暴走を導く可能性が高いエアポケットフォーム



製品数は限られます。そのようなシナリオ上での保管を鑑みる場合、問題が起こり得るそれぞれの条件下での物理的試験は実現不可能です。

熱暴走が起こり得る全ての危険シナリオを分析するために、COMSOLモデルは熱ビルドアップの追加として作成されました。ここではパッケージの周りに出来るエアポケット内での自然対流の液体力学が研究されました。(図3参照)

熱暴走の危険を避けるため、Naples大学と共同で熱暴走モデリングを開発してきました。このモデリングではエアポケット内での自然対流を含む、パレット上のエネルギーバランスを分析します。このモデルでは、非等温流体力学と複雑な3D幾何学上での熱伝導物理を共役させています。

モデリングの確証として、異なる熱活動や他の物理の特性を考慮しながら、実際の製品の様々な形状のパレットの物理テストは行われました。パレットは30~50℃のオープンの中で13日間、焼かれます。

モデリングが実証されると、安全に保管できる温度、パレット形状の関数として暴走までの誘発時間、及び製品の熱活動を設定する事ができました。

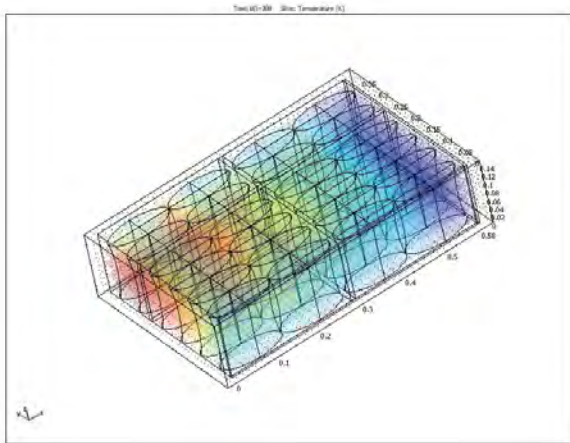


図4 パレット製品の温度プロファイル

熱持続性モデルが実証され、それが改善されると、重ねても安全なパレットの推奨レイヤー数を作成することができます。最適化されたパレット形状により数百万ユーロの物流コストを削減する事ができ、物流チェーンの環境影響を減らす事にも役立つ事になります。また、この研究結果が私たちにもたらしてくれたものは、供給プロセスの中で維持しなければならない温度に関してよりよ

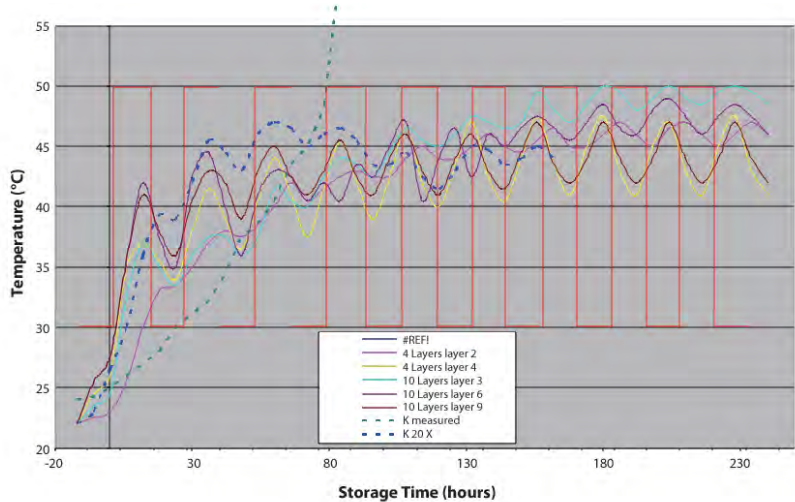


図5 実際の温度(実践)とモデリング結果(青い点線)との比較。赤いプラスはオープン温度のサイクルを示します。

い決断を下すことができるようになったこと、およびProcter & Gambleの製品を品質と効果を失うことなく、消費者の手へ届ける手助けができることです。

COMSOLはこの仕事をするにあたり、完璧なツールであったということを証明しました。COMSOLモデルは多数の異なるシミュ

レーションコンディション(過度電流、定常状態、高度な熱流量非線形構成方程式、高温勾配など)を実行するに十分な機能と性能を持ち、8 GBメモリの標準 4 プロセッサワークステーションで動作可能です。それだけでなく、1時間以内にリアルタイムの結果が出、ユーザーフレンドリーなCOMSOLインターフェースは施設安全担当マネージャ用のツールをデザインする事にも使用され、それぞれの施設での熱暴走リスクを査定するために自主的にシミュレーションを実行する事ができます。



## 執筆者について

Vincenzo Guida氏は、イタリア・ポメツィアにあるProcter & Gamble社のFabric Care Divisionのケミカルエンジニアです。Naples大学の修士号を取得しました。

彼の研究は液体構造の流動学、漂白システムの化学、及びモデリングの(化学的、物理的)スタビリティが含まれます。Guida氏は液体洗剤と乾燥機添加物製品のデザイン及び機能性拡大を担当しています。



# 最小限のエネルギーで最高の溶接を、モデリングで検証

FREDERIC ROGER博士 (ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DE TECHNIQUES AVANCEES PARISTECH)

**E**PRIの研究者たちによると、次世代の原子力発電所は、60年かあるいはそれ以上の設計寿命があるとされています。(参考資料1) 平均使用期間を引き上げるため、また、予想外に費用がかかる修理とメンテナンスを最小限に抑えるために、改良された溶接および製造は必要不可欠です。このレポートでは、稼働中の施設で最も起こり得る不具合は溶接部分あるいはその近辺で起こること、及び評価ではこれらの不具合の多くは、決して溶接、製造、或いは表面条件が最適なものではないという理由から起こっているわけではないことを示しています。

溶接と製造作業を改善するために、また新たな原子力発電施設が確実に60年以上の寿命を確保するために、多数の企業がシミュレーションソフトウェアを使用しています。例えばパリにあるthe Ecole Nationale Supérieure de Techniques Avancées Paristech (ENSTA Paristech)は、溶接を研究するためのメカニカルエンジニアグループを構成しました。

ENSTAはフランス国防省監督下の公共機関です。溶接グループの主要スポンサーの1つがARVA NPであり、地球規模の原子力発電所を所有するの世界的リーダーでもあります。

「重力、電磁力、アーク圧力、及び熔融池表面に沿って勾配する表面張力から生じ、対流に誘導されるマランゴニ効果などを含む、流量を引き起こす全ての要素をCOMSOLモデリングは考慮に入れることができます。」

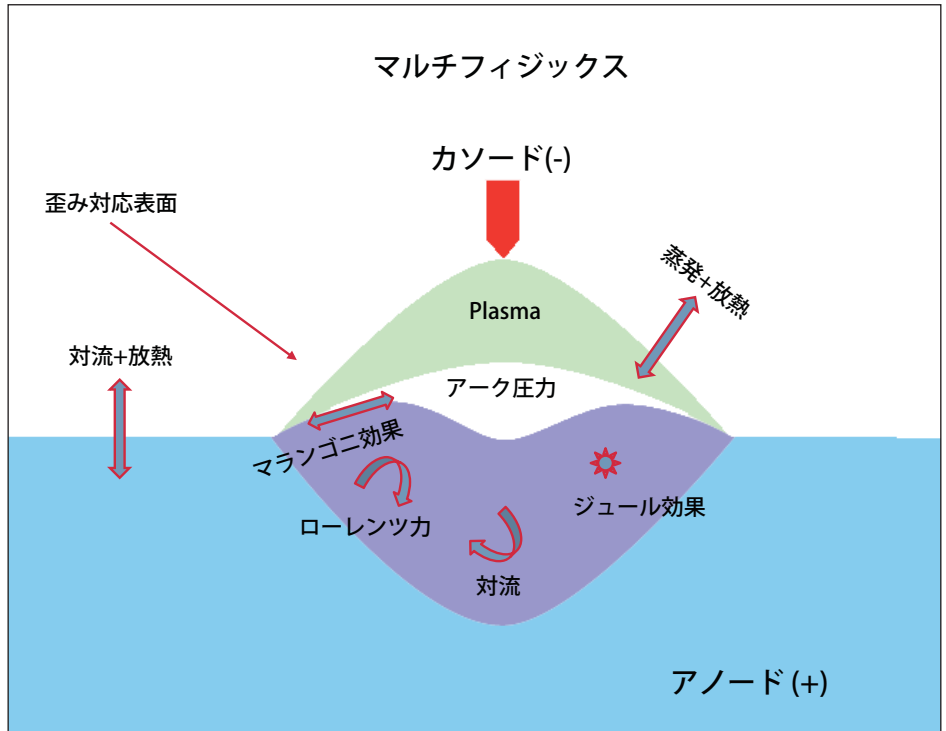


図1 アーク溶接での最初の物理現象、熔融池内から流れた液体は押し流され、浮力、電磁力、表面張力及びアーク圧力の結合により影響を受けます。

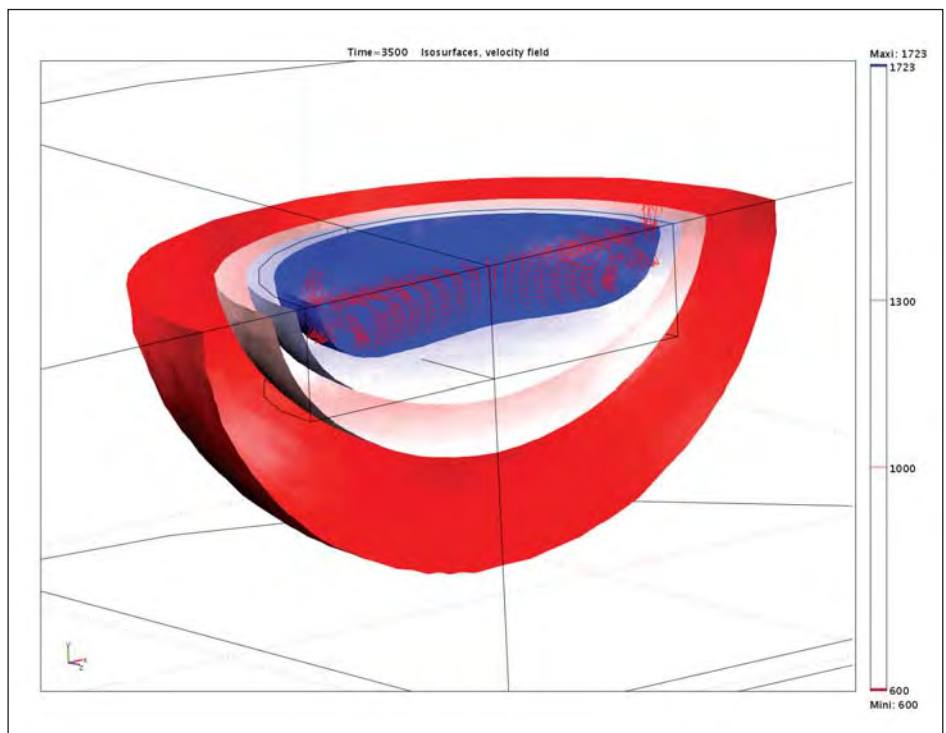


図2 等温ラインと熱持続終了後の熔融池の3D描写

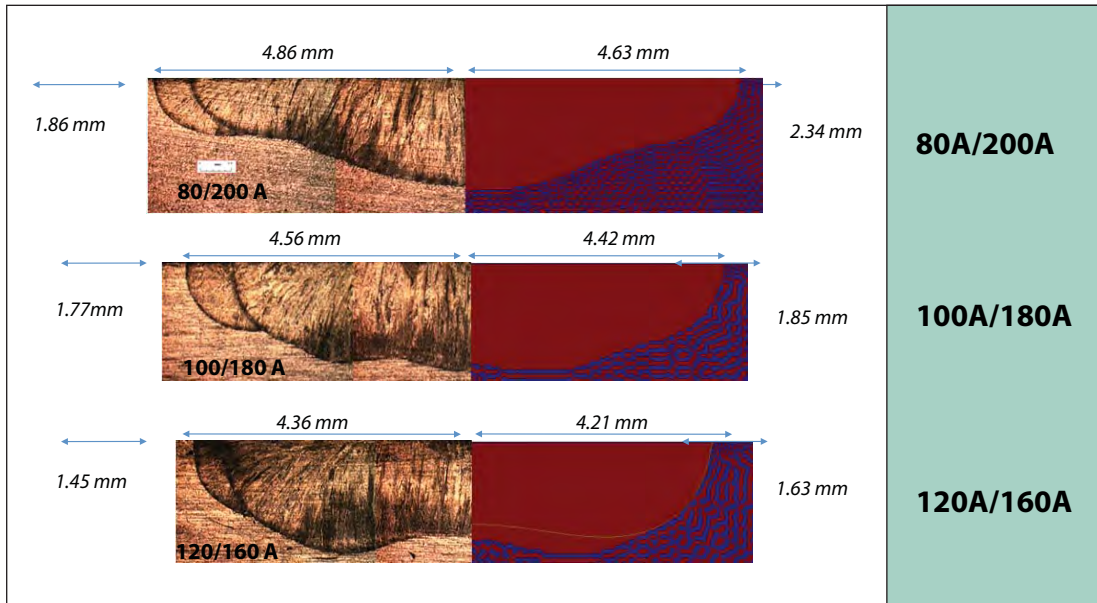


図3 3つのパルス電流(左)の実験的マイクログラフィと凝固後の溶融池の予測形(右)の比較。両方の形、寸法などは一致しています。

### 相変態効果

溶融および金属改質プロセスの中で、溶接は熱勾配を引き起こします。この熱勾配はローカライズされ、耐用年数を予想する時に重要な役割をはたす残留応力歪み場を引き起こします。溶接あるいは熱処理作業により誘引された熱サイクルによって、材料内部での固相変形は起こります。

### 溶融池の分析

最初の研究では、GTA (gas tungsten arc) ガスとタングスタンによる溶接のパルス電流変化の作動パラメータをどのように最適化すべきか研究しました。

この方法で、溶融池のより優れた管理を行うことができ、これによってオペレータは溶接溶け込み、溶接スピードと品質を高める事ができます。このプロセスを使用することにより、下記のような多大な利益を得ることができるとレポートされています。全体的な熱注入低減により、熱アークの安定性を向上し、溶接割れを防ぎ、熱変形と残留応力を削減します。実際、一定形状の溶融池に対して、パルス状電流のGTA・ガスとタングスタン溶接は、定電流GTA・ガスとタングスタン溶接よりも22%も溶接エネルギーを削減することができます。

溶接電流が2つのレベルで急速に変化するために上記のことは起こりえるのです。電流のピーク期間には、溶接部分は熱せられ、溶融が起こります。バックグラウンド電流まで下がると、溶接部分は冷やされ、凝固します。

溶接のゴールは溶接浸透を最大限に、そして熱勾配を最小限にするためのベストパラメータを選択する事です。これにより、残りの歪みや圧力を低減することができます。(図2参照) しかしながら、ピーク/バックグラウンド電流値とパルス周波数が含まれているこれらのパラメータを定義する事はとても複雑です。

今まで、それらの選択は経験に基づいた研究がベースになっていましたが、数学的モデルにより、私たちは、溶融池、最終的な溶接の形、そして熱勾配の流量の様々なパラメータ効果を理解することができるようになりました。

### アーク溶接プロセスのシミュレーション

重力、電磁力、アーク圧力、及び溶融池表面に沿って勾配する表面張力から生じ、対流に誘導されるマランゴニ効果などを含む、流量を引き起こす全ての要素をCOMSOLモデリングは考慮に入れることができます。

アーク熱により溶融池表面温度はかなり高温になります。端よりも特に中央部分が高温になります。表面張力は温度の上昇とともに、弱くなるため、表面流動の溶解は中央から端へ向かって広がります。

温度が臨界値に達するまで、流量はプラス、そしてその後、マイナスになります。図4を参照しますと、全体的な加熱時間に対するバックグラウンドタイムとピークタイムのそれぞれの終了時(各0.5秒)毎に計算された溶融池の時間発展を表示しています。それぞれの数値についての重要部分を下記にまとめます。

2つの渦の場合は明白に認識できます。溶融池の中央近くの時計回りの渦によって表面の外向きの流量が起こりました。そして凝固ポイント近くの半時計回りの渦により溶融池表面の内向き流量が起こりました。

最初の鍵となる結果は、平均電流よりもパルス電流での溶接の方が、より深く、より広い溶融池が出来たというものです。パルス電流の場合、プレートの中央でより高温になり、より高い温度勾配を誘引することがわかりました。その結果、溶融池の浸透と誘導された温度勾配の間で、最適選択がなされます。

### 執筆者について

2001年以来、Frederic Roger博士はパリにあるENSTA (Ecole Nationale Supérieure de Techniques Avancées) の Mechanical Engineering Department (機械工学部) の助教授を務めており、Solid Mechanics LaboratoryにあるEcole Polytechniqueにて博士号を取得しました。パルス状のGTAWシミュレーションは、AREVA NPとの共同で、ENSTAの博士課程の研修生のAbderrazak Traidiaと一緒に進めてきました。



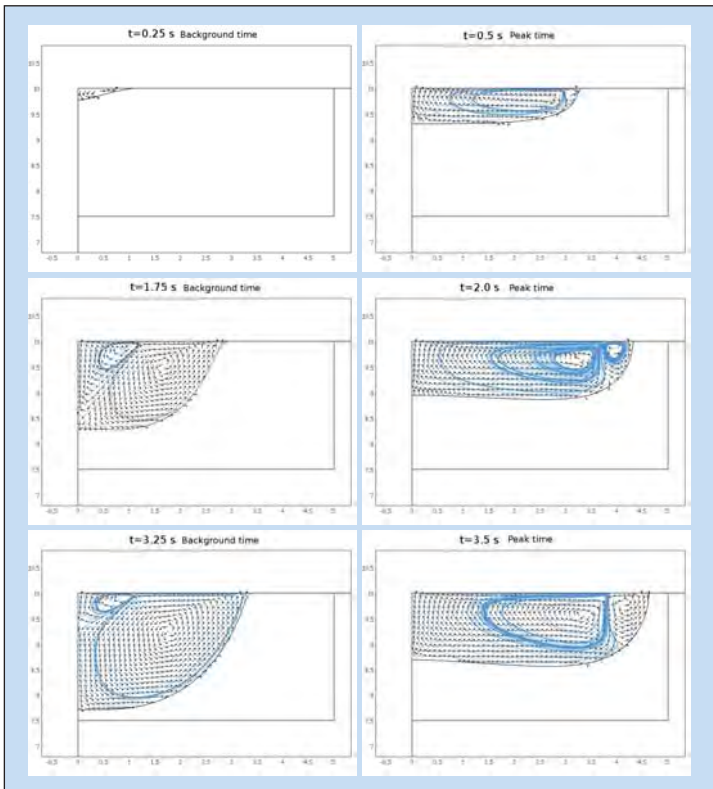


図4 計算された溶融池の時間展開。グラフの中で、電流アプリケーションは各0.5秒のパルスを通じて起こります。バックグラウンド電流は0.25秒、0.75秒……間隔で起こり、ピーク電流は0.5秒、1.0秒……間隔で起こります。

続いて、2,4,6Hzを使用した溶融池の電流周波数の効果について研究しました。2Hzの場合は、他のケースと比較してより広く、より深い溶融池ができました。高周波数での溶融池の寸法は平均電流のものによく似ています。この理由は、溶接エネルギーがより少ない直流電流のように、パルス溶接が同形の溶融池を作成するからです。また、パルス電流を使用することにより、金属プレートへの伝達熱量は制限され、残留応力と歪みは低減されます。

### 溶接が凝固するとき

溶接部分が凝固した後、モデリング、温度調査、冶金と機械現象及びそれらの相互作用によって、溶接構造物中の残留応力と圧力の決定が必要になります。

溶接をシミュレートするために、私たちは実験的に金属ディスクをレーザーで熱し、同じことをモデリングでも行い、研究しました。(図5参照) 圧力は、異なる結晶構造組織の間で起こるのと同様、異なる固相の間でも起こります。これらの残留応力は、高温勾配エリアの中ではより顕著に現れます。

モデルでは実験結果をシミュレーションすることができ、それを加圧水型原子炉容器の製造で使用した低合金フェライト鋼の研究で活用する事ができました。

冷却速度にもよりますが、異なる熱機械の特徴を持つ冶金構造のいくつかのタイプでも得ることができました。

### 参考文献

McCracken, S., Willis, E and Hamel, J, "Welding for New Nuclear Power Plants: Building on Experience", Welding Journal, May 2009, pgs 40-42.

