

COMSOL Multiphysics[®] **ではじめる** **工学シミュレーション**

みずほ情報総研株式会社 【編】

佐久間 優 【編著】

高山 務

茂木 春樹 【共著】

飯屋 夏樹

コロナ社

執筆者一覧

さくま まさる
佐久間 優 (みずほ情報総研株式会社 サイエンスソリューション部)
担当箇所：1章, 2章, 3.1～3.5節, 4.1節, 4.3節, 4.4節

たかやま つとむ
高山 務 (みずほ情報総研株式会社 サイエンスソリューション部)
担当箇所：4.5節, 4.6節

もてぎ はるき
茂木 春樹 (みずほ情報総研株式会社 サイエンスソリューション部)
担当箇所：3.6節

かりや なつき
仮屋 夏樹 (みずほ情報総研株式会社 サイエンスソリューション部)
担当箇所：4.2節

(所属は初版第1刷当時)

推薦のことは

COMSOL Multiphysics[®]は、その名の通り、さまざまな物理現象をモデル化し、連成して現象を予測・可視化できるツールである。恐らく、そのことは、本書を手にとった読者はよくご存知のことと思う。モデルが単純で、支配方程式も少なければ、解析解により現象の予測や理解も可能であるが、現在の技術開発においては、そのような単純なものでは処理しきれない事象が多くなっている。

例えば、自分が手掛けている CVD (Chemical Vapor Deposition, 化学気相成長法) や ALD (Atomic Layer Deposition, 原子層成長) などのプロセス開発においても、COMSOL Multiphysics[®]によるシミュレーションや現象理解はきわめて有用である。これらのプロセスは、半導体集積回路 (ULSI) 製造工程において、半導体、絶縁体や金属薄膜を平坦な基板上や数十 nm 幅の隙間・細溝に均一に形成することができるため、最先端デバイスの製造に不可欠な技術となっている。また、ULSI の製造歩留りを高いレベルで確保するには、直径 300 mm (近い将来には 450 mm) のシリコンウェハ上で、このような極薄膜を $\pm 0.1\%$ 以内の均一性で作製する必要がある。そのためには、薄膜が形成される化学反応のメカニズムと、拡散や流れによる物質移動を連成してシミュレーションすることが、プロセス開発手段として有用となる。このようなモデル立案、それに基づくシミュレーションによる予測、実験との比較を繰り返し、効率良く帰納的に現象の理解を深めれば、試行錯誤的な装置・プロセス開発と比較して、大幅にコストを削減することが可能となる。

以前は風洞内で実物大の模型を用いて行っていた自動車の流体抵抗低減なども、CFD の導入によりかなりの部分が CAE 化されていると聞く。近い将来に実現されるエクサスケールコンピューティングでは、さらに大規模、複雑形状の計算も容易となり、CAE の有用性は飛躍的に高まることを見込まれる。COMSOL Multiphysics[®]は、そのような時代の必須ツールとして活用されるであろう。

しかし、COMSOL Multiphysics[®]はその習得が容易ではないことも事実である。汎用的であるが故に、このソフトウェアで何ができるのかを俯瞰するのは難しい。例えば、表計算ソフトの使い方を習得した際、最初はきわめて基本的なことから始めて、必要に応じてより高度な機能を習得したように、最初の導入障壁を下げて、ステップアップする手段が必要となってくる。本書はまさにそのような目的に適った入門書として最適ではないだろうか。みずほ情報総研株式会社の皆様のご経験を基に、短期間に COMSOL Multiphysics[®]に習熟できるように工夫されており、学生や技術者をはじめ、多くの皆様の指南書としてお勧めする。

2017年1月

東京大学大学院工学系研究科マテリアル工学専攻 教授 霜垣幸浩

はじめに

コンピュータ上で仮想的にモノをつくり、シミュレーション技術を活かして製品の設計や製造の事前検討支援を行う **CAE** (computer aided engineering) は、その重要性がますます増している。CAE は当初、自動車産業や航空宇宙産業などの大規模で試作や実験を行うことが困難な製品から適用が始まり、その後ソフトウェア、ハードウェアの性能向上や低価格化に伴い、現在では多くの製造業で欠かせないツールとなっている。また、活用当初は構造解析や流体解析といった単一現象の解析に特化した取組みだったが、実現象や現実の製品開発で遭遇する問題は、構造や流体だけといった特定の分野に閉じたものであるとは限らず、電磁場や光、音響などのさまざまな現象の影響を受けていることから、複数の物理現象を同時に取り扱う枠組み (マルチフィジックス) が近年特に注目されている。

