



# COMSOL Multiphysics

イントロダクション

## COMSOL Multiphysics とは

© 1998–2019 COMSOL

[www.comsol.com/patents](http://www.comsol.com/patents) に列記された米国特許、並びに米国特許第 7,519,518 号、第 7,596,474 号、第 7,623,991 号、第 8,457,932 号、第 8,626,475 号、第 8,949,089 号、第 8,954,302 号、第 9,098,106 号、第 9,146,652 号、第 9,208,270 号、第 9,323,503 号、第 9,372,673 号、及び第 9,454,625 号により保護されています。特許出願係属中。

本文書及び本文書に記載される本プログラムは、COMSOL ソフトウェア使用許諾契約 ([www.comsol.com/comsol-license-agreement](http://www.comsol.com/comsol-license-agreement)) に基づき提供され、本使用許諾契約の条項に基づいてのみ、使用又は複製することができます。

COMSOL、COMSOL ロゴ、COMSOL Multiphysics、Capture the Concept、COMSOL Desktop、LiveLink、COMSOL Server、COMSOL Compiler は、COMSOL AB の登録商標又は商標です。その他全ての商標は、それぞれの権利者の所有物であり、COMSOL AB 並びに同社の子会社及び製品は、かかる権利者又は上記した COMSOL 以外の商標権者と関連しておらず、これらによる承認を受けておらず、これらによる資金提供を受けておらず、これらによる支援も受けておりません。かかる商標権者の一覧は、[www.comsol.com/trademarks](http://www.comsol.com/trademarks) でご覧頂けます。

バージョン： COMSOL 5.5

## 連絡先情報

一般のお問い合わせについては、COMSOL 連絡窓口ページ([www.comsol.com/contact](http://www.comsol.com/contact)) をご覧ください。住所、電話番号については、テクニカルサポートにお問い合わせください。住所、連絡方法については、ワールドワイドセールスオフィスのページ ([www.comsol.com/contact/offices](http://www.comsol.com/contact/offices)) をご覧ください。

サポートのお問い合わせについては、[www.comsol.jp/support/case](http://www.comsol.jp/support/case) の COMSOL Access ページにオンライン請求フォームがあります。他の役に立つリンク先は以下の通りです：

- サポートセンター：[www.comsol.com/support](http://www.comsol.com/support)
- 製品ダウンロード：[www.comsol.com/product-download](http://www.comsol.com/product-download)
- 製品アップデート：[www.comsol.com/support/updates](http://www.comsol.com/support/updates)
- COMSOL ブログ：[www.comsol.com/blogs](http://www.comsol.com/blogs)
- ディスカッション フォーラム：[www.comsol.com/community](http://www.comsol.com/community)
- イベント：[www.comsol.com/events](http://www.comsol.com/events)
- COMSOL ビデオギャラリー：[www.comsol.com/video](http://www.comsol.com/video)
- サポート ナレッジベース：[www.comsol.com/support/knowledgebase](http://www.comsol.com/support/knowledgebase)

パーツ番号： CM010004

## 目次

---

はじめに .....	5
COMSOL Desktop® .....	6
例 1 : レンチの構造解析 .....	31
モデルウィザード .....	31
ジオメトリ .....	33
材料 .....	36
グローバル定義 .....	37
フィジックスと境界条件 .....	39
メッシュ .....	42
スタディ .....	43
結果 .....	43
収束解析 .....	46
例 2 : バスバー — マルチフィジックスモデル .....	53
モデルウィザード .....	55
グローバル定義 .....	57
オートコンプリートとパラメータと変数の検索 .....	58
ジオメトリ .....	60
材料 .....	63
フィジックスと境界条件 .....	68
メッシュ .....	75
スタディ .....	76

結果.....	77
アプリケーションの構築.....	86
上級トピック.....	97
パラメーター, 関数, 変数, 連成.....	97
材料プロパティと材料ライブラリ.....	100
メッシュの追加.....	103
フィジックスの追加.....	105
パラメトリックスイープ.....	127
パラレルコンピューティング.....	141
COMSOL Multiphysics Client-Server.....	144
付録 A — ジオメトリの構築.....	146
付録 B — キーボードとマウスショートカット.....	161
付録 C — 言語要素と予約名.....	165
付録 D — ファイル形式.....	178
付録 E — LiveLink™ アドオンとの接続.....	184

## はじめに

---

初めて COMSOL Multiphysics® をご利用になる方は、本書をお読みください。本書では、COMSOL® 環境の概要を、COMSOL Desktop® ユーザーインターフェースとモデルビルダーの使用方法を示す例とともに解説します。また、アプリケーションビルダーによるアプリケーションの作成方法も簡単に紹介します。

本ソフトウェアをまだインストールしていない方は、[www.comsol.com/product-download](http://www.comsol.com/product-download) の説明に従ってインストールしてください。

本書の他にも、インストール後には、さまざまなドキュメントセットを利用できます。[www.comsol.com/videos](http://www.comsol.com/videos) のビデオギャラリー、[www.comsol.com/blogs](http://www.comsol.com/blogs) の COMSOL ブログなど、COMSOL Web サイトでチュートリアルを提供しています。

本書は COMSOL Multiphysics® ソフトウェア、バージョン 5.2a のために作られましたが、バージョン 5.3 および 5.3a にもお使いいただけます。

# COMSOL Desktop®

クイックアクセスツールバー — これらのボタンは、ファイルを開く / 保存、取り消し / やり直し、コピー / 貼り付け、削除などの機能呼び出すときに使用します。

アプリケーションビルダー — このボタンをクリックすると、アプリケーションビルダーに切り替わり、ユーザーのモデルからアプリケーション構築を開始できます。

モデルビルダー ツールバー

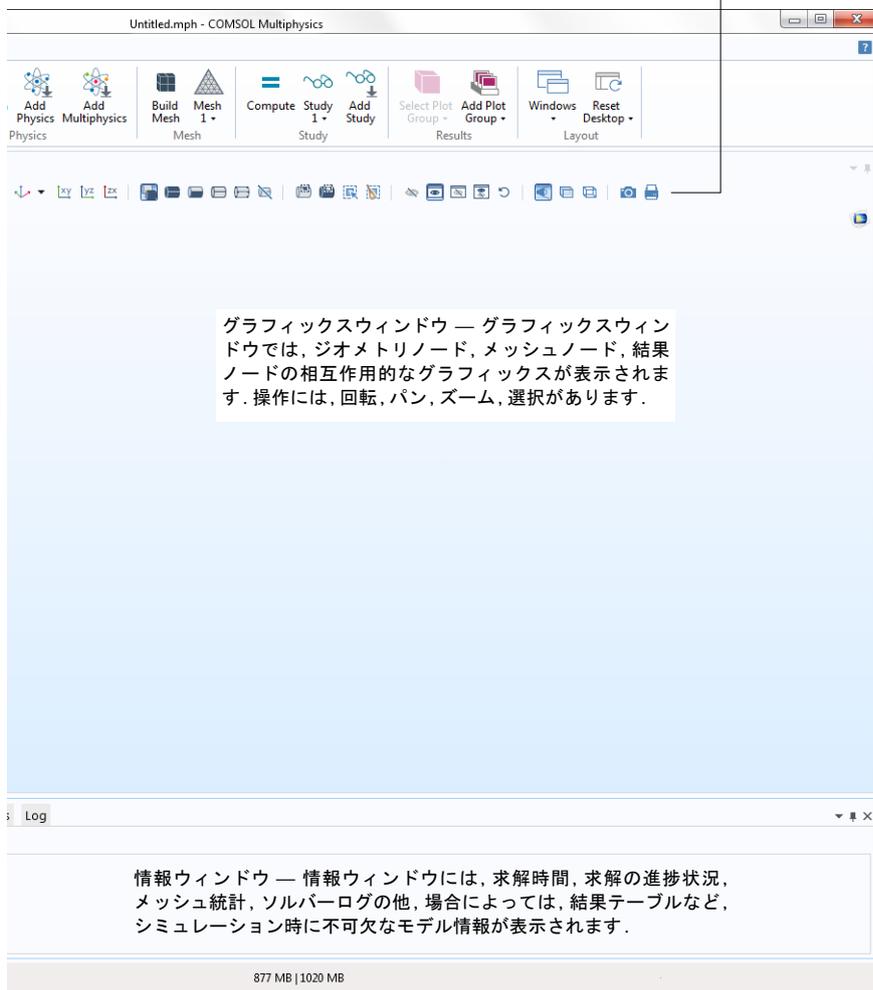
モデルツリー — モデルツリーにはモデルの概要の他、モデルの構築と求解、結果処理に必要な機能や操作が示されます。

モデルビルダー — モデルビルダーウィンドウと、そのモデルツリーおよび関連ツールバーボタンで、モデルの概要を知ることができます。モデリングプロセスは、ノードを右クリックしてアクセスするコンテキスト対応のメニューから制御できます。

リボン — リボンタブには、モデリングプロセスのステップを制御するボタンとドロップダウンリストがあります。

設定ウィンドウ — モデルツリーの任意のノードをクリックすると、モデルビルダーの横にそのノード関連の設定ウィンドウが表示されます。

## グラフィックスウィンドウツールバー



前ページのスクリーンショットは、モデルビルダーを使いCOMSOL Multiphysics で初めてモデリングを開始したときに表示される画面です。COMSOL Desktop® ユーザーインターフェースには、物理モデリング、シミュレーション、そしてアプリケーション設計一式の統合環境が備わっており、モデル用に使いやすいインターフェースを構築するために必要なツールがあります。デスクトップは、ユーザーそれぞれのニーズに合わせてカスタマイズできます。ウィンドウは、サイズ変更、移動、ドッキング、切り離しが可能です。レイアウトを変更すると、セッションの終了時に保存され、次回にCOMSOL Multiphysics を開いたときに利用できます。モデルを構築するとき、さらに追加のウィンドウとウィジェットが表示されます。(さらに進んだデスクトップの例については、25 ページを参照してください。)利用できるウィンドウとユーザーインターフェースコンポーネントは以下のとおりです：

### クイックアクセスツールバー

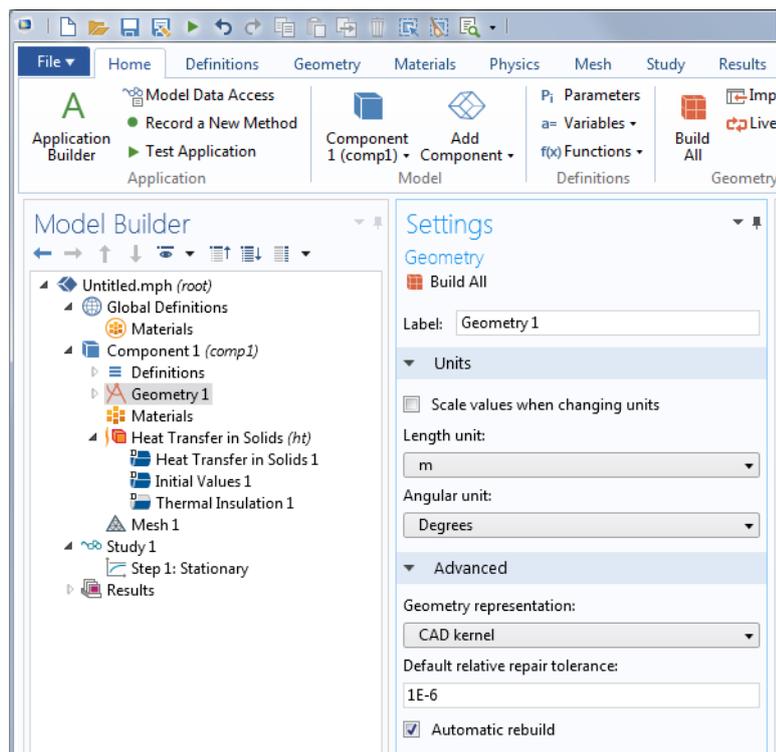
クイックアクセスツールバーでは、**開く**、**保存**、**取り消し**、**やり直し**、**コピー**、**貼り付け**、**削除**などの機能にアクセスできます。クイックアクセスツールバーの内容は、**クイックアクセスツールバーをカスタマイズ**リスト(ツールバー右の下向き矢印)でカスタマイズできます。

### リボン

デスクトップの一番上にあるリボンからは、ほとんどのモデリングタスクを実行するコマンドにアクセスできます。このリボンを使用できるのは、COMSOL Desktop の Windows® バージョン環境のみで、OS X バージョンと Linux® バージョンでは代わりにメニューとツールバーがあります。モデルビルダーからアプリケーションビルダーに切り替えるときや、ユーザーのモデルからアプリケーションの構築を開始するときは、**アプリケーションビルダー**ボタンをクリックします。

## 設定ウィンドウ

ジオメトリの寸法, 材料のプロパティ, 境界条件, 初期条件, ソルバーでシミュレーションを実行するのに必要なその他情報など, モデルの仕様をすべて入力するためのメインウィンドウです. 以下の図は, **ジオメトリ**ノードの**設定**ウィンドウです.



## プロットウィンドウ

グラフィックス出力用のウィンドウです. **グラフィックス**ウィンドウ以外に, 結果の可視化には**プロット**ウィンドウも使用します. 複数の結果を同時に表示する場合は, 複数の**プロット**ウィンドウを使用できます. 特別な例としては, モデルの実行中に求解プロセスの収束状況をグラフィカルに表示する**収束プロット**ウィンドウがあります. これは自動的に生成される**プロット**ウィンドウです.

## 情報ウィンドウ

これらは、非グラフィックス情報のウィンドウです。情報ウィンドウには、以下の種類があります：

- **メッセージ**：このウィンドウには、現在の COMSOL Multiphysics セッションに関する各種情報が表示されます。
- **進捗**：ソルバーからの進捗状況情報。停止ボタンがあります。
- **ログ**：自由度、求解時間、ソルバー反復データなど、ソルバーからの情報。
- **テーブル**：**結果**ノードに定義されたテーブル形式の数値データ。
- **外部プロセス**：クラスタージョブ、クラウドジョブ、バッチジョブのコントロールパネルがあります。

## その他のウィンドウ

- **材料を追加と材料ブラウザー**：材料プロパティライブラリ。 **材料ブラウザー**では、材料プロパティを編集できます。
- **選択リスト**：現在選択できるジオメトリオブジェクト、ドメイン、境界、エッジ、ポイントのリスト。

リボンの**ホーム**タブの**ウィンドウ**ドロップダウンリストから、すべての COMSOL Desktop ウィンドウにアクセスできます。(OS X と Linux<sup>®</sup>では、このリストは**ウィンドウ**メニューにあります。)

## キャンセルボタンのある進捗バー

現在の計算をキャンセルするボタン付きの**進捗バー**は、COMSOL Desktop インターフェースの右下隅にあります。

## ダイナミックヘルプ

**ヘルプ**ウィンドウでは、ウィンドウとモデルツリーノードに関するコンテキスト依存のヘルプテキストを利用できます。(たとえば F1 を押して) デスクトップで**ヘルプ**ウィンドウを開いて、ノードやウィンドウをクリックすると、**ダイナミックヘルプ** (英語のみ) を呼び出すことができます。**ヘルプ**ウィンドウからは、メニュー項目など、その他のトピックスも検索できます。

## モデルビルダーとアプリケーションビルダー

---

COMSOL Desktop 環境の 2 つのメインコンポーネントは、モデルビルダーとアプリケーションビルダーです。

モデルビルダーは、求解方法、結果の解析、レポートの作成など、モデルとそのコンポーネントを定義するツールです。定義はモデルツリーを構築して行います。モデルツリーは、ジオメトリ、メッシュ、フィジックスイインターフェース、境界条件、スタディ、ソルバー、後処理、可視化の設定など、モデルの状態を保存する基本データ構造であるモデルオブジェクトを反映します。

アプリケーションビルダーでは、使いやすい特化したユーザーインターフェースで簡単にアプリケーションを作成できます。アプリケーションは、通常、モデルビルダーで作成したモデルから作成します。アプリケーションビルダーには、アプリケーション作成用に、フォームエディターとメソッドエディターという 2 つの重要なツールがあります。さらに、アプリケーションでは、メニューバーやリボンを設定できます。フォームエディターには、ドラッグアンドドロップ機能があり、入力フィールド、グラフィックスウィンドウ、ボタンなどのユーザーインターフェースコンポーネントを簡単に呼び出して組み込むことができます。メソッドエディターは、プログラミング環境です。モデルオブジェクトデータ構造で表現したモデルの変更などことができます。さらにメソッドエディターでは、ユーザーインターフェースロジックや補助機能をアプリケーションに追加できます。メソッドエディターにコードを書き込むには、Java<sup>®</sup> プログラミング言語を使用します。したがって、すべての Java<sup>®</sup> 構文と Java<sup>®</sup> ライブラリを使用できます。

本書、COMSOL *Multiphysics* イントロダクションでは、モデルビルダーの使用方法を詳しく解説します。あわせて、アプリケーションビルダーについても簡単に説明します。フォームエディターやメソッドエディターなど、アプリケーションビルダーの使用方法の詳細については、アプリケーションビルダーイントロダクションを参照してください。

## アプリケーションの実行と COMSOL Server

---

アプリケーションビルダーは、COMSOL *Multiphysics* の Windows<sup>®</sup> バージョンに組み込まれています。COMSOL *Multiphysics* ライセンスがあれば、COMSOL Desktop 環境からアプリケーションを実行できます。アプリケーションは、本ソフトウェアの OS X バージョンや Linux<sup>®</sup> バージョンでは作成できませんが、これらのプラットフォーム上の COMSOL *Multiphysics* でアプリケーションを実行することはできます。

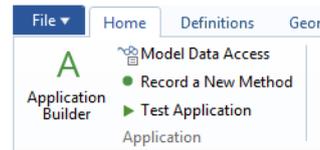
COMSOL Server ライセンスがある場合、さまざまなオペレーティングシステムとハードウェアプラットフォームの主な Web ブラウザーでアプリケーションを実行できます。また、COMSOL Server を簡単にインストールできる COMSOL Client for Windows<sup>®</sup> に接続すれば、アプリケーションを実行できます。

COMSOL Client for Windows<sup>®</sup> では、CAD 用 LiveLink<sup>™</sup> 製品が必要なアプリケーションを実行できます (この機能は、Web ブラウザーでアプリケーションを実行するときは使用できません)。

Web ブラウザーでアプリケーションを実行する場合、いかなるインストレーションも不要であり、Web ブラウザープラグインも必要ありません。Web ブラウザーでアプリケーションを実行する場合、1D、2D、3D で、インタラクティブなグラフィックスがサポートされています。Web ブラウザーにおける 3D グラフィックスレンダリングは、主要 Web ブラウザーのすべてに組み込まれている WebGL<sup>™</sup> テクノロジーがベースになっています。

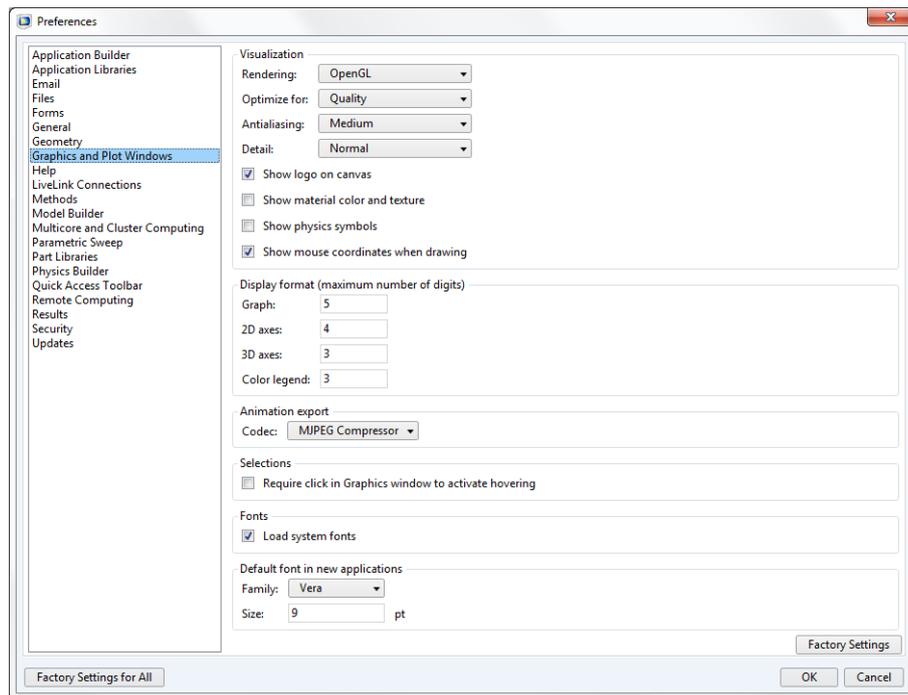
ユーザーのモデルからアプリケーションを作成するには、リボンの**ホーム**タブでアクセスできる**アプリケーションビルダー**ボタンをクリックします。

COMSOL アプリケーションの詳細方法の詳細については、セクション「アプリケーションの構築」86 ページと、マニュアルアプリケーションビルダーイントロダクションを参照してください。



## 環境設定

環境設定とは、モデリング環境に反映される設定のことです。ほとんどの設定は、モデリングセッションが変わっても保存されますが、一部はモデルとともに保存されます。環境設定は、**ファイル**メニューから**環境設定**を選択してアクセスします。



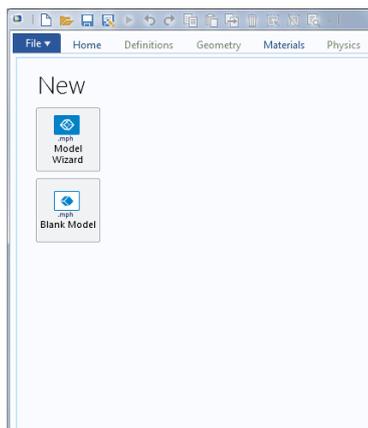
環境設定ウィンドウでは、グラフィックスレンダリング、結果の表示桁数、計算に使用する CPU コアの最大数、ユーザー定義のアプリケーションライブラリのパスなどの設定を変更できます。さまざまなオプションに慣れるため、少し時間をかけて現在の設定をざっと確認してください。

使用できるグラフィックスレンダリングオプションは、次の3つがあります：**OpenGL<sup>®</sup>**、**DirectX<sup>®</sup>**、**ソフトウェアレンダリング**。**DirectX<sup>®</sup>** オプションは、OS X や Linux<sup>®</sup> では利用できませんが、インストール時に DirectX<sup>®</sup> ランタイムライブラリのインストールを選択すれば Windows<sup>®</sup> で利用できます。使用しているコンピュータに専用のグラフィックスカードがない場合は、**ソフトウェアレンダリング**に切り替えてください。処理速度は遅くなりますが、すべての機能を備えたグラフィックスを利用できます。推奨グラフィックスのリストについては、以下のサイトを参照してください：

[www.comsol.jp/system-requirements](http://www.comsol.jp/system-requirements)

## 新規モデルの作成

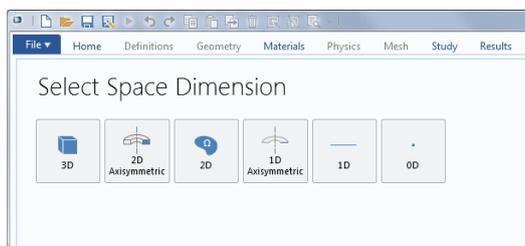
モデルは、**モデルウィザード**のガイダンスに従ってセットアップするか、以下の図のような**ブランクモデル**からセットアップを始めます。



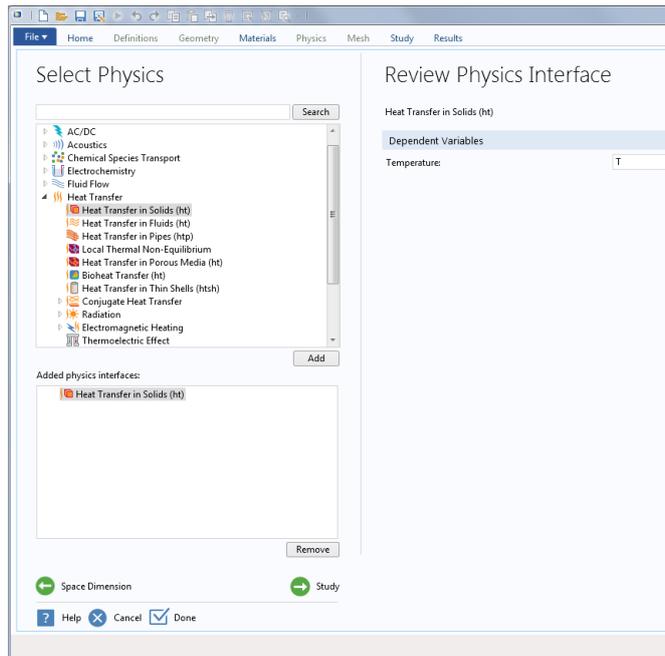
### モデルウィザードのガイダンスによるモデルの作成

モデルウィザードのガイダンスに従えば、空間次元、フィジックス、スタディタイプを数ステップでセットアップできます。

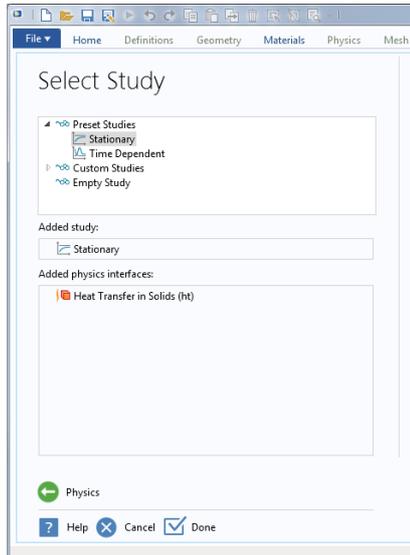
- モデルコンポーネントの空間次元を選択します：**3D**、**2D 軸対称**、**2D**、**1D 軸対称**、または **0D**。



- 2 1つ以上のフィジックスインターフェースを追加します。これらのインターフェースは、すぐに見つけやすいように、幾つかのフィジックスブランチに整理されています。これらのブランチは、製品に直接対応しているわけではありません。製品を COMSOL Multiphysics インストレーションに追加すると1つ以上のブランチにフィジックスインターフェースが追加されます。



- 3 計算に使用するソルバーまたはソルバーセットを表すスタディタイプを選択します。



最後に、**完了**をクリックします。デスクトップには、モデルウィザードで選択した選択肢に基づいて構成されたモデルツリーが表示されます。

## ブランクモデルの作成

**ブランクモデル**オプションでは、**コンポーネント**や**スタディ**なしで COMSOL Desktop インターフェイスが開きます。モデルツリーを右クリックすると、一定の空間次元、フィジックスインターフェイス、または**スタディ**の**コンポーネント**を追加できます。

## リボンとクイックアクセスツールバー

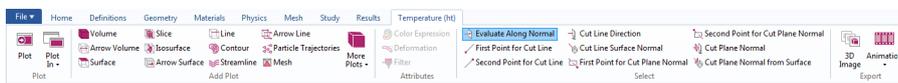
COMSOL Desktop 環境のリボントабは、モデリングワークフローを反映しており、ユーザーモデルからシミュレーションアプリケーションを構築するなど各モデリングステップで利用できる機能の概要を把握できます。



ホームタブには、モデルの変更、シミュレーション実行、アプリケーションの構築とテストのための主要操作のためのボタンのほとんどがここにあります。例としては、パラメーター化されたジオメトリのモデルパラメーターの変更、材料プロパティとフィジックスのレビュー、メッシュ構築、スタディ実行、シミュレーション結果の可視化などがあります。

モデリングプロセスの各メインステップに、標準タブがあります。これらのタブはワークフローに応じて左から右に、**定義**、**ジオメトリ**、**材料**、**フィジックス**、**メッシュ**、**スタディ**、**結果**と並んでいます。

対応するプロットグループを追加したときや、モデルツリーでこのノードを選択したときに表示される **3D プロットグループ**タブなど、コンテキスト対応タブは、必要時にのみ表示されます。



モードタブは、ごく限定された操作に使用し、リボンの他の操作が一時的に無関係な場合に使用します。例として、**ワークプレーン**モードタブがあります。ワークプレーンで作業するとき、他のタブは関連操作がないので表示されません。



## リボン対モデルビルダー

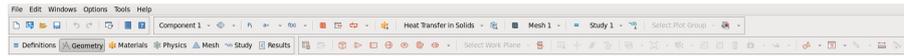
リボンは、利用可能なコマンドに簡単にアクセスでき、**モデルビルダー**ウィンドウのモデルツリーを補足します。リボンからアクセスする機能のほとんどは、モデルツリーのノードを右クリックしてコンテキスト対応メニューからもアクセスすることができます。しかしながら、どのデスクトップウィンドウを表示するかを選択するなど、操作によっては、リボンからしかアクセスできないものがあります。OS XとLinux®用のCOMSOL Desktopインターフェースでは、ツールバーからアクセスします。これらのプラットフォームでは、ツールバーがリボンの代わりにします。また、ノードの順序変更や無効化など、モデルツリーでないとアクセスできない操作もあります。

## クイックアクセスツールバー

**クイックアクセスツールバー**には、現在表示されているリボンタブから独立したコマンドセットがあります。**クイックアクセスツールバー**をカスタマイズして、最新のアクションの取り消しとやり直し、モデルツリー内のノードのコピー、貼り付け、複製など、**ファイル**メニューで利用できるほとんどのコマンドを追加できます。**クイックアクセスツールバー**は、リボンの上下どちらに配置するかを選択できます。

## OS X と LINUX®

OS X と Linux® の COMSOL Desktop 環境では、リボン、メニューとツールバーのセットに置き換わります。



本書の説明は、原則として Windows® バージョンの COMSOL Desktop 環境を想定しています。ただし、リボンユーザーインターフェースコンポーネントは、対応するメニューとツールバーにあることを理解しておけば、COMSOL Multiphysics と COMSOL Desktop 環境は、OS X や Linux® で実行する場合でもほとんど同じ感覚で操作できます。

## モデルビルダーとモデルツリー

モデルビルダーを利用して、デフォルトモデルツリーに肉付けする形で、ノードを追加し、ノード設定を編集してモデルを構築します。

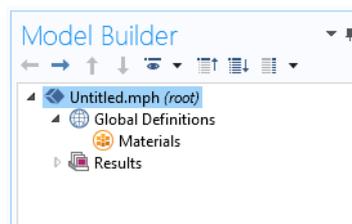
デフォルトモデルツリーのノードはすべて、最上位の親ノードです。これらのノードを右クリックすると、子ノードまたはサブノードのリストが表示されます。これらの子ノードまたはサブノードは親ノードの下に追加できます。ノードは、このようにしてツリーに追加します。

子ノードをクリックするとそのノード設定を**設定**ウィンドウで表示できます。ノード設定の編集は、このウィンドウで行います。

なお、**ヘルプ**ウィンドウを開いておけば、**ファイル**メニューから**ヘルプ**を選択するか、ファンクションキー F1 を押すと、ノードをクリックしたときにダイナミックヘルプ (英語のみ) にもアクセスすることができます。

### ルート、グローバル定義、結果ノード

モデルツリーには、必ずルートノード (最初のラベルは Untitled.mph)、**グローバル定義**ノード、**結果**ノードがあります。ルートノードのラベルは、モデルを保存するマルチフィジックスモデルファイルまたは MPH ファイルの名前です。ルートノードには、作者の名前、デフォルト単位システムなどの設定があります。

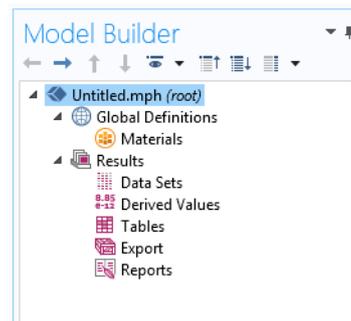


**グローバル定義**ノードには、デフォルトで**材料**サブノードがあります。**グローバル定義**ノードでは、モデルツリーで使用できるパラメーター、変数、関数、連成を定義できます。グローバル定義では、たとえば、材料プロパティの機能的依存関係、力、ジオメトリ、その他関連機能を定義できます。**グローバル定義**ノード

そのものに設定はありませんが、その子ノードには多くの定義があります。材料サブノードには、モデルのコンポーネントノードで参照できる材料プロパティが保存されています。

結果ノードでは、シミュレーション実行後に解にアクセスでき、さらに、データ処理のためのツールがあります。結果ノードには、最初、以下の5つのサブノードがあります：

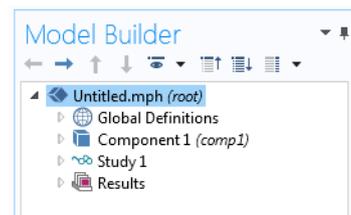
- **データセット**．作業できる解リストをまとめたものです。
- **計算値**．さまざまな後処理ツールで解から導き出す値を定義します。
- **テーブル**．シミュレーションの実行中にリアルタイムで解を監視するプローブが生成した**計算値**や**結果**の便利な出力先です。
- **エクスポート**．ファイルにエクスポートする数値データ、画像、動画を定義します。
- **レポート**．モデルに関する自動的に生成されたHTML形式またはMicrosoft® Word形式のレポートまたはカスタムレポートを保存します。



これら5つのデフォルトサブノードには、**グラフィックスウィンドウ**や**プロットウィンドウ**に表示するグラフを定義する**プロットグループ**サブノードをさらに追加することもできます。実行するシミュレーションのタイプによっては、これらのノードの一部は自動的に作成されますが、**結果**ノードを右クリックして、プロットタイプリストから選択すると追加の図を組み込むこともできます。

### コンポーネントとスタディノード

以上説明した3つのノード以外に、さらに次の2つの最上位ノードタイプがあります：**コンポーネント**ノードと**スタディ**ノード。これらのノードは、通常、新しいモデルの作成時にモデルウィザードによって作成されます。モデリングするフィジックスのタイプ、実行する**スタディ**のタイプ（定常状態、時間依存、周波数領域、または固有振動数解析）をモデルウィザードで指定すると、モデルウィザードは、タイプごとに1ノードを自動的に作成し、その内容を表示します。



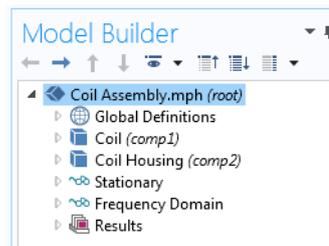
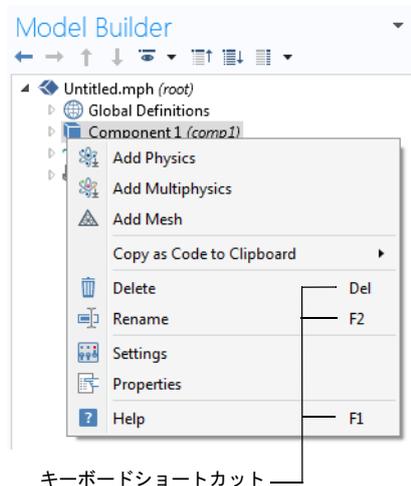
モデル開発に応じてさらに**コンポーネント**ノードと**スタディ**ノードを追加することができます。1つのモデルに、複数の**コンポーネント**ノードと**スタディ**ノードを含めることができますが、それらにすべて同じ名前を付けると混乱の元です。そこで、これらのノードタイプは、それぞれの目的に応じて名前を変更することができます。

モデルに複数の**コンポーネント**ノードがある場合、それらを結合してシミュレーションステップのより高度なシーケンスを形成することができます。

ちなみに、**スタディ**ノードごとに、実行する計算のタイプが異なることが考えられるので、ノードごとに**計算**ボタン  があります。

具体的に、コイルとコイルハウジングの2つのパーツからなるコイルアセンブリのモデルを構築することを考えてみましょう。1つはコイルをモデリングする**コンポーネント**ノード、もう1つはコイルハウジングをモデリングする**コンポーネント**ノードと、2つの**コンポーネント**ノードを作成します。それぞれのノードの名前をオブジェクト名で変更します。同様に、2つの**スタディ**ノードを作成します。最初のノードは、アセンブリの定常状態をシミュレートし、もう1つは周波数応答をシミュレートします。これら2つのノードの名前を、**定常**と**周波数領域**に変更します。モデルが完成したら、ファイル `Coil Assembly.mph` に保存します。この時点で、以下の図のようなモデルビルダーのモデルツリーができます。

この図で、ルートノード名は `Coil Assembly.mph` です。モデルを保存するファイルであることを表した名前です。**グローバル定義**ノードと**結果**ノードは、それぞれデフォルト名があります。また、上記で選択した名前の2つの**コンポーネント**ノードと2つの**スタディ**ノードがあります。



## パラメーター, 変数, スコープ

### グローバルパラメーター

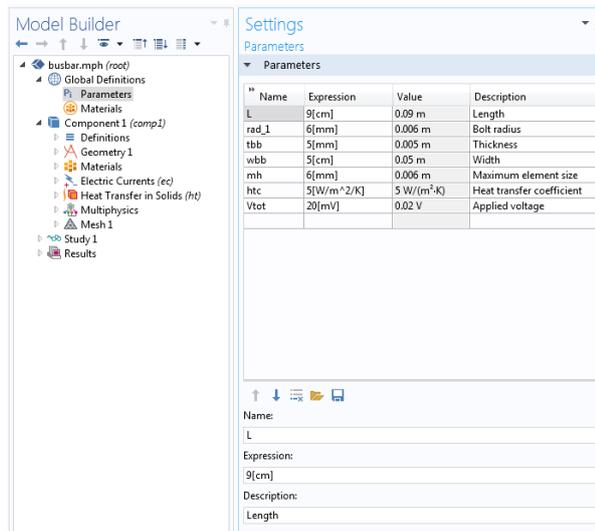
グローバルパラメーターは, モデル全体で利用できるユーザー定義のスカ  
ラー定数です. すなわち, 「グローバル」パラメーターです. 主な用途:

- パラメーター化 幾何学的寸法.
- メッシュ要素サイズの指定
- パラメトリックスイープの定義 (周波数や荷重など, さまざまなパラメ  
ーター値で繰り返されるシミュレーション).

グローバルパラメーター式には数字, グローバルパラメーター, 組み込み定数,  
引数としてグローバルパラメーター式を持つ組み込み関数, 単項演算子とバイ  
ナリ演算子を設定できます. 利用できる演算子のリストについては, 「付録  
C 言語要素と予約名」165 ページを参照してください. これらの式は, シ  
ミュレーション開始前に評価されるため, グローバルパラメーターは時間変  
数  $t$  に依存しないことがあります. 同じく,  $x, y$ , あるいは  $z$  のような空間変数や  
式で導き出そうとする変数にも依存しないことがあります.

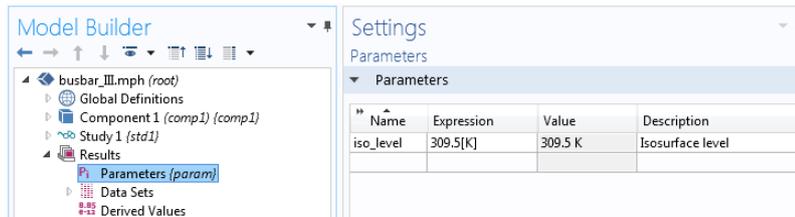
パラメーター名は大文字と小文字が区別されます.

グローバルパラメーターは, **グローバル定義**の下のモデルツリーの**パラメ  
ーター**ノードで定義します.



## 結果パラメーター

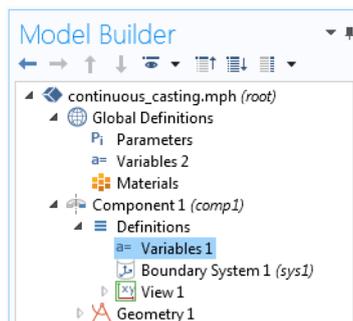
柔軟性を考慮し、**結果**ノードでのみ使用するパラメーターを定義することができます。これらのパラメーターは、モデルを求解しなくても使用できます。



結果パラメーターは、他の結果パラメーターに依存することがありますが、グローバルパラメーターに依存することはありません。

## 変数

変数にはモデルツリーに関連**変数**ノードがあり、**グローバル定義**ノードまたは任意の**コンポーネント**ノードの**定義**サブノードで定義できます。



もちろん、変数をどこで定義するかは、それをグローバルにするか(つまり、モデルツリー全体で利用可能)、あるいは1つの**コンポーネント**ノードでローカルに定義するか、によって異なります。パラメーター式と同じく、変数式で数字、パラメーター、組み込み定数、単項演算子とバイナリ演算子を設定できます。ただし、変数式には、 $t$ ,  $x$ ,  $y$ ,  $z$  のような変数、あるいは引数として変数式を持つ関数や、その空間導関数と時間導関数以外に解を求める従属変数も設定できます。

## アプリケーションで使用する変数

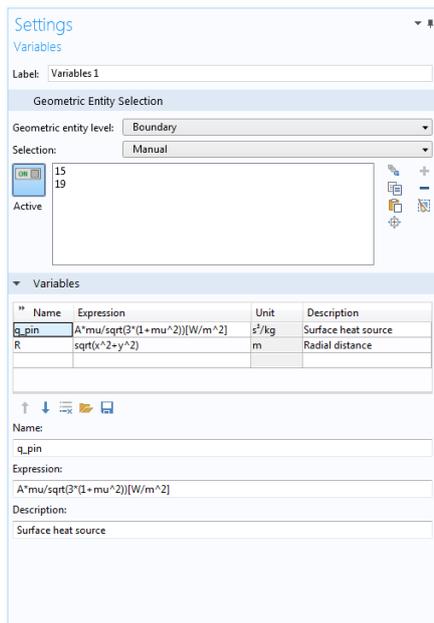
アプリケーションでは、モデルパラメーターと変数を使用できます。たとえばアプリケーションのユーザーにパラメーター値を変更させることができます。また、アプリケーションで使用する変数は、**宣言**ノードの下のアプリケーションツリーにあるアプリケーションビルダーで定義できます。

## スコープ

パラメーターや変数の「スコープ」は、式のどこでそれを使用するかを示す文です。グローバルパラメーターは、すべてモデルツリーの**グローバル定義**ノードで**パラメーター**サブノードとして定義済みです。つまり、グローバルパラメーターは、スコープがグローバルであり、モデルツリー全体で使用できることを意味します。

グローバル定義ノードには変数も**変数**サブノードとして定義できます。グローバルスコープが与えられますが、他に制約があります。たとえば、変数は、**ジオメトリ**ノード、**メッシュ**ノード、あるいは**スタディ**ノードでは使用できません(唯一の例外として、シミュレーションの中断を表現する式では使用できます)。

**コンポーネント**ノードの**定義**サブノードで定義される変数のスコープはローカルスコープになり、特定の**コンポーネント**でのみ使用します(ただし、この場合も**ジオメトリ**ノードや**メッシュ**ノードでは使用できません)。これらの変数では、たとえば、**コンポーネント**の**材料**サブノードで材料プロパティの他、境界条件や相互作用を指定できます。変数は、変数のスコープをジオメトリの一定の部分(一定の境界など)に制限するときに便利です。その場合、変数の設定では定義を**コンポーネント**のジオメトリ全体に適用するか、または**ドメイン**、**境界**、**エッジ**、**ポイント**に適用するかを選択できます。



左の図は、q\_pinとRという2つの変数の定義です。そのスコープは、数字15と19で示す境界に制限されています。

このような数字グループを**選択**と呼び、名前を付ければ、モデル内のどこからでも参照できます。この機能は、たとえば、一定の境界だけで変数を使用する材料プロパティや境界条件を定義するときに便利です。**選択**に名前を付けるには、**選択**リスト右の**選択を作成**ボタン(🔍)をクリックします。

**コンポーネント** > **定義**サブノードの下の**変数**ノードで定義した変数には、ローカルスコープを割り当てますが、明確な識別子があれば、モデルツリーの**コンポーネント**ノード外からもアクセスできます。その場合は、「ドット表記」を使用します。変数名には、その変数が定義されている**コンポーネント**ノードの名前を付け、「ドット」で結合します。つまり、foo

という変数を MyModel という名前の**コンポーネント**ノードに定義する場合、こ

の変数には、コンポーネントノード外から `MyModel.foo` でアクセスできます。この方法は、たとえば、**結果**ノードに変数でプロットを作成するときなどに便利です。アプリケーションビルダーの**宣言**ノード下に定義された変数は、フォームオブジェクトとメソッドでグローバルに利用できますが、モデルビルダーでは使用できません。

## 組み込み定数、変数、関数

---

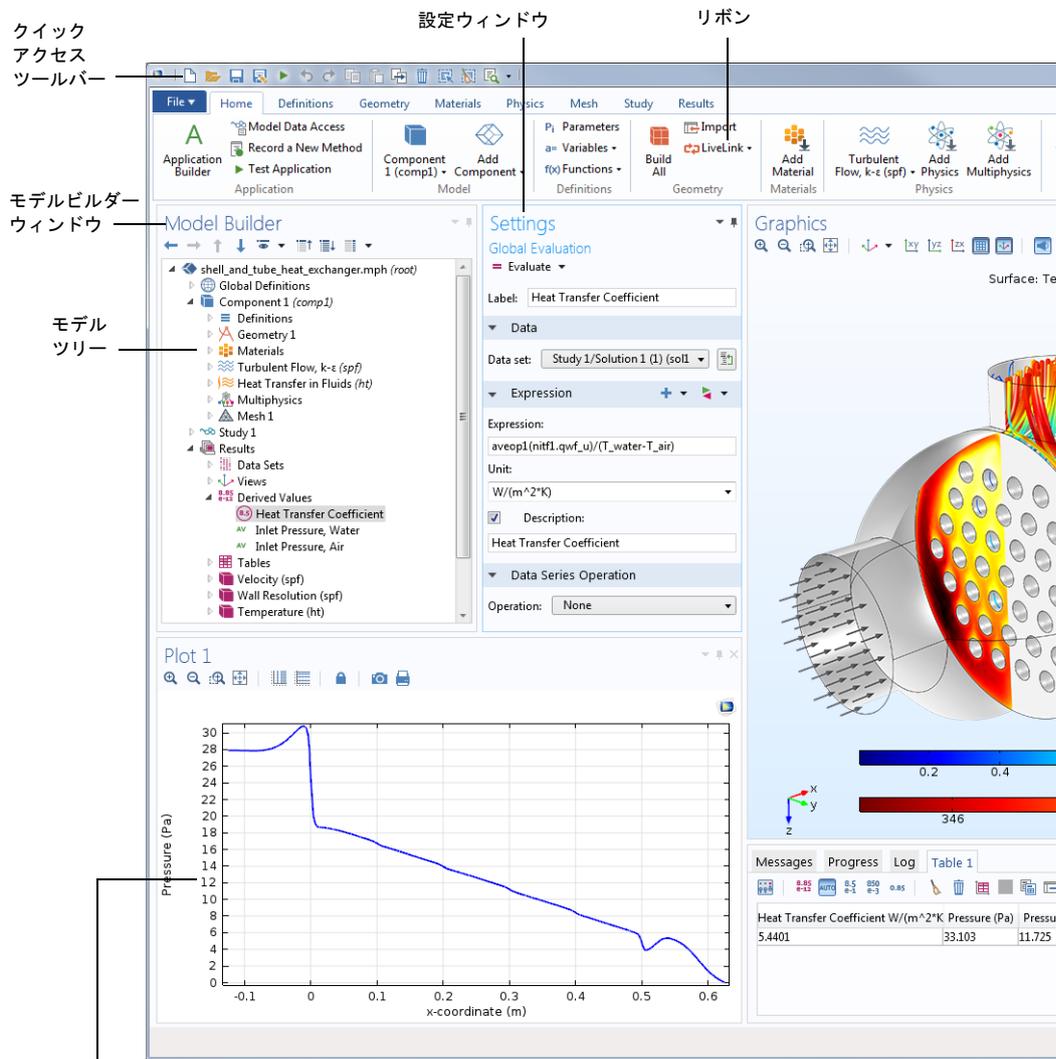
COMSOL Multiphysics には、さまざまな組み込み定数、変数、関数が用意されています。これらの定数、変数、関数には、ユーザーが再定義できない予約名が付いています。ユーザー定義の変数、パラメーター、または関数の予約名を使用すると、入力したテキストがオレンジ色（警告）か赤色（エラー）に変化し、そのテキスト文字列を選択するとツールチップメッセージが表示されます。

いくつか重要な例を示します：

- `パイ` (3.14...) などの数学定数、あるいは `i` または `j` などの虚数単位
- `g_const` (重力加速度)、`c_const` (光速)、`or R_const` (普遍気体定数) などの物理定数
- 時間変数、`t`
- 空間座標名と従属変数名 (ユーザー定義の変数) から派生した名前の従属変数 (解) の一次導関数と二次導関数
- `cos`, `sin`, `exp`, `log`, `log10`, `sqrt` などの数学関数

詳細については、「付録 C—言語要素と予約名」165 ページを参照してください。

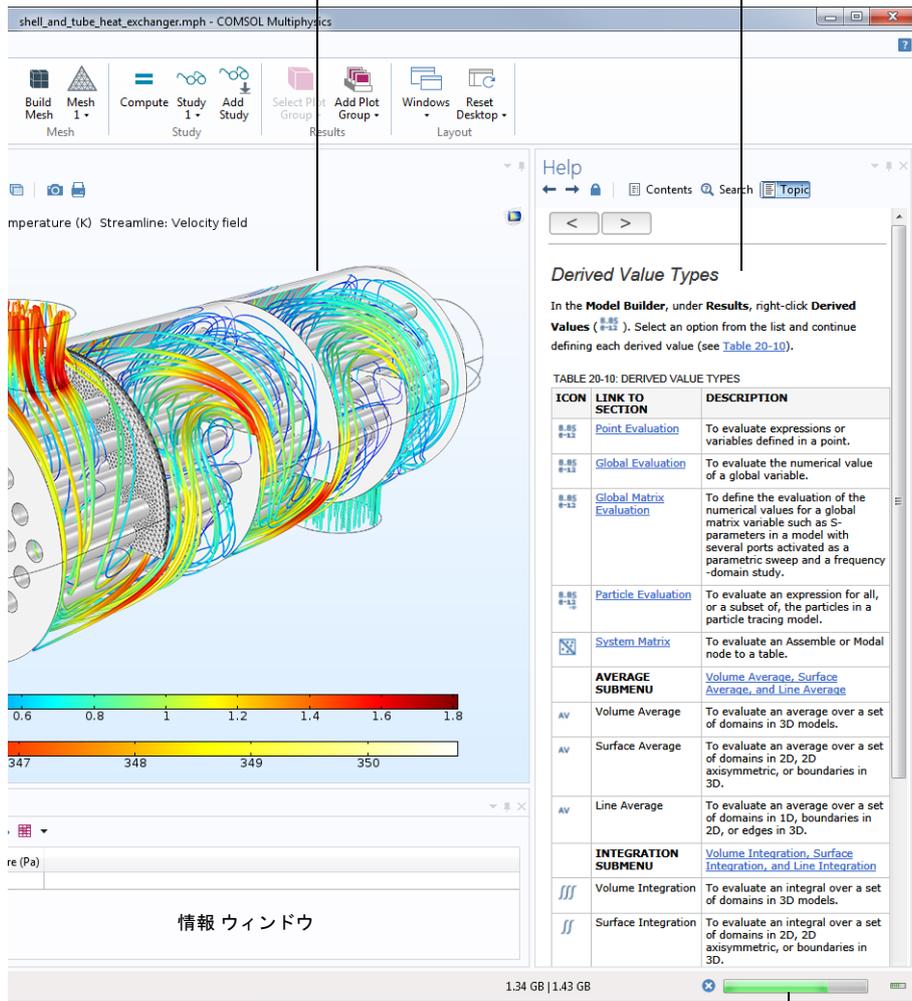
以下の見開きは、カスタマイズしたデスクトップにウィンドウを追加した例です。



プロットウィンドウ—プロットウィンドウでは、結果の値、  
プローブ、収束プロットを可視化します。複数のプロット  
ウィンドウで、複数の結果を同時に表示することができます。

グラフィックスウィンドウ

ダイナミックヘルプ—ナレッジベースとアプリケーション  
ギャラリーのオンラインアクセスにより常時、内容を更新。ヘル  
プウィンドウでは、拡張検索機能により、簡単に参照が可能。



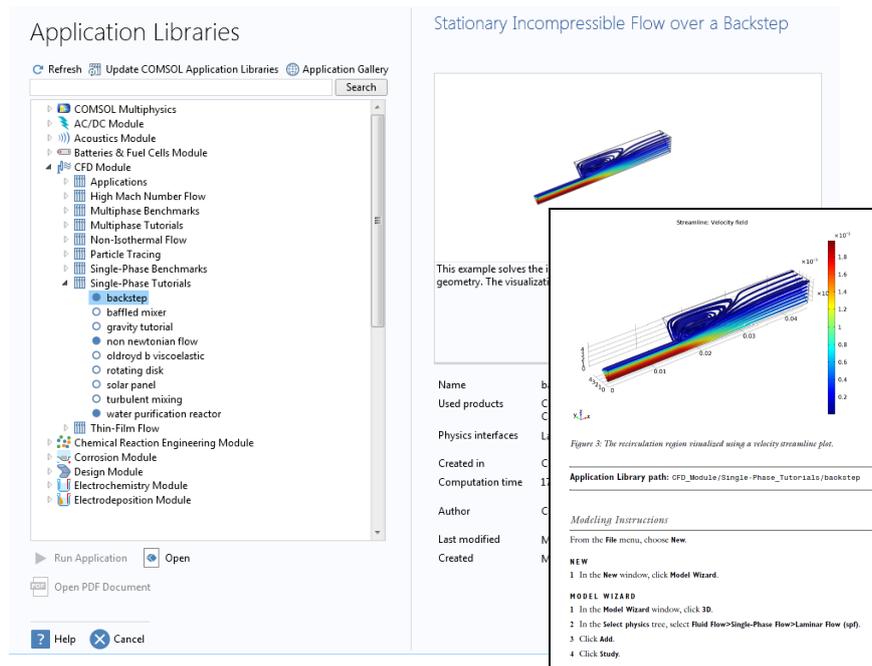
情報 ウィンドウ

進捗バーキャンセルボタン付き

## アプリケーションライブラリ

アプリケーションライブラリは、付属ドキュメントを伴うチュートリアルモデルと実行可能アプリケーションを保存した MPH ファイルの集まりです。チュートリアルモデルでは、モデルビルダーの使用方法を紹介します。また、理論的バックグラウンドと順を追った操作方法をまとめたドキュメントが用意されています。実行可能アプリケーションには、アプリケーションの使用法に関する取り扱い説明が用意されています。チュートリアルモデルとアプリケーションは、手軽に内容を確認、編集して自分専用のモデルとアプリケーションを作成できます。各フィジックススペースのアドオンモジュールには、そのアプリケーションとフィジックスエリア専用のサンプルを伴う専用のアプリケーションライブラリがあります。順を追った操作説明と MPH ファイルはモデリングのテンプレートとして利用できます。

アプリケーションライブラリウィンドウを開くには、ホーム ツールバーのウィンドウメニューか、ファイルメニュー  からアプリケーションライブラリ  を選択します。次に、アプリケーション名で検索するか、モジュールフォルダー名で参照します。



The screenshot shows the 'Application Libraries' window on the left and a preview of a simulation on the right. The 'Application Libraries' window displays a tree view of various modules, with 'CFD Module' expanded to show 'Single-Phase Tutorials' and 'backstep' selected. The preview window shows a 3D visualization of a flow over a backward-facing step, with a color scale for velocity. Below the visualization is a table of metadata for the application.