A Traidia, F. Roger, E Guyot, "Optimal parameters for pulsed Gas Tungsten Arc Welding in partially and fully penetrated weld pools", International Journal of Thermal Sciences, to be published in 2010.

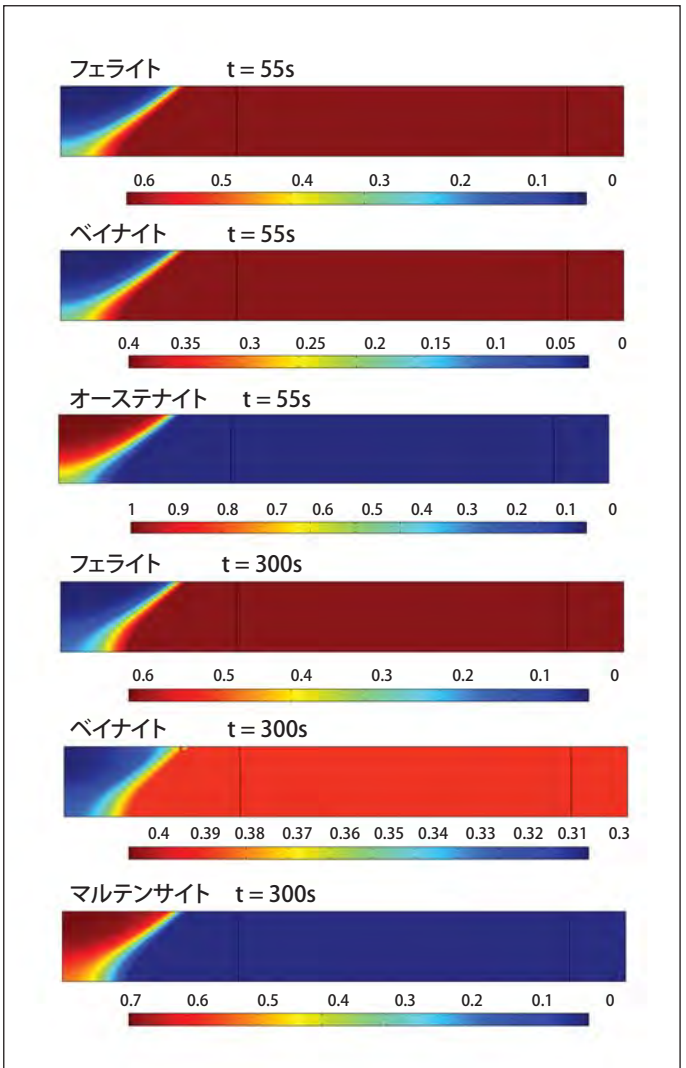


図5 加熱最終時点 (t = 55 s) と冷却後 (t = 300 s) での金属ディスクの位相場。中央部において、初めフェライトとベイナイトだった部分は、そのままオーステナイトへ変化しました。一方で、冷却後にマルテンサイトとベイナイトの混合物は得られました。

# COMSOL音響モジュールを用いた超低周波音伝播の有限要素モデリング

人工的なものであれ、自然発生したものであれ、一連の発生音源を遠隔でモニタリングすることに軍などの政府機関は関心を持っています。このようなモニタリング技術の一つでは、超低周波音、すなわち、信号の特性を失わずに、発生音源の強さによって数十から数千キロメートルの伝播が可能である可聴以下の音を用います。本項では、超低周波音伝播のモデル化で用いる方法の実用性に着目します。

MIHAN H. MCKENNA博士 (米陸軍ENGINEER RESEARCH & DEVELOPMENT CENTER)

**超** 超低周波音は0.05~20ヘルツの音と一般的に定義され、ヒトの耳では聞くことはできませんが、録音可能な電気インパルスを生じる振動圧力場の原理に基づいて可聴周波数以下の音を集音する特殊マイクを使って拾うことができます。従来の超低周波音モニタリングは、発生音源とレシーバとの距離が250キロメートル超のものを重点的に行っていましたが、最新の研究では150キロメートル未満のものに着目しており、長い距離を伝播する音と実際の超低周波音モニタリングとの「距離」が縮まろうとしています。

大気圏における長距離(500キロメートル超)の超低周波音伝播の数値解析では、放物型方程式(PE)を用いる方法が長年にわたり発達してきました。PEは、数値のインプリメンテーションがシンプルで演算処理に使うリソースが少ないため、長距離伝播の解析で威力を発揮する手法と言えます。PEでの解析は実測データを用いた周波数の調査と類似しており、閉じ込められたエネルギーと球面波面での現象が、到着時間や観測された振幅の減衰においてどのような相互作用を持つのかを予測します。PEを用いた手

法では、望ましい方向に向けた錐体に沿って伝播するエネルギーをモデル化し、波の均一化を予測します。この予測法は、長距離においては一定の正確性を持っています。しかし、短距離(50キロメートル未満)の伝播ではPEで用いる数式は機能せず、高精度な測定と予測に必要な正確性を発揮できません。

発生音源の複雑な作用に対応でき、忠実度の高い伝播モデルを作成するため、私はAltaSim Technologies社のKyle Koppenhofer博士およびJeffrey Crompton博士の協力を得て、PEによる予測を使わずに音波の伝播を正確にとらえる、COMSOL Multiphysicsと同様の有限要素法(FEM)をベースとした音響ソリューションの開発に取り組みました。

このような解析は、PEが適さない短距離の音波伝播を正確に解くために用いることが可能と考えられます。しかし、FEMで長距離伝播を解くには多大な演算処理リソース(メモリ、CPU時間など)が必要であり、正確な解を出すのは容易ではありません。そのため、大気圏での超低周波音伝播を解く際には、FEMとPEの手法を相互補完的に用います。つまり、短距離の正確な解はFEMベースのソリューション、長距離の正確な解はPEベースのソリューションで求めます。FEMをベースとしたCOMSOLの音響コード使用の妥当性を確認するため、PEの手法およびFEMの手法を評価した2つのケースをご紹介します。



図2. スペースシャトル「コロンビア号」の打ち上げ 写真提供: NASA

## 超低周波音の伝播

超低周波音の伝播は、音が伝わる大気の有効音速(Ceff)によって変化するため、大気条件をできる限り伝播経路の時間および位置に近づけ適切に設定することが不可欠です。伝播経路は、計算式 $C_{eff} = C_t + n \cdot v$ で求める有効音速プロファイルに支配されます。ここで $C_t$ は $\sim 20.07(T)^{1/2}$ 、Tは絶対温度(ケルビン)、 $n \cdot v$ は進行方向における風速の成分です。有効音速の計算における支配的な要素は温度であり、風速と進行方向は副次的な要素にすぎません。上昇する超低周波音のエネルギーが地表で観測されるためには、原点よりも速度の速い領域に達していなければなりません。このとき、エネルギーは旋回し、地表に戻ります。それぞれの大気層

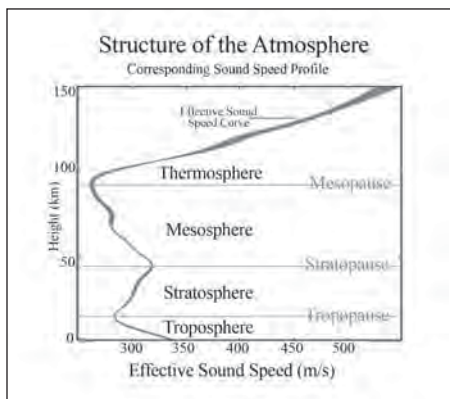


図1. 対流圏において線形である、理想的な大気の構造

における有効音速プロファイルのサンプルを図1に示します。

データ分析およびモデル化における大気の数値化の方法は、超低周波音が伝播する大気の種類によって異なります。発生音源からレシーバまでの距離が200キロメートル未満の場合、正確に伝播媒体を特徴づけるためにはその地域の気象情報が欠かせません。超低周波音が伝播する大気のプロファイルをすべての高度において正確に特徴づけるためには、地表での測定は適切ではありません。モデルで用いる  $C_{eff}$  を求めるには、高層気象観測装置、気象観測気球など、温度や風のプロファイルを測定する装置を使う必要があります。

発生音源からレシーバまでの距離が200キロメートル超の場合には、信号は主に上層大気圏および熱圏を通る非常に変化しやすいエネルギー経路を進み、数カ月単位で少しずつ変化する媒体を介して長い距離を伝播します。このような発生音源の大半は大規模（消滅までに世界中で8回反射した1883年のクラカトア火山噴火のエネルギーなど）であるか、地震による相当量の垂直方向の応答変位により発生、あるいは隕石など上層大気圏で発生するものです。

図1に示した対流圏の有効音速プロファイルは直線的ですが、対流圏の構造は速い速度で移動する気候に左右されることがあり、圏界面の上にある大気と比較し変化しやすいと考えられます。短期間の気温の逆転は、地表に比べて速度の速いダクトを一時的に

Energy Propagation Pathways through the upper atmosphere for the Columbia Space Shuttle disaster, February 1, 2003, between the shuttle and Lajitas, TX

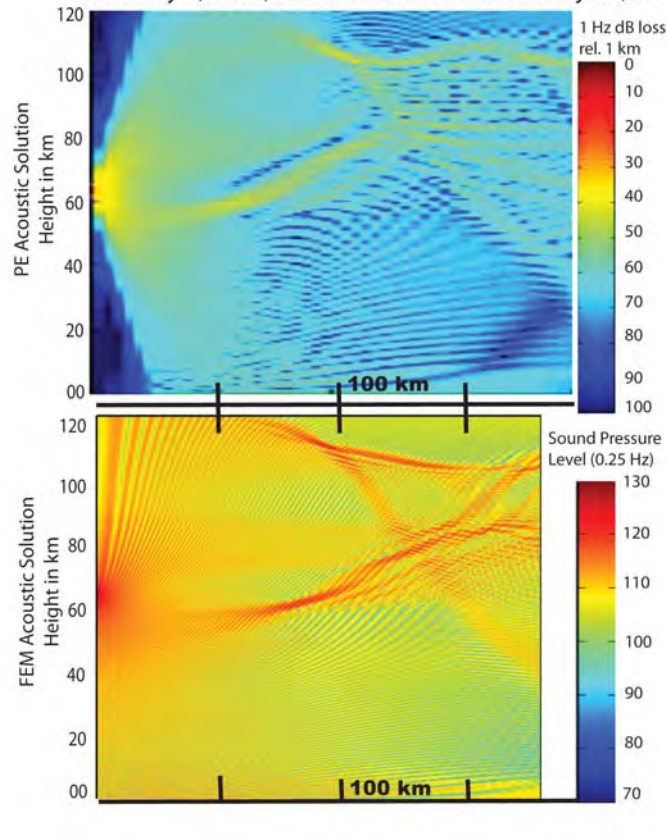


図3. コロンビア号の事例のPE法での解(上)。観測データに基づき、1ヘルツをモデルにおける支配的な周波数とした。FEMであるCOMSOLの音響モジュールによる解(下)。図2で観測された有効音速プロファイルを使用し、0.25ヘルツを支配的な周波数として解析。

発生させることがあります。超低周波音を用いた遠隔モニタリングでは、それぞれの高度における温度や風の不連続かつ急速な変化を効率良く処理可能な演算方法の開発により、これらのダクトを時間的、空間的に正確に数値化可能であることが不可欠です。

### 超低周波音の長距離伝播

世界中の超低周波音アレイが探知する音の発生源や距離はさまざまです。地震、火

山、採掘のための爆発、人工的な大気圏内での爆発などが超低周波音の信号として一般的なもので、その他には爆発流星(流星)やスペースシャトルの大気圏再突入も数百～数千キロメートルの長い距離を伝播して観測されます。スペースシャトルの再突入など大気圏の超音速音源は、超低周波音アレイの設置当初から記録され、長い年月をかけて研究されています。1971年にはすでに超低周波音の信号がアポロ宇宙船の飛行で観測されており、観測は今日も続いています。

2003年2月1日のスペースシャトル「コロンビア号」の再突入失敗は、高高度での爆発の位置が4次元の空間と時間で明らかとなり、大気プロファイルの特徴が判明した最初のケースであり、また、高高度での爆発が約600キロメートル離れたテキサス州ラヒータスの超低周波音アレイによって初めて観測されたケースでした。コロンビア号の3次元の軌道はNASAが記録しており、空中分解を引き起こした事象のタイミングも明らかになっています。記録された軌道とタイミングを詳細な大気プロファイル

と組み合わせれば、大気を伝わった音響エネルギーの経路を画像にすることができます。

PE(放物型方程式)は水中音響研究を応用しており、PEによるモデリングでは、一つの周波数の完全な垂直面上の場を解くことができます。今回の検証では、超低周波音モニタリングで標準的に用いられるPEコードを比較し、発生音源だけでなく、垂直面上での振幅を予測するため減衰場を算出し

「COMSOLは音波伝播の偏微分方程式を解くことで、PE法では必要な予測を行わずに非常に正確な解を導き出します。」

ます。PEコードを使用する場合は、変化の激しいエネルギー経路をすべて含めるため、計算上での大気を十分に深くする必要があります。モデリングで必要とされる場の深さは、FEM法の高い精度という利点を上回るPE法の利点です。図3のPE法でのモデリングは、Naval Research Laboratory提供の有効音速のプロファイル、NOAA Global Forecast System (GFS)、NASA Goddard Space Flight Center (GFSC)、Goddard Earth Observing System (GEOS) が観測したコロムビア号の空中分解における0~55キロメートル範囲のデータ(爆発は高度62.2キロメートルで発生)を使用し、ノートパソコン上で数分間で解くことができました。

一方、図3に示した同一の大気プロファイルのFEM法によるモデリングでは、全伝播距離である600キロメートル(図中には表示されていません)ではなく200キロメートルに限定した0.25ヘルツの音の伝播を、16GBクアドコアMac Proで解くのに5日間必要でした。0.25~1ヘルツの周波数成分の変化や関連した波長の変化を念頭におくと、2つの手法によるモデリング結果は、FEM法で実施した200キロメートルの範囲においてよく相関しています。FEM法は正確ではあるものの、このような距離においてPE法と同レベルの解を求めるために必要な演算リソースを考えると、PEの方がより効率のよい手法であることが示唆されます。

### 超低周波音の短距離伝播

短距離の場合、COMSOLのFEM法の優位は言うまでもなく明らかです。短距離(100キロメートル未満)での超低周波音の伝播はここ数年注目を集めています。コロムビア号の伝播経路のような長い距離では、伝播エ



図5. キャリブレーション実験における、100ポンドのANFO爆弾の地表における爆発

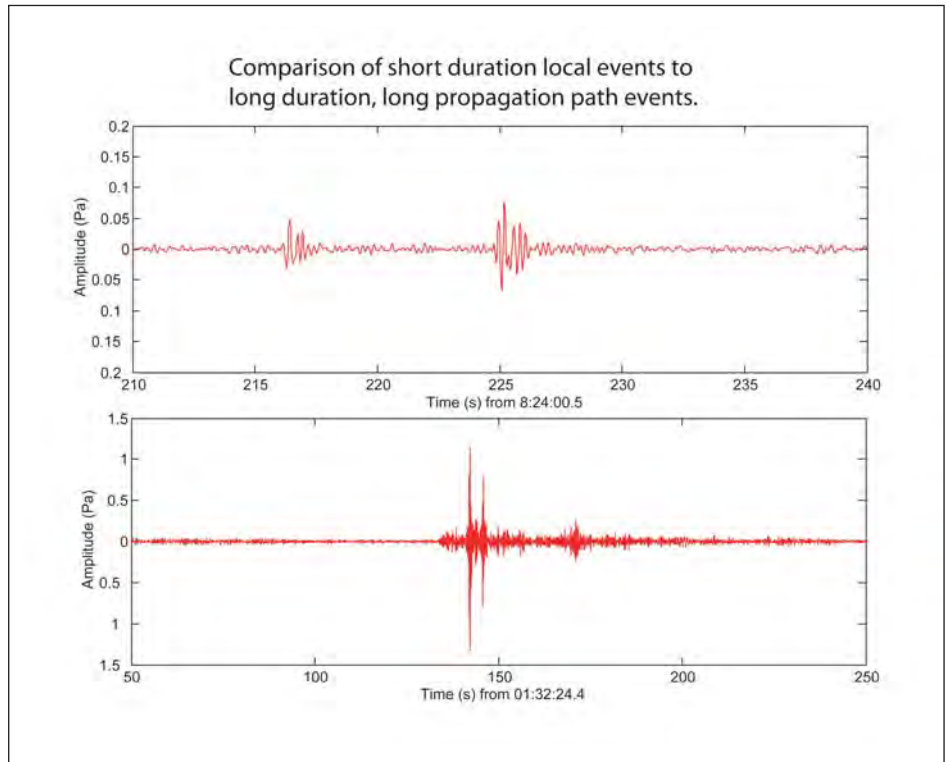


図4. ほぼ局地的な伝播経路と長距離(遠距離低周波数音)伝播経路では信号の特徴が異なる

ネルギーが示す詳細な発生源構造は、観測される信号に明瞭には現れません。

以下に示す30~100キロメートルという短い距離では、観測される信号に比較的明瞭に現れる発生源の特徴をつかむことがより重要になります。図4は、小規模でほぼ局地的な衝撃音の発生源からの信号の特徴と、より長い距離を進んだエネルギーの特徴との違いを示しています。観測の時間軸の違いは、ほぼ局地的な信号の継続は数秒間である一方、長い距離を拡散する超低周波音は数十~数百秒間継続するためです。

COMSOLは音波伝播の偏微分方程式を解くことで、PE法では必要な予測を行わずに非常に正確な解を導き出します。そのため、発生源の特徴はすべてその解に含まれます。図4に示した点状の爆発や構造的な放射など発生源は多種多様であり、そのモデル化にCOMSOLを使えば発生源と

