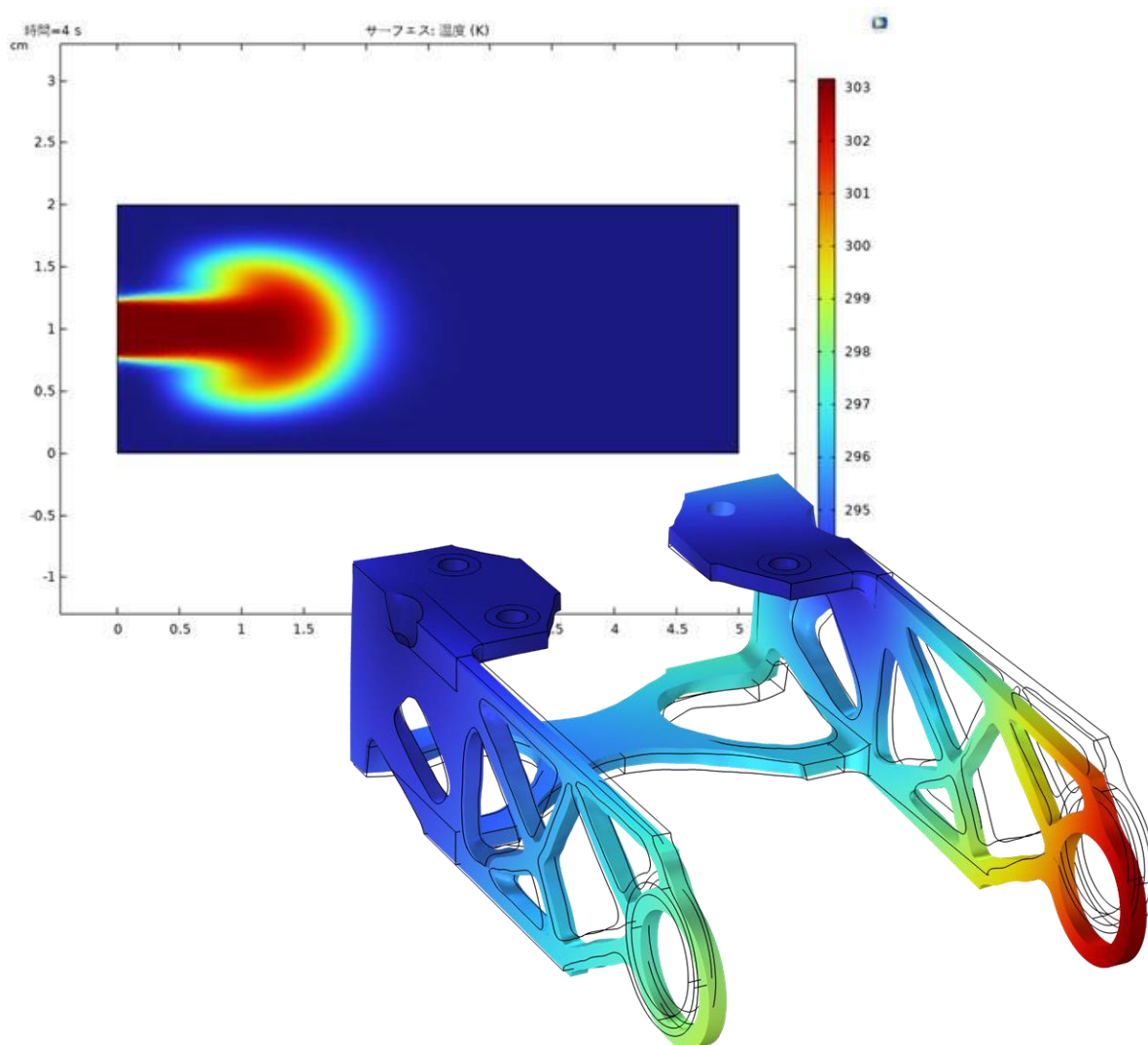


COMSOL Multiphysics® Ver6.2

はじめての COMSOL Multiphysics®

～これから COMSOL Multiphysics® を知る方に～



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

本書の内容の無断複製・転載などをご遠慮ください。

目次

目次	2
はじめに	3
第 1 章 シミュレーションと COMSOL Multiphysics®	4
シミュレーションとは？	5
コンピュータシミュレーションの必要性	5
物理現象の解析とその現状	5
COMSOL Multiphysics® とは？	6
第 2 章 COMSOL Multiphysics® の構成	7
2.1 言語設定	8
2.2 初期設定	9
2.3 条件設定	10
用語の説明	12
2.4 COMSOL を用いた物理現象の解法	13
第 3 章 連成問題	36
3.1 マルチフィジックス解法の説明	37
3.2 流体流れの解析と伝熱の連成解析	38
3.3 固体の伝熱と熱膨張の連成解析	64
3.4 電磁場と伝熱の連成解析	83
第 4 章 COMSOL Multiphysics® をより深く理解するために	107
4.1 COMSOL Multiphysics® を使用している方、使用を検討する方に	108
4.2 無料セミナーに関して	108
4.3 無料トライアル版に関して	108
4.4 詳細な使用手順書および参考資料の検索	109
4.6 各モジュールのサンプルに関して	110
4.7 ダイナミックヘルプの日本語化に関して	111
4.8 お問い合わせ	112
おわりに	113
付録 関数	114
付録 1 パラメータの使用法に関して	115
付録 2 関数の表示	116
付録 3 文字の表記	117
付録 4 数式、関数の表記	118
付録 5 変数の設定と物理定数の値の確認	128
付録 6 物理定数・関数群の一覧表示と検索	129

はじめに

私たちは今、非常に高度に発達した情報化社会で生活しています。

情報、通信、科学、金融、医療、交通、生産、物流、気象など、ほとんどの分野が一体化・連動する現代は、資源や環境問題のように長年顕在化してこなかった未解決の課題も山積しており、経験・観測にもとづく手法ではスピードが遅すぎるうえにコストもかかります。

こんなとき、低コストでタイムリーに課題を解決できる手段があるといいですね。

たとえば、電気は現代生活で一番大事なエネルギーですが、発電管理は天候だけでなく経済活動など様々な要因に依存しています。

基本的に電気エネルギーは貯められないですから、これらの要因を考慮に入れて事前に状況を予測し、その上で発電計画をたて発電量を管理しなければなりません。

日常生活の場面でよく目にし使う「シミュレーション」は、ここでも大きな威力を発揮します。

本書では、私たちの快適な生活に必要な製品群の研究開発・設計・製造をサポートする「COMSOL Multiphysics」をご紹介します。

電卓アプリのように計算し予測することも可能な最先端のシミュレーションアプリケーションが実現する世界に触れてみてください。

本書の内容は COMSOL Multiphysics® を操作しながら読んでいくと効果的です。

COMSOL Multiphysics® は無料のトライアルライセンスをご用意しております。トライアルライセンス使用期間は全てのモジュールの内容をお試しいただけます。

COMSOL Multiphysics® の日本国内販売総代理店である、計測エンジニアリングシステム株式会社（東京都千代田区内神田 1-9-5）の HP から申し込んでください。

<https://kesco.co.jp/trial/>

著者一同

第 1 章

シミュレーションと COMSOL Multiphysics®

シミュレーションの重要性と
COMSOL Multiphysics® の概要を説明します。

シミュレーションとは？

COMSOL Multiphysics® は物理シミュレーションソフトウェアですが、シミュレーションとはどういう意味でしょうか？

シミュレーションとは、現実の世界で起こる現象を実世界に近い環境を作り出した上で再現すること、つまり「模擬実験」を表します。例えば、サッカーの試合でミーティングを行い、監督と選手が戦略を練ります。その際、ボードをサッカーフィールド、ボードの上の駒を選手に見立てて、相手選手の動きを予測して選手個人がどのように動かないといけないかを話し合うという風景がよく見られます。これも、サッカーフィールドという環境をボード上に作り出して試合展開を模擬的に再現しているのので、一種のシミュレーションといえます。

コンピュータシミュレーションは、実世界に近い環境をコンピュータ上に作り出し、現象を仮想的に再現します。

コンピュータシミュレーションの必要性

コンピュータシミュレーションの発達によって、実現象をより詳細に再現できるようになりました。例えば、飛行機は 100 年ほど前にライト兄弟によって発明されました。発明までに彼らは自らが試作した飛行機に登乗し、命がけで何千回と飛行実験を行っていました。一方、現在では新しい飛行機を開発する場合でもコンピュータで模擬試験ができるようになったため、飛行の実試験の回数を格段に減らすことができました。

このように、コンピュータシミュレーションによって、今まで複雑でわからなかった現象を詳細に解明できるようになりました。そして、現象を把握するために必要とされていた実験の回数を飛躍的に減らすことや、システムの最適化が可能になりました。そのため、コンピュータシミュレーションは産業の様々な分野で用いられるようになりました。

物理現象の解析とその現状

コンピュータシミュレーションでは方程式を解くことによって現象を把握します。

例えば、A さんが時速 4km で歩くとして 2 時間で何 km 歩いたかという問題をコンピュータシミュレーションで解くとしてみます。（この問題は手計算や Excel で解くことができ、シミュレーションで解くまでもありませんが、簡単な例として紹介します）

歩いた時間を $t[h]$ 、歩いた距離を $y[km]$ とした場合、歩くという現象の支配方程式は「 $y=4 \times t$ 」となり、コンピュータ上に書き込みします。そして、 $t=2$ 時間という値を代入することで $y=8 \text{ km}$ と解が得られ、A さんは 2 時間で 8km 歩いたということをコンピュータ上で把握することができます。しかしながら、実世界では複数の現象が互いに影響しあうこと（これをマルチフィジックス：多重物理という）がほとんどであり、一般にマルチフィジックスはひとつの支配方程式のみでは正確に把握することは困難です。そのような場合には、マルチフィジックスの連成解析が必要となります。例えば、B さんがジム室でランニングマシンを使用しており、走行速度の時間変化を追うとします。ジム室が狭いうえに換気されていなかった場合、B さんの発熱によって室温が上昇します。そして、室温が上がることで B さんの体力が奪われて、B さんの走行速度が減少すると考えられます。

このように、互いに影響しあう複数の物理現象を計算に組み込むことで単一物理だけの計算よりも、より自然界に近い結果を得ることができます。これを実現するのが COMSOL Multiphysics® です。

COMSOL Multiphysics® とは？

COMSOL Multiphysics® は Svante 氏と Farhad 氏が学生のころに立ち上げたプロジェクトの成果です。COMSOL Multiphysics® は物理シミュレーションソフトウェアの一種です。操作性が良い解析のプラットフォームを提供します。また、統一されたルック & フィールをもっているので、1 つの物理がわかれば他の物理も同じ手順・考えで解くことができます。

特徴は以下の通りです。

- 1) マルチフィジックス解析 (2 種類以上の物理現象を組み合わせた解析) ができる
- 2) 操作手順はわかるところから試行錯誤的に進めていける

マルチフィジックス解析ができる

COMSOL Multiphysics® の最大の特徴です。2 種類以上の物理現象を無制限かつ自由に組み合わせで解析できるため、実現象に即したシミュレーションが可能です。

以前に作成したモデルに複数の物理現象を条件に入れたい場合、他社製品では、新しくモデルを作り直す必要があります。一方、COMSOL Multiphysics® は以前に作成したモデルに新しい物理現象の条件を追加して連成解析を行うだけで解析可能です。COMSOL Multiphysics は 1 つの会社で作っているソフトウェアですので、マルチフィジックスを関連付けることが他社のソフトウェアに比べて容易です。

以上のように、COMSOL Multiphysics® は広範囲における複雑な物理現象を簡易に扱うことが可能なソフトウェアです。

操作手順はわかるところから試行錯誤的に進めていける

COMSOL Multiphysics® は条件設定する手順は決められておらず、操作手順を本人の意思で決めることができます。使用者が操作した手順通りのモデルを保存することができます。モデルツリーやレポート作成機能を使うことで人に手順を教える場合に使用者にとって最適な手順書を作することもできます。

第 2 章

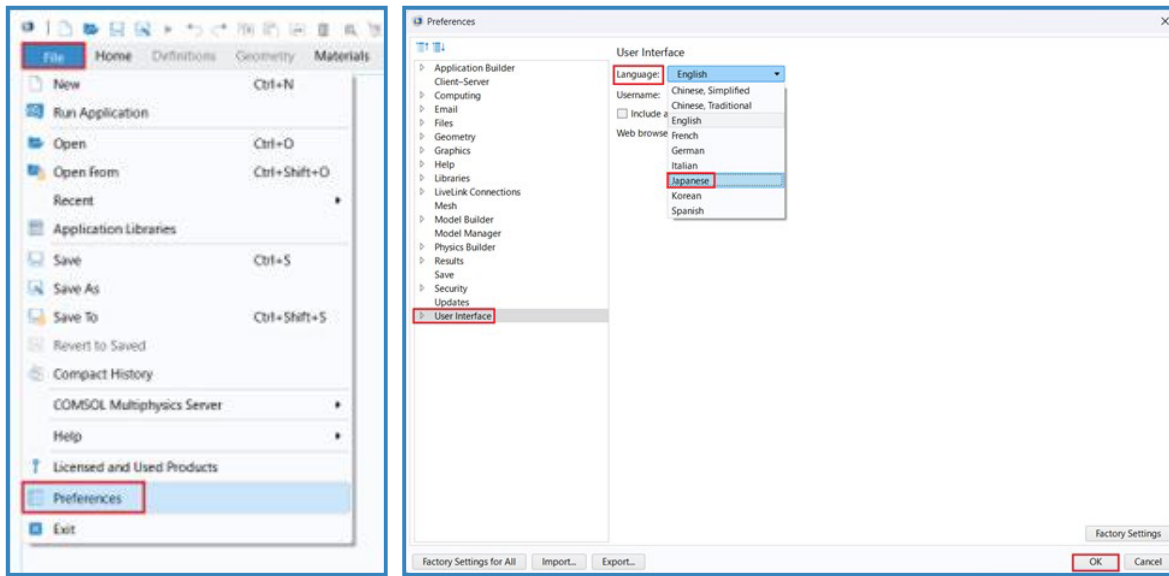
COMSOL Multiphysics® の構成

COMSOL Multiphysics® の構成や使い方について、
言語設定、環境設定、条件設定の順に説明します。

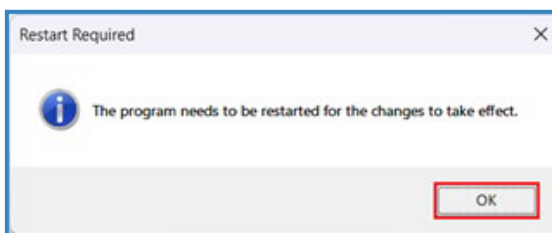
2.1 言語設定

COMSOL Multiphysics® デスクトップは日本語で起動することができます。もし立ち上げ時に英語で表示される場合は、このテキストで学習する前に以下の操作で日本語モードに設定を変更して下さい。

- 1) COMSOL Multiphysics® デスクトップを起動します。
- 2) ツールバーの“ファイル > Preferences”(環境設定) をセレクトします。
- 3) “User Interface” メニューで“Language” を“English” から“Japanese” に切り替え “OK” ボタンをクリックします。



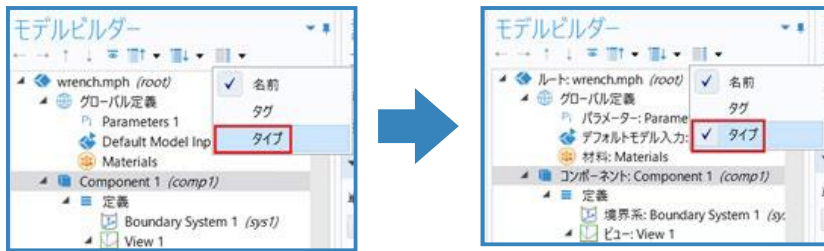
- 4) メッセージが表示されますが“OK” ボタンクリックで閉じます。
一度セッションを終了させ再起動すると設定変更が有効になります。



- 5) ツールバーの“ファイル > Exit”で現セッションを終了させます。
COMSOL Multiphysics® デスクトップを再起動すると日本語モードになります。



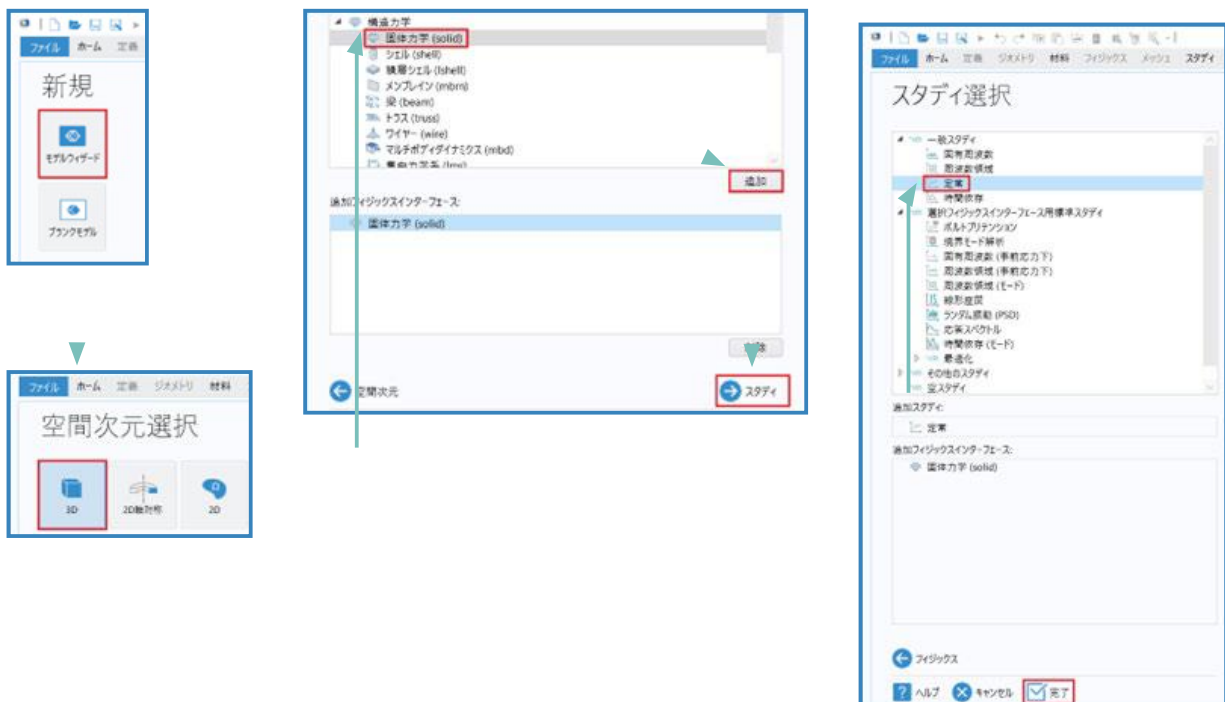
一方、日本語の変更後も COMSOL Multiphysics® 付属のアプリケーションライブラリ (4 章にて後述) にある例題はモデルツリーが英語で表記されています。これを、日本語表示にするには、“タイプ”を使用します。



2.2 初期設定

COMSOL Multiphysics® の立ち上げの際に、解析するフィジックスの次元、フィジックスの種類、系の状態を設定します。今回は、フィジックスとして固体力学、系の状態として定常状態を選択する場合を例として説明します。(のちに例題として固体力学に関する問題を解きます)

- 1) COMSOL Multiphysics® デスクトップを起動します。2)
- “新規”で“モデルウィザード”ボタンをクリックします。
- 3) “空間次元を選択”で“3D”ボタンを選択します。
- 4) “フィジックスを選択”で“構造力学 > 固体力学”をクリックし“追加”ボタンを左クリックします。
- 5) “スタディ”ボタンをクリックし、“定常”をクリックし“完了”ボタンを左クリックします。



2.3 条件設定

COMSOL Multiphysics® の条件設定の項目について記載し、どのように対象とする現象の条件を設定していくのか説明をします。

2.3.1 COMSOL Multiphysics® の初期画面

① モデルビルダ

設定項目が記載されており、右クリックして開くことで詳細な項目がツリー状に展開（コンテキストメニューという）し、あらゆる設定箇所へのアクセスが瞬時に可能になります。ここで、各設定項目、すなわちツリー状構造の各要素をノードといいます。

② 設定ウィンドウ

具体的な系の詳細条件を設定します。

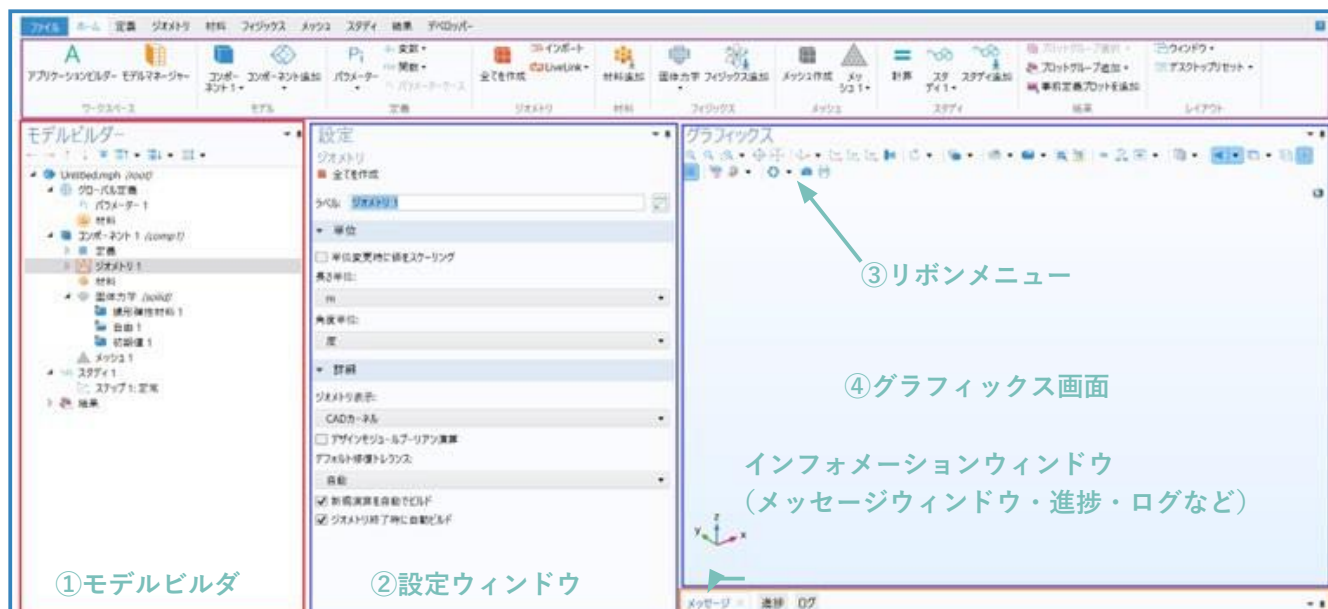
③ リボンメニュー

モデルビルダ同様、ノードが記載されています。デフォルトの設定項目であるため、モデルビルダに記載されていないノードも記載されています。

④ グラフィックス画面

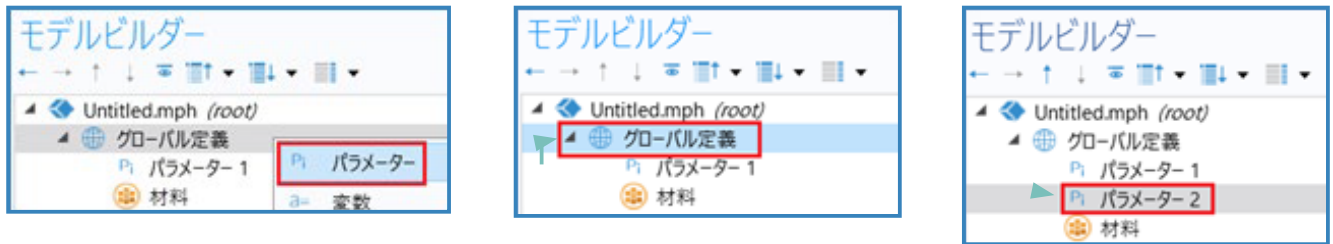
ここに、系の全体図が表示されます。

まず、モデルビルダ（またはリボンメニュー）で設定したいノードを選択し、その設定ウィンドウでノードの内容が表示されて具体的な条件を設定します。設定した項目がグラフィックスに反映されます。（下図参照）