Name	backstep
Used products	COMSOL Multiphysics
Physics interfaces	Laminar Flow
Created in	COMSOL Multiphysics
Computation time	11.111111111111111
Author	COMSOL
Last modified	2019-08-28 10:00:00
Created	2019-08-28 10:00:00

**Modeling Instructions**  
From the File menu, choose **New**.

**NEW**  
1 In the **New** window, click **Model Wizard**.

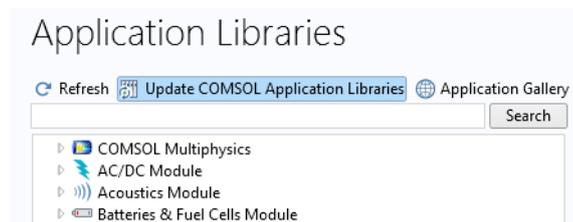
**MODEL WIZARD**  
1 In the **Model Wizard** window, click **3D**.  
2 In the **Select physics** tree, select **Fluid Flow>Single-Phase Flow>Laminar Flow (spf)**.  
3 Click **Add**.  
4 Click **Study**.

開く , **アプリケーションを実行** , または **PDFドキュメントを開く**  をクリックします。あるいは、**ファイル**メニューから**ヘルプ > ドキュメント**を選択して、アプリケーション名で検索するか、モジュールで参照します。**アプリケーションを実行**オプションは、実行可能アプリケーションである MPH ファイルでのみ使用できます。

アプリケーションライブラリの MPH ファイルには、フル MPH ファイルとコンパクト MPH ファイルの 2 つの形式があります。

- すべてのメッシュと解を含むフル MPH ファイル。アプリケーションライブラリウィンドウでは、● アイコンで表示されます。MPH ファイルサイズが 25MB を超える場合、アプリケーションライブラリツリーでモデルのノードにカーソルを合わせると、「ラージファイル」というテキストとファイルサイズが表示されます。
- コンパクト MPH ファイルには、モデルのすべての設定が保存されていますが、DVD やダウンロード画像の容量を節約するため、メッシュと解データは含まれていません。一部の MPH ファイルには、計算時間が短く、結果をすぐに生成できるなど、他の理由で解が含まれていません。これらの MPH ファイルは、設定の確認や、メッシュ化や再求解のために開くことができます。また、以上のほとんどの MPH ファイルは、アプリケーションライブラリの更新時にメッシュと解を伴うフルバージョンのダウンロードも可能です。これらの MPH ファイルは、アプリケーションライブラリウィンドウでは、○ アイコンで表示されます。アプリケーションライブラリウィンドウでカーソルをコンパクトファイルに合わせると、**保存解なし** というメッセージが表示されます。フル MPH ファイルをダウンロードできる場合、対応するノードのコンテキストメニューには、**解と共にファイルをダウンロード**  オプションが表示されます。

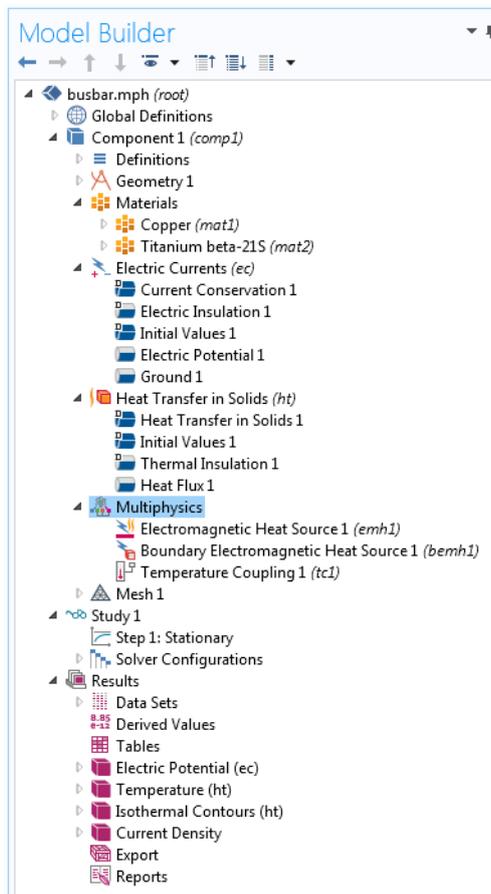
アプリケーションライブラリは、COMSOL が定期的に更新しています。利用できるアップデートについては、**アプリケーションライブラリ**ウィンドウ最上部の **COMSOL アプリケーションライブラリをアップデート**  をクリックしてください。また、このオプションは、**ファイル > ヘルプ**メニュー (Windows® ユーザー) または **ヘルプ**メニュー (OS X と Linux® ユーザー) にもあります。これをクリックすると、COMSOL Web サイトにつながり、新しいアプリケーションや最新のアップデートにアクセスできます。



コンピュータにインターネット接続がある場合、**アプリケーションギャラリー**ボタンをクリックすると、COMSOL Web サイトでさまざまなその他の例にアクセスできます。

## ワークフローと操作シーケンス

**モデルビルダー**ウィンドウには、プロセスモデリングのすべてのステップが、グローバル変数の定義から、結果の最終レポートまでモデルツリーに表示されます。



モデルツリーには、操作シーケンスが上から順番に定義されています。

以下のモデルツリーのブランチでは、ノード順序で違いが生じ、モデルツリーでサブノードを上下に移動することで操作シーケンスを変更できます：

- ジオメトリ
- 材料
- フィジックス
- メッシュ
- スタディ
- プロットグループ

ツリーの**コンポーネント > 定義**ブランチでは以下のノードタイプの順序でも違いが生じます：

- 完全整合層 (PML)
- 無限要素

ノードは以下の方法で順序を変更できます：

- ドラッグアンドドロップ
- ノードを右クリックし、**上移動**または**下移動**を選択
- Ctrl + 上矢印または Ctrl + 下矢印を押す

他のブランチでは、ノードの順序は、操作シーケンスにとって大きな意味はありませんが、一部のノードでは読みやすさのために順序を変更することもあります。**グローバル定義**の子ノードはその1例です。

**ファイルメニュー**で**履歴を圧縮**を選択した後、モデルを**MATLAB のモデルファイル**<sup>®</sup>または**Java のモデルファイル**<sup>®</sup>として保存すると操作シーケンスをプログラムコード文として表示できます。モデル履歴には、モデルの構築時に行った変更の完全な記録が保存されています。したがって、モデル履歴には、パラメーターと境界条件に対する変更や、ソルバーの修正などすべての修正が記録されます。この履歴を圧縮すると、オーバーライドされた変更結果はすべて削除され、モデルステップの最新のクリーンコピーが残ります。アプリケーションビルダーでは、**新規メソッドを記録**オプションで、メソッドエディター内のプログラムコード文の表示と編集ができます。

COMSOL Desktop インターフェースとモデルビルダーに慣れてくると、体系化され、合理化された方法の良さがわかるようになります。しかし、ユーザーインターフェースについて解説を尽くしても、自分でそれを体験するまで使いこなすことはできません。次の章では、本ソフトウェアの操作に慣れるため、2つの例を紹介しましょう。

## 例 1：レンチの構造解析

---

この簡単な例では、COMSOL Multiphysics® のアドオン製品は必要ありません。十分な機能を備えた構造力学モデルについては、構造力学 モジュールアプリケーションライブラリを参照してください。

これまでに、レンチでボルトを締めたことは何度かあるでしょう。この課題では、最悪の荷重条件下にあるレンチの構造的完全性の観点から、この基本タスクを解析する構造力学モデルを紹介します。

レンチは、もちろん延性材料のスチール製です。適用したトルクが大きすぎると、降伏応力レベルを超えて押したときに、スチールの弾塑性挙動によりツールは永久に変形します。レンチハンドルが正しい寸法に設定されているかどうかを調べるには、機械的応力レベルが降伏応力限界内であることを確認します。

このチュートリアルでは、モデルビルダーワークフローを簡単に紹介します。まず、モデルウィザードを開いて、固体力学のフィジックスオプションを追加します。次に、ジオメトリをインポートし、材料としてスチールを選択します。そして、荷重のパラメーターと境界条件を定義し、グラフィックスインドウで幾何学的エンティティを選択し、メッシュとスタディを定義し、最後に可視化によって結果を数値的に検討して、モデル作成のその他の主要ステップを体験します。

より高度なモデルで練習したいときは、この項で主要キーのいくつかを修得してから、チュートリアル「例 2：バスバー — マルチフィジックスモデル」53 ページに進んでください。

## モデルウィザード

---

1 本ソフトウェアを開始するには、デスクトップの COMSOL Multiphysics アイコンをダブルクリックします。新規モデル作成用の 2 つのオプション、**モデルウィザード** または **ブランクモデル** がある新規ウィンドウが表示されます。



空白モデルを選択すると、モデルツリーでルートノードを右クリックして、コンポーネントとスタディを手動で追加できます。このチュートリアルの場合、**モデルウィザード** ボタンをクリックします。

COMSOL Desktop ユーザーインターフェースが開いている場合は、**ファイル**メニューから**新規**を選択してモデルウィザードを開始できます。モデルウィザードを選択します。



モデルウィザードで、モデルのセットアップの最初のステップのガイダンスが表示されます。次のウィンドウでは、モデリング空間の次元を選択します。

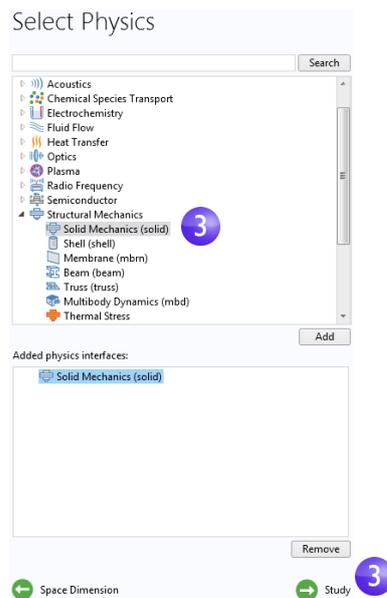
2 空間次元選択ウィンドウで、3D を選択します。



3 フィジックスを追加で、**構造力学 > 固体力学 (ソリッド)** を選択します。追加をクリックします。

アドオンモジュールがなければ、**固体力学**は、**構造力学**フォルダーで利用できる単なるフィジックスインターフェースです。右の図は、アドオンモジュールを使用できるときに表示された**構造力学** フォルダーです。

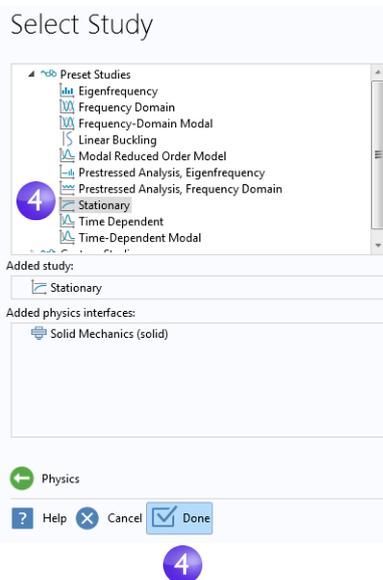
**スタディ** をクリックして操作を続けます。



4 プリセットスタディの下の定常  をクリックします。操作が完了したら、完了  をクリックします。

プリセットスタディには、選択したフィジックス (この例では**固体力学**) に適合したソルバー設定と式設定があります。今回は、**定常**スタディを使用します。時間的に変化する荷重や材料プロパティはありません。

**カスタムスタディブランチ**  の選択には、すべて手動設定が必要です。



## ジオメトリ

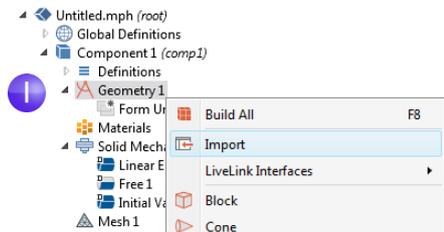
このチュートリアルでは、先に作成済みで、COMSOL ネイティブ CAD 形式、.mphbin、で保存したジオメトリを使用します。カスタマイズしたジオメトリの構築方法については、「付録A—ジオメトリの構築」146ページを参照してください。

### ファイルの場所

本演習を実行するためのファイルがあるアプリケーションライブラリの場所は、本ソフトウェアのインストレーションとオペレーティングシステムによって異なります。Windows®では、次のようなファイルパスになります：

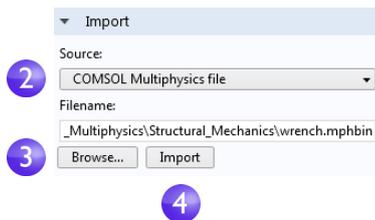
C:\Program Files\COMSOL\COMSOL52a\Multiphysics\applications.

- 1 モデルビルダーウィンドウで、**コンポーネント 1** の下の、**ジオメトリ 1** を右クリックし、**インポート** を選択します。



あるいは、リボンと **ジオメトリ** タブの **インポート** をクリックする方法もあります。

- 2 **インポート** の **設定** ウィンドウで、**ソース** リストから **COMSOL Multiphysics ファイル** を選択します。



- 3 **ブラウザ** をクリックし、COMSOL インストールフォルダーのアプリケーションライブラリフォルダーでファイル **wrench.mphbin** を選択します。Windows® のデフォルト場所は、以下のとおりです：

C:\Program Files\COMSOL\COMSOL52a\Multiphysics\applications\COMSOL\_Multiphysics\ Structural\_Mechanics\wrench.mphbin  
ダブルクリックして追加するか、**開く** をクリックします。



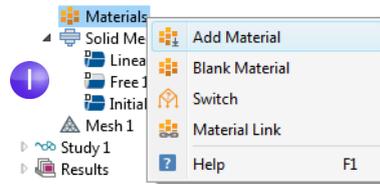
## 材料

材料ノード  には、コンポーネントノードのすべてのフィジックスとすべてのドメインの材料プロパティが保存されています。ボルトとツールの両方に汎用スチール材料を使用します。モデルビルダーの選択方法は次のとおりです。

### 1 材料を追加ウィンドウを開きます。

材料を追加ウィンドウは、以下の2とおりの方法のどちらでも開くことができます。

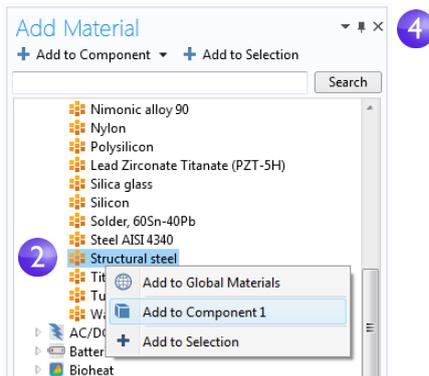
- モデルビルダーでコンポーネント 1 > 材料  を右クリックし、材料を追加を選択する。 
- リボンから、ホームタブを選択し、材料を追加をクリックする。



### 2 材料を追加ウィンドウで、組み込みフォルダーをクリックして展開します。スクロールダウンして、構造スチールを探し、右クリックして、コンポーネント 1 に追加を選択します。

### 3 設定ウィンドウの材料の内容セクションで材料について、利用できるプロパティを確認してください。緑色のチェックマークのプロパティはシミュレーションでフィジックスに使用します。

### 4 材料を追加ウィンドウを閉じます。



3

Property	Name	Value	Unit	Property group
<input checked="" type="checkbox"/> Density	rho	7850[kg/m^3]	kg/m^3	Basic
<input checked="" type="checkbox"/> Young's modulus	E	200e9[Pa]	Pa	Young's modulus and Poisson's ratio
<input checked="" type="checkbox"/> Poisson's ratio	nu	0.33	1	Young's modulus and Poisson's ratio
Relative permeability	mur	1	1	Basic
Heat capacity at constant pressure	Cp	475[J/(kg*K)]	J/(kg*K)	Basic
Thermal conductivity	k	44.5[W/(m*K)]	W/(m*K)	Basic
Electrical conductivity	sigma	4.032e6[S/m]	S/m	Basic
Relative permittivity	epsilon_r	1	1	Basic
Coefficient of thermal expansion	alpha	12.3e-6[1/K]	1/K	Basic
Murnaghan third-order elastic moduli	l	-3.0e11[Pa]	N/m^2	Murnaghan
Murnaghan third-order elastic moduli	m	-6.2e11[Pa]	N/m^2	Murnaghan
Murnaghan third-order elastic moduli	n	-7.2e11[Pa]	N/m^2	Murnaghan

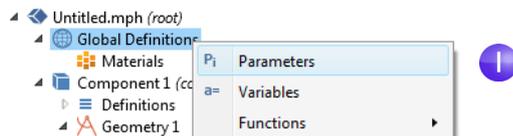
- ⚠ バスバーチュートリアルセクション「材料」63 ページと「材料のカスタマイズ」101 ページについても、材料の扱い方について詳しく確認してください。

## グローバル定義

レンチに適用する荷重を指定するグローバルパラメーターを定義します。

### パラメーター

- 1 **モデルビルダー**で、**グローバル定義**  を右クリックし、**パラメーター**  $P_1$  を選択します。



- 2 **パラメーターの設定** ウィンドウに移動します。**パラメーター** テーブルで、以下の設定を入力します：

- **名前**列かフィールドに、F と入力します。
- **式**列かフィールドに、150[N] と入力します。物理単位を数値に関連付けるには、角括弧表記を使用します。ここでは、力の単位ニュートンを使用します。フィールドを離れるか、Return を押すと、**値**列は、入力した式に従って自動的に更新されます。
- **説明**列またはフィールドに、加えた力を入力します。

Parameters			
Name	Expression	Value	Description
F	150[N]	150.00 N	Applied force

2

- ⚠ エントリが1つ以上の**パラメーター**テーブルがある場合、対応するヘッダをクリックすると、特定の列を基準に、テーブルの内容を並べ替えることができます。

パラメーターの操作方法の詳細については、セクション「グローバル定義」57 ページと「パラメーター、関数、変数、連成」97 ページを参照してください。

ここまでで、フィジックスとスタディを追加し、ジオメトリをインポートし、材料を追加し、1つのパラメーターを定義しました。モデルビルダーノードシーケンスは、右図のようにになっているはずです。固体力学の下のデフォルト機能ノードは、ノードアイコンの左上隅に、Dと表示されます。

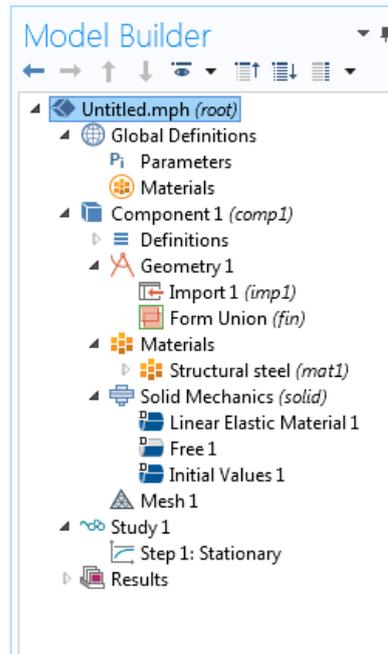
固体力学のデフォルトノードは次のとおりです：線形弾性材料、自由、初期値。

ノード線形弾性材料は、固体力学インターフェースのデフォルト材料モデルです。ノード自由は、すべての境界が制約や荷重なしで自由に移動できる境界条件です。ノード初期値は、非線形過渡解析の初期変位と速度値の指定時に使用します(今回は適用不可)。

デフォルトのフィジックスノードは削除できません。代わりに、追加ノードを追加して、デフォルトノードのフィジックス設定とは異なるフィジックス設定を指定します。これらの追加ノードは、デフォルトノードや他のノードの設定をオーバーライドするか、逆にデフォルトノードや他のノードの設定根拠になる場合があります。詳細については、「オーバーライドと寄与：排他的ノードと寄与ノード」112 ページを参照してください。

モデルはいつでも保存して、後で保存時とまったく同じ状態で開くことができます。

3 ファイルメニューから、ファイル > 名前を付けて保存を選択します。書き込み権限のあるフォルダーを参照し、ファイルを wrench.mph として保存します。



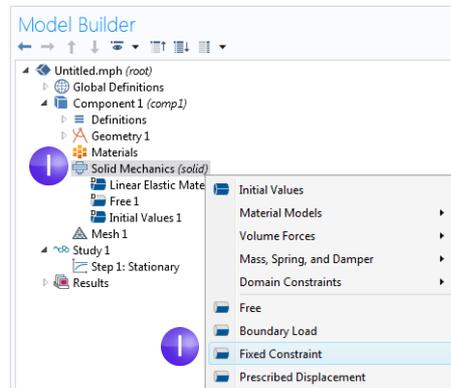
## フィジックスと境界条件

ジオメトリと材料を定義すると、境界条件の設定準備が整います。

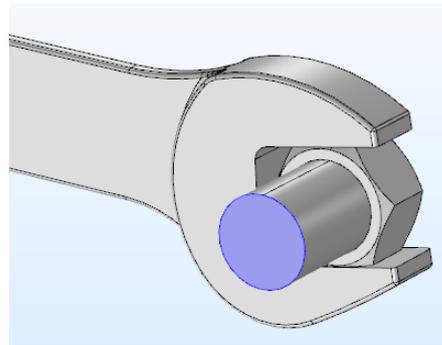
- 1 モデルビルダーで、**固体力学 (ソリッド)** を右クリックし、**固定拘束** を選択します。

この境界条件は、境界サーフェス上の各点の変位をすべての方向でゼロに抑制します。

さらに、リボンを使用し、**フィジックスタブ**、**境界 > 固定拘束**から選択することもできます。



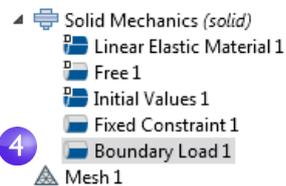
- 2 **グラフィックス**ウィンドウで、ウィンドウの任意の箇所をクリックし、レンチを図の場所にドラッグして、ジオメトリを回転します。部分的にモデル化したボルトの手前のサーフェスをクリックします。境界が、選択されたことを示す青色に変化します。選択リストの**境界番号**は**35**です。



- 3 **グラフィックstoolバー**の**デフォルト 3D ビューへ移動**ボタン をクリックし、ジオメトリをデフォルトビューに戻します。

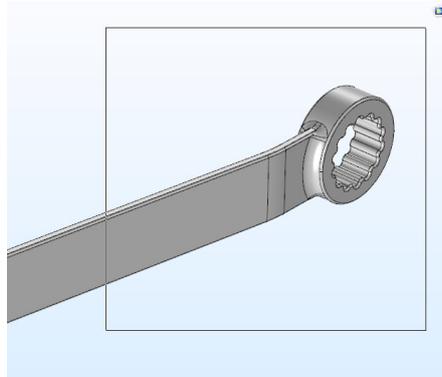


- 4 モデルビルダーで、**固体力学 (ソリッド)** を右クリックし、**境界荷重**を選択します。**境界荷重**ノード が**モデルビルダー**シーケンスに追加されます。



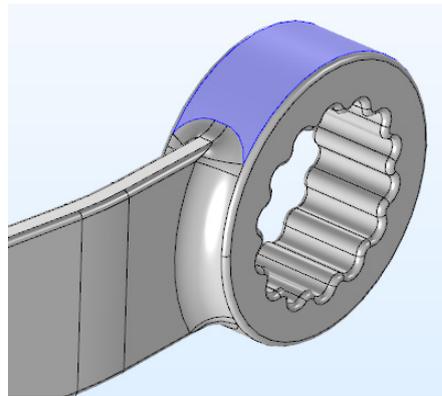
- 5 グラフィックスウィンドウで、ツールバーの**ズームボックス**ボタンをクリックし、マウスをドラッグして、右図の正方形の領域を選択します。マウスボタンを離すと、選択した領域までズームインします。

5

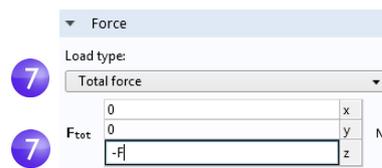


- 6 境界をクリックして青色の強調表示にし、それを**選択**リストに追加して上部ソケット面(境界 III)を選択します。

6



境界荷重の設定ウィンドウの、**力**の下で**荷重タイプ**として**総力**を選択し、**z**コンポーネントのテキストフィールドに**-F**を入力します。負号は、負の**z**方向(下方向)を示します。これらの設定で、荷重 150 N が、選択したサーフェスに均等に分散します。

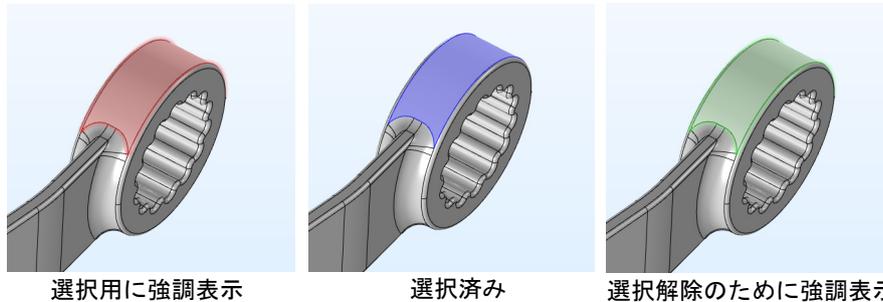


プロセスモデリングをシンプルにするため、ボルトとレンチ間の機械的接触を、材料インターフェース境界条件で近似します。このような内部境界条件は自動的に定義され、材料インターフェースの法線応力と変位の連続性を保証します。機械的接触など、詳細な解析は構造力学モジュールで実行できます。

## 境界とその他の幾何学的エンティティの選択

境界の選択を解除すると、色は通常グレーになりますが、**材料**で利用できる材料**外觀**設定の使用時はそのような結果になりません。66 ページを参照してください。境界を選択するには、まずカーソルを合わせます。選択されていない境界の場合、境界が赤色の強調表示になります。マウスの左ボタンで境界をクリックして選択します。境界は青色になります。その境界番号が、対応する境界条件の**設定**ウィンドウの**選択**リストに表示されます。境界を選択して、カーソルを再び合わせると、境界は緑色になります。緑色に強調表示された境界をクリックすると、その境界の選択が解除され、再びグレーになります。同じ選択と選択解除の操作方法は、ジオメトリオブジェクト、ドメイン、境界、エッジ、ポイントに適用できます。

以下の図は、境界のさまざまな選択状態です。



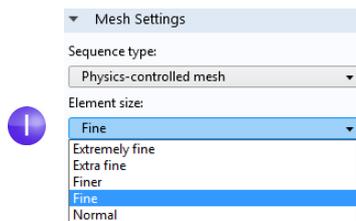
手前のサーフェスに隠れている内部サーフェスを選択するには、マウスのスクロールホイールを回転するか、キーボードの上矢印と下矢印を使用するか、タッチパッドで2本指ドラッグを実行して、マウスポインタ位置の境界の選択を巡回します。

## メッシュ

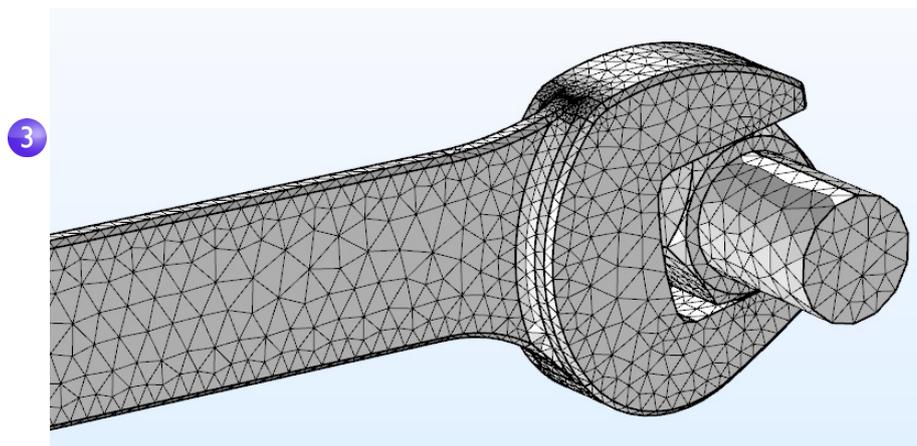
メッシュ設定では、モデルを離散化するための有限要素メッシュの分解能を決定します。有限要素法では、モデルを幾何学的に単純な形状の小さい要素に分割します。今回は、四面体です。各四面体で、多項式関数を使用して、構造変位場の近似値を求めます。つまり、3方向の座標系のそれぞれで、オブジェクトの変形度を求めます。

この例では、ジオメトリに小さいエッジと面があるため、デフォルト設定よりも多少細かいメッシュ定義になります。結果的に、応力場の変化でよりよい解と、正確な結果が得られます。計算精度向上のためにメッシュサイズを小さくすると、確実に処理速度が犠牲になり、さらに、通常メモリ消費量が増えます。

- 1 **モデルビルダーのコンポーネント 1**で、**メッシュ 1**▲をクリックします。**メッシュの設定**ウィンドウの**メッシュ設定**で、**要素サイズ**リストから**細かい**を選択します。



- 2 **設定**ウィンドウまたは**メッシュ** ツールバーの**全作成**ボタン■をクリックします。
- 3 数秒すると、**グラフィックス**ウィンドウにメッシュが表示されます。レンチを回転させて、要素サイズ分布を調べます。

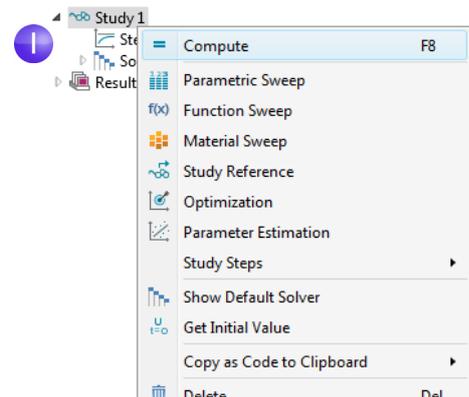


## スタディ

モデルをセットアップするとき、まず最初に**定常**スタディを選択します。これは定常ソルバーを使用することを意味します。そのためには、時間的な荷重、変形、応力の変化がないことが前提になります。ソルバーを開始するには：

1 **スタディ**  を右クリックし、**計算**  を選択し(または F8 を押し)ます。

数秒かけて計算が終わると、**グラフィックス**ウィンドウにデフォルトプロットが表示されます。計算に関するその他の有用情報が**メッセージ**ウィンドウと**ログ**ウィンドウに表示されます。**グラフィックス**ウィンドウの**メッセージ**タブと**ログ**タブをクリックすると、利用できる情報の種類が表示されます。**メッセージ**ウィンドウは、リボンの**ホーム**タブの**ウィンドウ**ドロップダウンリストからも開くことができます。

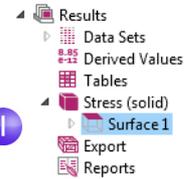


```
Messages Progress Log
Stationary Solver 1 in Study 1/Solution 1 (sol1) started at 13-May-2016 17:36:24.
Linear solver
Number of degrees of freedom solved for: 108483.
Symmetric matrices found.
Scales for dependent variables:
Displacement field (Material) (comp1.u): 1
Orthonormal null-space function used.
Iter SolEst Damping Stepsize #Res #Jac #Sol LinErr LinRes
1 0.85 1.0000000 0.85 1 1 1 5e-007 2.3e-009
Stationary Solver 1 in Study 1/Solution 1 (sol1): Solution time: 5 s
Physical memory: 1.77 GB
Virtual memory: 2.1 GB
```

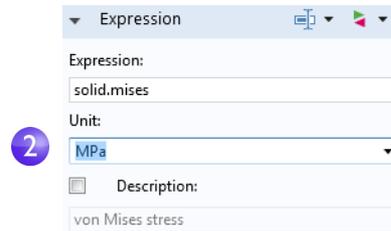
## 結果

**グラフィックス**ウィンドウのデフォルトサーフェスプロットに、変形サブノードで可視化した変位とともにミーゼス応力が表示されます。以下のステップに従って、デフォルト単位 (N/m<sup>2</sup>) を、より適切な MPa に変更します。

- 1 モデルビルダーで、結果> 応力 (ソリッド) ノードを展開し、サーフェス 1 をクリックします。

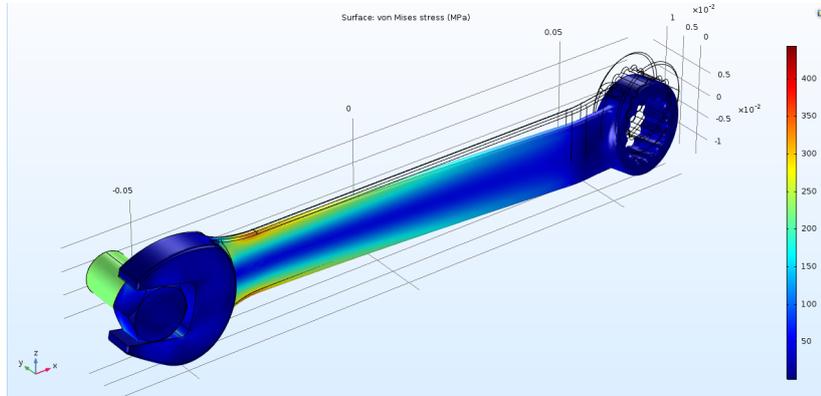


- 2 式の設定ウィンドウで、単位リストから、MPa を選択 (またはフィールドに MPa と入力) します。



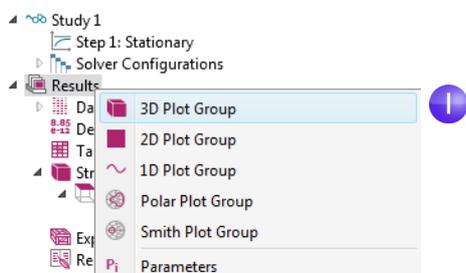
- 3 サーフեսプロットの設定ウィンドウのツールバーのプロットボタンをクリックし、グラフィックスウィンドウツールバーのデフォルト 3D ビューへ移動ボタンをクリックします。

加えた鉛直荷重下のボルトとレンチにミーゼス応力分布が表示されます。

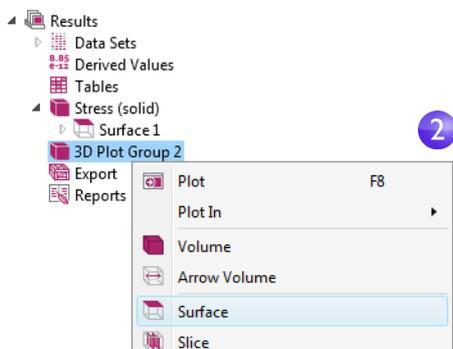


レンチなどの工具に使用する代表的なスチールの場合、降伏応力は約 600 MPa です。これは、可塑性変形 150 N 荷重 (約 34 重量ポンド) に近いことを表します。さらに、安全マージンをたとえば3倍取ることも可能です。レンチのどの部分に可塑性変形のリスクがあるかは、`solid.mises>200[MPa]` のような不等式のプロットで、簡単に判断できます。

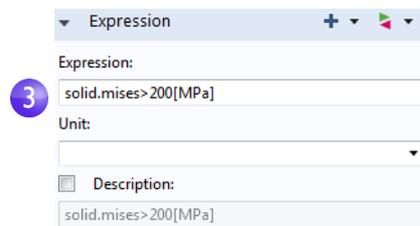
- 1 結果ノード  を右クリックし、3D プロットグループ  を追加します。



- 2 3D プロットグループ 2 ノード  を右クリックし、サーフェス  を選択します。



- 3 サーフェスの設定ウィンドウで、式を置換ボタン  をクリックし、ダブルクリックして、モデル > コンポーネント 1 > 固体力学 > 応力 > **solid.mises - ミーゼス応力** を選択します。あらかじめ変数名がわかっている場合、式フィールドに直接 **solid.mises** と入力します。この式を次のように編集します：  
**solid.mises > 200[MPa]**。

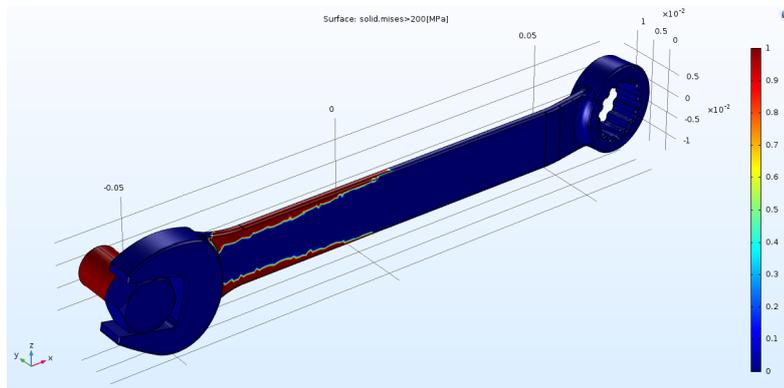


これは、真の 1 または偽の 0 を評価する論理式です。式の評価が 1 のエリアでは、安全マージンを超えます。

- 4 プロットボタン  をクリックします。

**5 モデルビルダーで、3D プロットグループ 2 をクリックします。3D プロットグループの名前を変更** ダイアログボックスで F2 を押し、安全マージンを入力します。OK をクリックします。

得られるプロットには、ボルトの応力が高いと表示されますが、この演習で問題にしているのはレンチの応力です。安全マージン 3 倍で 150 N 荷重のレンチを余裕を持って認定するためには、ハンドルデザインを幅広にするなど幾分の変更が必要です。



さまざまな理由で製造元が、レンチに非対称デザインを選択したのだということがわかったかもしれません。そのため、レンチを反転すると異なる応力場になる可能性があります。そこで、異なる方向から同じ力をかけて、最大ミーゼス応力を可視化して、何らかの違いがあるか確認します。

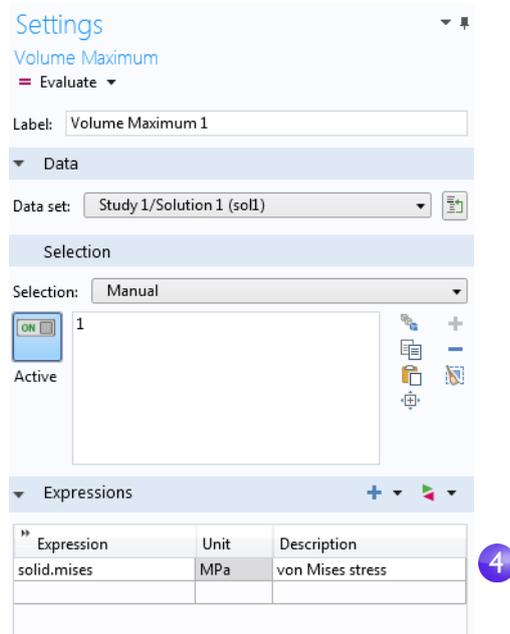
## 収束解析

メッシュ収束解析を進めると、レンチにおける計算した最大ミーゼス応力の精度を確認することができます。そのためにはメッシュをさらに細分化して、自由度 (DOF) を大きくします。

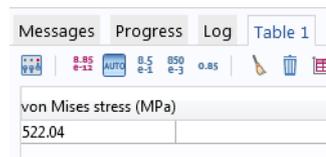
⚠ このセクションでは、機能性について一部さらに詳しく解説します。初回は、以下のステップは読み飛ばしてもかまいません。以下の収束解析を実行するには、4GB メモリ容量 (RAM) 以上のコンピュータを推奨します。

## 最大ミーゼス応力の評価

- 1 レンチで最大ミーゼス応力を調べるには、モデルツリーの**結果**セクションで**計算値**  $8.85 \times 10^{-12}$  ノードを右クリックし、**最大 > 体積最大値**  $MAX$  を選択します。
- 2 **体積最大値**の設定ウィンドウの**選択**で、**手動**を選択し、**グラフィックス**ウィンドウのレンチをクリックしてレンチ(ドメイン1)を選択します。対象になるのは、レンチ領域の値のみであり、ボルトの値は無視します。
- 3 **式**テーブルの最初の行の、**式**列に、**solid.mises** と入力します。**式を置換**ボタン  をクリックしてもミーゼス応力の式を検索できます。
- 4 **テーブル**に、**単位**として **MPa** と入力します。

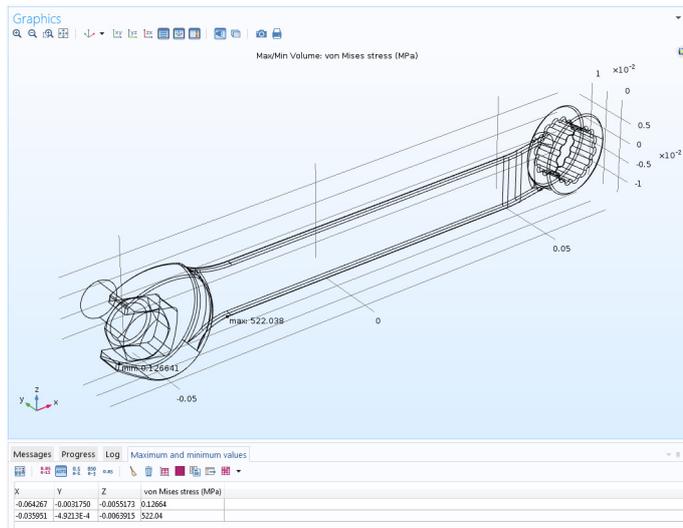


- 5 **体積最大値**の設定ウィンドウで、**評価**をクリックして、最大応力を評価します。結果は、約 522 MPa がテーブルウィンドウに表示されます。
- 6 どこで最大値が得られるかを確認するため、**最大/最小体積**プロットを使用します。**結果**ノード  を右クリックし、**3D プロットグループ**  を追加します。
- 7 **3D プロットグループ 3**ノード  を右クリックし、さらに**プロット > 最大/最小体積**  選択します。



von Mises stress (MPa)
522.04

- 8 **最大/最小体積の設定** ウィンドウの**式**テキストフィールドに、`solid.mises` と入力します。
- 9 **式の設定** ウィンドウで、**単位**リストから **MPa** を選択 (またはフィールドに MPa と入力) します。
- 10 **プロット** ボタン  をクリックします。このプロットタイプでは、同時に最大値と最小値の場所、およびその座標位置も以下のテーブルに表示されます。



## メッシュのパラメーター化

ここでは、求解時にメッシュサイズを連続して微細化するためのパラメトリックスイープを定義し、最後に、最大ミーゼス応力対メッシュサイズをプロットします。まず、メッシュ密度を制御するパラメーターを定義します。

- 1 **モデルビルダー**で、**グローバル定義**  の下の**パラメーター**  $P_1$  をクリックします。
- 2 **パラメーターの設定** ウィンドウに移動します。**パラメーター** テーブル (またはフィールドのテーブルの下) に以下の設定値を入力します：
  - **名前**列またはフィールドに `hd` と入力します。このパラメーターは、パラメトリックスイープで使用して、要素サイズを制御します。
  - **式**列またはフィールドに `1` と入力します。
  - **説明**列かフィールドに**要素サイズデバイダー**を入力します。

3 今度は、名前  $h_0$ 、式  $0.01$ 、説明要素サイズの開始でもう 1 つパラメーターを入力します。このパラメーターでは、パラメトリックスイープ開始時の要素サイズを定義します。

Name	Expression	Value	Description
F	150[N]	150.00 N	Applied force
hd	1	1.0000	Element size divider
$h_0$	0.01	0.010000	Starting element size

4 モデルビルダーで、コンポーネント 1 の下のメッシュ 1 をクリックします。メッシュの設定ウィンドウで、シーケンスタイプリストからユーザー制御メッシュを選択します。

5 メッシュ 1 のサイズノード をクリックします。

6 サイズの設定ウィンドウで、要素サイズのカスタムボタンをクリックします。

要素サイズパラメーターで、以下の値を入力します：

- 最大要素サイズ フィールドに  $h_0/h_d$ 。
- 最小要素サイズ フィールドに  $h_0/(4 \cdot h_d)$ 。
- 最大要素増加率フィールドに 1.3。
- 曲率フィールドに 0.1。
- 狭小領域解像度フィールドに 0.2。