本書で紹介する COMSOL Multiphysics[®] は、スウェーデンの COMSOL AB 社により開発された、マルチフィジックス解析を前提として設計されている有限要素法ベースの汎用工学シミュレーションソフトウェアである。COMSOL Multiphysics[®] の最大の特徴は、「**さまざまなプログラムやソフトウェア間でデータを行き来させることなく、一つのソフトウェア上で実現象と同等のマルチフィジックス解析が迅速かつ容易に可能**」なことである。また、通常ソフトウェアの内部、特に数理モデルの部分はブラックボックス化されていることが常であるが、COMSOL Multiphysics[®] では物理モデルや方程式などの内部情報を編集することもでき、この高いオープン性も大きな特徴の一つとなっている。これらの機能を用いることによって実現象に則した高精度のシミュレーションが再現できるため、設計・開発現場で活用できれば強力な設計支援ツールとなる。

著者らが所属しているみずほ情報総研株式会社では、COMSOL Multiphysics[®] の販売、保守、および解析コンサルティングサービスを提供している。したがって、著者らはユーザーとして COMSOL Multiphysics[®] を活用しているが、その経験から COMSOL Multiphysics[®] による解析モデル作成には、COMSOL Multiphysics[®] の操作に関する知識とともに形状作成やメッシュ生成を含むモデル作成のプランニング力が必要であると言える。これらの力を身につけるためには、数多くのモデル作成を経験することが一番の近道であるが、モデル作成の手助けとなるはずのマニュアルは膨大な量であると同時にすべて英語で記述されている (2016 年 12 月現在) ことから、習熟には多大な労力を要してしまう。実際に、さまざまな企業の COMSOL Multiphysics[®] ユーザーからも「日本語で記述されたマニュアルはないのか」、「ま

とまった解説資料はないのか」といった問い合わせを多数受けており、これらの要望を受けて本書を執筆するに至っている。

前述したように、CAE がより身近になった昨今では、解析専任者ではない、たとえば設計・開発部門の担当者が解析を担当することも考えられる。また、近年は大学などで学生が数値シミュレーションを学ぶうえでも、COMSOL Multiphysics[®]のような汎用シミュレータを利用する機会が増えている。本書は、このような解析や数値計算を専門としない企業のユーザーや、数値計算を学び始める学生でも COMSOL Multiphysics[®]を容易に利用できるようにするための支援を目的としている。例題によるチュートリアルや個別の機能説明はもちろんのこと、著者らも COMSOL Multiphysics[®]のユーザーであることから、ユーザー目線を重視したノウハウやテクニックを交えて COMSOL Multiphysics[®]を紹介している。本書が読者諸氏の COMSOL Multiphysics[®]活用の一助となれば幸いである。

本書は全部で4章の構成となっている。まず、第1章では本書の狙いとともに本書の利用手順を示したため、まずはこの第1章を読んで本書の利用方法を検討してもらいたい。次に、第2章では COMSOL Multiphysics[®]の特徴と基本機能を解説する。第3章では複数の例題を取り上げ、チュートリアル形式で COMSOL Multiphysics[®]における解析モデル作成方法から計算の実行、結果の分析方法までの一連の手順を説明する。最後に、第4章では第3章のチュートリアルで使用された機能を中心に、個別機能の使用方法を説明する。本書で書ききれなかった内容の一部は、みずほ情報総研の Web ページ^{†1}に記載するので、興味があれば参照いただきたい。また、本書では COMSOL 社が提供するアプリケーションギャラリーの結果例を引用させていただいており、ここに記して感謝したい。なお、COMSOL 社ではすべての機能を評価することが可能な無料トライアルライセンス（有効期間 30 日）を発行している。無料トライアルライセンスの発行方法に関しては、次ページの「COMSOL Multiphysics[®]の利用について」を参照していただきたい。おわりに、本書の出版に際しては COMSOL 社および計測エンジニアリングシステム株式会社には多大なご便宜をいただいております。各社に感謝の意を表したい。

2017年1月

著者一同

†1 <http://www.mizuho-ir.co.jp/solution/research/digital/manufacture/comsol/index.html>
(本書に記載された URL はすべて 2017 年 1 月現在です)

COMSOL Multiphysics®の利用について

「トライアルライセンス」の取得

本書は、例題によるチュートリアル形式の解析モデル作成方法の解説を中心に構成されており、ユーザーが COMSOL Multiphysics®を使用できる環境にあることを想定していますが、COMSOL Multiphysics®のライセンスを保有していないユーザーにおいても、無料トライアルライセンスを取得することによって COMSOL Multiphysics®を試用することが可能です。このトライアルライセンスは有効期間が30日ではありますが、オプションモジュールを含むすべての機能を利用することができるため、COMSOL Multiphysics®の性能や使い勝手の確認には非常に有用なライセンスとなっています。トライアルライセンスの取得、およびソフトウェアに関しては下記にお問い合わせください。