2.3.2 モデルビルダの説明

ノードが記載されており、右クリックして開くことで詳細な項目がツリー状に展開する（コンテキストメニューが開く）ため、あらゆる設定箇所へのアクセスが瞬時に可能になります。例えば、グローバル定義のパラメータを追加する場合、グローバル定義を右クリックしてパラメータを選択することでパラメータのグループを追加することができます。



フィジックスとして、固体力学 (solid)* で設定していくモデルビルダを図で示します。続く操作は上に示したように右クリックで行います。モデルビルダの代表的なノードを以下に示します。

※モデルビルダからリボンメニューへの発展

本書では、コンテキストメニューでの設定方法をご紹介します。その考え方を理解すれば、リボンメニューの使用への発展も容易です。

グローバル定義 [A] : ファイル全体に使われるパラメータや変数を設定します。

コンポーネント [B] : モデルビルダの中にある部品の意味合いをもっています。モデルビルダが扱う現象のある側面をとらえるためにジオメトリ、材料、フィジックス、メッシュを含んでいます。

フィジックス [C] : フィジックス (右図) では、固体力学(solid) 条件を設定します。

※コンポーネント中のノードに含まれます。

メッシュ [D] : 数値解析に必要なメッシュを設定します。

※コンポーネント中のノードに含まれます。

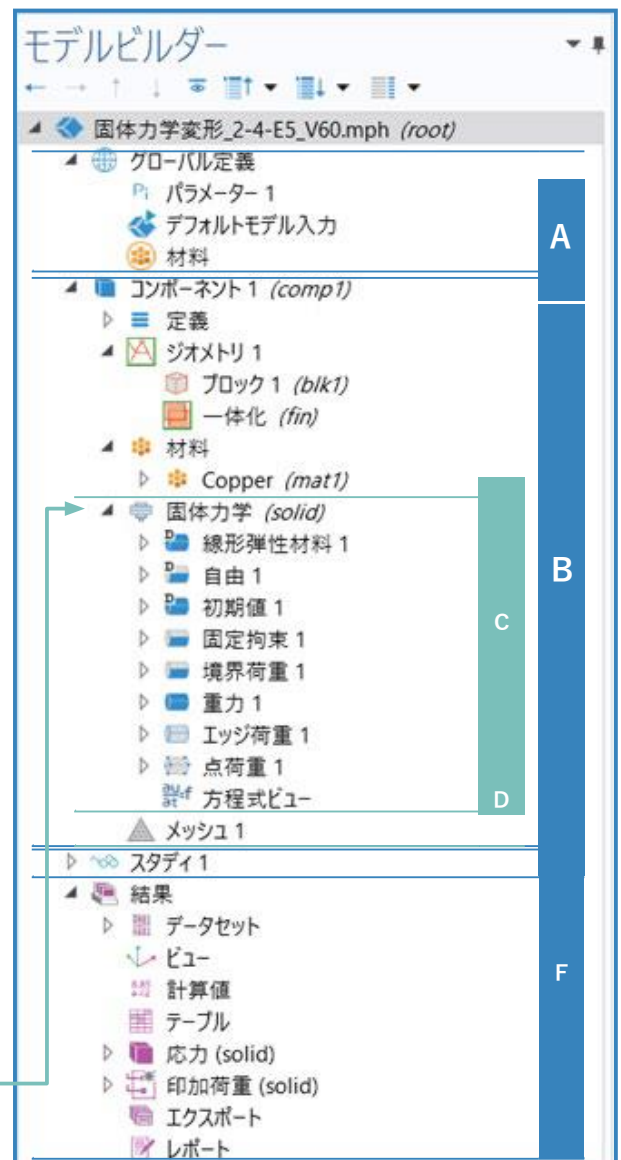
スタディ [E] : モデルビルダの内容をもとに数値解析します。

結果 [F] : 数値解析の結果を表示します。

ノード

右クリックでフィジックスコンテキストメニューが表示されます。

※ solid : 識別子とよび、変数を区別するのに使われます。フィジックスによって名前は異なります。



用語の説明

D	: デフォルト、あるいは空間次元
ノード	: 各種設定を行うためのもの。ユーザーはこれを左クリックあるいは右クリックすることができる。追加・削除、場所の移動ができる。
モデルビルダ	: ここに必要なノードを追加していく。コンポーネントもノードの一つ。
コンポーネント	: モデルビルダの中核部分であり、フィジックスに関する複数のノードが含まれている。
ジオメトリック エンティティレベル	: ポイント、エッジ、境界、ドメインポイント、点
エッジ	: 辺
境界	: 面 (3D)、辺 (2D)、ポイント (1D)
ドメイン	: ボリューム、領域
ジオメトリ	: 形状
ブロック	: 直方体
スタディ	: 計算、解析
メッシュ	: フィジックスを計算するために必要な有限要素分割、有限要素メッシュ
コンテキストメニュー	: ポップアップメニュー
マルチフィジックス	: 連成解析
固定拘束	: 固定境界
グローバル定義	: モデル共通
識別子	: フィジックスの固有名称
COMSOL デスクトップ	: COMSOL Desktop (登録商標)

クリックの役割

右クリック	: ノードを選択して、詳細な設定をするための更なるノードを開きます。
左クリック	: 通常クリックであり、何かを選択するために使います。 説明文中の>は左クリックを示しています。

2.4 COMSOL を用いた物理現象の解法

物理現象を COMSOL Multiphysics® で解く考え方を、以下のような手順を追って説明します。

2.4.1 問題の定義と分析

2.4.2 COMSOL Multiphysics® における表現

2.4.3 COMSOL Multiphysics® における操作

はじめに、問題を定義した後にその内容を分析します。

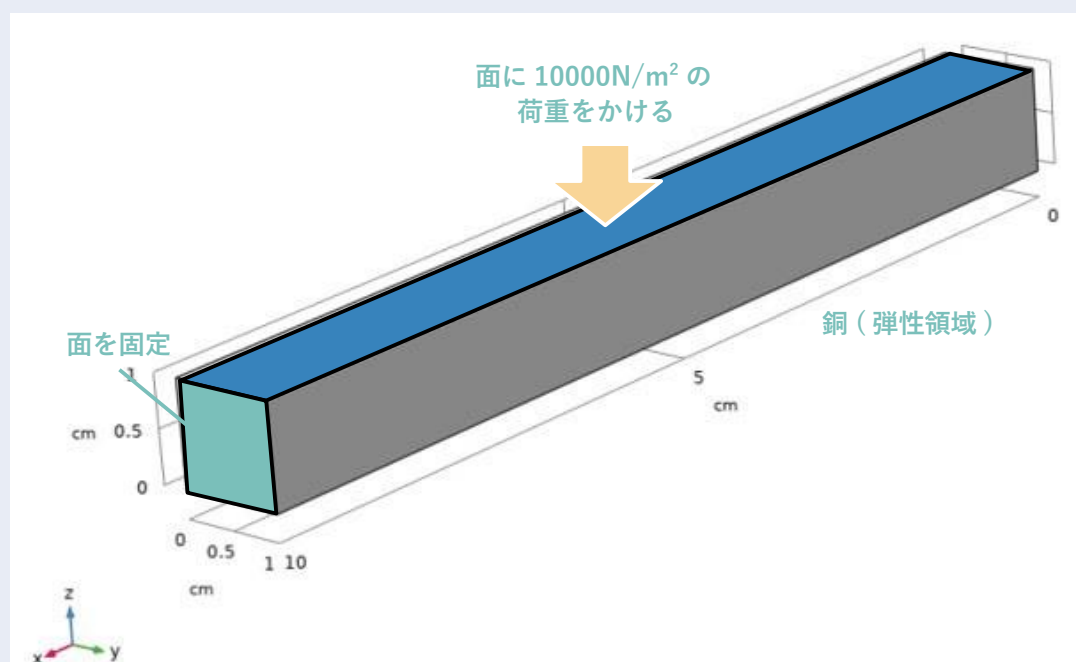
その次に、定義・分析した問題を COMSOL Multiphysics® 上の表現で置き換えます。最後に、COMSOL Multiphysics® で操作して、問題を解きます。

片持ち梁による考え方の説明

2.4.1 問題の定義と分析

初めに、問題を定義していきます。例として、物体に重さをかける問題を定義する場合の手順を説明します。また、その問題の概略を下の図に示します。

- Q1. 何をしたいか。
A1. 固体に力をかけた場合の変形を調べたい。
- Q2. 扱う固体の形は。
A2. 直方体。
- Q3. 固体の材質は。
A3. 銅で弾性領域。
- Q4. 固体の支持の方法は。
A4. 一面のみの固定。
- Q5. 力はどのようにかけるか。
A5. 下向きの力 10000N/m^2 を固定した面とは別の面にかける。



2.4.2 COMSOL Multiphysics における表現

問題の定義と分析の内容を COMSOL Multiphysics® における表現に置き換えます。各設問において、適切な表現を各一覧表から選びます。一覧表 P(フィジックス) では物理現象、一覧表 G(ジオメトリ) では図形、一覧表 M(マテリアル) では材料、一覧表 B(境界条件) では境界条件を選択します。

Q1. 固体に力をかけた場合の変形を解析するには、どのインターフェイスがよいか。

A1. 一覧表 P(フィジックス) から判断し、構造力学が適しているので、その中の固体力学インターフェイスを使用する。

Q2. 直方体は COMSOL Multiphysics 上ではどのように表しているか。 A2.

一覧表 G(ジオメトリ) から判断し、直方体はブロックで表現される。

Q3. 銅 (弾性領域) は COMSOL Multiphysics 上ではどのように表しているか。

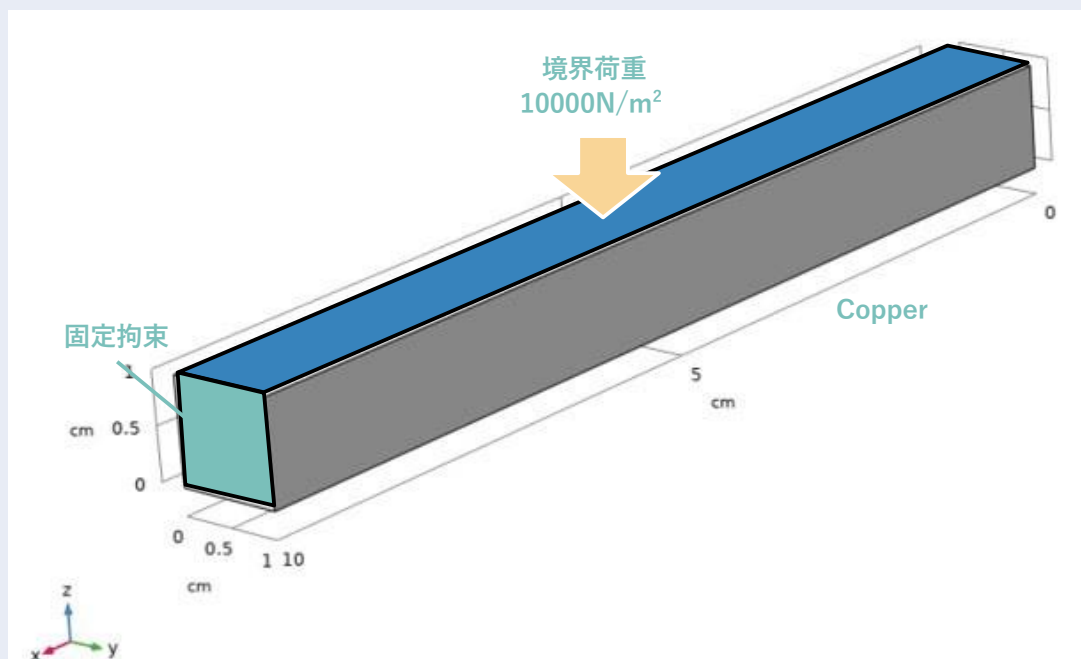
A3. 一覧表 M(マテリアル) から判断し、直方体は Copper で表現される。

Q4. 一面のみを固定するためには、どのノードを選べばよいか。

A4. 一覧表 B(境界条件) から判断し、固定拘束を使う。

Q5. 面に荷重をかけるためには、どのノードを選べばよいか。

A5. 一覧表 B(境界条件) から判断し、境界荷重を使う。



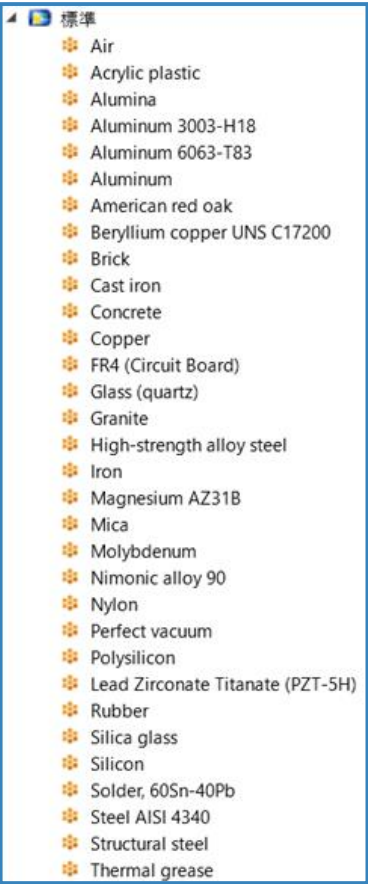
一覧表 P(フィジックス)

フィジックスの追加画面



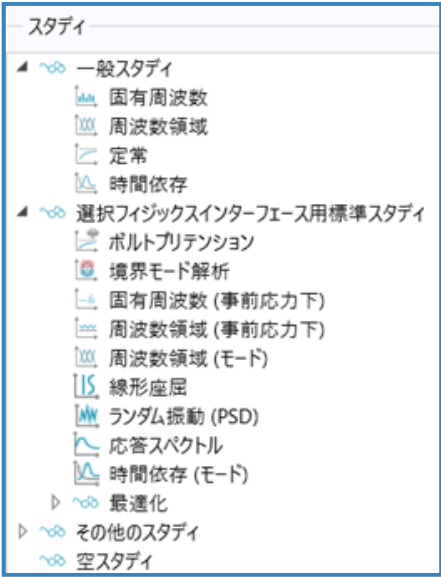
一覧表 M(マテリアル)

材料の追加画面



一覧表 S(スタディ)

スタディの追加画面



一覧表 B(境界条件)

フィジックスコンテキストメニュー



一覧表 G(ジオメトリ)

ジオメトリコンテキスト
メニュー



2.4.3 COMSOL Multiphysics® における操作

COMSOL Multiphysics® で操作して、問題を解きます。

- S1. 初期設定において、固体力学を設定（直方体を用いるので 3 次元）
空間次元：3D フィジックス：構造力学＞固体力学 追加 スタディ：定常 完了
- S2. ブロックの設定
ジオメトリを右クリック ブロック 幅、深さ、高さを入力 プロット
（解説では、幅 =10cm、奥行 = 1c m、高さ =1cm とします）
- S3. 材質の設定
材料を右クリック ライブラリから材料を追加 Copper をダブルクリック
- S4. 固定拘束の設定
固体力学を右クリック 固定拘束 固定する面を選択（解説では、境界 1 を固定します）
- S5. 境界荷重の設定
固体力学を右クリック 境界荷重 境界をかける面を選択
荷重タイプ：力大きさ 荷重の重さを z 軸の欄に -10000 と入力
（解説では、境界 3 に力を加えます）
- S6. 計算
スタディを選択したのち、計算を選択

操作手順【片持ち梁変形解析】

単独フィジックスの操作を理解します。詳細な操作手順を説明します。

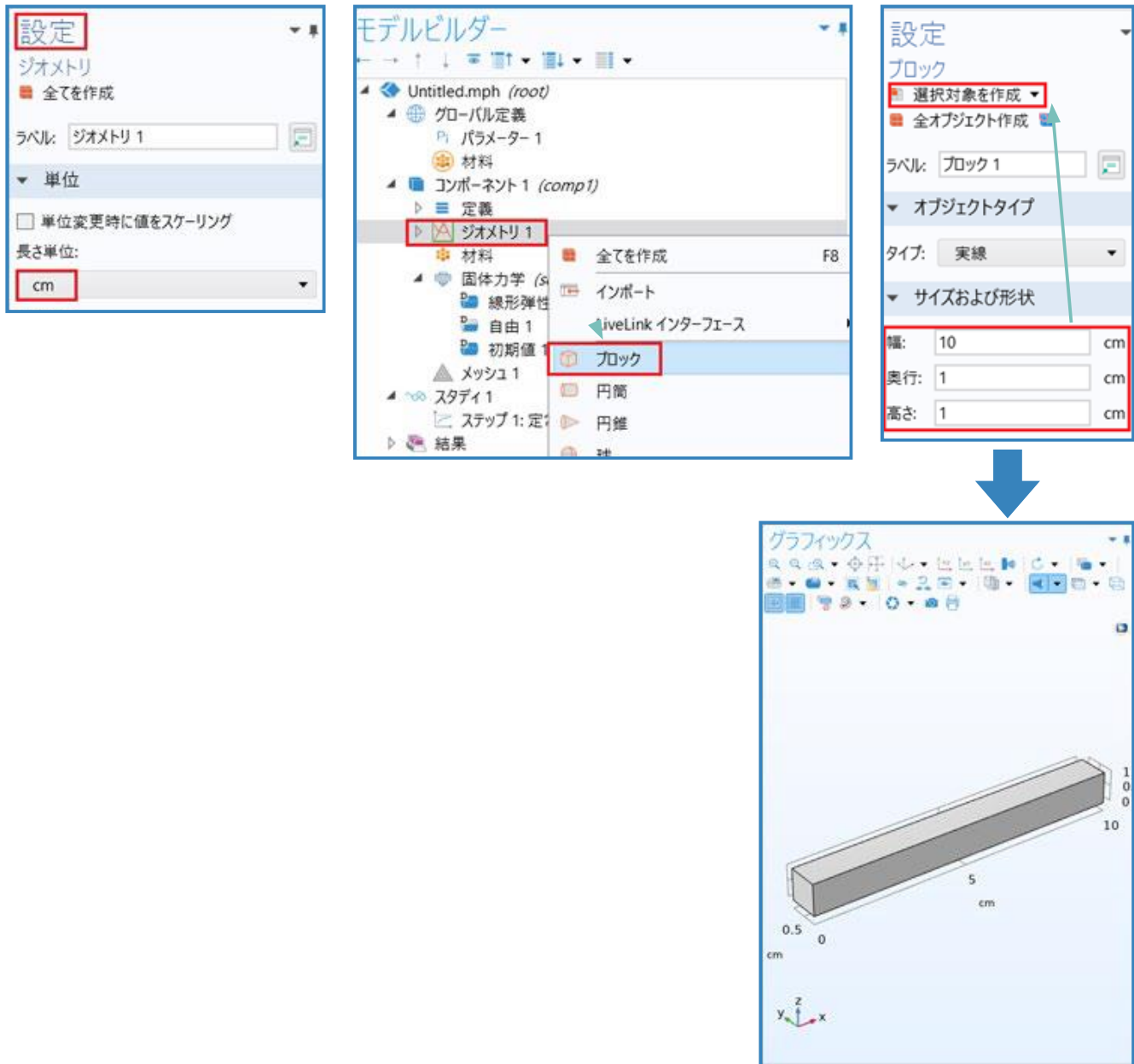
S1. 初期設定において、固体力学を設定（直方体を用いるので 3 次元）

初期設定の空間次元選択を参照してください。

S2. ブロックの設定

“コンポーネント>ジオメトリ”において扱う系の図形を設定します。1辺が1cmの正方形断面で、幅が10cmの直方体を作成します。はじめに、ジオメトリの親ノードを選択し、単位をジオメトリの単位をmからcmにします。

“ジオメトリ”を右クリックし、ブロックを選択します。サイズで各長さを設定し、設定画面の上部にある“選択対象を作成”を選択することでグラフィックス上に直方体を作成できます。単位が無記入の場合は自動的に初期に指定した単位系（デフォルトでは 国際単位系 (SI)）における値となります。（固体力学変形 -S2_V60.mph）