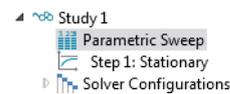
要素サイズパラメーターの詳細については 75 ページを参照してください。

Element Size Parameters	
Maximum element size:	$h_0/h_d$ m
Minimum element size:	$h_0/(4 \cdot h_d)$ m
Maximum element growth rate:	1.3
Curvature factor:	0.1
Resolution of narrow regions:	0.2

## パラメトリックスイープとソルバー 設定

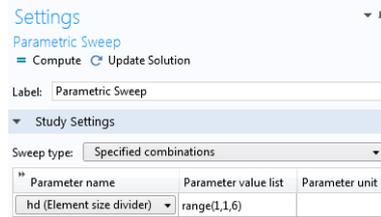
次のステップとして、パラメーター  $h_d$  のパラメトリックスイープを追加します。

1 モデルビルダーでスタディ 1 を右クリックし、パラメトリックスイープを選択します。パラメトリックスイープノードがモデルビルダーシーケンスに追加されます。



2 パラメトリックスイープの設定ウィンドウの、スタディ設定セクションのテーブルで、追加ボタン + をクリックします。テーブルのパラメーター名リストから、 $h_d$  を選択します。

- スweepする**パラメーター値**の範囲を入力します。**範囲** ボタンをクリックし、**範囲**ダイアログボックスに値を入力します。**開始**フィールドに、1 と入力します。**ステップ**フィールドに、1 と入力し、**終了**フィールドに、6 と入力します。**置換**をクリックします。**パラメーター値リスト**に**範囲 (1,1,6)** と表示されます。



上記の設定により、スweepの進捗につれてパラメーター hd の値は増加し、最大要素サイズと最小要素サイズは減少します。

パラメトリックスweepの定義の詳細については、127 ページを参照してください。

hd の最高値で、DOF 数は百万を超えます。したがって、よりメモリ効率の良い反復ソルバーに切り替えます。

- スタディ 1 > ソルバー 構成 > 解 1** の下で、**定常ソルバー 1** ノードを展開し、**定常ソルバー 1** を右クリックし、**反復** を選択します。**反復**ソルバー オプションでは、通常、メモリ使用量は減少しますが、効率的に計算を実行するためには、ソルバー設定のフィジックス固有の調整が必要な場合があります。
- 反復**の設定ウィンドウの**全般**の下で、**ソルバー**を**共役勾配**に変更します。
- 反復**の同じ**設定**ウィンドウで、**前処理**を**右**に設定します。(これは、低レベルソルバー オプションであり、この場合、本来表示されるはずの警告メッセージが表示されなくなります。ただし、この設定で、得られる解に影響はありません。前処理は、反復ソルバーを使用するために、有限要素方程式系の準備に使用する数学的変換です。)
- 反復 1**ノード を右クリックし、**マルチグリッド** を選択します。
- マルチグリッド 1**ノードの**設定**ウィンドウで、**ソルバー**を**平滑化アグリゲーション AMG**に変更します。
- スタディ 1**ノードをクリックし、**設定**ウィンドウから、またはノードを右クリックして**計算** を選択します。リボンの**ホーム**または**スタディ**タブの**計算**をクリックしても同じ結果が得られます。計算時間は数分であり(コンピュータハードウェアによる)、必要なメモリ容量は約 4GB です。

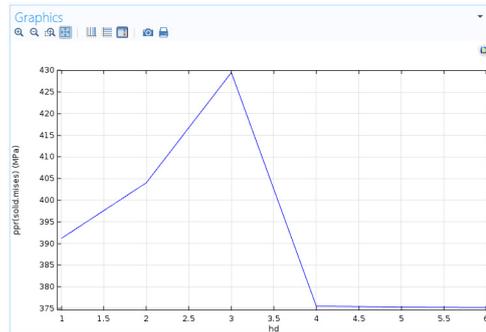
## 結果解析

最終ステップとして、テーブルの最大ミーゼス応力を表示してパラメトリックスweepの結果を解析します。

- モデルビルダーの**結果 > 計算値**の下で、**体積最小 1**ノード **MAX** を選択します。パラメトリックスweepの解は、**スタディ 1/パラメトリック解 1**という名前の新しい**データセット**に保存されます。ここで、**体積最大値設定**もそれに応じて変更します。

- 2 体積最大値の設定ウィンドウで、データセットをスタディ I/パラメトリック解 I に変更します。
- 3 体積最大値の設定ウィンドウ最上部の評価ボタン横の矢印をクリックし、新規テーブルを選択します。この評価には、約 20 秒程度かかります。
- 4 テーブルの結果をプロットするには、テーブルウィンドウ最上部のテーブルグラフ  ボタンをクリックします。

hd	ppr(solid.mises) (MPa)
1.0000	391.20
2.0000	404.04
3.0000	429.50
4.0000	375.53
5.0000	375.32
6.0000	375.23



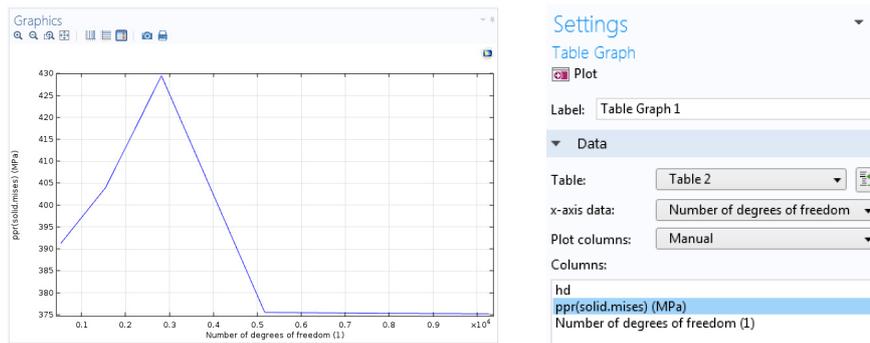
最大値対 DOF 数のプロットも興味ある結果が期待できます。この作業には、組み込み変数 `numberofdofs` を使用します。

- 5 計算値ノード  を右クリックし、グローバル評価  を選択します。
- 6 グローバル評価の設定ウィンドウで、データセットをスタディ I/パラメトリック解 I に変更します。
- 7 式フィールドに、`numberofdofs` を入力します。
- 8 グローバル評価の設定ウィンドウで、評価ボタン横の矢印をクリックし、オプションを選択してテーブル 2 で評価します。その結果、各パラメーターの DOF 値が前回評価したデータの横に表示されます。

この収束解析により、レンチハンドルの最大ミーゼス応力の計算値が、約 52,000 DOF のメッシュの元の 391 MPa から、約 1,000,000 DOF のメッシュの 375 MPa まで減少することがわかります。さらにこの解析では、基本的に、500,000 DOF で、1,000,000 DOF 同じ精度が得られることがとわかります。以下のテーブルを参照してください。

自由度	最大ミーゼス応力 (MPa) の計算値
52,269	391.2
155,097	404.0
281,886	429.5
516,930	375.5
775,968	375.3
1,027,374	375.2

以下の図は、関連テーブルグラフとテーブルグラフ設定ウィンドウです。



実行中の COMSOL Multiphysics のバージョンによっては、メッシュ化アルゴリズムで生成される要素数の変動によって以上の値が少し異なる場合があります。

以上でレンチチュートリアルは終了です。

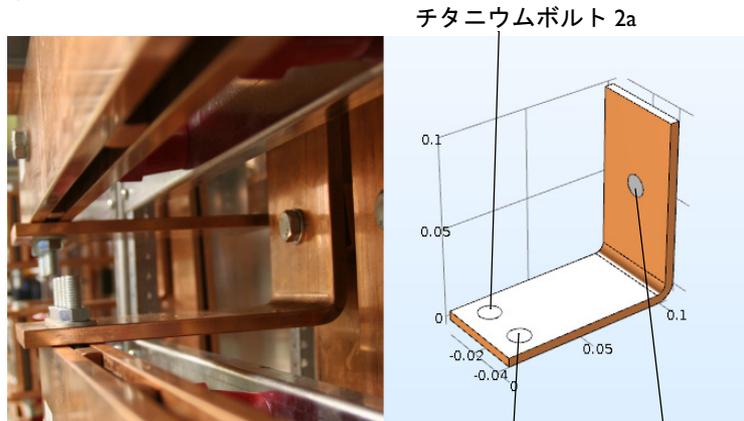
## 例 2 : バスバー — マルチフィジックスモデル

### バスバーの電気加熱

このチュートリアルでは、モデルビルダーを使用した COMSOL Multiphysics におけるマルチフィジックスモデリングの考え方を紹介します。さまざまな構成済みマルチフィジックスの組み合わせの 1 つの使用方法を学習し、その後、解析には当初含まれていないフィジックス現象の効果を追加します。最後に、本格的なマルチフィジックスモデルを構築します。

これから作成するモデルでは、工業環境で大きな直流電流を伝えるために設計されたバスバーを解析します。バスバーに電流 (ボルト 1 から ボルト 2a と 2b) が流れると、抵抗損失で熱が生じます。この現象をジュール熱と呼びます。バスバーは銅製であり、ボルトはチタニウム合金製です。バスバーボルトは、通常スチール製ですが、この例では非常に腐食性の高い環境を想定しています。したがって、チタニウム合金を選択しました。

通常の動作条件下では、銅では電流がよく流れます。しかしこの例では、ボルトからバスバーに生じる望ましくない電気負荷の効果を表しています。異なる材料があるという事実が重要です。これは、チタニウムは銅よりも電気伝導率が低く、電気密度が高くなるためです。



チタニウムボルト 2a      チタニウムボルト 2b      チタニウムボルト 1

シミュレーションの目的は、バスバーの加熱の度合いを正確に計算することです。基本マルチフィジックス現象を捉えることができれば、バスバーに構造応力と歪みを生ずる熱膨張と、気流による冷却効果を検証できます。

ジュール熱効果は、電流とエネルギーの保存則で説明できます。この式を解くことで、2つの保存則により、それぞれ温度と電場が得られます。ボルト接触面以外のすべての面は、バスバーを取り囲む空気の自然対流によって冷却されます。ボルトの露出部分は、装置の冷却や加熱に寄与しません。右上垂直ボルト面の電位は 20 mV であり、下側ボルトの2つの水平面の電位は 0 V です。これは、この種のバスバーの、危険性の高い、比較的高い負荷に対応しています。境界上の全電流の供給能力など、電磁気学解析のより高度な境界条件は、AC/DC モジュールで利用できます。

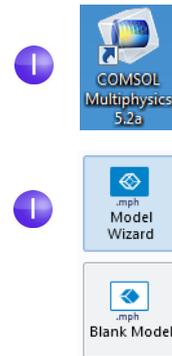
### バスバーモデルの概要

このチュートリアルでは、COMSOL Multiphysics で利用できるさまざまなオプションの一部を、徹底した高度な内容のトピックで紹介합니다。このチュートリアルで取り上げるトピックは、以下のとおりです：

- 「パラメーター、関数、変数、連成」 97 ページ では、関数とコンポーネントカップリングの定義方法を紹介합니다。
- 「材料プロパティと材料ライブラリ」 100 ページ では、材料のカスタマイズ方法、および、それを自分専用の材料ライブラリに追加する方法を紹介합니다。
- 「メッシュの追加」 103 ページ では、2 種類のメッシュを追加して、グラフィックスウィンドウで比較します。
- 「フィジックスの追加」 105 ページ では、固体力学と層流をバスバーモデルに追加して、マルチフィジックス機能の概要を把握します。
- 「パラメトリックスイープ」 127 ページ では、パラメーターを使用してバスバーの幅を変更する方法と、さまざまなパラメーター値で求解する方法を紹介합니다。結果として、幅の関数としての平均温度のプロットが得られます。
- 「パラレルコンピューティング」 141 ページ では、クラスターにおける求解方法の概要を解説します。
- 「COMSOL Multiphysics Client-Server」 144 ページ では、COMSOL Multiphysics クライアント-サーバー操作モードの使用方法を紹介합니다。

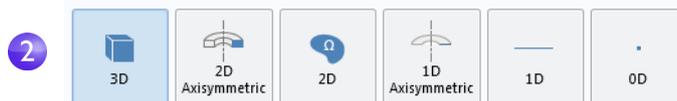
## モデルウィザード

- 1 本ソフトウェアを開くには、デスクトップで COMSOL Multiphysicsicon をダブルクリックします。



本ソフトウェアが開いたら、**モデルウィザード**ボタンをクリックします。モデルウィザードは、**ファイルメニュー**で**新規**を選択しても開始できます。次に、**モデルウィザード**を選択します。

- 2 空間次元を選択ウィンドウで、**3D** をクリックします。

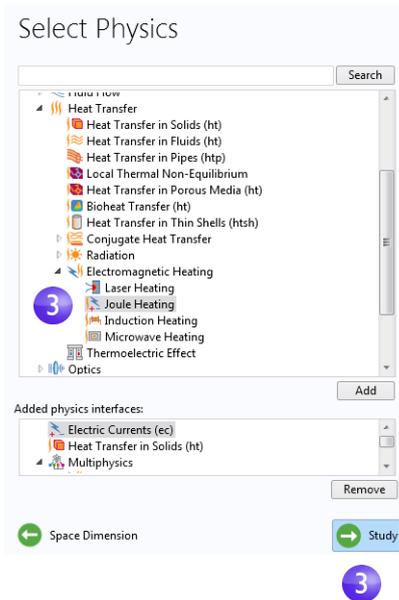


- 3 **フィジックスを追加**ウィンドウで、**伝熱 > 電磁加熱**ノードを展開します。次に、**ジュール熱** を右クリックし、**フィジックスを追加**を選択します。**スタディ** ボタンをクリックします。

**追加**ボタンをダブルクリックするか、クリックしても、フィジックスを追加できます。

(その他、フィジックスを追加する方法としては、モデルビルダーで**コンポーネント**ノードを右クリックし、**フィジックスを追加** を選択して**フィジックスを追加**ウィンドウを開く方法があります。)

インストールしたアドオンモジュールによっては、フィジックスリストの項目が少ない場合があります。右図は、すべてのアドオンモジュールがインストールされている例です。



4 **スタディを選択** ウィンドウで、クリックして **定常**  スタディタイプを選択します。

**完了** ボタンをクリックします。

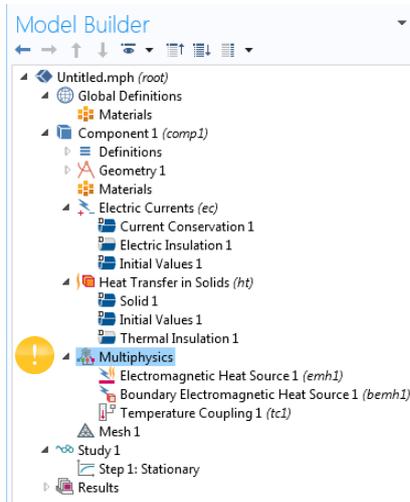
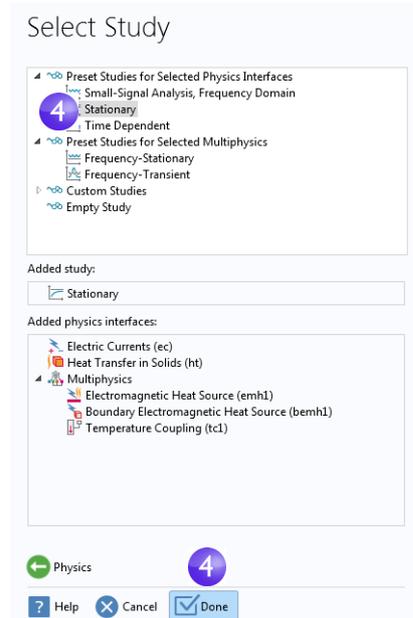
定常スタディを選択するのは、バスバーが周囲との熱平衡に達したときのバスバーの定常温度を求解するためです。

構成済みの **スタディ** には、選択したフィジックスインターフェースの組み合わせに対応したソルバーと式設定があります。この例では、**ジュール熱** です。

**カスタムスタディ** ブランチ  からの選択には、手動調整が必要です。

インストールしたアドオンモジュールによっては、スタディリストのスタディタイプが少ない場合があります。

 **ジュール熱** マルチフィジックスインターフェースは、2つのフィジックスインターフェース、**電流**と**固体中の伝熱**からなり、マルチフィジックスブランチに表示されるマルチフィジックス連成、**電磁熱源**と**温度連成**を備えています。(境界**電磁熱源**は、薄いシェルのモデリング用であり、この例では使用しません。)マルチフィジックス目的のフィジックスインターフェースは、非常に柔軟性に富み、関連フィジックスインターフェースの機能をフルに活用できます。



## グローバル定義

時間節約のため、ファイルからジオメトリを読み込むことを推奨します。その場合、スキップして「ジオメトリ」60ページに進むことができます。

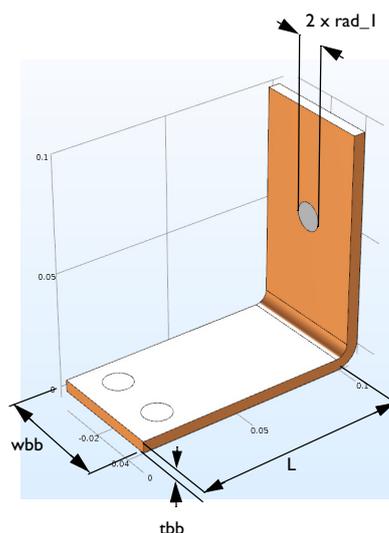
これに反して、ジオメトリを自分で描画する場合は、**グローバル定義**ノードでパラメーターを定義してください。最初に、以下のステップ1から3でモデルのパラメーターリストを定義します。次に、ステップ4を済ませて、セクション「付録A—ジオメトリの構築」146ページに進みます。

モデルビルダーの**グローバル定義**ノード  には、**パラメーター**、**変数**、**関数**が、グローバルスコープとともに保存されています。モデルツリーでは、複数のモデルコンポーネントを同時に保存でき、グローバルスコープの定義は、すべてのコンポーネントで使用できます。この例では、このパラメーターを使用するのは**コンポーネント**ノードのみです。スコープをこのコンポーネント1つに限定する場合は、たとえば、対応する**コンポーネント**ノードの直下で直接アクセスできる**変数**と**関数**を**定義**サブノードで定義します。ただし、ここでは、**パラメーター**は定義できません。これは、**グローバル定義**で定義した**パラメーター**は必ずグローバルになるからです。

この例では後でジオメトリのパラメトリックスタディを実行します。従って、最初からパラメーターでジオメトリを定義してください。このステップでは、バスバーの下側の長さのパラメーター  $L$ 、チタニウムボルトの半径  $rad\_1$ 、バスバーの太さ  $tbb$ 、装置の幅  $wbb$  を入力します。

さらに、メッシュを制御するパラメーター  $mh$ 、自然対流による冷却の熱伝導係数を制御するパラメーター  $htc$ 、バスバー全体の電圧を制御するパラメーター  $V_{tot}$  も追加します。

- 1 **グローバル定義**  と **パラメーター**  $P_1$  を右クリックします。**パラメーター**テーブルで、**名前**の下最初の行をクリックし、 $L$  と入力します。
- 2 **式**の下最初の行をクリックし、 $L, 9[cm]$  の値を入力します。角括弧内に単位を入力できます。



- 3 続けて他のパラメーターを入力します:以下の**パラメーター**リストに従って rad\_1, tbb, wbb, mh, htc, Vtot を入力します. モデルを他の人と共有するときのために,そして自分の将来の覚えとして,変数の説明を入れておくといでしょう.

Parameters			
Name	Expression	Value	Description
L	9[cm]	0.09 m	Length
rad_1	6[mm]	0.006 m	Bolt radius
tbb	5[mm]	0.005 m	Thickness
wbb	5[cm]	0.05 m	Width
mh	6[mm]	0.006 m	Maximum element size
htc	5[W/m^2/K]	5 W/(m^2·K)	Heat transfer coefficient
Vtot	20[mV]	0.02 V	Applied voltage

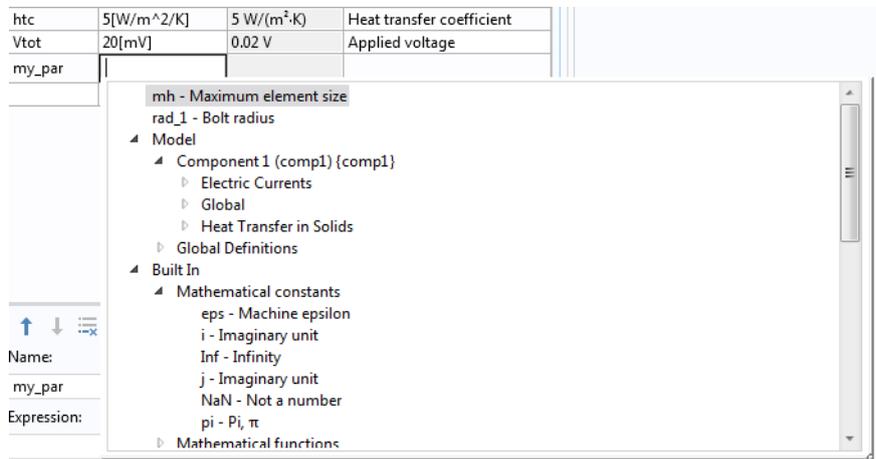
クイックアクセスツールバーの**保存**ボタン  をクリックし,モデルに busbar.mph と名前を付けるか,対応する **ファイル**メニューオプションを使用します.「付録A—ジオメトリの構築」146ページに進みます.

## オートコンプリートとパラメーターと変数の検索

モデルツリーには,多くのパラメーターと変数があります.それらが簡単に見つかるよう,以下の説明のようなオートコンプリートツールと検索ツールを用意しました.

### オートコンプリート

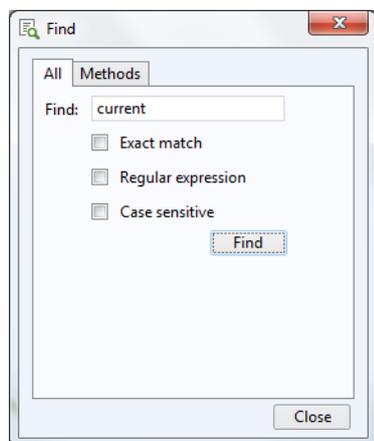
オートコンプリートとパラメーターと変数名には Ctrl+ スペースを使用します.たとえば,**パラメーター**テーブルで,空の**式**フィールドをクリックし,Ctrl+ スペースを押すと,以下の図のように,パラメーターと変数のリストが表示されます.



この機能は、モデルビルダーでその他の編集フィールドでも利用できます。

## 検索

モデルツリーでパラメーターと変数を検索するには、**クイックアクセスツールバー**で**検索**ボタンをクリックするか、キーボードショートカット Ctrl+F を使用します。**検索**ウィンドウが開きます。



検索結果は、**検索結果** ウィンドウに、以下の図のように表示されます。

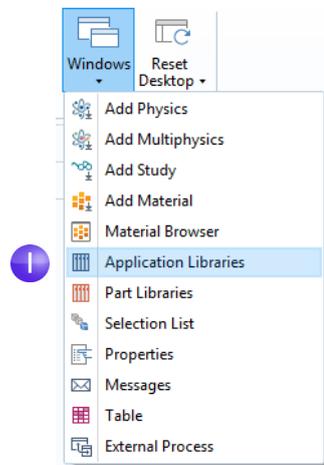
Node	Type	Text
Electric Currents (ec) {ec}	Node	Electric Currents
Electric Currents (ec) {ec}	Node	Electric Currents
Current Conservation 1 {cucn1}	Node	Current Conservation 1
Current Conservation 1 {cucn1}	Node	Current Conservation
Electromagnetic Heat Source 1 (emh1) {emh1}	Setting	Electric Currents (ec) {ec}
Boundary Electromagnetic Heat Source 1 (bemh1) {bemh1}	Setting	Electric Currents (ec) {ec}
Temperature Coupling 1 (tcl) {tcl}	Setting	Electric Currents (ec) {ec}
Current Density {pg4}	Node	Current Density
Surface 1 {surf1}	Setting	Current density norm

このウィンドウの任意の行をダブルクリックすると、対応する**設定**ウィンドウが表示されます。

## ジオメトリ

この項では、アプリケーションライブラリからジオメトリを開く方法を解説します。フィジックス、スタディ、パラメーター、ジオメトリは、これから開こうとするモデルファイルにあります。

- ホームタブの**ウィンドウ**ドロップダウンメニューから**アプリケーションライブラリ**を選択します。



**2 アプリケーションライブラリツリーの COMSOL Multiphysics > マルチフィジックスで busbar geom を選択します。**

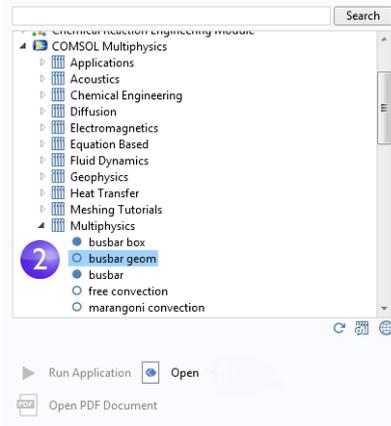
ファイルを開く方法は次のとおりです：

- 名前をダブルクリックする
- 右クリックし、メニューからオプションを選択する
- ツリーの下の方のボタンの 1 つをクリックする

Untitled.mph の保存を確認するプロンプトが表示されたら、**いいえ**を選択できます。

このファイルのジオメトリがパラメータ化されます。次の数ステップでは、幅パラメータ *wbb* でさまざまな値を試してみます。

Application Libraries



**3 グローバル定義  $\oplus$  の下のパラメータノード  $P_1$  をクリックします。**

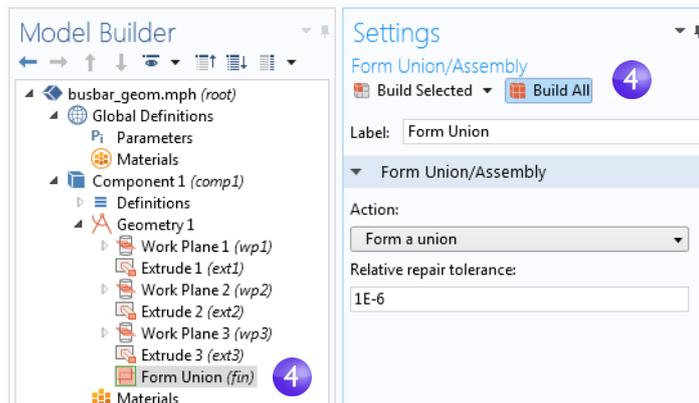
パラメータの設定ウィンドウで、*wbb* パラメータの式列をクリックし、10[cm] と入力してバスバーの幅を変更します。

Parameters

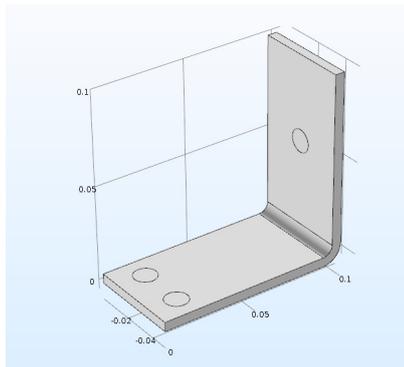
Name	Expression	Value
L	9[cm]	0.09 m
rad_1	6[mm]	0.006 m
tbb	5[mm]	0.005 m
wbb	10[cm]	0.1 m
mh	6[mm]	0.006 m
htc	5[W/m <sup>2</sup> /K]	5 W/(m <sup>2</sup> ·K)
Vtot	20[mV]	0.02 V

**4 モデルビルダーのコンポーネント 1 > ジオメトリ 1 で、フォームユニオンノード  $\square$  をクリックし、次に設定ウィンドウ  $\square$  の全作成ボタンをクリックしてジオメトリシーケンスに戻ります。あるいは、リボンを使用し、ホームタブのジオメトリグループから全作成をクリックしても同じ結果が得られます。**

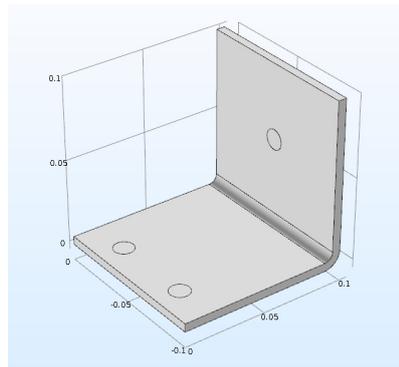
あるいは、リボンを使用し、ホームタブのジオメトリグループから全作成をクリックしても同じ結果が得られます。



- 5 **グラフィックツールバーで、範囲をズームボタン  をクリックして、グラフィックスウィンドウで幅が広がったバスバーを確認します。**



wbb = 5cm



wbb = 10cm

- 6 **グラフィックスウィンドウのジオメトリでテストします：**

- バスバーを回転するには、**グラフィックスウィンドウ**でポインタを任意の場所で、クリックアンドドラッグします。
- バスバーを移動するには、右クリックして、ドラッグします。
- ズームインとズームアウトをするには、スクロールホイールをクリックし、そのままドラッグします。
- 元の位置に戻るには、ツールバーの**デフォルト 3D ビューへ移動**ボタン  をクリックします。



- 7 **パラメーターテーブルに戻り、wbb の値を 5[cm] に戻します。**

- 8 **モデルビルダーで、フォームユニオンノード  をクリックし、全作成ボタン  をクリックしてジオメトリシーケンスに戻ります。**

- 9 **グラフィックツールバーで、範囲をズームボタン  をクリックします。**

Parameters		
Name	Expression	Value
L	9[cm]	0.09 m
rad_1	6[mm]	0.006 m
tbb	5[mm]	0.005 m
wbb	5[cm]	0.05 m
mh	6[mm]	0.006 m
htc	5[W/m <sup>2</sup> /K]	5 W/(m <sup>2</sup> ·K)
Vtot	20[mV]	0.02 V

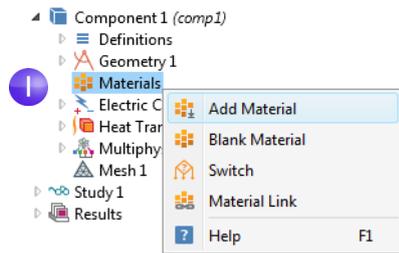
10 自分でジオメトリを構築する場合は、busbar.mph ファイルをすでに使用していますが、そのファイルをアプリケーションライブラリから開いた場合は、ファイルメニューから**名前を付けて保存**を選択し、モデル名をbusbar.mphに変更します。

ジオメトリの作成やインポートの後、材料を定義します。

## 材料

**材料**ノード  には、**コンポーネント**ノードのすべてのフィジックスの材料プロパティと幾何学的領域が保存されています。バスバーは銅製であり、ボルトはチタニウム合金製です。これら両方の材料は、**組み込み**材料データベースにあります。

1 **モデルビルダー**で、**コンポーネント** | > **材料**  を右クリックし、**材料を追加**  を選択します。デフォルトで、このウィンドウはデスクトップの右側に表示されます。このウィンドウは、ウィンドウタイトルをクリックして、それを新しい位置までドラッグすると移動できます。このウィンドウをドラッグする間、ドッキング用の複数のオプションが表示されます。

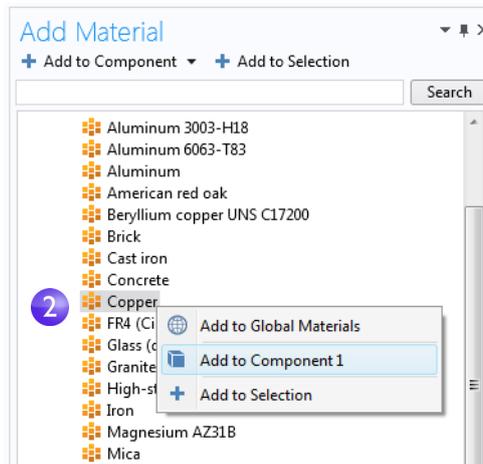


1  最初に材料を定義せずに操作しようとする時、**材料**ノードの左下隅に、赤色の×が表示されます。これについては、次の数ステップで検討してみましょう。

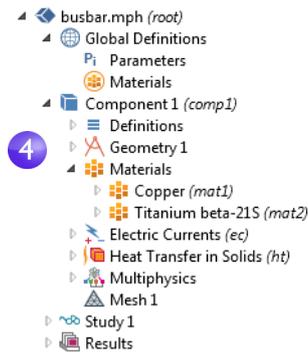
2 材料を追加ウィンドウで、組み込み材料フォルダーを展開し、銅を選択します。銅を右クリックし、コンポーネント 1 に追加を選択します。あるいは、ダブルクリックしても同じ結果が得られます。

銅ノードがモデルビルダーに追加されます。

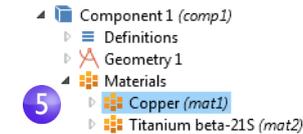
3 材料を追加ウィンドウで、組み込み材料フォルダーリストのチタニウム beta-21S までスクロールします。右クリックして、コンポーネント 1 に追加を選択します。



4 モデルビルダーで、ジオメトリ 1 ノードを折り畳んで、モデル概要を表示します。



5 材料ノードの下で、銅をクリックします。



6 材料の設定ウィンドウで、材料の内容セクションを検討します。

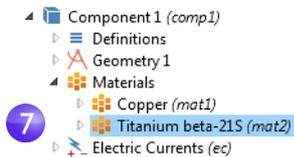
Property	Name	Value	Unit	Property group
<input checked="" type="checkbox"/> Electrical conductivity	sigma	5.998e7[S/m]	S/m	Basic
<input checked="" type="checkbox"/> Heat capacity at constant pressure	Cp	385[J/(kg*K)]	J/(kg*K)	Basic
<input checked="" type="checkbox"/> Relative permittivity	epsilon_r	1	1	Basic
<input checked="" type="checkbox"/> Density	rho	8960[kg/m^3]	kg/m^3	Basic
<input checked="" type="checkbox"/> Thermal conductivity	k	400[W/(m*K)]	W/(m*K)	Basic
Relative permeability	mu_r	1	1	Basic
Coefficient of thermal expansion	alpha	17e-6[1/K]	1/K	Basic
Young's modulus	E	110e9[Pa]	Pa	Young's modulus and Poisson's ratio
Poisson's ratio	nu	0.35	1	Young's modulus and Poisson's ratio
Reference resistivity	rho_0	1.72e-8[ohm...]	Ω·m	Linearized resistivity
Resistivity temperature coefficient	alpha	0.0039[1/K]	1/K	Linearized resistivity
Reference temperature	Tref	298[K]	K	Linearized resistivity

材料の内容セクションには、モデルの材料プロパティの使用法に役立つ情報が収められています。フィジックスに必要で、材料から利用できるプロパティは、緑色のチェックマーク  が付きます。フィジックスでも必要で、材料にないプロパティは、警告記号  が付きます。利用できるがモデルで使っていないプロパティは、マークが付きません。

 上の表の熱膨張係数は使用しませんが、後で、熱誘導応力と歪みをモデルに追加するときが必要です。

銅材料は最初に追加するため、デフォルトで、すべてのパーツに銅材料が割り当てられます。次のステップでは、チタニウムプロパティをボルトに割り当てます。この割り当てで、それらの材料における銅材料の割り当てがオーバーライドされます。

7 モデルビルダーで、チタニウム beta-21S  をクリックします。

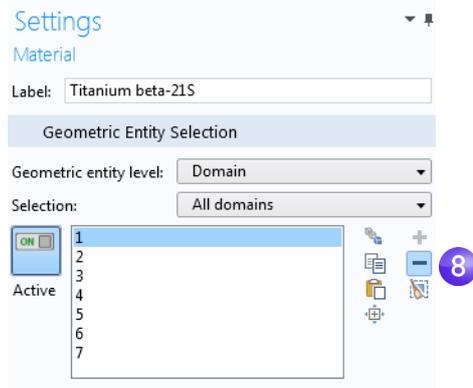


8 選択リストから、すべてのドメインを選択し、リストのドメイン 1 をクリックします。これで、選択リストからドメイン 1 が削除されます。

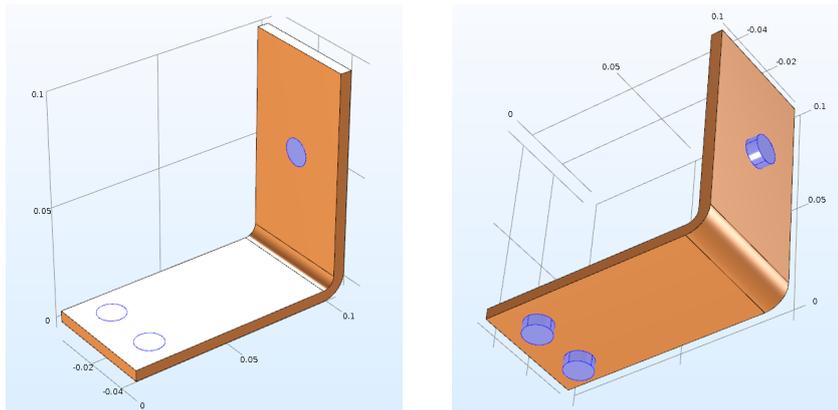
選択リスト (あるいは、境界、エッジ、または点などの幾何学的エンティティ) からドメインを削除するには、これら 2 つの方法のいずれかを利用できます。

- 材料の設定ウィンドウにある選択リストで、ドメイン 1 をクリックします。次に、選択から削除ボタン  をクリックするか、キーボードの Delete を押します。

- あるいは、**グラフィックス**ウィンドウで、ドメイン1をクリックして、選択リスト から削除します。

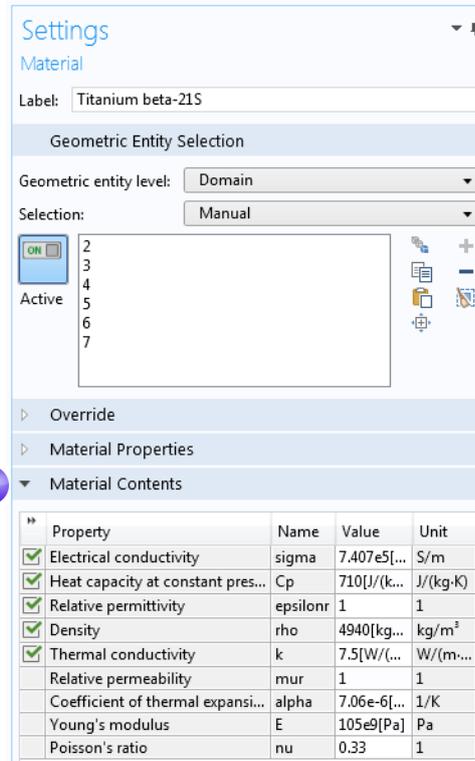


- 8** ドメイン 2, 3, 4, 5, 6, 7 は青色で強調表示されます。

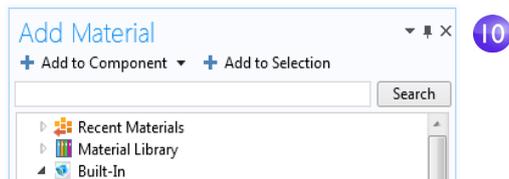


- !** 銅コンポーネントを実際の材料の色でレンダリングするには、**ファイル**メニューから**環境設定**ウィンドウを開きます。**グラフィックスとプロットウィンドウ** ページで、**材料の色とテクスチャーを表示**チェックボックスを選択します。この方法ではその他の材料の実材料レンダリングも可能です。

9 材料の設定ウィンドウで、チタニウム材料の**材料の内容**セクションを必ず確認してください。フィジックスが使用するプロパティはすべて、緑色のチェックマーク  が付いているはずです。



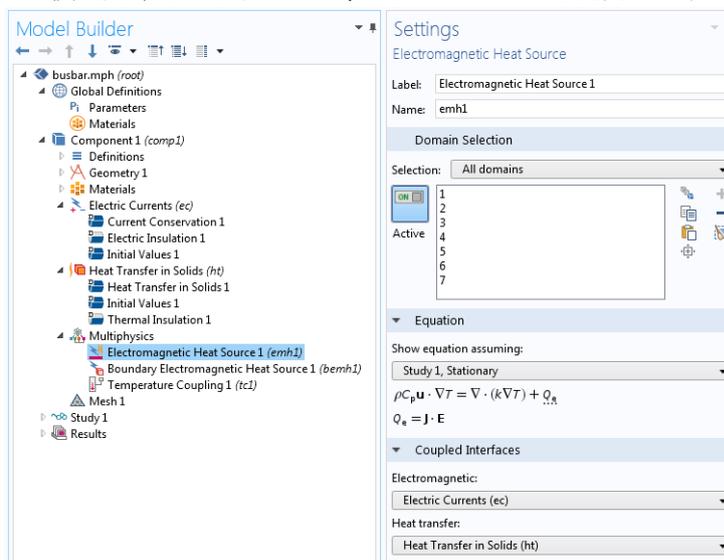
10 右上隅のアイコンをクリックするか、リボンの**ホーム**タブの**材料グループ**で**材料を追加**切り替えボタン  をクリックして、**材料を追加**ウィンドウを閉じます。



## フィジックスと境界条件

次に、フィジックスドメイン設定を調べて、熱伝導問題と電流の導通の境界条件を設定します。

**モデルビルダー**ウィンドウで、**ジュール熱**マルチフィジックスインターフェースのデフォルトフィジックスノードを調べます。最初に、**材料**ノードを折り畳みます。次に、**電流** ノード、**固体中の伝熱** ノード、**マルチフィジックス** ノードの横の矢印をクリックして、これらのノードを展開します。



ノードのアイコン ( ) の左上隅の **D** は、それがデフォルトノードであることを表します。

各フィジックスノードの設定ウィンドウの方程式セクションに、求解中の式が表示されます。

デフォルトの方程式のフォームは、モデルウィザードで追加したスタディから継承します。**ジュール熱**マルチフィジックスインターフェースの場合、方程式は温度と電位に関する式です。

- ⚠ **設定**ウィンドウで常時、方程式を表示するには、**モデルビルダー**ツールバーの**表示**ボタン ( ) をクリックし、**方程式セクション**を選択して、横のチェックマークを表示します。

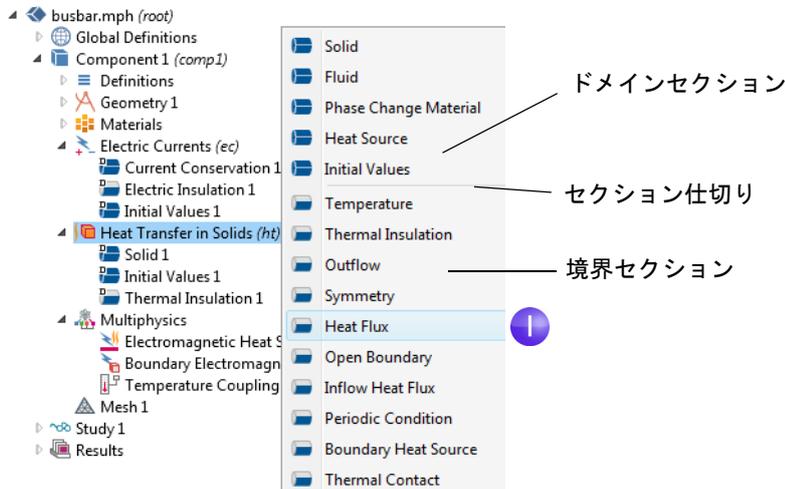
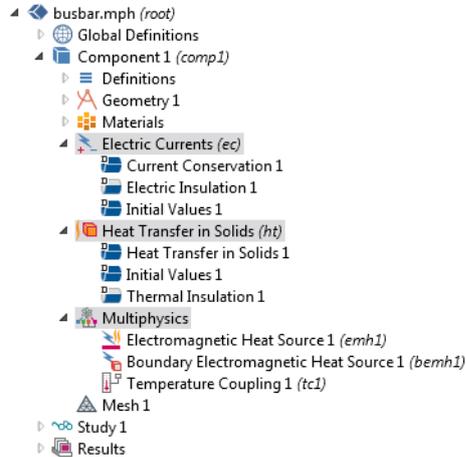
固体中の伝熱ノードと電流ノードには、それぞれ熱伝導と電流伝導の設定があります。

電流ノードの下で、電流保存ノードは、ドメインレベルの電流保存を表し、電気絶縁ノードには、電流のデフォルト境界条件があります。

固体中の伝熱ノードの下で、ドメインレベルの固体中の伝熱ノードは熱保存を表し、断熱ノードには、固体中の伝熱のデフォルト境界条件があります。ジュール熱効果の熱源は、マルチフィジックスノードの電磁熱源ノードで設定します。電流インターフェースと固体中の伝熱インターフェースの両方にある初期値ノードには、時間依存問題の定常問題と初期条件に対する非線形ソルバーの初期推測値があります。

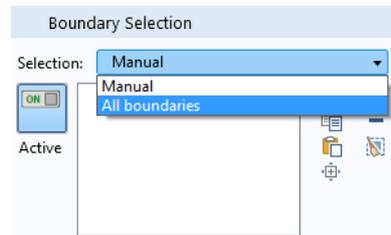
では、境界条件を定義しましょう。

1 固体中の伝熱ノード を右クリックし、コンテキストメニューの第 2 セクション（境界 セクション）で、熱流束を選択します。



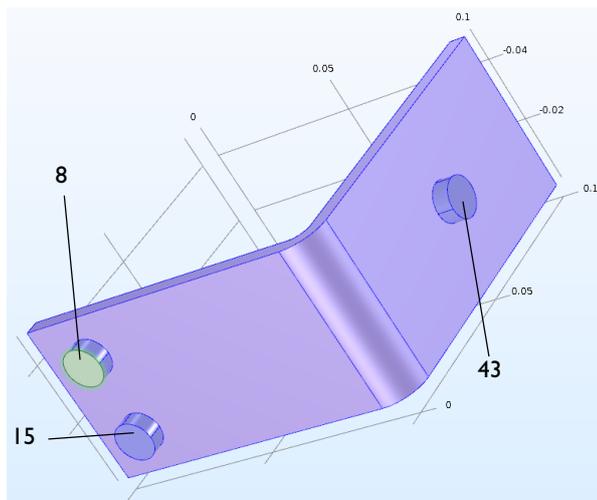
- 2 熱流束の設定ウィンドウで、選択リストから**すべての境界**を選択します。

円形ボルト境界は、周囲から加熱も冷却もされていないものとして扱います。次のステップでは、これらの境界の選択を熱流束選択リストから削除します。これにより、**固体中の伝熱インターフェース**はデフォルトの**断熱境界条件**になります。



- 3 バスバーを回転して背後を表示します。マウスポインタを円形チタニウムボルトサーフェスの1つに合わせ、それを緑色に強調表示します。ボルトサーフェスをクリックし、現在の境界選択肢を**選択リスト**から削除します。このステップを繰り返して、他に2つの円形ボルトサーフェスを選択リストから削除します。境界 8, 15, 43 が削除されます。

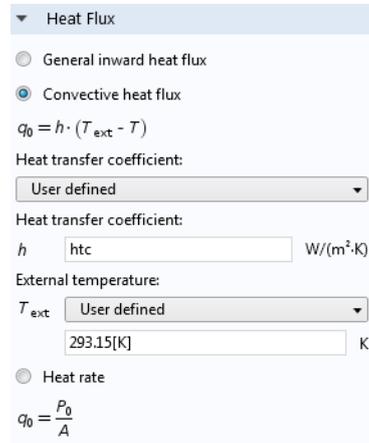
- 3 照合：境界 8, 15, 43 が選択リストから削除されます。



4 熱流束の設定ウィンドウの熱流束の下で、対流熱流束ボタンをクリックします。熱伝導係数 フィールド、 $h$ 、に  $htc$  と入力します。

このパラメーターは、「グローバル定義」57 ページの「パラメーターテーブル」か、ジオメトリとともにインポートしたものです。

4

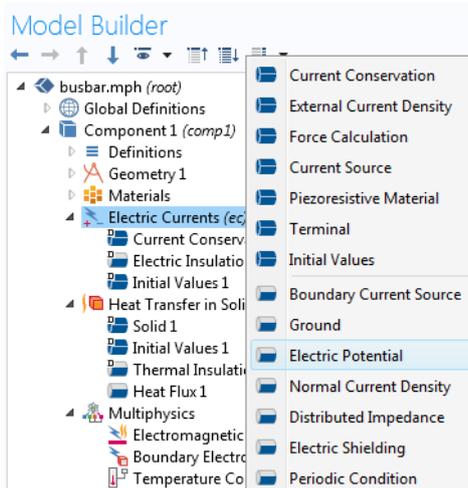


熱伝導解析では、伝熱モジュールでさらに高度な境界条件を利用できます。例としては、境界上の合計累積パワーを与える機能や、水平壁や垂直壁などのよく使われる自然対流シナリオの境界条件の設定機能などがあります。

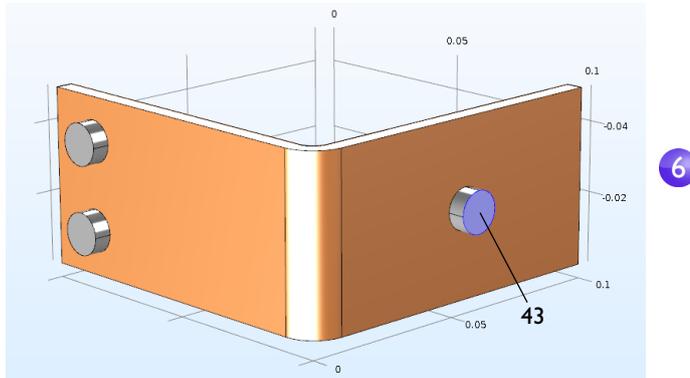
以下のステップに従って電流の境界条件を引き続き設定します。

5 モデルビルダーで、電流ノードを右クリックします。コンテキストメニューの第2のセクション—境界セクション—電位を選択します。電位ノードがモデルツリーに追加されます。

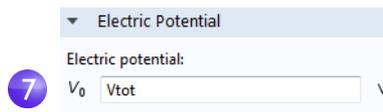
5



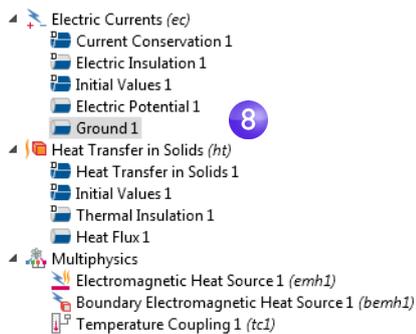
- 6 1 本のチタニウムボルトの円形面にマウスポインタを合わせて強調表示にし、クリックしてそれ(境界 43)を**選択**リストに追加します。



- 7 **電位**の設定ウィンドウで**電位**フィールドに、 $V_{tot}$  と入力します。  
最後のステップで、残り 2 本のボルトのサーフェスを接地に設定します。

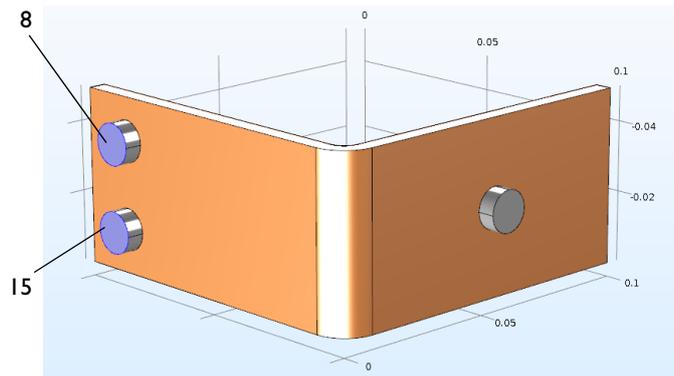


- 8 **モデルビルダー**で、**電流**ノード  を右クリックします。コンテキストメニューの境界セクションで、**接地**を選択します。**接地**ノード  がモデルツリーに追加されます。モデルツリーノードシーケンスは、この図のようになるはずで



9 グラフィックスウィンドウで、残り1本のボルトをクリックして、それを**選択**リストに追加します。

9 照合：境界 8 と 15.