【トライアルライセンスおよびソフトウェアに関するお問い合わせ先】

■ 国内代理店

みずほ情報総研株式会社 サイエンスソリューション部

〒101-8443 東京都千代田区神田錦町 2-3 竹橋スクエアビル 8F

TEL. (03)5281-5311 FAX. (03)5281-5331

<http://www.mizuho-ir.co.jp/solution/research/digital/manufacture/comsol/index.html>

【ソフトウェアに関するお問い合わせ先】

■ 国内総代理店

計測エンジニアリングシステム株式会社

〒101-0047 東京都千代田区神田 1-9-5 井門内神田ビル

TEL. (03)5282-7040 FAX. (03)5282-0808

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

■ 開発元

COMSOL, Inc.

100 District Avenue, Burlington, MA 01803, USA

TEL. +1-781-273-3322 FAX. +1-781-273-6603

<https://www.comsol.jp/>

(2017年1月現在)

推奨環境

COMSOL Multiphysics®を使用するうえでの推奨環境を記載します。なお、下記ではPC環境の主要項目のみを記載していますので、その他の項目も含めた詳細情報に関しては http://www.kesco.co.jp/comsol/system_r.html を参照ください。

項目	推奨環境
OS	Windows® 10/Windows® 8.1/Windows® 8/Windows® 7/Windows® Vista/Windows Server® 2012 R2/Windows Server® 2012/Windows Server® 2008 R2/Windows Server® 2008/Windows HPC Server® 2008 R2/Windows HPC Server® 2008 (Linux, Mac OSでも稼働するが、本書ではWindows環境で利用することを想定、いずれも64bit環境のみ対応)
CPU	Intel Pentium IV以降、またはAMD Athlon XP processor以降 複数コアの搭載を推奨 (ハイパースレッティング機能は利用不可)
メモリ	実数コア数×4 GB、またはそれ以上のメモリ搭載を推奨
ハードディスク	ソフトウェアのインストール領域として、5 GBまたはそれ以上の空き容量
グラフィックス	OpenGL 2.0以降、またはDirectX 9.0以降 (3Dグラフィックス表示のために必要)
アプリケーション	Adobe Acrobat Reader 9.0またはそれ以降のインストールを推奨 (マニュアルなどのPDFドキュメントを見る際に必要)

本書を発行するにあたって、記載内容に誤りがないように可能な限り注意を払いましたが、本書の内容を適用した結果生じたこと、また、適用できなかったことに関して、著者、出版社とも一切の責任は負いませんのでご了承ください。

COMSOL, COMSOL Multiphysics, COMSOL Desktop, および Livelink は COMSOL AB の商標または登録商標です。その他の製品名, サービス名, 組織名は, 各組織の商標または登録商標です。なお, 本文中に™, ® マークは明記しておりません。

目 次

第 1 章 本書でわかること

第 2 章 COMSOL Multiphysics とは

2.1	COMSOL Multiphysics の特徴を知ろう	6
2.2	COMSOL Multiphysics を使ってみよう	10
2.2.1	COMSOL Multiphysics の起動方法と初期設定について	10
2.2.2	COMSOL Desktop の基本操作	11

第 3 章 COMSOL Multiphysics を用いた解析事例集

3.1	熱伝導解析—圧縮成形時の金型加熱を評価	18
3.2	気液 2 相流解析—スロッシング現象の再現	28
3.3	電磁波解析—波動光学を用いた有機 EL 内部の光伝搬を再現	41
3.4	流体・構造連成解析—人工弁の開閉問題の再現	64
3.5	電気化学解析 ①—電気めっきによるバンプ内の膜成長を予測	77
3.6	電気化学解析 ②—蓄電池の発熱特性を評価	87

第 4 章 さまざまな機能の使い方

4.1	さまざまな機能の定義方法	111
4.1.1	パラメーターの定義方法	115
4.1.2	変数の定義方法	116
4.1.3	関数の設定方法	116
4.1.4	プローブの設定方法	121
4.1.5	コンポーネントカップリングの設定方法	122
4.1.6	選択の作成方法	124
4.1.7	無限領域の設定方法	126

4.2 形状モデルの作成方法	127
4.2.1 共通機能	132
4.2.2 ジオメトリの作成機能	133
4.2.3 仮想操作機能	151
4.2.4 ジオメトリのインポート/エクスポート機能	152
4.2.5 計測機能	153
4.3 材料設定の方法	155
4.3.1 材料データの設定	155
4.3.2 ユーザー定義材料の作成	158
4.3.3 材料リンク機能の設定	158
4.3.4 材料データの利用に関して	159
4.4 メッシュ生成の方法	160
4.4.1 共通機能	161
4.4.2 メッシュ生成機能	163
4.4.3 その他機能	176
4.4.4 メッシュのインポート/エクスポート機能	178
4.4.5 メッシュサイズのコントロール方法	179
4.5 解析の実行方法	182
4.5.1 スタディノードの構成	183
4.5.2 スタディステップ	184
4.5.3 スイープ計算	189
4.5.4 ソルバーコンフィギュレーション	191
4.5.5 ソルバーの動作確認	200
4.6 計算結果の分析方法	205
4.6.1 データセット	208
4.6.2 計算値	212
4.6.3 テーブル設定	215
4.6.4 3D/2Dプロットグループ	216
4.6.5 1Dプロットグループ	225
参考文献	236
索引	237