※ジオメトリに関する簡易な操作

ここで、ジオメトリに関するボタンおよびマウスの簡易な操作方法について説明します。ジオメトリに関する操作の大部分は以下のボタンで行うことが可能です。



回転

グラフィックス上で、マウス左ボタンを押したままマウスを動かすとジオメトリが回転します。

平行移動

グラフィックス上で、マウス右ボタンを押したままマウスを動かすとジオメトリが平行移動します。

図形の拡大および縮小

グラフィックス上で、マウス中央ボタンを押したままマウスを動かすとジオメトリが拡大・縮小します。

図形の大きさの調整

全体表示ボタン  を選択して図形を画面に納めます。

所定部分の拡大

ズームボックスボタン  を押すことで図形が部分的に拡大します。

図形の標準姿勢

デフォルトビューへボタン  で図形を標準姿勢にすることができます。

ワイヤーフレームの表示

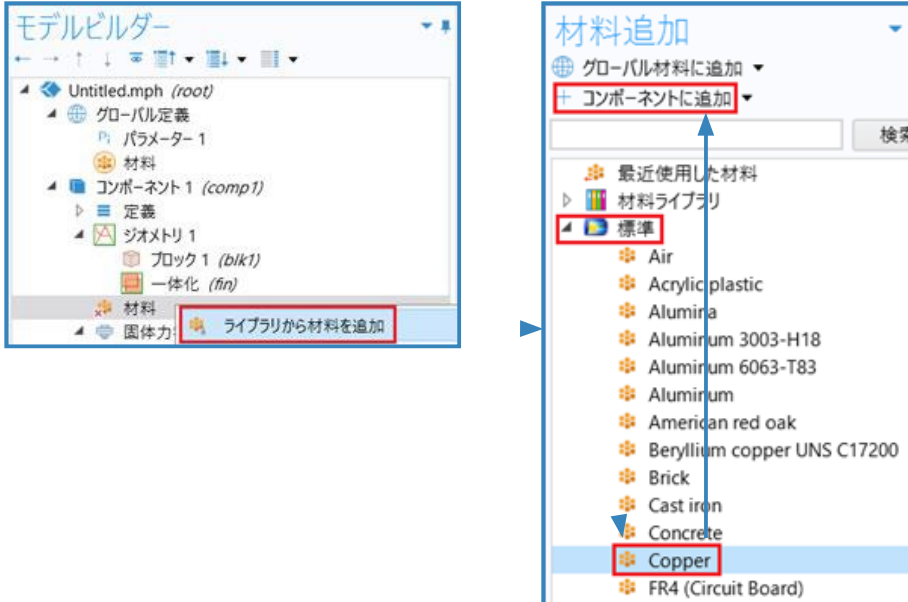
ワイヤーフレームレンダリングボタン  でワイヤーフレームを表示できます。

S3. 材料の設定

系内ジオメトリの材料を設定します。

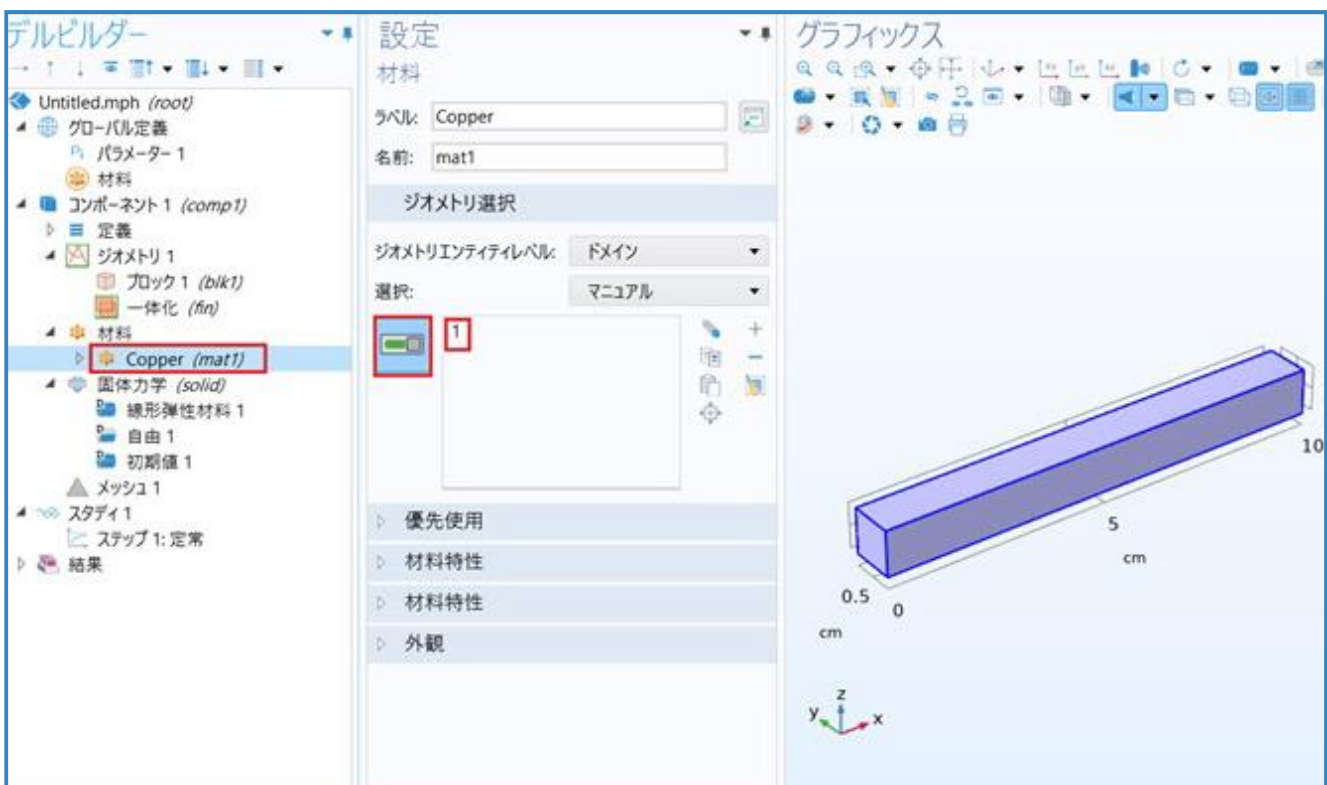
“コンポーネント>材料”を右クリックして“ライブラリから材料の追加”を選択すると、画面右側に材料の種類が表示されます。COMSOL Multiphysics®の標準的な材料は、材料ライブラリーの標準にあります。

銅はCOMSOL Multiphysics®ではCopperと英語で表記されるため、Copperを標準から選択し、“コンポーネントに追加”をクリックして銅が材料に追加されます。



設定ウィンドウ>ジオメトリ選択セクションの選択欄において1が表示され、直方体の領域が青く塗られており、直方体領域（ドメイン1と内部で自動的に定義）に銅の物性が割り当てられていることがわかります。

なお、領域選択や解除を手動で行う場合は、“選択を有効化”をオン（緑色のマーク）にして対象となるジオメトリ領域をクリックします。ジオメトリが灰色の場合は選択されておらず、ジオメトリが青色に表示されている場合は、材料特性が割り当てられていることを表します。



※材料特性と材料プロパティ

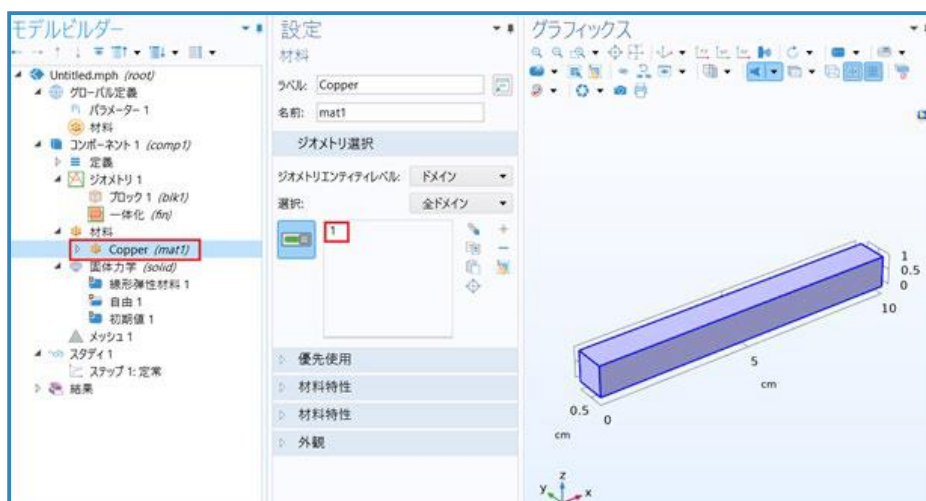
材料設定ウィンドウにおいて、材料特性が 2 行にわたって表示されていますが、英語の GUI においては下記のようになります。したがって、上から「材料特性」、「材料コンテンツ」となります。

▷ Material Properties	材料特性
▷ Material Contents	材料コンテンツ

※材料を必要とするエンティティの確認方法

ジオメトリを作成後、材料の設定のために材料ノードをクリックした直後は材料ノードのアイコンに × 印が表示されます。これはエンティティごとに材料設定が必要であるために表示されます。どのエンティティに材料設定が必要であるかについては、設定ウィンドウ>材料概要セクションの材料と選択の列を見ることで確認できます。本例題の場合、材料を必要とするエンティティは「ドメイン 1」です。

設定 材料		
ラベル: 材料		
▼ 材料概要		
材料	選択	
Copper (mat1)	ドメインなし	
材料を必要とするエンティティ	ドメイン 1	

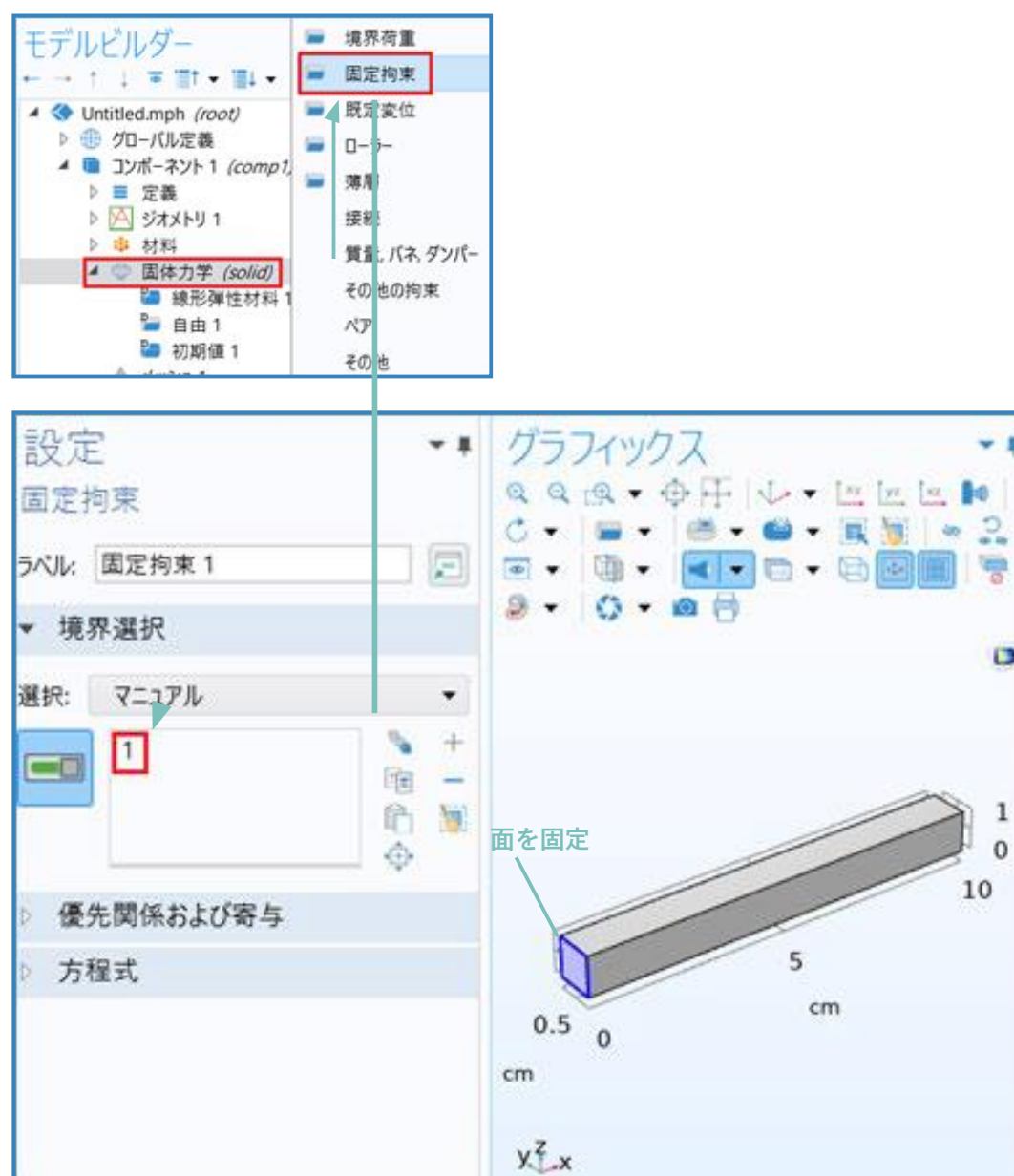


材料を追加した直後は、下図のように材料ノードに × マークが残ったままとなりますが、材料ノードをクリックすることで × 表示が消えます。



S4. 固定拘束の設定

“固体力学 (solid)*” を右クリックして“固定拘束”を選択し、設定において固定したい面を選択します。



S5. 境界荷重の設定

“固体力学 (solid)*” を右クリックして“境界荷重”を選択します。そして、荷重タイプを“単位面積あたりの力”として z 軸方向の欄に -10000 を入力します。

The screenshot displays the COMSOL Multiphysics interface with the following components:

- モデルビルダー (Model Builder):** Located at the top left, it shows a tree structure. The "固体力学 (solid)" component is highlighted with a red box. A red box also highlights the "境界荷重" (Boundary Load) button in the toolbar.
- 設定 (Settings):** The "境界荷重" (Boundary Load) settings panel is open on the left.
 - ラベル (Label):** 境界荷重 1
 - 境界選択 (Boundary Selection):** The selection method is set to "マニュアル" (Manual). A list shows boundary 4 is selected.
 - 優先関係および寄与 (Priority and Contribution):** Collapsed.
 - 方程式 (Equations):** Collapsed.
 - 座標系選択 (Coordinate System Selection):** The coordinate system is set to "グローバル座標系" (Global Coordinate System).
 - 力 (Force):**
 - 荷重タイプ (Load Type):** Set to "単位面積あたりの力" (Force per unit area), highlighted with a red box.
 - F_A (Force per unit area):** Set to "ユーザー定義" (User-defined).
 - Force components table:**

Value	Axis	Unit
0	x	N/m ²
0	y	
-10000	z	
- グラフィックス (Graphics):** The 3D model of a rectangular block is shown on the right. The dimensions are 0.5 m (width), 5 cm (length), and 1 cm (height). A green arrow points to the top surface of the block with the text "この面に荷重を加える" (Add load to this surface). A coordinate system (x, y, z) is shown at the bottom left of the graphics area.

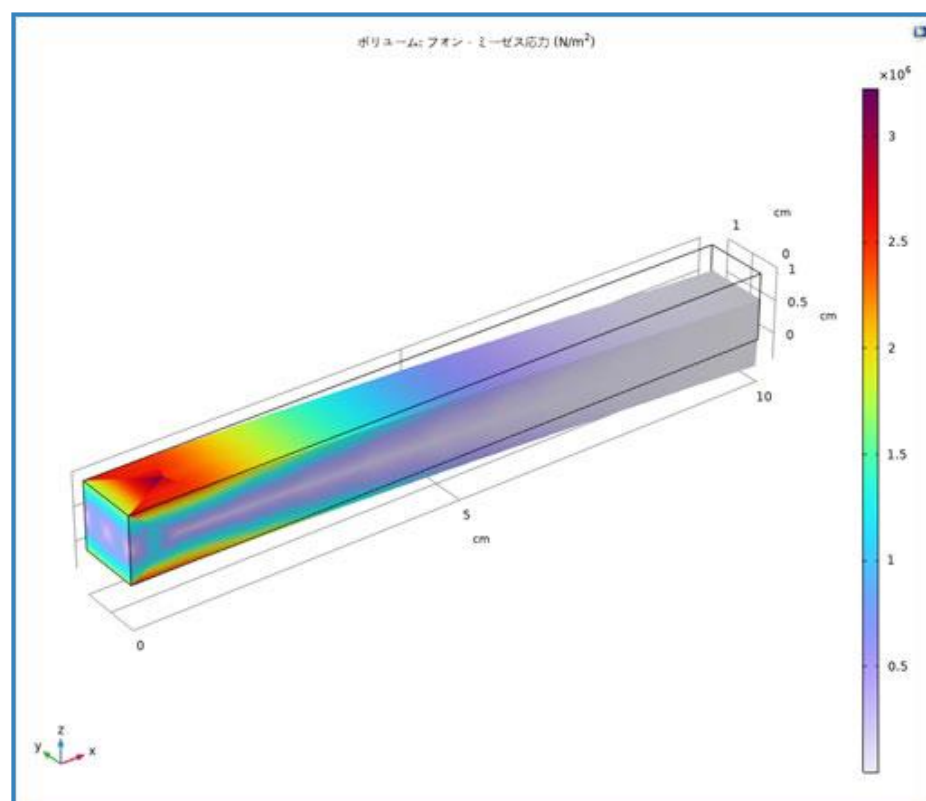
S6. 計算

設定した現象の解析を行います。“定常”の設定がされているので、“スタディ 1 > ステップ1: 定常”を選択して、“計算”をクリックします。



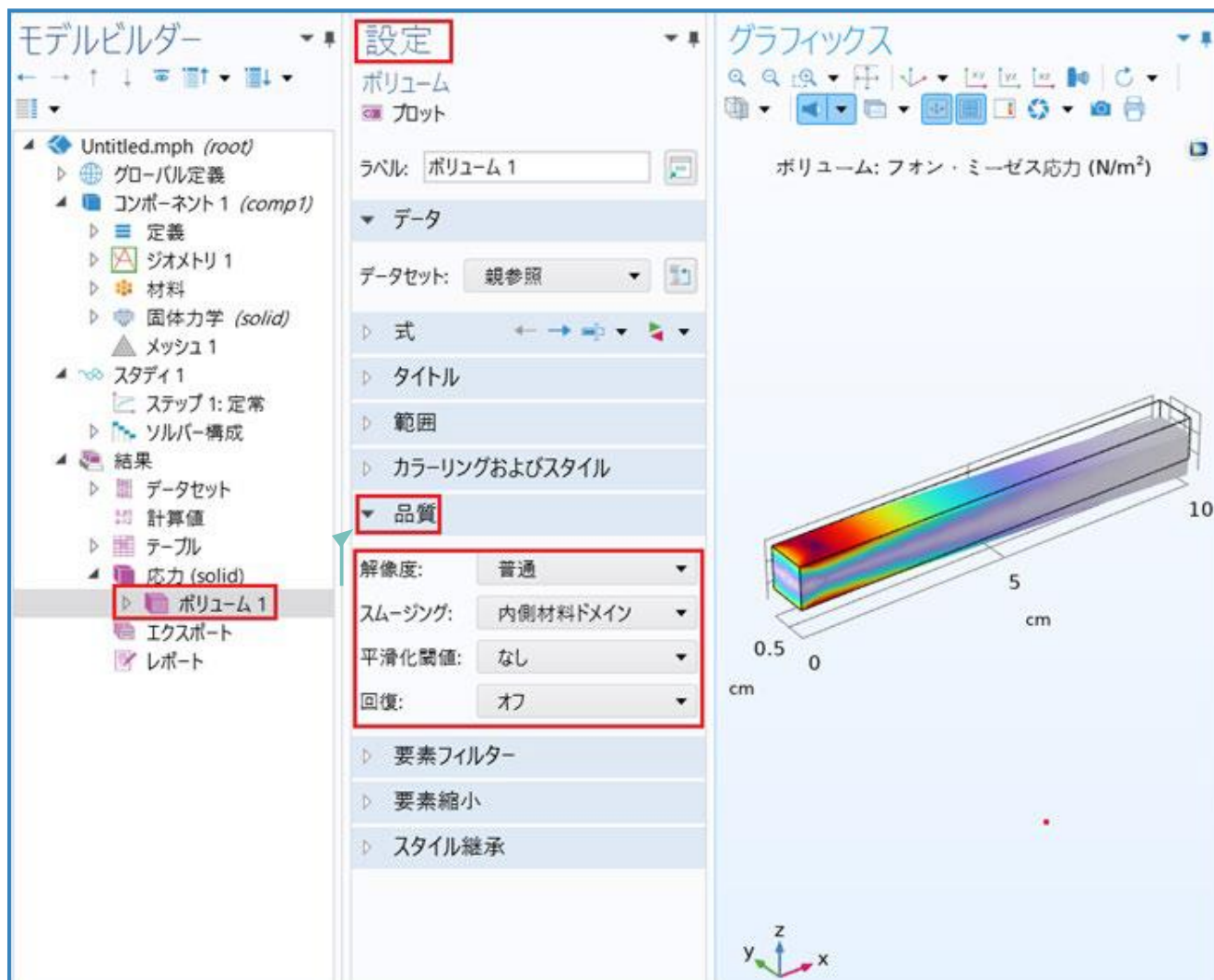
S7. 結果

“結果”で、解析した現象の結果がグラフィックス上に表示されます。“結果>応力>ボリューム”を選択すると、直方体にかかったフォン・ミーゼス応力分布と変形の様子を表したグラフィックスが表示されます。フォン・ミーゼス応力分布をみると、拘束面に近づくほど強い応力がかかっているのがわかります。