このステップを繰り返して、最後のボルトを追加します。境界 8 と 15 が、**接地**境界条件の選択リストに追加されます。

10 グラフィックスツールバーで、**デフォルト 3D ビューへ移動**ボタン  をクリックします。

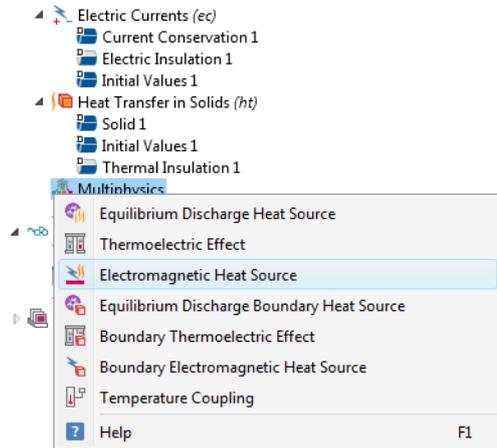


! 境界上の全電流の供給能力など、電磁気解析のより高度な境界条件は、AC/DC モジュールで利用できます。

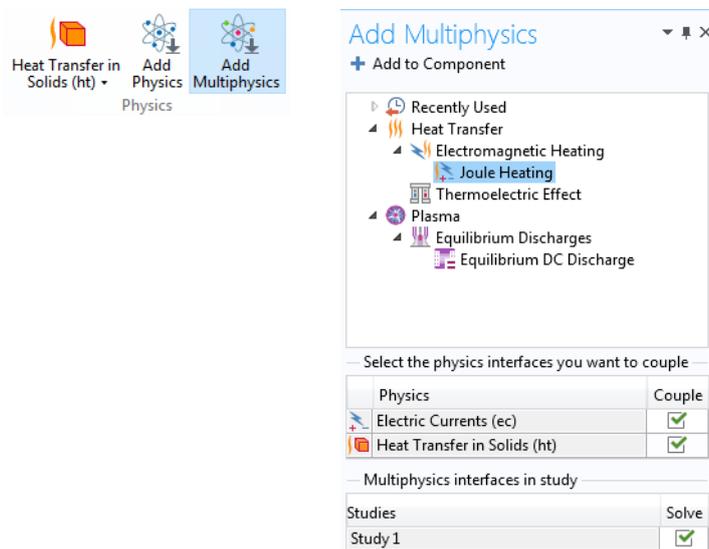
### フィジックスインターフェースの手動連成

構成済みの**ジュール熱**マルチフィジックスインターフェースを使用する代わりに、**電流**インターフェースと**固体中の伝熱**インターフェースを連成することができます。たとえば、**電流**についてモデルを設定して求解した後、続けて**固体**

中の伝熱を追加することができます。その場合、マルチフィジックスノードを右クリックして、必要なマルチフィジックス連成を追加します。



もう1つの方法として、リボンの**マルチフィジックスを追加** ボタンをクリックし、**マルチフィジックスを追加** ウィンドウで提案されたマルチフィジックス連成を選択する方法があります。

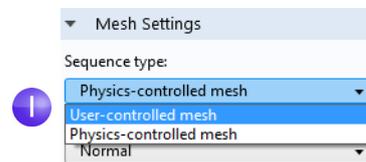


## メッシュ

最も簡単にメッシュ化する方法は、非構造化四面体メッシュを作成する方法です。バスバーモデルにはこの方法を使用できます。あるいは、「メッシュの追加」103 ページに示すようにいくつかのメッシュ化シーケンスを作成する方法もあります。

❗ デフォルトでフィジックス制御のメッシュが作られます。ほとんどの場合、**スタディ**ノードまで一気に進んでそのままモデルを求解することができます。この演習では、メッシュ設定をパラメーター化するため設定を調べます。

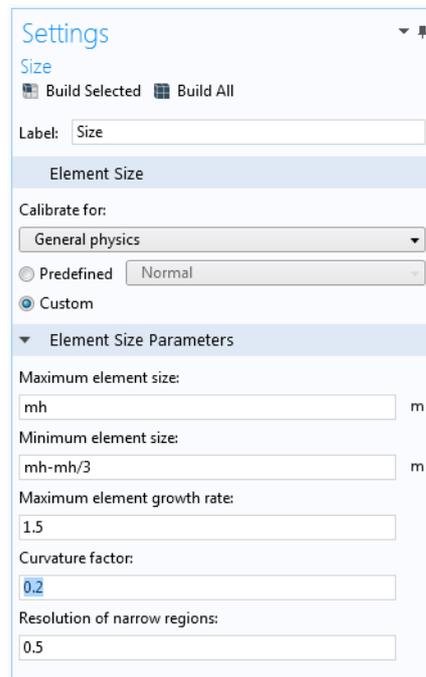
1 **モデルビルダー**で、**メッシュ1**ノード  をクリックします。**メッシュ**の**設定**ウィンドウで、**シーケンスタイプ**リストから**ユーザー制御メッシュ**を選択します。



2 **メッシュ1**で**サイズ**ノード  をクリックします。



3 **要素サイズ**セクションの**サイズ**の**設定**ウィンドウで、**カスタム**ボタンをクリックします。



**要素サイズパラメーター**で、以下のように入力します：

- **最大要素サイズ**フィールドに  $mh$ 。  $mh$  は 6 mm です。これは、先にグローバルパラメーターとして入力した値です。パラメーター  $mh$  により、要素サイズは、この値に制限されます。
- **最小要素サイズ**フィールドに  $mh-mh/3$ 。 **最小要素サイズ**は、最大サイズより少し小さい値です。
- **曲率** フィールドに 0.2。 **曲率**は、曲線境界上の要素数を決定します。値が低いほどメッシュが細かくなります。

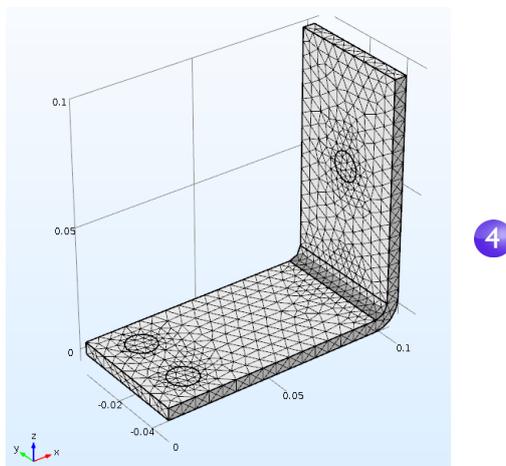
その他 2 つのパラメーターは変更しません。

**最大要素増加率**は、領域内で要素が小から大までどの程度の速さで増加するかを決定します。この値が大きいほど、増加率は高くなります。値が1では増加しません。

**狭小領域解像度**では、値が大きいほど、通常は、細かいメッシュになります。

**サイズノード**  の右上隅に表示されるアスタリスク (\*) は、そのノードが編集集中であることを表します。

- 4 **サイズ**の設定ウィンドウの**全作成**ボタン  をクリックし、この図のようなメッシュを作成します：

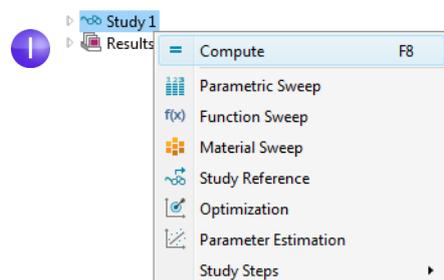


リボンの**ホーム**タブの**メッシュを構築**をクリックする方法でも同じ結果が得られます。

## スタディ

- 1 **モデルビルダー**でシミュレーションを実行するには、**スタディ 1**  を右クリックし、**計算**  を選択します。あるいは、F8 を押すか、リボンの**ホーム**タブの**計算**をクリックします。

**スタディノード**  は、選択したフィジックスとスタディタイプに基づいてシミュレーションの求解シーケンスを自動的に定義します。今回は、シ



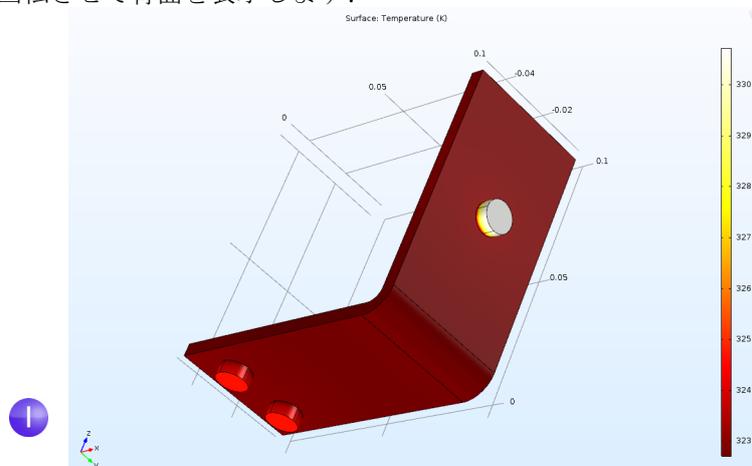
ミュレーションの求解に数秒しかかかりません。求解プロセスの間に2つの**収束**プロットが生成され、これらは**グラフィックスウィンドウ**横のタブから利用できます。これらのプロットには、**スタディ**ごとに、ソルバーアルゴリズムの収束進捗状況が表示されます。

## 結果

デフォルトで、**結果**ノードには、**電位**のマルチスライスプロット、**温度**のサーフェスプロット、温度の**アイソサーフェス**プロットを取めた**等温コンター**プロットという、3つのプロットグループが生成されます。

**結果 > 温度** をクリックして、**グラフィックスウィンドウ**に**温度**プロットを表示します。装置内の温度差は銅とチタニウムの高い熱伝導率のため10 K未満です。温度変動は、上側ボルトで最大です。ここでは、2本の下側ボルトの2倍の電流が流れます。温度は、周囲温度 293 K をかなり上回ります。

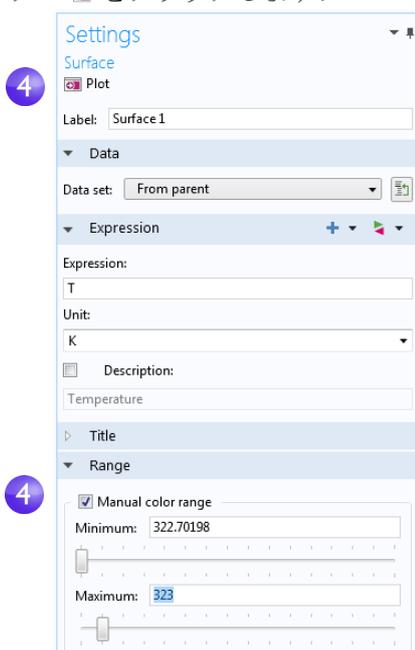
- 1 **グラフィックスウィンドウ**の画像をクリックアンドドラッグして、バスバーを回転させて背面を表示します。



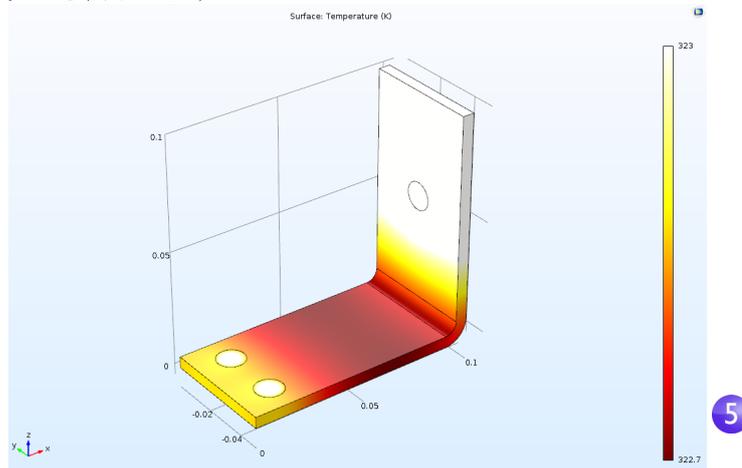
- 2 **グラフィックスツールバー**で、**デフォルト 3D ビューへ移動**ボタン  をクリックします。

これで、**カラーテーブル**範囲を手動設定して、銅パーツの温度差を可視化できます。

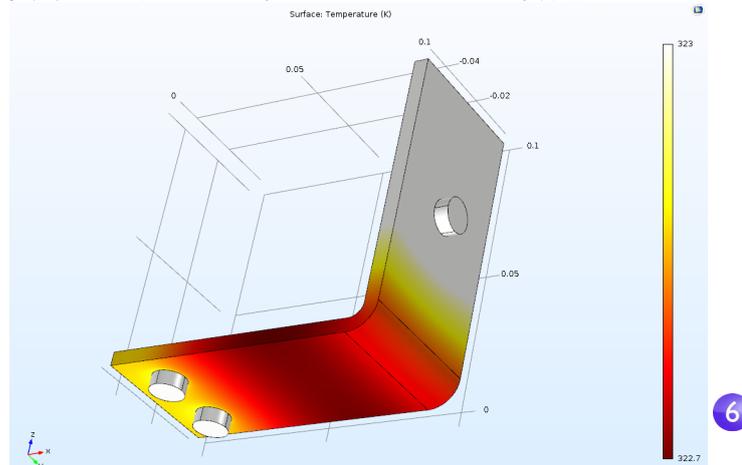
- 3 モデルツリーで、**結果 > 温度** ノード  を展開し、**サーフェス** ノード  をクリックします。
- 4 **サーフェスの設定** ウィンドウで、**範囲** をクリックしてセクションを展開します。 **手動色範囲** チェックボックスを選択し、**最大** フィールドに **323** と入力します (デフォルト値と置き換え)。 **サーフェスの設定** ウィンドウの **プロット** ボタン  をクリックします。



- 5 グラフィックスツールバーで、**範囲をズーム**ボタン  をクリックして更新したプロットを表示します。



- 6 グラフィックスウィンドウで、バスバーを回転させ、背面を表示します。

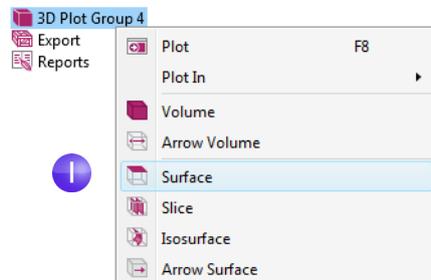


温度分布は、2本の下側チタニウムボルト間を通り、上側ボルトの中心を横切る垂直ミラー平面で水平対称になります。この場合、モデルは計算パワーを節約でき、ジオメトリ全体をモデル化できます。より複雑なモデルの場合、計算要件を緩和するため、対称性を利用することも検討してください。

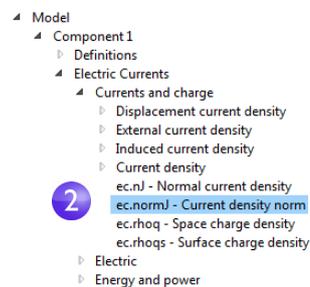
グラフィックスウィンドウ  のツールバーで**デフォルト 3D ビューへ移動**を選択します。

次に、装置内の電流密度を表示した**サーフェスプロット**を生成します。

- 1 モデルビルダーで、結果 を右クリックし、3D プロットグループ を追加します。3D プロットグループ 4 を右クリックし、サーフェスノード を追加します。



- 2 サーフェスの設定ウィンドウの式の下で、式を置換ボタン をクリックします。モデル > コンポーネント 1 > 電流 > 電流と電荷 > ec.normJ - 電流密度法線に移動し、ダブルクリックするか Enter を押して選択します。

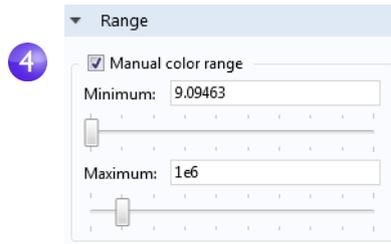


ec.normJ は、現在の密度ベクトルの大きさの変数、または絶対値です。変数名がわかっているときは、式フィールドに ec.normJ と入力してもかまいません。



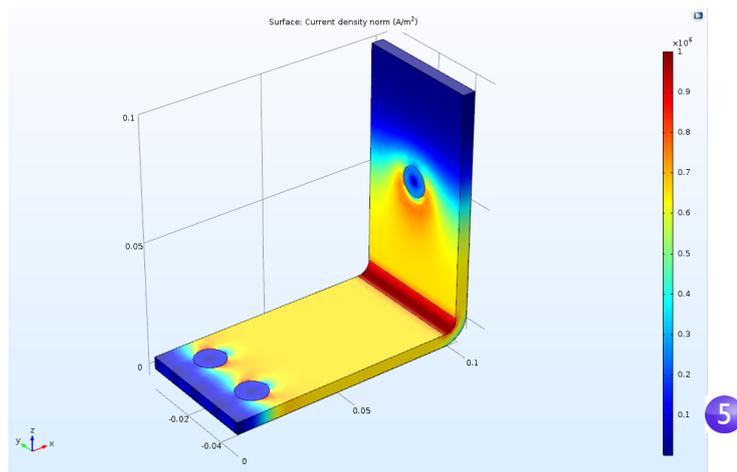
- 3 プロットボタン をクリックします。グラフィックスウィンドウに表示されるプロットは、ボルトとの接触エッジの電流密度が高いため、ほぼ均一な色になります。次のステップでは、カラーテーブルの範囲を手動で変更して、電流密度分布を可視化します。

- 4 **サーフェス**の設定ウィンドウの**範囲**の下で、**手動色範囲**チェックボックスを選択します。**最大** フィールドに **1e6** と入力してデフォルト値と置き換えます。

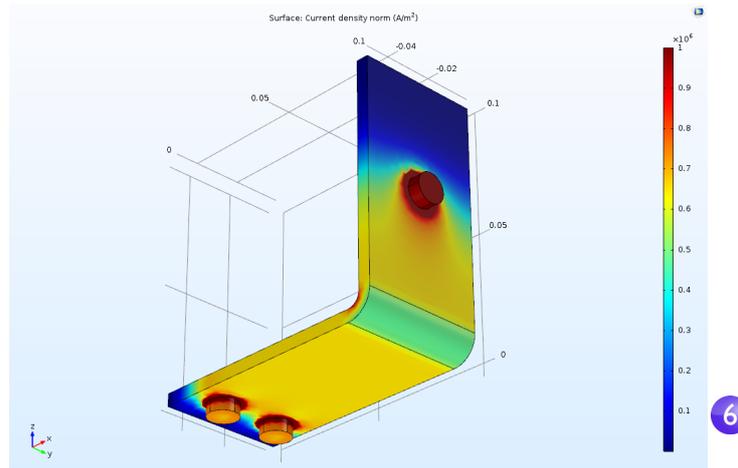


- 5 **プロット**ボタン  をクリックします。

得られるプロットでは、電流の流れがバスバーの 90 度ベンドの最短経路で表示されます。ボルト外側のバスバーのエッジには、ほとんど電流が流れません。



- 6 **グラフィックス**ウィンドウでバスバーをクリックアンドドラッグして背面を表示します。引き続き画像を回転させて、各ボルトの接触サーフェスの高い電流密度を表示します。

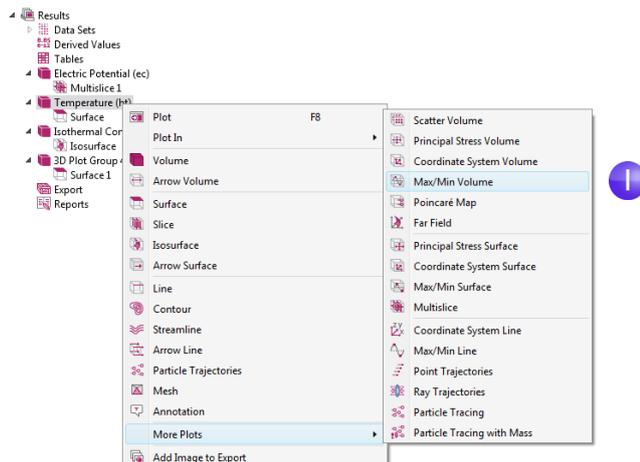


作業が完了したら、**グラフィックス**ツールバーの**デフォルト 3D ビュー**に**移動**ボタン  をクリックします。

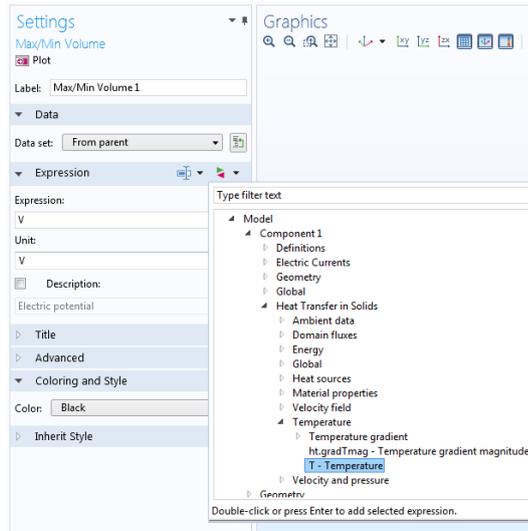
### 最高温度と最低温度の取得

バスバーの最高温度と最低温度は、その位置とともに簡単に入手できます。

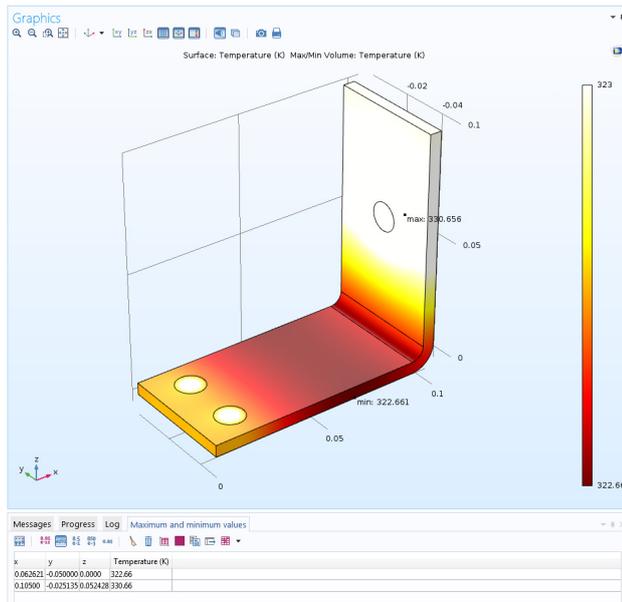
- 1 **結果 > 温度**  を右クリックし、さらに**プロット > 最大/最小体積**を選択します。



2 式の下の**最大/最小 体積**の設定ウィンドウで、**式を置換**ボタン  をクリックします。**モード 1 > コンポーネント 1 > 固体における熱伝導 > 温度 > T - 温度**に移動し、ダブルクリックするか、Enter を押します。後処理変数のツリーの上の検索フィールドで**温度**を検索することもできます。**プロット**をクリックします。



最大値と最小値がグラフィックスウィンドウにプロットされ、その位置と値が**最大値と最小値**テーブルに表示されます。



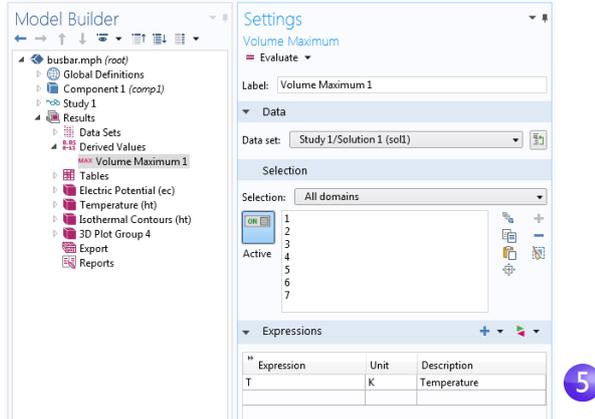
2

先に説明した最大値と最小値のプロット方法として、純粹に数値出力の**計算値**ノードを使用することができます。

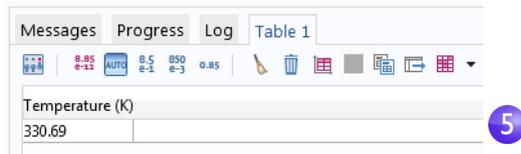
3 モデルツリーの**結果**セクションで**計算値** 8.85ノードを右クリックし、**最大 > 体積最大値 MAX**を選択します。

4 選択の下の**体積最大値**の**設定**ウィンドウで、**すべてのドメイン**を選択します。

5 式テーブルの最初の行に,(自動的に入力されない場合)温度のTを入力し,設定ウィンドウ最上部の**評価**をクリックします.



その結果,最高温度が**テーブル 1**に表示されます.



次のステップとして,モデルサムネイル画像を作成します.

### プロットからモデル画像の作成

どのような解でも,モデルファイルの参照時に表示する画像を作成できます.**モデルビルダー**のプロットを生成したら,**結果**の下で,対応するプロットノードをクリックします.ルートノード(モデルツリーの最初のノード)をクリックします.**サムネイル**の下のルートノードの**設定**ウィンドウで,**グラフィックスウィンドウ**から**設定**をクリックします.

プロットから画像を作成する方法は,他にも2とおりあります.ひとつは,**グラフィックス**ウィンドウツールバーの**画像スナップショット**ボタン  をクリックして,画像を直接作成する方法です.また,**画像**ノード  を**エクスポート**ノードに追加して,画像ファイルを作成する方法もあります.目的のプロットグループを右クリックし,**エクスポート**に**画像を追加**を選択します.

 この段階で必ずモデルを保存してください.モデル busbar.mph の,このバージョンは,チュートリアル次のセットで再利用して名前を変更します.

## アプリケーションの構築

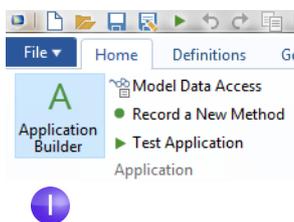
---

この項では、バスバーモデルを基本としたアプリケーション作成について簡単に紹介します。アプリケーションには、長さ、幅、印可電圧の入力フィールドを備えた、バスバーモデルとの相互作用に特化した特別なユーザーインターフェースがあります。出力は、最高温度と温度プロットです。

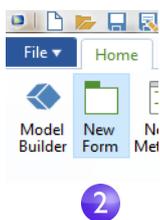
新規フォームウィザードを利用して、簡単にアプリケーションを作成する方法を学習します。新規フォームウィザードでは、ユーザーインターフェースコンポーネントがあるフォーム、いわゆるフォームオブジェクトを作成します。ウィザードからは、クイックアクセスアプリケーションビルダーによるアプリケーションの作成に利用できるすべてのフォームオブジェクトのサブセットに簡単にアクセスできます。この例では、このウィザードを使って入力フィールド、数値出力、グラフィックス、ボタンを追加する方法を学習します。アプリケーション構築の詳細については、マニュアル *アプリケーションビルダーイントロダクション*を参照してください。

### 新規フォームの作成

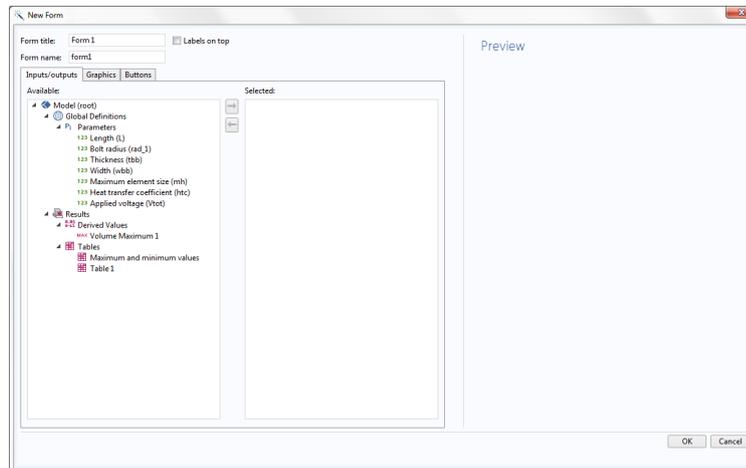
- 1 モデルビルダーからアプリケーションビルダーに切り替えるには、リボンの **ホーム** タブの左端にある **アプリケーションビルダー** ボタンをクリックします。



- 2 新規フォームを作成するには、リボンで **新規フォーム** ボタンをクリックします。

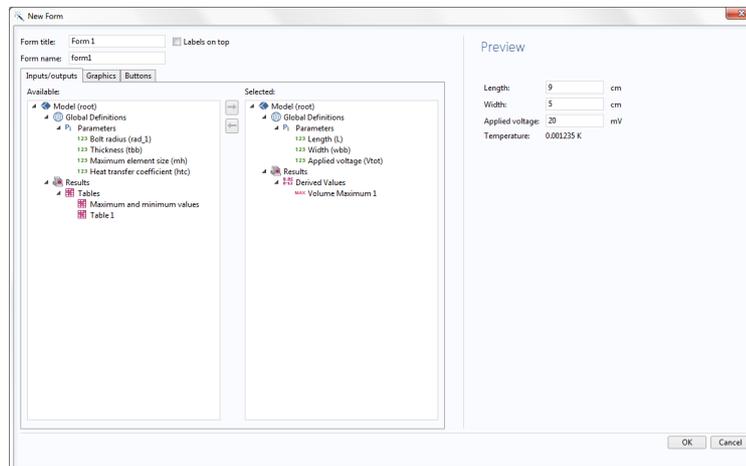


ウィザードウィンドウが表示されます。



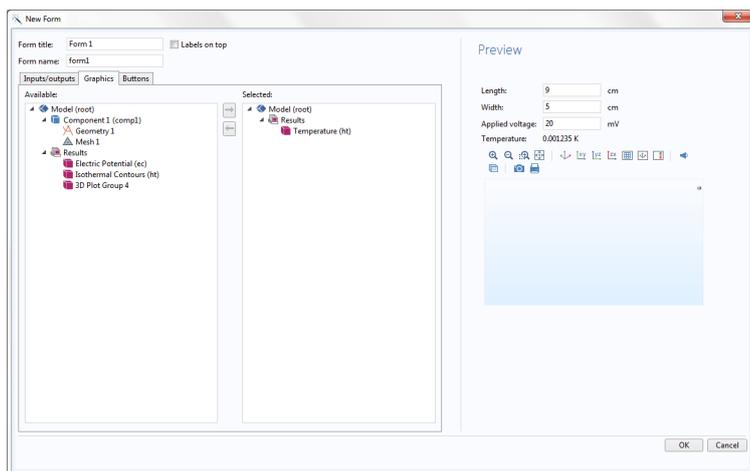
ウィザードウィンドウには、**入出力**、**グラフィックス**、**ボタン**用の3つのタブがあります。**入出力**タブで、ツリーのノードをダブルクリックすると、アプリケーションのユーザーインターフェースでこれらのタブが有効になります。このアプリケーションでは、入力フィールドとしていくつかのパラメーターを、また出力として最高温度を選択します。

- 3 以下のパラメーターをそれぞれダブルクリックします：**長さ (L)**、**幅 (wbb)**、**印可電圧 (Vtot)**。さらに、**計算値**で**体積最大値**をダブルクリックします。

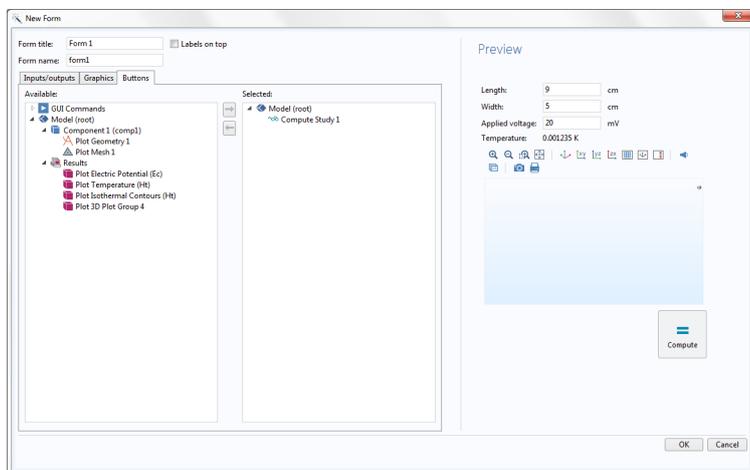


右の**プレビュー**セクションには、ユーザーインターフェースレイアウトが表示されます。

- 4 ウィザードの**グラフィックスタブ**をクリックし、**温度**プロットをダブルクリックします。**プレビュー**エリアにグラフィックスオブジェクトプレースホルダーが表示されます。

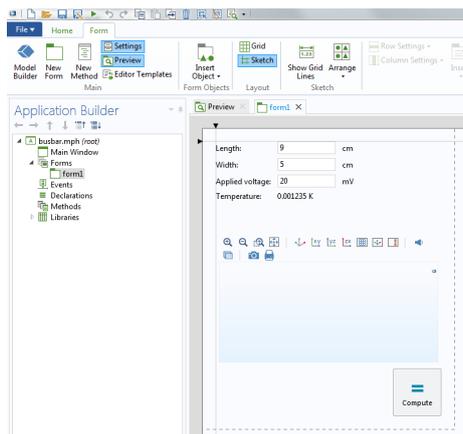


- 5 ウィザードで**ボタントab**をクリックし、**計算スタディ**をダブルクリックします。ボタンは、グラフィックスオブジェクトの下の**プレビュー**エリアに表示されます。

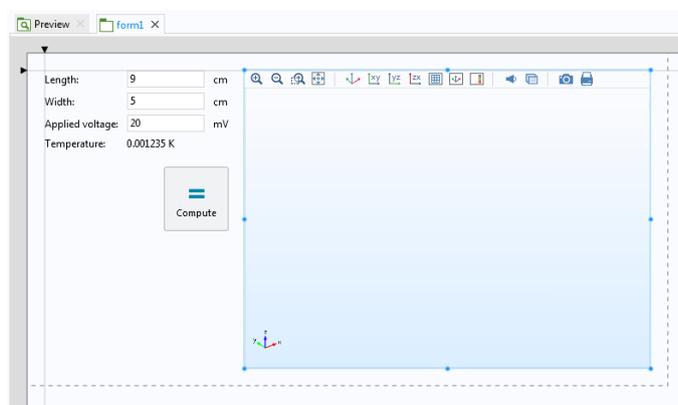


6 最後に, **OK** をクリックして, 設定を承認し, ウィザードを終了します.

新規フォームウィザードを終了すると, フォームエディターが開きます. フォームエディターでは, フォームオブジェクトのドラッグアンドドロップや, 新しいフォームオブジェクトの追加ができます.

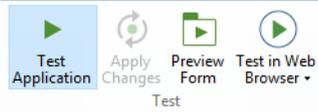


7 たとえば, 以下の図のように, 入力フィールド右のグラフィックスオブジェクトと, 入力フィールド直下のボタンをドラッグし, ユーザーインターフェースの配置を変更することができます. 青色のガイドラインは, オブジェクトを揃えるときに利用してください.



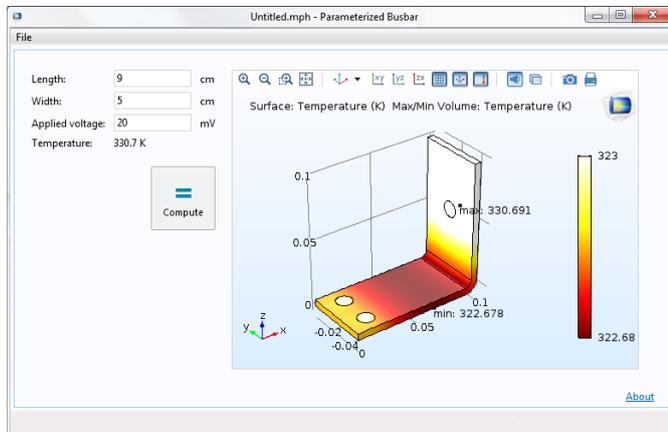
グラフィックスオブジェクトは, 青色のハンドルをドラッグして拡大できます.

- 8 アプリケーションは、リボン内の**アプリケーションをテスト**をクリックしてテストすることができます。



8

これにより、アプリケーションの実行時コピーを作成して、アプリケーション開発プロセス間にさまざまなデザインを簡単に試してみることができます。

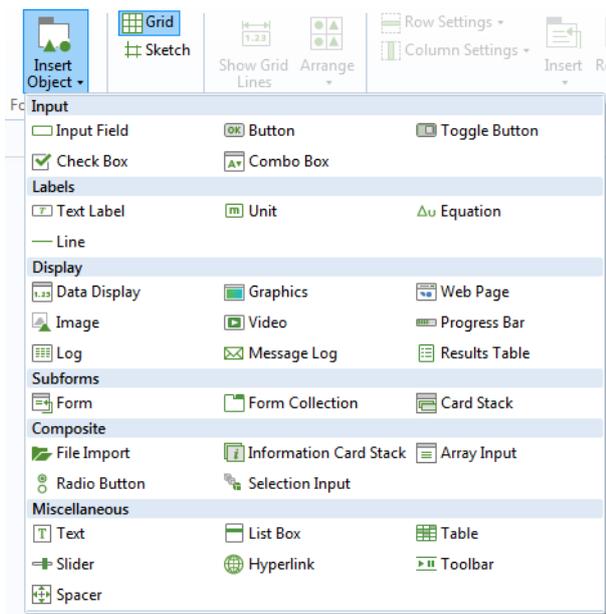


8

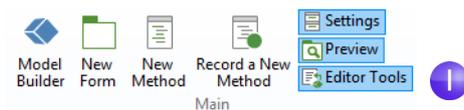
- 9 では、別の長さ値を試して、**計算**をクリックしてみましょう。

## ボタンの追加

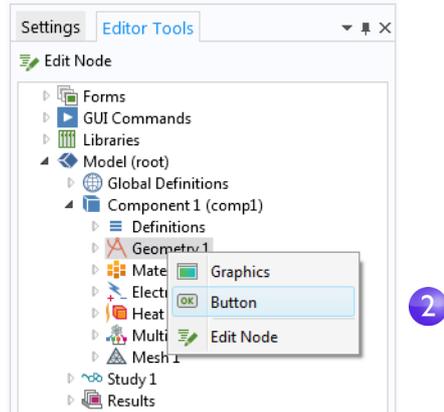
計算開始前にジオメトリのプレビューをすることができます。これは、ボタンを追加すれば簡単に実行できます。ボタンの追加方法は2とおりあります。以下の図のように、リボンの**オブジェクトを挿入**メニューを使用するか、**エディタツール**ウィンドウを使用します。この例では、後者の方法を使用します。



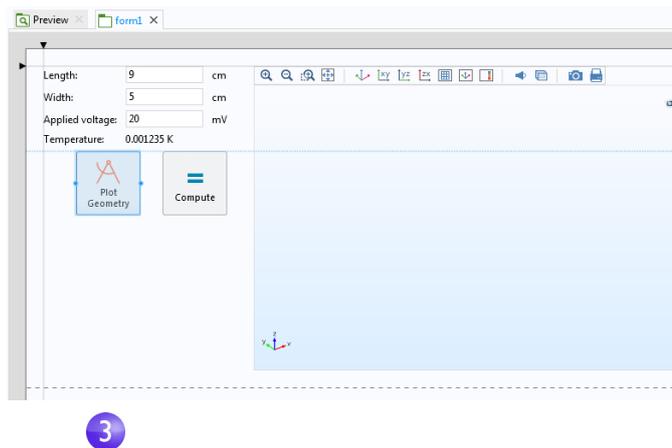
- 1 まず、リボン内で対応するボタンを選択して**エディタツール**ウィンドウを表示します。



- 2 エディタツールツリーで、ジオメトリノードを右クリックし、ボタンを選択します。

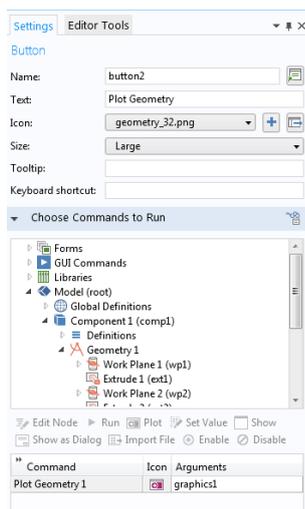


- 3 ジオメトリをプロットボタンを計算ボタンの左にドラッグします。



それぞれのボタンの後に、それを押したときに実行される動作を制御するコマンドシーケンスがあります。コマンドシーケンスは、そのボタンの**設定**ウィンドウに定義されており、ボタンをダブルクリックすると**設定**ウィンドウが(開いていない場合)開きます。

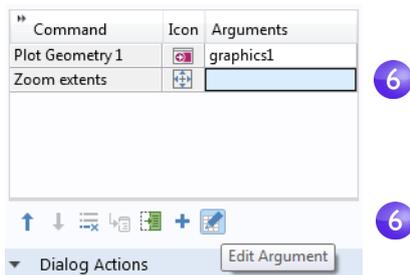
- 4 ジオメトリをプロットボタンをダブルクリックして、設定ウィンドウを表示します。コマンドシーケンスがセクション **実行するコマンドを選択** のツリーの下に表示されます。



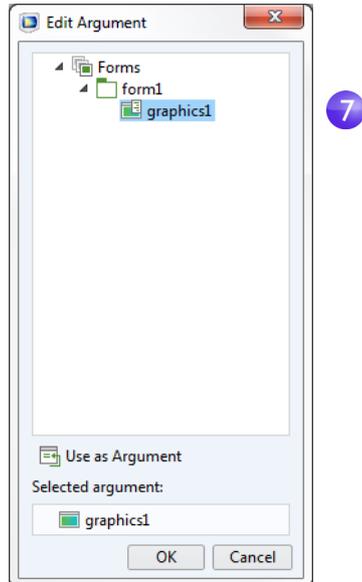
この例では、**ジオメトリをプロット**のコマンドシーケンスに、ジオメトリプロット用のコマンドが1つあります。入力引数には、ジオメトリプロットを送信するグラフィックスウィンドウに関する情報が収められています。この例では、グラフィックスオブジェクトグラフィックス 1があります。

軸設定を自動的に調整するために、**範囲をズーム**コマンドを追加できます。

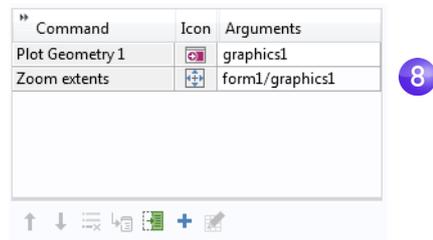
- 5 **実行コマンドを選択**セクションで、**GUI コマンド > グラフィックス コマンド**の下に**範囲をズーム**コマンドまで移動します。ダブルクリックして、それをコマンドシーケンスに追加します。
- 6 次に、**範囲をズーム**コマンドに対する入力引数を作成します。**範囲をズーム**の横の白いフィールドをクリックし、**引数を編集**ボタンをクリックします。



- 7 これで、ダイアログボックスが入力引数候補とともに開きます。**フォーム1**で**グラフィックス1**を選択します。



- 8 以上でコマンドシーケンスが完成です。

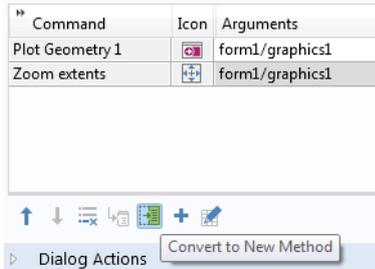


- 9 新しい**ジオメトリをプロット**ボタンが正常に機能することを確認するため、リボン内の**アプリケーションをテスト**を再びクリックしてアプリケーションをテストすることができます。

## メソッド

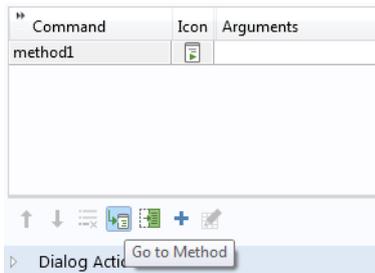
コマンドシーケンスを利用した場合よりもさらに高度な操作を実行するには、ユーザーがボタンをクリックしたとき、メニュー項目を選択したときなどに実行するアクションを定義するコードを、メソッドエディターで記述します。メソッドエディターを簡単に始める方法として、既存のコマンドシーケンスをメソッドに変換する方法があります。

- 1 ジオメトリをプロットボタンの設定ウィンドウを再び探すか開きます。コマンドシーケンスの下の**新規メソッドに変換**ボタンをクリックします。



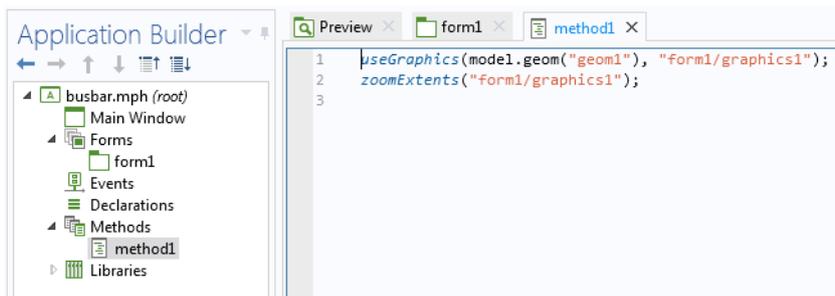
1

- 2 メソッドエディターでメソッドを開くには、コマンドシーケンスで**メソッドに移動**ボタンをクリックします。



2

メソッドエディターが、コマンドシーケンスの**ジオメトリをプロット**コマンドと**範囲をズーム**コマンドに対応する **method1** のコードとともに開きます。



2

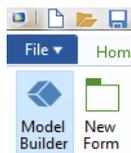
アプリケーションビルダーには、自動的にコードを生成するツールがいくつかあります。コマンドシーケンスをメソッドに変換する方法以外に、たとえばリボンの**コードを記録**をクリックする方法もあります。



この場合、COMSOL Desktop ウィンドウで実行する操作ごとにコードが生成されます。リボンの**記録を停止**をクリックすると、記録を停止し、メソッドエディターに戻ります。

フォームエディターとメソッドエディターの使用方法の詳細については、マニュアルアプリケーションビルダーイントロダクションを参照してください。

以上でバスバーサンプルは終了です。モデルビルダーに戻るには、リボンの**モデルビルダー**ボタンをクリックします。



次のセクションは、これまで実行してきたステップの理解を深める内容であり、シミュレーションを拡張して熱膨張と流体流れなどの追加効果を取り入れます。これらのトピックスは以下のページから始まります：

- 「パラメーター、関数、変数、連成」 97 ページ
- 「材料プロパティと材料ライブラリ」 100 ページ
- 「メッシュの追加」 103 ページ
- 「フィジックスの追加」 105 ページ
- 「パラメトリックスイープ」 127 ページ
- 「パラレルコンピューティング」 141 ページ
- 「COMSOL Multiphysics Client-Server」 144 ページ
- 「付録 A – ジオメトリの構築」 146 ページ

## 上級トピック

### パラメーター，関数，変数，連成

この項では、パラメーター、関数、変数、コンポーネントカップリングの取り扱いについて検討します。

**グローバル定義とコンポーネント > 定義**ノードには、モデル入力とコンポーネントカップリングの準備と、シミュレーションの編成に役立つ機能があります。モデル入力を編成するためのパラメーターを追加する機能はすでに、「グローバル定義」57 ページで体験しました。