伝播の作用を同一モデルに統合できます。この柔軟性が、これまで容易に解くことのできなかった多くの条件を含む超低周波音のモデリングを可能にしています。COMSOL使用の利点は、FEM法の解がもたらす正確性だけではありません。近い領域での超低周波音研究が可能となっただけでなく、対象となる音源の種類が劇的に増えたのです。

また、COMSOLなら過渡的な時間調和解析も可能です。過渡解析は、図5に示したような点状の爆発音源など短時間の音源のほとんどを正確に解きます。

図6は、COMSOLの音響モジュールで作成した、2ヘルツの信号が30キロメートルの距離を伝播する様子です。それぞれの大気層における音速の違いはこの信号の伝播に大きく影響します。大気条件が良好な場合、音響エネルギーは地表に向かって屈折します。約2キロメートルの距離にあるダクトが、超低周波音のエネルギーが発生源からレシーバに伝わる可能性を高めるために必要な音響エネルギーを閉じ込めます。

処理時間や演算処理リソースの最小化に向けて、境界条件やメッシュサイズを最



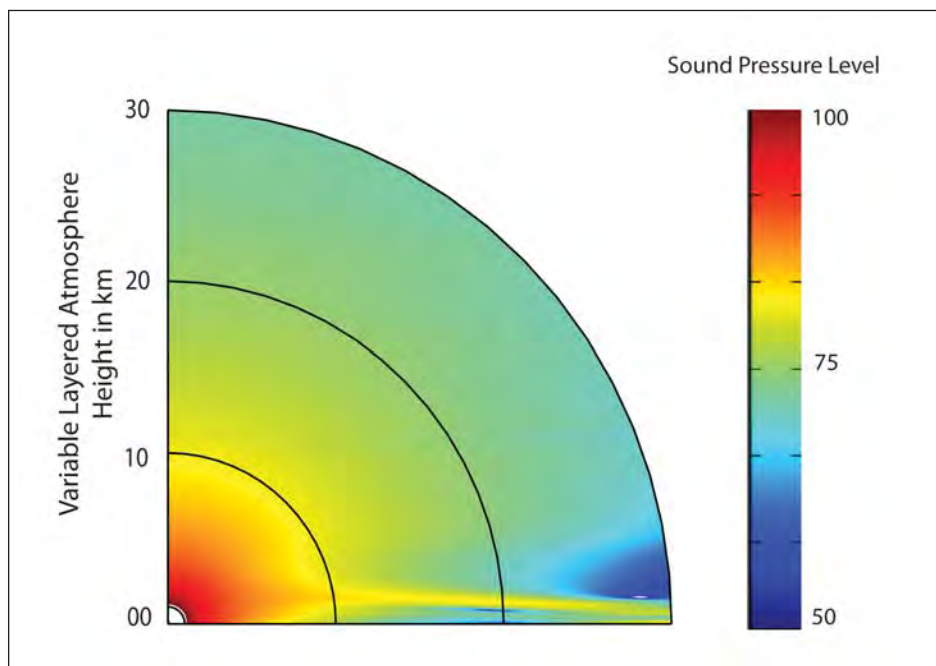


図6. 2ヘルツのエネルギーが低い大気層を局地的に伝播する経路

適化する将来を見据えた研究が進むなか、COMSOLの音響モジュールは、長距離の音響エネルギーやほぼ局地的な超低周波音のモニタリングに携わる者にとって、多岐にわたる発生源の組合せが重要である伝播モデルを非常に正確かつ高解像度で作成できる、とても有力なツールとなっています。

### 謝辞

Southern Methodist大学のEugene Herrin博士、AltaSim Technologies社のSergei Yushanov博士、ならびに米陸軍ERDCのJason McKenna博士の助言に感謝します。

また、コロンビア号の事例に使用した大気層データベース、NRL-G2Sを提供してくれたNaval Research LaboratoryのDoug Drob氏に感謝の意を表します。

コロンビア号の事故で観測された超低周波信号についての詳細は、以下をご覧ください：

McKenna, M., and E. Herrin (2006), Validation of infrasonic waveform modeling using observations of the STS107 failure upon reentry. *Geophys. Res. Lett.*, 33, LXXXXX, doi:10.1029/2005GL024801.



Mihan H. McKenna, Ph.D.

## 執筆者について

McKenna博士は、米陸軍Engineer Research and Development Center (ERDC) のGeotechnical and Structures Laboratoryにて2005年7月から地球物理学研究員を務めています。ERDCは、米陸軍工兵隊および米陸軍に所属する7つの研究開発グループの一つです。

McKenna博士は、前方展開部隊での戦術的意思決定を支援するための地震、音、超低周波音発生源の探知、解析、および数値モデリング、ならびに伝播現象学を専門としています。ERDCのDenied Area Monitoring and Exploitation Systemsワーキンググループでは国防総省、エネルギー省、国防情報局、ロスアラモス国立研究所、学術機関と協力し、高性能コンピュータによる統合モデリングおよび実験的研究を進めており、博士はこのワーキンググループのトップであるほか、硬目標攻略、戦略的イメージング、および国境を越えた脅威のモニタリングに関連したいくつかのDARPAおよびDTRAプログラムにも携わっています。また、博士は連邦政府が公認した交通インフラ検査官であり、公共交通基幹施設の構造に関する遠隔モニタリングを行っています。

注)Geotechnical & Structures LaboratoryのDirectorの許可を得て公表。一般公開許可済み、配布についての制限なし。商品名、製品名、企業名の使用はすべて説明のみを目的としたものであり、米政府による推奨を意味するものではありません。

図1 CERNにてThe Compact Muon Solenoid (CMS) 実験



写真:CERN提供 撮影:Maximilien Brice

## CERNの世界最大の超伝導磁石の冷却

世界最先端の素粒子加速器を使用する時に必要な超伝導磁石の冷却方法を理解し、最適化するために、モデリングが有益であると証明されてきました。またこの分野の物理に焦点をあてた研究には、COMSOLがとても重要であるという事も証明されています。

BERTRAND BAUDOUY博士 (CEA・フランス原子力庁)

**素**粒子を信じがたいスピードで加速し、その一方で驚くほど正確にその経路をコントロールする事は、高エネルギー物理では必要不可欠なことであり、これは超伝導磁石によって実現可能なものとなっています。そのデザインはとても複雑ですが、様々なオプションが研究され、シミュレーションソフトウェアを使用しながらより迅速に改良されるようになっています。フランス原子力庁の科学者達は、COMSOL Multiphysics は 社内コードの補完として素晴らしい働きをしてきている、と述べています。

### 世界最大の超伝導磁石

有名な一例は、欧州合同素粒子原子核研究機構(The European Organization for Nuclear Research / CERN)における世界最大規模の大型ハドロン衝突型加速器(LHC)の科学的実験です。それ加速器はスイスとフランスの両国国境にまたがり、地中約100 mの場所に位置し、全周約27 kmもあります。

素粒子を99.99%の光速スピードに加速するために、大型ハドロン衝突型加速器LHCはヘリウムで冷却された8000個以上の超伝導磁石を使用しています。加速器リングの周囲に超流動ヘリウムが循環している極低温ディストリビューションシステムは、LHC

を大気圏外より低温の $-271.3^{\circ}\text{C}$  (1.9K) に保ちます。

フランス、SaclayにあるCEAのThe Accelerator, Cryogeny and Magnetism Divisionは、約120名の従業員のうち、30名がシミュレーション業務に従事しています。彼らは磁石とその冷却システムの改良、改善のために頻りにシミュレーションソフトウェアを使用しています。

特にLHCのCompact Muon Solenoid (CMS)素粒子検出器は世界最大の超伝導磁石を含み、これは4.2Kの2相ヘリウムを装備したコイルとともに外面を冷却されています。メンテナンスにコストがかかり、低温度稼働の加圧システムと関連するポンプを排除するため、自然対流を使用します。この超伝導磁石は直径7m、長さ12.5mのサイズで5つの独立したモジュールから成り立っています。各モジュールはマグネットケーシングと平行に取り付けられたネットワークチューブを介して間接的に冷却されます。フェーズセパレータとしての役割も持つ貯蔵庫より下にあるチューブを通して、モジュールに液体ヘリウムが供給されます。超伝導磁石の高電流密度により、十分な空き容量内における磁場強度と適度なエネルギー消費が実現可能になります。LHC稼働には50MW必要で、このうちの半分は低温

貯蔵システムのみで使用されますが、所要冷却の調達は決して簡単な作業ではありません。エンジニア達は液体ヘリウムが最小使用量で抑えられるデザインを考え出さなくてはなりません。現時点でのLHCの合計ヘリウムは700,000リットルで、これは260万ユーロに値します。

「以前は2~3ヶ月かかった作業である超伝導磁石の冷却チューブのデザインが、今では1週間足らずでデザインを完成する事ができるようになりました。」

CMSで使用されているような大きな磁石検出器のためには、磁石を急冷するようなシナリオ同様、通常の実験中に適切冷却できるような内部冷却方法にもかなり入念なデザインが必要とされます。

冷却チューブのサイズや位置、同時に

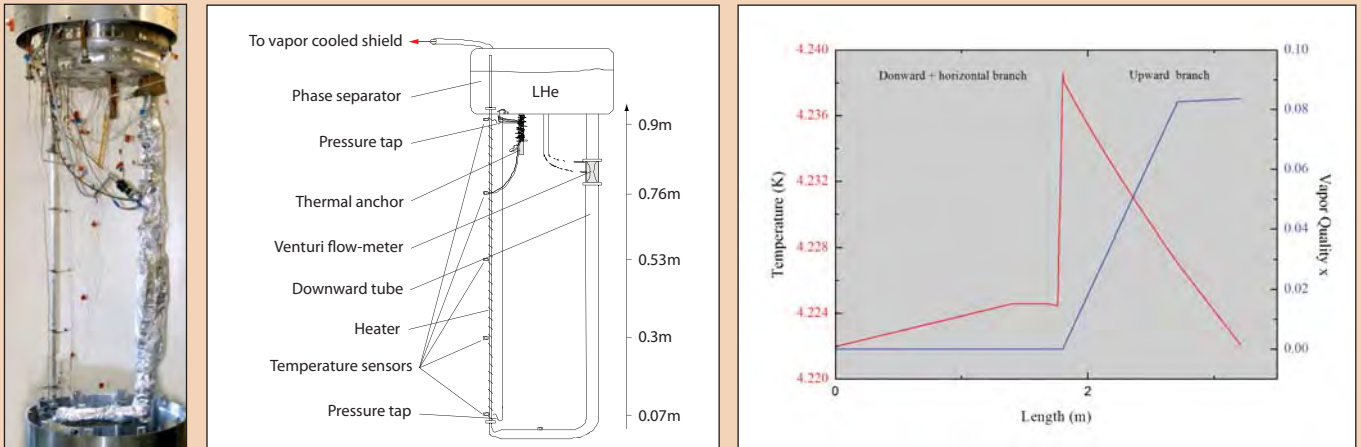


図2 縮小サイズの冷却ループ(左) コンポーネントを示すダイアグラム(中央) 右は温度とループを通ってきた蒸気の質を示す1Dモデルからの結果 1-液体ヘリウムタンク 2-底面パイプ 3-上方パイプ

ループ内のヘリウムの圧力や質量流など、様々な関数に関係しています。

高度に専門化された庁内コードの補完として、容易に理解、実験可能なソフトウェアを使用して、私は冷却サイクルを分析したいと思っていました。COMSOLと出会った時、私は大変喜びました。なぜならば何百と言うC言語やFORTRANコードのラインよりも、私にとっては物理の方が理解可能だからです。物理を使用し、即座に証明する事はとても簡単です。様々なモジュール内で、方程式を使用し、修正する事が可能です。あるいは私が行ったように、自分自身の方程式を入力する事もできます。

それと同時に、私はCOMSOLの本当の信仰者になりつつあります。庁内の他のラボの人たちが、私の経験について質問したり、どのようにして自分のアプリケーション上で使用できるかなどについて質問をしに来るのです。

### 将来のデザイン向上

ヘリウム2相熱サイフォンオープンループをより良く理解すると同時に、未来のプロジェクを視覚化するために、6mのスケールモデルとして2mサイズのテストループを作成しました。(図2)

そのコンセプトを有効にするために、COMSOL Multiphysicsを使用して、そのオペレーションをシミュレートしてみました。結果は私たちの実験結果ととても近いものでした。私は、今、摩擦の影響を修正するとともに、ループの拡大や幾何学の変更など、数多くのアプリケーション用のループ修正をするツールを持っています。

素晴らしい事に、今では1週間ほどで超伝導磁石の冷却チューブをデザインすることが出来るようになったのです。以前であれば、2~3週間はかかってしまっていた作業です。私の次のステップは、気体を再凝結させ、ループをより縮小させる事ができるクローズループの低温冷却器をシミュレートするためのモデリングを展開させることです。

COMSOL Multiphysicsを使用した、すでに終了済みの作業で、最近の私たちのプロジェクトの中に大変価値あるものがあります。ドイツ、ドラムスタッドにあるFacility for Antiproton and Ion Research (FAIR) (反陽子およびイオン研究施設)におけるR3B超伝導マグネットの開発がそれにあたります。

これは約1100mの外周を持つ超伝導シンクロトロン・ダブルリング設備の作業で、2011年に完了予定です。

低温学システムはCMS磁石の中で使用され、平行に取り付けられた冷却チューブとともに、熱サイフォンループコンセプトがベースになっています。



### 執筆者について

Bertrand Baudouy博士はCEA (フランス原子力庁)のアクセラレーター、低温学及び磁力部署の研究専門の科学者です。博士は、近年低温学研究所での研究開発活動を第一人者として進めています。

# 燃焼モデルの必要性

GIANLUCA ARGENTINI (RIELLO BURNERS社・イタリア、レニャーゴ)

**私**たちは、暖房と冷房について考えると、その構成部品によって消費されるエネルギーの検討を無視しがちです。構成部品とは、空気を部屋に送り込むための、あるいは燃焼用バーナーに空気を供給するための送風機のようなもので、私たちが当然のように享受しているものです。送風機によって消費されるエネルギーは、多くの形状によって左右されますが、(1キロワット以上の)高出力バーナーでは、送風機によって消費されるエネルギーの比率は、小型の換気扇用の150ワットから、大型バーナー用の25キロワットまで、多岐にわたるシステムを稼動するために必要とされる合計の約30-40%です。実際に住宅用・家庭用バーナー(熱出力100キロワットまで)では、小型形状のため、この比率はより高くなり、送風機が消費する電気エネルギーは、全システムの約80%までに達します。

加えて、産業用送風機を対象とするEU指令125/2009の新環境保護規制は、送風機電力消費を、約40-50%に制限し、製造業者が、その製品の改良するように追加的圧力をかけています。実際に優れた設計による送風機では、製造コストと同様に、エネルギーを節約する大きな可能性があり、ここでのモデリングは、設計時間を節約できるだけでなく、最適な設計をもたらすもので、非常に大きな役割を担っています。電力消費を低減することにより、より小型のモーターの使用でも、同じ性能を得ることが可能となります。そのほかの利点としては、バーナー全体重量の低減や燃焼ヘッド部品設計の改良などがあります。

この種の継続的開発はRiello Burners社の業務の一部です。私たちは、石油・ガスの燃焼、換気装置および油圧ポンプの分野で国際的に活動する企業です。本社および主要な生産工場は、イタリアヴェローナ近郊のレニャーゴにあり、約600人の従業員を雇用しています。バーナーに関しては、10キロワットから32メガワットまでの高性能で、ほとんど保守の不要なバーナーを生産しています。これらの製品は、産業用として、また家庭用・業務用の暖房設備の全てのレンジで利用されています。

## 2つの重要な部品

換気装置は、バーナーにとって基本的な要素です。なぜならば、換気装置は、炎が位置する燃焼ヘッドに、継続的かつ適切な空気の流れ確保するからです。2つの主要な換気部品があります。それは、回転ホイールあるいは回転羽根と、それが駆動する外側のシャーシで、これはポリユート(渦巻き)とも呼ばれています。送風機を設計する際の基本的な課題は、高い機械効率を維持しながら、高い値の静圧とポリユートの流速を得られるように、回転羽根とポリユートの配置構成を決定することであり、このことは換気装置を動かすために必要な電気使用量を減らすことを意味するものです。

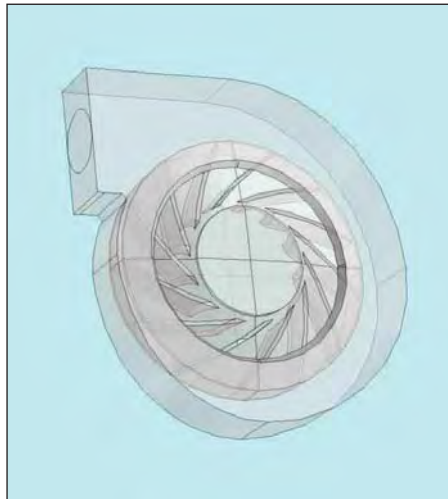


図1 中央の回転羽根と拡大する渦巻きから成るバーナー用換気ファンの幾何形状

私たちが最近研究した特別な送風機は、比較的複雑なシステムで、13枚の後ろ向き羽根を持つ羽根車と、直線的に拡大する外半径のあるポリユートから構成されています。(図1)

COMSOL Multiphysicsを使用する前に、私たちは、送風機を開発し、ピトーチューブで実験的検査のみで使用するそれらの特性曲線を作りました。ピトーチューブは、流体を直接入れられる、たった1つの開口端を持つチューブであり、このチューブ内で計測された静圧は、ベイヌール方程式を使った流量に一致します。

この種の実験の問題点は、幾何形状やいくつかの物理的境界条件を変更した場合、新たな実験を実行しなければならず、それぞれの実験のために、ほとんど1日を費やすこととなります。

幾何形状と設計時間削減との間で最良の選択を行うために、数学的モデルに頼ることにしました。「フローズンローター」手法を使ったモデルの構築と計算の実行には、通常、僅か2時間で済みます。今、私は、流体力学を基礎とする理論的方法や、いくつかの偏微分方程式の数学的分解を使って、解決する新しい概念や設計図を実験する素早い方法を持っています。このとき、数値シミュレーションは、恐らく最初から最適な構造はどこであるかを教えてくれます。

シミュレーションを実行する前に、私たちは、1年をかけて数十のプロトタイプを実際に作成し、実験しました。ほとんどの場合、これらのモデルは何らかの問題を示していました。COMSOLで、私たちが製作・実験した2つの可能性の高いポリユートの形状構造を使用しました。最終的な構造は、問題を示さず、極めて良好な性能を持っていました。モデルの開始から実用実験の終了まで、プロトタイプの実験の1年と比較して、約1ヶ月でした。

## 1つのモデル中の、固定された幾何形状と動く幾何形状

全体構造の中の総空気領域における流れをシミュレーションすることは、動いている幾何形状(羽根車)と固定された幾何形状(ポリユート)の相互作用のために、一般的に流体力学を利用した難しい作業です。この問題に対処するため、私たちはフローズンローター手法を用いました。この手法は、羽根車の回転する空気領域とポリユートの静的な空気領域との間の幾何学的な接点における流速領域の近似値を求めるための数値技法です。COMSOL CFD モジュールを使って、私たちは、どんな回転をも考慮せずに、送風機の中心円盤から軸方向に入る流れを推定し、外側部分から筐体を外し、全体の幾何形状内の速度 $v_1$ を計算しました。