※グラフィックスウィンドウ表示の調整について

デフォルトの応力分布は「S7. 結果」のように断続的な分布に見える結果となっています。
品質の設定を下図のようにすることで、なめらかな分布の表示になります。



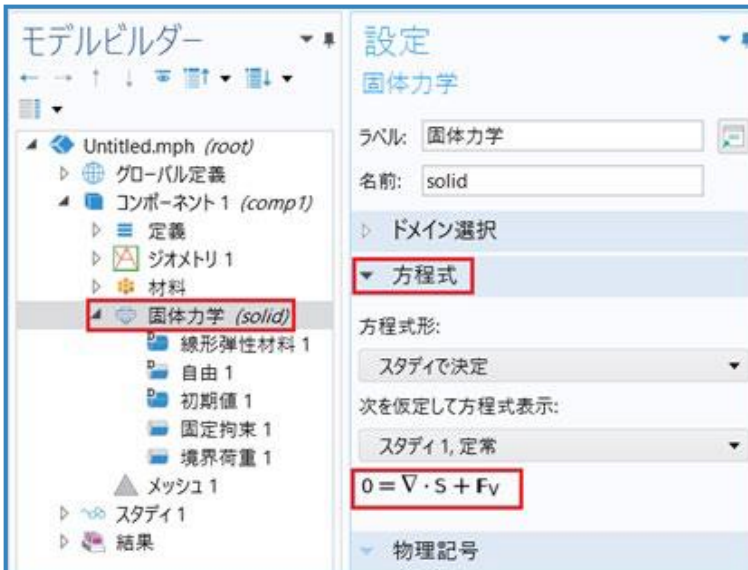
※内部方程式に関して

ここでは、各物理条件で使用される方程式とその方程式に使用される演算子の定義に関して説明します。

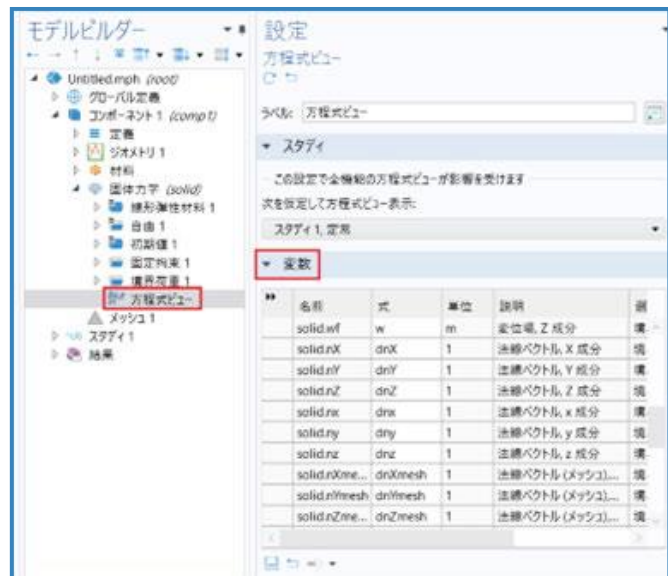
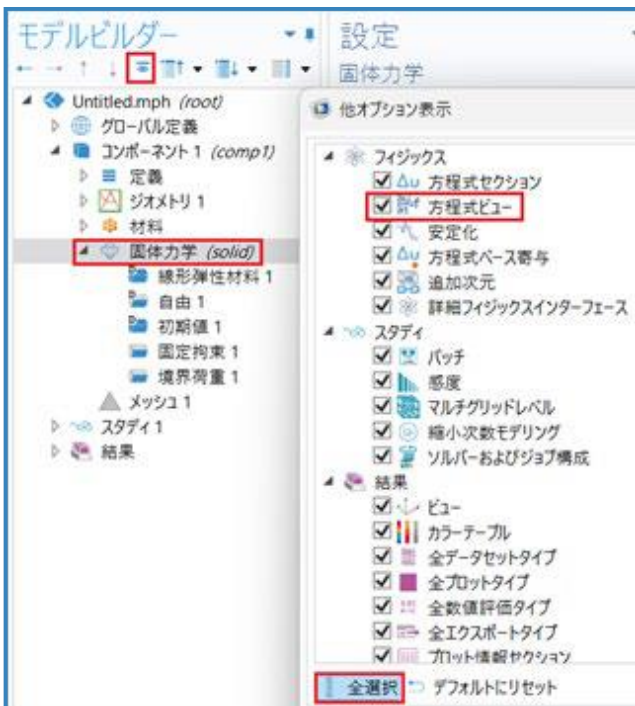
各物理条件の方程式は、各フィジックスのノードの設定ウィンドウに記載されています。例えば、“固体力学 (solid)*”を選択して方程式を展開すると、固体力学インターフェイスではどのような支配方程式を用いて計算しているか、確認することができます。また、各物理条件で使用される演算子は“方程式ビュー”で確認できます。

まず、モデルビルダーの上部にある“人目のマーク”を展開し、方程式ビューにチェックマークをつけます。それにより、フィジックス中の各ノードに方程式ビューが追加されます。例えば、“境界荷重”の方程式ビューを選択すると、境界荷重の設定に使用される演算子が記載されております。（“方程式ビュー”以外の項目もチェックを入れても差し障りありません。）

例) 固体力学インターフェイスの支配方程式の確認



例) 固体力学インターフェイスの変数の確認



単一物理解析の自由課題【片持ち梁の変形解析】

今まで解いた問題の条件設定を変更して解きなおしましょう。

手順ごとの mph ファイルが用意されています。

途中で分からなくなった場合は、該当 mph ファイルを開いて再開ください。

以下の操作を順番に行ってください。

E1. パラメータでブロックの各辺の長さを設定

“パラメータ”を選択 名前の欄に a, L を入力 式の欄に $1, 10 \cdot a$ をそれぞれ入力
ブロックを選択 幅 L 、深さ a 、高さ a と入力

E2. 加える力を変える

■重力を加える。

“固体力学”を右クリック “体積力”にある “重力”を選択

■辺に荷重を加える。

“パラメータ”で F_e の値を任意に入力 “固体力学”を右クリック
“エッジ荷重” 荷重をかける辺を選択 荷重タイプ：“単位長さ当たりの力” 荷重の重さを z 軸の欄に F_e と入力
(解説では、境界 11 に力を加えます)

■点に荷重を加える。

“パラメータ”で F_p の値を任意に入力 “固体力学”を右クリック “点荷重” 荷重をかける点を選択 荷重の重さを x 軸の欄に F_p と入力
(解説では、ポイント 5 に力を加えます)

E3. メッシュを設定する

計算するには、メッシュの設定が必要であるため、メッシュを設定します。
“メッシュ”を右クリック “フリーメッシュ 4 面体”を選択 サイズ “さらに細かい”
“全てを作成”を選択

E4. 計算

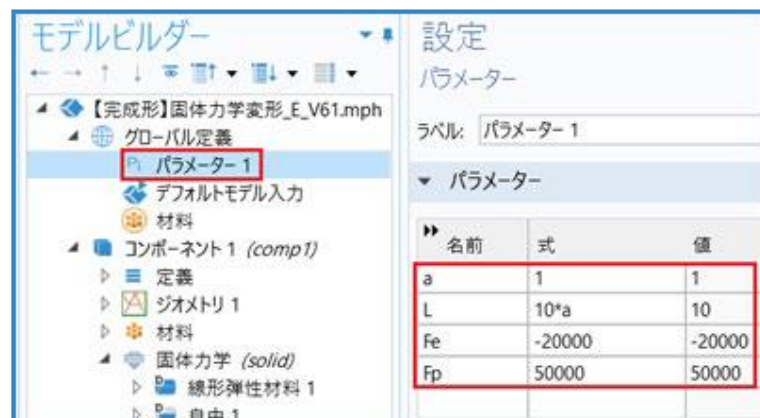
“スタディ”を選択した後、“計算”を選択

E5. 変位を表示する

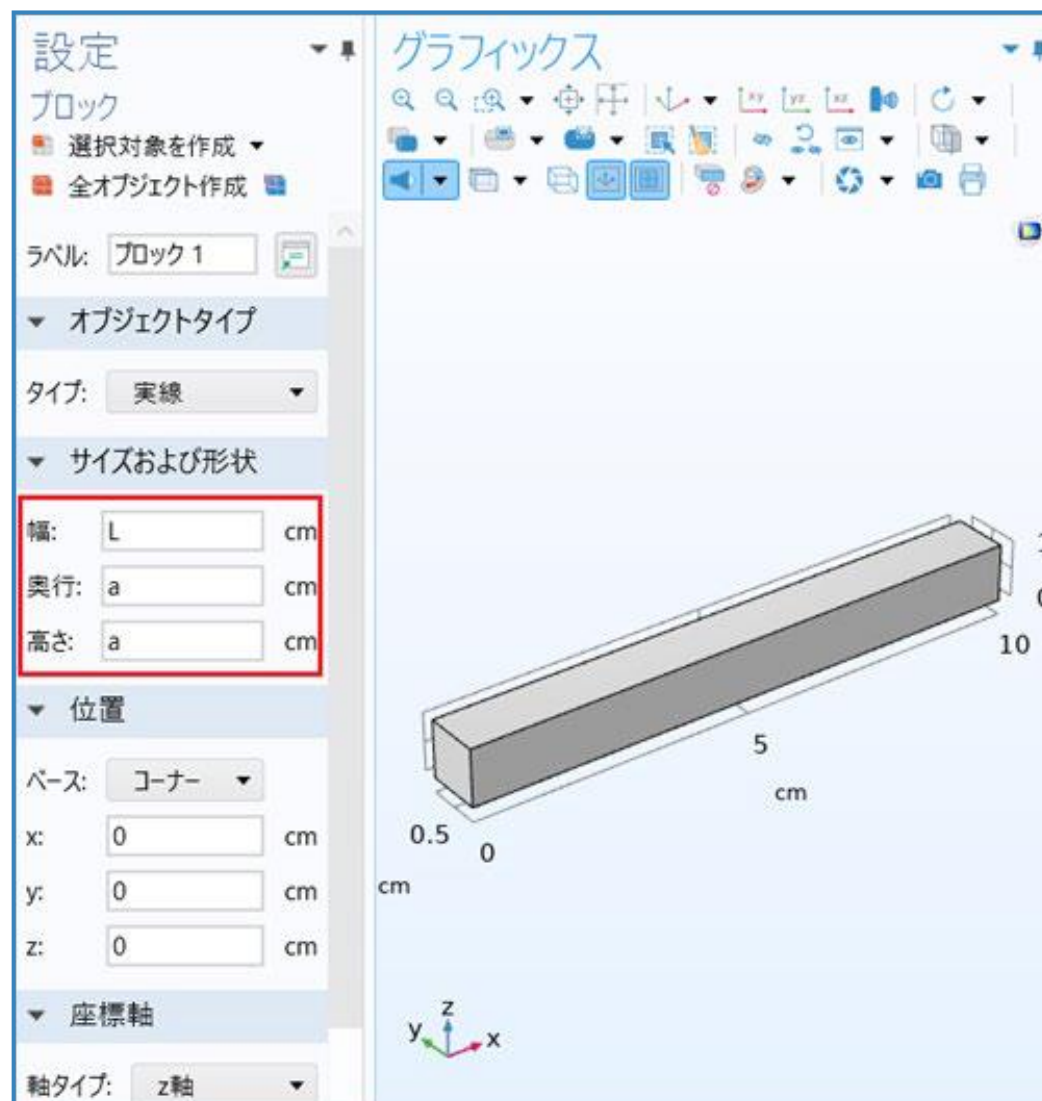
“応力>サーフェス”を選択 式の欄に solid.disp を入力 “プロット”

E1. パラメータでブロックの各辺の長さを設定

グローバル定義>パラメータを選択します。 $a=1[\text{cm}]$, $L=10 \times a[\text{cm}]$ と設定するため、以下のようにパラメータを入力します。(Fe, Fp は後で使用します)



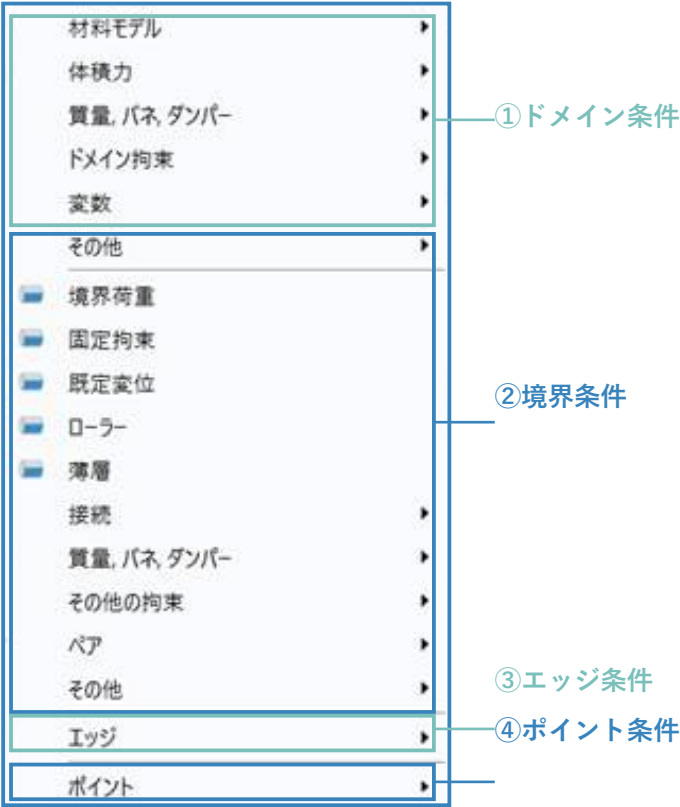
“ジオメトリ”を右クリックし、ブロックを選択します。幅をL、高さおよび奥行をaと設定して、設定画面の上部にある“選択対象を作成”を選択することでグラフィックス上に直方体を作成します。



E2. 加える力を変える

フィジックスの条件は、デフォルト表示の条件に加えて、ドメイン、境界、エッジ、ポイントのいずれかの条件を与えることで設定することができます。3D(三次元) 条件において、ドメインは空間、境界は面、エッジは辺、ポイントは点に対応します。

条件を設定するには、フィジックス (固体力学) を右クリックして、各条件設定の項目を開きます。



下の表は、各空間次元における、ドメイン、境界、エッジ、ポイントを表示しています。

	1D(1次元)	アイコン	2D(2次元)	アイコン	3D(3次元)	アイコン
①ドメイン	辺		面		空間	
②境界	無し	無し	無し	無し	面	
③エッジ	無し	無し	辺		辺	
④ポイント	点		点		点	

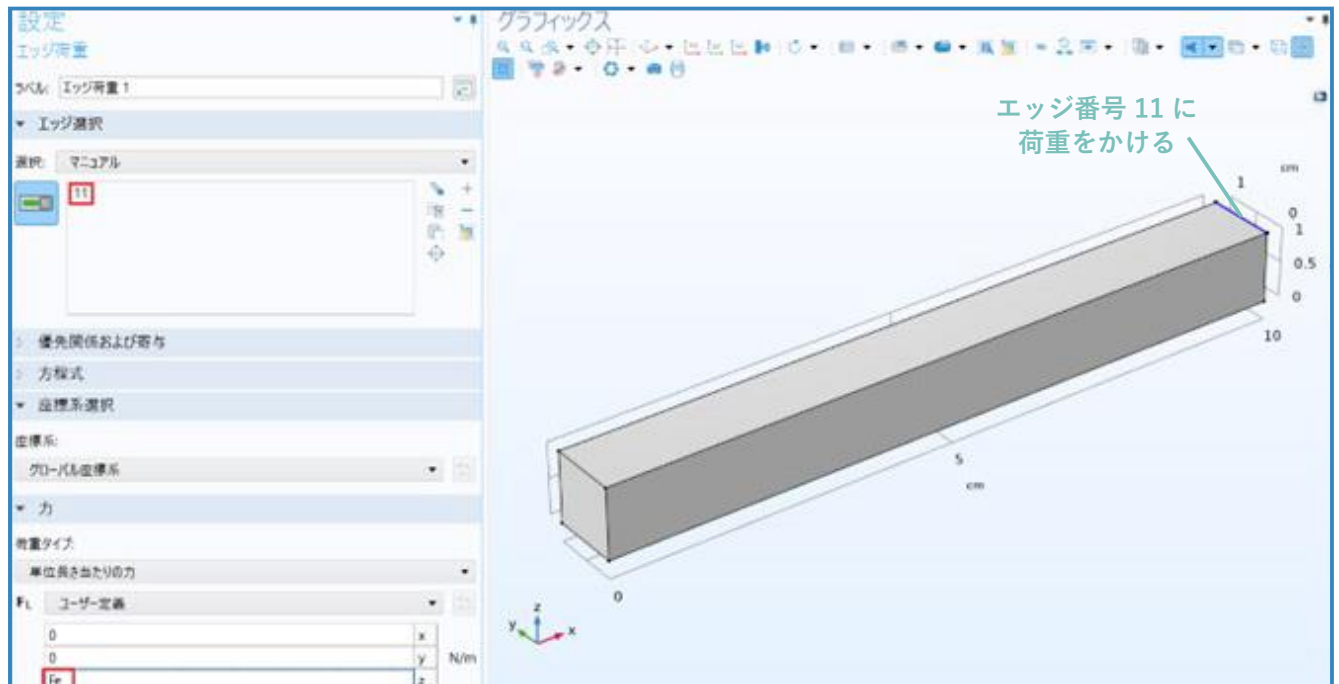
E2.1 重力を追加

“ 固体力学(solid)* ” を右クリックして、“ 重力 ” を選択し、系に重力を設定します。設定ウィンドウの重力という項目を見ると、z 軸の下方方向に重力がかかっていることが確認できます。ここで、式に記載されている「g_const」は COMSOL Multiphysics® に用意してある重力加速度定数を表します。



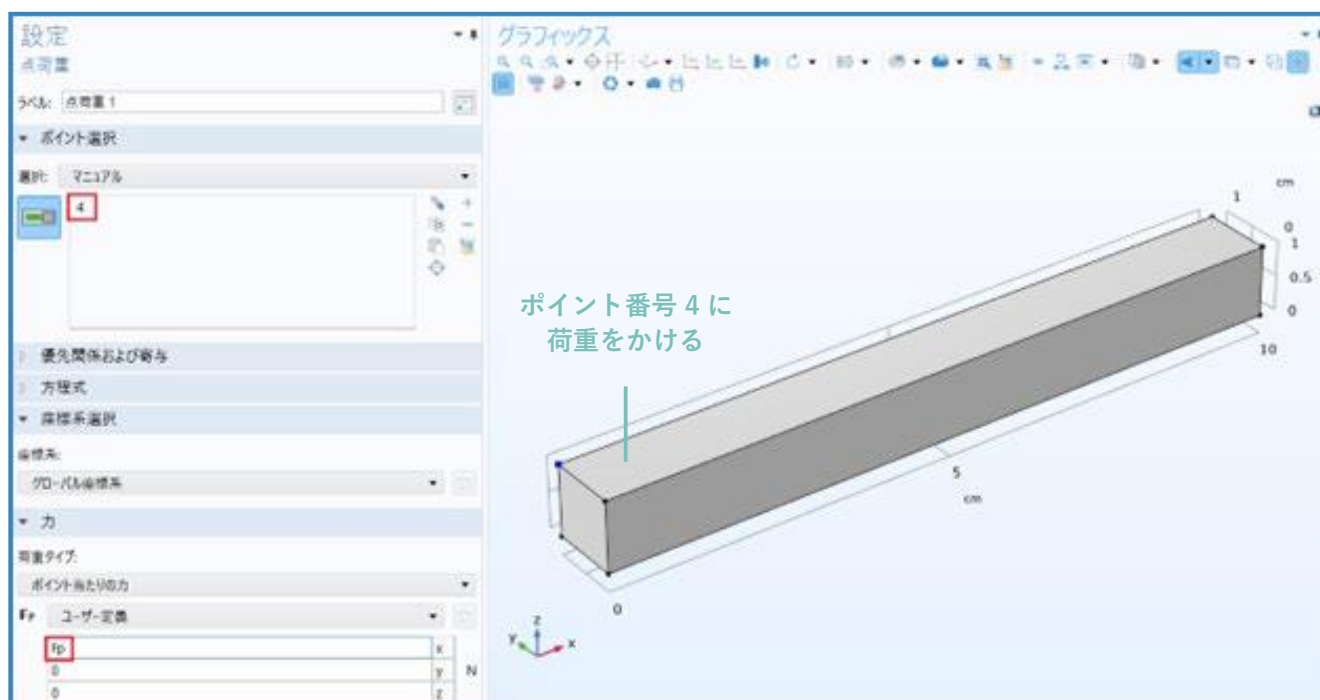
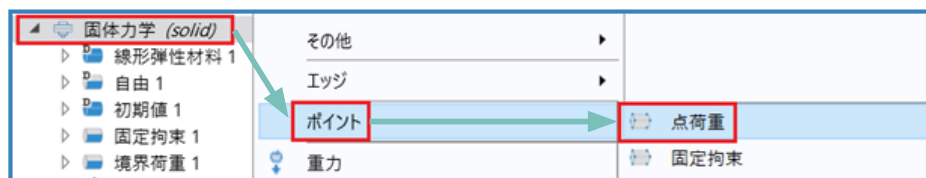
E2.2 辺に荷重を加える

“ 固体力学 (solid)* ” を右クリックして “ エッジ>エッジ荷重 ” を選択します。そして、設定のところで固定したい辺を選択して “ アクティブ ” にすることで拘束条件が設定されます。荷重タイプを “ 単位長さ当たりの力 ” として、辺にかかる荷重を z 軸方向に F_z とします。



E2.3 点に荷重を加える

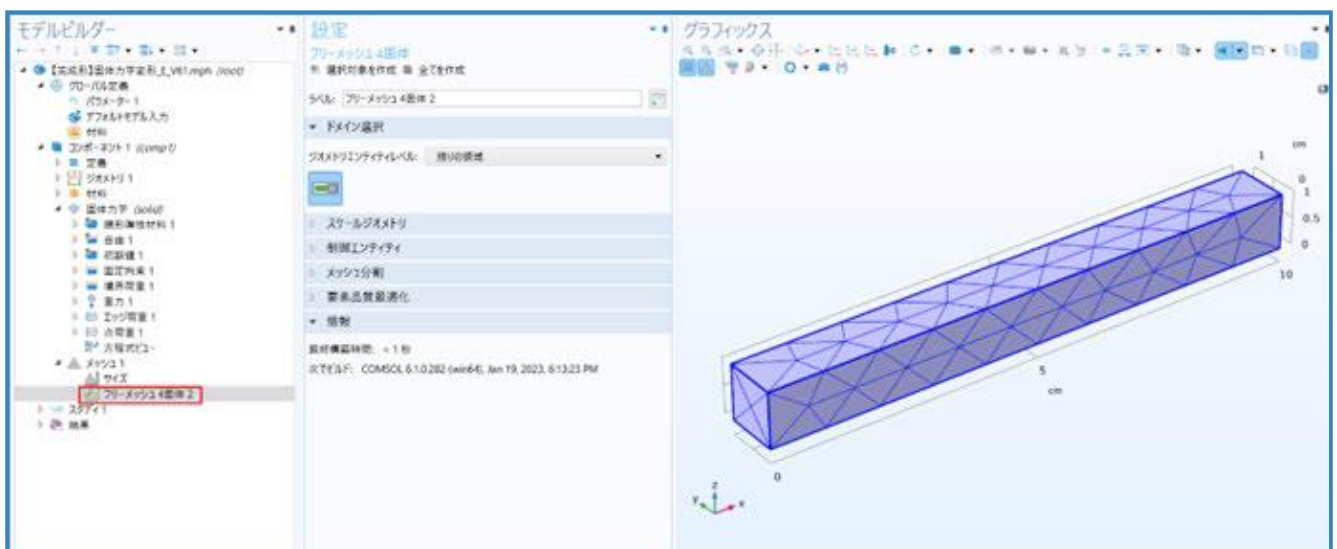
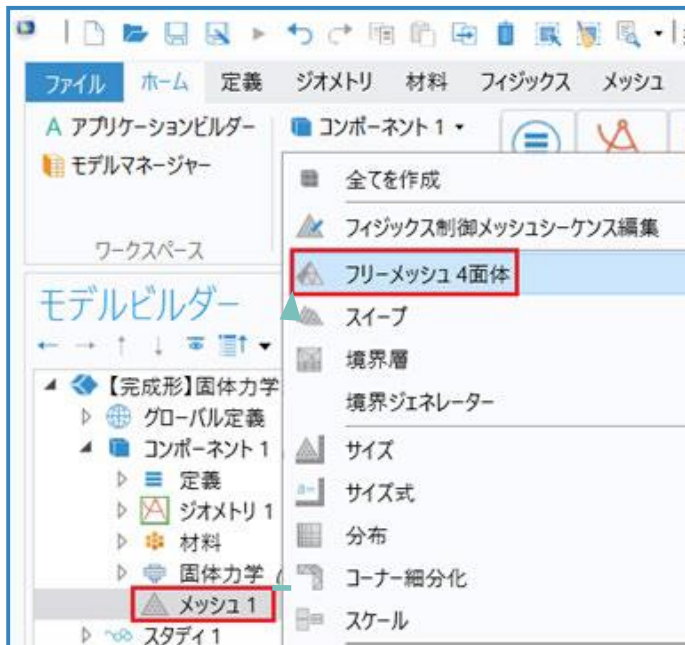
“固体力学(solid)*”を右クリックして“ポイント>点荷重”を選択します。そして、固定したい点を選択して“アクティブ”にします。線にかかる荷重は x 軸方向に F_p とします。