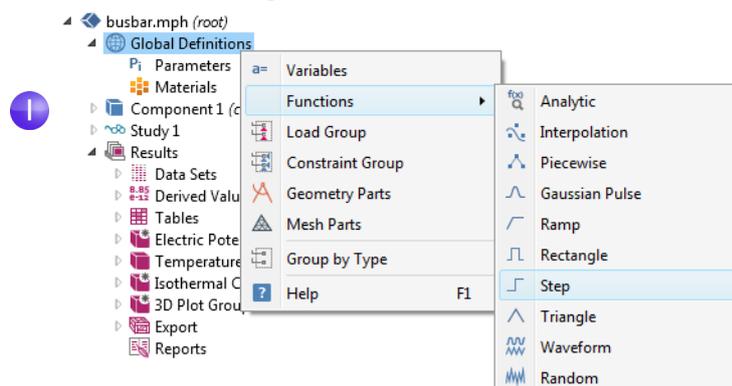
**グローバル定義とコンポーネント > 定義**で利用できる関数には、マルチフィジックスシミュレーションをセットアップするときに便利な定義済みの関数テンプレートが収められています。たとえば、**ステップ**関数テンプレートでは、さまざまなタイプの空間的推移や時間的推移を定義するためのスムーズなステップ関数を作成できます。

関数の使用方法を解説する前提として、バスバーモデルへの時間依存スタディの追加を目的とし、0.5 秒で 0 V から 20 mV に変化するバスバー全体に電位をかけるものとします。この目的には、パラメーター  $V_{tot}$  を乗じたステップ関数を使用できます。この項では、0 から 1 に 0.5 秒でスムーズに移行するモデルにステップ関数を追加して、関数の定義方法と検証方法を求めます。

#### 関数の定義

この項では、前の項で作成した同じモデルファイルで作業します。ファイル `busbar.mph` がデスクトップに開かれていない場合は、参照して開きます。

1 **グローバル定義ノード**  を右クリックし、**関数 > ステップ**  を選択します。



- 2 ステップの設定ウィンドウで、場所フィールドの既存値 0.5 のところに 0.25 を入力して、ステップ中間の位置を設定します。

Settings

Step

Plot (F8) Create Plot

Label: Step 1

Function name: step1

Parameters

Location: 0.25

From: 0

To: 1

Smoothing

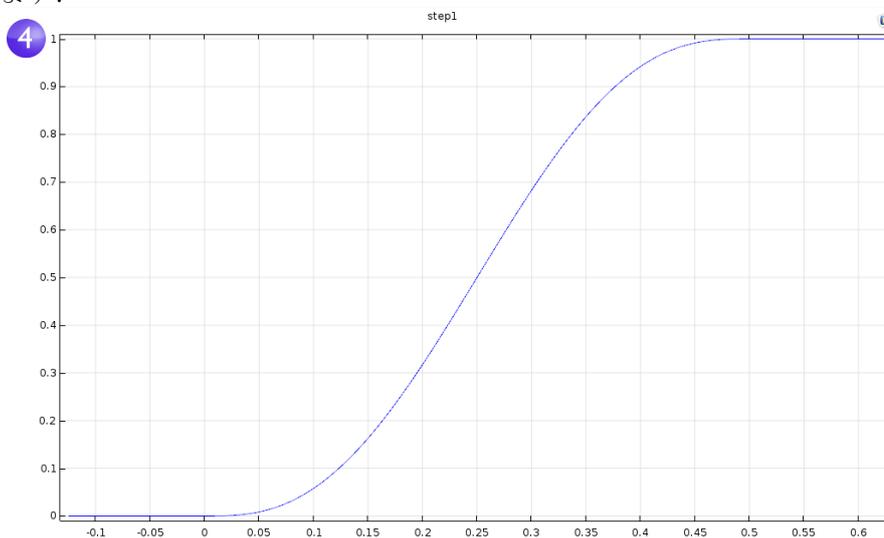
Size of transition zone:  0.5

Number of continuous derivatives: 2

- 3 スムージングをクリックして、セクションを展開し、遷移ゾーンのサイズフィールドに 0.5 を入力して、スムージング間隔の幅を設定します。デフォルト連続導関数の数 2 を維持します。

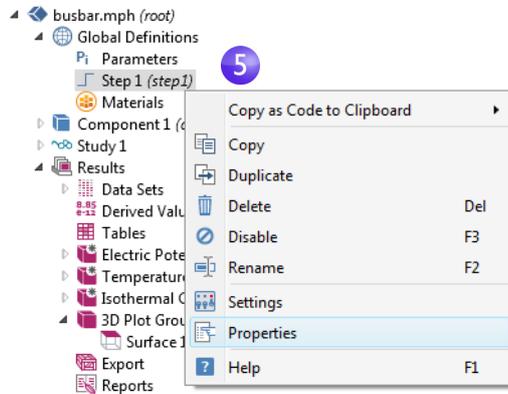
- 4 ステップの設定ウィンドウのプロットボタン  をクリックします。

以下のようなプロットになったら、その関数は正しく定義されたことになります。

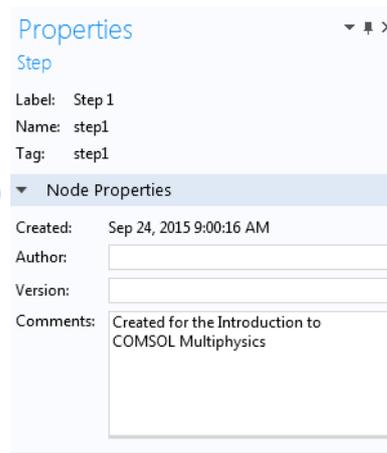


さらに、識別しやすいように、関数にコメントの追加や関数名を変更します。

- 5 モデルビルダーでステップ 1 ノード」を右クリックし、プロパティを選択します。



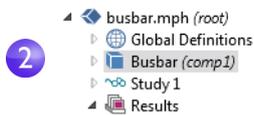
- 6 プロパティウィンドウで、必要な情報を入力します。プロパティタブを右クリックし、すべて完了したら閉じるを選択します。



この演習の目的を踏まえて、チタニウムボルトに接続した電気デバイスを表す第 2 のコンポーネントを導入することにします。

まず、コンポーネント 1 の名前を変更して、バスバーを表す名前にします。

- 1 コンポーネント 1 ノード」を右クリックし、名前を変更」を選択し(または F2 を押し)ます。
- 2 コンポーネントの名前を変更」ウィンドウで、バスバーを入力します。OK をクリックして、モデルを保存します。



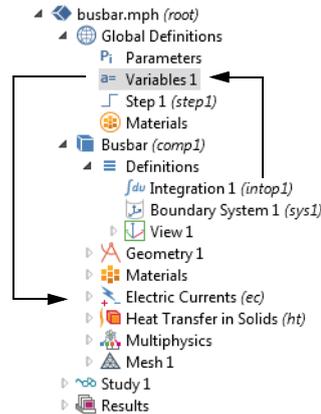
## コンポーネントカップリングとプローブの定義

**バスバー (comp1)** の下の **定義** ノード  を右クリックし、電気デバイスに面するボルト境界の **バスバー (comp1)** 変数の積分を計算するコンポーネントカップリングを導入します。このようなカップリングでは、たとえば、全電流を計算する **グローバル定義ノード** の下の **変数** ノードの変数を定義します。この変数は、グローバルにアクセスでき、たとえば、第2のコンポーネントとしてモデル化された電気デバイスの境界条件を形成することができます。

**定義** の **コンポーネントカップリング** にはさまざまな用途があります。 **平均**<sub>AV</sub>、**最大**<sub>MAX</sub>、**最小**<sub>MIN</sub> カップリングの用途には、結果生成の他、境界条件、ソース、シンク、プロパティ、またはモデル式に対する任意のその他の寄与情報にもあります。 **プローブ**  は、求解の進捗状況を監視します。たとえば、求解の進捗は、時間依存シミュレーションの間は重要箇所、あるいはパラメトリックスタディのパラメーター値ごとに追跡できます。

平均演算子の使用例については、「パラメトリックスイープ」127ページを参照してください。また、利用できる関数のリストについては、「関数」169ページも参照してください。

 定義の取り扱い方法の詳細については、**モデルビルダー** で **定義**  ノードまたは **グローバル定義**  ノードをクリックし、F1を押して、**ヘルプ** ウィンドウ  を開きます。このウィンドウには、デスクトップで選択した項目に関して役立つ情報が表示され、ドキュメントまでのリンクも用意されています。このウィンドウは初めての起動時は読み込みに最長1分かかりますが、次回開くときは読み込み時間が短縮されます。



## 材料プロパティと材料ライブラリ

**材料** ノードの機能は、バスバーモデルの銅とチタニウムのプロパティをアクセスするときを使用しました。 **材料** ノードでは、自分専用の材料を定義して、自分の材料ライブラリに保存することもできます。さらに、材料プロパティを既存の材料に追加することもできます。他の変数 (たとえば温度) の関数であるプロパティを定義する場合、対象範囲内のプロパティ関数を検証するとき、プロット機能が便利です。また、Excel<sup>®</sup> スプレッドシートを読み込んで、LiveLink<sup>™</sup> for Excel<sup>®</sup> で材料プロパティの補間関数を定義することもできます。

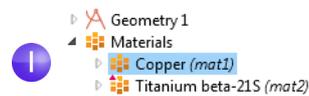
材料ライブラリアドオンには、何万という温度従属プロパティ関数とともに2500体を超える材料が登録されています。それだけでなく、アドオン製品の多くには、アプリケーション領域に関連のある材料ライブラリが含まれています。

最初に、既存の材料にプロパティを追加する方法について調べてみましょう。目的は、銅プロパティに対する体積弾性率と剛性率の追加です。

## 材料のカスタマイズ

引き続き題材はバスバーです。

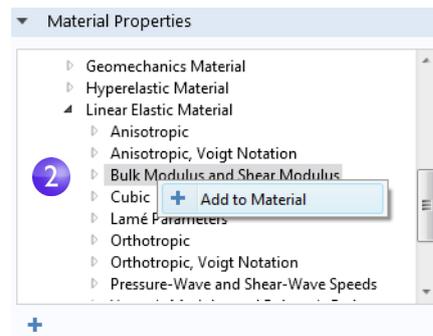
1 モデルビルダーの材料の下で、銅  をクリックします。



2 材料の設定ウィンドウで、材料プロパティセクションをクリックして展開します。このセクションには、定義可能なすべてのプロパティのリストがあります。

固体力学 > 線形弾性材料セクションを展開します。体積弾性率と剛性率を右クリックし、+ 材料に追加を選択します。

これで、モデルの銅の体積弾性率と剛性率を定義できます。



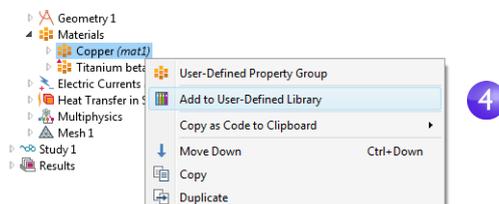
- 3 銅ノードで、**材料の内容**セクションに移動します。**体積弾性率**行と**剛性率**行は、テーブルに表示されています。警告符号  は、その値が未定義であることを表します。値を定義するには、**値**列をクリックします。**体積弾性率**行に 140e9、**剛性率**に 46e9 と入力します。

3

Material Contents					
Property	Name	Value	Unit	Property group	
Bulk modulus	K	140e9	N/m <sup>2</sup>	Bulk modulus and shear mod...	
 Shear modulus	G	46e9	N/m <sup>2</sup>	Bulk modulus and shear mod...	
<input checked="" type="checkbox"/> Electrical conductivity	sigma	5.998e7[S/...	S/m	Basic	
<input checked="" type="checkbox"/> Heat capacity at constant pressure	Cp	385[J/(kg*...	J/(kg·K)	Basic	
<input checked="" type="checkbox"/> Relative permittivity	epsilon_r	1	1	Basic	
<input checked="" type="checkbox"/> Density	rho	8700[kg/m...	kg/m <sup>3</sup>	Basic	
<input checked="" type="checkbox"/> Thermal conductivity	k	400[W/(m...	W/(m·K)	Basic	
Relative permeability	mu_r	1	1	Basic	
Coefficient of thermal expansion	alpha	17e-6[1/K]	1/K	Basic	
Young's modulus	E	110e9[Pa]	Pa	Young's modulus and Poisson...	
Poisson's ratio	nu	0.35	1	Young's modulus and Poisson...	
Reference resistivity	rho_0	1.72e-8[oh...	Ohm	Linearized resistivity	

これらの材料プロパティを追加して、**銅**材料を変更しました。この情報は、自分専用の材料ライブラリに保存できますが、読み取り専用の固体力学材料ライブラリには保存できません。

- 4 **モデルビルダー**で、**銅**を右クリックし、**ユーザー定義のライブラリに追加**  を選択します。



このライブラリを表示するには、リボンの**材料**タブで**材料を参照**をクリックします。

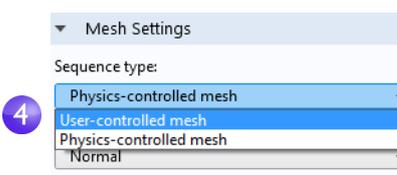
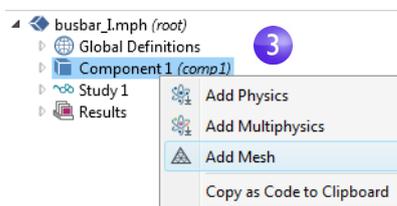
## メッシュの追加

モデルコンポーネントには、さまざまな設定でメッシュを生成するためのさまざまなメッシュシーケンスを設定できます。メッシュシーケンスは、メッシュを生成する命令を順番に並べたセットです。メッシュシーケンスは、スタディステップでアクセスできます。スタディでは、シミュレーションごとに、どのメッシュを使用するかを選択できます。

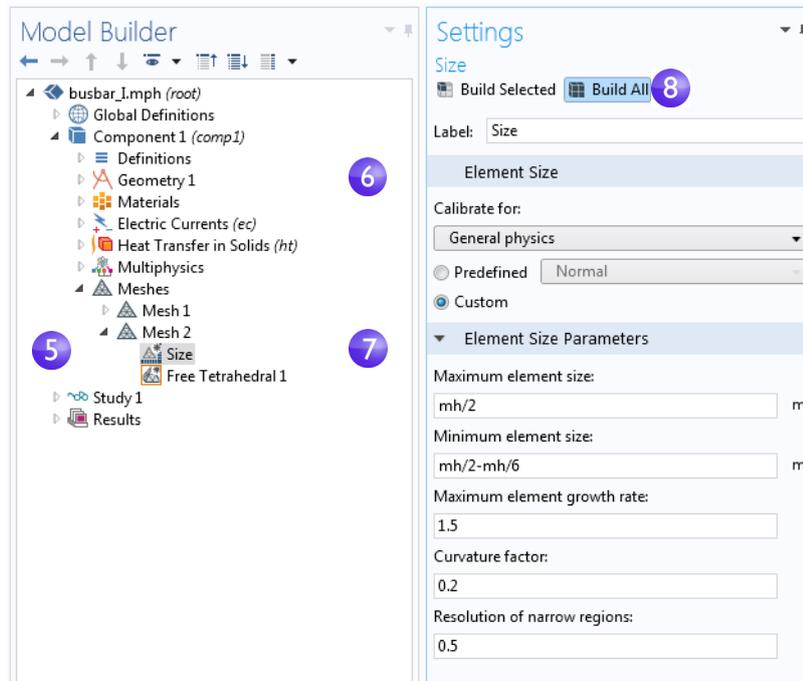
バスバーモデルでは、ボルトとベンド周辺で細分化されたメッシュを作成するために第2のメッシュノードが追加されました。

### メッシュの追加

- 1 先に作成したモデル busbar.mph を開きます。
- 2 後で使用するため、このモデルを別のファイルに保存するには、**ファイル > 名前を付けて保存**を選択し、モデル busbar\_I.mph の名前を変更します。
- 3 第2のメッシュノードを追加するには、**コンポーネント1**ノード  を右クリックし、**追加メッシュ**  を選択します。(「パラメーター、関数、変数、連成」97ページの指示に従って操作した場合、**コンポーネント1**の名前は**バスバー**です。)もう1つのメッシュノードを追加すると、**メッシュ1**と**メッシュ2**の両方がある**メッシュ親ノード**が作成されます。
- 4 **メッシュ2**ノードをクリックします。**メッシュ**の設定ウィンドウの**メッシュ設定**の下で、**シーケンスタイプ**として**ユーザー制御メッシュ**を選択します。**メッシュ2**の下で**サイズ**ノードと**自由四面体**ノードを使用できます。



5 モデルビルダーのメッシュ 2 で、サイズ  をクリックします。



ノードアイコン右上隅のアスタリスクは、そのノードが編集中であることを表します。

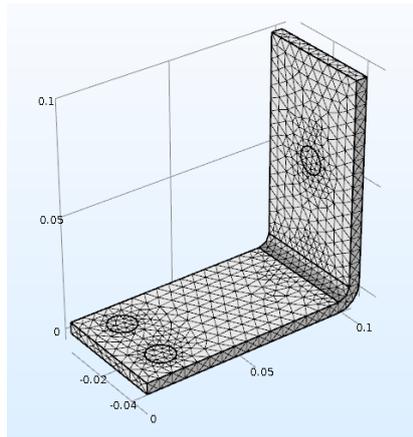
6 要素サイズの下のサイズの設定ウィンドウで、カスタムボタンをクリックします。

7 要素サイズパラメーターの下で、以下の値を入力します：

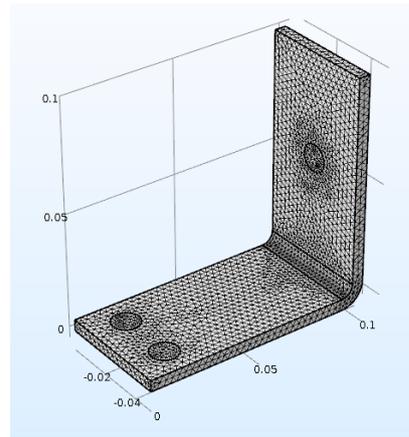
- 最大要素サイズフィールドに  $mh/2$  と入力します。 $mh$  は  $6\text{ mm}$  です。先に定義したメッシュ制御パラメーターです。
- 最小要素サイズフィールドに  $mh/2-mh/6$ 。
- 曲率 フィールドに  $0.2$ 。

8 全作成  をクリックします。ファイルを busbar\_I.mph という名前で保存します。

メッシュノードをクリックして**メッシュ 1**と**メッシュ 2**を比較します。メッシュは、**グラフィックスウィンドウ**で更新されます。複数メッシュの作成方法には、これ以外にも、**最大メッシュサイズ (mh, 「グローバル定義」 57 ページで定義済み)** のパラメーターのパラメトリックスイープを実行する方法があります。



メッシュ 1



メッシュ 2

## フィジックスの追加

---

COMSOL Multiphysics の特長を区別するため、フィジックスを既存のモデルに追加するとき、特に**適応性と互換性**ははっきりと表示されます。この項では、一見難しそうに見えるタスクも簡単にできることを体験します。これらの指示に従えば、**構造力学**と**流体流れ**を**バスバーモデル**に追加できます。

### 構造力学

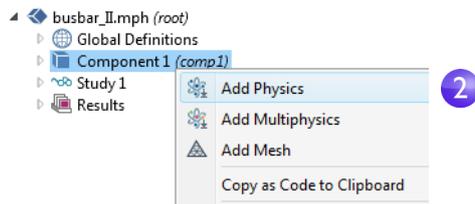
バスバーの**ジュール熱シミュレーション**を完了すると、バスバーの温度が上昇するのがわかります。熱膨張によってどのような種類の**機械的応力**が引き起こされるのでしょうか? この質問に答えるため、**構造力学関連フィジックス**をモデルに組み込みます。

- ❗ これらのステップを実行するには、構造力学モジュールと MEMS モジュール (コア固体力学インターフェースを拡張) のどちらかが必要です。

流体流れによる冷却を強化する場合や、構造力学モジュールや MEMS モジュールがない場合、この項を読んで、次に「流体流れ追加で冷却」114 ページに進んでください。

- 1 先に作成済みのモデル busbar.mph を開きます。メインメニューから、**ファイル > 名前を付けて保存** を選択し、モデル busbar\_II.mph の名前を変更します。

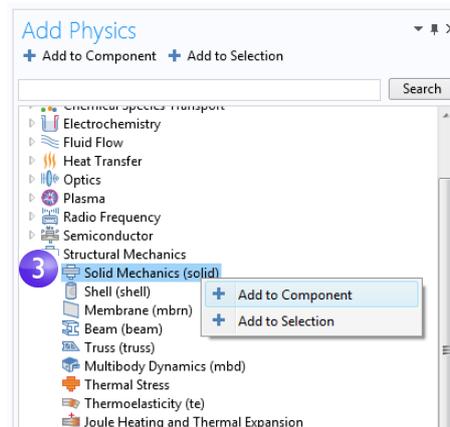
- 2 **モデルビルダー**で、**コンポーネント 1** ノード  を右クリックし、**フィジックスを追加**  を選択します。



- 3 **フィジックスを追加** ウィンドウの **構造力学** の下で、**固体力学**  を選択します。

このインターフェースを追加するためには、右クリックして、**コンポーネントに追加** を選択するか、ウィンドウ最上部の **+ コンポーネントに追加** ボタンをクリックします。

- 4 **フィジックスを追加** ウィンドウを閉じてファイルを保存します。



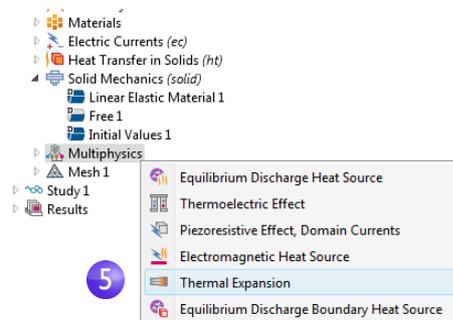
- ❗ さらにフィジックスを追加するときは、選択したフィジックスに必要なプロパティがすべて **材料** ノードにあることを確認してください。この例では、銅とチタニウムのすべてのプロパティが利用できるようになっています。

熱膨張の効果を構造解析に追加すると開始できます。

5 モデルビルダーで、マルチフィジックスノード  を右クリックし、**熱膨張**  を選択します。

熱膨張ノードがモデルツリーに追加されます。

さらに、リボンを使用して、**フィジックスタブ** から **マルチフィジックス > 熱膨張** を選択することもできます。

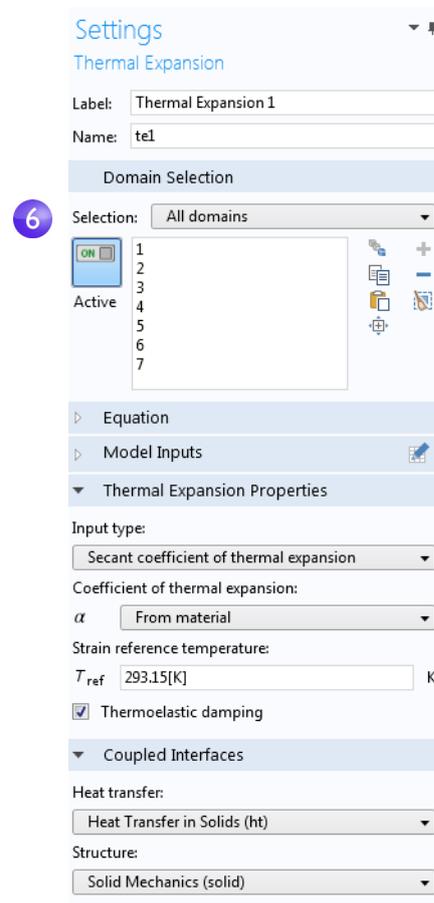


6 熱膨張の設定ウィンドウで、選択リストから、**すべてのドメイン** を選択します。これで、チタニウムボルトだけでなく銅ボルトでも熱膨張が可能になります。

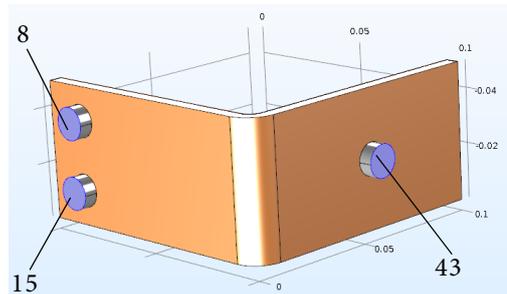
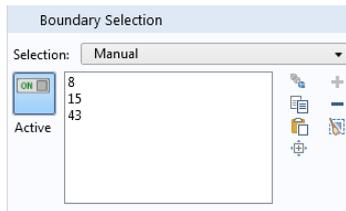
このウィンドウの**熱膨張プロパティ**セクションには、**熱膨張係数**と**歪み基準温度**に関する情報が表示されます(これ以外にもいくつか拡張設定あり)。**熱膨張係数**の値は**材料**ノードから抽出します。**歪み基準温度**のデフォルト値は293.15 K(室温)であり、熱膨張が生じない温度を定義しています。**設定**ウィンドウの**連成インターフェース**セクションには、熱伝導と固体力学のフィジックスを定義する2つのフィジックスインターフェースが表示されます。モデルコンポーネントの熱伝導や固体力学で複数のフィジックスインターフェースがある場合に便利な機能です。デフォルト設定値はすべてこのウィンドウに表示されます。

次に、バスバーをチタニウムボルトの位置に拘束します。

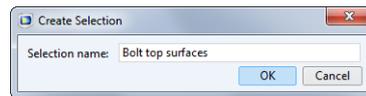
7 モデルツリーで、**固体力学**  を右クリックし、境界レベルから**固定拘束**  を選択します。同じ名前のノードがツリーに追加されます。



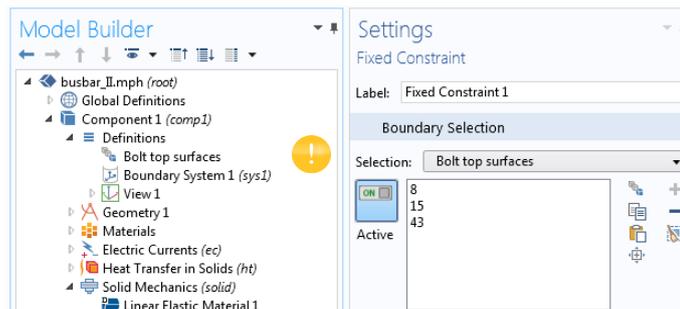
- 8 **固定拘束** ノード  をクリックします。**グラフィック** スウィンドウで、バスバーを回転させて、背面を表示します。ボルトの円形サーフェスをクリックしてそれを**選択**リストに追加します。
- 9 残りのボルトについてもこの手順を繰り返して、境界 8, 15, 43 を追加します。



複数の境界選択を管理しやすくするため、境界をユーザー定義の選択にグループ化することができます。境界 8, 15, 43 を選択したら、**選択を作成** ボタン  をクリックして、ボルト上面サーフェスのような名前を付けます。



この選択は、**コンポーネント 1 > 定義** でノードとして追加され、すべてのタイプの境界条件の**設定** ウィンドウで**選択** リストからアクセスできます。この方法で、ドメイン、境界、エッジ、ポイントをグループ化できます。



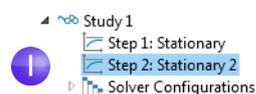
次に、**スタディ** ノードを更新して、追加したフィジックスを対象にします。

## ジュール熱と熱膨張の求解

材料温度が変化せず、変形が小さく、電気接触圧力が無視できると仮定する場合、バスバーのジュール熱効果は、応力や歪みとは無関係です。すなわち、構造解析に対する単なる入力として温度を使用してシミュレーションを実行できることとなります。言い換えると、広範囲なマルチフィジックス問題の連成は弱くなります。したがって、この問題は、1つはジュール熱、もう1つは構造解析と、2つの独立したスタディステップで求解すれば、計算時間を節約できます。さらに高度な解析では、前述のすべての効果を組み込むことができます。

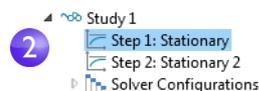
❗ この例の場合、これらのステップを省略して、**計算**をクリックします。ただし、以下の方法は、特に大型シミュレーションで計算時間とメモリリソースを節約する際に有効です、

- 1 **モデルビルダー**で、**スタディ 1** を右クリックし、**スタディステップ > 定常 > 定常** を選択して第2の定常スタディステップを追加します。



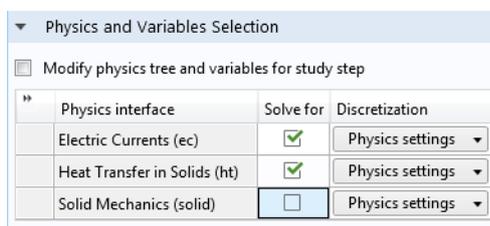
❗ スタディステップを追加するとき、正しいフィジックスを正しいスタディステップと手動で結合する必要があります。最初のステップから構造解析を無効にして開始します。

- 2 **スタディ 1** の下で、**ステップ 1: 定常ノード** をクリックします。
- 3 **定常の設定** ウィンドウで、**フィジックスと変数の選択** に移動します。



- 4 **求解対象** の下の **固体力学 (ソリッド)** 行で、チェックマーク  をクリックして  に変更し、**スタディ ステップ 1** から **固体力学** を削除します。

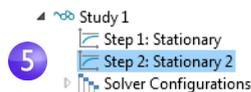
4



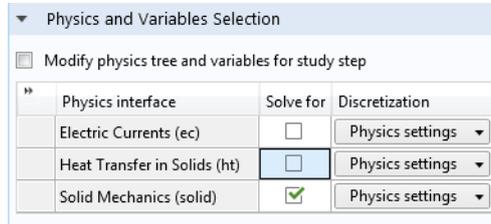
**マルチフィジックスセクション**で、すべてのデフォルト設定を残します。

これらのステップを繰り返して、第2のスタディステップから **電流 (ec)** と **固体中の伝熱 (ht)** を削除します。

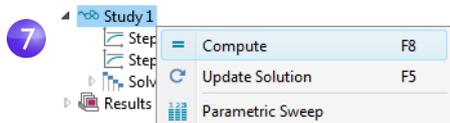
- 5 **スタディ 1** の下で、**ステップ 2: 定常 2** をクリックします。



6 フィジックスと変数の選択  
 の下の、電流 (ec) 行と固体中  
 の伝熱 (ht) 行で、チェック  
 マーク  をクリックして  
 に変更してステップ 2:  
 定常 2 からジュール熱を削  
 除します。



7 スタディ | ノード を右ク  
 リックし、計算 を選択 (または F8 を押すか、リボンの計算をクリック) し  
 て、求解します。

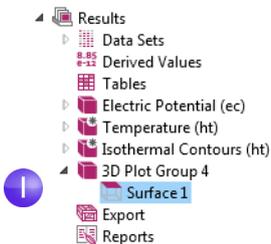


ファイルを busbar\_II.mph という名前で保存します。ファイルには固体力学  
 インターフェイスと追加スタディステップが保存されています。

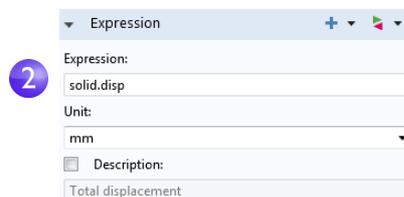
## 得られる変形

フィジックスインターフェイスを追加したので、固体力学には手動でさらにプ  
 ロットを追加します。最初に変位プロットを追加します。

1 結果 > 3D プロットグループ 4 で、サーフェス | ノード をクリックします。



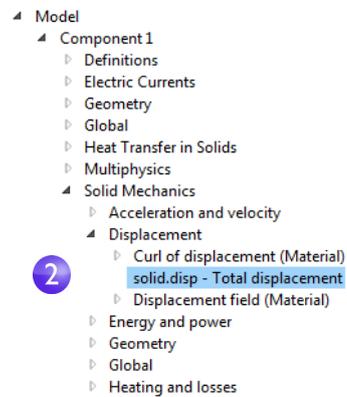
2 式セクションのサーフェスの設定ウイ  
 ンドウで、式を置換ボタン をクリッ  
 クします。



コンテキストメニューから、**モデル > コンポーネント 1 > 固体力学 > 変位 > solid.disp - 変位合計** を選択します。

また、**式**フィールドに `solid.disp` と入力することもできます。

これから、さらに適切な単位に変更します。**設定**ウィンドウの**式**の下で、**単位**リストから、`mm` を選択 (またはフィールドに `mm` と入力) します。



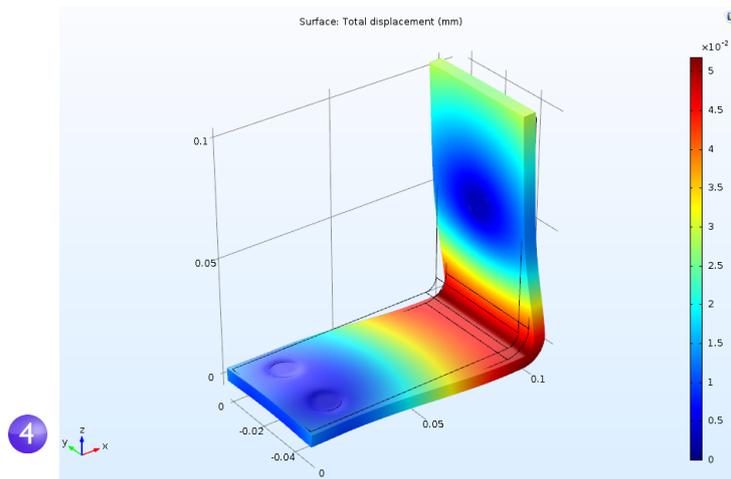
- 3** **範囲**をクリックしてそのセクションを展開します。**手動色範囲**チェックボックスをクリックしてクリアします。



熱膨張によるローカル変位がサーフェスプロットとして表示されます。次に、**バスバー**の変形に関する情報を追加します。

- 4** **モデルビルダーの結果 > 3D プロットグループ 4**で、**サーフェス 1**ノード  を右クリックし、**変形**ノード  を追加します。このプロットは**グラフィックス**ウィンドウで自動的に更新されます。**デフォルト 3D ビューへ移動**ボタン  をクリックします。以下の図のプロットと同様のビューが表示されます。

- ❗ 図に表示された変形は、実際にはごく小さな歪みを、わかりやすいように極端に大きく表示されています。



- 5 busbar\_II.mph ファイルを保存します。ここには**変形**がある**サーフェス**プロットが保存されています。

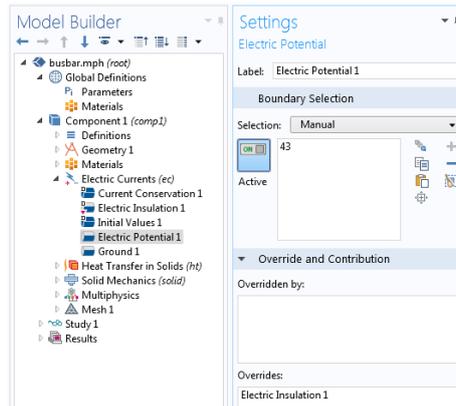
- ❗ さらに、ミーゼス応力と主応力もプロットして、バスバーとボルトの構造的完全性を評価することができます。

### オーバーライドと寄与：排他的ノードと寄与ノード

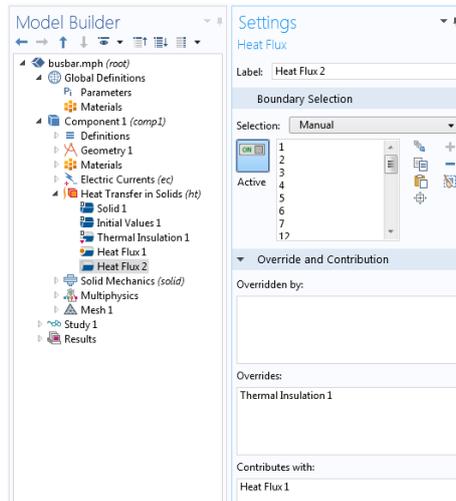
フィジックスインターフェースのモデルツリーノードは、最上部から下向きの並びで配置されています。選択結果次第で、ノードは、シーケンスの先行ノードについて、そのすべて、またはその一部のオーバーライド、またはシャドローイングが可能です。フィジックスインターフェースノードには、排他的と寄与の2つのタイプがあります。ノードの取り扱いは、そのタイプによって決まります。

排他的ノードの代表例として制約境界条件があります。制約境界条件の例としては、**電位**や**固定拘束**があります。**電流**の場合、たとえば、同じ境界で複数の**電位**ノードがある場合、シーケンスの最後の**電位**ノードは、他のノードの設定をオーバーライドします。**接地**ノードも排他的ノードであり、同じく、先行ノードが指定した境界条件をオーバーライドします。

以下の図は、電位の設定ウィンドウのオーバーライドと寄与 セクションを示しています。オーバーライドリストは、現在の境界条件が、デフォルト電気絶縁境界条件より優先することを示しています。



熱流束を指定する流束境界条件などの流束境界条件は、寄与ノードの代表例です。熱流束境界条件をいくつか積み重ねると、それらがすべて合計熱流束に寄与します。以下の図は、熱流束 2 境界条件でデフォルト断熱境界条件をオーバーライドして、熱流束 1 とともに熱流束に寄与する例を示したものです。



モデルツリーでは、オーバーライドと寄与関係は、それぞれ赤い矢印とオレンジ色の円で示されます。

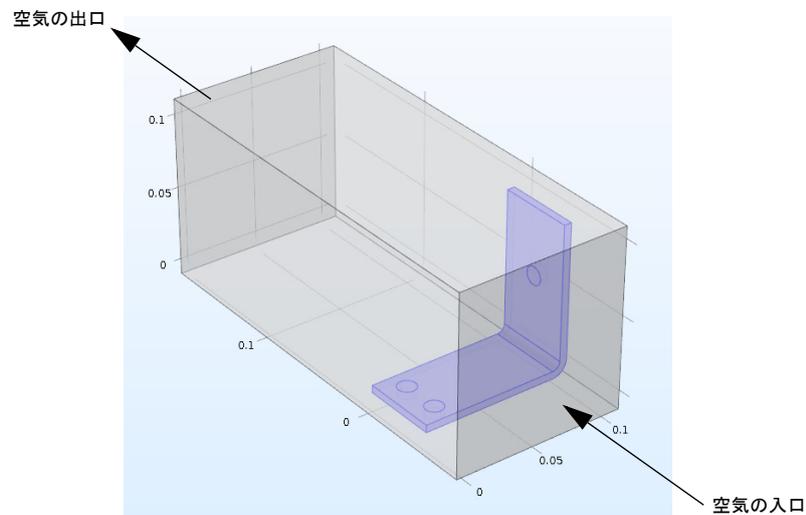
## 流体流れ追加で冷却

バスバーで生成される熱と、場合によっては誘発される熱膨張を解析した後は、バスバーのサーフェスに気流を流して冷却する方法を検証することになるかもしれません。これらのステップに、追加モジュールは必要ありません。なぜなら、モデルで扱うのはジュール熱だけで、先の熱膨張解析は含まれないからです。

❗ CFD モジュールが手元があれば、**非等温流**マルチフィジックスインターフェースを利用できます。伝熱モジュールがあれば、**共役伝熱**マルチフィジックスインターフェースを利用できます。これら2つのインターフェースのいずれも、層流や乱流など固体と流体における連成熱伝導を自動的に定義するのに対し、この例では、限定された機能を利用して手動で対応しています。

流体流れをジュール熱モデルに追加すると、新しいマルチフィジックス連成が生まれます。流れの領域をシミュレートするには、バスバーの周囲に外部流れ用の空気ボックスを作成する必要があります。そのためには、最初のモデルから手動でジオメトリ変更するか、アプリケーションライブラリ ファイルを開きます。時間節約のため、ボックスを作成済みのファイルを開きます。

ジオメトリを読み込み後、気流をシミュレートする方法をこの図に従って処理します。



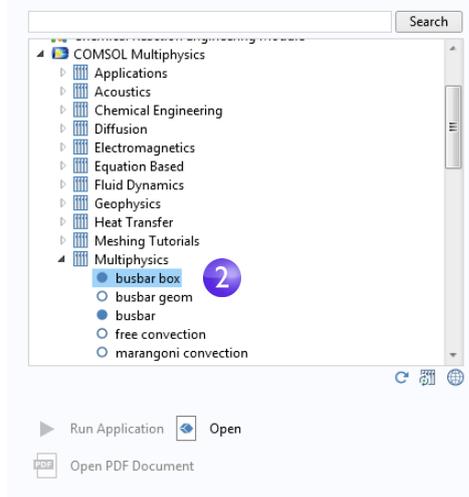
## 入口速度の定義

ジオメトリを読み込んで、入口流速の新しいパラメーターを追加します。

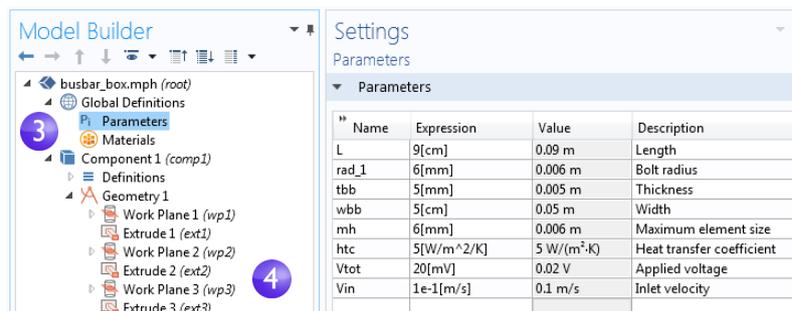
- 1 本ソフトウェアを再び開いたばかりの場合、**キャンセル**ボタン  をクリックして、自動的に開く**新規**ウィンドウを閉じます。
- 2 **ホーム**タブをクリックし、**ウィンドウメニュー**から**アプリケーションライブラリ**  を選択します。**COMSOL Multiphysics > マルチフィジックス > パスパーボックス**まで移動します。(あるいは、**ファイルメニュー**から直接アプリケーションライブラリを開くこともできます。)

ファイルをダブルクリックして開きます。このファイルには、ジオメトリ以外に、「材料のカスタマイズ」101 ページの項の最後まで完了したフィジックスモデリングステップがあります。

### Application Libraries



- 3 **グローバル定義**の下で、**パラメーターノード**  $P_1$  をクリックします。
- 4 **パラメーター**の**設定**ウィンドウで  $V_{tot}$  行のすぐ下の空行をクリックします。**名前**列に  $V_{in}$  と入力します。**式**列に  $1e-1$  [m/s] と入力し、**入口速度**のような、選択の説明を**説明**列に入力します。



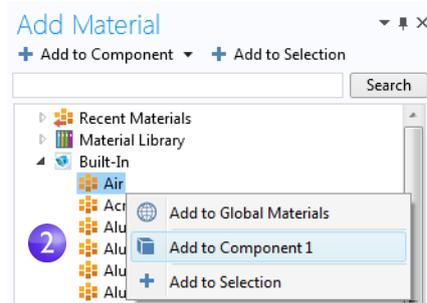
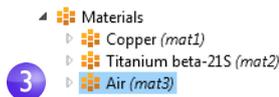
Name	Expression	Value	Description
L	9[cm]	0.09 m	Length
rad_1	6[mm]	0.006 m	Bolt radius
tbb	5[mm]	0.005 m	Thickness
wbb	5[cm]	0.05 m	Width
mh	6[mm]	0.006 m	Maximum element size
htc	5[W/m^2/K]	5 W/(m^2·K)	Heat transfer coefficient
Vtot	20[mV]	0.02 V	Applied voltage
Vin	1e-1[m/s]	0.1 m/s	Inlet velocity

- 5 **ファイル**> **名前を付けて保存**を選択して、新しい名前 busbar\_box\_I.mph でモデルを保存します。

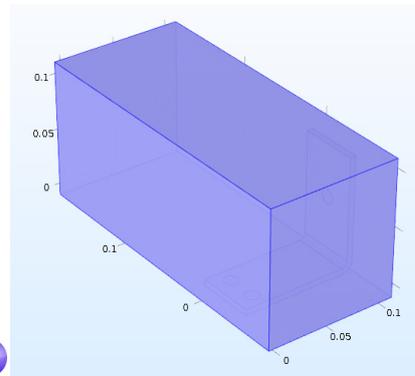
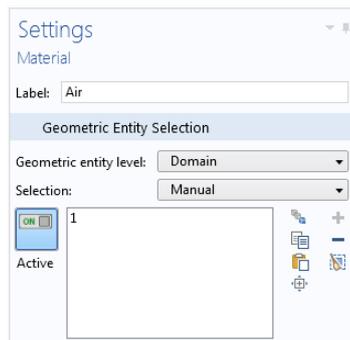
## 空気の追加

次のステップでは、空気の材料プロパティを追加します。

- 1 ホームタブから、**材料を追加**  を選択します (または、**材料** ノードを右クリックし、**材料を追加** を選択します)。
- 2 **材料を追加** ウィンドウで、**組み込み** ノードを展開します。 **空気** を右クリックし、**コンポーネント 1** に **追加** を選択します。 **材料を追加** ウィンドウを閉じます。
- 3 **モデルビルダー** の **材料** で、**空気** ノード  をクリックします。



- 4 **グラフィックス** ウィンドウ ツールバーで、**範囲をズーム**  をクリックします。
- 5 **グラフィックス** ウィンドウで、**空気** ボックス (ドメイン 1) をクリックして **選択** リストに追加します。色が青色に変化します。このステップでは空気の材料プロパティを空気ボックスに割り当てます。

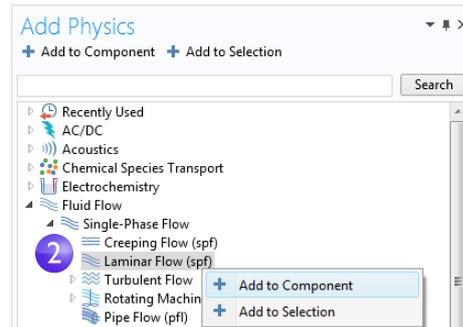


## 流体流れの追加

次に、流体流れのフィジックスを追加します。

- 1 モデルツリーで、**コンポーネント 1** を右クリックし、**フィジックスを追加** を選択します。

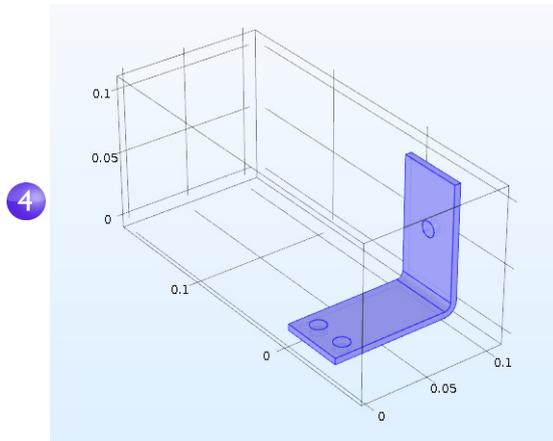
- 2 **フィジックスを追加** ウィンドウの **流体流れ > 単層流** の下で、**層流** を右クリックし、**+ コンポーネントに追加** を選択します。**層流** は、モデルツリーの **コンポーネント 1** の下に表示されます。**フィジックスを追加** ウィンドウを閉じます。



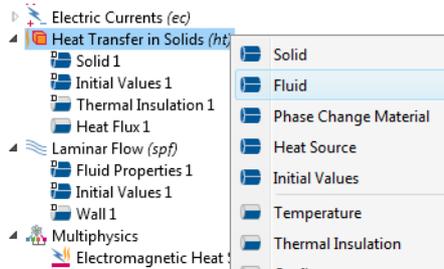
- 3 **グラフィックスツールバー** で **透過度** ボタン をクリックします。さらに、**ワイヤフレームレンダリング** ボタン をクリックします。これら 2 つの設定により、ボックス内部が見やすくなります。必要に応じて、モデリングプロセスの間にこれらのオンとオフを切り替えて、使用するレンダリングのタイプを制御します。

以上で、モデルに流体流れが追加されたので、**空気領域 (ドメイン 1)** を **電流 (ec)** インターフェースから削除し (空気は電気伝導性がなく、電流もないと想定)、**ジュール熱** マルチフィジックスインターフェースの熱伝導部分を流体流れに連成します。

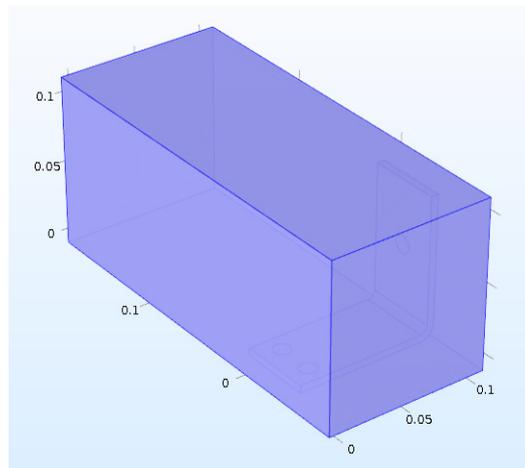
- 4 モデルツリーで、**電流 (ec)** ノード を選択します。**グラフィックス** ウィンドウでマウスポインタを**空気領域**に移動し、クリックして選択リストから削除します。このとき、**バスバー**のみを選択して、青色に強調表示にしてください。



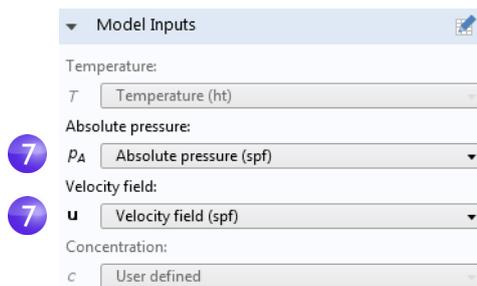
- 5 モデルビルダーで、**固体中の伝熱** を右クリックします。コンテキストメニューの最初のセクション(ドメインレベル)で、**流体**を選択します。



- 6 グラフィックスウィンドウで、空気領域(ドメイン1)をクリックして、**選択**リストに追加します。これから、流体流れ現象と熱伝導現象を連成します。



- 7 セクションモデル入力の**流体**の設定ウィンドウで、**速度フィールド**リストから**速度フィールド (spf)**を選択します。次に**絶対圧**リストから**絶対圧 (spf)**を選択します。

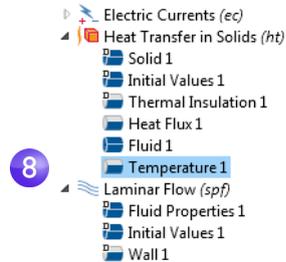


これで**層流**インターフェースから得られる流れ場と圧力を識別し、それを熱伝導に連成します。

これから、流体領域の熱伝導入口と出口を指定して境界条件を定義します。

8 モデルビルダーで、**固体中の伝熱** を右クリックします。コンテキストメニューの第2セクション(境界セクション)で**温度**を選択します。

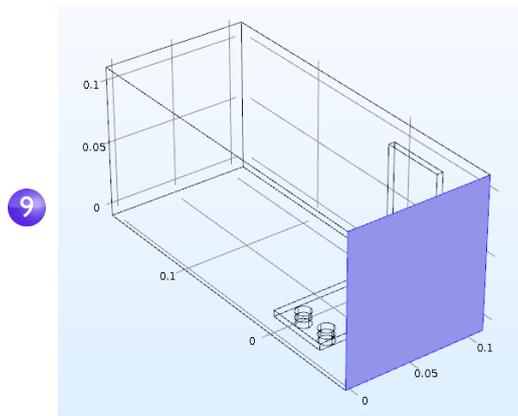
温度ノードがモデルツリーに追加されます。



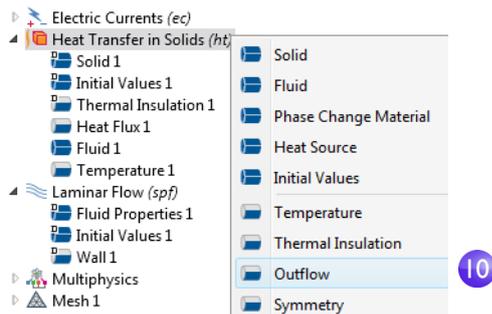
9 グラフィックスウィンドウで、入口境界(境界番号2)をクリックして、それを**選択**リストに追加します。

これで入口温度は、デフォルト設定値の 293.15 K に設定されます。

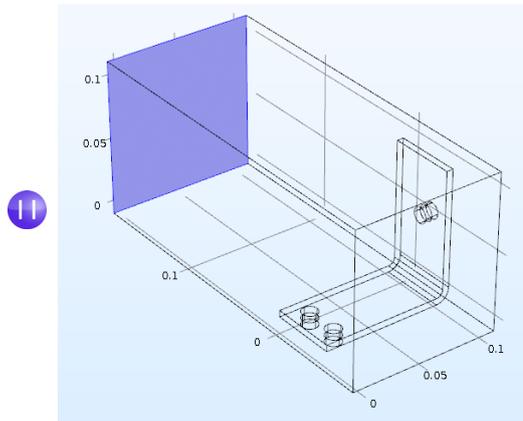
グラフィックスは、右の画像のようになるはずです。(透過度とワイヤフレームレンダリングのオン、オフの設定によっては、多少異なる表示になります。) 出口を定義して操作を続けます。



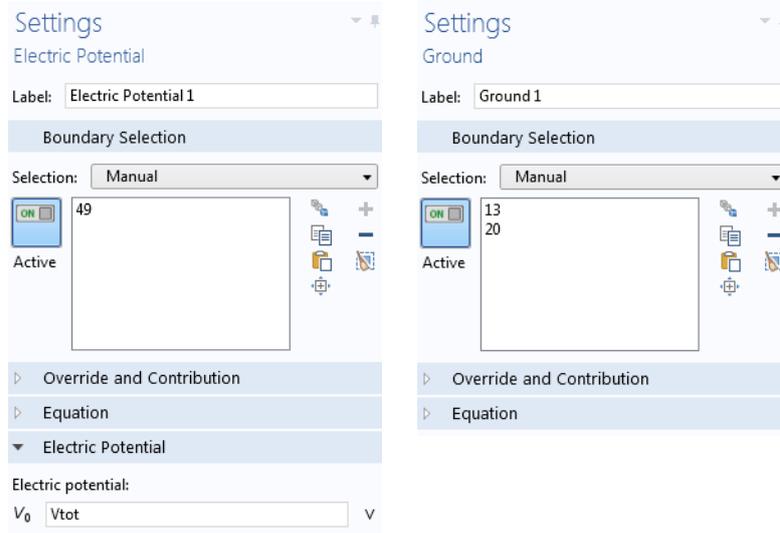
10 モデルビルダーで、**固体中の伝熱** を右クリックします。境界レベルで**流出**を選択します。流出ノードがモデルツリーに追加されます。



II グラフィックスウィンドウで, 出口境界 (境界番号 5) をクリックして, **選択** リストに追加します. マウススクロールホイールで, カーソルを境界内に入れて選択前に強調表示にするか, 上矢印と下矢印キーボードボタンを使用します.