この結果は、羽根車の中で「フローズン」速度場となり、もっと重要なことに、 $v_1$ 値は、 $v_2$ の境界データのために、フローズンローター方程式に用いられます。次に第2の計算

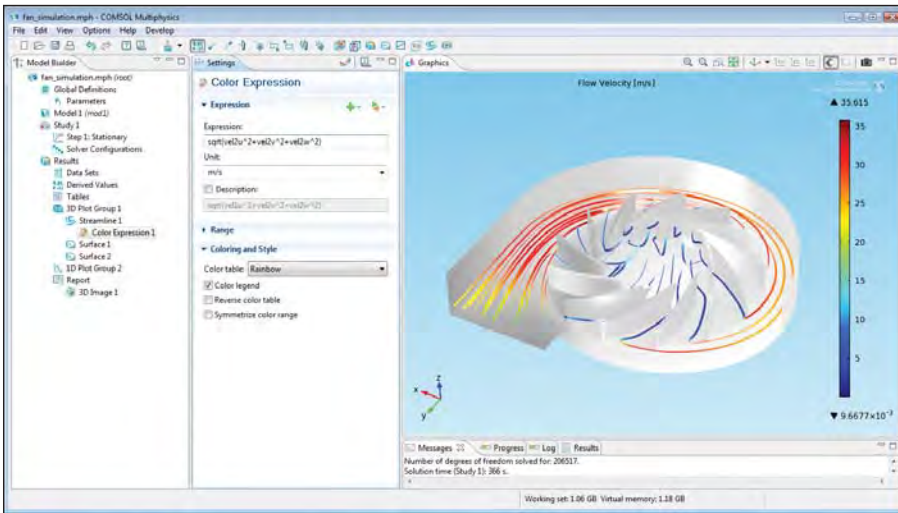


図2 羽根車への速度と筐体のへ速度を示す流線形

COMSOLの将来計画は、フローズンローター手法から開始し、流れと構造を結合するモデルを開発ことです。なぜならば、送風機分野において、より重要な課題は、振動、エネルギー損失、騒音を最小限に抑えることだからです。

### 謝意

著者は、排気装置の実験中に受けたAngiari Combustion Research Centerの同僚からの支援と提案に対して感謝します。

詳細は下記を参照

[www.comsol.com/papers/7988/](http://www.comsol.com/papers/7988/)

が、ボリュートの定義域内だけで、速度場を確定します。(図2)

このシミュレーションによって計算された送風機の圧力が実験とほとんど一致する分析結果を示すことを、実験によって確認しました。こうした良好な結果は、フローズンローター手法が、固定されたケーシングの中で回転する流体領域をシミュレーションするためのアルゴリズムとなりうることを証明しました。

私は、幾何形状を作成する上で、特に効率的なソフトウェアを発見するとともに、解析式を使って説明することのできる境界条件の数値処理方法を見出しました。例えば、フローズンローター手法において、回転領域と静止領域の間の接点上の速度場の正確な公式化は、親和性の代数条件を示す能力なしに、手に入れることは極めて困難です。

私たちの換気装置でCOMSOLを使用することの重要な利点は、ボリュートを最適な形にすることにあります。これは、バーナーの燃焼ヘッドに向かって、より層流となり、その結果、より効率的な空気の流れとなります。この改善された流れによって、より少ない電力使用で、同じ流速を達成できます。

ユーザー(例:家庭もしくは企業)にとって、直接的な利点は、バーナー価格が安くなることです。さらに重要な間接的な利点は、環境のために合計エネルギーが節約される点です。

例えば、換気装置では、同じ流量で、電力消費を250ワットから200ワットへと低下させることができ、年間1万点の部品の場合(この型の送風機が作られる一般的な年間売上量の場合)のエネルギー節約量は50万ワットで、この分、環境に負荷がかかりません。



### 執筆者について

Gianluca Argentini氏は、Riello Burners社の研究開発部のマネージャーで、換気構造と回転装置の流体力学を研究しています。彼はイタリアのバドア大学から数学賞を受賞し、ドイツのエランゲン大学から科学計算および流体力学の修士号を取得しています。彼は当初、大学で数学の指導者として勤務し、その後、Riello Burners社に入社し、科学計算で実績を上げ、数理モデルを開発しました。



## 低騒音風力タービン

Xi ENGINEERING CONSULTANTS社は、百万キロワット風力タービンシステムのモデル化により、顧客のための改善工事コストを最小限に抑える画期的なソリューションで、問題となっている共鳴音対策を可能にしました。

JENNIFER HAND

**風**力発電所から出る騒音は、2つのカテゴリーに分類される。空気力学的騒音は、タービン羽根が空気を鳴らすことによって発生しますが、機械的な騒音はタービンのエンジン室の中に設置された機械と関連しています。機械的な騒音は共鳴音になる傾向があるので、近隣住民にとってしばしば不愉快な要素となるものです。この結果、ヨーロッパから北アメリカでは厳しい規制が決められており、業者がこれらの要求に適合しない場合には、重い刑罰が科せられる可能性があります。

「この複雑なモデルの中で、タワーの先端近くにホットスポットがあり、その場所ではタワーの表面が波立っている様子を見ることができました。」

「人々は騒音に気づくが、実際に感じるのは揺れである場合が多い」と、エジンバラに拠点を置き、複雑な振動問題を専門とする企業であるXi ENGINEERING CONSULTANTS社の上級コンサルタントBrett Marmo博士は語っています。Xi社の最近のプロジェクトの1つが、800-830ヘルツ周波数帯で過度の騒音を発する百万キロワット規模の風力タービン設備の製造企業向けに実施されました。

この製造企業は、すでにこの騒音の原因は恐らくギアボックス内の歯車のかみ合わせから発生していたことを認識しており、主なプロジェクトでは、80メートルの高さのタワーの1つから15トンのギアボックスを持ち上げ、その真下のゴム製の緩衝材を交換しましたが、これはこの問題に悪影響を及ぼしただけでした。この継続する騒音に対し



スコットランド南部高地にある風力発電所

て、大幅な設計変更や改良作業なしに、どのように取り組むべきか、全く不明でした。

大幅な設計変更や改良作業は、多数のタービンが対象となることを前提にすると、多額の費用がかかり、大混乱を引き起こす恐れがありました。「私たちは、この原因を追究し、振動対策に取り組むために招かれた」とBrett Marmo博士は説明します。

### 原因の追究

現在の設計資料の検証および広い範囲の実地調査が行われ、そこではセンサーが

タービンタワーに取り付けられました。調査後Xi社は、この騒音の原因が、間違いなくギアボックスにあることを確認しました。「私たちは、通常の回転速度で、ギア上の歯車は1秒間に約820回接触することを究明することができました。言い換えると、1秒ごとに820回の衝突音が聞こえていることになりましたが、これはそれほど単純ではない。最初の騒音は、どこかで増幅されており、私たちは、タワーの鉄部表面の関与を疑いました」とMarmo博士は指摘します。それぞれの構造物は単振動しており、このケースでは、



チューブ状の鉄製タワーは、800-900ヘルツの間で共鳴していました。

Xi社は、シミュレーションの幅広い経験を持ち、COMSOLマルチフィジックスを利用して、タワー、回転羽根、ギアボックス内に設置されたエンジン室のモデルを開発しました。(図1)このモデルは、タービン内部および外部の空気の全てを組み込んでいるので、エンジニアは各振動要素の形態を確認することができ、どのように振動がギアボックスから伝わってきているかを正確に知ることができました。この結果、タワーの壁における820ヘルツ前後での共鳴が可視化されていることがわかりました。次の段階は、タワーの構造と表面の固有振動数モデルを作ることでした。Marmo博士は再び次のように述べました。「この複雑なモデル内で、私たちは、タワーの先端近くにホットスポットがあり、そこではタワー表面が800-820ヘルツの共鳴周波数で波紋を起こしていたことを見ることができました。これらの共鳴はギアボックスの振動を増幅し、不快な騒音を生み出していました。」

### シンプルを心がける

「私たちの考え方は、振動の原因を隔離する緩衝材やスプリングのような単純なソリューションで始めることです。私たちは現状をそのまま利用して修理を行うことを進めており、調整やメンテナンスを必要とする積極的な介入はしません。このケースでは、設計上のソリューションは、ギアボックスとタワーの壁の間の振動経路を遮断することであり、最も単純な方法は、ギアボックスの下の部分をゴム製の緩衝材に変更することであったと思います。しかし、技術的な制約のために、これらを硬化することも柔らかくすることも実用的ではありませんでした。最も有効な代替ソリューションは振動の増幅を抑える特殊な材料でタワー内部をコーティングすることでした」とX1社のオペレーションマネージャのBarry Carruthers氏はコメントしました。

2つの重要な検討課題がありました。この材料は高価で、それぞれのタワーは先端の直径が2.5メートル、末端の直径は4メートルあり、対象範囲は広範囲にわたっていました。さらに架設工事にコストがかかると考えられました。この材料は、全体を覆う足場ではなく、エンジニアがタワー内部でロープを使って作業することのみが可能でした。大きな疑問点は、騒音問題を解決するために、どれだけの量の材料が必要なのか？

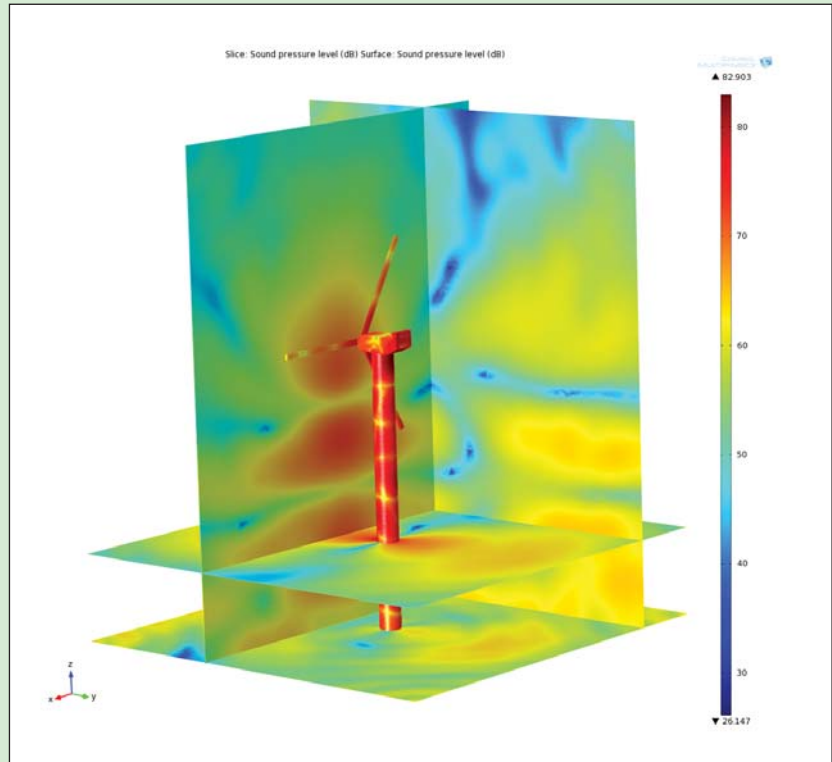


図1 タービンの振動加速度振幅を示す空気中の風力タービンの音響構造相互作用モデルおよび合成音圧レベルを示す空気の断面。この図はタワーの先端部分(赤い部分)の騒音の局所的な増幅に伴う振動を示している。

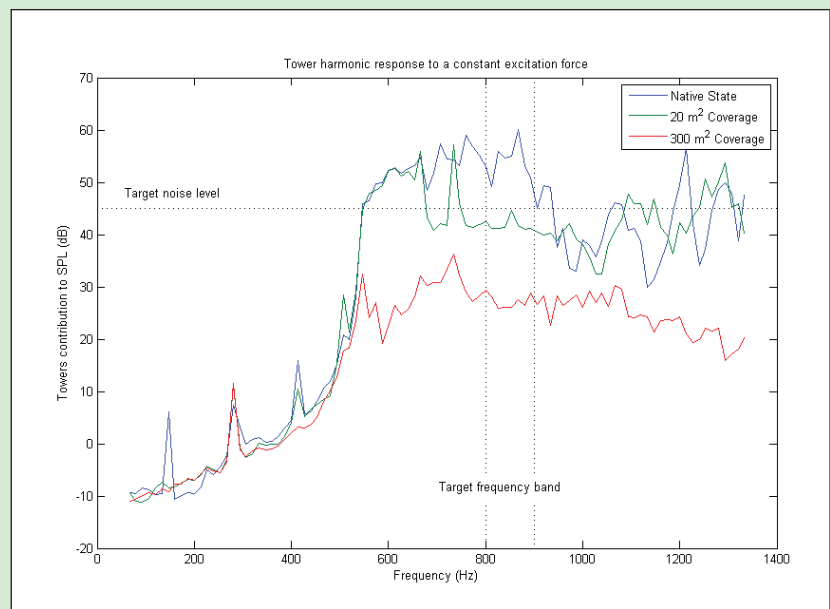


図2 音圧レベルは、このタワー外部で、仮想マイクを使って測定した。現状のままの風力タービン、内壁の上部20㎡が振動防止材料で覆われているとき、タワーの上半部(300㎡)が振動防止材料で覆われているとき、それぞれのケースでの測定結果。



## 「私たちは仮想テストを実施し、繰り返し作業に関わる実際の全体コストをかけることなく、選択肢を調査することができました。」

唯一の選択肢は、COMSOL Multiphysicsで第3のモデルを創造し、タワー内部の材料の効果をシミュレーションすることでした。(図2)

「私たちは、タワーの壁と内外の空気の防音構造相互作用モデルを実現しました。タワーのいろいろな表面がこの材料で覆われているとき、タワーから50mでどんな音のレベルであったかを、仮想マイクロフォンを使って、測定しました。固有振動数モデルにおいてタワーの先端近くで認識されたホットスポットから開始し、いろいろな量の材料を実験しました。壁の中で材料の量を調整した時、騒音が満足できるレベルまで低下した場所に到達しました。また、必要とされる材料の量が最小限に達するまで、この範囲を調整し続けました」

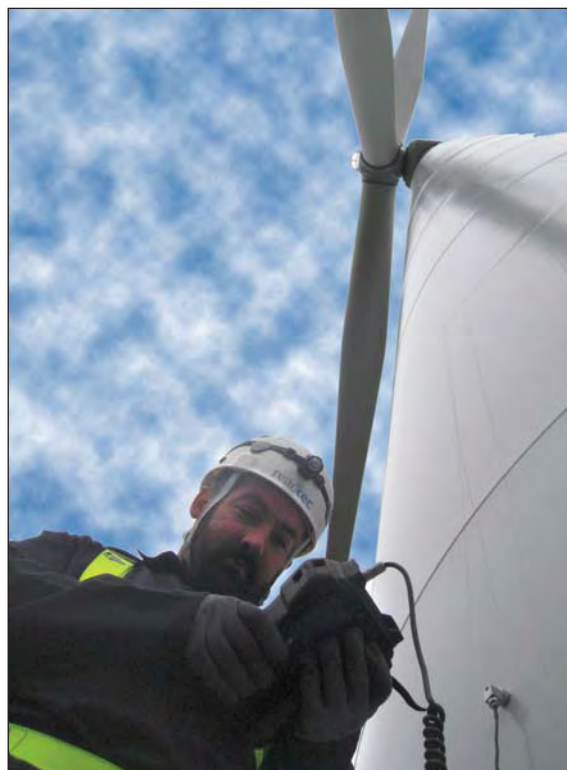
この高価な材料で、タワー内部の600㎡の表面の全てを覆うと、10万ポンドの費用がかかることになるでしょう。

例えば、それぞれのタワーの先端部分だけにこの材料を適用したとしても、1台あたり

100㎡が必要となると思われる。タービンの数量を考えると、その費用は莫大になったでしょう。その代わりに、私たちは、顧客に対して、それぞれのタワーで、材料の20㎡だけが必要であるとアドバイスすることができました。ひとつのプロトタイプを導入によって、私たちの調査結果が間違いなく確認できました。騒音は十分に弱くなり、顧客はとても満足しました」とCarruthers氏は報告しています。

### 仮想実験台の価値

Marmo博士によれば、このような状況において、シミュレーションできることの価値を過大評価しているわけではありません。「私たちの当初の調査から、タワーは共鳴していることが分かっており、COMSOL Multiphysicsでモデル化せずに、80mの高さのタワーの全てをセンサーで検査しなければならぬと考えていました。しかし、私たちは、最初の解析モデルを使って、全てこの段階をスキップすることができました。」 Carruthers氏は続けて、「私たちは仮想テストを実施し、繰り返し作業に関わる実際の全体コストをかけることなく選択肢を調査することができました。高価な材料と労働者を使った現地での試行錯誤は、シミュレーション解析の30倍以上のコストがかかります。重要な点、は仮想的に調査し、実行は1度で解決することです。」

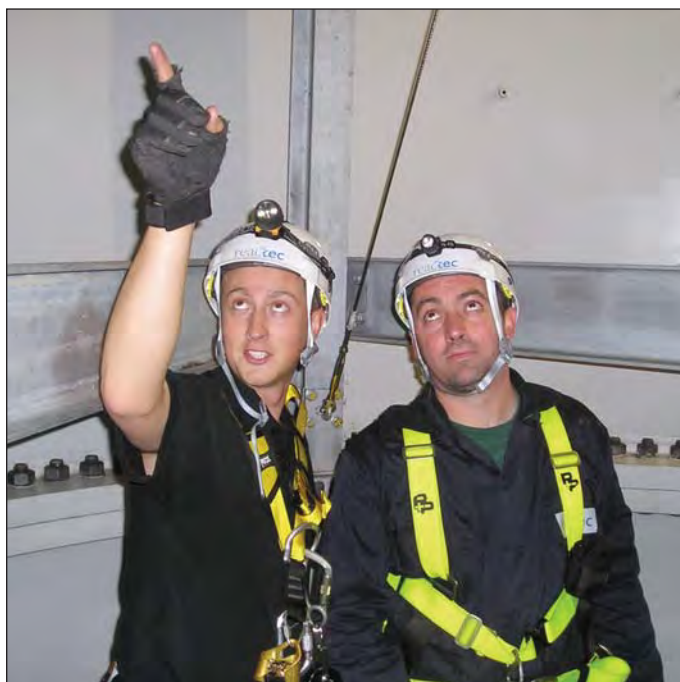


携帯用加速度計で風力タービンタワーの振動を検査しているBrett氏。

Xi社は、スコットランドの南部高地で難しい耐震性問題を解決することを依頼された2006年からCOMSOL Multiphysicsを使用しています。「1つの技術の適用で、異なるタイプの解析を実行できることはまれです。振動の専門家として、私たちは、音波あるいは流体で、どのように構造的相互作用が働くのかという点に特に関心を寄せており、COMSOL Multiphysicsにより、動的関係を描き出すことができます。つまり、起こっていることの概観を把握し、複雑で多面的な問題を容易に実行できます。システムの中の振動問題は極めて複雑で、多くの企業が問題を認識できますが、その問題を解決することができません。私たちの価値は、ソリューションを提供することであり、COMSOL Multiphysicsは、広い範囲に及ぶ難しいプロセスに役立つことができます。」