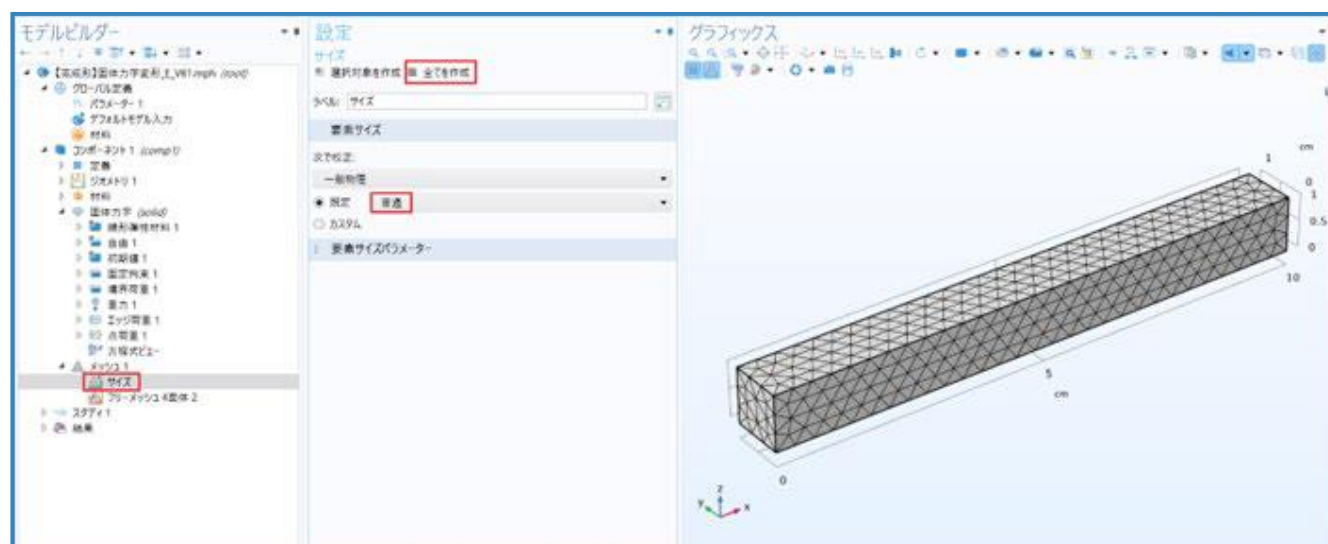
E3. メッシュの設定

計算するために必要なメッシュを作成します。基本的にはメッシュが細かいほど計算精度は上がります。3D系の場合、一般的にフリーメッシュ 4 面体のメッシュをジオメトリに作成します。そこで、今回もフリーメッシュ 4 面体をジオメトリ上に作成します。

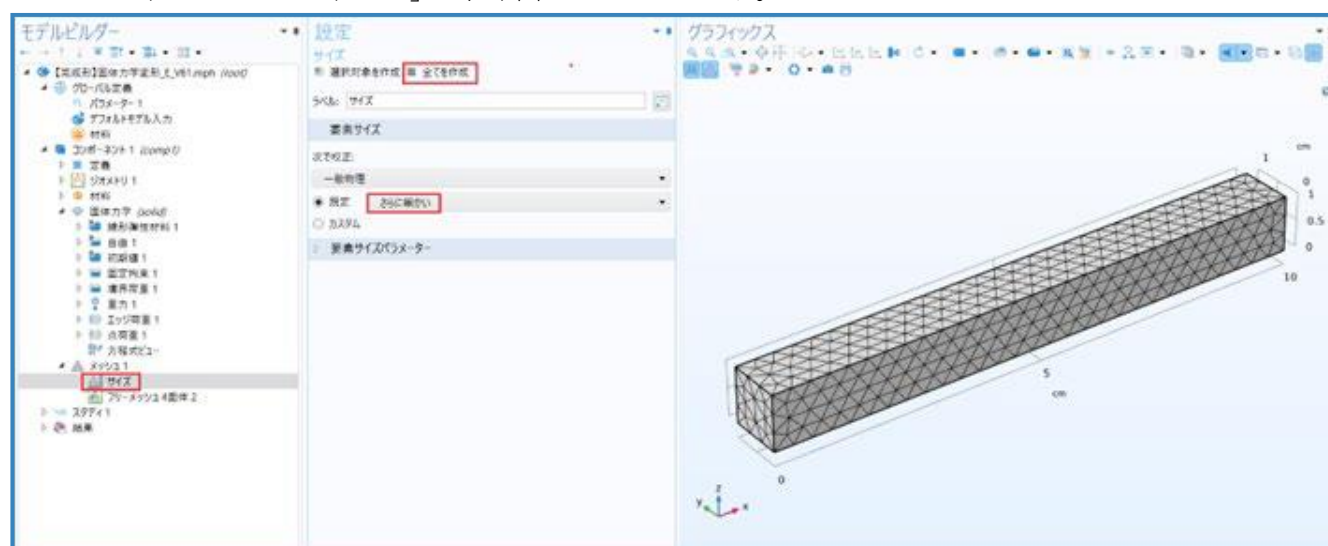
“メッシュ”を右クリックして“フリーメッシュ 4 面体”を選択します。メッシュの細かさはサイズを選択して指定することができます。そして、“全てを作成”をクリックするとグラフィックにメッシュが作成されます。この際に、“普通”を選択した場合と“さらに細かい”を設定した場合に、メッシュの細かさが変わることを確認してみてください。



下図は、メッシュの細かさ「普通」になります。

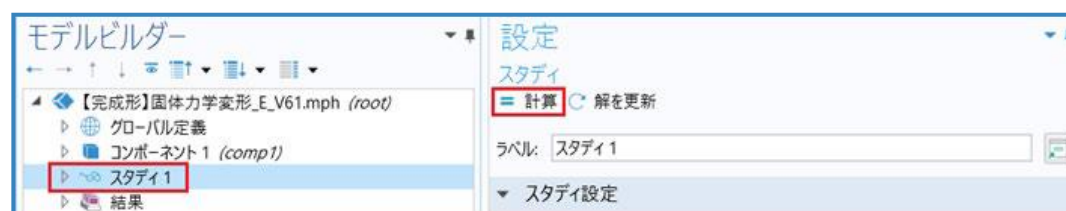


メッシュの細かさ「さらに細かい」は、下図のようになります。



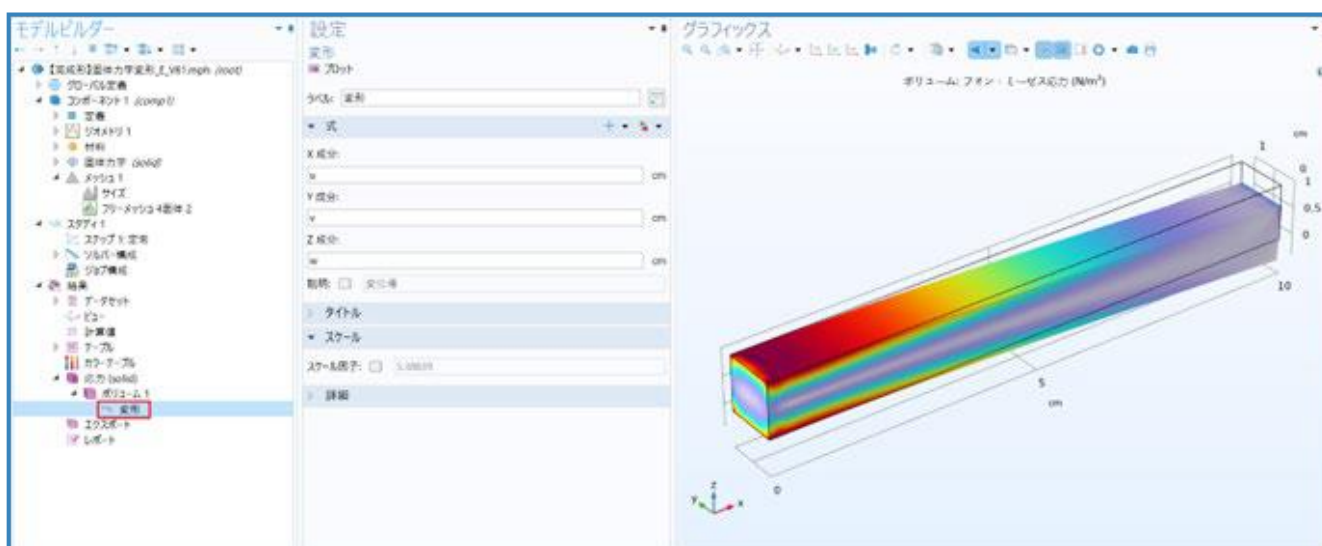
E4. 計算

“スタディ 1”を選択した後、“計算”を選択します。



E5. 変形の表示

計算後、変形がデフォルトで表示されます。式の確認の際は、まず“応力>ボリューム>変形”を選択します。



次に、設定欄で“ (数式置換アイコン) > 固体力学 > 変位を展開します。固体力学インターフェイス > 従属変数の“変位場成分”が入力されていることが確認できます。“プロット”を押すと、変位分布が表示されます。なお、変形前の形状はワイヤーフレームで示されています



これで、例題を1つ解き終わりました。操作をまとめると、モデルビルダのノードを右クリックしたら設定項目が出てきて、その選択した項目の設定ウィンドウで条件を記入することを繰り返すだけで解析ができます。また、使用者が操作した手順通りのモデルを保存することができ、最適な手順書を作ることにも可能です。

第2章では1つの物理現象を例に問題を解きましたが、COMSOL Multiphysics® は複数の物理現象を組み合わせるシミュレーションすなわち連成が可能なソフトとなっています。

そこで、第3章では物理現象の連成問題（マルチフィジックス）を解いていき、COMSOL Multiphysics® において物理現象を容易に連成できることを体感してもらいます。ただし、第3章を理解するためには第2章の理解が必要であるため、第2章を2、3回反復して自信がついた後に、第3章の連成問題に取り組まれることをお勧めします。

もっといろいろな形を作りたいときは、第4章でも紹介する、COMSOL 社のラーニングセンター (<https://www.comsol.jp/learning-center>) の GEOMETRY をご参照ください。

第 3 章

連成問題

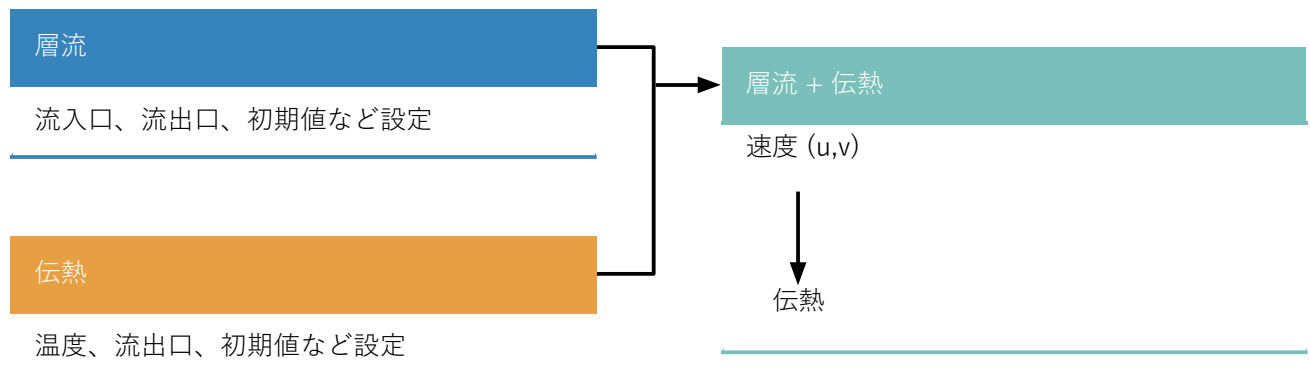
本章では、物理現象の連成問題を解いていき、COMSOL Multiphysics® において複数の物理現象を連成する方法を習得します。

3.1 マルチフィジックス解法の説明

物理現象の連成は、フィジックスを追加した後、フィジックス間の関連付けを行うことによって可能になります。

関連付けは、変数によって行われます。以下に、関連付けの概略図を載せております。ここでは、流体流れ：層流 (spf) と伝熱 (流体) (ht) のインターフェースの連成問題を解く場合の例を示しております。まず、それぞれのフィジックスの条件設定を行います。その後、2つのフィジックスがどの変数をもって相互作用を起こしているかを考えます。層流 (spf) において速度場 (u, v) を従属変数として解析しており、速度場 (u, v) を伝熱の計算に組み込む設定を行います。

このように、変数をフィジックス間で関連付けることで連成が可能となります。



※マルチフィジックス機能による連成設定の自動化が行える場合があります。後の例題で説明します。

3.2 流体流れの解析と伝熱の連成解析

物理現象を COMSOL Multiphysics® で解く考え方を、以下のような手順を追って説明します。熱流体の連成問題をいく工程として、まず、流体の問題設定を行った後 (3.2.1 ~ 3.2.3 参照)、伝熱を追加し連成設定を行います。(3.2.4 ~ 3.2.6 参照)

3.2.1 流体問題の定義と分析

3.2.2 流体問題の COMSOL Multiphysics® における表現

3.2.3 流体問題の COMSOL Multiphysics® における操作

3.2.4 熱流体連成問題の定義と分析

3.2.5 熱流体連成問題の COMSOL Multiphysics® における表現

3.2.6 熱流体連成問題の COMSOL Multiphysics® における操作

3.2.1 問題の定義と分析

初めに、流体問題を定義していきます。連成の例として、熱流体を定義する場合の手順を説明します。また、その問題の概略図を下の図に示します。

Q1. 何をしたいか。

A1. 流路に水を流したときの流体の速度を求めたい。(流れは層流とする)

Q2. どの状態か。

A2. 4 秒後の状態。

Q3. 扱う管路の形は。

A3. 四角形。細い管から流体が入ってくる。

Q4. 流体の材質は。

A4. 水(液体)。

Q5. 流入口はどこか。また、流入速度は。

A5. 流入口を左境界線の一部。流入速度は 0.01m/s。

Q6. 流出口はどこか。

A6. 流出口を右境界全体とする。

現象：管内に流体を流す

状態：4 秒後

初期速度：0m/s

流入口
速度：0.01m/s



流出口

材料：水(液体)

3.2.2 COMSOL Multiphysics® における表現

問題の定義と分析の内容を COMSOL Multiphysics® における表現に置き換えます。各設問において、適切な表現を各一覧表から選びます。一覧表 P(フィジックス) では物理現象、一覧表 S(スタディ) では解析の種類、一覧表 G(ジオメトリ) では図形、一覧表 M(マテリアル) では材料、一覧表 B(境界条件) では境界条件を選択します。

Q1. 物体に熱を加えた時における現象を解析するには、どのインターフェイスがよいか。

A1. 一覧表 P(フィジックス) から判断し、流体流れ (層流) が適している。

Q2. 4 秒後の状態をどのように設定するか。

A2. 一覧表 S(スタディ) から判断し、時間依存を設定する。

Q3. 円柱は COMSOL Multiphysics® 上ではどのように表しているか。

A3. 一覧表 G(ジオメトリ) から判断し、管路は矩形で表現される。
また、流入口はポリゴンで表現される。

Q4. 水 (液体) は COMSOL Multiphysics® 上ではどのように表しているか。

A4. 一覧表 M(マテリアル) から判断し、水 (液体) は water(liquid) で表現される。

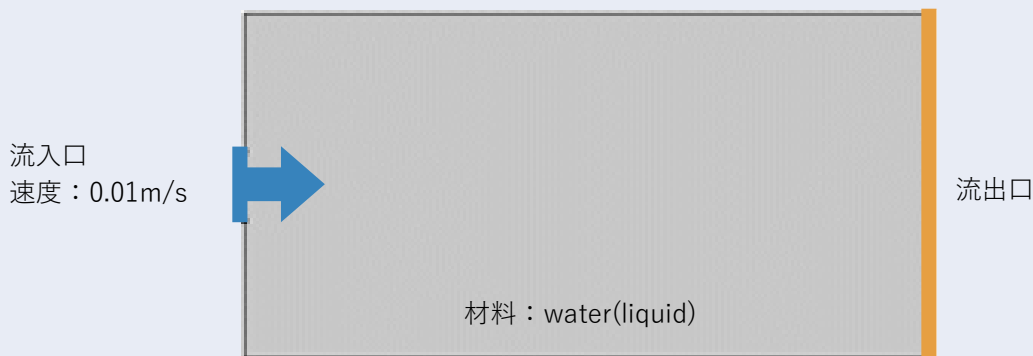
Q5. 流入口を設定するには、どのノードを選ばよいか。

A5. 一覧表 B (境界条件) から判断し、流入口を使う。

Q6. 流出口を設定するには、どのノードを選ばよいか。

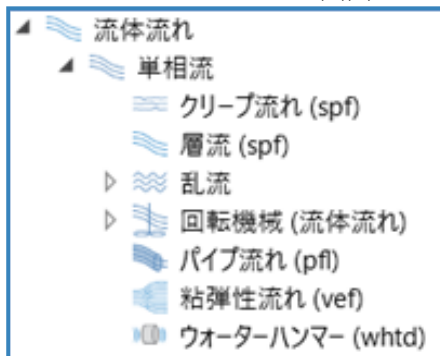
A6. 一覧表 B (境界条件) から判断し、流出口を使う。

現象：液体流れ (層流)
状態：時間依存 4 秒後
初期速度：0m/s



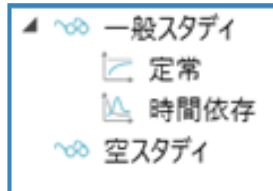
一覧表 P (フィジックス)

フィジックスの追加画面



一覧表 S (スタディ)

スタディの追加画面



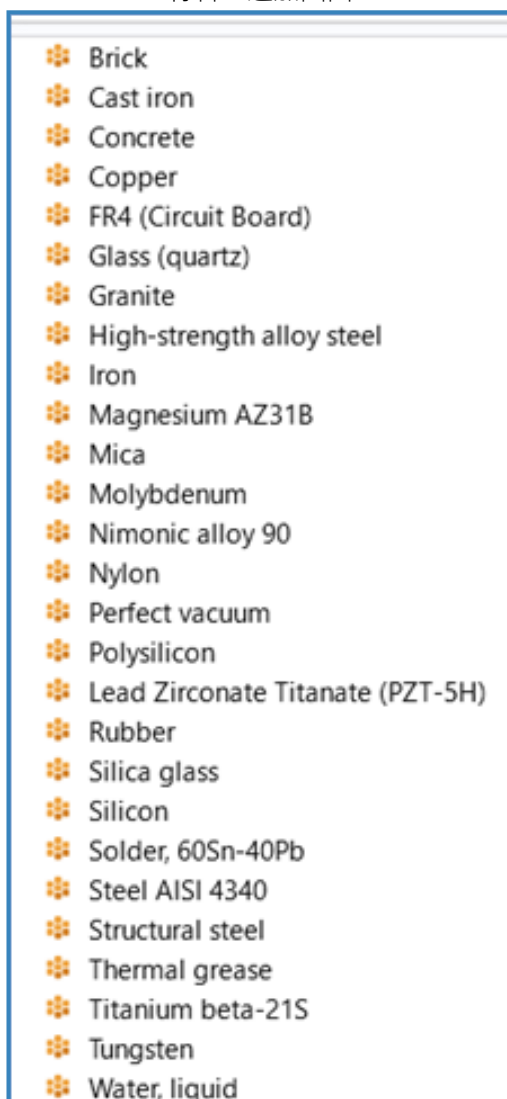
一覧表 G (ジオメトリ)

ジオメトリコンテキストメニュー



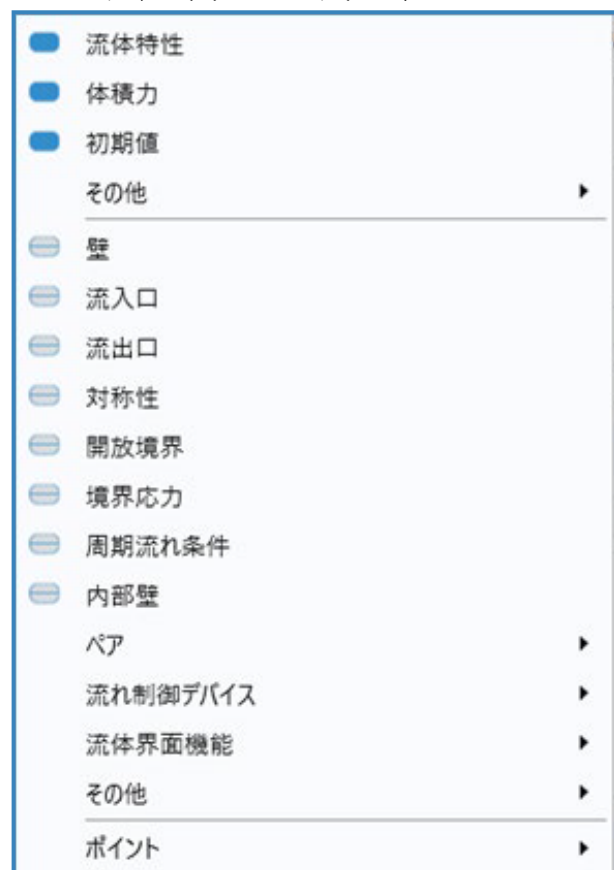
一覧表 M (マテリアル)