1

本書でわかること

本書は、COMSOL Multiphysics の特徴から基本的な機能説明、チュートリアルによる解析モデル作成方法を記した日本語版解説書である。本書の最大の狙いは、初学者を含めた一般ユーザーが容易に COMSOL Multiphysics を習熟するための支援をすることである。

COMSOL Multiphysics は多彩な機能を有しているため、付属されるマニュアルは膨大であり、すべてを理解することは非常に困難である。また、すべてのマニュアルが英語によって記述されていることも、日本のユーザーにとって大きな障害となっている。これらの理由から、本書では著者らが学んだテクニックやノウハウを交えつつ、実際に COMSOL Multiphysics を利用する際に即戦力として使える機能を抽出し、日本語でまとめている。また、ジオメトリの作成、物理条件の設定、メッシュ生成、計算の実行、結果の分析といった解析モデル作成の一連の手順（図 1.1）を、図を用いながらわかりやすく読み進められるように心がけた。

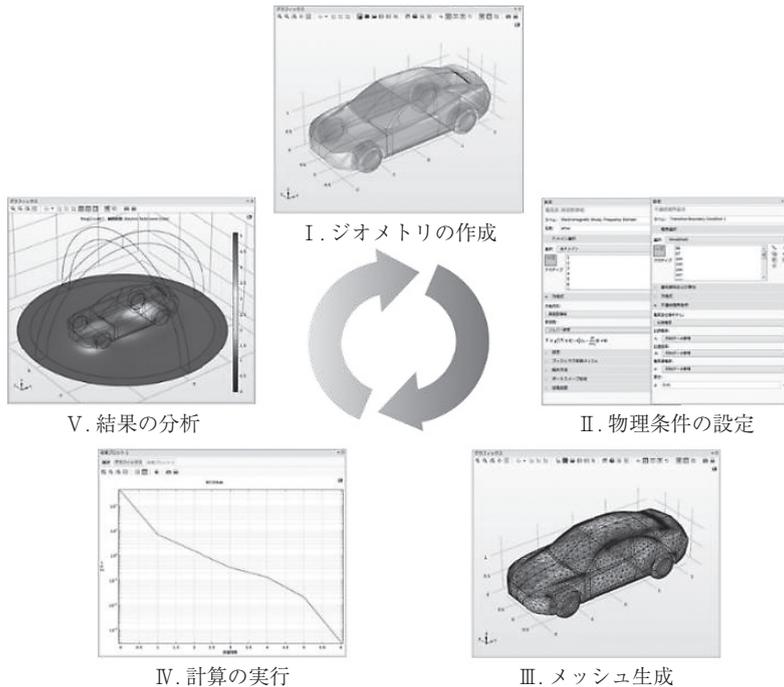


図 1.1 COMSOL Multiphysics による解析作業イメージ

2 1. 本書でわかること

本書は4章で構成されており、各章で記述されている内容は以下のとおりである。

- ・第1章：本書の狙いと利用手順を記述
- ・第2章：COMSOL Multiphysics の特徴と、すべてに共通した基本機能の説明を記述
- ・第3章：例題によるチュートリアル形式の解析モデル作成方法を記述
- ・第4章：機能の定義、形状作成、メッシュ生成などの個別機能の詳細説明を記述

第2章から第4章の各節の概要を以下に示すので、学習するうえで参考にしてもらいたい。

第2章 COMSOL Multiphysics とは

■ 2.1 COMSOL Multiphysics の特徴を知ろう

キーワード：マルチフィジックス、オプションモジュール、PDE モード

COMSOL Multiphysics には、複数のマルチフィジックス解析に対応した基本機能、専門分野に特化したオプションモジュール、そして任意の物理現象に対応した PDE（偏微分方程式）モードといった大きく三つの特徴がある。この節では、これらの特徴の詳細を記述する。

■ 2.2 COMSOL Multiphysics を使ってみよう

キーワード：COMSOL Desktop、起動、日本語環境、モデルビルダ、カスタマイズ

この節では、COMSOL Multiphysics の起動方法と、COMSOL Multiphysics を使用するうえで知っておくべき共通の機能を説明している。共通機能の説明に関しては、解析モデル作成のプラットフォームである COMSOL Desktop の説明に重点を置いている。