詳細は下記をご覧ください

[www.comsol.com/papers/8720/](http://www.comsol.com/papers/8720/)



南部高地プロジェクトのタービンタワー内のBarry氏(左)とBrett氏(右)。



# 海底エネルギーの採取

NAGI ELABBASI, BRENTAN ALEXANDER, STUART BROWN (VERYST ENGINEERING社・米国マサチューセッツ州ニーダム)

**エ**ネルギーの採取は、周囲の運動を電気エネルギーに変換することであり、ますます多くの用途に向けられ、成長しています。大規模なエネルギー利用技術としては、太陽光発電所、水力発電所、風力タービンが知られています。より小規模な技術も開発されており、より少ない量の局所電力を生産しています。エネルギー利用の用途には、振動を利用して、分散センサーノードに電力を供給するもの、波エネルギーを利用して、ブイに電力を供給するもの、低速の海流を利用して、水面下の津波検知センサーに再充電するものなどがあります。

全てのエネルギー利用技術には、基本的にマルチフィジクス設計問題が関わってきます。電気を生み出す源となる運動は、力学系に関連しており、力学系もまた、電力を生産するエネルギー変換システムと連動しています。運動は、振動、直接機械的接触、あるいは流体で可能です。エネルギー変換は、電磁気、圧電性、静電気、電気ひずみにより可能となります。このさまざまな種類を前提にすると、COMSOLは、アイデアを評価し、最初の証明のために、全ての結合した物理プロセスを説明することのできる重要なシミュレーションツールを提供するとともに、その後の製品設計や最適化のためのシミュレーションツールも提供しています。

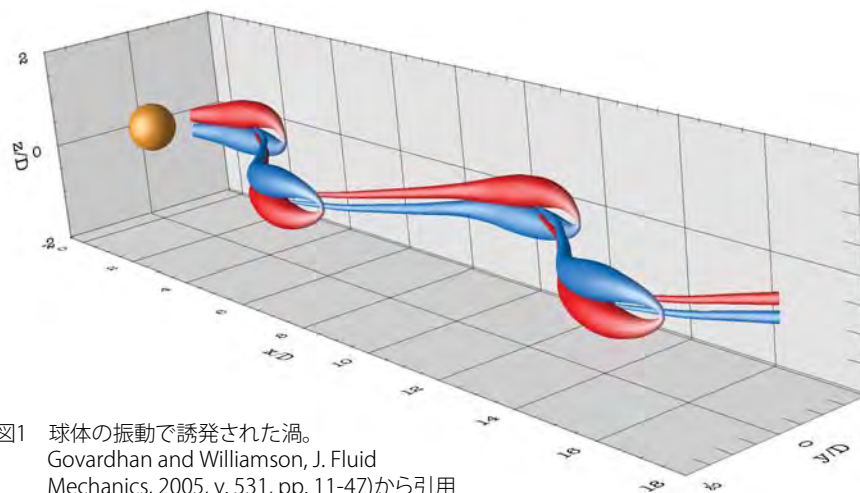


図1 球体の振動で誘発された渦。  
Govardhan and Williamson, J. Fluid Mechanics, 2005, v. 531, pp. 11-47)から引用

## 海流エネルギー

Veryst Engineering社は、エネルギー採取に関して数年にわたり研究を続けており、多くの産業に設計ソリューションを提供しています。1つの事例では、コンスタントに採取できるエネルギーとして、低速の深層海流があり、海底センサーに電力を供給しています。こうしたセンサーは海軍、環境調査、地震調査、石油探査に利用されています。海底センサーは、現在、バッテリーで稼働している。このため、船舶サービスを使って、バッテリーの交換や再充電をしており、高い費用がかかります。バッテリーのコスト自体

は低いが、交換のために送る船舶のコストが非常に高く、ある推定によると、海軍が使用する水中センサーアレイの現地メンテナンスコストは、サービス間隔ごとに数10万ドルに達しています。

この問題に対処するため、Veryst社は、低速深層海流のエネルギーを採取する技術の開発に取り組んできました。図1にイラスト表示された概念は、安定した流体を、エネルギー転換装置の対象になるほど、連続する交流の渦に変換します。ブラフボディが、安定した低速海流の流れる海底に設置されます。層流のカルマン渦列を生じさせる流れを導くためにブラフボディの幾何図形が選択されます。ブラフボディからの流に、羽根が挿入され、ブラフボディの先端で旋回すると、渦が羽根の中で交流運動を引き起こし、この羽根は電磁発電機に連動し、電力を生産します。この設計は、単純で、簡単な既製部品を使用し、回転シャフトの必要性をなくし、生物の付着を減らすために、密閉されています。Veryst社の設計の代替として、ブラフボディ上で周期的に振動する力からのエネルギーを利用する方法などがあります。



Veryst Engineering社・Xiaohu Liu, Stuart Brown, Nagi Elabbasi

「COMSOLは、アイデアを評価し、最初の証明のために、全て結合された物理プロセスを説明することのできる重要なシミュレーションツールを提供するとともに、その後の製品設計や最適化のためのシミュレーションツールも提供します」

信頼性の高いモデル

Veryst社はCOMSOLで羽根の流れと機械的運動をモデル化し、流体速度、ブラフボディ図形、羽根図形、羽根の位置の間の相互作用を実験しました。このエネルギー採取の利用は、取り込まれるエネルギーが少量であるため、困難な問題を抱えています。数ワットの違いで、エネルギー採取の設計の実行可能性に影響を及ぼします。経験式は、この設計を有効にするには適してはならず、なぜならば、経験式は、要求精度を満たして

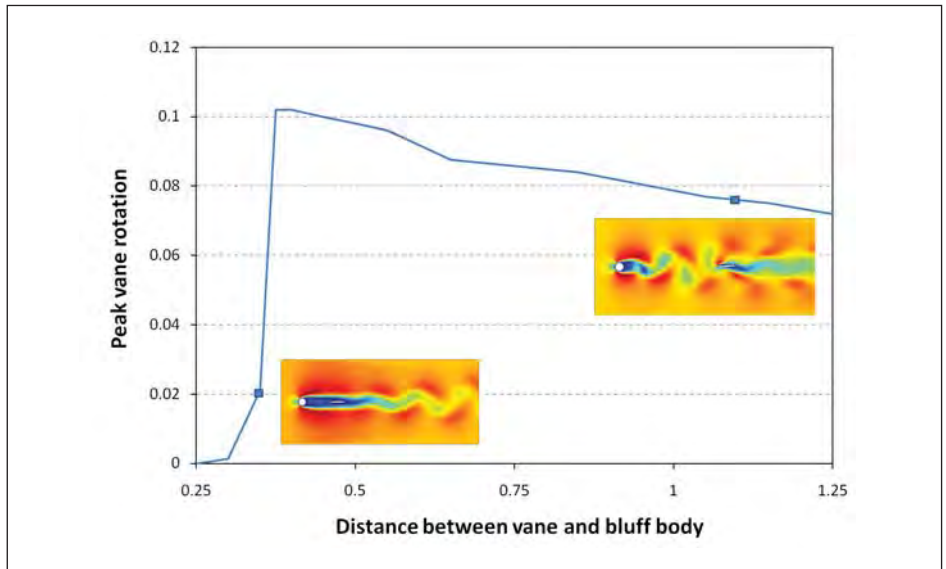


図3 羽根の回転中の羽とブラフボディの距離

おらず、プロトタイプを作成や実験は、全ての可能性のある設計パラメータで実行されるわけではないからです。

信頼性の高いマルチフィジックスモデルツールが求められています。COMSOLの主な魅力は、異なるモジュールの連続した統合です。COMSOLは、電磁場や高度な固体力学効果のような、他のプロセスを説明することが必要な場合、追加的な物理モデルを提供します。一般的な流体構造の相互作用(FSI)分析の代わりに、この羽根を、その先端で回転自由度を持つ剛体として、モデル化することはとても有効です。

羽根の回転を支配する運動学的、動的関係は、方程式で直接COMSOLに入力されます。この方程式の直接入力、このモデルを単純化するユニークなCOMSOLの特性です。移動メッシュの特性は、羽根の歪みのために、CFDメッシュを更新することに利用されます。シミュレーションはCFDモデルを有効にするために羽根なしで実行されました。結果として層流の渦流量は、振幅の周波数および大きさに関して、カルマン渦列予測に一致しました。

設計の最適化

COMSOL Multiphysicsのシミュレーションは、変換可能なエネルギー量を素早く予測し、エネルギー採取装置の設計上の最適化を容易にしました。図2は、渦の流れのある場所の構造を示しています。図3は、ブラフボディと羽根の間の羽根の回転量に関する1つのパラメータを示しています。これは可能エネルギーの量を決定します。このタイプのパラメータスイープを、COMSOLで実行することは簡単です。羽根の位置の最適な範囲があります。この羽根は、ブラフボディに近い位置に置かれたとき、渦巻きの形成を遅らせ、より遠い位置に置かれたとき渦流量は徐々に低下します。

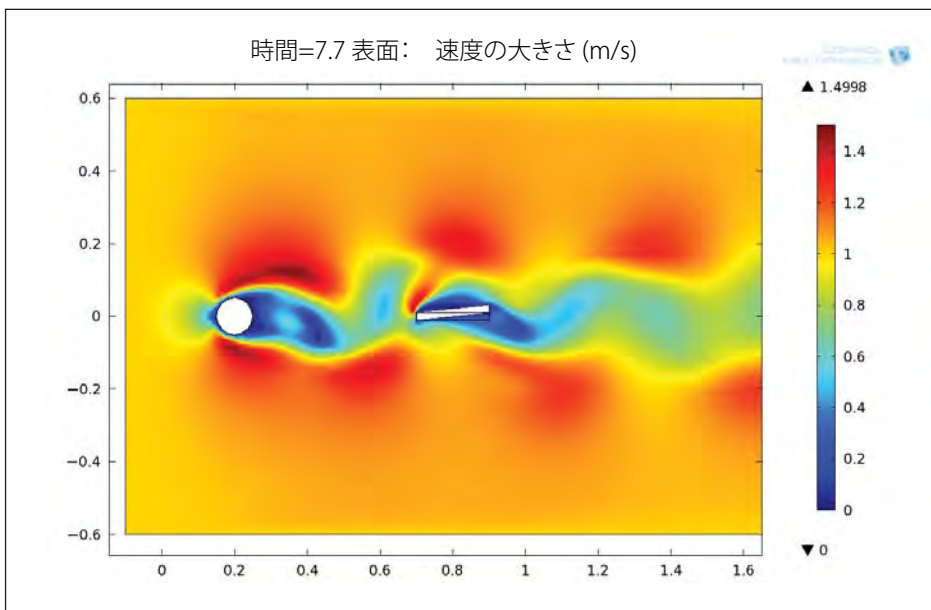


図2 特定エネルギー生産装置の速度曲線

# COMSOLを活用する湖沼の水環境再生実験

微細気泡(マイクロバブル)を用いる湖沼の水環境への酸素供給は、自然が本来持っている自己復元力による水質の改善に役立ちます。

吉岡修哉 (立命館大学理工学部機械工学科 准教授・博士(工学))

**我**々は、湖沼等の閉鎖水域の水環境を再生させる取り組みを行っています。これにより、水源として利用できる湖沼を増やすことで、多大な環境負荷を伴う新規の水源地を開発を抑制する事が出来ます。現在は、宮城県の行政機関の協力を得て、県内の水源ダムである惣の関(そうのせき)ダムにて実証フィールド実験を実施しています。

次に、微細気泡で水質を改善する仕組みを説明します。近年の人為的な環境負荷は、湖沼や沿岸部等の閉鎖水域の水中から酸素を奪い続けます。酸素不足の水中には、金属類や有機物等、多くの有害物質が存在しています。ここに酸素を溶解すれば、金属類は酸化され沈殿するので除去できます。また、酸素により微生物が活性化するので、これらが有機物を分解除去してくれます。このようにして水質が全般的に改善します。この酸素供給を、大量の微細気泡により急速に行うのです。



図3 惣の関ダム貯水池での現場実験風景2

しかし供給していません。それでも、この酸素供給により窒素、リン、鉄、マンガンといった有害物質が大幅に減少し、水質が改善している事を確認しています。



図1 惣の関ダム貯水池での現場実験風景1

水環境の再生には、微細気泡を大量に使用します。微細気泡とは、直径がマイクロメートル程度の気泡で、「マイクロバブル」とも言われます。同一体積の気体でも、それを無数の微細気泡に分割する事で、気液界面の面積を広くする事が出来ます。加えて、気泡は小さい程、内部圧力は高くなります。これらの効果で、気泡内部の気体を効率良く水中に溶かす事が出来ます。さらに、微細気泡には作用する浮力が小さくなかなか浮上しないので、数分から数時間水中に滞留し、気体の溶解を継続する事が出来ます。(図2)

微細気泡は、気体を混入した水を高速で攪拌する機械的な手法で生成します。この方法は、安価に大量の気泡を生成する能力がありますが、一方で気泡の直径がばらついてしまいます。そのため、自然相手の環境技術には適していますが、ドラッグデリバリーの様な高い精度が必要な医療技術等には不向きです。

このプロジェクトの特徴は、浄水場や水処理プラントと違い、広大な自然の大量の水を対象とする点です。池やダムですと、数十万から数百万立方メートル程度の水量があります。これだけの水に酸素供給するため、大量の微細気泡が必要です。ただしこれは、大量のエネルギーが必要という意味ではありません。前述の通り微細気泡は、効率よく無駄なく気体を溶解するので、用意する気体は少量で済みます。

例えば、我々が惣の関ダムで行っている実証フィールド実験では、100万立方メートルの湖水に対して、毎分2-5リットル程度の空



図2 微細気泡を含む水。乳白色に見える。

立命館大学では、COMSOL Multiphysics を利用する数値シミュレーションによって、水環境再生の基礎研究と、実証フィールド実験の支援を行っています。基礎研究では、自然風が水面に波を生成し、それが水中に水流を起こし、その水流が底部の泥を巻き上げて水質が変化するという一連の現象の予測を試みています。フィールド実験支援では、手間のかかる実証フィールド実験をなるべく効率良く行うための事前検討等を行っています。

ここでは、対象となる水域で起きる環境関連の現象(流体、熱、化学反応、物質拡散)すべてを予測する必要があります。これらの現象の支配方程式はすべて異なりますので、それぞれを連成させて同時に予測する必要があります。つまり、これは典型的なマルチフィジクス問題なのです。我々は、COMSOL Multiphysicsが持つ強力なマルチフィジクス問題の解析技術を利用し、この問題に取り組んでいます。これにより、微細気泡を投入する場所、深度や、その速度等の決定に役立てています(図9参照)。

COMSOL Multiphysics 4.1をCFDで

ジュール・化学反応工学モジュールと組み合わせて次の物理インターフェースを用いました。

- : 2相流-フェーズフィールド (tpf)
- : 乱流,  $k-\epsilon$  (spf)
- : 高濃度化学種輸送 (chcs)
- : 希釈化学種輸送 (chds)

図7は、左から右に吹く自然風が水面に波を発生させ、水中に水流を駆動する様子を再現しています。

図8は、惣の関ダム全体の水流の計算結果です。これから、ダム貯水池内で水流が大規模に循環するエリアがあることが分かります。微細気泡の効率的な拡散のためにこの流れを利用することができました。

実証フィールド実験は、NPO環境生態工学研究所と共同で、宮城県の惣の関ダムに行っています(図1, 3, 4, 5参照)。

フィールド実験は大掛かりなのですが、宮城県の自治体関係者の皆様のご協力により、順調に推移しています。ここでは、COMSOL Multiphysicsによる事前検討の結果を見ながら、大型の実験装置を用いて酸素供給の実証試験を行っています。貯水量100万立方メートルの満水時に約1カ月間、酸素供給実験を行った結果、図6に示す様に有害物質を有効に除去する事に成功しました。

浄化とは、汚染物質を除去するか、対象地域外へ移動する事です。水処理プラント等で、お金とエネルギーを投入して行われませぬ。

もちろん、きれいになる事は良い事なのですが、最終的な環境への収支に注意する必要があります。水をきれいにする為の工

ネルギーを化石燃料の燃焼から得ていたなら、元も子もありません。我々は、一方的な「浄化」は目指していません。水をきれいにするのは酸素の力ですが、そもそも自然の水には豊富な酸素が含まれていました。ですので、多少の自然災害や気候変動によって水中に汚染物質が入っても、豊富な酸素により、すぐに除去されていたのです。これが、自然自らが本来持つ、環境再生能力です。

近年の人為的な環境負荷は、この環境再生能力の処理量を超える化学物質を水環境に投入しています。その為、水中の酸素が消費されて減少しています。

我々の目標は、単なる環境水への酸素供給による一時的な浄化ではありません。水中の酸素濃度そのものを大幅に増加させ、環境再生能力を発揮できる状態に水環境を戻す事です。すなわち「再生」は自然へのアシストです。このようにして自然の再生能力が戻れば、あとは自然が自らの力で良好な環境を保つ、持続可能な社会が拓けます。

我々は、今後も環境再生のフィールド実験を各地で続け、この技術の実用化を目指します。複雑で大規模な実験ですが、COMSOL Multiphysicsによる予測支援を受けながら今後も続けていきます。



図5 現地での微細気泡生成装置



## 執筆者について

吉岡修哉 (よしおか しゅうや)  
立命館大学理工学部機械工学科准教授。博士(工学)。

1993年慶應義塾大学理工学部機械工学科卒業、2002年慶應義塾大学大学院理工学研究科機械工学専攻博士課程修了。スウェーデン王立工科大学研究員、東北大学流体科学研究所助教を経て現職。

研究分野は微細気泡の生成技術及び環境技術への応用研究、非定常乱流の制御技術研究。



図4 現地での水のサンプル採取風景

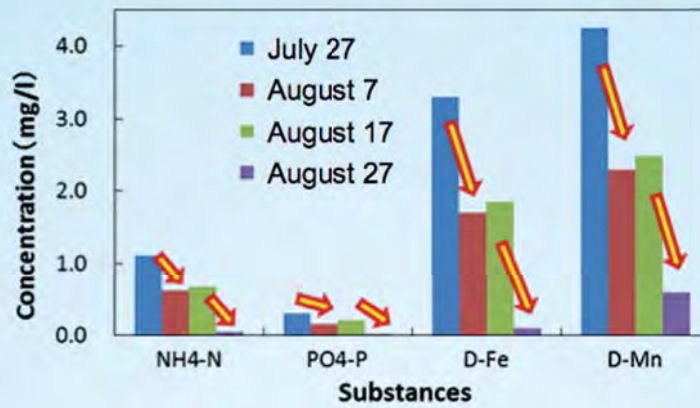


図6 検証結果は、各種有害物質の濃度の減少を示している  
(この実験は8月7日から17日まで一時中断)