材料の追加画面



一覧表 B (境界条件)

フィジックスコンテキストメニュー



3.2.3 COMSOL Multiphysics® における操作

COMSOL Multiphysics® で操作して、問題を解きます。

- S1. 初期設定において、層流 (spf) を設定 (四角形を用いるので 2 次元)
“ 空間次元 ” : 2D “ フィジックス ” : 層流 (spf) 追加 “ スタディ ” : 時間依存完了
- S2. ブロックの設定
“ ジオメトリ ” を選択 単位 : cm を選択
“ ジオメトリ ” を右クリック 矩形 幅 5 高さ 2 を入力
“ ジオメトリ ” を右クリック ポリゴンを追加
(x,y)=(0,0.8) (0,1.2) を入力
- S3. 材質の設定
“ 材料 ” を右クリック 材料追加 water(liquid) をダブルクリック
- S4. 流入口の設定
“ 層流 (spf)” を右クリック “ 流入口 ” 境界 3 を選択法
線流入速度を選択 0.01 と入力
- S5. 流出口の設定
“ 層流 (spf)” を右クリック “ 流出口 ” 境界 6 を選択
- S6. メッシュ
“ メッシュ選択 ” “ より細かい ”
- S7. 計算
“ スタディ ” の時間依存を選択 時間指定 range(0, 0.01,4) 計算
(時間刻みを 0.01 秒として 0 秒から 4 秒までの計算を行う)
- S8. 結果表示
“ 結果 ” “ 速度 ” “ サーフェス ” “ プロット ”

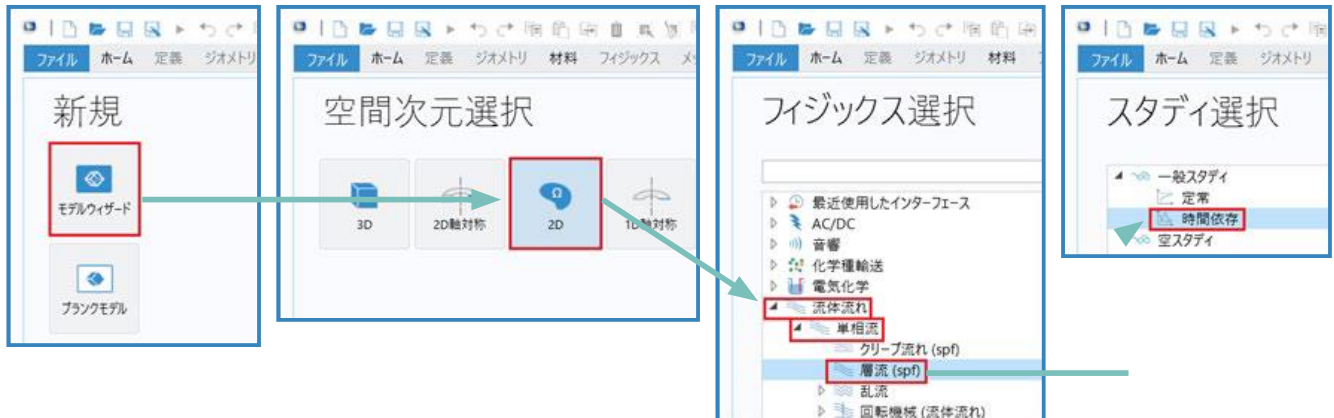
操作手順【流体流れの解析と伝熱の連成解析】

前半の説明：流体流れの解析

詳細な操作手順を説明します。

S1. 初期設定において、層流を設定（矩形を用いるので 2 次元）

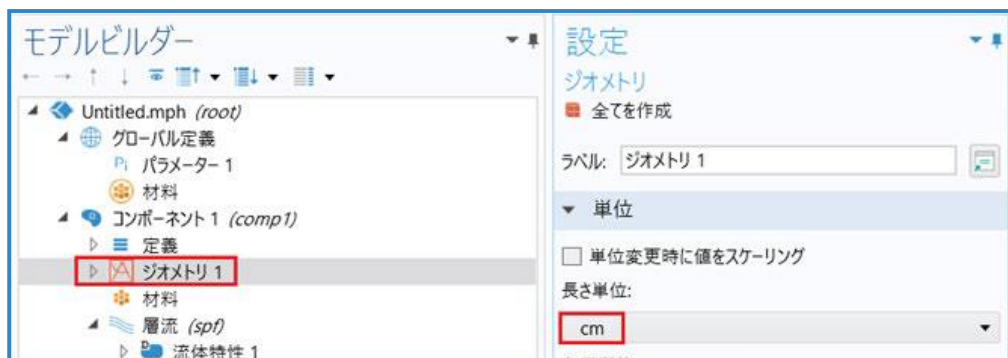
2.2 を参照してください。“空間次元”は 2D、“フィジックス”は流体流れ＞単相流＞層流 (spf)、“スタディ”は時間依存を設定し、“完了”を選択します。



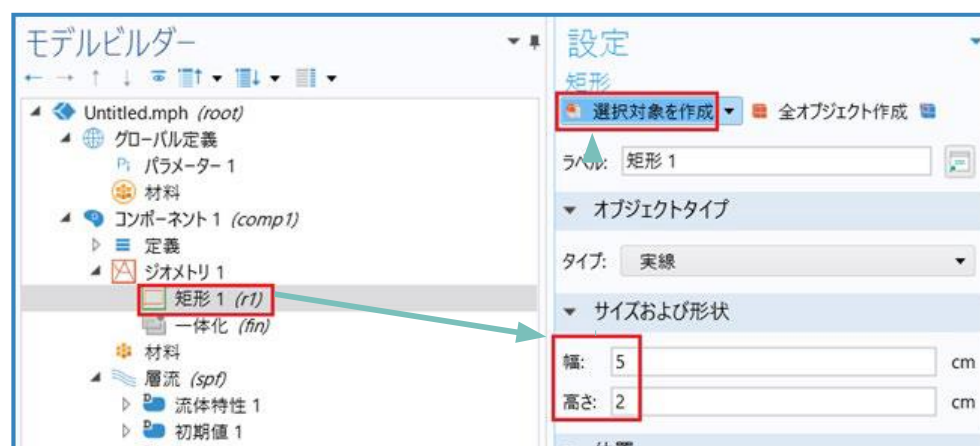
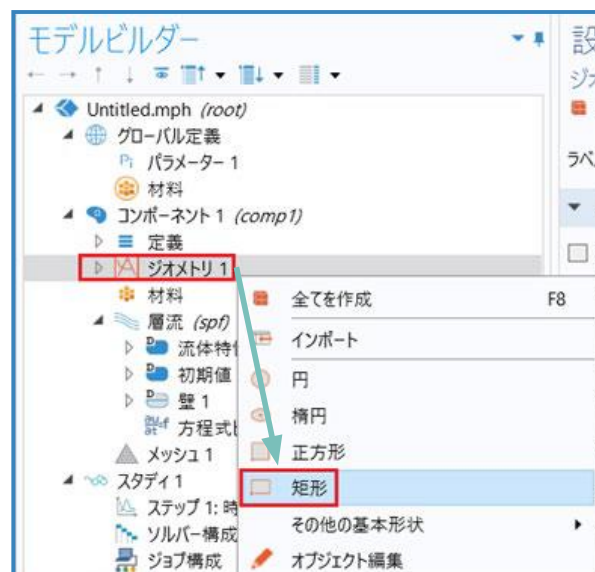
S2. ジオメトリの設定

“コンポーネント>ジオメトリ”において扱う系の図形を設定します。幅が 5cm、高さが 2cm の四角形と長さが 0.4cm の線分を作成します。

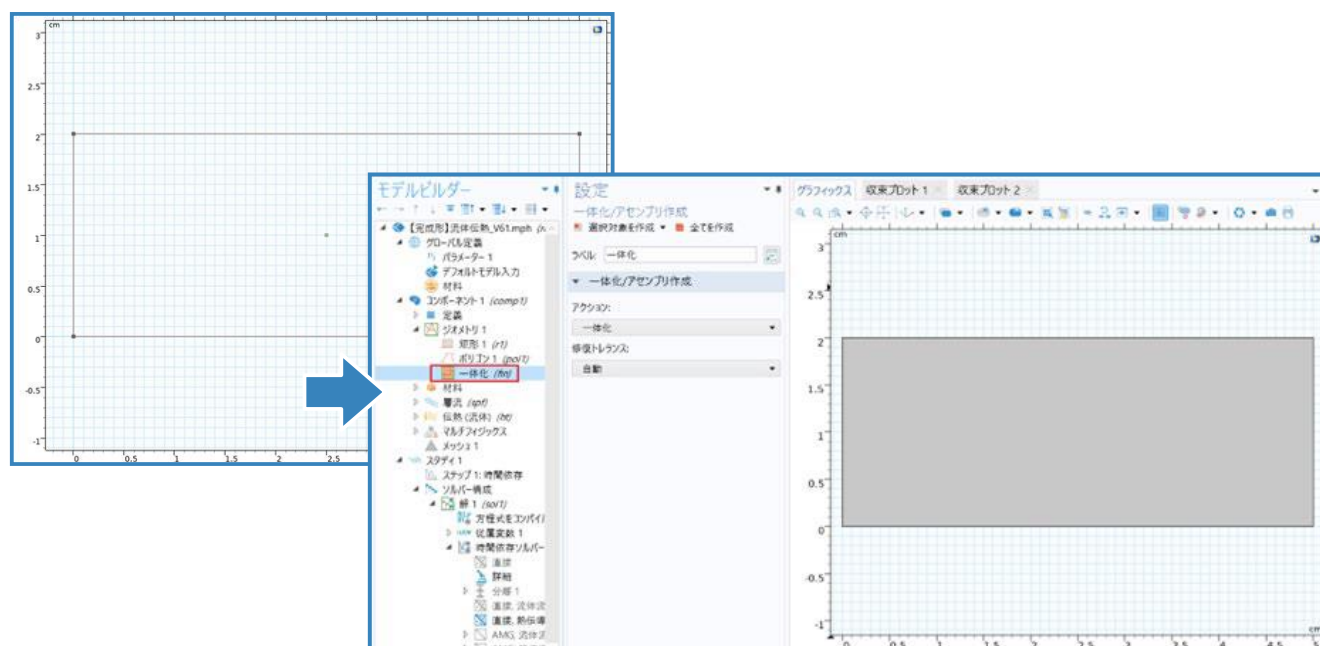
まず、“ジオメトリ”を選択し、単位を cm にします。



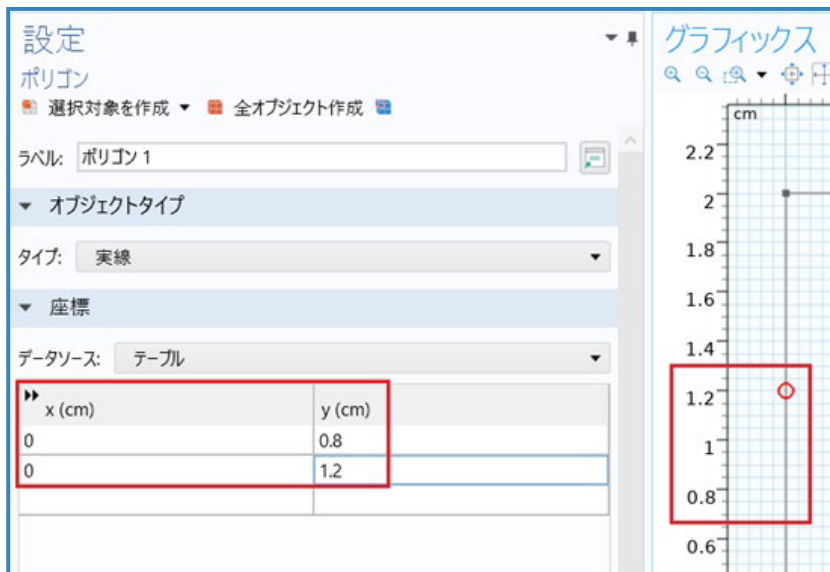
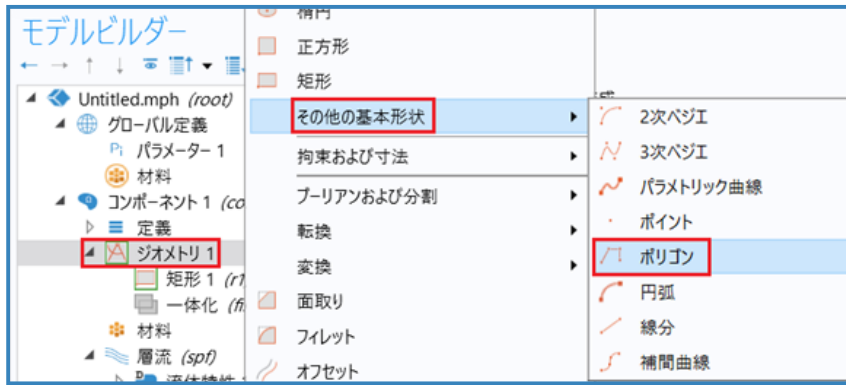
次に“ジオメトリ”を右クリックし、矩形を選択します。“サイズおよび形状”で各長さを設定し、設定画面の上部にある“選択対象を作成”を選択することでグラフィックス上に四角形を作成できます。



曲線だけの表示の場合、最後に“一体化”をクリックすることで、実線表示になります。



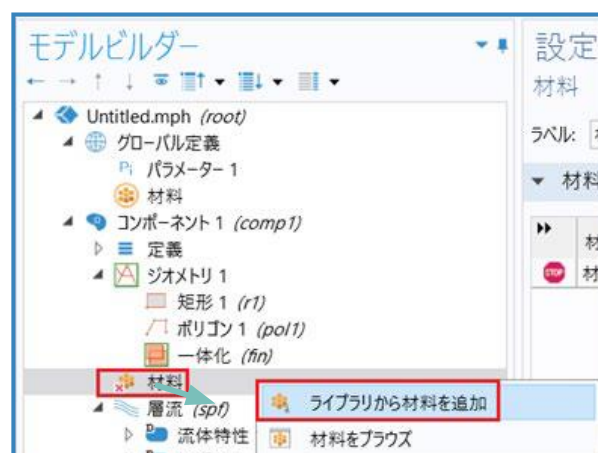
ジオメトリ”を右クリックし、ポリゴンを選択します。座標を $(x,y)=(0,0.8)$ $(0,1.2)$ と設定し、“選択対象を作成”を選択することで線分が四角形の左境界上に作成されます。



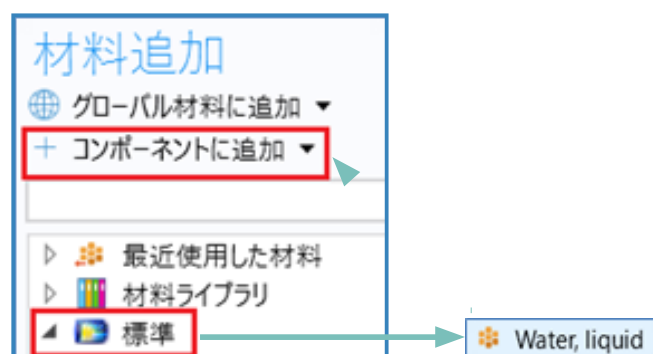
S3. 材料の設定

系内ジオメトリの材料を設定します。

1. “材料” を右クリックして “ライブラリから材料を追加” を選択すると、画面右側に材料の種類が表示されます。COMSOL Multiphysics® の標準的な材料は、“材料ライブラリー” または “標準” にあります。



2. 水（液体）は COMSOL Multiphysics® では water(liquid) と英語で表記されるため、water(liquid) を標準から選択し、“コンポーネントに追加” をクリックすると water(liquid) が材料に追加されます。