第3章 COMSOL Multiphysics を用いた解析事例集

■ 3.1 熱伝導解析—圧縮成形時の金型加熱を評価

キーワード：熱伝導、温度分布、プローブ設定

この節では、熱硬化性樹脂の板を圧縮成形するときの金型加熱の3次元解析事例を紹介する。本事例では、伝熱（固体）インターフェースを用いた熱伝導解析において、3次元形状の作成や物理条件の設定方法、可視化方法など、基本機能の利用方法を中心に解説する。

■ 3.2 気液2相流解析—スロッシング現象の再現

キーワード：スロッシング、横揺れ振動、2相層流、メッシュサイズ制御

この節では、液体を充填したタンクに振動が加わることで発生する液面揺動現象（スロッシング現象）の2次元解析事例を紹介する。本事例では、2相層流（レベルセット）インターフェースを用いて、タンクに一定周期の横揺れ振動を加えた場合の気液2相流時間依存問題の解析を実施する。横揺れ振動の関数定義やメッシュ制御を想定したジオメトリ作成などの基本操作から、揺動する液面最大値時刻歴を評価するといった応用的な操作方法も示す。

■ 3.3 電磁波解析—波動光学を用いた有機 EL 内部の光伝搬を再現

キーワード：有機 EL，光伝搬，PML 吸収境界，データマッピング，パラメトリックスイープ

この節では、有機 EL の典型的な多層構造内における光伝搬の 2 次元解析事例を紹介する。本事例では、電磁波（周波数領域）インターフェースを用いて発光層から発生した光が多層構造内を伝搬する様子を解析し、微細構造の有無による外部への光取出し効率の差異を評価する。積分操作や選択操作、二つのモデル間での計算結果のマッピングといった事前定義の方法に加え、パラメータスタディを自動で実行するパラメトリックスイープの設定方法について説明する。また、開放領域問題を有限領域問題とみなして解析するために必要な PML 境界（吸収境界条件）の設定方法を示す。

■ 3.4 流体・構造連成解析—人工弁の開閉問題の再現

キーワード：弁の開閉，流体-構造連成，ALE，移動境界，メッシュのスライディング

この節では、流体の力を受けてたわむ弁の開閉問題に対する 2 次元解析事例を紹介する。本事例では、流体-構造相互作用インターフェースに実装された ALE (arbitrary Lagrangian and Eularian method) による移動境界を用いて、時間変動する速度を有する流体から力を受けた弁の開閉問題を計算する。移動境界問題におけるメッシュ破綻に対して一般的に用いられるリメッシングの代わりに、本例題ではジオメトリの境界面をスライディングさせることによってメッシュ品質の低下を抑える手法を紹介する。

■ 3.5 電気化学解析①—電気めっきによるバンプ内の膜成長を予測

キーワード：めっき膜成長，電流密度分布，メッシュ変形，自動リメッシング

この節では、めっき加工処理の一つである電気めっき法によるバンプめっきの 3 次元解析事例を紹介する。本事例では、2 次元電流密度分布と変形ジオメトリのインターフェースを組み合わせて、めっき膜の成長を時間依存計算によって算出する。めっき膜成長とともに初期メッシュは歪んでいくが、それに対する自動リメッシング機能についての説明を述べる。

■ 3.6 電気化学解析②—蓄電池の発熱特性を評価

キーワード：リチウムイオン二次電池，異次元間のデータ授受，等価回路モデル

この節では、リチウムイオン二次電池（以下、LiB と略記）の解析事例を紹介する。LiB の解析では、目的に応じて適切なモデルを選択する必要がある。例えば、電池特性を考慮した熱解析を実形状で検討するためには、等価回路モデルを適用することが多い。一方で、実験では取得困難な内部状態の把握を行うためには、Newman の文献に代表される輸送と反

4 1. 本書でわかること

応の連成モデルを使用する必要がある。本事例では、前者の等価回路モデルについての解析事例を解説する。なお、このモデルでは異なる次元のモデルを同じコンポーネント上に構築しており、COMSOL Multiphysics ではこのようなモデリングも容易に構築できることを示す。

第4章 さまざまな機能の使い方

■ 4.1 さまざまな機能の定義方法

キーワード：グローバル定義，関数定義，選択の定義（グループ化）

この節では、グローバル定義ノードおよびコンポーネントノードにおける定義ノードの設定方法を示す。また、パラメーターや変数、関数の定義方法のほかに、プローブ設定やコンポーネントノード間の結果の受け渡しなどで利用するコンポーネントカップリングの説明を記述する。