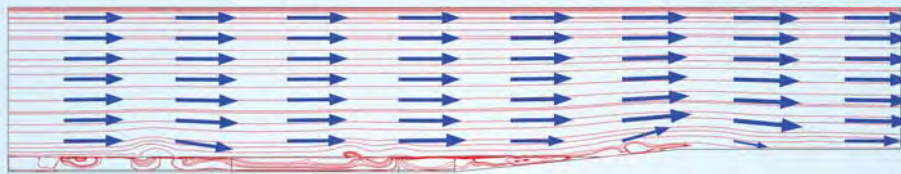


図7 沿岸部における風と水流のCOMSOL Multiphysicsによる数値解析結果  
(上部:空気、下部:水、右:岸)

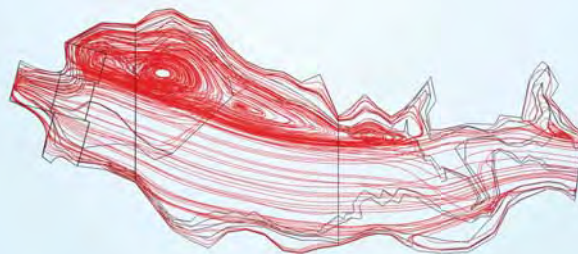


図8 惣の関ダム貯水池内水流のシミュレーション結果

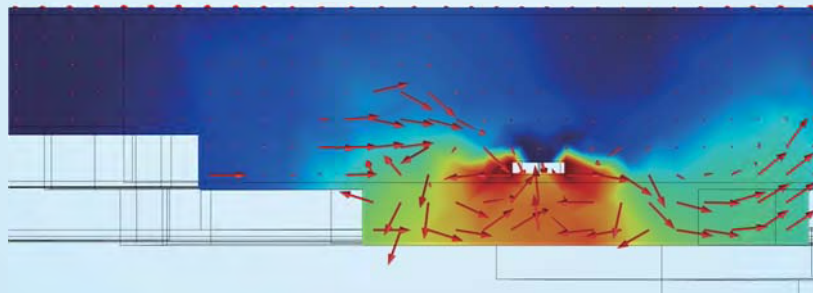


図9 惣の関ダム貯水池の断面  
微細気泡の拡散状態のシミュレーション結果



# ポリマーの混合が作り出す、独自の一体成型医療用インプラント

ポリマーを混ぜ合わせて型に流し込み医療用インプラントを作るためには、広範囲にわたるパラメータの設定が必要です。製作現場で問題に直面したエンジニアがCOMSOL Multiphysicsを用いて行ったモデリングは、原因の究明だけでなく、同タイプの斬新なポリマー製インプラントを同じ工程で製作し臨床試験に進める一助となりました。

MARK YEOMAN博士 (CONTINUUM BLUE社R&Dディレクター)

**医**療用の軟組織インプラントの多くは、身体の組織が再生し治癒するまでの数カ月あるいは数年のみ必要とされます。組織が再生、治癒した時点でインプラントを取り出すのが望ましい場合もありますが、これは常に可能というわけではありません。従来の軟組織インプラントは繊維やバイオ繊維で作られていましたが、特殊ポリマー技術の発展にともない、体細胞の自然な反応を再現、促進するインプラントの材料として、高伸縮性ポリマーに大きな期待が寄せられています。Continuum Blue社(英国)のエンジニアは、生分解型の高柔軟性エラストマーを使った、目的達成後は体内で自然に分解され再置換手術で取り出す必要のないインプラントの開発で、この流れにおける大きな一歩を踏み出そうとしています。

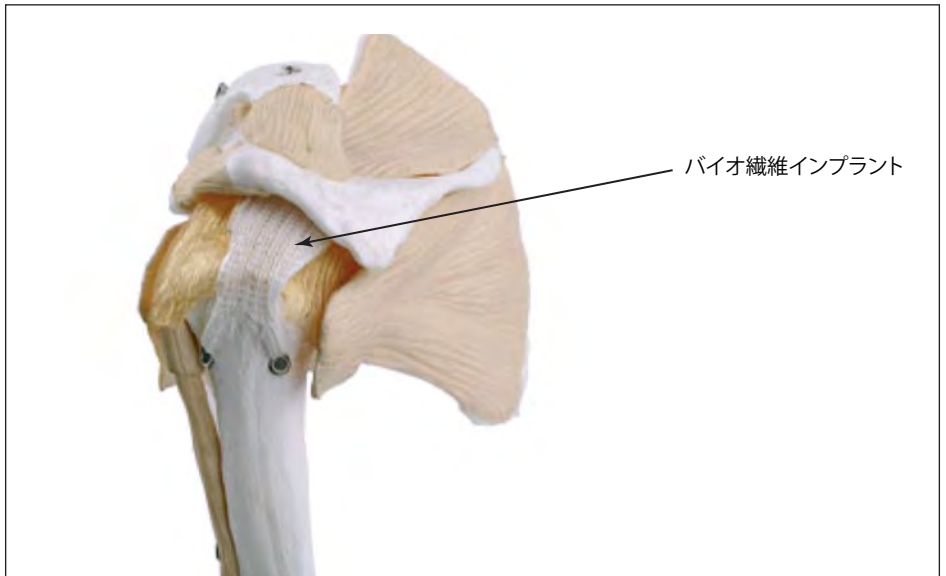


図1 肩関節に接合した繊維ベースのLARSインプラント。インプラントは、片側にある固定穴から骨に差し込まれた2本のネジで固定されている。Continuum Blue社では現在、関節の治癒後に生分解される同タイプのインプラントを、数種類のエラストマーを用いて開発している。

Continuum Blue社は2004年に創立され、医療機器および医療用インプラントの研究開発および解析を専門としています。当社はメトロニック、Abbott Spine(現ジマー)、シンセス、NuVasive、Scient'X、British Technology Group、Ranier Technology、エースクラブ、Blackstone Medicalといった数多くのグローバル企業と取引があり、眼科および心血管系が主な分野です。

新開発された斬新な靭帯インプラントは、柔軟性を保ちつつ骨を束ねて支える輪ゴムのような役割を果たします。さまざまな要件を満たすためには材料の異方性が必要です。例えば、回旋腱板LARS(靭帯置換・補強システム、図1)では、腕を自由に動かすのに十分な柔軟性だけでなく、モノを一定の位置で支える際や持つ際に腕や肩周辺を機能的に使うための安定性も兼ね備えていなければなりません。

## ポリマーを混合する

1種類のエラストマー材料では、こういったLARSで望まれる要件を満たすことはできません。そこで、必要とされる異方性と高い弾性を持つ一体成型インプラントを作る

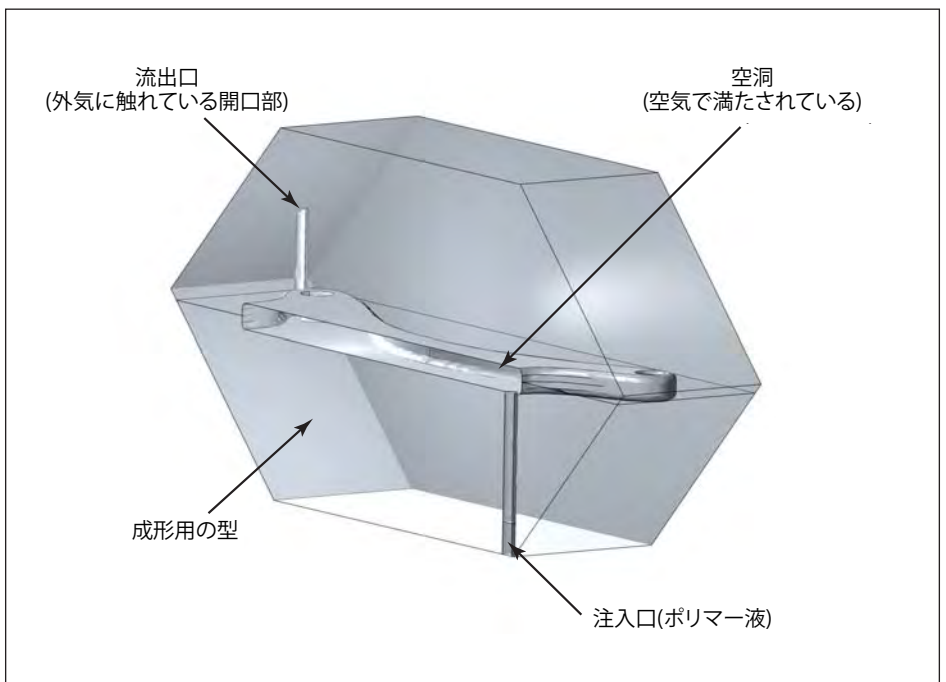


図2 2種類のエラストマーを用いたLARSインプラント用の型のジオメトリの半分を示すモデルドメイン。ポリマー溶液は下部の注入口から入り、上部の流出口から空気を押出す。

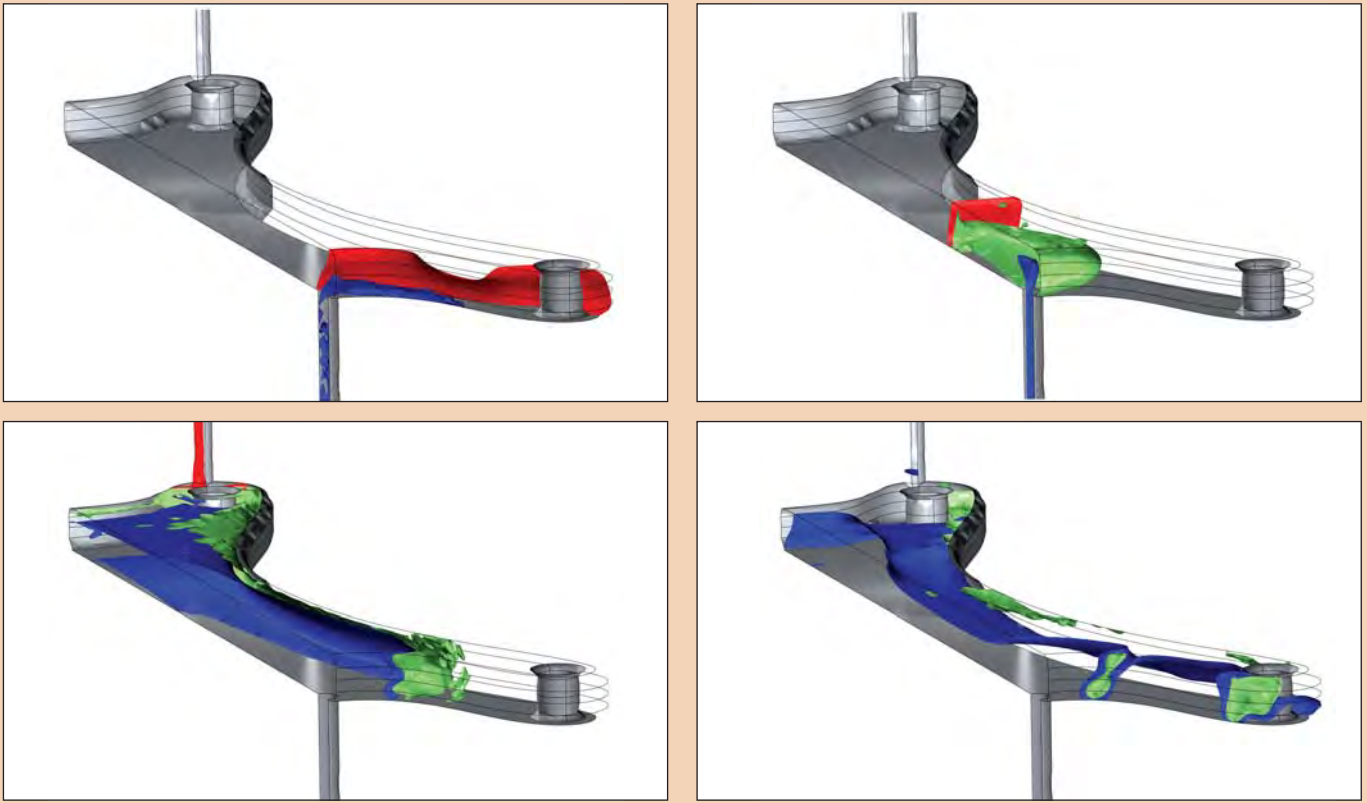


図3 ポリマーが型の空間に充填される様子のシミュレーション(20秒、40秒、100秒、3000秒後)。赤の等値面は混合したポリマーと空気の境界、緑の等値面は2種類のポリマーの体積分率が50%である箇所、青の等値面は2番目のポリマーの体積分率が100%である箇所を示す。  
注:分かりやすく図示するため、型の空間の壁は表示されていない部分あり。

よう、硬化速度の違い2種類のポリマーを型に射出する斬新な方法が当社の取引先で開発されました。モデルを用いることで、私たちは一つの製造工程で立体的な移植可能デバイスを作る最良の方法を捜し出すことができました。工程の開発は無事成功し、この工程で製造されたインプラントの一つは現在臨床試験が行われています。次のステップは、望ましい生分解性を持つ3種類目のポリマーを加え、インプラントの異方性、高い弾性をさらに強化することです。

このようなポリマーベースのLARSには多くの利点があります。ポリマーベースのLARSは繊維ベースのLARSと比較しより低コスト、より短時間で製造可能です。繊維ベースのLARSは複数の製造工程が必要であり、また、各工程で人の手が加わるため、徹底した品質保証も必要です。それに対し、ポリマー製インプラントの製造は成型および最終製品の洗浄という2段階のみであり、製造および品質保証のコストを大幅に削減できます。

最初の試作品では、意図した濃度、順番、速度、状態で型に流し込むことが可能な2種類のエラストマーを使用しました。成型されたインプラントの両端はそれぞれ、2種類のうちどちらかのエラストマー100%で構成され、間の部分は2種類が連続的に混合していました。エンジニアは、射出点だけでなく、射出するポリマー、型全体、型表面の温度も管理しなければなりません。また、ポリマーが型に入るタイミングや2種類の合計体積も管理が必要です。

これらの変動要素すべてについて適切なパラメータを決定するのは容易ではありません。このタイプのインプラントを最初に開発した時には、成型工程で発生した問題の

原因を突き止めることができませんでした。その後、工程についての理解をより深めるためにシミュレーションソフトウェアを使い始めたのですが、目的にかなったのは最終的にCOMSOL Multiphysicsのみでした。具体的に言えば、COMSOLでは2種類のポリマーの射出をフル3Dで処理し射出状況を管理することが可能ですが、私たちが評価した、射出成型に特化した他のソフトウェアにはこのような機能はありませんでした。

作成したモデルは、空洞の壁という固体領域、射出したポリマーという液体領域、空洞内の空気というガス領域、の3つのドメインで構成されています。同時に射出されたポリマーが型に入る前に混ざり合う様子は、

**「その後、工程についての理解をより深めるためにシミュレーションソフトウェアを使い始めたのですが、目的にかなったのは最終的にCOMSOL Multiphysicsのみでした。」**



# 「このプロジェクトのソリューションを見出すうえで COMSOL Multiphysicsの有用性は非常に高いものでした。その優れた機能はわが社の未来にとって間違いなく有益で重要な貢献となることでしょう。」

2種類のポリマー溶液の体積分率を射出率の関数とする境界条件などを使ってシミュレートしました。これはCOMSOL Multiphysicsでは簡単にできましたが、他のソフトウェアではほぼ不可能でした。

2種類のポリマー同士や周囲環境との複雑な相互作用を処理するため、私たちは3つの過渡解析物理インターフェースのそれぞれを組み合わせました。まず、2層の流れのフェーズフィールド法インターフェースを用いて、流体流れの前面が空洞から空気を押出す様子をシミュレートしました。2つ目は、フェーズフィールド法流れのインターフェースを用いて、同時に射出された2種類のポリマー溶液の、2層の流れの液相と、それぞれの相互作用をシミュレートしました。3つ目は、対流および伝導アプリケーションにより熱変化をモデル化しました。射出が止まると、ポリマーが詰まった空洞の温度は下がります。その過程で、2種類のポリマーの密度および粘性は変化し、粘性の高まりですべての流れが止まるまで、流体同士の相互作用は続きます(図3)。

このモデルには約5万の要素と約30万の自由度が存在します。2.8 GHzのインテルCore 2 Quadプロセッサ、8 GBのメモリ、Windows Vistaという環境で解析に要した時間は18時間でした。

## 温度と流れが見事に一致

作成したモデルは、別個の複雑な立体と空洞を用いて検証しました。その詳細は本稿では明らかにできませんが、検証の方法は3つです。1つは定性評価で、充填過程での流体-空気流れの前面の映像を、同じ過程をCOMSOLで動画化したものと比較しました。モデルは、流体と空気の接合点や、射出率を変化させた際に空洞のさまざまな立体機構(壁や曲面、整流装置など)の周辺で観察された流れを非常に正確に示していました。

2つ目の評価では、ポリマーが流れ込み冷却される時の温度を測定するため、モデルの3個所に熱電対を設置しました。熱電対は空洞の上面、下面、側面に設置し、3個所での計測値とシミュレーションとの比較を行いました。図4は、シミュレーションが実測値と非常に近かったことを示しています。実際の射出データの切れ目は、型に入るポリマー

の流れを整えるソレノイド弁の切り替えによるものです。

モデルは、これとは対照的に、理想的な一様流の流れ関数を用いています。これらの曲線は私たちが目指す、そしてモデルから引き出しうる最良の結果を示しています。3つ目の評価では、型の温度が下がりポリマーが硬化した時点でインプラントを切断し、2種類のポリマーの境界領域を特に注意して観察し、モデルとの比較を行いました。この評価においても、モデルが出した解は実際のインプラントの性質を非常に正確に予測するものでした(図5、注:この図は実際の回旋腱板用LARSとは異なる3Dインプラントの一部)。

このモデルを用いることで、合理的な期間と妥当なコストでさまざまな型の検証が可能になりました。一つの型を設計し直しモデルで検証するために必要な時間はおよそ1日半、コストは約850イギリスポンドです。一方、特殊シリコンで作製する型を一つ約3000ポンドとすると、実際のサンプルを用いた検証の概算費用は9000ポンド近くなり、また、設計しなおしたシリコン製の型を入手するのにも3~4週間かかります。