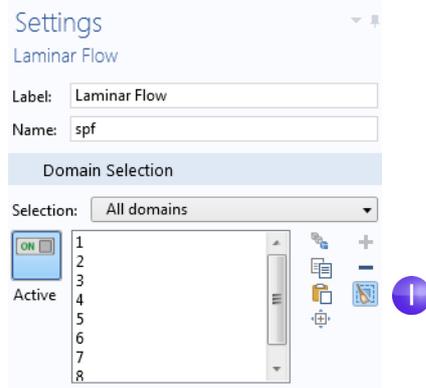


! 空気領域のボックスジオメトリを追加してもバスバー, ボルト, **電位 I** 境界と **接地 I** 境界の正しい設定が変更されることはありません. これを確認するには, **電流** の下のモデルツリーで, **電位 I** ノードと **接地 I** ノードをクリックして, 正しい境界が選択されていることを確認します.



次に, 流体流れ設定に進みます. 流体流れが必要なのは流体領域のみです. そのため, 入口, 出口, 対称性の各条件を設定します. 最初に選択結果からすべてのドメインを削除し, 改めて空気領域を追加します.

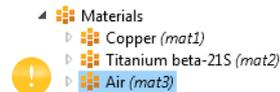
- 1 モデルツリーで、**層流**ノードをクリックします。層流の設定ウィンドウで、**選択をクリア**ボタンをクリックします。



- 2 グラフィックスウィンドウで、空気ボックス(ドメイン1)をクリックして、それを**選択**に追加します。

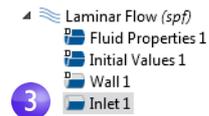


このとき、**材料**ノードの下の**空気**材料に、現在のマルチフィジックスの組み合わせで必要なすべてのプロパティがあることを確認する習慣を付けましょう。**材料**の下のモデルツリーで**空気**をクリックします。**材料**の設定ウィンドウの**材料の内容**の下で、警告符号の付いた欠落プロパティがないことを確認してください。詳細については、「材料」63ページを参照してください。



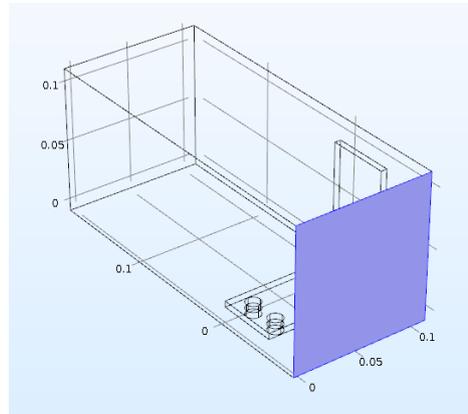
これから、境界の操作に移ります。

- 3 **モデルビルダー**で**層流**を右クリックし、現在の境界レベルで**入口**を選択します。**入口**ノードがモデルツリーに追加されます。



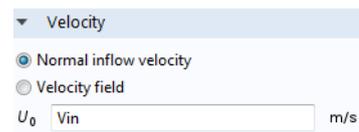
- 4 **グラフィックス** ウィンドウで, 入口 (境界 2) をクリックして, それを**選択**リストに追加します.

4



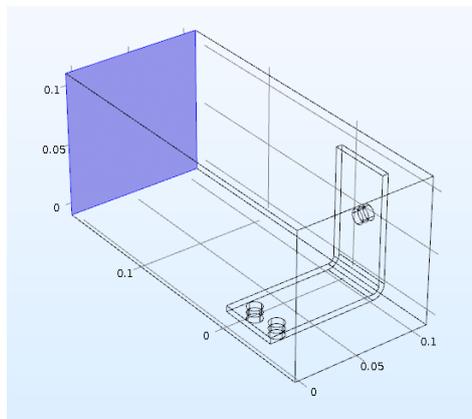
- 5 **入口** の設定ウィンドウの**速度**で,  $U_0$  フィールドに  $V_{in}$  と入力して, **標準流入速度** を設定します.

5



- 6 **層流**  を右クリックし, 現在の境界レベルで**出口**  を選択します. **グラフィックス** ウィンドウで, 出口 (境界 5) をクリックして, それを**選択**リストに追加します. マウスのスクロールホイールまたはキーボードの矢印キーで, 境界をスクロールして強調表示してから選択します.

6

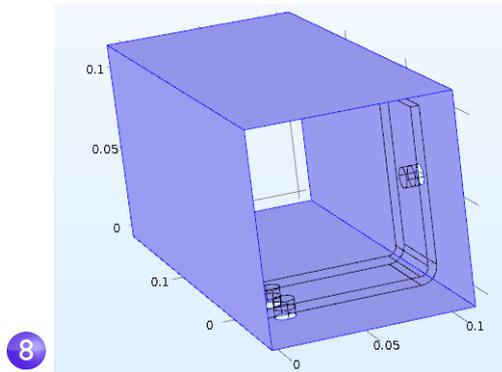


最後のステップで, 対称性境界を追加します. 簡単に処理するため, チャンネル面のすぐ外側の流れは, それらの面の内側の流れと似たような流れになるものと仮定します. この仮定は対称条件で正確に表現できます.

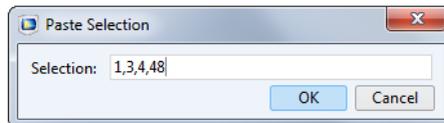
- 7 **層流**  を右クリックし**対称性**を選択します. **対称性**ノード  がシーケンスに追加されます.

- 8 **グラフィックス**ウィンドウで、下の図の青色面をそれぞれクリックし（境界 1, 3, 4, 48）、そのすべてを**選択**リストに追加します。すべての面を選択するときは、必要に応じて、マウスのスクロールホイールを使用するか、ジオメトリを回転させます。

busbar\_box\_I.mph ファイルを保存します。ここでは、今は**空気**材料と**層流**インターフェースの設定が保存されています。



- ⚠ 境界番号がわかっている場合は、**選択を貼り付け**ボタン  をクリックして情報を入力できます。この例では、**選択を貼り付け**ウィンドウに 1,3,4,48 と入力します。**OK**をクリックします。境界が**選択**リストに追加されます。



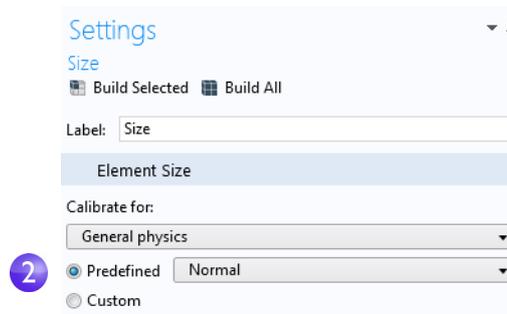
### メッシュの拡大

解を迅速に得るためには、メッシュを少し変更して粗くします。現在のメッシュ設定では、解を得るまでに比較的時間がかかるので、このような措置を取ります。メッシュの細分化は後で行えます。

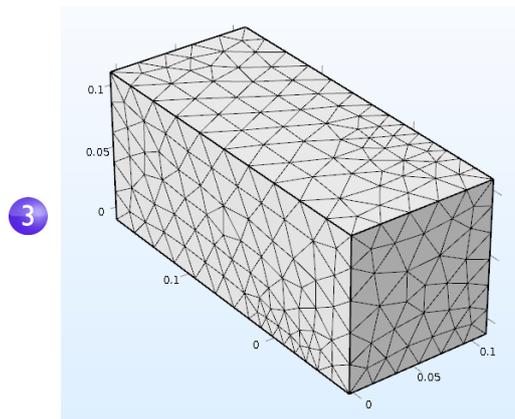
- 1 **モデルビルダー**で、**メッシュ** | ノード  を展開し、**サイズ** ノード  をクリックします。



- 2 **サイズ**の設定ウィンドウの**要素サイズ**で、**定義済み**ボタンをクリックして、**標準**が選択されていることを確認します。



- 3 **全作成**ボタン  をクリックします。**グラフィックス**ウィンドウにメッシュとともにジオメトリが表示されます(以下の図のような表示にするには必要に応じて**透過度**をオフにします)。



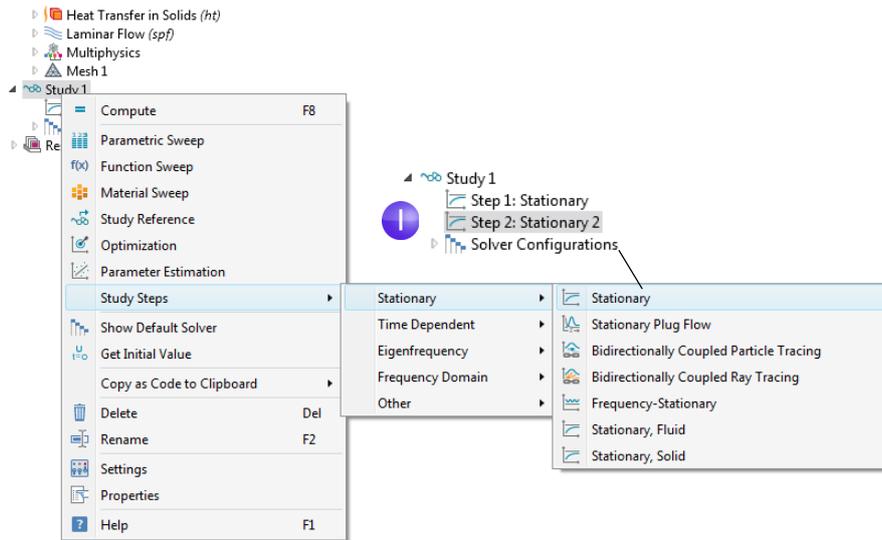
流速が十分に速いため、流速場における温度上昇の影響は無視できると仮定します。

その結果、流速場を最初に求解でき、次に流速場の結果を入力として生かして温度を求解します。以上は、スタディシーケンスで実装します。

### 流体流れとジュール熱の求解

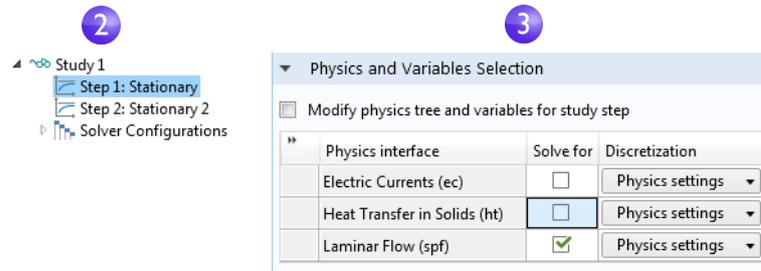
温度場の前に流速場を求解するとき、連成度の弱いマルチフィジックス問題が生じます。この項で解説するスタディシーケンスでは、このような弱連成や一方向連成を自動的に求解します。

- モデルツリーで、**スタディ 1** を右クリックし、**スタディステップ > 定常 > 定常** を選択して、第2の定常スタディステップを**モデルビルダー**に追加します。



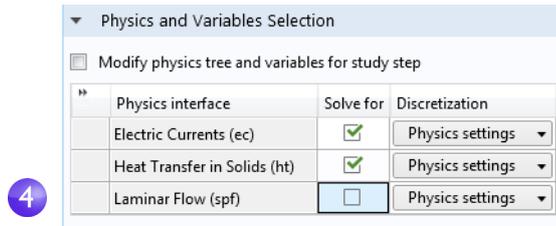
次に、正しいフィジックスは正しいスタディステップに結合します。ジュール熱関連の**電流 (ec)** インターフェースと**固体中の伝熱 (ht)** インターフェースを最初のステップで無効にして開始します。

- スタディ 1** の下で、**ステップ 1: 定常** をクリックします。

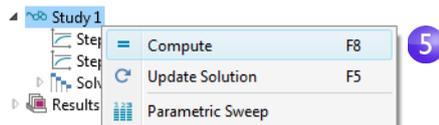


- 定常の設定ウィンドウで、**フィジックスと変数の選択**セクションに移動します。**電流 (ec)** 行と**固体中の伝熱 (ht)** 行の両方で、**求解対象列**のチェックマーク  を  に変更し、**ステップ 1** からジュール熱効果を削除します。

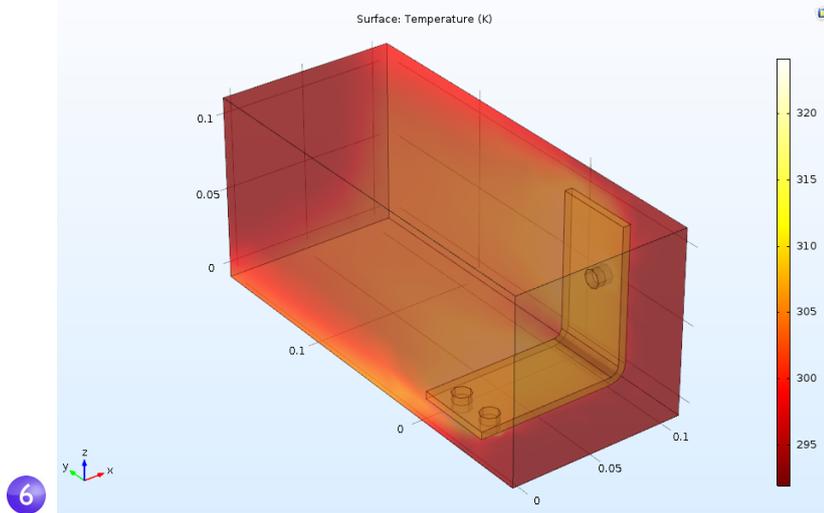
- 4 ステップを繰り返します。スタディ 1 の下でステップ 2 : 定常 2 をクリックします。フィジクスと変数の選択の下の層流 (spf) 行で、求解対象列をクリックして、チェックマーク  を  に変更します。



- 5 スタディ 1 ノードを右クリックし、計算 = を選択 (または F8 を押すか、リボンの計算をクリック) します。これで、層流を求解し、次にジュール熱を求解する新しいソルバー シーケンスが自動的にできます。



- 6 求解が完了したら、モデルビルダーの結果ノードの下の温度 (ht) プロットを選択します。透過度をオンにしていなかった場合は、グラフィックツールバーの透過度ボタンをクリックして、ボックス内の温度場を可視化します。ズームするには、マウスの中央ボタンをクリックし、マウスボタン (またはスクロールホイール) を押したまま、マウスをドラッグします。



グラフィックスウィンドウに表示される**温度サーフェス**プロットには、バスバーと周囲のボックスの温度が表示されます。また、比較的メッシュが粗いため、温度場はスムーズではありません。スムーズな解を得る手段としては精度に合わせてメッシュを調整する方法があります。

- 7 いつでも元の設定に戻れるように、この時点で **busbar\_box\_I.mph** ファイルを保存します。次のステップでは、元の **busbar.mph** ファイルを使用します。

## パラメトリックスイープ

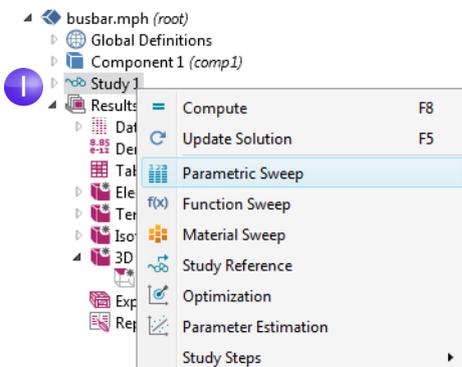
### 幾何学的パラメータのスイープ

一般に、特定の制約に合わせるためには、設計のインスタンスを複数生成すると便利です。前のバスバーの例では、設計目標は、動作温度を下げるか、電流密度を落とすことになりそうです。ここでは、前者を取り上げます。電流密度は、バスバーのジオメトリによって異なるため、幅 (**wbb**) を変更すると電流密度が変化し、一方、動作温度にも何らかの影響が生じます。**wbb** でパラメトリックスイープを実行して、この変化を調べてみましょう。

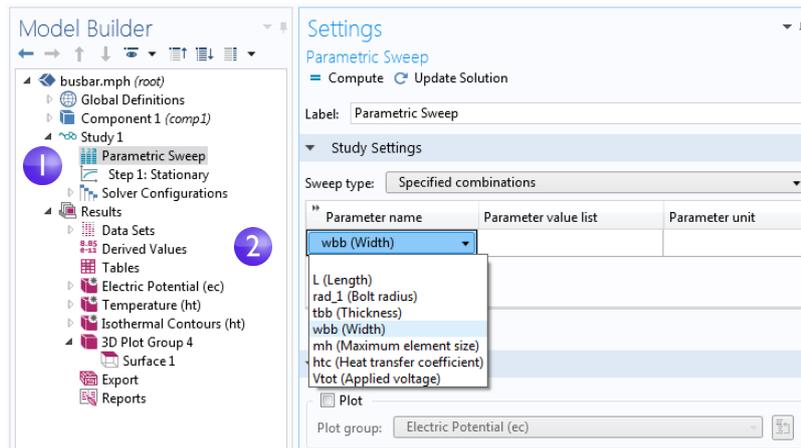
### パラメトリックスイープの追加

- 1 **ファイルメニュー**から、モデルファイル (**busbar.mph**) を開きます。モデルを保存していなければアプリケーションライブラリを開くこともできます：**ファイル > アプリケーションライブラリ > COMSOL Multiphysics > マルチフィジックス > バスバー**。

モデルビルダーで**スタディ 1** を右クリックし、**パラメトリックスイープ**を選択します。パラメトリックスイープノードがモデルビルダーシーケンスに追加されます。



- 2 パラメトリックスイープの設定ウィンドウで、空のパラメーター テーブル下で、追加ボタン **+** をクリックします。テーブルの**パラメーター名**リストから **wbb** を選択します。

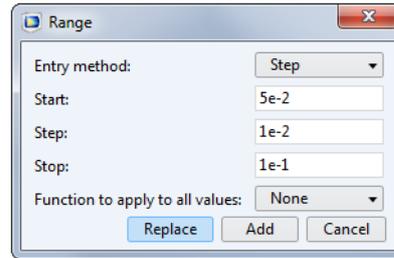


- ⚠ **スイープタイプ**は、複数のパラメーターによるパラメトリックスイープを制御します。スイープについては、所定のパラメーターの**全ての組み合わせ**と**指定の組み合わせ**のサブセットのいずれかを選択します。

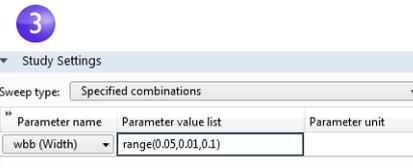
3 パラメーター値の範囲を入力して、バスバーの幅を 5 cm から 10 cm まで 1 cm 刻みでスイープします。この情報の入力方法には、

- コピーアンドペーストと、範囲 (0.05,0.01,0.1) をパラメーター値リストフィールドに入れる方法の2つがあります。

- **パラメーター値リスト**フィールドをクリックし、**範囲** ボタンをクリックして、**範囲**ダイアログボックスに値を入力します。**開始**フィールドに  $5e-2$ 、**ステップ**フィールドに  $1e-2$ 、**Stop**フィールドに  $1e-1$  と入力します。**置換**をクリックします。

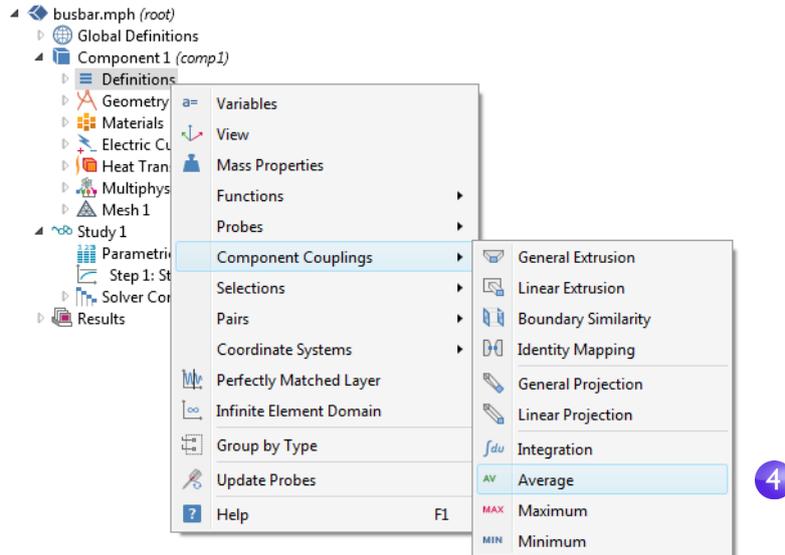


- メソッドのどれかで、長さ単位を使用して、デフォルトの SI 単位系をメートルでオーバーライドすることができます。 $5e-2$  の代わりに  $5[cm]$  を入力できます。同じく、 $1[cm]$  を  $1e-2$  の代わりに、 $10[cm]$  を  $1e-1$  の代わりに入力できます。また、デフォルト単位系は、モデルツリーのルートノードの**設定**ウィンドウから変更できます。

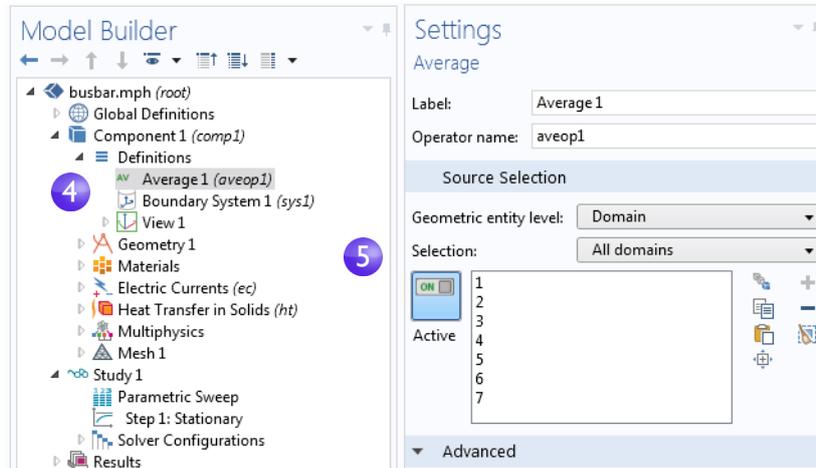


次に、後で、バスバーの平均温度の計算に使用できる**平均**コンポーネントカップリングを定義します。

- 4 コンポーネント 1 の下で、定義 を右クリックし、コンポーネント カップリング > 平均<sub>av</sub> を選択します。



- 5 平均の設定ウィンドウで、選択リストからすべてのドメインを選択します。



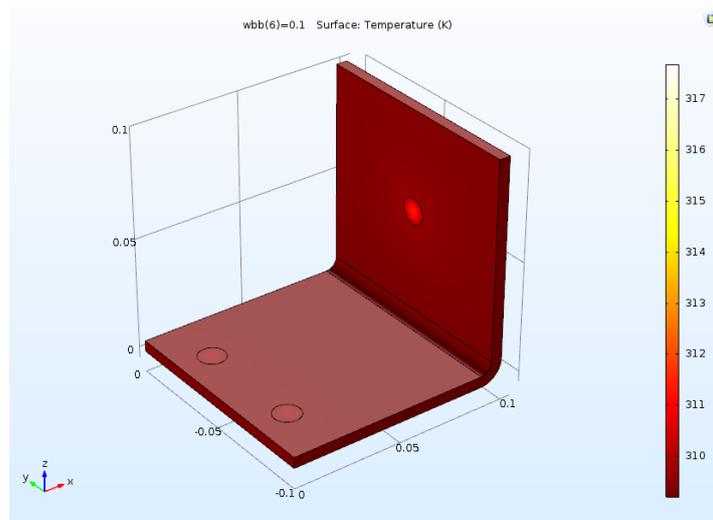
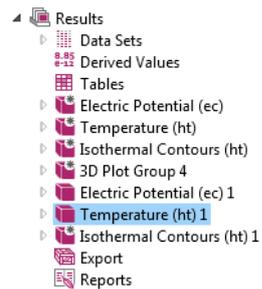
これで、演算子 `aveop1` ができます。この演算子は、選択したドメインに定義した任意の数量の平均値の計算に使用できます。後で、このツールを使用して平均温度を計算しますが、このツールは、平均電位、電流密度などの計算にも使用できます。

- 6 **ファイル > 名前を付けて保存**を選択して、モデルを新しい名前 busbar\_III.mph で保存します。
- 7 **スタディ I** を右クリックし、**ホーム**タブの **計算 =** を選択して、スイープを実行するか、**計算**をクリックします。

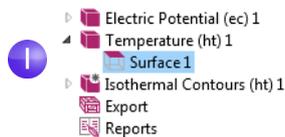
### パラメトリックスイープの結果

モデルツリーの**結果**の下にある**温度 (ht) I** ノードをクリックします。

**グラフィックス**ウィンドウに表示されるプロットには、最後のパラメーター値 ( $wbb=0.1$  [m] (10 [cm])) を使用した幅広バスバーの温度が表示されます。プロット全体を表示できるように、**グラフィックス**ウィンドウツールバーから**範囲をズーム**  を選択します。得られるプロットは、色の組み合わせが多少単調なので、色の最大範囲を変更する必要があります。



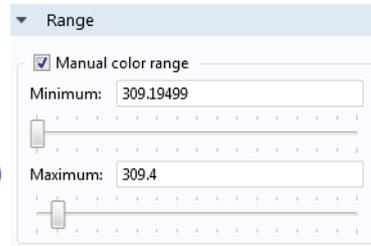
- 1 **温度 (ht) I** ノードで**サーフェス**ノード  をクリックします。



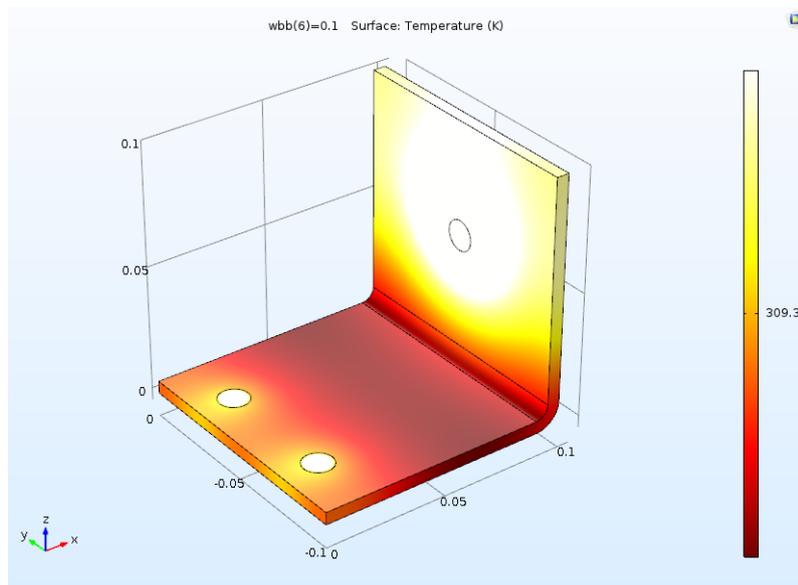
2 **サーフェスの設定**ウィンドウで、**範囲**をクリックしてセクションを展開します。**手動色範囲** チェックボックスを選択します。**最大** フィールドに **309.4** と入力します (デフォルト値と差し替え).

2

2

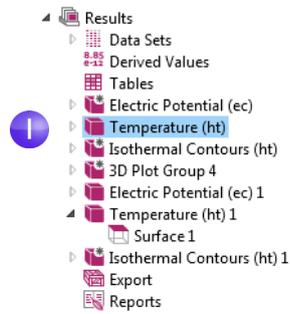


3 **グラフィックス**ウィンドウの  $wbb=0.1$  [m] (10 [cm]) の **温度 (ht) I** プロットがに更新されます.

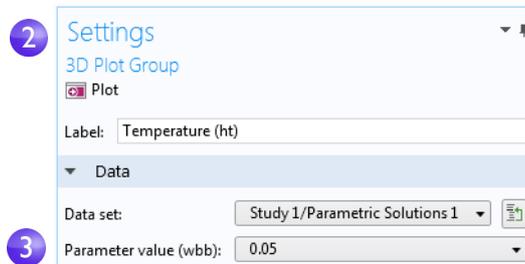


幅広バスバープロットを、 $wbb=0.05$  [m] (5 [cm]) の温度と比較します. この目的のために、先に定義したプロットグループの1つを再利用できます.

1 モデルビルダーで、温度 (ht) ノード  を先にクリックします。

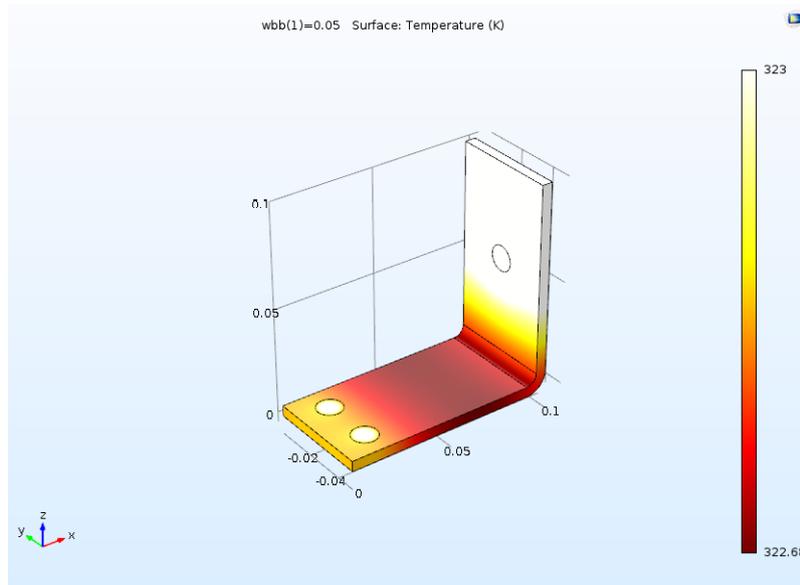


2 3D プロットグループの設定ウィンドウで、データセットリストから **スタディ 1 / パラメトリック解 1** を選択します。このデータセットには、パラメトリックスイープの結果が収められています。



3 パラメーター値リストで、**0.05 (wbb=5 cm)** を選択します。プロットボタン  をクリックします。グラフィックスウィンドウツールバーの **範囲をズーム** ボタン  をクリックします。

wbb=0.05[m] (5[cm]) の**温度 (ht)** プロットが更新されます。このプロットの色範囲を変更した場合、プロットは以下のどれか 1 つに似たものになります。変更していなければ、続きのステップを実行してください。



幅広バスバーと同じく、プロットの色はきわめて単調なので、最大色範囲を変更します。

- 1 最初の**温度 (ht)** ノードで、**サーフェス** ノード  をクリックします。
- 2 **サーフェス** の設定ウィンドウで、**範囲** をクリックしセクションを展開します (展開されていなかった場合)。**手動色範囲** チェックボックスを選択します。
- 3 **最大** フィールドに 323 と入力して (デフォルト値と差し替え) wbb を 5 cm でプロットします。

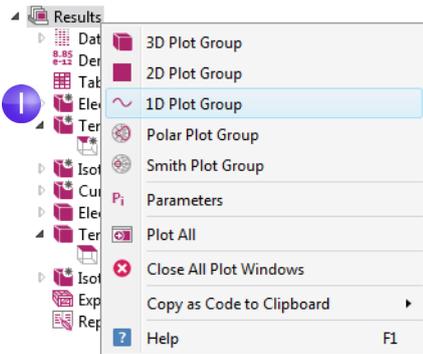
**グラフィックス** ウィンドウの wbb=0.05[m] (5[cm]) の**温度 (ht)** プロットが更新されます。

最初と 2 番目の**温度** プロットノードをクリックし、**グラフィックス** ウィンドウのプロットと比較します。バスバーの幅が 5 cm から 10 cm に広がると、最高温度が、331 K から 318 K に低下します。

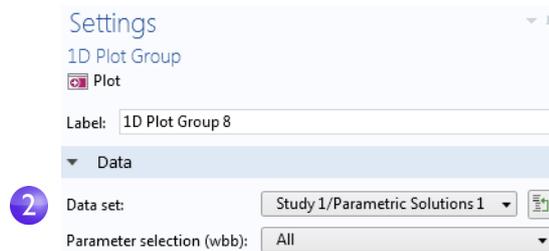
## さらにプロットを追加

これらの結果をさらに解析するため、幅ごとの平均温度をプロットできます。

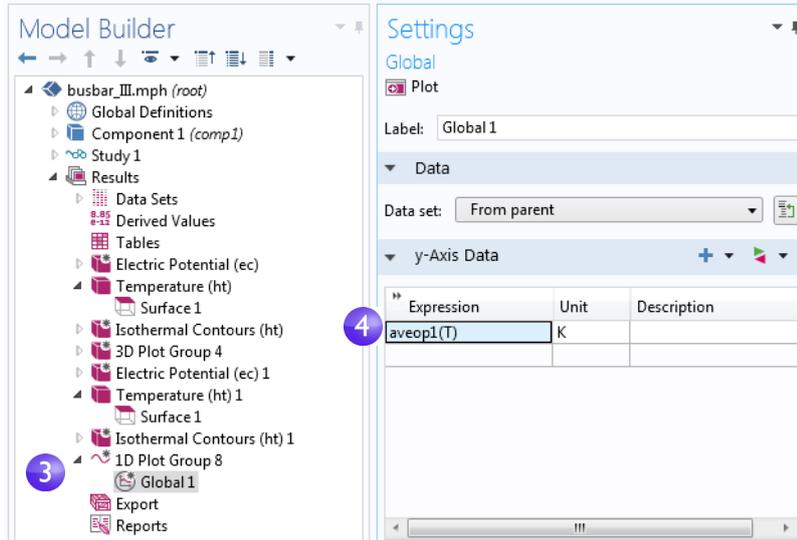
1 **結果** を右クリックし、**ID プロットグループ** を追加します。



2 **ID プロットグループ** の設定ウィンドウで、**データセットリストからスタディ 1/パラメトリック求解 1** を選択します。

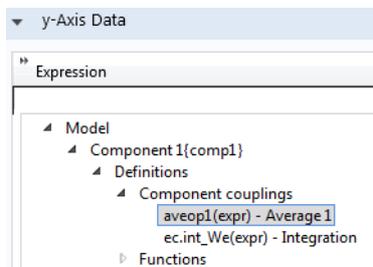


- 3 モデルビルダーで、ID **プロットグループ 8** を右クリックし、**グローバル** ノードを追加します。

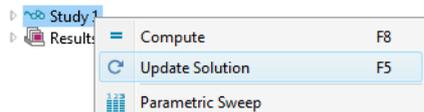


- 4 **グローバル** の設定ウィンドウの **y-軸データ** の下で、**式列**の最初の行をクリックし、**aveop1(T)** を入力します。これは、130 ページで使用するために定義しておいた演算子です。同様の構文でその他の数量の平均値を計算します。

- 最初の行をクリック後、**Ctrl+スペース** を使用して自動完了を使用することもできます。



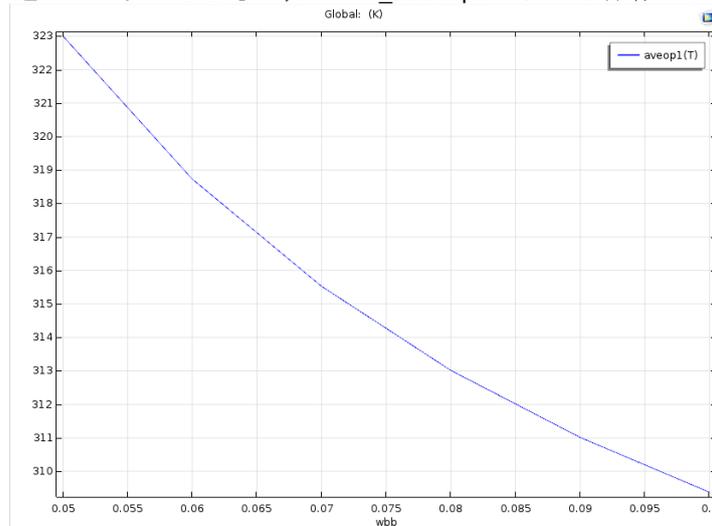
- 求解なしでカップリング演算子を使用するには、**スタディ** ノードを右クリックしてアクセスするオプション **解を更新** を選択できます。



5 凡例セクションをクリックして展開します。**式**チェックボックスを選択します。

これで、グラフの右上隅に凡例が追加されます。

6 **プロット**ボタン  をクリックし、パラメトリックスイープ結果を使用するこれら追加プロットとともに、busbar\_III.mph モデルを保存します。

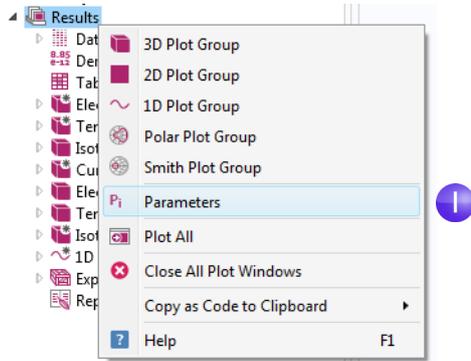


プロットでは、幅の増加とともに平均温度が減少します。

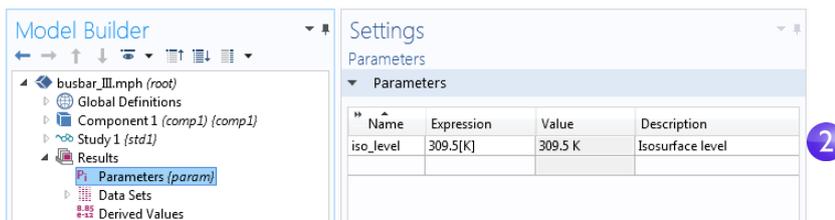
### 結果のパラメーター

柔軟性を重視して、**結果**ノードでのみ使用するパラメーターを定義することができます。これらのパラメーターは、モデル求解がなくても使用できます。以下の例では、**結果**で定義した**パラメーター**でどのように動画化できるかを示します。

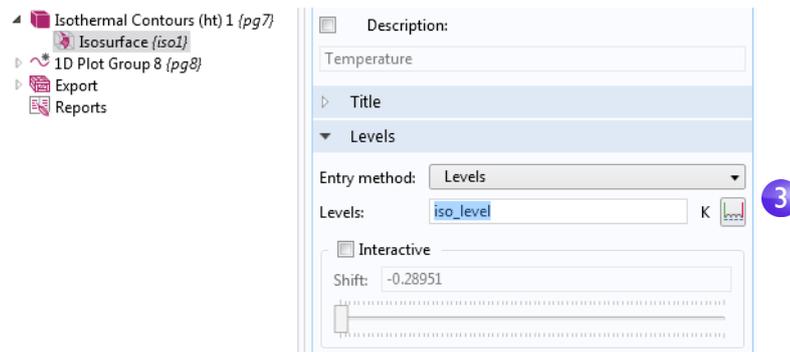
1 結果ノードを右クリックし、パラメーターを選択します。



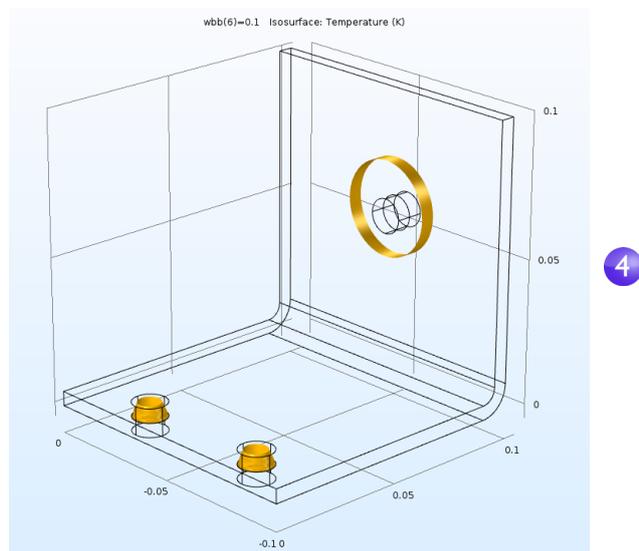
2 式 309.5[K] で、パラメーター iso\_level を定義します。



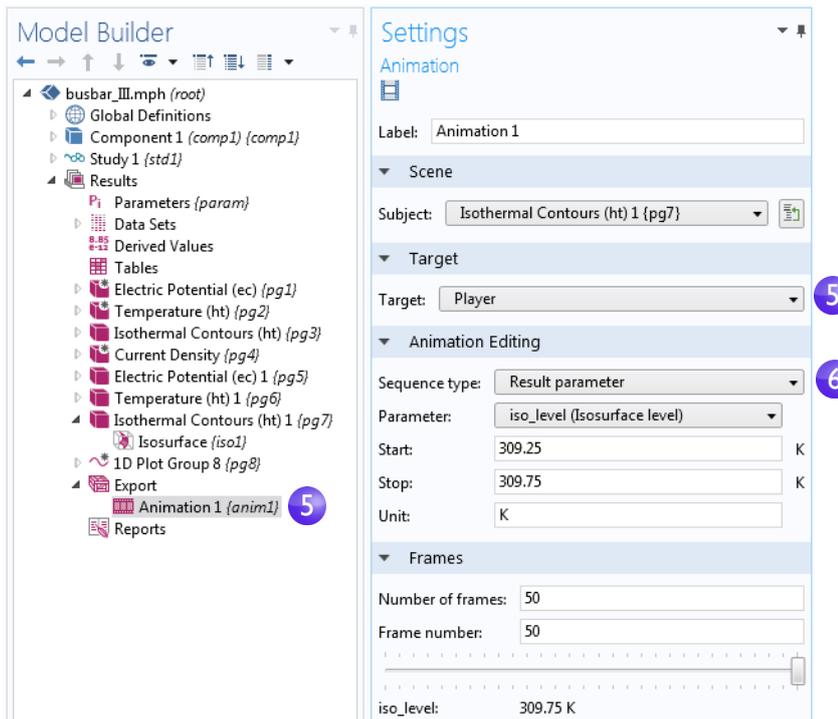
3 等温コンター (ht) | プロットグループの場合、アイソサーフェスプロットの設定ウィンドウで、エントリメソッドをレベルに変更します。レベル式フィールドで、iso\_level と入力します。



4 同じ設定ウィンドウで、**プロット**をクリックします。



- 5 リボンの**等温コンター (ht)** タブの**動画**メニューで**プレーヤー**オプションを選択するか、エクスポートノードを右クリックし、**動画 > プレーヤー**を選択して、**動画**を生成します。



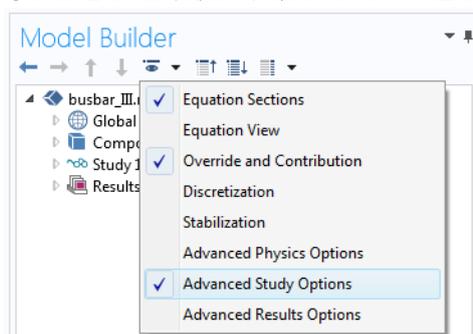
- 6 動画の**設定**ウィンドウで、**シーケンスタイプ**を**結果パラメーター**に変更し、**iso\_level**パラメーターを選択します。**開始**に 309.25 を、**終了**に 309.75 を入力します。**グラフィックス**ツールバーの**再生**ボタンをクリックするか、**動画の設定**ウィンドウの**フレームを表示**ボタンをクリックします。よりスムーズな動画にするには、**フレーム数**の値を、たとえば 50 に増やします。

パラメトリックスイープという課題に対してパラレルコンピューティングという対策が考えられます。すべてのパラメーターを同時処理すれば効率的です。

## パラレルコンピューティング

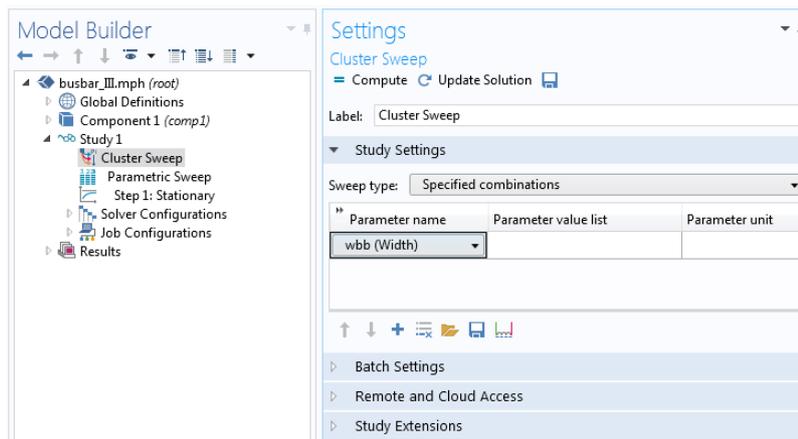
COMSOL Multiphysics と COMSOL Server は、マルチコアプロセッサ用の共有メモリ並列処理、クラスターとクラウド用のハイパフォーマンスコンピューティング (HPC) など、ほとんどのパラレルコンピューティングフォームをサポートしています。COMSOL ライセンスは、すべてマルチコア対応です。並列処理スイープなどのクラスターコンピューティングまたはクラウドコンピューティングでは、フローティングネットワークライセンス (FNL) が必要です。