■ 4.2 形状モデルの作成方法

キーワード：ジオメトリ作成，CAD インポート/エクスポート

この節では、COMSOL Multiphysics におけるジオメトリの作成や、外部 CAD データのインポート/エクスポートに利用する機能の説明を記述する。

■ 4.3 材料設定の方法

キーワード：材料ライブラリ，材料追加，新規材料の定義

この節では、材料設定の方法や使用できる材料種の概要について記述する。また、材料設定の方法に関しては、既存の材料の追加や新規材料の作成方法を説明する。

■ 4.4 メッシュ生成の方法

キーワード：自動/手動メッシュ生成，メッシュインポート/エクスポート

この節では、COMSOL Multiphysics でのメッシュ生成や、外部メッシュのインポート/エクスポートに利用する機能の説明を記述する。

■ 4.5 解析の実行方法

キーワード：計算実行手順，計算手法，直接/反復解法，強連成，分離解法，スイープ機能

この節では、計算の実行手順を設定するスタディ設定の利用方法を示す。主要な計算手法に関する説明や、一連の計算処理をパラメーター変更しながら順次実行するパラメトリックスイープなどの計算処理方法の設定手順を説明する。

■ 4.6 計算結果の分析方法

キーワード：可視化，3次元・2次元・1次元プロット，物理量算出

この節では，計算実結果の処理方法を示す。ベクトル表記やサーフェス処理，ライングラフなどの各次元で実行する可視化処理の説明を示すとともに，任意の領域における物理量の算出や積分値 / 平均値の算出といったデータ処理の方法を説明する。

最後に，本書の利用手順を示す。利用方法に関しては基本的に読者の自由であるが，参考までに著者の意図したことを示すので利用の参考にしてもらいたい。

まず，COMSOL Multiphysics を利用したことがない場合，または本書を初めて読む場合は，第2章においてCOMSOL Multiphysicsの特徴を理解してもらいたい。第2章では，COMSOL Multiphysicsにおける解析モデル作成の一連の作業を行うプラットフォーム，COMSOL Desktopの説明を記述しているため，第3章の例題や第4章の機能説明へ進む前に必ず目を通してもらいたい。一方で，すでにCOMSOL Multiphysicsに対して一定の理解があり，すでに利用されている読者は，第2章を読み飛ばしていただいてもかまわない。

次に，第3章ではチュートリアル形式で解析モデル作成手順を学んでもらう。この章では，解析モデル作成に関する基礎的な内容から応用的な内容までを順を追って解説しており，手順に従って操作を進めることによって基本的な内容を一通り学べるように記述してある。操作の中では，ジオメトリ作成やメッシュ生成，可視化の方法などの個別機能も数多く使用されているが，この章では実際の問題の中での活用方法のイメージをつかんでもらいたい。一方で，個別機能の詳細や，例題で使用された方法以外の使い方に関しては，第4章の機能説明を参考にしてもらいたい。例題に関しては，伝熱，流体，構造，電磁波，電気化学といった複数の分野の例題を用意してあるため，読者の興味がある分野から読み進めてもらってかまわない。

最後に，第4章に関しては，上述したように，解析モデル作成に必要な個別機能の詳細な使用方法を記述している。第3章で使用された機能からの参照以外にも，読者独自で解析モデルを作成するときに辞書のようなかたちで利用することもできる。また，この機能説明では，個別機能の通常的使用方法以外にも，著者らが実際に使用して学んだテクニックやノウハウを各所で記載してあるので，ぜひ参考にしてもらいたい。

COMSOL Multiphysicsには非常に多くの機能が備わっているため，本書においてすべての機能を網羅することは困難である。したがって，利用頻度の少ない機能や専門性の高い内容に関しては，COMSOL Multiphysicsのインストールによって閲覧が可能となるReference Manualや別途専門書を参照いただきたい。

索引

【あ】

アセンブリモデルを形成 133
圧力ポイント拘束 34

【い】

一体化モデルを形成 133
一般形式 PDE 88, 89
移動 (ジオメトリ作成) 130, 149
インポート (ジオメトリ作成)
..... 128, 152
インポート (メッシュ生成)
..... 161, 178

【え】

エクスポート (ジオメトリ作成)
..... 128, 153
エクスポート (メッシュ生成)
..... 161, 178
エッジ分割 (ジオメトリ作成)
..... 130, 147
エッジをコピー (メッシュ生成)
..... 162, 170
円 (ジオメトリ作成)
..... 30, 66, 129, 134
演算式構成 (ジオメトリ作成)
..... 30, 130, 146
円錐 (ジオメトリ作成)
..... 20, 129, 137
エンティティを削除 (ジオメトリ
作成) 67, 132
円筒 (ジオメトリ作成)
..... 79, 129, 137