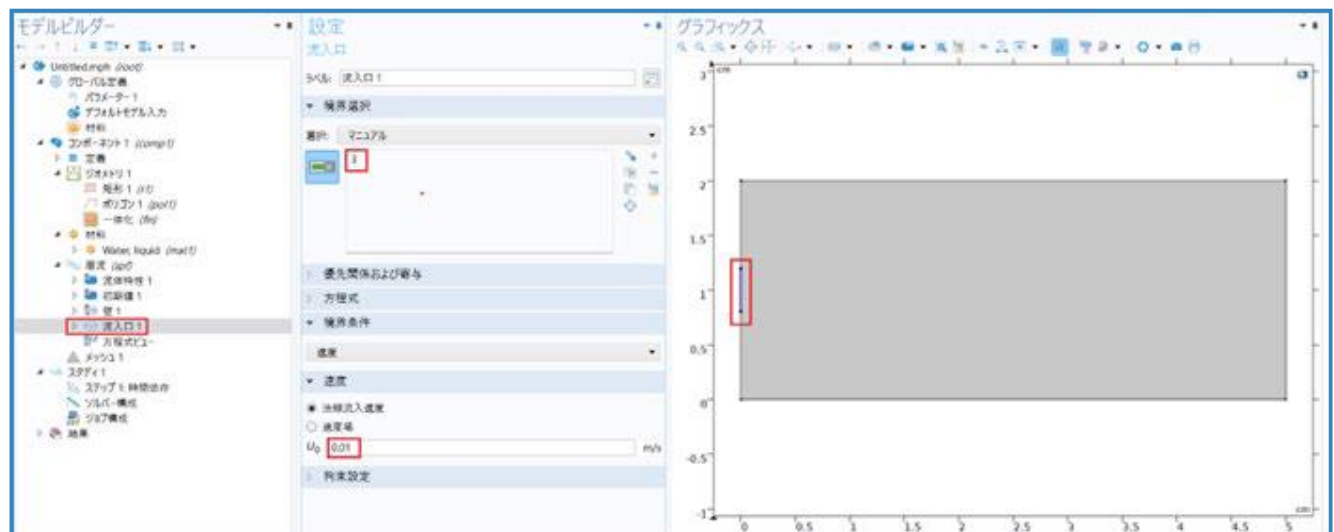


S4. 流入口の設定

層流 (spf) を右クリックして“流入口”を選択します。

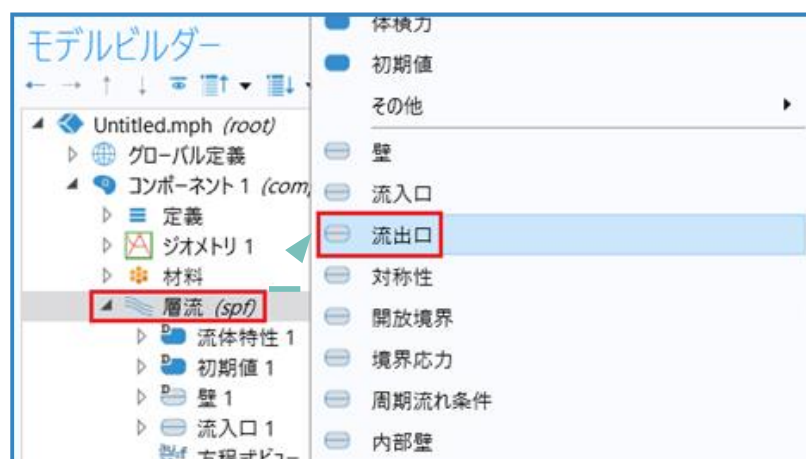


グラフィックス上で境界 3 を選択し、法線流入速度に 0.01 を入力します。

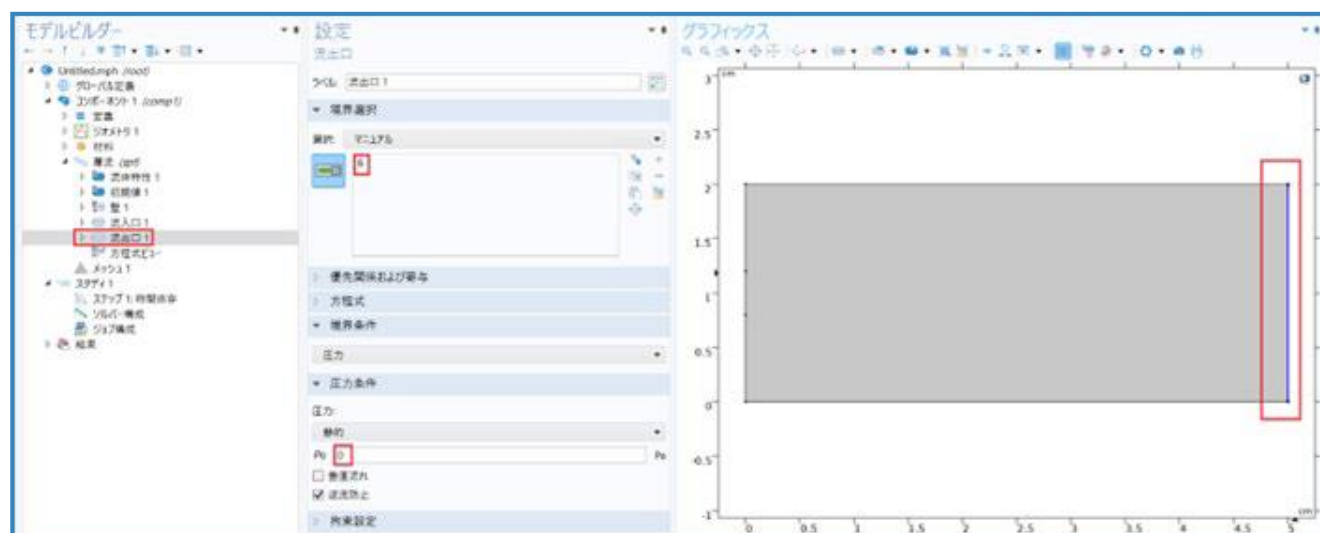


S5. 流出口の設定

層流 (spf) を右クリックして“流出口”を選択します。

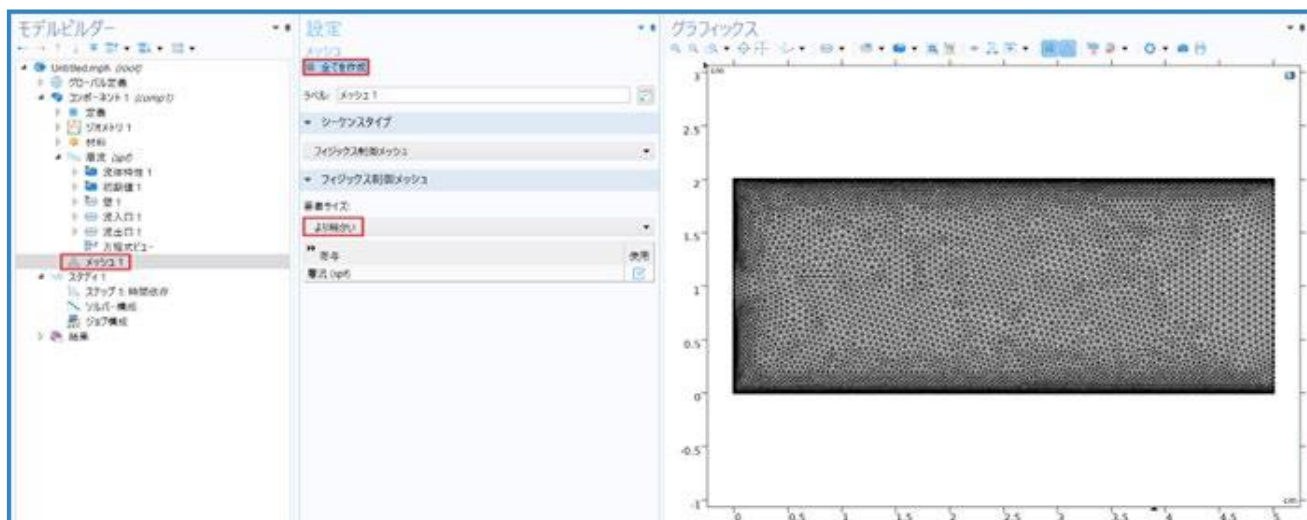


グラフィックス上で境界 6 を選択します。



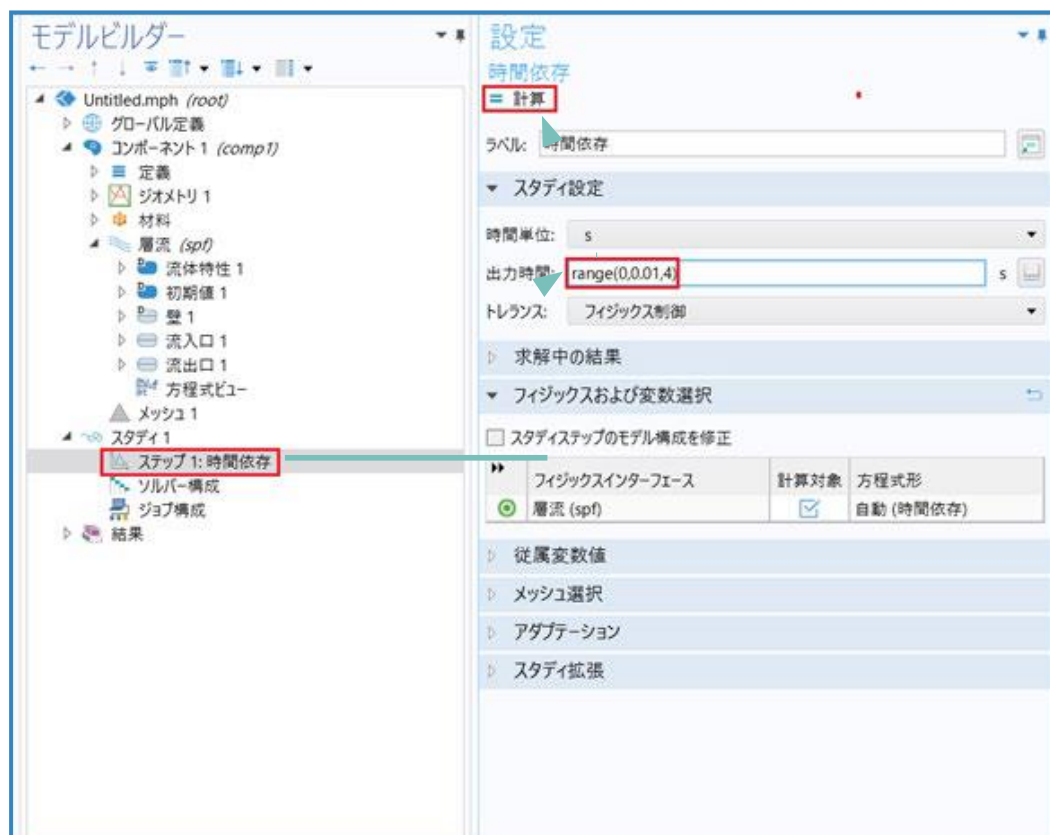
S6. メッシュの設定

計算するために必要なメッシュを作成します。“メッシュ”を選択して、要素サイズを“より細かい”に設定します。“全てを作成”をクリックするとグラフィックにメッシュが作成されます。



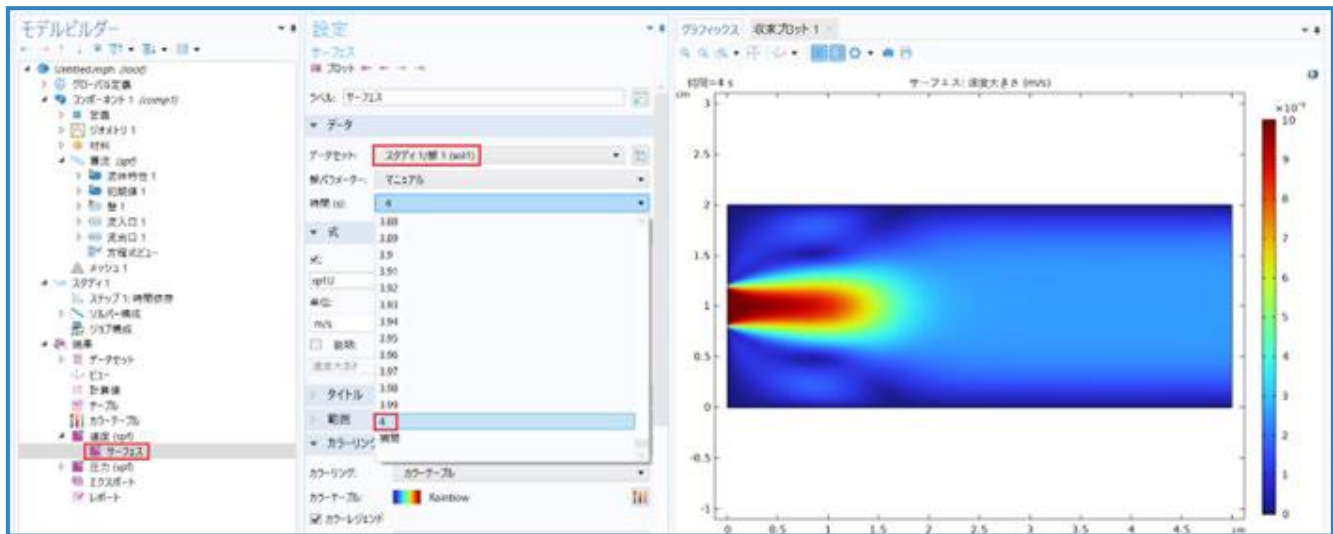
S7. 計算

“スタディ>ステップ 1：時間依存”を選択し、時刻指定を $\text{range}(0,0.01,4)$ と入力します。これは、計算結果の表示用出力間隔を 0.01 秒にして、0～4 秒の時刻を計算するという意味になります。そして“計算”をクリックします。

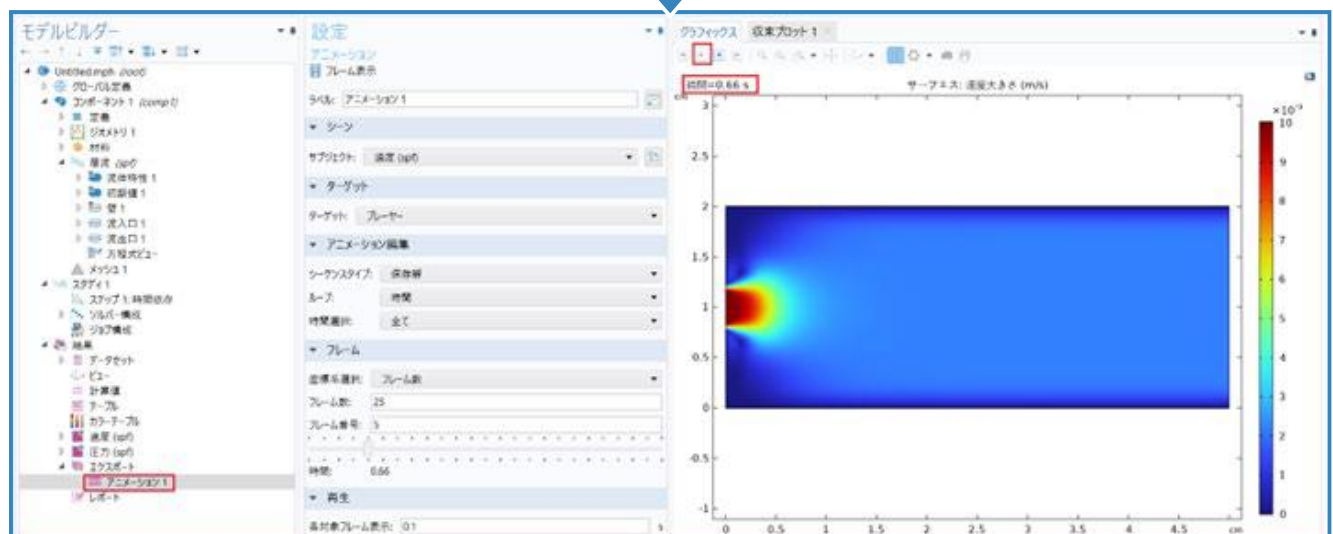
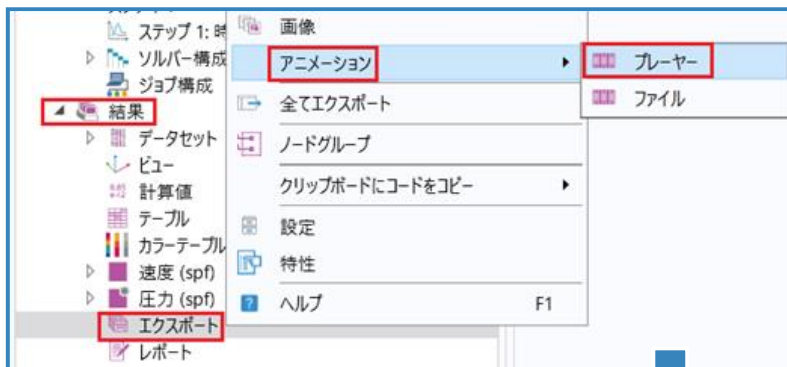


S8. 結果表示

“結果>速度>サーフェス”を選択し、“プロット”を選択すると速度分布が表示されます。ここで、“データセット：スタディ 1/解 1(sol1)”とすると、表示時間を設定することができます。“データセット：親参照”の場合、“結果>速度”で設定されている時刻の結果が表示されることになります。



なお、“結果>エクスポート”を右クリックし、“アニメーション>プレーヤー”において、時間結果のアニメーション表示ができます。



3.2.4 問題の定義と分析（連成設定）

次に、3.2.1 ～ 3.2.3 の流体流れの設定に伝熱の設定を追加し、連成設定を行います。その際の問題の定義と分析を行います。また、その問題の概略図を下の図に示します。

- Q1. 何をしたいか。
A1. 流路に温水を流したときの流体の温度分布を求めたい。（流れは層流とします）
- Q2. どの状態か。
A2. 4 秒後の状態。
- Q3. 扱う管路の形は。（すでに設定済）
A3. 四角形。細い管から流体が入ってくる。（すでに設定済）
- Q4. 流体の材質は。（すでに設定済）
A4. 水（液体）。（すでに設定済）
- Q5. 流入口はどこか。また、流入流体の温度は。
A5. 流入口を左境界線の一部とする。流入流体の温度は 303.15K。
- Q6. 流出口はどこか。
A6. 流出口を右境界全体とする。
- Q7. 流体流れと伝熱の 2 つの現象はどのように作用しあうか。
A7. 流体流れが対流伝熱に影響を与える。

現象：管内に流体を流す（設定済）＋流入流体は温水とする
状態：4 秒後
初期温度：293.15K

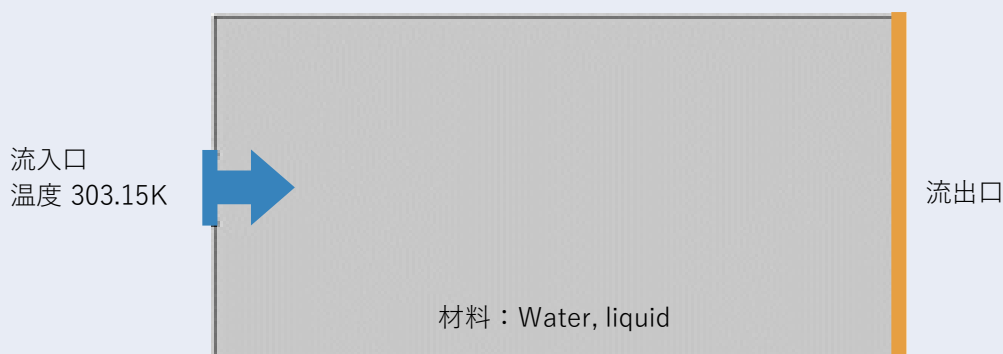


3.2.5 COMSOL Multiphysics® における表現（連成設定）

問題の定義と分析の内容を COMSOL Multiphysics® における表現に置き換えます。各設問において、適切な表現を各一覧表から選びます。一覧表 P(フィジックス) では物理現象、一覧表 S(スタディ) では解析の種類、一覧表 G(ジオメトリ) では図形、一覧表 M(マテリアル) では材料、一覧表 B(境界条件) では境界条件を選択します。

- Q1. 物体に熱を加えた時における現象を解析するには、どのインターフェイスがよいか。
A1. 一覧表 P(フィジックス) から判断し、伝熱 > 伝熱 (流体) が適している。
- Q2. 4 秒後の状態をどのように設定するか。(設定済)
A2. 一覧表 S(スタディ) から判断し、時間依存を設定する。(設定済)
- Q3. 円柱は COMSOL Multiphysics® 上ではどのように表しているか。(設定済)
A3. 一覧表 G(ジオメトリ) から判断し、管路は矩形で表現される。(設定済)
また、流入口はポリゴンで表現される。(設定済)
- Q4. 水 (液体) は COMSOL Multiphysics® 上ではどのように表しているか。(設定済) A4.
一覧表 M(マテリアル) から判断し、水 (液体) は water(liquid) で表現される。(設定済)
- Q5. 流入口の温度を設定するには、どのノードを選ばよいか。
A5. 一覧表 B (境界条件) から判断し、温度を使う。
- Q6. 流出口を設定するには、どのノードを選ばよいか。
A6. 一覧表 B (境界条件) から判断し、流出を使う。
- Q7. 2 つの連成の設定として、どの変数を関連付けするか。
A7. 流体流れで求めた速度 (u, v) を伝熱の解析に反映させる。

現象：流体流れ (設定済) + 伝熱
状態：4 秒後
初期温度：293.15K



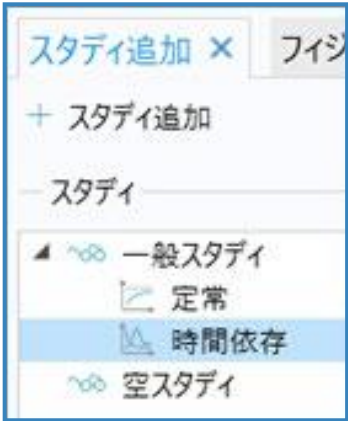
一覧表 P(フィジックス)

フィジックスの追加画面



一覧表 S(スタディ)

スタディの追加画面



一覧表 G(ジオメトリ)

ジオメトリコンテキストメニュー

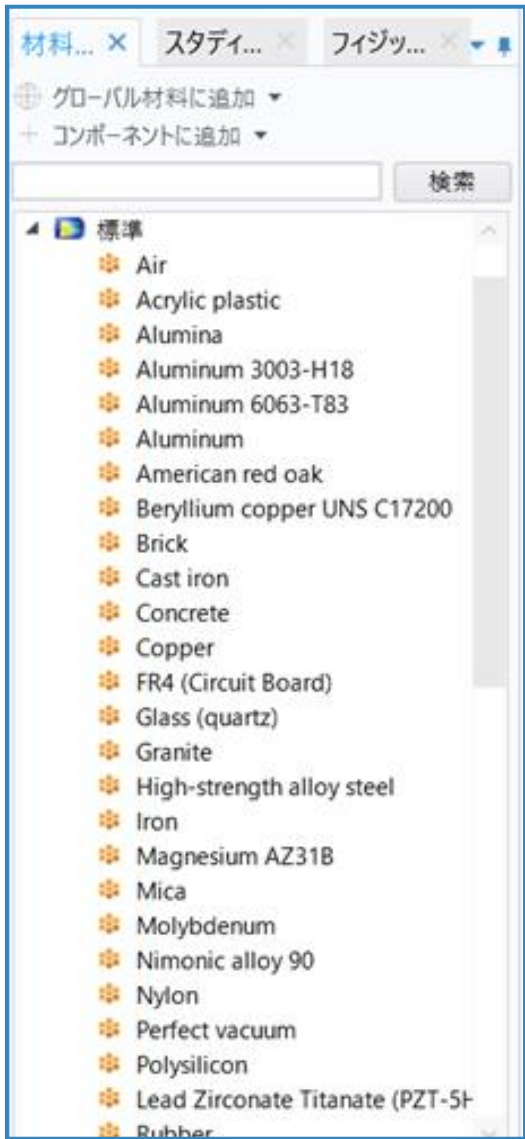


一覧表 M(マテリアル)

材料の追加画面

一覧表 B(境界条件)

フィジックスコンテキストメニュー



3.2.6 COMSOL Multiphysics® における操作

COMSOL Multiphysics® で操作して、問題を解きます。

- S1. フィジックスの追加
コンポーネント 1 を右クリック “フィジックス追加>伝熱 (流体)” を選択
- S2. 流入口の温度の設定
“伝熱 (流体)(ht)” を右クリック “温度” を選択 境界 3 303.15K と入力
- S3. 流出口の設定
“伝熱 (流体)(ht)” を右クリック “流出” を選択 境界 6
- S4. 連成の設定
“伝熱 (流体)(ht)” “流体 1” 速度場：速度場 (spf) に変更
- S5. 計算
“スタディ” の時間依存を選択 時間指定 range(0, 0.01,4) 計算
(時間刻みを 0.01 秒として 0 秒から 4 秒までの計算を行う)

操作手順【流体流れの解析と伝熱の連成解析】

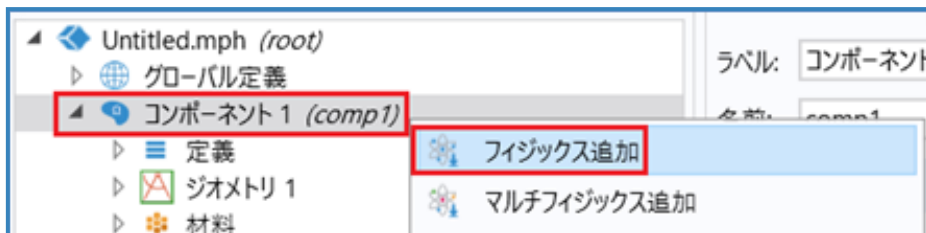
後半の説明：伝熱解析の追加

詳細な操作手順を説明します。

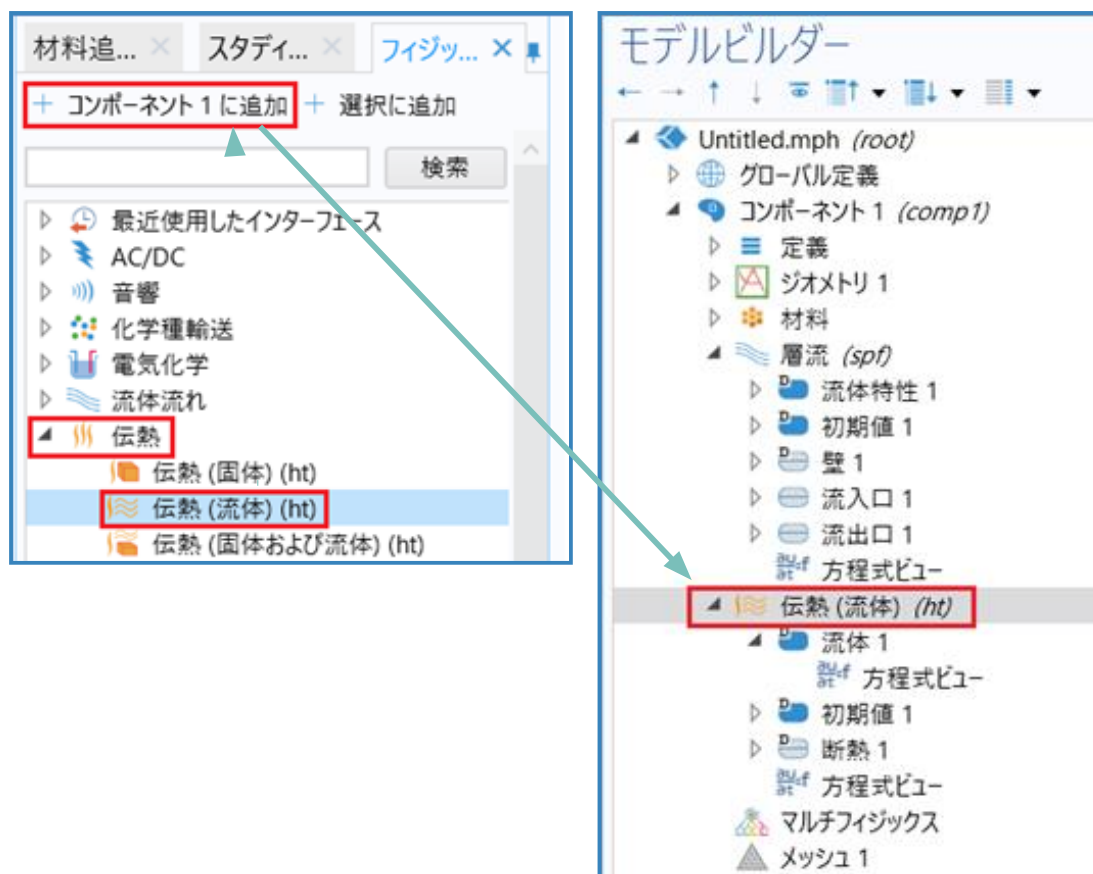
S1. フィジックスの追加

コンポーネント 1 を右クリックし、“フィジックス追加>伝熱（流体）”を選択すると、画面右側にフィジックスを追加する項目が表示されます。その中で、伝熱（流体）(ht) を選択して、フィジックスに追加します。