2つのオプションとともに1つでクラスターまたはクラウド、**クラスタースイープ**または**クラスターコンピューティング**を使用できます。フローティングネットワークライセンスをお持ちの場合、**スタディノード**を右クリックするとこの2つのオプションを利用できます。ただし、**モデルビルダー**ツールバーの**表示**ボタンをクリックし、**拡張スタディオプション**を選択して、**拡張スタディオプション**を最初に有効にしておく必要があります。



## クラスタースイープ

**クラスタースイープ**オプションは、モデルごとに異なるパラメーターセットがある複数のモデルを並列処理するときに使用します。**パラメトリックスイープ**の一般化。**スタディ**ノードを右クリックして、**クラスタースイープ**ノードを追加します。



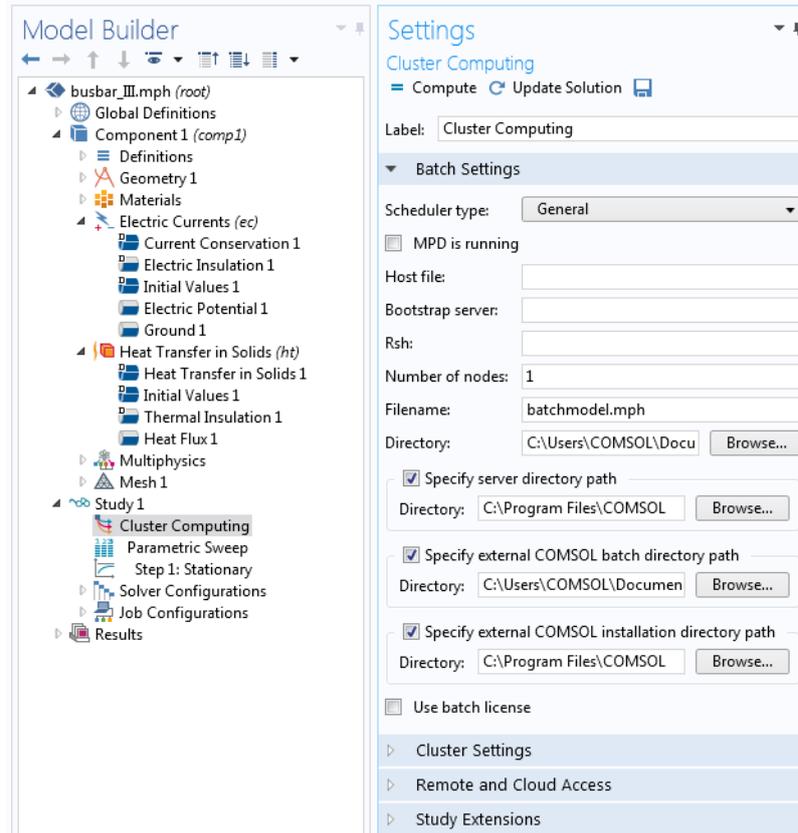
**クラスタースイープ**の**スタディ**設定は、**パラメトリックスイープ**の**スタディ**設定に似ていますが、使用するクラスターやクラウドに、追加設定が必要です。上の図は、「**パラメトリックスイープ**」127ページで定義した同じスイープに対して、**クラスタースイープ**の**設定**ウィンドウの最初がどうなるかを示した物です。この場合、**クラスタースイープ**を実行するには、最初に**パラメトリックスイープ**ノードを削除します。

## クラスターコンピューティング

さらにクラスターやクラウドで1つの大型モデルを、分散メモリを利用して求解することもできます。パフォーマンスを最大限生かすには、COMSOL ソフトウェアクラスターの実装で、分散メモリモデルに従って、メッセージ伝達インターフェース (MPI) と組み合わせて、ノードごとに共有メモリマルチコア処理を利用することができます。この手法はハイブリッド並列処理とも呼び、利用可能な計算パワーを最大限生かして大幅なパフォーマンス強化を図ることができます。

**スタディ**ノードを右クリックして、**クラスターコンピューティング**ノードを追加します。**クラスターコンピューティング**ノードは、**クラスタースイープ**と組み合わせて使用することはできません。先に進む前に**クラスタースイープ**を削除するかどうかを確認するプロンプトが表示されます。**はい**を選択します。

以下の**クラスターコンピューティング**の**設定**ウィンドウは、クラスターまたはクラウドの設定でシミュレーションを管理するときに使用します。



実行するクラスタージョブのタイプを**クラスタータイプ**リストから選択します。COMSOL Multiphysics と COMSOL Server は、全般、Windows® Compute Cluster Server (WCCS) 2003, Windows® HPC Server (HPCS) 2008/2012, Open Grid Scheduler/ Grid Engine (OGS/GE), SLURM, または非分散システムをサポートしています。全般オプションは、Linux® クラスター用の多目的オプションです。その他のクラスター設定とスケジューラー設定、**プリペンドコマンド**と**ポストペンドコマンド**は**ファイルメニュー**からアクセスする**環境設定**ウィンドウで利用できます。

並列処理の詳細については、リファレンスマニュアルを参照してください。

## COMSOL Multiphysics Client-Server

---

COMSOL Multiphysics をフローティングネットワークライセンス (FNL) で使用する場合、ローカルマシンのグラフィックスカードでグラフィックスを表示する機能は利用しつつ、クライアントサーバーモードの動作で大型モデルを求解するためにリモートコンピューティングリソースにアクセスすることができます。(この動作モードをCOMSOL アプリケーションで使用するCOMSOL Server 製品と混同しないでください。)

COMSOL Multiphysics クライアント-サーバー モードを使用する場合、いくつか大きなメリットがあります。エンジニアリング計算と科学のコンピューティング問題には、大量のデータを扱うという問題があります。どこでもメガバイトレベルからギガバイトレベルのデータがシミュレーションの間、普通に生成されます。このデータを生成して保存するには、高速プロセッサ、大容量のランダムアクセスメモリ (RAM)、大型ハードドライブを備えたコンピュータが必要です。サイズの大きなデータセットを可視化するには、ローカルコンピュータにハイエンドグラフィックスカードを搭載します。

すべてのシミュレーションステップで十分なメモリ容量と処理パワーを備えたハイエンドコンピュータをいつも使用できれば、それが理想的条件です。しかし、そのような条件が整っていない状態で、大型モデルを処理しなくてはならない場合、ネットワークによる共有コンピューティングリソースのアクセス環境があります。

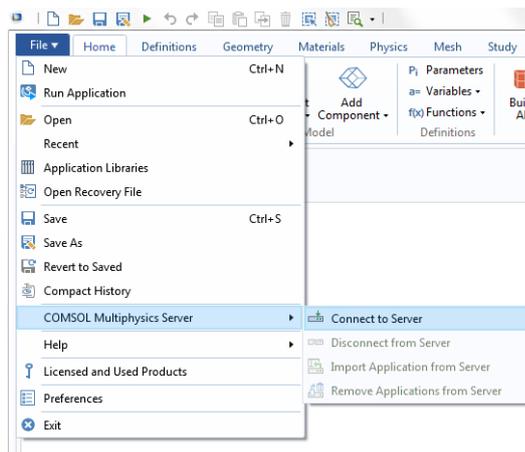
COMSOL Multiphysics を使用しながら、いつでも、クライアントサーバー動作モードでリモートコンピューティングリソースに接続できます。これは、2 ステッププロセスになっています。まず、リモートシステムにログオンし、COMSOL Multiphysics サーバーを呼び出します。これで、COMSOL Multiphysics サーバープロセスが開始し、ネットワークに接続します。次に、ローカルマシンで、開かれた COMSOL Multiphysics セッションにネットワーク接続情報を入力します。本ソフトウェアは、ネットワーク経由でモデルデータと結果をストリーミングで透過的にやりとりし、すべての計算にリモートコンピューティングリソースを使用します。

COMSOL Multiphysics サーバーセッションの開始方法はいくつかあります。たとえば、Windows<sup>®</sup> 7 では、**COMSOL Multiphysics 5.2a > Client-Server** でスタートメニューからサーバーセッションを開始します。Windows<sup>®</sup> 10 の場合、サーバーセッションは、Windows スタートメニューの **COMSOL Launchers** オプションから開始します。Linux<sup>®</sup> の場合、`comsol mphserver` コマンドを使用します。サーバーセッションとクライアントセッションは、異なるオペレーティングシステムで実行できます。たとえば、サーバーを Linux<sup>®</sup> で実行して、クライアントセッションは Windows<sup>®</sup> で実行することができます。

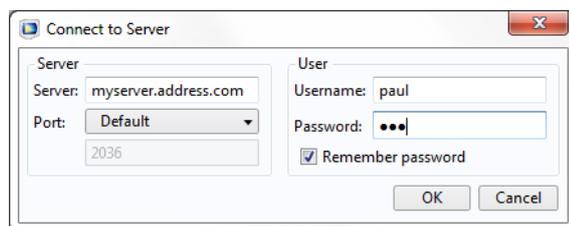
コンピュータで初めて COMSOL Multiphysics サーバーを開始すると、クライアントサーバー動作モードに関連付けられ、今後の利用時のために保存されるユーザー名とパスワードを求めるプロンプトが表示されます。以下の図は、Windows でサーバーセッションを開始するときのコマンドウィンドウです。

```
COMSOL Multiphysics Server
Username: paul
Password:
Confirm password:
Port number 2036 was busy, using 2038 instead
COMSOL Multiphysics Server started listening on port 2038
Use the console command 'close' to exit the program
```

以下の図では、COMSOL Desktop ユーザーインターフェースからサーバーセッションに接続する方法を示しています。接続するには、**ファイル**メニューから **COMSOL Multiphysics Server > サーバーに接続** を選択します。



サーバーセッション開始時に入力したユーザー名とパスワードを求めるプロンプトが表示されます。



COMSOL Multiphysics クライアント-サーバー実行の詳細については、リファレンスマニュアルを参照してください。

## 付録 A — ジオメトリの構築

---

この項では、COMSOL Multiphysics で組み込みジオメトリツールを利用してバスバージオメトリを作成する方法を詳しく紹介します。順を追った操作説明では、**グローバル定義**セクションのパラメーターセットアップでジオメトリを構築します。パラメーター化寸法は、**仮定解析**と幾何学的パラメトリックスイープを作成するのに役立ちます。

COMSOL Multiphysics で利用できるツールによるジオメトリ構築に代わる方法として、CAD パッケージで作成したジオメトリをインポートする方法があります。オプションの CAD インポートモジュールとデザインモジュールでは、さまざまな CAD ファイル形式をサポートしています。さらに、一般的な CAD ソフトウェアパッケージとの双方向インターフェースを備えたアドオン製品もいくつか用意しています。リストについては、「付録 E — LiveLink™ アドオンとの接続」185 ページを参照してください。CAD インポートモジュールで利用できる機能以外に、デザインモジュールでは、ロフト、フィレット、面取り、中立面、肉厚化のための 3D 機能を追加しました。

まだ開始していない場合は、「例 2：バスバー — マルチフィジックスモデル」53 ページで開始してください。「モデルウィザード」31 ページのステップに従って、フィジックスとスタディを追加し、**グローバル定義**のステップに従ってパラメーターを追加してください。ジオメトリモデリングについては、この項に戻ってください。ジオメトリシーケンスの最初のステップは、バスバーのプロファイルの描画です。

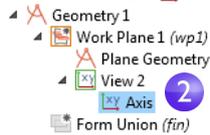
### 1 コンポーネント 1 の下で、ジオメトリ 1

を右クリックし、ワークプレーン を選択します。ワークプレーンの設定ウィンドウで：

- 平面リストから **xz-plane** (リストの最後のオプション) を選択します。
- ワークプレーンツールバーの **設定** ウィンドウの **ワークプレーンを表示** ボタン をクリックします。

引き続き、**ワークプレーン 1** の軸設定とグリッド設定を編集します。

### 2 モデルビルダーで、ビュー 2 ノード を展開し、軸 をクリックします。



### 3 軸の設定ウィンドウで：

軸の下で：

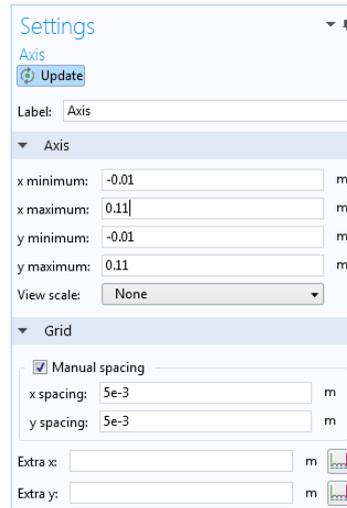
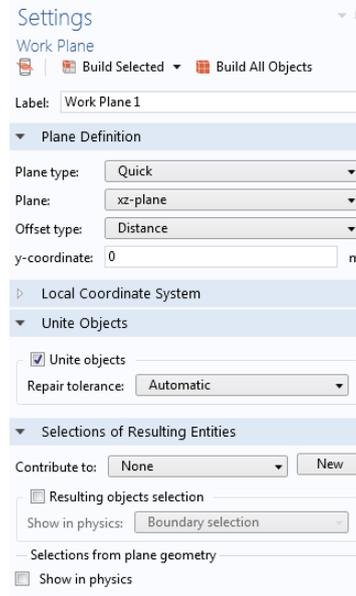
- **x 最小** フィールドと **y 最小** フィールドに、-0.01 と入力します。
- **x 最大** と **y 最大** フィールドに、0.11 と入力します。

グリッドの下で：

- **手動間隔** チェックボックスを選択します。
- **x 間隔** フィールドと **y 間隔** フィールドに  $5e-3$  を入力します。

### 4 ツールバーの更新 ボタン をクリックします。

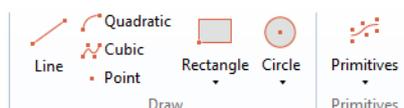
入力する値は更新をクリックの少し後に、画面の縦横比に合わせて自動的に調整されます。



インタラクティブな描画では、**グラフィックス**ウィンドウをポイントしてクリックする間に、リボンの**ワークプレーン**タブから描画ツールでジオメトリを作成できます。



ワークプレーンタブ



ジオメトリプリミティブ

**ワークプレーン 1** の下の**平面ジオメトリ**ノード  を右クリックしても、ジオメトリオブジェクトをジオメトリシーケンスに追加できます。

次の数ステップで、バスバーのプロファイルを作成します。

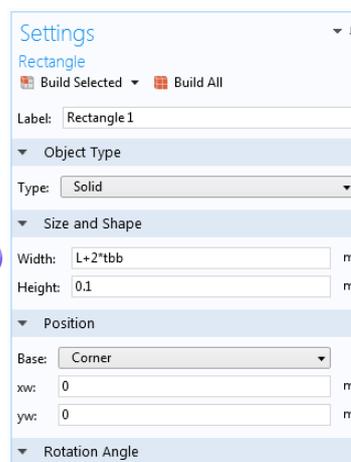
**5** **ワークプレーン 1** の下の**モデルビルダー**で、**平面ジオメトリ**  を右クリックし、**長方形**  を選択します。

**長方形の設定**ウィンドウの**サイズ**の下で：

- $L+2*tbb$  を**幅**フィールドに入力します。
- $0.1[m]$  を**高さ**フィールドに入力します。

**選択をビルド**ボタン  をクリックします。

5



6 第 2 の長方形を作成します。ワークプレーン 1 の下で、平面ジオメトリ  を右クリックし、長方形  を選択します。サイズの下で、以下の値を入力します：

- L+tbb を幅フィールドに
- 0.1[m]-tbb を高さフィールドに

位置の下で、以下の値を入力します：

- tbb を yw フィールドに

選択をビルドボタン  をクリックします。

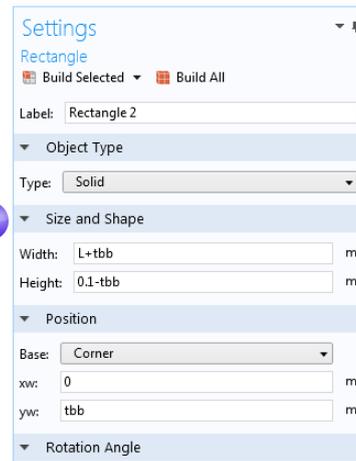
ブール 差 演算で、最初の長方形から第 2 の長方形を取り去ります。

7 ワークプレーン 1 の下で、平面ジオメトリ  を右クリックし、ブールとパ

ーティション > 差  を選択します。グラフィックスウィンドウで、r1 (2 つの長方形の大きい方) をクリックして、それを差の設定ウィンドウの追加するオブジェクトリストに追加します



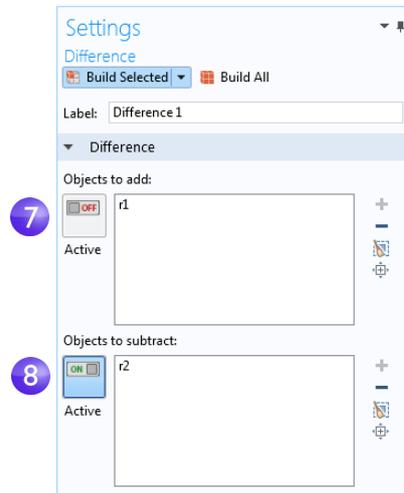
ジオメトリを選択しやすいよう、ジオメトリラベルをグラフィックスウィンドウに表示できます。モデルビルダーのジオメトリ 1 > ワークプレーン 1 の下で、ビュー 2 ノードをクリックします。ビューの設定ウィンドウに移動し、ジオメトリラベルを表示チェックボックスを選択します。



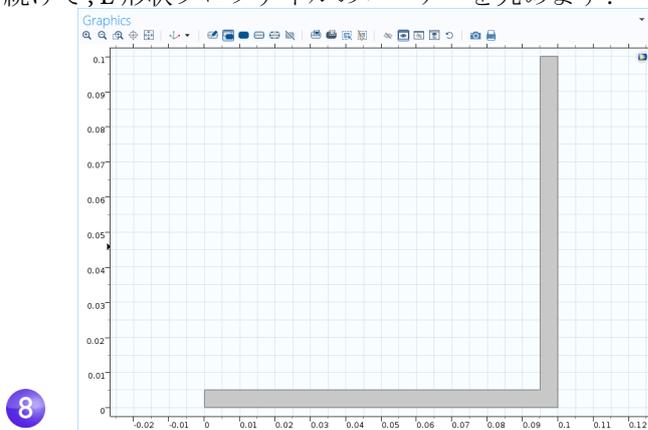
- 8 差ノードをクリックします。差の設定ウィンドウで、**除去オブジェクト**リストの左の**アクティブ**選択ボタンをクリックします。マウススクロールホイールまたは矢印キーで、重複した長方形を循環して、最初に強調表示にして、次にクリックして小さい長方形(r2)を選択します。

**選択をビルド** をクリックします。

グラフィックスウィンドウで r2 を選択するもう 1 つの方法は、**選択リスト**機能を利用する方法です。リボンの**ホーム**タブに移動して、**ウィンドウ > 選択リスト**を選択します。選択リストで、r2(ソリッド)をクリックして強調表示にします。リストで r2(ソリッド)を右クリックし、**選択に追加**を選択して、それを**除去オブジェクト**リストに追加します。選択リストウィンドウタイトルを右クリックし、**閉じる**を選択します。



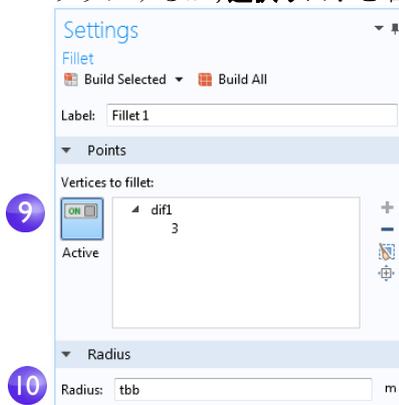
選択したジオメトリを構築後、後方仕上げ面、L 形状プロファイルを作成します。続けて、L 形状プロファイルのコーナーを丸めます。



9 ワークプレーン I の下で、平面ジオメトリ  を右クリックし、フィレット  を選択します。

(内側右コーナーの) 点 3 を選択して、それを **フィレット処理する頂点** リストに追加します。点はさまざまな方法で追加できます：

- **グラフィックス** ウィンドウで、点 3 をクリックして、それを **フィレット処理する頂点** リストに追加します。
- **ホーム** タブから、**ウィンドウ > 選択リスト** を選択します。選択リストウィンドウで、3 をクリックします。対応する点が **グラフィックス** ウィンドウで強調表示されます。フィレットの **設定** ウィンドウで **選択に追加** ボタン  をクリックするか、**選択リスト** を右クリックします。

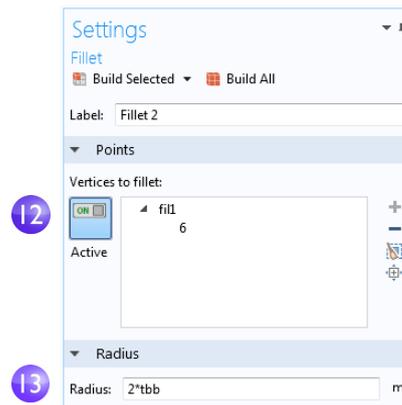


10 半径 フィールドに tbb を入力します。 **選択をビルド**  をクリックします。これで、内側コーナーにフィレットができます。

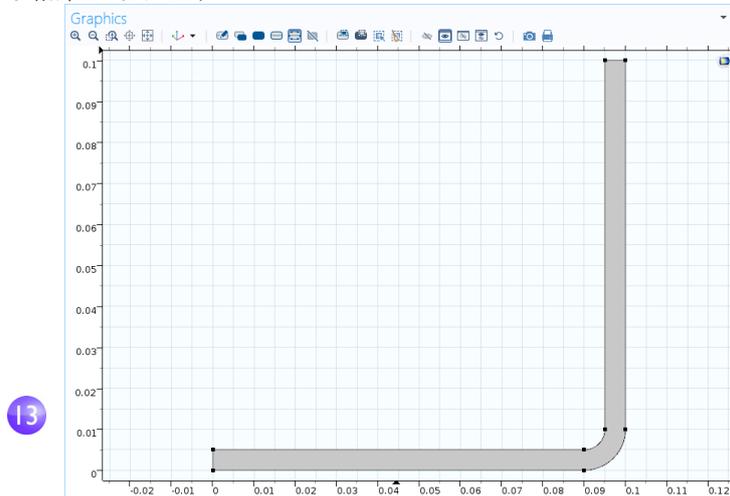
11 外側コーナーの場合、 **平面ジオメトリ**  を右クリックし、 **フィレット**  を選択します。

12 **グラフィックス** ウィンドウで、点 6 (外側コーナー) をクリックし、それを **フィレット処理する頂点** リストに追加します。

13 半径 フィールドに  $2*tbb$  を入力します。 **選択をビルド**  をクリックします。

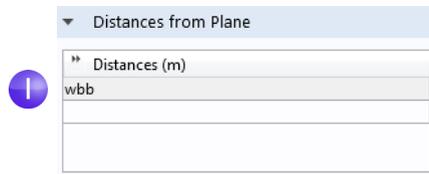


図のような結果になります。



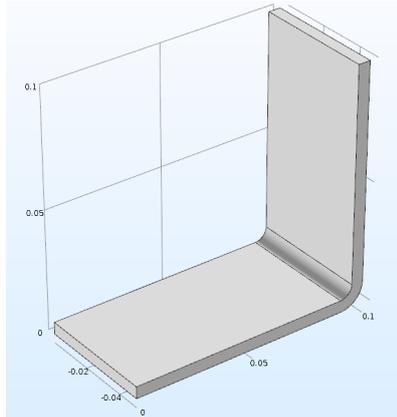
次に、ワークプレーンを押出して、3D バスバージオメトリを作成します。

- 1 **モデルビルダー**で、**ワークプレーン 1** を右クリックし、**押し出し** を選択します。**押し出し** の設定ウィンドウで、**平面からの距離**テーブルに wbb を入力して (デフォルト値と差し替え) プロファイル幅まで押し出します。



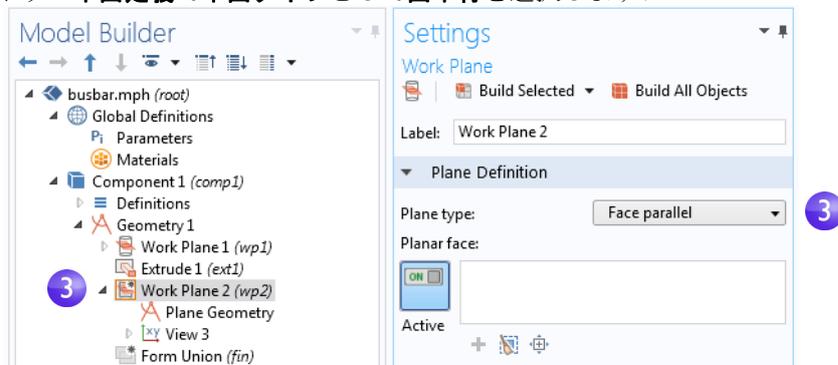
テーブルでは、複数の値を入力して、異なる材料によるサンドウィッチ構造を作成することができます。今回、必要なのは押し出しレイヤー 1 層だけです。

- 2 **選択をビルド**  をクリックし、**グラフィックスツールバー**の**範囲をズーム**  ボタンをクリックします。**保存**ボタン  をクリックし、モデルに busbar.mph という名前を付けます (まだ名前を付けていない場合)。

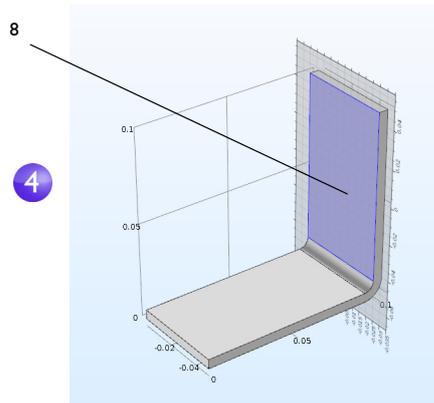


次に、2つのワークプレーンに描画した2つの円を押し出してチタニウムボルトを作成します。

- 3 **モデルビルダー**で、**ジオメトリ 1**  を右クリックし、**ワークプレーン**  を追加します。**ワークプレーン 2** ノードが追加されます。**ワークプレーン**の**設定**ウィンドウの**平面定義**で**平面タイプ**として**面平行**を選択します。



- 4 以下の図のように、**グラフィックス**ウィンドウで、面 8 をクリックして、**ワークプレーン**の設定ウィンドウでそれを**平面**リストに追加します。  
面 8 は青色に強調表示され、ワークプレーンは面最上部に配置されます。



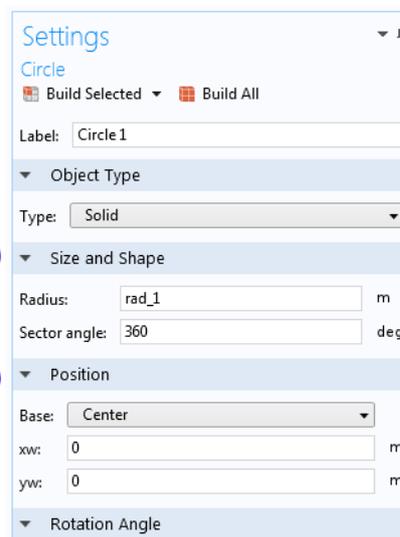
- 5 **ワークプレーンを表示** ボタン  をクリックして最初のボルトの位置を示す最初の円を描画します。**グラフィックス**ツールバーの**範囲をズーム**ボタン  をクリックします。

- 6 **ワークプレーン 2** で、**平面ジオメトリ**  を右クリックし、**円**  を選択します。

**円**の設定ウィンドウで：

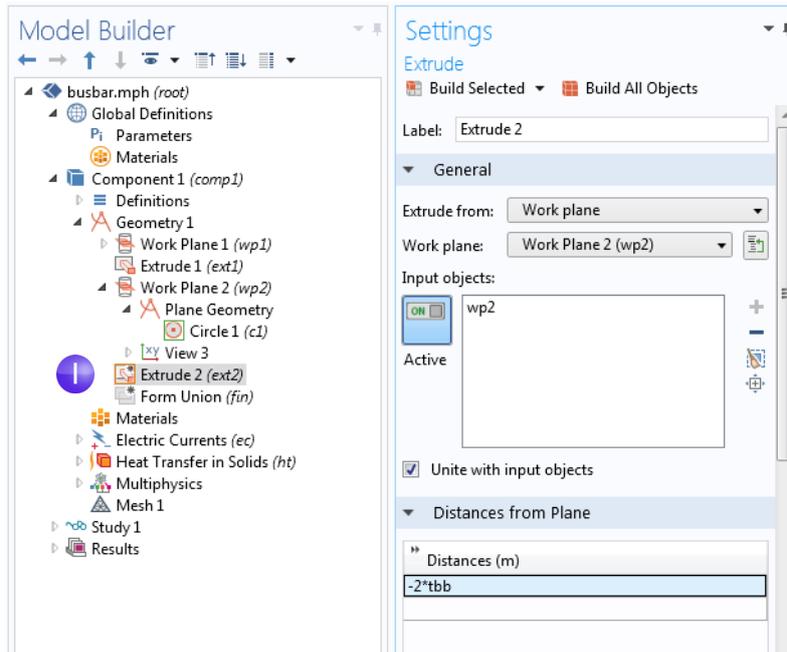
- **サイズと形状**の下の**半径**フィールドに rad\_1 を入力します。
- **位置**の下で、デフォルト **xw** と **yw** 座標 (0, 0) を残します。

**選択をビルド**  をクリックします。

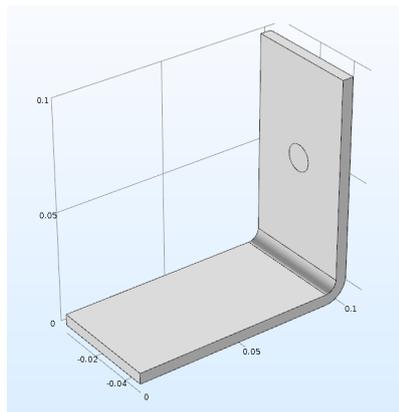


押し出し操作を続けてボルト作成を続けます。

- 1 **モデルビルダー**で、**ワークプレーン 2** を右クリックし、**押し出し** を選択します。**押し出し**の設定ウィンドウで、**平面からの距離**テーブルの先頭行に、 $-2*tbb$ と入力して円を押し出します。

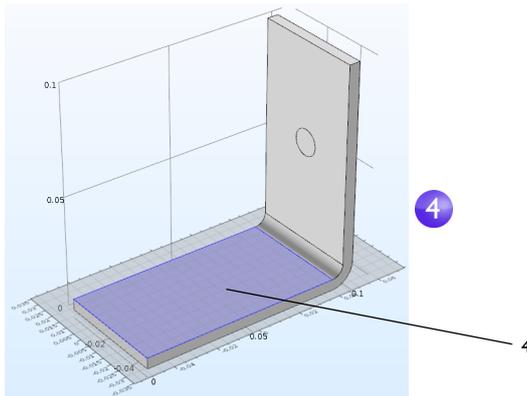


- 2 **選択をビルド**ボタン をクリックして、バスバーを貫通するチタニウムボルトの円筒部分を作成します。



残り 2 本のボルトを描画します。

- 3 ジオメトリ 1  を右クリックし、ワークプレーン  を選択します。ワークプレーン 3 ノードが追加されます。ワークプレーンの設定ウィンドウで、ワークプレーン 3 について、平面タイプとして面平行を選択します。
- 4 図のように、グラフィックスウィンドウで、面 4 をクリックして、ワークプレーンの設定ウィンドウでそれを平面リストに追加します。



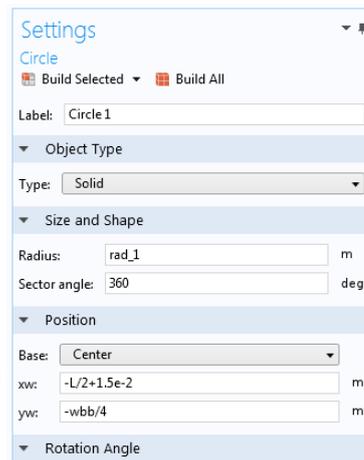
- 5 ワークプレーンの設定ウィンドウでワークプレーンを表示ボタン  と、グラフィックスツールバーの範囲をズームボタン  をクリックして、ジオメトリを見やすくします。

残り 2 本のボルトの位置をパラメータ化するには、ボルトの横断面を形成する円を追加します。

- 6 ワークプレーン 3 で、平面ジオメトリ  を右クリックし、円  を選択します。円の設定ウィンドウで：

- サイズと形状の下で、半径フィールドに rad\_1 を入力します。
- 位置の下で、xw フィールドに  $-L/2+1.5[\text{cm}]$ 、yw フィールドに  $-wbb/4$  を入力します。

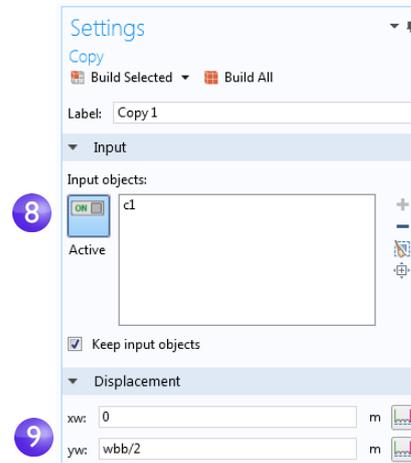
選択をビルド  をクリックします。



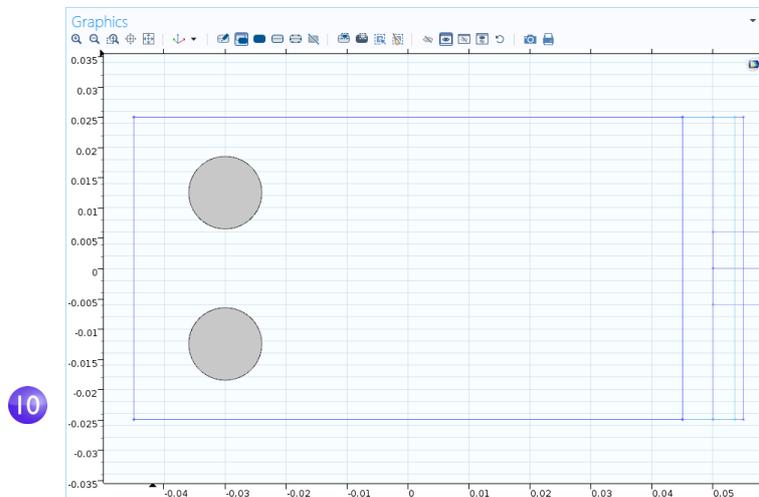
作成したばかりの円をコピーして、バスバーに第 3 のボルトを生成します。

- 7 ワークプレーン 3 の下で、平面ジオメトリ  を右クリックし、変換 > コピー  を選択します。

- 8 グラフィックスウィンドウで、円 c1 をクリックして選択し、コピーの設定ウィンドウの入力オブジェクトリストにその円を追加します。
- 9 コピーの設定ウィンドウの変位で、yw フィールドに  $wbb/2$  を入力します。

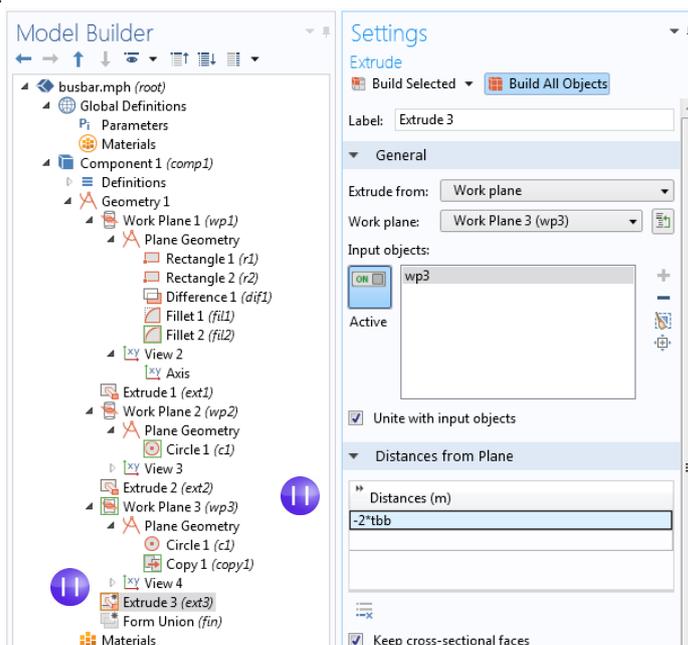


- 10 選択をビルド  をクリックし、グラフィックスツールバーの範囲をズームボタン  をクリックします。  
ワークプレーンに表示されたジオメトリは、これまでのところ、図と一致しているはずです。

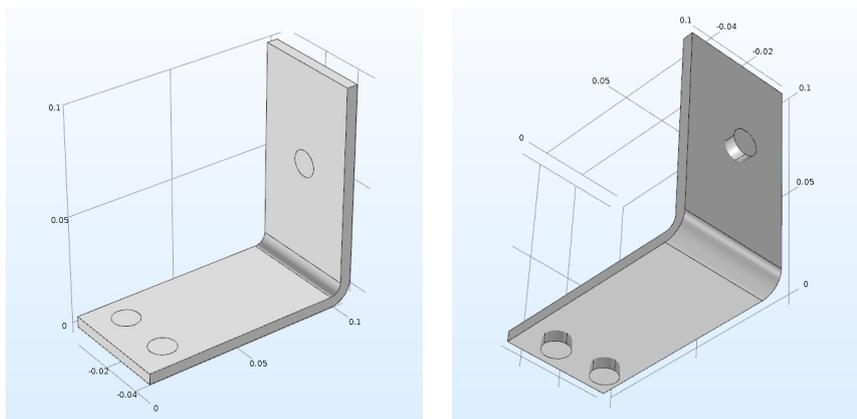


円形を押し出して操作を続けます。

- II モデルビルダーで、ワークプレーン 3 を右クリックし、押し出し を選択します。押し出しの設定ウィンドウで、平面からの距離テーブルの先頭行に、 $-2*tb$  を入力します(デフォルト値と差し替え)。全作成オブジェクト をクリックします。



ジオメトリとジオメトリシーケンスは以下の図と一致するはずですが、保存ボタン をクリックし、モデルに busbar.mph と名前を付けます。

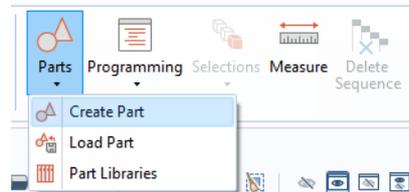


## パーツの作成とパーツライブラリ

---

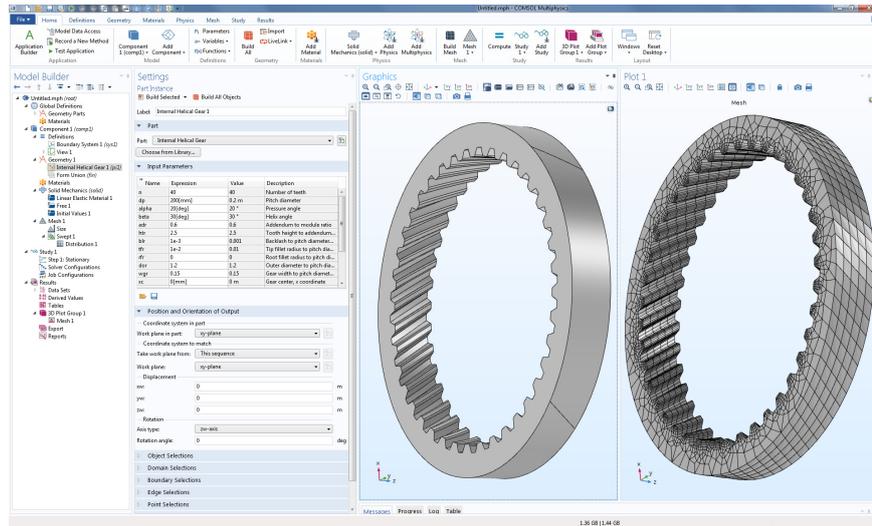
バスバーまたはその他のジオメトリモデルをセットアップしたら、将来使用するために保存しておく、作業の繰り返しを省くことができ便利です。完了したばかりのステップで、ジオメトリは COMSOL モデルファイルに直接保存しました。これは、バスバーモデル一式のセットアップにも利用できます。代わりに、もっと複雑な COMSOL モデルジオメトリの構築ブロックとして利用できる、再利用可能なパラメーター化したパーツを作成することもできます。これは、パーツライブラリでアクセスできる独立したファイルに保存します。

バスバージオメトリの構築時に、**ジオメトリタブ**と**ワークプレーンタブ**の機能を使用してきました。**パーツメニュー**は、これらのタブの**その他の**グループにあります。



**パーツメニュー**で、パーツの作成や読み込みの選択、あるいはパーツライブラリからパーツを1つ選択してモデルジオメトリに追加することが可能です。本ソフトウェアにはデフォルトでいくつかのパーツライブラリが用意されています。新しいパーツを作成すると、モデルツリーの**グローバル定義**セクションでパーツの親ノードの下に追加されます。

以下の図は、Multibody Dynamics モジュールのパーツライブラリの内部ヘリカルギアパーツです。このパーツには、寸法を制御する 18 個の入力パラメーターがあります。



パーツとパーツライブラリの取り扱い方法の詳細については、リファレンスマニュアルを参照してください。

⚠ バスバーチュートリアルをさらに続けるため、「材料」63 ページの項に戻ります。

## 付録 B — キーボードとマウスショートカット

ショートカット (WINDOWS, LINUX)	ショートカット (OS X)	アクション
F1	F1	選択したノードまたはウィンドウのヘルプを表示
Ctrl+F1	Command+F1	外部ウィンドウに COMSOL ドキュメントの最初のページを表示
F2	F2	選択したノード、ファイル、またはフォルダーの名前を変更
F3	F3	選択したノードを無効化
F4	F4	選択したノードを有効化
F5	F5	新しいグローバル定義と定義に関して、モデルを再度求解することなくデータセットの解を更新
F6	F6	ジオメトリブランチで先のノードを構築
F7	F7	ジオメトリとメッシュブランチに選択したノードを構築し、選択したスタディステップを計算、またはソルバー シーケンスで選択したノードを計算
F8	F8	ジオメトリを構築、メッシュを構築、ソルバーシーケンス全体を計算、結果データを更新、またはプロットを更新
Del	Del	選択したノードを削除
左矢印 (Windows), Shift + 左矢印 (Linux)	左矢印	モデルツリーのブランチを折り畳み
右矢印 (Windows), Shift + 右矢印 (Linux)	右矢印	モデルツリーのブランチを展開
上矢印	上矢印	モデルツリーで上のノードに移動
下矢印	下矢印	モデルツリーで下のノードに移動
Alt+ 左矢印	Ctrl+ 左矢印	モデルツリーで前に選択したノードに移動

ショートカット (WINDOWS, LINUX)	ショートカット (OS X)	アクション
Alt+ 右矢印	Ctrl+ 右矢印	モデルツリーで次に選択したノードに移動
Ctrl+A	Command+A	すべてのドメイン, 境界, エッジ, または点を選択. テーブルのすべてのセルを選択
Ctrl+C	Command+C	フィールドにテキストをコピー
Ctrl+D	Command+D	ドメイン, 境界, エッジ, またはポイントの選択をクリア
Ctrl+Shift+D	Command+Shift+D	モデルツリーで選択したノードを複製
Ctrl+F	Command+F	検索文字列を検索
Ctrl+N	Command+N	新しいモデル
Ctrl+O	Command+O	モデルファイルを開く
Ctrl+P	Command+P	プロットウィンドウの内容を印刷
Ctrl+S	Command+S	モデルファイルを保存
Ctrl+V	Command+V	コピーしたテキストを貼り付け
Ctrl+Y	Ctrl+Shift+Z	前回取り消した操作をやり直し
Ctrl+Z	Command+Z	前回の操作を取り消し
Ctrl+ 上矢印	Command+ 上矢印	定義ノード, ジオメトリノード, フィジックスノード (デフォルトノードを除く), 材料ノード, メッシュノード, スタディ ステップノード, または結果ノードを1ステップ上に移動
Ctrl+ 下矢印	Command+ 下矢印	定義ノード, ジオメトリノード, フィジックスノード (デフォルトノードを除く), 材料ノード, メッシュノード, スタディ ステップノード, または結果ノードを1ステップ下に移動
Ctrl+Tab	Ctrl+Tab	フォーカスをデスクトップの次のウィンドウに切り替え
Ctrl+Shift+Tab	Ctrl+Shift+Tab	フォーカスをデスクトップの前のウィンドウに切り替え
Ctrl+Alt+A	使用不可	アプリケーションビルダーに移動

ショートカット (WINDOWS, LINUX)	ショートカット (OS X)	アクション
Ctrl+Alt+M	使用不可	モデルビルダーに移動
Ctrl+Alt+ 左矢印	Command+Alt+ 左矢印	フォーカスをモデルビルダー ウィンドウに切り替え
Ctrl+Alt+ 右矢印	Command+Alt+ 右矢印	フォーカスを設定ウィンドウに 切り替え
Ctrl+Alt+ 上矢印	Command+Alt+ 上矢印	フォーカスを設定ウィンドウの 前のセクションに切り替え
Ctrl+Alt+ 下矢印	Command+Alt+ 下矢印	フォーカスを設定ウィンドウの 次のセクションに切り替え
Shift+F10 または (Windows のみ) メニューキー	Ctrl+F10	コンテキストメニューを開く
Ctrl+ スペース	Ctrl+ スペース	挿入のため、式フィールドで定 義済みの物理量のリストを開く
左クリックしてマウスボタ ンを押したままマウスをドラ ッグ	Windows と同じ。2 ボタンマウスでの み使用可能	シーンの回転中心を原点として 画面の x 軸と y 軸に 並行な軸の回りでシーンを 回転
右クリックしてマウスボタ ンを押したままマウスをドラ ッグ	Windows と同じ。2 ボタンマウスでの み使用可能	画像平面上の可視フレームを 任意の方向に移動
マウス中央ボタンをクリック し、マウスボタンを押し たままマウスをドラッグ	Windows と同じ。2 ボタンマウスでの み使用可能	アクションを開始したマウス位 置の回りでシーンをズーム イン/ズームアウト
Ctrl キーを押しながら左ク リック。キーとボタンを押 したまま、マウスをドラッ グ	Windows と同じ。2 ボタンマウスでの み使用可能	画像平面で、x 軸と y 軸の回りを 回転させて、カメラをチルト、パ ン
Ctrl キーを押しながら右ク リック。キーとボタンを押 したままマウスをドラッグ	Windows と同じ。2 ボタンマウスでの み使用可能	画像平面に並行にカメラを平面 で移動
Ctrl キーを押しながらマウ ス中央ボタンをクリック。 キーとボタンを押したまま マウスをドラッグ	Windows と同じ。2 ボタンマウスでの み使用可能	オブジェクトに対してカメラを 遠近移動 (ドリーイン/アウト)
Ctrl+Alt を押しながら左ク リック。キーとボタンを押 したままマウスをドラッグ	Windows と同じ。2 ボタンマウスでの み使用可能	軸の回りでカメラを回転

ショートカット (WINDOWS, LINUX)	ショートカット (OS X)	アクション
Alt キーを押しながら左クリック、キーとボタンを押したままマウスをドラッグ	Windows と同じ、2 ボタンマウスでのみ使用可能	カメラとシーンの回転中心の間の軸の回りでカメラを回転 (ロール方向)
Alt キーを押しながら右クリック、キーとボタンを押したままマウスをドラッグ	Windows と同じ、2 ボタンマウスでのみ使用可能	カメラとシーンの回転中心の間の軸に直角な平面でシーンを移動
Alt キーを押しながらマウス中央ボタンをクリック、キーとボタンを押したままマウスをドラッグ	Windows と同じ、2 ボタンマウスでのみ使用可能	カメラとシーンの回転中心の間の軸に沿ってカメラを移動

## 付録 C — 言語要素と予約名

---

COMSOL Multiphysics におけるモデルツリーの構築は、操作シーケンスをグラフィカルにプログラミングすることと同じことです。アプリケーションビルダーのコード記録機能を使用するか、MATLAB<sup>®</sup> または Java<sup>®</sup> のモデルファイルとして保存すると、従来のプログラム文のリストとして操作シーケンスが出力されます。この項では、基本 COMSOL 言語で定義した以下の要素カテゴリの概要を紹介します：

- 定数
- 変数
- 関数
- 演算子
- 式

これらの言語要素は、組み込みか、ユーザー定義です。演算子はユーザー定義できません。式は、常にユーザー定義です。

### 予約名について

組み込み要素には、ユーザーが再定義できない予約名が付いています。ユーザー定義の変数、パラメーター、または関数の予約名を使用しようとすると、入力したテキストがオレンジ色に変化し、そのテキスト文字列を選択するとツールチップメッセージが表示されます。予約関数名が予約されるのは関数名に関してのみであり、同じ名前を変数名やパラメーター名には使用でき、その逆も可です。以下のページでは、最も多用される組み込み要素と、それに伴う予約名をリストします。組み込み要素のより完全なリストについては、*プログラミングリファレンスマニュアル*と*アプリケーションプログラミングガイド*を参照してください。

### アプリケーションで使用する変数

アプリケーションでは、モデルパラメーターと変数を使用できます。たとえばアプリケーションのユーザーにパラメーター値を変更させることができます。また、アプリケーションで使用する変数は、アプリケーションビルダーの**宣言**ノードで定義できます。このような変数は、フォームオブジェクトとメソッドでグローバルに使用できますが、モデルビルダーでは使用できません。

## 定数とパラメーター

モデルビルダーからは、組み込みの数学的および数値的定数、組み込みの物理定数、そしてパラメーターという3つのタイプの定数にアクセスできます。パラメーターは、ユーザー定義の定数であり、パラメータースイープの間に変動することがあります。定数はスカラー値です。以下のテーブルは、組み込み数学数値定数と、組み込み物理定数をまとめたものです。定数とパラメーターには単位を設定できます。

### 組み込み数学数値定数

説明	名前	値
倍精度浮動小数点数の浮動小数点の相対精度 (機械イプシロン)	eps	$2^{-52}$ ( $\sim 2.2204 \cdot 10^{-16}$ )
虚数単位	i, j	i, sqrt(-1)
無限大, $\infty$	inf, Inf	浮動小数点表現で処理できる範囲を超えた値
非数	NaN, nan	未定義の表現不可能な値. 0/0 または inf/inf などの結果
$\pi$	?	3.141592653589793

### 組み込み物理定数

説明	名前	値
重力加速度	g_const	9.80665[m/s <sup>2</sup> ]
アボガドロ定数	N_A_const	6.02214129e23[1/mol]
ボルツマン定数	k_B_const	1.3806488e-23[J/K]
真空の特性インピーダンス (自由空間のインピーダンス)	Z0_const	376.73031346177066[ohm]
電子質量	me_const	9.10938291e-31[kg]
電気素量	e_const	1.602176565e-19[C]
ファラデー定数	F_const	96485.3365[C/mol]
微細構造定数	alpha_const	7.2973525698e-3
引力定数	G_const	6.67384e-11[m <sup>3</sup> /(kg*s <sup>2</sup> )]

説明	名前	値
理想気体のモル体積 (273.15 K, 1 気圧時)	V_m_const	2.2413968e-2[m <sup>3</sup> /mol]
中性子質量	mn_const	1.674927351e-27[kg]
真空の誘電率 (磁気定数)	mu0_const	4*pi*1e-7[H/m]
真空の誘電率 (電気定数)	epsilon0_const	8.854187817000001e-12[F/m]
プランク定数	h_const	6.62606957e-34[J*s]
プランク定数 / 2π	hbar_const	1.05457172533629e-34[J*s]
陽子質量	mp_const	1.672621777e-27[kg]
真空中の光速	c_const	299792458[m/s]
シュテファン ボルツマン定数	sigma_const	5.670373e-8[W/(m <sup>2</sup> *K <sup>4</sup> )]
普遍気体定数	R_const	8.3144621[J/(mol*K)]
ウィーンの変位則	b_const	2.8977721e-3[m*K]

## パラメーター

パラメーターは、モデルツリーの**グローバル定義**ブランチのユーザー定義の定数スカラーです。使用例を以下に示します：

- 幾何学的寸法のパラメーター化
- パラメーター化メッシュ要素サイズ
- パラメトリックスイープで使用するパラメーターの定義

パラメーターは、数字、パラメーター、組み込み定数、パラメーターと組み込み定数の組み込み関数に関する式として定義できます。大きさのないパラメーターを除き、パラメーターには、[], で単位を割り当てます。

## 変数

モデルビルダーでは2つのタイプの変数、組み込み変数とユーザー定義変数を使用します。変数には、スカラー変数とフィールド変数があります。変数には、単位を設定できます。

注：空間座標変数と従属変数は、特に興味深いユーザー定義の変数です。これらの変数には、それぞれジオメトリの空間次元とフィジックスインターフェースに基づいたデフォルト名があります。これらの変数に選択した名前

の結果として、COMSOL Multiphysicsによって組み込み変数リスト（空間と時間に関する一次導関数と二次導関数）が作成されます。

## 組み込み変数

名前	説明	タイプ
curv	2D 境界の曲率	フィールド
curv1, curv2	3D 境界の主曲率	フィールド
dom	ドメイン, 境界, エッジ, またはポイントのドメイン番号	フィールド
dvol	体積スケール因子変数. ローカル (要素) 座標からグローバル座標へのマッピングのヤコビ行列の行列式	フィールド
freq	周波数	グローバル変数
h	メッシュ要素サイズ (要素の最長エッジの長さ)	フィールド
lambda	固有値	グローバル変数
linearizedelem	強制線形要素	フィールド
numberofdofs	自由度	グローバル変数
meshtype	メッシュ要素のメッシュタイプインデックス. 要素内のエッジ数	フィールド
meshelement	メッシュ要素番号	フィールド
meshvol	(線形化した) 要素体積	フィールド
nx, ny, nz	境界の法線成分	フィールド
phase	位相角	グローバル変数
qual	メッシュ品質	フィールド
realdetjac	求解時に使用される可能性のある曲線要素への直線メッシュ要素からのマッピングのヤコビ行列の行列式. 曲線要素と対応する直線要素間の形状の差の測定に使用	フィールド

名前	説明	タイプ
realdetjacmin	対応する要素の reldetjac 変数の最小値として定義された各要素のスカラーフィールド変数. ゼロ未満の reldetjacmin 値はその要素が裏表逆, すなわち, 反転を意味	フィールド
s, s1, s2	曲線と表面のパラメーター化変数	フィールド
t	時間	グローバル変数
tcurvx, tcurvy, tcurv1x, curv1y, tcurv1z, tcurv2x, tcurv2y, tcurv2z	対応する曲率変数の接線方向	フィールド
tx, ty, t1x, t1y, t1z t2x, t2y, t2z	曲線と曲面パラメーター化に対応する接線ベクトル成分	フィールド
qual	0 (不良) から 1 (最良) の値をとるメッシュ品質値	フィールド

### 組み込み変数を生成するユーザー定義の変数

デフォルト名	説明	タイプ
x, y, z	空間座標 (デカルト)	フィールド
r, phi, z	空間座標 (円筒)	フィールド
u, T, 他	従属変数 (解)	フィールド

例: T は, 2D の時間依存熱伝導モデルの温度です. x と y は, 空間座標名です. このとき, 以下の組み込み変数が生成されます: T, Tx, Ty, Txx, Txy, Tyx, Tyy, Tt, Txt, Tyt, Ttxt, Txyt, Tyxt, Tyyt, Ttt, Txtt, Tytt, Ttxtt, Txytt, Tyxtt, Tyytt. ここで, Tx は温度 T の x に関する偏微分に対応し, Ttt は, T の二階時間微分に対応します. 以下同様です. 空間座標変数に, その他の名前, たとえば, psi や chi が付いていると, Txy は Tpsichi に, また Txt は Tpsit になります. (時間変数 t は組み込みであり, ユーザーはその名前を変更できません.)