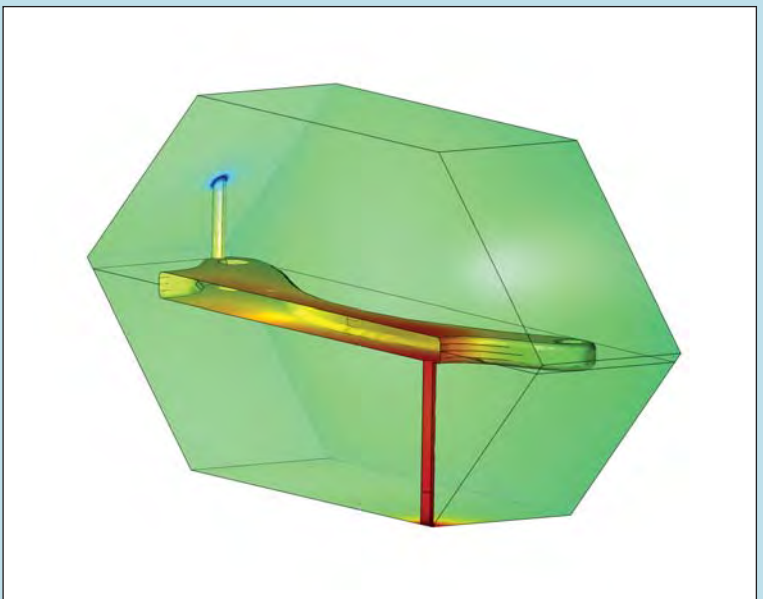
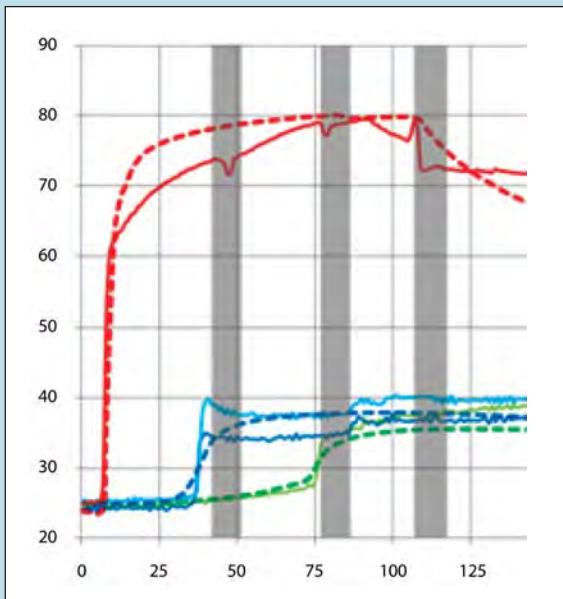


図4 (左)充填過程において空洞の内部で計測された温度とモデルの結果との比較。実線は実測値、点線はモデルのデータを示す。実測値の不規則な部(図中グレー部分)は、射出されたポリマーの流れをコントロールするためのソレノイド弁の開閉による。(右)空洞の充填時の熱プロット。





COMSOLがなければ、ポリマーの位置をコントロールするための重要なパラメータを探し出すにより長い期間と20倍ものコストがかかったことでしょう。コストの面だけでなく、型取りインプラントのサンプルは性質上不明な点が多いことから、実際のサンプルを用いてポリマーの境界や段階的に混合している領域を定義するのは容易ではありません(図5)。境界や領域を見極めるために、従来はポリマー溶液に微小気泡や染料を加えねばならず、それがポリマーの流れの特性を変化させていました。

もう一つの選択肢は、機械的押し込み解析[mechanical-indent analysis]を実施し、型の各点における物性の相違をあぶり出すという、より高コストなものでした。それにひきかえ、モデルを使えば型への充填工程で何が起きているのかを詳細に把握でき、顧客は最終製品や2種類のポリマーの間にある混合部分を思い描くことができます。ポリマー製LARS作製の実用的なソリューションとして最良の成型工程とはどのようなものか、COMSOLでのモデリングと結果の視覚

化により、費用と時間の両面で効率よく顧客を納得させることができました。

### 生分解性を加えるために

検証済みのモデルを手には、私たちは多くのプロジェクトを頭に描いています。まず最初に、生分解性を持つ製品を作るため、射出するポリマーの数を増やしたいと考えています。また、射出点も複数にしたいと考えています。

もっとも野心的な試みは、モデルにパラメタリゼーション機能を加え、新しい製品に必要な製造工程のパラメータを即座に探せるようにすることです。

LARSインプラントは、さまざまな解剖学的構造、関節の複雑さ、疾病に対応するため大きさや形状を変更する必要があります。そのため私たちは、最終製品のジオメトリの詳細を入力するだけで、型の最適なデザインと、製品の理想的な物性をもたらすパラメータをソフトウェアが

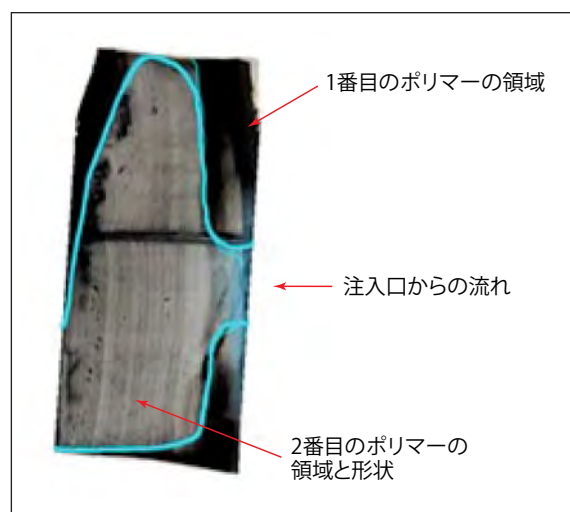


図5 検証用サンプルの断面図とCOMSOLでのシミュレーション結果(青線)の比較。2番目のポリマーの輪郭がぴったり合致している。

自動的に提案する、最適化したモデルを作りたいと考えています。このようなモデルを使えば、これから出会うあらゆる型、材料の設計変更に対応できることでしょう。

一言でいえば、このプロジェクトのソリューションを見出すうえでCOMSOL Multi-physicsの有用性は非常に高いものでした。その優れた機能はわが社の未来にとって間違いなく有益で重要な貢献となることでしょう。

### 謝辞

この研究に協力してくれたRanier Technology社のRobert Snell氏に、感謝の意を表します。



2009年のCOMSOLカンファレンス(ミラノ)で、COMSOL社のPresident & CEO Svante Littmarckから賞を手渡される筆者のMark Yeoman氏(右)。

## 執筆者について

Continuum Blue社のR&D DirectorであるMark Yeoman博士は、医療用機器開発における12年以上の経験と豊富な知識を持つスペシャリストです。大学院時代には計算処理手法を用いた心血管インプラントの設計および最適化、ならびにメトロニック社との遺伝的アルゴリズム研究に取り組み、コンピュータモデリングと応用数学で博士号を取得しました。ステントを専門とするDisa Vascular社でも経験を積んだほか、学部生、大学院生向けの力学、計算処理の方法・技術の講義を何年にもわたり行っています。

# MEMS(マイクロマシン)装置の飛躍的進歩による、血液粘性の簡単で正確な測定

Microvisk社は、シミュレーションを使った設計により、自分自身の血液粘性を素早く、正確に計測できる携帯装置を投入し、大きな家庭用医療製品市場で優位に立ち、このビジネスを軌道に乗せようとしています。Microvisk社は、シミュレーションを使った設計により、自分自身の血液粘性を素早く、正確に計測できる携帯装置を投入し、大きな家庭用医療製品市場で優位に立ち、このビジネスを軌道に乗せます。

JENNIFER HAND

**血**液粘性は、健康全般に関する指標として広く認識されています。血管が損傷もしくは破れたとき、出血を最小限にとどめる必要があります。(凝固カスケードとして知られている)一連の反応が始まり、血栓が作られます。数多くの疾患がこのプロセスに悪影響をこうむり、この場合、患者はしばしばワルファリンなど抗凝固薬を処方される。こうした多くの個人に対する健康管理では、薬物投与が適切であるかどうかを確認するため血液凝固時間を週単位で検査します。

既存の携帯装置は、化合物でコーティングされた電極によって受信される化学反応を誘導することで機能します。この技術は数年にわたり基本的に変更されていません。一方でMicrovisk社は、マイクロ技術の未来研究から派生し、そしてMEMS(マイクロ電気機械システム)の力を利用した、超新技術の開発を行っています。

## 全く異なるアーキテクチャー

Microvisk社製MEMSベース小型カンチレバー装置は、ウェハの大きさのレベルで生産され、数千個の同質マイクロチップがシリコンウェハ表面上に平面構造で加工されます。製造の最終工程で、小型カンチレバーが取り出され、上部の支持面で偏向させ、正確な3次元のマイクロ構造が形成されます。(図1)このように極めて変形しやすく、柔軟性のある小型カンチレバーは、CMOS(相補型金属酸化半導体)タイプ信号によりコントロールされ、微小な(ナノリットル量)サンプルの特性の決定に使用されるMicrovisk社独特の流体マイクロプローブの中核をなしています。

電流がこの構造物を通ったとき、それぞれの層は、異なる方法で偏向させます。(図2)1つの構造層が大きく拡大すると、他の層は縮小します。このことで、ガスや血液のような液体の中で、それぞれのカンチレバー

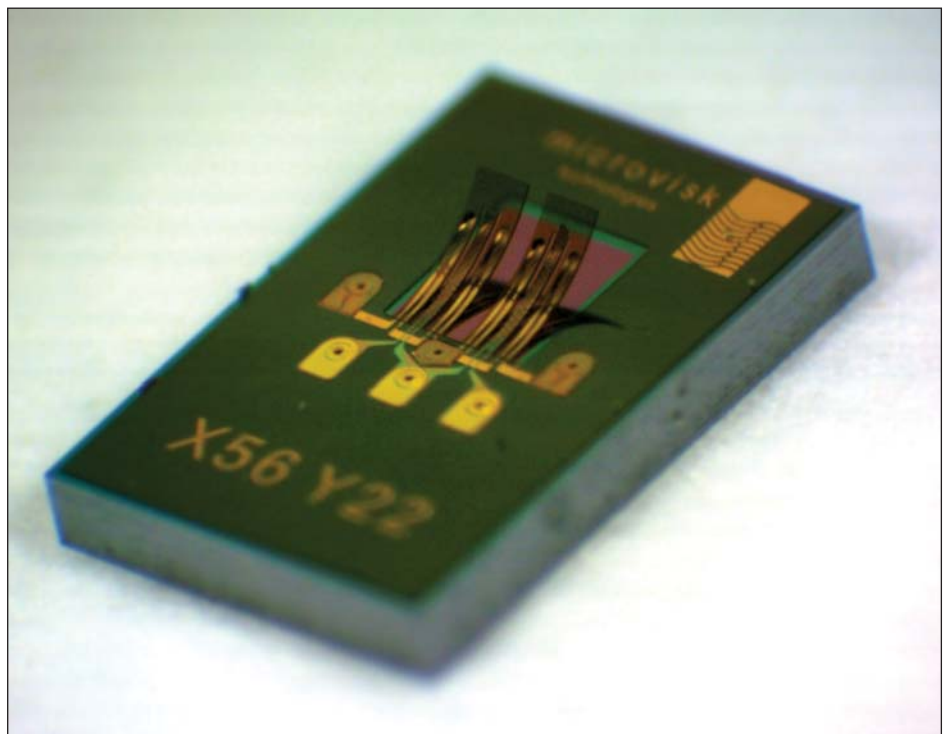


図1 Microvisk社製 MEMSベースの小型カンチレバー装置

が上下に動く結果となります。従って、血液の凝固する速度と、その凝固プロセスに関連する粘弾性(レオメトリック)変化は、化学よりもむしろ物理的原理に基づく1段階プロセスで調べられます。

発明家でMicrovisk社センサー開発部長のSlava Djakov博士は、Microvisk社のアプローチがなぜユニークなのかを次のように説明しています。「一般的にAFM(原子間力顕微鏡法)の応用で利用されるカンチレバー、あるいはDNAたんぱく質、薬もしくは抗体と結合するアプタマーを調査する生物学的研究で利用されるカンチレバーの設計は、通常、結晶シリコンの硬いカンチレバーを用います。

この硬さのため、結晶シリコンなどと類似

構造のものは、壊れやすく、不安定で、移動が制限されています。結晶シリコンは、とても敏感であるけれども、小型カンチレバーもしくは、マイクロブリッジや皮膜のような類似構造のものがいったん液体につかると、共振モードで作動するために、この移動制限は性能を妨げることとなります。高分子化合物の上手な選択を通して、私たちは、その静止位置からかなり遠く離れて、カンチレバーの自由端を偏向させることができ、この結果、特に効率的で正確なものとなりました。私たちは僅かなパラメータでも検査することができます。例えば、血液の量が極めて少量で、マイクロリットル以下でも血液の粘性と粘弾性特性を調べることができます。」

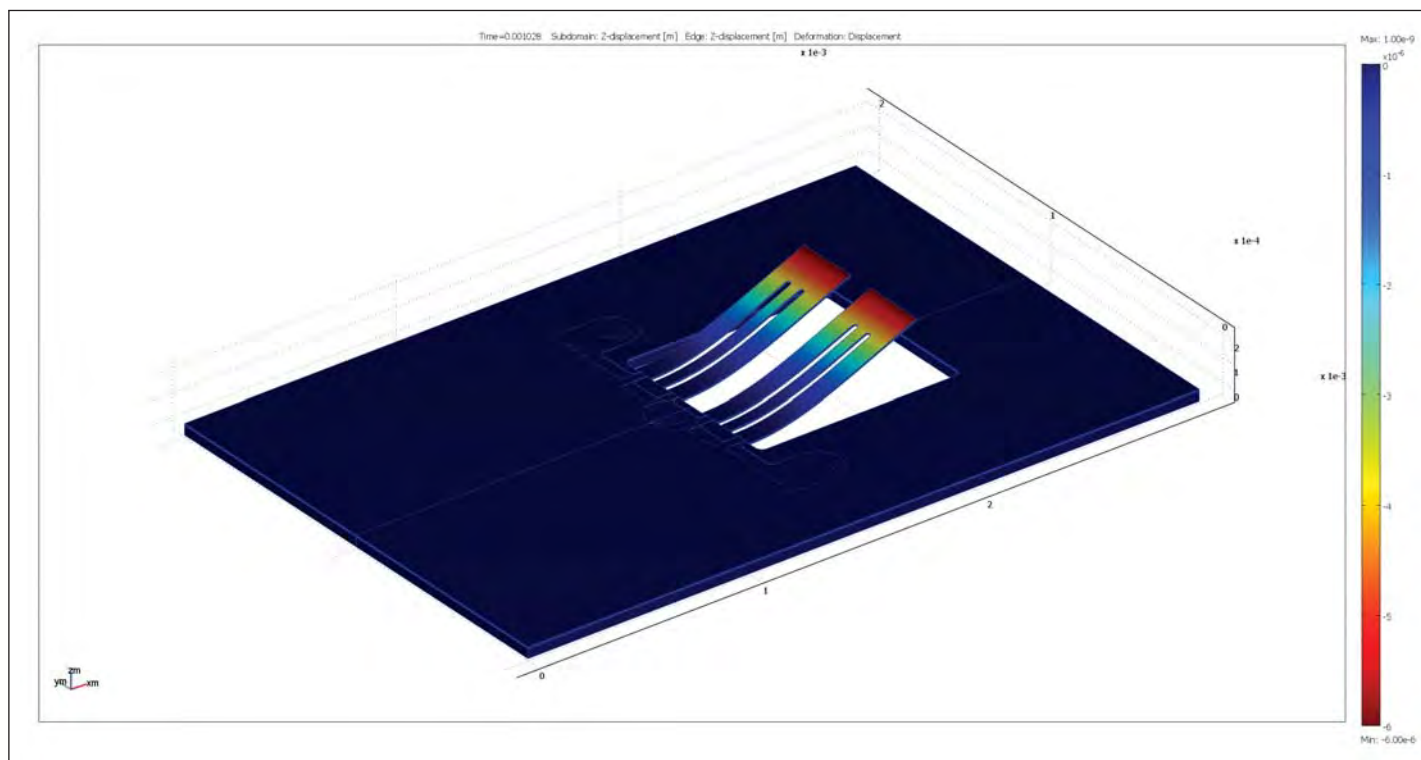


図2 小型カンチレバーの変形を示すCOMSOLモデル

## 信号、統計データ、相乗効果

この洗練された高度な技術にもまた課題がありました。「このソリューションは、カンチレバーがどのように上下に動くかについては、あまり重視していません。」とDjakov博士(図4)は指摘します。「それは、統合、パッケージング、信号処理の全体的なアプローチに重点を置いています。MEMSを基本とするマイクロチップの設計における大きな疑問は、一度コンセプトが証明されると、そのチップがどんな性能を発揮するのだろうか、何がその設定ポイントなのだろうかということになります。

標準的な検査は物質を電子的に調べるが、私たちは、サイクル時間や性能低下のような機械的応答や再現性や信頼性の特徴をも検討する必要があります。」

これは、身近な構造材料である熱と電気的特性を持つ光束システムの力学と統計学を統合するアプローチを必要とします。このMEMS構造物が、液体に浸かっている状態で、そこに電流が加えられたとき、問題はさらに複雑になります。電流は、静電場を変化させるだけでなく、力学的な構造も修正し、熱効果を生み出します。Djakov博士は次のように報告している。研究が始まったとき、適切なモデリングの選択がなく、このチームは当初、MEMSの複合分析を実行することができませんでした。

そして、マルチフィジックスシミュレーションが登場し始めたとき、同社は、小規模かつ限られた資金のため、これを使うことができませんでした。「私たちは、過去の経験、基本的なノウハウ、直感に頼らねばならなかった。設計の決定は、研究所での実験や実際の耐久試験など、長く、退屈なプロセスです。」

2009年、彼はMicrovisk社の取締役会と経営陣から、COMSOL Multiphysicsを導入するために必要とされる投資を行う認可を受けました。「彼らは最初に実験だけに注力していましたが、今、設計フロー図をシミュレーションで補う素晴らしい方向へと動きだしました。COMSOL Multiphysicsは、設計に関する全ての物理特性に対応しています。私たちは、多くの異なる要素を扱っているので、それほど簡単なことではありません。

すなわち、独特の熱特性や電気特性を持つ固有の物質を調査するだけでなく、それらの物質が互いに複雑に入り組んでいるときに、それらをも分析しなければなりません。どちらの物質が最も重要で、これらの物質は液体の中でどのように反応しているのでしょうか?」

COMSOL MultiphysicsによってMicrovisk社の研究者は、マイクロチップを力学的、熱的(図5)、静電的な視点から見るができるようになりました。また、研究者たちは、微小な流体や特性を解析し、このチップと、動くカンチレバーの相互作用がどのようにとれているのかを分析できます。

「設計上で全ての物理特性を関係づけることによって、COMSOLは、繰り返しの全プロセスをスピードアップし、試作品の作成を減らし、開発期間を短縮しました。私たちはもはや、1つの問題を解決してから次の問

**私たちは、僅かなパラメータでも検査することができます。例えば、血液の量が極めて少量で、マイクロリットル未満でも、血液の粘性と粘弾性特性を調べることができます。**

図3 携帯装置モデル



**「設計上で全ての物理特性を関係づけることによって、COMSOLは、繰り返しの全プロセスをスピードアップし、試作品の作成を減らし、開発期間を短縮しました。」**

題に移る必要も、それぞれの段階が終了してからグラフを描く必要もなくなった。」と Djakov博士は言います。

これまで、多くの試験紙の試作品の改良型からデータが集められ、その後、分析、理解、検証を実施しなければなりません。一般的に、1つの繰り返し作業で、20種類の異なる設計の選択肢を評価し、それぞれ関係する製造・組み立てを作業を算定しました。COMSOL Multiphysicsのモデリング手法を使い、Microvisk社は、最も優れていると思われる選択肢を抽出し、研究室での実験とともにシミュレーション結果で確認する方法を採用し始めました。