【お】

押し出し (ジオメトリ作成)
..... 91, 92, 130, 141

【か】

開回路電圧 87, 109
解析的 (関数) 66, 112, 117
回転 (ジオメトリ作成) 130, 141
ガウスパルス (関数) 112, 119
化学量論係数 77, 81
価数 77
仮想操作 30, 31, 68, 131, 151

カットプレーン 26, 205, 209
カットポイント 85, 107, 205, 209

【き】

既定メッシュ変位 71
球 (ジオメトリ作成) 129, 138
境界層 (メッシュ生成) 162, 166
境界層特性 (メッシュ生成)
..... 162, 175
境界プローブ 96, 112
鏡面コピー (ジオメトリ作成)
..... 44, 67, 130, 149

【く】

矩形 (関数) 112, 119
矩形 (ジオメトリ作成)
..... 30, 43, 44, 45, 66, 67, 129, 135
屈折率 41, 51, 52, 54
区分 (関数) 112, 118
グラフィックスウィンドウ
..... 12, 14
グローバル定義
..... 15, 19, 29, 42, 65, 78, 89, 111
グローバル評価 38, 39, 61, 213

【け】

計算値 38, 61, 206, 212
形成 (仮想操作) 131, 151
計測 128, 153
結果 16, 205

【こ】

拘束条件 28, 34, 64
固定拘束 64, 70
コピー (ジオメトリ作成)
..... 20, 79, 130, 147
コピー (メッシュ生成) 73
コンター (プロット)
..... 26, 76, 84, 207, 224
コンポーネント 15, 111
コンポーネントカップリング
..... 31, 48, 50, 68, 113, 122

【さ】

差 (ジオメトリ作成) 130, 145
差 (選択) 113, 126

最小 113, 123
サイズ (メッシュ生成)
..... 24, 35, 36, 56, 72, 82, 162, 173
最大 31, 113, 123
細分化 (メッシュ生成) 162, 171
材料コンテンツ
..... 33, 51, 57, 69, 158, 159
材料追加 23, 32, 156
材料特性 158
材料リンク 52, 53, 156, 158
サーフェス (プロット) 25, 37,
60, 74, 105, 107, 207, 223
三角形 (関数) 112, 120
散乱境界条件 54

【し】

時間依存 25, 36, 73, 82, 104, 186
自動リメッシング 82, 83, 187
充電状態 87, 109
周波数領域 59, 187
重力 28, 34, 38
消衰係数 41
ジョブコンフィギュレーション
..... 184
進捗ウィンドウ 16

【す】

スイープ (メッシュ生成)
..... 101, 102, 103, 162, 164
スケール (ジオメトリ作成)
..... 130, 148
スタディ 15, 182, 183
スタディステップ 182, 184
ステップ (関数) 112, 120
すべりなし条件 64
スロッシング 2, 28
スロープ (関数) 112, 119

【せ】

正方形 (ジオメトリ作成)
..... 129, 135
積 (ジオメトリ作成) 130, 145
積 (選択) 113, 125
積分 48, 50, 68, 113, 123
線形押し出し 49, 113, 122
線形弾性材料 70

線分 (ジオメトリ作成) … 129, 133

【そ】

層流 … 29, 33
層流入 … 70
ソルバーコンフィギュレーション … 183, 191

【た】

体積分率 … 32, 37, 38
体積力 … 28, 34
楕円 (ジオメトリ作成) … 129, 134
楕円体 (ジオメトリ作成) … 130, 141
断面 (ジオメトリ作成) … 130, 145
断面 (プロット) … 26, 83, 84, 106, 207, 223

【ち】

長周期振動 … 28

【て】

定常 … 185
ディリクレ境界条件 … 98
転換 (メッシュ生成) … 162, 172
データセット … 25, 26, 85, 106, 205, 208
テーブル … 39, 61, 62, 206, 215
テーブルグラフ … 26, 39, 62, 207, 233
電解質電位 … 77, 80, 83
電気めっき … 3, 77
電極表面 … 80
電磁波 (周波数領域) … 42, 54
電磁波解析 … 3, 41
伝熱 (固体) … 19, 23

【と】

等価回路モデル … 87, 109, 236
統計 (メッシュ生成) … 161, 177
等値面 (プロット) … 207, 224
導電率 … 77, 80
ドメインプローブ … 112, 121
ドメイン分割 (ジオメトリ作成) … 130, 146
ドメインポイントプローブ … 22, 112, 122
ドメインをコピー (メッシュ生成) … 162, 169
トラス (ジオメトリ作成) … 129, 139

【ぬ】

ぬれ壁 … 28, 33

【ね】

熱源 … 18, 24
熱伝達係数 … 18, 23
熱伝導解析 … 2, 18
粘性係数 … 28, 33, 64, 69

【は】

配列 (ジオメトリ作成) … 21, 44, 130, 149
波動形式 (関数) … 29, 65, 112, 120
パラメーター … 19, 29, 42, 43, 65, 78, 89, 111, 115
パラメトリックスイープ … 36, 48, 58, 59, 183, 189