### 関数

モデルビルダーには, 組み込み関数とユーザー定義関数という 2 つのタイプの関数があります. 関数には, 入力引数に応じて, スカラー値とフィールド値の関数があります. 一部の関数には, 入力引数と出力引数の単位を設定できます.

## 組み込み数学関数

これらの関数では、入力引数や出力引数に単位はありません。

名前	説明	構文例
abs	絶対値	abs(x)
acos	逆余弦 (単位ラジアン)	acos(x)
acosh	逆双曲線余弦	acosh(x)
acot	逆余接 (単位ラジアン)	acot(x)
acoth	逆双曲線余接	acoth(x)
acsc	逆余割 (単位ラジアン)	acsc(x)
acsch	逆双曲線余割	acsch(x)
arg	位相角 (単位ラジアン)	arg(x)
asec	逆正割 (単位ラジアン)	asec(x)
asech	逆双曲線正割	asech(x)
asin	逆正弦 (単位ラジアン)	asin(x)
asinh	逆双曲線正弦	asinh(x)
atan	逆正接 (単位ラジアン)	atan(x)
atan2	4象限逆正接 (単位ラジアン)	atan2(y,x)
atanh	逆双曲線正接	atanh(x)
besselj	第1種ベッセル関数	besselj(a,x)
bessely	第2種ベッセル関数	bessely(a,x)
besseli	第1種変形ベッセル関数	besseli(a,x)
besselk	第2種変形ベッセル関数	besselk(a,x)
ceil	最近接整数	ceil(x)
conj	複素共役	conj(x)
cos	余弦	cos(x)
cosh	双曲線余弦	cosh(x)
cot	余接	cot(x)
coth	双曲線余接	coth(x)
csc	余正割	csc(x)
csch	双曲線余割	csch(x)
erf	誤差関数	erf(x)
exp	指数関数	exp(x)
floor	床関数	floor(x)

名前	説明	構文例
gamma	ガンマ関数	gamma(x)
imag	虚数部	imag(u)
log	自然対数	log(x)
log10	底 10 の対数	log10(x)
log2	底 2 の対数	log2(x)
max	2 つの引数の最大値	max(a,b)
min	2 つの引数の最小値	min(a,b)
mod	モジュロ演算子	mod(a,b)
psi	プサイ関数とその導関数	psi(x,k)
range	数値範囲を生成	range(a,step,b)
real	実数部	real(u)
round	近似整数に丸め	round(x)
sec	正割	sec(x)
sech	双曲線正割	sech(x)
sign	符号関数	sign(u)
sin	正弦	sin(x)
sinh	双曲線正弦	sinh(x)
sqrt	平方根	sqrt(x)
tan	正接	tan(x)
tanh	双曲線正接	tanh(x)

## 組み込み演算子関数

これらの組み込み関数は、組み込み数学関数とは異なる挙動をします。これらの関数は、導入テキストには含まれませんが、予約名リストを完成するためにリストされます。詳細については、リファレンスマニュアルを参照してください。

名前	名前	名前	名前
adj	dtang	mean	timeavg
at	emetric	noenv	timeint
atlocal	env	nojac	timemax
attimemax	error	noxd	timemin
attimemin	fsens	pd	treatasconst
atxd	fsensimag	ppr	try_catch
atonly	if	pprint	uflux
ballavg	integrate	prev	up
ballint	isdefined	reacf	var
bdf		realdot	with
bndenv	isinf	residual	withsol
centroid	islinear	scope.ati	
circavg	isnan	sens	
circint	jacdepends	setconst	
circumcenter	lindev	setind	
d	linper	setval	
depends	linpoint	shapeorder	
dest	linsol	side	
dflux	lintotal	sphavg	
diskavg	lintotalavg	sphint	
diskint	lintotalpeak	subst	
down	lintotalrms	sum	
dtang	linzero	test	

## ユーザー定義関数

ユーザー定義関数は、**グローバル定義ノード**の下のモデルツリーで、あるいは**コンポーネント**ごとに**定義ノード**の下で定義できます。関数メニューからテンプレートを選択し、名前と関数の詳細形状を定義する設定を入力します。

テンプレート名	引数と定義	構文例
解析	<p>関数名が識別子。例: an1 関数は引数の数学表現。</p> <p>例: 引数を <math>x</math> と <math>y</math> として <math>\sin(x) * \cos(y)</math>。 任意の数の引数を設定可能。</p>	<p>括弧内にコンマ区切りで指定した引数を持つ関数名。例: an1(x,y)</p>
標高	<p>関数が識別子。例: elev1 地理空間上の標高データを数値標高モデルからインポートして <math>x</math> と <math>y</math> の関数に標高データをマップするときに使用。DEM ファイルには、地表面部分の標高データを含む。得られる関数は、基本的にグリッドベースの補間関数のように動作。</p>	<p>括弧内にコンマ区切りで指定した引数を持つ関数名。例: elev1(x,y)</p>
ガウシアンパルス	<p>関数名が識別子。例: gp1 シフトパラメーター <math>x_0</math>、標準偏差 <math>\sigma</math> でベル形の曲線を定義。</p> $y(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}}$ <p>1つの引数をとる。</p>	<p>括弧内に引数を1つ持つ関数名例: gp1(x)</p>
画像	<p>関数名が識別子。例: im1 画像 (BMP, JPEG, PNG, または GIF 形式) をインポートし、画像の RGB データをスカラー (1チャンネル) 関数出力値にマップするために使用。デフォルト関数の出力は、マッピング (R+G+B)/3 を使用。</p>	<p>括弧内にコンマ区切りで指定した引数を持つ関数名。例: im1(x,y)</p>

テンプレート名	引数と定義	構文例
補間	関数名が識別子. 例: int1 離散点内の関数の値を保存した テーブルやファイルで定義. ファイル形式は, スプレッド シート, グリッド, セクション方式. 1~3個までの引数をとる.	括弧内にコンマ区切りで指定し た引数をもつ関数名. 例: int1(x,y,z)
区分	関数名が識別子. 例: pw1 それぞれの関数を1つの間隔で 定義し, 複数の関数を連結して 作成. 引数, 外挿方法とスムージング 方法, 関数とその間隔を定義. さまざまな間隔で設定される引 数の定義が重複したり, 間に穴 ができてはならない.	括弧内に1つの引数を持つ関数 名. 例: pw1(x)
ランプ	関数名が識別子. 例: rm1 指定した時刻で開始するユー ザ一定義の傾きをもつ線形増加 関数. 1つの引数をとる. 平滑化可能.	括弧内に1つの引数をもつ関数 名. 例: rm1(x)
ランダム	関数名が識別子. 例: rn1 一様分布または正規分布のホワ イトノイズを生成し, ホワイト ノイズをシミュレートする引数 を1つ以上指定. 任意の数の引数を設定可能.	括弧内にコンマ区切りで指定し た引数を持つ関数名. 例: rn1(x,y) 引数xとyは, ランダム関数の ランダムシードとして使用.
長方形	関数名が識別子. 例: rect1 一定間隔で1で, それ以外はす べて0. 1つの引数をとる.	括弧内に1つの引数を持つ関数 名. 例: rect1(x)
階段	関数名が識別子. 例: step1 0から任意の場所の他の値(大 きさ)までの形状の遷移. 1つの引数をとる. 平滑化可能.	括弧内に1つの引数を持つ関数 名. 例: step1(x)

テンプレート名	引数と定義	構文例
スイッチ	関数名が識別子. 例: sw1 ソルバースイープの際に, グローバル関数間で切り替えるときに使用. スイッチノードの下にサブノードとして追加. 関数のスイッチは, 基本的にプログラミング言語のスイッチ文として機能. 関数スイープスタディでソルバーから制御できるパラメーターに応じて, 基本ブランチの1つを動的に選択. また, スイッチノードは, 材料の下にも追加可能. その場合, 材料スイープで材料の離散セットをスイープ可能.	関数のコンテナノード
三角形	関数名が識別子. 例: tri1 一定間隔内の線形増加と線形減少, それ以外はすべて 0. 1つの引数をとる. 平滑化可能.	括弧内に1つの引数を持つ関数名. 例: tri1(x)
波形	関数名が識別子. 例: wv1 鋸歯, 正弦, 正方形, または三角形など, 1つ以上の特徴的形態の周期関数. 1つの引数をとる. 平滑化可能.	括弧内に1つの引数を持つ関数名. 例: wv1(x)

テンプレート名	引数と定義	構文例
外部 (グローバル定義のみ)	C 言語で記述された 1 つ以上の関数に対するインターフェースを定義 (たとえば FORTRAN で記述されたソースコードのインターフェースとなるラッパー関数など). たとえば, ユーザーが作成した共有ライブラリとのインターフェースとして使用が可能. 共有ライブラリファイルの拡張子は, プラットフォームに依存: .dll (Windows), .so (Linux), または .dylib (OS X).	括弧内に適切な数の引数を持つ関数名. 例: myextfunc(a,b)
MATLAB <sup>®</sup> (グローバル定義のみ)	MATLAB <sup>®</sup> 言語で記述された 1 つ以上の関数とのインターフェース. LiveLink™ for MATLAB <sup>®</sup> と MATLAB <sup>®</sup> がインストールされていれば, COMSOL Multiphysics に定義されたその他の関数同様に使用可能. (MATLAB <sup>®</sup> 関数は, 実行時に MATLAB <sup>®</sup> が評価.)	括弧内に適切な数の引数を持つ関数名. 例: my matlabfunc(a,b)

## 単項演算子とバイナリ演算子

モデルビルダーで, 以下のテーブルには, 式で使用できる単項演算子とバイナリ演算子があります.

優先レベル	シンボル	説明
1	() {} .	グルーピング, リスト, スコープ
2	^	累乗
3	! - +	単項: 論理否定, 負, 正
4	[]	単位
5	* /	乗算, 除算
6	+ -	バイナリ: 加算, 減算
7	< <= > >=	比較: 未満, 以下, を超える, 以上
8	== !=	比較: 等しい, 不等
9	&&	論理積

優先レベル	シンボル	説明
10		論理和
11	,	リスト内の要素分離記号

## 式

---

### パラメーター

パラメーター式には、数字、パラメーター、組込み定数、パラメーター式の組込み関数、単項演算子とバイナリ演算子を設定できます。パラメーターには単位を設定できます。

### 変数

変数式には、数字、パラメーター、定数、変数、変数式の関数、単項演算子、バイナリ演算子を設定できます。変数には、単位を設定できます。

### 関数

関数定義には、入力引数、数字、パラメーター、定数、関数、または入力引数、単項演算子とバイナリ演算子などのパラメーター式を設定できます。

## 付録 D — ファイル形式

---

### COMSOL ファイル形式

---

COMSOL モデル MPH ファイル形式 (拡張子 .mph) は、それぞれモデルビルダーとアプリケーションビルダーからモデルツリーとアプリケーションツリー一式を取り込んだデフォルトファイル形式です。このファイルには、バイナリデータとテキストデータがあります。他の情報がすべてプレーンテキストとして保存されるのに対し、メッシュと解データはバイナリデータとして保存されます。

COMSOL バイナリファイル形式とテキストファイル形式 (拡張子 .mphbin と .mphtxt) にはそれぞれ、**ジオメトリ**ノードモデルツリーや**メッシュ**ノードモデルツリーに直接インポートできるジオメトリオブジェクトまたはメッシュオブジェクトを保存します。

Physics Builder ファイル形式 (拡張子 .mphphb) には、モデルビルダーからアクセスできる 1 つ以上のユーザー定義のフィジックスインターフェースがあります。詳細については、*Physics Builder* マニュアルを参照してください。

COMSOL Multiphysics がサポートしているその他すべての形式の詳細については、「サポート対象外部ファイル形式」を参照してください。

ファイル形式	拡張子	読み取り	書き込み
COMSOL モデルとアプリケーション	.mph	はい	はい
バイナリデータ	.mphbin	はい	はい
テキストデータ	.mphtxt	はい	はい
Physics Builder	.mphphb	はい	はい

### サポート対象外部ファイル形式

---

#### CAD

CAD インポートモジュールとデザインモジュールでは、さまざまな範囲の業界標準 CAD ファイル形式をインポートできます。その他のファイル形式は、CAD 向け LiveLink 製品の双方向機能で利用できるほか、CATIA® V5 アドオンのファイルインポートでも利用できます。

DXF (2D), VRML (3D), STL (3D) の各ファイル形式は, COMSOL Multiphysics によるインポートで使用でき, アドオン製品は不要です. 以下のテーブルでは, 特に記載のないかぎり, リストされたファイル形式は, Linux®, Mac OS X, Windows® の各オペレーティングシステムのサポート対象バージョンのすべてで使用できます.

ファイル形式	拡張子	読み取り	書き込み
AutoCAD® <sup>1, 2, 3</sup>	.dwg	はい	はい <sup>9</sup>
Inventor® <sup>1, 2, 3</sup>	.ipt, .iam	はい	はい <sup>9</sup>
NX® <sup>1, 4</sup>	.prt	はい	いいえ
PTC® Creo® Parametric™ <sup>1, 3</sup>	.prt, .asm	はい	はい <sup>9</sup>
PTC® Pro/ENGINEER® <sup>1, 3</sup>	.prt, .asm	はい	はい <sup>9</sup>
Revit® Architecture <sup>3, 5</sup>	.rvt	はい <sup>9</sup>	はい <sup>9</sup>
Solid Edge® <sup>3, 6</sup>	.par, .asm	はい <sup>9</sup>	はい <sup>9</sup>
SOLIDWORKS® <sup>1, 2, 3</sup>	.sldprt, .sldasm	はい	はい <sup>9</sup>
DXF (3D <sup>1, 2</sup> と 2D)	.dxf	はい	はい <sup>10</sup>
Parasolid® <sup>1</sup>	.x_t, .xmt_txt, .x_b, .xmt_bin	はい	はい
ACIS® <sup>1</sup>	.sat, .sab, .asat, .asab	はい	はい
STEP <sup>1</sup>	.step, .stp	はい	いいえ
IGES <sup>1</sup>	.iges, .igs	はい	いいえ
CATIA® V5 <sup>2, 7</sup>	.CATPart, .CATProduct	はい	いいえ
VRML, v1 <sup>8</sup>	.vrml, .wrl	はい	いいえ

ファイル形式	拡張子	読み取り	書き込み
STL <sup>8</sup>	.stl	はい	はい

<sup>1</sup> AutoCAD®, Revit®, PTC® Creo® Parametric™, Inventor®, PTC® Pro/ENGINEER®, Solid Edge®, SOLIDWORKS® 向けの LiveLink™ 製品のひとつ、または CAD インポートモジュールかデザインモジュールが必要

<sup>2</sup> インポートは、Windows® オペレーティングシステムのみでサポート。

<sup>3</sup> COMSOL Multiphysics とリンク先の CAD プログラム間のファイルの同期は、Windows® 7, 8, 8.1 オペレーティングシステムでのみサポート

<sup>4</sup> インポートは、Windows® と Linux オペレーティングシステムでのみサポート

<sup>5</sup> LiveLink™ for Revit® が必要

<sup>6</sup> LiveLink™ for Solid Edge® が必要

<sup>7</sup> CAD インポートモジュール (またはデザインモジュールまたは AutoCAD®, PTC® Creo® Parametric™, Inventor®, PTC Pro/ENGINEER®, Solid Edge®, または SOLIDWORKS® 向けの LiveLink™ 製品のひとつ) と File Import for CATIA® V5 が必要

<sup>8</sup> 幾何学的ドメインひとつに限定

<sup>9</sup> リンク先 CAD パッケージによるファイルからの読み取り/ファイルへの書き込み。ただし、元の CAD ジオメトリが CAD パッケージで作成されている場合のみ

<sup>10</sup> ファイルへの書き込みが可能なのは、2D ジオメトリのみ

## ECAD

ECAD インポートモジュールでは、3D CAD モデルへの自動変換により、2D レイアウトファイルのインポートが可能です。Touchstone ファイル形式は、S-パラメーター、インピーダンス、アドミッタンスの値を、同時ポートと周波数スイープからエクスポートするときに使用します。SPICE Circuit Netlist ファイル形式は、電気回路ノード下の一連の集中回路要素ノードへのインポート時に変換されます。

ファイル形式	拡張子	読み取り	書き込み
NETEX-G <sup>1</sup>	.asc	はい	いいえ
ODB++ <sup>1</sup>	.zip, .tar, .tgz, .tar.gz	はい	いいえ
ODB++(X) <sup>1</sup>	.xml	はい	いいえ
GDS <sup>1</sup>	.gds	はい	いいえ
Touchstone <sup>2</sup>	.s2p, .s3p, .s4p, ...	いいえ	はい
SPICE Circuit Netlist <sup>3</sup>	.cir	はい	いいえ

<sup>1</sup> ECAD インポートモジュールが必要

<sup>2</sup> AC/DC モジュール, RF モジュール, MEMS モジュール, 波動光学モジュールの1つが必要

<sup>3</sup> 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, 半導体モジュールの1つが必要

## 材料データベース

反応工学モジュールとプラズマモジュールは、CHEMKIN<sup>®</sup> ファイルを読み取って、気相の複雑な化学反応をシミュレートできます。プラズマモジュールでは、電子衝撃衝突横断面セットの LXCAT ファイルを読み取ることができます。

ファイル形式	拡張子	読み取り	書き込み
CHEMKIN <sup>®</sup> <sup>1</sup>	.dat, .txt, .inp <sup>3</sup>	はい	いいえ
CAPE-OPEN <sup>1</sup> (直接接続)	該当なし	該当なし	該当なし
LXCAT ファイル <sup>2</sup>	.lxcat, .txt	はい	いいえ

<sup>1</sup> 反応工学モジュールまたはプラズマモジュールが必要。プラズマモジュールは、熱力学データと輸送データのみをサポートしています。

<sup>2</sup> プラズマモジュールが必要。

<sup>3</sup> どの拡張子でもかまいません。これらの拡張子は、代表的な拡張子です。

## メッシュ

体積メッシュのインポートには、NASTRAN<sup>®</sup> バルクデータファイル形式を使用します。三角形サーフェスマッシュのインポートには、VRML ファイル形式と STL ファイル形式を使用します。体積メッシュの作成には使用できません。ジオメトリとしてインポートすると、VRML ファイルと STL ファイルから、1 つの幾何学的ドメインの体積メッシュを作成できます。

ファイル形式	拡張子	読み取り	書き込み
NASTRAN <sup>®</sup> バルクデータ	.nas, .bdf, .nastran, .dat	はい	はい
STL	.stl	はい	はい
VRML, v1	.vrml, .wr1	はい	いいえ
VTK	.vtu	いいえ	はい

## 画像と動画

結果の可視化は、さまざまな一般的な画像ファイル形式にエクスポートできます。以下のテーブルを参照してください。画像もフィジックスモデリングの補間関数として読み取って、使用することができます。動画は、動画 GIF、Adobe<sup>®</sup> Flash<sup>®</sup>、AVI ファイル形式のどれかにエクスポートできます。

ファイル形式	拡張子	読み取り	書き込み
Adobe <sup>®</sup> Flash <sup>®</sup>	.swf	いいえ	はい
動画 GIF	.gif	いいえ	はい

ファイル形式	拡張子	読み取り	書き込み
AVI <sup>1</sup>	.avi	いいえ	はい
BMP	.bmp	はい	はい
EPS (ID グラフのみ)	.eps	いいえ	はい
GIF	.gif	はい	はい
JPEG	.jpg, .jpeg	はい	はい
MP4 <sup>2</sup>	.mp4	はい	いいえ
OGV <sup>2</sup>	.ogv	はい	いいえ
PNG	.png	はい	はい
TIFF	.tif, .tiff	いいえ	はい
WEBM <sup>2</sup>	.webm	はい	いいえ

<sup>1</sup> Windows<sup>®</sup> にのみ使用可

<sup>2</sup> アプリケーションビルダーで、Windows<sup>®</sup> にのみ、ビデオ形式オブジェクトに使用可

## プログラミング言語とスプレッドシート

Java<sup>®</sup> 用モデルファイルは、Java<sup>®</sup> コードとして COMSOL コマンドのシーケンスを保存した、拡張子 `.java` の編集可能ファイルです。テキストエディタでファイルを編集して追加コマンドを追加します。これらの Java<sup>®</sup> ファイルは、拡張子 `.class` で Java<sup>®</sup> クラスファイルにコンパイルして、独立したアプリケーションとして実行できます。Java<sup>®</sup> のモデルファイルで使用するプログラムコードは、基本的にアプリケーションビルダーのメソッドエディターのプログラムコードと同じです。ただし、メソッドエディターには、統合 Java<sup>®</sup> コンパイラが用意されています。

MATLAB<sup>®</sup> のモデルファイルは、Java<sup>®</sup> 用モデルファイルに似た編集可能スクリプトファイル (M ファイル) です。MATLAB<sup>®</sup> に使用します。これらのモデルファイル (拡張子 `.m`) には、COMSOL コマンドのシーケンスが MATLAB<sup>®</sup> M ファイルとして保存されています。その他の M ファイルスクリプトと同じく、モデルファイルは MATLAB<sup>®</sup> で実行できます。また、これらのファイルはテキストエディターで編集して、追加の COMSOL コマンドや一般 MATLAB<sup>®</sup> コマンドを組み込むことができます。M ファイル形式でモデルファイルを実行するには、LiveLink<sup>™</sup> for MATLAB<sup>®</sup> が必要です。

LiveLink<sup>™</sup> for Excel<sup>®</sup> のライセンスがあれば、モデルは、Excel<sup>®</sup> で使用できる Visual Basic for Applications (VBA) 形式で保存できます。

コンパイル済み C コードは、モデルビルダーの外部材料インターフェースや外部関数インターフェースや、また、アプリケーションビルダーの外部ライブ

ラインターフェイスなど、さまざまな方法でモデルやアプリケーションとリンクできます。

ファイル形式	拡張子	読み取り	書き込み
MATLAB® : MATLAB® 向けモデル ファイル	.m	はい	はい
MATLAB® : 関数 <sup>1</sup>	.m	はい	はい
Java® : アーカイブファイル	.jar <sup>6</sup>	はい	はい
Java® : Java® 向けコンパイル済みモデル ファイル	.class	はい	はい
Java® : Java® 用モデルファイル	.java	はい	はい
C : 関数	.dll <sup>3</sup> , .so <sup>4</sup> , .dylib <sup>5</sup>	はい	はい
Excel® <sup>2</sup>	.xlsx, .vba	はい	はい

<sup>1</sup> LiveLink™ for MATLAB® が必要

<sup>2</sup> LiveLink™ for Excel® が必要。Windows® でのみ使用可

<sup>3</sup> Windows® でのみ使用可

<sup>4</sup> Linux® でのみ使用可

<sup>5</sup> OS X でのみ使用可

<sup>6</sup> アプリケーションビルダーでアプリケーションにリンク可能

### 数値データ形式と補間データ形式

グリッドファイル形式、セクション方式ファイル形式、スプレッドシートファイル形式を読み取って、補間関数を定義できます。さらにセクション方式ファイル形式とスプレッドシートファイル形式を読み取って、補間曲線を定義し、書き込んで結果をエクスポートすることができます。また、テーブルはスプレッドシート形式でコピーアンドペーストできます。

パラメーターと変数は、プレーンテキストファイル形式、コンマ区切り値ファイル形式、またはデータファイル形式でインポートやエクスポートできます。

連続カラーテーブルテキストファイル形式と離散カラーテーブルテキストファイル形式は、ユーザー定義のカラーテーブルに使用して、結果を可視化することができます。

数値標高モデル (DEM) ファイルは、ジオメトリ定義のためにパラメトリックサーフェスとして読み取って使用できます。

ファイル形式	拡張子	読み取り	書き込み
スプレッドシート形式を コピーアンドペースト	該当なし	はい	はい
Excel® スプレッドシート <sup>1</sup>	.xlsx	はい	はい

ファイル形式	拡張子	読み取り	書き込み
テーブル	.txt, .csv, .dat	はい	はい
グリッド	.txt	はい	はい
セクション方式	.txt, .csv, .dat	はい	はい
スプレッドシート	.txt, .csv, .dat	はい	はい
パラメーター	.txt, .csv, .dat	はい	はい
変数	.txt, .csv, .dat	はい	はい
連続/離散カラーテーブル	.txt	はい	いいえ
切点データセットの点データ	.txt	はい	いいえ
DEM	.dem	はい	いいえ
VTK	.vtu	いいえ	はい

<sup>1</sup> LiveLink™ for Excel® が必要 . Windows® でのみ使用可

## 付録 E — LiveLink™ アドオンとの接続

以下のテーブルでは、COMSOL とさまざまなリンク先のパートナーソフトウェアを LiveLink アドオンで開始するためのオプションをまとめました。

COMSOL® ソフトウェア	パートナーソフト ウェアから COMSOL を開始可能	COMSOL からパートナ ーソフトウェアを開始可能	実行中のセッ ションに接続 可能
LiveLink™ for Excel®	はい <sup>1</sup>	はい <sup>2</sup>	いいえ
LiveLink™ for MATLAB®	はい <sup>3</sup>	はい <sup>4</sup>	はい <sup>5</sup>
LiveLink™ for AutoCad®	いいえ	いいえ	はい
LiveLink™ for Revit®	いいえ	いいえ	はい
LiveLink™ for PTC®Creo® Parametric™	いいえ	いいえ	はい
LiveLink™ for Inventor®			
- 双方向モード	いいえ	いいえ	はい
- シングルウィ ンドウモード	はい	いいえ	いいえ
LiveLink™ for PTC® Pro/ENGINEER®	いいえ	いいえ	はい
LiveLink™ for Solid Edge®	いいえ	いいえ	はい
LiveLink™ for SOLIDWORKS®			
- 双方向モード	いいえ	いいえ	はい
- シングルウィ ンドウモード	はい	いいえ	いいえ

<sup>1</sup> Excel® からモデルを開くと、モデルウィンドウが開始し、リンクが自動的に接続します。モデルウィンドウは、ジオメトリ、メッシュ、結果を表示する出力ウィンドウです。

<sup>2</sup> Excel® スプレッドシートまでのテーブル参照を含むモデルでは、そのモデルを COMSOL Desktop 環境で実行すると、Excel® プロセスが背景で自動的に開始します。

<sup>3</sup> COMSOL Multiphysics サーバーは、system コマンドで MATLAB® セッションから開始して、mphstart で MATLAB® コマンドプロンプトから接続できます。

<sup>4</sup> 「COMSOL with MATLAB® デスクトップショートカットでは、COMSOL Multiphysics サーバーと MATLAB® を開始し、それらを自動的に接続します。COMSOL Desktop インターフェイスで MATLAB® 関数 (グローバル定義 > 関数) を含む COMSOL Multiphysics モデルを実行すると、MATLAB® エンジンと接続が自動的に開始します。

<sup>5</sup> MATLAB® セッションは、実行中の COMSOL Multiphysics サーバーにコマンド mphstart で MATLAB® コマンドプロンプトから接続できます。

## 索引

---

- A** AC/DC モジュール 54, 73
- C** CAD インポートモジュール 146, 178
- CFD モジュール 114
- COMSOL Client 12
- COMSOL Desktop 環境
  - Linux 上 18
  - OS X 上 18
  - 概要 6
  - カスタマイズ 24
- COMSOL Multiphysics 11
  - ネイティブ CAD 形式 34
  - 開く 31
- COMSOL Server 12
- COMSOL アプリケーションライブラリをアップデート 28
- D** DirectX 13
- E** ECAD インポートモジュール 180
  - Excel® 182, 184
- H** HPC 141
- J** Java ファイル 30, 182
- L** Linux バージョン 18
- LiveLink™ アドオン 184
- M** MATLAB® 182
- MEMS モジュール
  - 熱膨張, および 106
- MPHBIN ファイル 178
- MPHPHB ファイル 178
- MPHTXT ファイル 178
- MPH ファイル 178
  - フルとコンパクト 28
  - 保存 63, 85
- MPI 142
- M ファイル 30, 182
- O** OpenGL 13
- OS X バージョン 18
- あ** アイソサーフェスプロット 77, 138
- アドオンモジュール
  - AC/DC モジュール 54, 71, 73
  - CAD インポートモジュール 146, 178
  - CFD モジュール 114
  - ECAD インポートモジュール 180
  - MEMS モジュール 106
  - アプリケーションライブラリ 27
  - 構造力学モジュール 31, 41
  - スタディタイプ 56
  - 設計モジュール 146, 178
  - 反応工学モジュール 180
  - フィジックスリスト 32, 55
  - フィジックスリスト, および 55
  - プラズマモジュール 180
  - アプリケーション 12, 86
  - アプリケーションギャラリ 29
  - アプリケーションビルダー 6, 8, 11, 12, 22, 86, 165
- アプリケーションライブラリ
  - MPH ファイル 27
  - ファイル形式 28
  - 例 27
- アプリケーションライブラリウィンドウ 28
- アプリケーションライブラリのアップデート 28
- アプリケーションをテスト 90
- う** ウィザード
  - 新規フォーム 86
  - ウィンドウリスト 43, 150

- え エクスポートノード 19
- エッジ
  - 変数スコープ 23
- エディターテンプレートウィンドウ 91
- お オートコンプリート
  - パラメーターと変数 58
- オーバーライドと寄与 38, 113
- オブジェクトを挿入メニュー 91
- 温度 77, 126
- 温度, 平均 130
- か 解が保存されていません,
  - メッセージ 28
- 解析
  - 収束 46
  - 例, パラメトリックスイープ 50
- 外部プロセスウィンドウ 10
- 化学反応工学モジュール 180
- 拡張スタディオプション 141
- 可視化 9
  - カラーテーブル 77, 80
- カスタマイズしたデスクトップ 24
- カスタムスタディ 56
- 画像, サムネイルの作成 85
- 画像スナップショットボタン 85
- 画像のエクスポート 85
- 関数
  - 組み込み 24
  - 上級トピック 97
  - 数学 24
  - スコープ 57
- 関数ノード 57
- 完全整合層 (PML) 30
- き 幾何学的寸法
  - パラメーター, および 21, 159
  - パラメトリックスイープ 57
- キャンセルボタン 10, 26
- 境界 70
  - 選択に追加 72
  - 変数スコープ 23
- 境界荷重 40
- 境界条件 68
  - 境界荷重 40
  - 固定拘束 39
  - 材料インターフェース 41
  - 自動的に定義 41
  - 自由 38
  - 接地, 電気 73
  - 設定ウィンドウ 9
  - 断熱 70
  - 電流 68, 71
  - 熱伝導 68
  - バスバー, 設定 68
- 境界セクション
  - コンテキストメニュー 69
- 境界選択, バスバーモデル 70
- 共有メモリの並列処理 141
- 曲率の分解能, メッシュ 75
- 寄与ノード 113
- く クイックアクセスツール
  - バー 6, 8, 17, 25
- 空間次元 14
- 組み込み
  - 材料 36, 63
  - 定数, 関数, 変数 24
  - 変数 80
- クラウドコンピューティング 141
- クラスターコンピューティング
  - ノード 141
- クラスタースイープノード 141
- グラフィックス
  - レンダリングとハードウェア 13
- グラフィックスウィンドウ 7, 9, 26
  - 使用 35
  - 境界の選択 39, 40
  - 選択境界 73
  - ジオメトリ, および 35

- ジオメトリを回転 39, 77, 79
  - 使用 62
  - ズームボックス 40
  - ツールバー 7
  - プロット 43
- グラフィックスオブジェクト 88, 89
- グラフィックストूलバー
  - 画像スナップショットボタン 85
  - デフォルトビューボタン 39, 44, 73, 82
  - 範囲をズームボタン 62, 79
- グローバル定義ノード 18, 21
  - 関数 57
  - スコープ 23, 57
  - パラメーター 57
  - 変数 22
- グローバルパラメーター 21, 37, 48, 57
  - 式 21
- け 計算値
  - グローバル評価 51
  - 体積最大値 47, 51, 84
  - 定義済み 19
- 結果
  - カラーテーブルの範囲 80, 77
  - サーフェス 設定, 変更 78
  - 単位, 変更 43
  - 導出値 47, 51, 84
  - パラメーター 22, 137
  - 表示 43
- 結果ノード
  - 3D プロットグループ 47, 80
  - サーフェスノード, 追加 80
  - サブノード 19
  - バスバーデフォルト 77
- 検索
  - パラメータと変数 59
- こ コードを記録 96
  - 構造解析 31
  - 構造変位フィールド 42
  - 構造力学
    - 応力と歪み 53, 65
    - 可塑性変形 44
    - デザイン 46
    - ミーゼス応力 43
  - 構造力学モジュール
    - アプリケーションライブラリ 31
    - 機械的接触 41
    - 熱膨張 106
  - 降伏応力 31, 44
  - 固体における熱伝導インターフェース
    - 概要 68
    - 境界条件の定義 69
    - マルチフィジックス 56, 73
  - 固体力学インターフェース 32
    - アドオンモジュール 106
  - 固定拘束ノード 39
  - コマンドシーケンス 92
  - 固有振動数解析 19
  - コンテキスト対応タブ 17
  - コンテキストメニュー
    - 領域セクションと境界セクション 69
  - コンパクト MPH ファイル 28
  - コンポーネントノード, 材料の追加 64
  - コンポーネントカップリング 130
- さ サーフেসプロット
  - カラーテーブル範囲 81
  - 更新 78, 80
  - 式の置換 80
  - 設定 45
  - 電流密度 79
  - バスバーの結果 77
  - 変形 43

- 最大/最小体積プロット 47
- 最大値と最小値テーブル 84
- 材料
  - 外観, 色とテクスチャー 66
  - スチール 36, 44
  - 設定ウィンドウ 9
  - チタニウム合金 53
  - 銅 53
  - モデルツリー 30
  - 領域, 割り当て 65
- 材料インターフェース
  - 機械的接触 41
- 材料ノード 36, 63
- 材料ブラウザー
  - 材料の内容セクション 36, 65
  - 定義済み 10
- 材料を追加ウィンドウ
  - バスバーモデル 64
  - 開く 36, 63
- サムネイル画像 85
- し ジオメトリ
  - CAD 形式 33
  - アプリケーションライブラリ 60
  - インポート 33
  - 構築 57
  - 設定ウィンドウ 9
  - パラメータ化 21, 57, 61, 159
  - ファイルからの読み込み 57, 60
- ジオメトリオブジェクト, ドメイン, 境界, エッジ, ポイントの選択 41
- ジオメトリノード 30
- ジオメトリのインポート 33, 34
- 時間依存スタディ 19
- 式
  - 組み込み 68
  - 手動入力 48, 57
  - 単位, 指定 47
  - 置換 45, 80, 83
  - ユーザー定義の 44
  - 論理 45
- 事前調整 50
- 自動完了
  - パラメーター名と変数名 136
- シミュレーション, 実行 76
- シミュレーションの実行 76
- 四面体, 多項式関数 42
- ジュール熱
  - 式 68
  - マルチフィジックスインターフェース 55
  - マルチフィジックス連成 73
- 収束解析 46, 52
- 収束プロット 9, 77
- 自由度 46, 52
- 周波数応答 20
- 周波数領域スタディ 19
- 主応力 112
- 上級トピック 97
- 情報ウィンドウ 7, 10, 26
- 初期条件 9
- 初期値ノード
  - 固体中伝熱インターフェース 69
  - 固体力学インターフェース 38
  - 電流インターフェース 69
- 新規フォームウィザード 86
- 進捗ウィンドウ 10
- 進捗バー 10, 26
- す ズーム 126
- 数学定数と関数 24
- スコープ
  - グローバル定義 57
  - パラメーターと変数 23
  - パラメーター, 定義済み 21
  - 変数名 23
- スタディ
  - 解の計算 50, 76

- タイプ 19
- 定義 43
- プリセット 56
- モデルツリー 30
- 例, 静止 43
- 例, マルチグリッド反復 50
- スタディウィンドウを選択 16
- スタディノード 19
  - ソリューションシーケンス 76
- スタディの計算 50
- すべてを構築ボタン
  - ジオメトリ 61
  - メッシュ 42, 76
- せ 精度
  - 収束解析 46
  - 設計モジュール 146, 178
  - 接地, 境界条件 72
  - 設定ウィンドウ 6, 9, 18, 25
  - 選択 108
    - 複数の境界 108
  - 選択リストウィンドウ 10, 150
  - 選択を作成ボタン 108
- そ 層流インターフェース 117
- ソフトウェアレンダリング 13
- ソルバー
  - 構成 50
  - 使用 43
  - 定常 43, 50
  - 反復 49, 50
- た ダイナミックヘルプ 10, 26
- 体積最大値, 評価 47, 82, 84
- 多項式関数 42
- 単位, 変更 43, 111
- ち 中立面 146
- て データセット, 定義済み 19
- テーブル
  - 最大値と最小値 84
  - テーブル, 評価 51
- テーブルウィンドウ 10
  - グラフプロット 51
  - レンチ 結果 47
- テーブルノード 19
- 定義済み
  - リボン 16
- 定義ノード 30
- 定常スタディ 33, 43
- 定常状態スタディ 19
- 定数
  - 数学タイプと物理的タイプ 24
- デフォルト機能 68
- 点, 変数スコープ 23
- 電位 54
  - 電圧降下, パラメーター 57
  - フィジックスノード 71
- 電気加熱 53
- 伝熱モジュール 114
- 電流インターフェース
  - 概要 68
  - 境界条件の定義 69
  - マルチフィジックス 56, 73
- と 動画 19, 140
- 導関数 24
- ドキュメント, モデル 27
- トルク, 適用した 31
- な 内部サーフェスの選択 41
- に 肉厚化 146
- 入力パラメーター
  - パーツ用 160
- 入力フィールド 87
- ね 熱膨張 53, 65
- の ノード 18
  - 順序変更 30
  - デフォルト機能 38

- は パーツ 159
  - 入力パラメーター 160
  - 排他的ノード 112
  - ハイパフォーマンスコンピューティング 141
  - ハイブリッド並列処理 142
  - パラメーター 21, 87
    - 値の範囲 50
    - グローバル 21
    - 結果 22, 137
    - 式 21, 48
    - 使用, 参照 71
    - スコープ 57
    - 定義 48, 57
    - 名前 48
    - 編集 61
    - メッシュ 48
  - パラメーターノード 57, 97
  - パラメトリックスイープ 21
    - 範囲, 定義 50
    - メッシュ 48
    - 例 49
  - パラメトリックスタディ 57
  - パラレルコンピューティング 141
  - 範囲をズーム コマンド 93
  - 反復ソルバー
    - 前処理 50
    - マルチグリッド 50
- ひ 評価
  - 体積最大値 47, 82, 84
  - ミーゼス応力 47
- ふ ファイルの保存 63, 85
  - フィジックス
    - 境界条件 68
    - ジュール熱 53, 68
    - 層流 117
    - 追加 55
    - 電磁加熱 55
    - 熱伝導 55
    - モデルツリー 30
  - フィジックスインターフェース 15
    - 固体中の伝熱 56
    - 固体力学 32
    - ジュール熱 55
    - 層流 117
    - 電流 56
  - フィレット 146
  - フォームエディター 11, 89
  - フォームオブジェクト 86
  - フォームユニオン, ジオメトリ 61
  - 部品ライブラリ 159
  - プラズマモジュール 180
  - ブランクモデル, 作成 14, 16
  - プリセットスタディ 56
  - プリファレンス 13
  - フル MPH ファイル 28
  - プレーヤー 140
  - フローティングネットワークライセンシス 141
  - プログラムコード
    - Java のモデルファイル 30
    - M ファイルをモデリング 30
  - プロット
    - ウィンドウ 9
    - サーフェス 43, 45
    - 再生 48
    - 最大/最小体積 47
    - 式, ユーザー定義 44
    - モデルツリー 30
  - プロットウィンドウ 25
  - プロットグループ
    - 3D, 追加 45
  - プロットグループ 19
  - プロットグループの名前の変更 46

- へ 平均温度 130
- ヘルプウィンドウ 10
  - 開く 18
- 変数
  - 組み込み 24
  - 式 22
  - 上級トピック 97
  - スコープ 57
  - スコープ, 制約 23
  - 例, 組み込み 51
- 変数ノード 22, 57
- ほ ホームタブ 17
- ボタンオブジェクト 88
- ま マルチコアプロセッサ 141
- マルチスライスプロット 77
- マルチフィジックス現象 53
- マルチフィジックスノード 68, 69, 74, 107
- マルチフィジックスモデル 53
- マルチフィジックスを追加
  - ウィンドウ 74
  - ボタン 74
- み ミーゼス応力 43, 112
- む 無限要素 30
- め メソッド 94
- メソッドエディター 11, 94
- メッシュ
  - 収束解析, および 46
  - 設定 42
  - パラメーター化 48, 75
  - 非構造化四面体 75
  - 微細化 48
  - フィジックス制御, デフォルト 75
  - 密度 48
  - モデルツリー, および 30
  - ユーザー制御 49, 75
  - 有限要素 42
- メッシュ要素サイズ
  - 設定 42
  - パラメーター, 定義 21, 75
- メッセージウィンドウ 10, 43
- メッセージ伝達インター
  - フェース 142
- 面取り 146
- も モードタブ 17
- モデル
  - 構造力学 31
  - 対称性 79
  - 定義中 11
  - ドキュメント 27
  - 保存 63
  - 離散化 42
  - ワークフロー 29
- モデルウィザード
  - カスタムスタディ 33, 56
  - 空間次元 32, 55
  - コンポーネントノード, および 19
  - 新規モデルの作成 14
  - スタディ 19, 56
  - 開く 32, 55
  - フィジックスの追加 19, 32, 55
  - プリセットスタディ 33, 56
- モデルツリー 6, 25
  - グローバル定義ノード 18, 37, 57
  - 結果ノード 19
  - 構築 18
  - 材料ノード 30, 36
  - ジオメトリ 30
  - スタディノード 19, 30
  - 定義済み 57
  - ノード 18
  - モデルビルダー 11
  - リボン 17

- ルートノード 18
  - 例 29
- モデルビルダー 6, 86
  - ウィンドウ 25
  - ジオメトリインポート 34
  - セクションの展開 68
  - ツールバー 6
  - 定義済み 11
  - ノードシーケンス例 38
  - リボン, および 17
    - 例 29
- モデル履歴 30
- ゆ ユーザーインターフェース
  - COMSOL Desktop 6
  - 概要 6
  - ユーザー制御メッシュ 49
- 有限要素
  - 前処理 50
  - 四面体 42
  - メッシュ 42
- よ 予約名 24
- リ 離散化 42
  - リボン 6, 25
    - ウィンドウ 10, 43, 150
    - 計算 50, 110, 126
    - 材料を追加 36, 67, 116
    - 作業面 148
    - ジオメトリのインポート 34
    - すべてを構築 61
    - 定義済み 8
    - フィジックスタブ 39, 107
    - メッシュを構築 76
    - モデルビルダー 17
      - 例 6
- 領域
  - 材料 65
  - 選択から削除 65
  - 変数スコープ 23
- 領域セクション
  - コンテキストメニュー 69
- 領域レベル 69
- る ルートノード
  - 定義済み 18
  - デフォルト単位 129
  - モデルウィザード 32
  - モデルサムネイル 85
- れ 例
  - 拡張, 電気加熱 53
  - 基本, 構造力学 31
- 冷却
  - 気流 53
  - 自然対流 57
- レポート, 定義済み 19
- 連成演算子 130
- レンダリングオプション 13
- ろ ログウィンドウ 10, 43
  - ロフト 146
- わ ワークフロー 27