僅か15ヶ月後、同社は2つの大きな設計反復法と多くの最適改良版を全て整え、この結果、開発期間を4から5ヶ月間短縮したと Djakov博士は推測しています。「もちろん、私たちは、4から5ヶ月間も座って待っていたわけではないが、科学者たちは、恐らく、全ての疑問に満足するための時間と人手をかけずに、素早く判断を下すことができなかったのでしょう。COMSOL Multiphysicsによって、私たちは、より広い範囲で可能性を考察し、2件から3件以上を調査し、決定することができます。この結果、私たちは、開発期間を短縮できると同時に、より良い最終製品を生み出すことができます。

COMSOL Multiphysicsは、設計の最適化をもたらしただけでなく、開発チームがMicrovisk社の投資家に意思を伝える方法を改善してきました。各種モデルは、簡単に取

締役会で発表され、進捗状況は、カラーマップやビデオを使って表示されます。

#### 法的規制に対応

医療診断装置に関しては、厳しい規制があります。例えば、血液サンプル検査には時間の制限があります。血液凝固は針で指を刺したときから始まるので、その処置は急ぐ必要があります。

Djakov博士は自信を持って、Microvisk社が最高の技法を持っていると言います。

「例えば、COMSOL Multiphysicsによって、私たちは、マイクロチップ上の液体サンプルを搬送する極毛細管の動作を行う非常に素晴らしいソリューションを作り出すことができます。既存の検査装置に必要な量のちょうど4分の1で、カンチレバー全体が直ぐに満たされ、検査が始まります。このため、患者はほとんど痛みを感じません。加えて、マイクロチップに血液サンプルをつける必要がない、つまり、装置に特定の部分に血液をたらず必要がありません。」

#### 小さな投資、大きな予想利益

健康管理検査や家庭で使用のポイントは、先進国の健康管理戦略に大きくかかわっています。この市場はまだ新興のものであって、Djakov博士によれば、家庭用血液検査の潜在市場は、糖尿病と診断された患者が使用する血糖値検査とほぼ同じ規模です。血糖値検査の市場では、いまや160社の企業が設立されています。

Microvisk社は、2011年の最終四半期に新装置を投入する予定です。

私たちは、既に、いろいろな付加的な機能に取り組んでいます。「私たちが新製品を投入した時点で、とても素早く規模を拡大し、月産百万個のマイクロチップを低価格で生産できます。血液の変化は、粘着性の変化によって全て決定されると専門家は認識しているため、彼らはとても興奮しています。私たちの開発したマイクロチップは、将来一度にいくつかの検査を実行することになんかの障害もなく、私たちの技術は、既に1つの血液サンプルで多くの検査を扱うことができます。」



図4 Slava Djakov博士 Microvisk社センサー開発部長

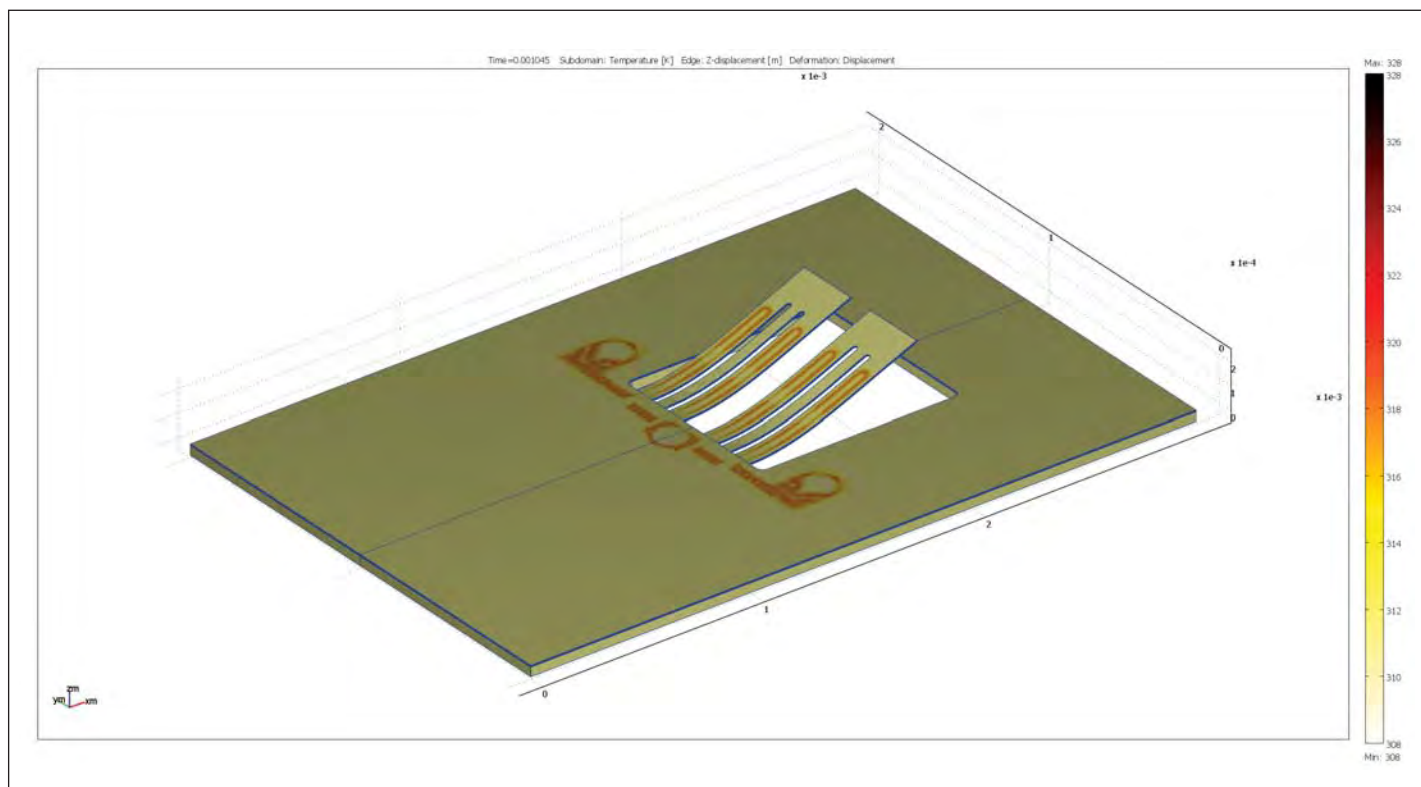


図5 このCOMSOL モデルは正確な熱偏向を示しています。

このような大規模市場での機会があり、技術的リスクが少なく、強力な多くの知的資産を持ち、同社は、この製品の発売後ちょうど1年で採算ベースに乗ると期待しています。「開発に関しては、計画通りに進んでいます。」とDjakov博士は断言します。「COMSOL Multiphysicsが無かったなら、状況は随分違っていたものになっていたでしょう。これは私たちが必要なものを正確にあたえてくれます。私たちの技術の全体的なモデリングによって、私たちのチームは、より簡単に設計の評価を行うことができます。COMSOL MultiphysicsとそのMEMSモジュールは、僅か1万4千ポンドにすぎないが、私たちにとって最良のソフトウェアです。」

## 要約

- ✓ Microvisk社は、抗血液凝固薬剤を使用している患者のために、健康管理および家庭用携帯型検査装置を開発している。
- ✓ これらの装置は、指に針を刺して得られた患者血液の1滴を使って、国際的に認められたプロトロンビン時間測定/国際標準比率検査を実施する。
- ✓ この装置は、ディスプレイと大型ボタンを使用する単純なもので、手の中で快適に操作でき、家庭用装置として適当なサイズである。
- ✓ Microvisk社の技術は、他社の装置とは異なるアプローチを採用しており、光学的分析または化学反応を利用したもので、現在、市場で実験を行っている。
- ✓ Microvisk社は、血液凝固を測定する小型カンチレバーを組み込んでいる使い捨て試験紙の上で微細電気機械センサー(MEMS)を使用している。
- ✓ この装置は少量の血液を使用するので、この検査は煩わしさがなく、検査室が不要である。
- ✓ プロトロンビン時間測定/国際標準比率検査は、血液凝固カスケードとして知られている反応を始めるために組織因子を取り入れることで、実施される。これは、血液を自由流動性溶液からゼラチン様物質に変化させる。センサーが検知し、測定するのは、この変化である。



## COMSOLはシェフの国際的料理コンテスト受賞に役立つ

DAGBJØRN SKIPNES (NOFIMA NORCONSERV AS)

**あ**らゆる料理人、それが専門家であれ、単なる趣味の料理人であれ、どれほどの時間で、何度で加熱すべきかを決定することの重要性を理解しています。これは調理不足・過剰を避けるだけではなく、料理は適切な温度でテーブルに出されるべきものです。また、私たちは、加熱するのを止めても、調理が続いていることも知っています。

ローストは多くの場合、肉を落ち着かせ、牛肉の中に肉汁をとどめるために、オーブンから出した後、15分以上そのままにしておきます。実際、完璧な料理を作ることは、いつも芸術であったけれど、それはまた多少なりとも科学でもあります。

これは、ノルウェーのシェフGunnar Hvarnes氏が見出したもので、彼は最近、オヒョウ料理で「料理のオリンピック」といわれるボキューズ・ドールで銀賞を受賞しました。大変興味深いことに、彼は最高傑作を準備するために、COMSOL Multiphysicsを使う事を決め、私たちに支援を求めたのです。



ノルウェー食品漁業農業研究所の試験用キッチンで受賞者Gunnar Hvarnesシェフ(左)と執筆者(右)

### 地元の食材の宣伝

ノルウェー技術センターが、国内および輸出市場のために、オヒョウ料理のプロジェクトを開始・設立したときに、このプロジェクトは始まりました。彼らは、ボキューズ・ドール料理コンテストに参加する料理人のスポンサーになること、そしてまた、より革新的で、味の良い料理をつくることを支援するために研究者、料理人、料理研究家の間で協力することは、良いアイデアであると考えました。この目的のために、彼らは、NOFIMA(ノルウェー食品漁業農業研究所)に協力を求めました。このNOFIMAは、ノルウェー漁業省が過半数株式を所有する研究グループで、約500名の従業員はノルウェーの水産養殖、漁業、食料に関する研究・開発を行っています。

Hvarnesシェフは、オヒョウ料理のアイデアに取り組んでいましたが、必ずしも満足

## 「私たちは、魚の中に熱電温度計を設置し、COMSOLモデルで予測した熱い部分と冷たい部分を確認しました。」

いく成果が得られませんでした。彼の特別な料理は、香辛料を混ぜてミンチにしたオヒョウ料理から始めています。オヒョウのフィレをミンチにしてロール状に巻き、この魚の巻物を特別なパン生地で包みます。彼は、いくつかの重要な要素(魚ロールの直径、パン生地の厚さ、揚げ油の温度、調理時間など)で実験を開始しました。

料理コンテストで彼は、審査員のテーブルに料理を運ぶ前の15分間、料理を温めておかなければなりません。その間に、副菜を準備し、皿の盛り付けを行いました。しかし、実際には、適切な時間に最適な温

度で、料理をどのように運ぶのかを判断する問題に直面していました。

偶然にも、私たちの施設には試験用キッチンがあり、そこでHvarnesシェフが仕事をしていました。そのキッチンは、私たちのオフィスのちょうど1階上にあつたので、彼は、私たちのオフィスに立ち寄り、魚ロールを調理する際に、その中で何が起きているのかを知りたいので、その支援ができないかどうか尋ねました。

### 中心に集まらない熱

このため、私たちは比較的簡単な2次元のCOMSOLモデルを設定しました。魚ロール

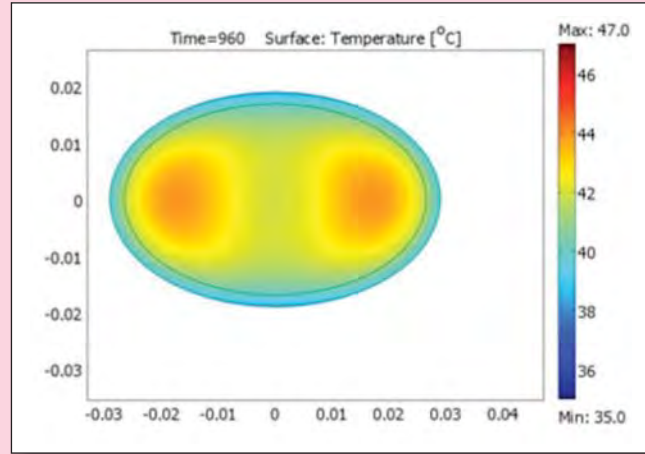


図1 Gunnar Hvarnesシェフが受賞したオヒョウ料理と調理中に現れる熱い部分を示すCOMSOLシミュレーション分析。  
(ノルウェー食品漁業農業研究所のTom Haga氏の拡大写真)

は円形ではなく、むしろ長円形であることに気づくことが大切です。私たちが発見したように、最も温かい部分は中心ではなく、むしろ冷めている間に外側に向かう2つの部分でした。

このように、中心の温度を計測し、誤ったデータを次の段階の基礎とすることは、引き続き、完全とはいえない結果をもたらします。モデルの研究結果に基づいて、私たちが行った最初のことは、魚の内部の最大温度を判定するために、温度計を設置する場所をシェフに示すことでした。また、私たちは、この魚をどれほどの時間、揚げ油の中に置くべきか、中心が最適な温度(48°C)に近づくにはどれくらいの時間がかかるか、この料理にまんべんなく熱がいきわたるには、どれくらいの時間それを冷ましておくか、これらの検証もおこないました。さらに、重要な要素は、パン生地が断熱効果として働き、私たちのシミュレーションでは、シェフの要望に応えるために、この生地の厚さをどのくらいにすべきかを示すことでした。

この純粋な対流過熱問題のために、私たちに必要だったのは、僅か2つのドメイン(魚と生地)だけでした。魚の繊維は非常に複雑な模様を形成しており、また、内部はミンチされた混合物になっていますが、魚の堅さは全体で一律であることを発見しました。

物質特性を判断するには、いくつかの検証が必要でした。私たちは、最初に魚の熱伝導率を見出すための測定を行い、示差走査熱量計でこの特定の熱容量も見つけ出しました。私は文献調査で、その密度に関する情報も探し出しました。

モデルの作成には数時間かかり、必要なパラメータを見出すには、1日~2日かかりました。そして、このモデルを検証するために、キッチンと実験室で約3日間を費やしました。私たちは、魚の内部に熱電温度計を設置し、COMSOLモデルで予測した熱い部分と冷たい部分を確認しました。

このモデルを作成したとき、Hvarnesシェフは、魚を調理する温度と、その食事を出すときの好ましい温度を、私たちに伝えました。

私たちは、いっしょに調理時間や調理温度とともに、魚ロールの最良の大きさ、生地の厚さを決定しました。COMSOLの支援を得て、シェフは、この料理を完成させた後で、2年に1回開催されているボキューズ・ドール料理コンテストに参加するため、昨年6月にスイスのジュネーブを訪れました。公共の場に作られた18㎡のコンテストキッチンでの調理では、20人のシェフが2種類の料理、一つはスイスの子牛を使った料理、もう一つはイギリス産のオヒョウを使った料理を、制限時間内に創作する課題に取り組みました。

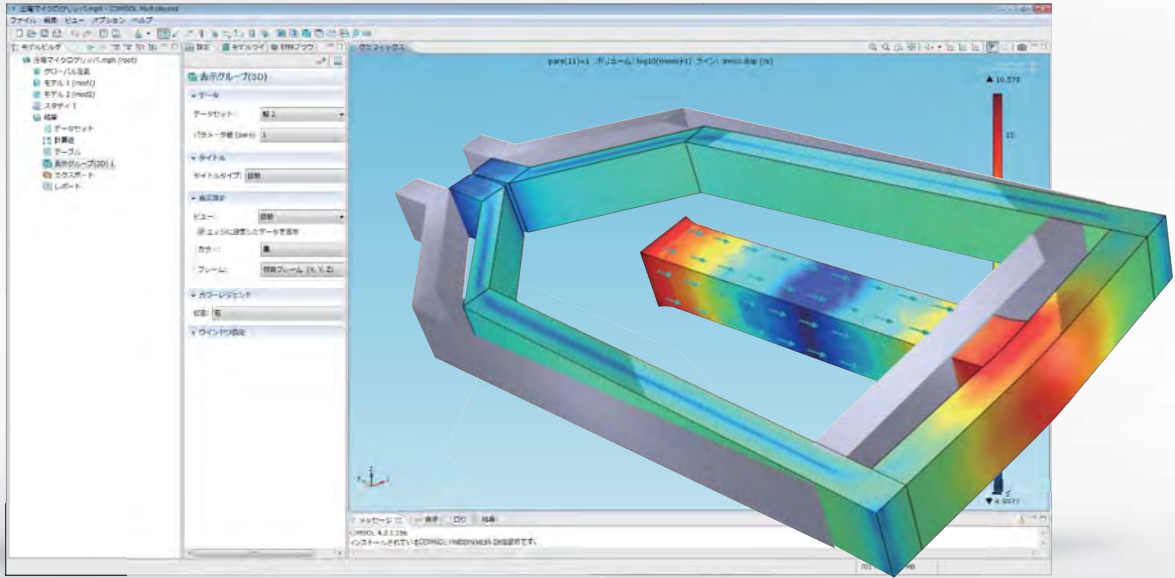
Hvarnesシェフは、COMSOLモデルから得られた知識を元にして料理を創作し、銀賞と賞金9千ユーロを獲得することができました。

## 執筆者について

Dagbjørn Skipnes氏は1993年1月からNofima Norconserv ASに勤務しています。彼は、トロンヘイムにあるノルウェー科学技術大学で理学修士を取得して卒業しました。その後、食品の熱加工分野および魚加工技術分野で働き、1997年から利便性の高い魚介製品の真空加工技術に重点を置いており、真空パックの魚加工企業Fjordkjøkken AS社の設立に関わりました。最近では、ノルウェー大学の生命科学で博士課程を修了しました。

### 圧電(ピエゾ)マイクログリッパ:

積層された圧電素子で構成されており、横方向の収縮と縦方向の伸長を同時に行うと、このマイクログリッパの先端を閉じることができます。図は、電流の方向とフォンミーゼス応力による変形を元の形状と比較したものです。



## ～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ください。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  
マイクロフルイディクスモジュール  
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 \*

##### 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

##### 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

##### インターフェース

CAD 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®

\*印は ver4.3 以降で使用可能

 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>

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

©2012 COMSOL. COMSOL, COMSOL Multiphysics and LiveLink are either registered trademarks or trademarks of COMSOL AB. AutoCAD and Inventor are registered trademarks of Autodesk, Inc., in the USA and other countries. LiveLink for AutoCAD and LiveLink for Inventor are not affiliated with, endorsed by, sponsored by, or supported by Autodesk, Inc., and/or its affiliates and/or subsidiaries. MATLAB is a registered trademark of The Mathworks, Inc. Pro/ENGINEER and Creo are trademarks or registered trademarks of Parametric Technology Corporation or its subsidiaries in the U.S. and in other countries. SolidWorks is a registered trademark of Dassault Systèmes SolidWorks Corp. CATIA is a registered trademark of Dassault Systèmes. SpaceClaim is a registered trademark of SpaceClaim Corporation.