【ひ】

光取出し効率 … 3, 41
否定 … 32
非変形境界 … 81
表式置換 … 25, 37, 38, 61, 74, 76, 84
表面張力係数 … 28, 33
ピラミッド (ジオメトリ作成) … 129, 140

【ふ】

ファイルメニュー … 10, 12, 13
フィジックスインターフェース … 19, 29, 42, 65, 78, 88
フィレット (ジオメトリ作成) … 67, 132, 150
フェースをコピー (メッシュ生成) … 162, 169
フォン・ミーゼス応力 … 76
ブランクモデル … 11
ブランク材料 … 32, 51, 69, 156, 158
フリーメッシュ3角形 (メッシュ生成) … 35, 56, 72, 162, 166
フリーメッシュ4辺形 (メッシュ生成) … 162, 167
フリーメッシュ4面体 (メッシュ生成) … 24, 82, 162, 163
ブロック (ジオメトリ作成) … 19, 20, 21, 79, 90, 129, 136
プロットグループ … 206, 207, 216, 217, 225, 226
分割フェース (ジオメトリ作成) … 130, 147
分布 (メッシュ生成) - 57, 58, 100, 101, 102, 103, 162, 174

【へ】

平均 … 113, 123

ベジエ多角形 (ジオメトリ作成) … 67, 129, 136
変形 (プロット) … 225
変形ジオメトリ … 78, 80
変形電極 … 81
偏心円錐 (ジオメトリ作成) … 130, 140
変数 … 31, 49, 50, 94, 95, 96, 111, 116

【ほ】

ポアソン比 … 64, 69
ポイント (ジオメトリ作成) … 129, 133
ポイントグラフ … 85, 86, 105, 108, 207, 232
ポイントプローブ式 … 22, 122
補間 (関数) … 89, 112, 117
補集合 (選択) … 22, 46, 113, 126
保存型流束 … 97, 98, 99
ボックス (選択) … 46, 93, 113, 125
ボリューム (プロット) … 206, 220

【ま】

マップト (メッシュ生成) … 57, 58, 100, 101, 162, 168
マルチフィジックス … 29, 78, 80

【み】

密度 … 28, 33, 64, 69

【む】

無視 (仮想操作) … 68, 131, 151

【め】

明示的 (選択) … 21, 47, 92, 113, 124
メッシュコントロール (仮想操作) … 31, 131, 152, 179
メッセージウィンドウ … 16
面取り (ジオメトリ作成) … 132, 150

【も】

モデルウィザード … 11
モデルビルダ … 12, 14
モル質量 … 77, 81

【や】

矢印 (プロット) … 38, 75, 84, 207, 222
ヤング率 … 64, 69, 202

【ゆ】

- ユーザー定義特性グループ
 156, 158
 ユーザー定義ライブラリに追加
 156, 158

【ら】

- ライングラフ 207, 229
 らせん (ジオメトリ作成)
 129, 139
 乱数 (関数) 112, 120

【り】

- リチウムイオン二次電池 3, 87
 リボンタブ 12, 13

- リボンツールバー 12, 13
 流出口 70
 流線 (プロット) 74, 207
 流束/ソース 97, 98, 99
 流体-構造相互作用 65, 70
 流体・構造連成解析 3, 64
 隣接 (選択) 22, 113, 126

【れ】

- レジスト 77
 レベルセット 29, 33

【ろ】

- ログウィンドウ 16
 論理積 32
 論理和 32

【わ】

- 和 (ジオメトリ作成)
 66, 79, 130, 145
 和 (選択) 113, 125
 ワークプレーン (ジオメトリ作
 成) 130, 143

【数字】

- 2次電流密度分布 78, 80
 2相流解析 2, 28
 4面体 (ジオメトリ作成)
 129, 138
 6面体 (ジオメトリ作成)
 129, 139

COMSOL Multiphysics® で始める工学シミュレーション

Introduction to Engineering Simulation with COMSOL Multiphysics®

© Mizuho Information & Research Institute, Inc. 2017

2017年3月23日 初版第1刷発行



検印省略

編者 みずほ情報総研株式会社

編著者 佐久間 優

著者 高山 務

茂木 春樹

仮屋 夏樹

発行者 株式会社 コロナ社

代表者 牛来真也

印刷所 新日本印刷株式会社

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替 00140-8-14844・電話 (03) 3941-3131 (代)

ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-02868-3 (柏原) (製本：愛千製本所)

Printed in Japan



本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられております。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めておりません。

落丁・乱丁本はお取替えいたします