フィジックス追加



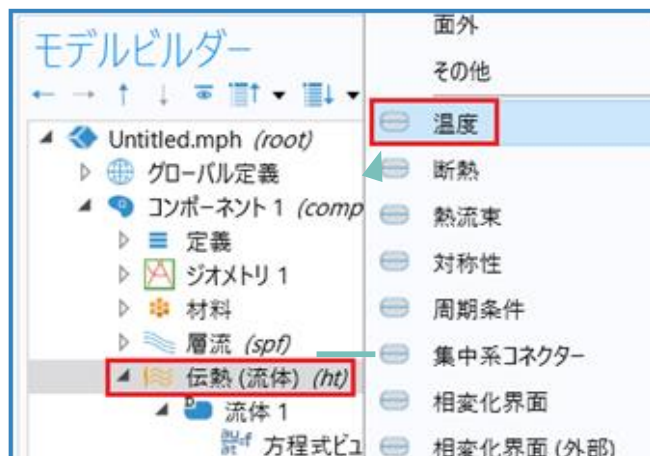
コンポーネントに追加



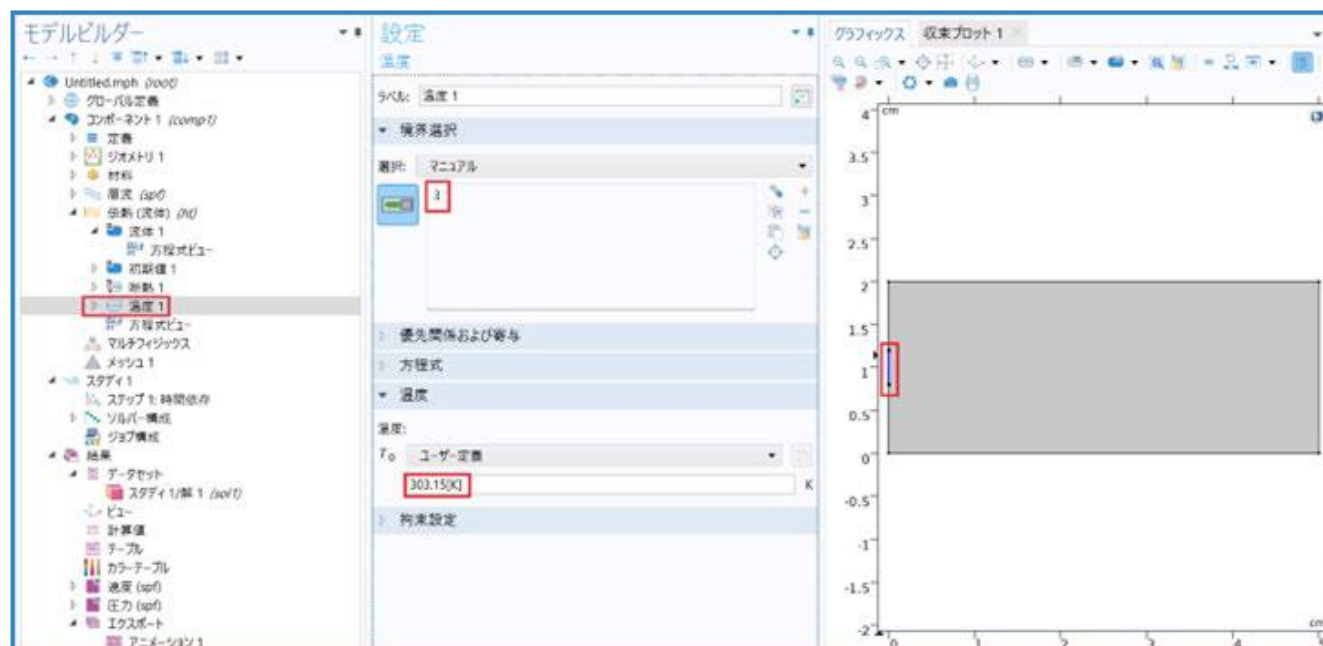
S2. 流入口の温度の設定

“伝熱 (流体) (ht)” を右クリックして “温度” を選択し、流入口となる境界を選択します。

温度の入力

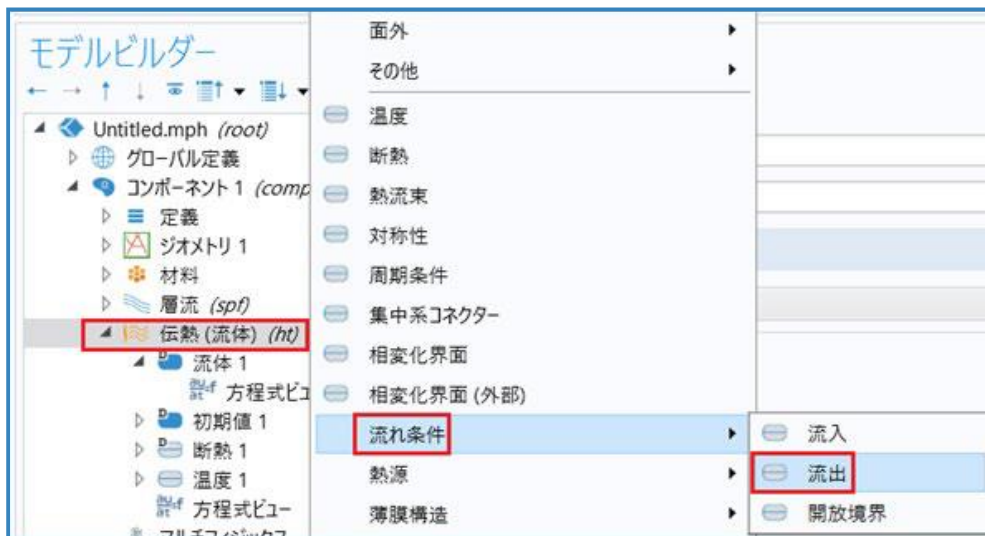


温度の欄に 303.15K と入力します。

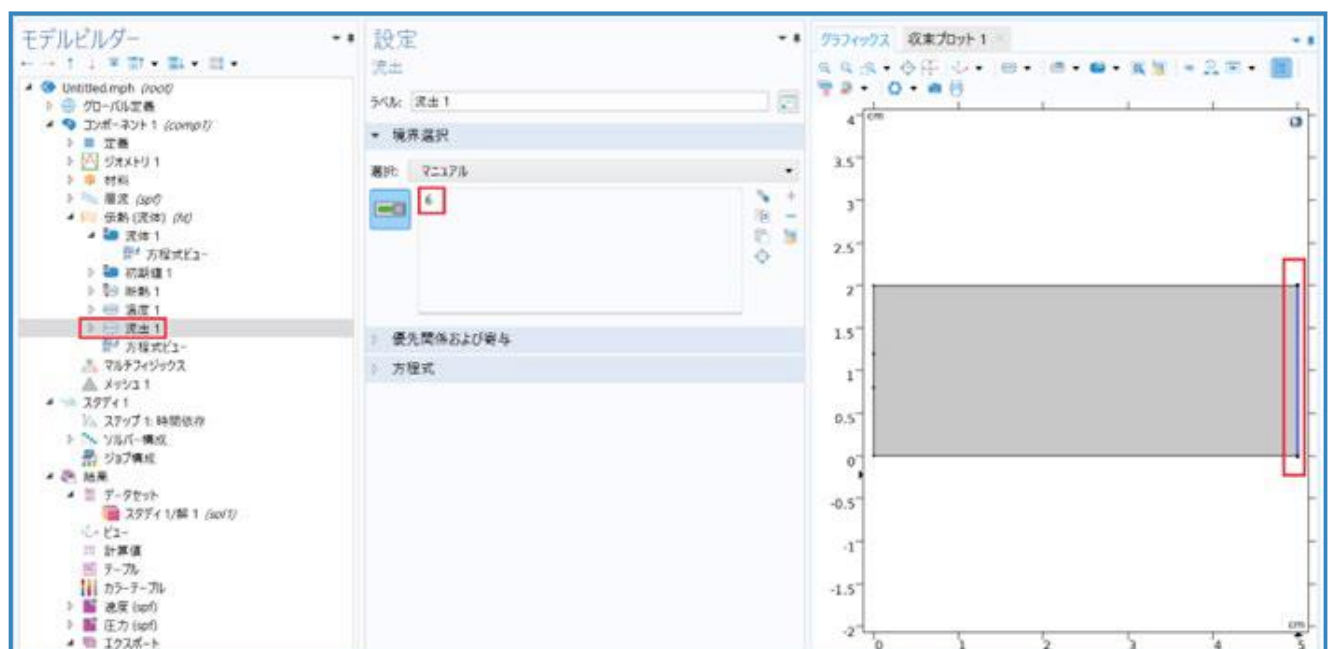


S3. 流出口の設定

“伝熱 (流体) (ht)” を右クリックして流れ条件 > “流出” を選択します。

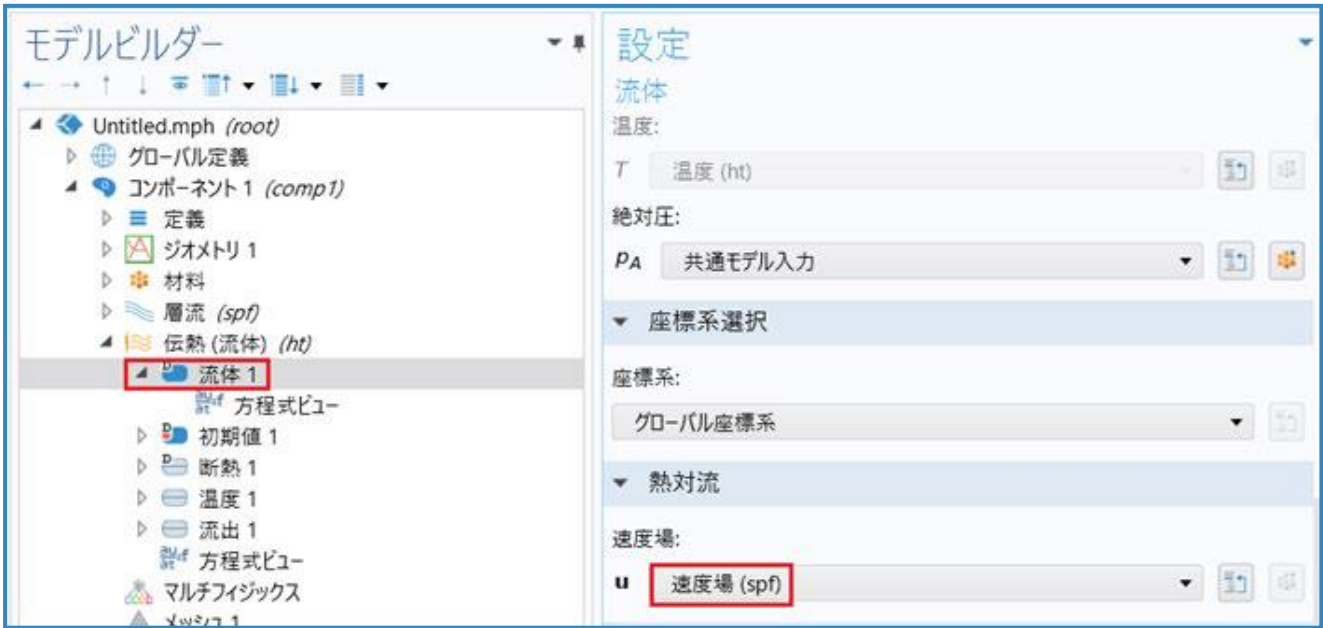


グラフィックス上で境界 6 を選択します。



S4. 連成の設定

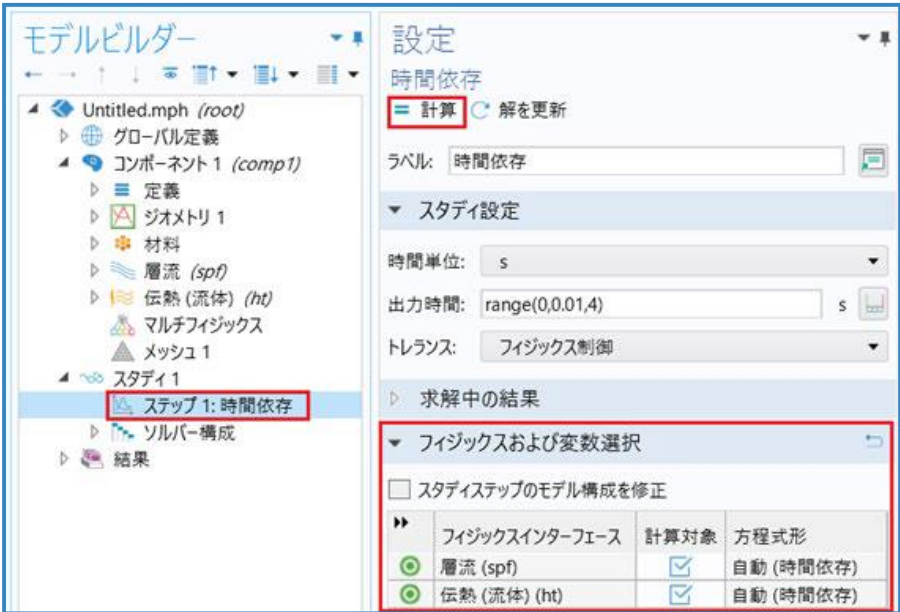
“伝熱（流体）(ht)”の“流体 1”を選択し、速度場：速度場 (spf) に変更します。次に、2 つのフィジックスがどの変数をもって相互作用を起こしているかを考えます。層流 (spf) において速度場 (u, v) を従属変数として解析しており、速度場 (u, v) を伝熱の計算に組み込む設定を行います。このように、変数をフィジックス間で関連付けることによって連成が可能になります。



S5. 計算

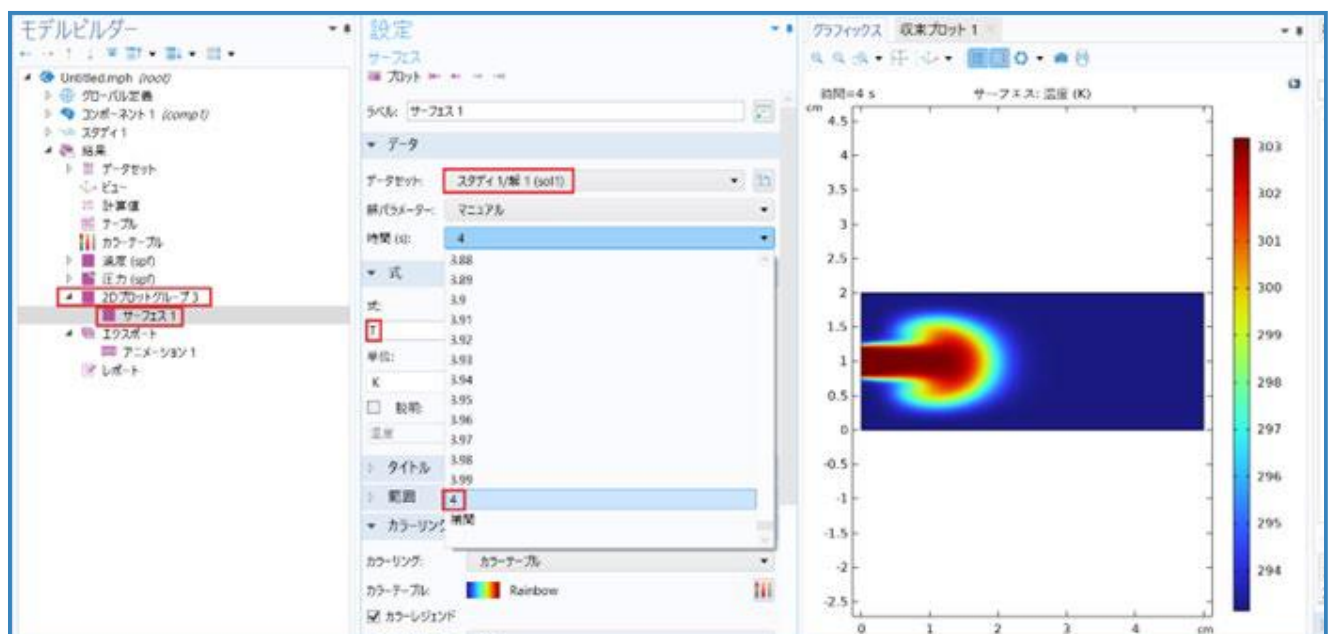
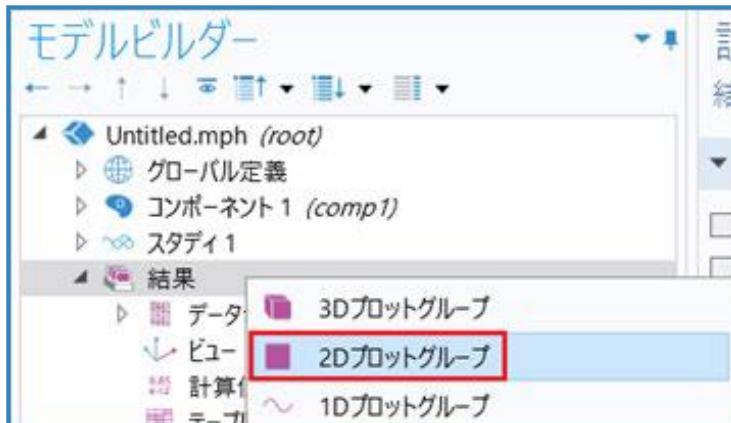
“スタディ>ステップ 1：時間依存”を選択し、時刻指定を前半と同じ設定とします。“フィジックスおよび変数選択”セクションにおいて、フィジックスインターフェース：層流 (spf) および伝熱（流体）を計算対象とします。(☑ マークを入れる)そして“計算”をクリックします。変数を手動で関連付けた場合を計算します。

(変数手動：熱流体 Step2-S5 (変数手動)_V60.mph)



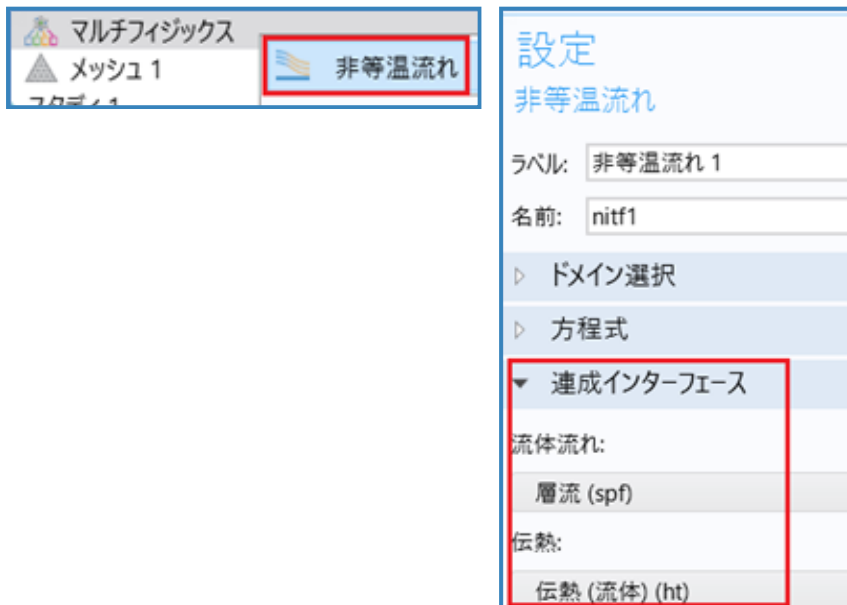
S6. 結果表示

“結果”を右クリックして“2Dプロットグループ”を選択します。次に、“2Dプロットグループ”を右クリックして“サーフェス”を選択します。ここで、“データセット：スタディ1／解1(sol1)”とすると表示時間を設定することができ、“最後”を選択します。そして、式に“T”を入力し、“プロット”を選択すると温度分布が表示されます。この結果は変数を手動で関連付けた場合の結果になります。マルチフィジックス機能を利用した場合、ソルバーの設定変更が必要になりますので、後述します。

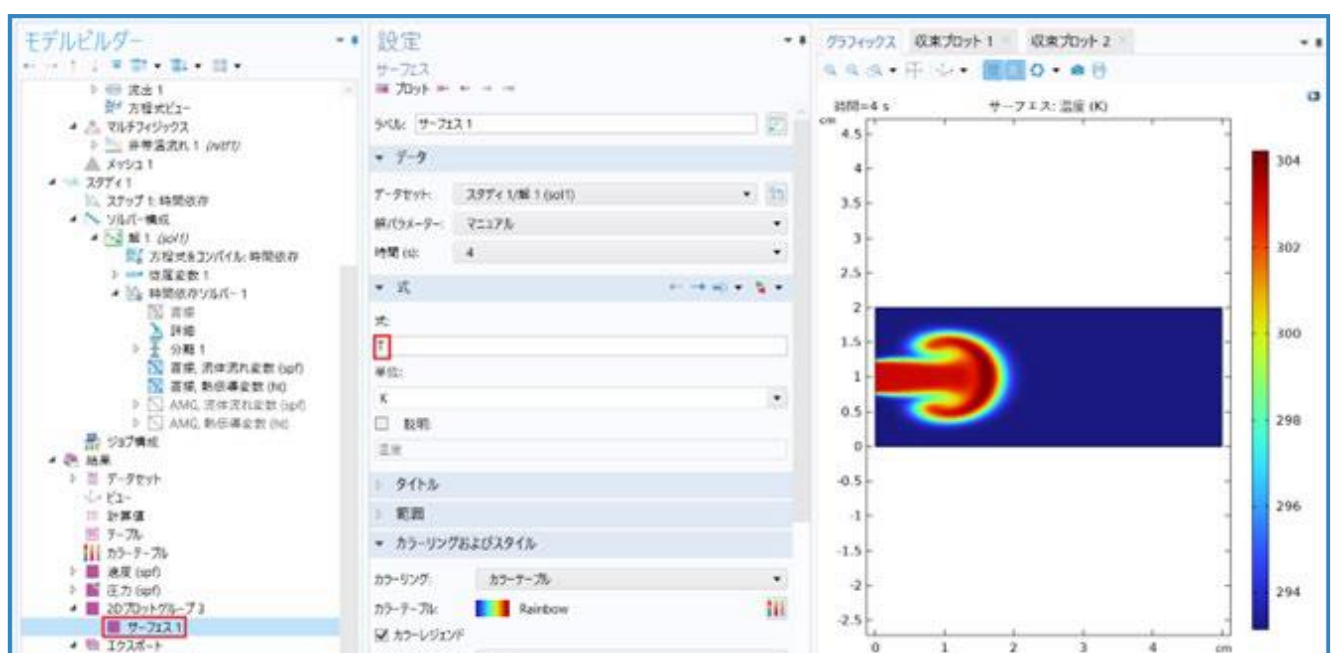
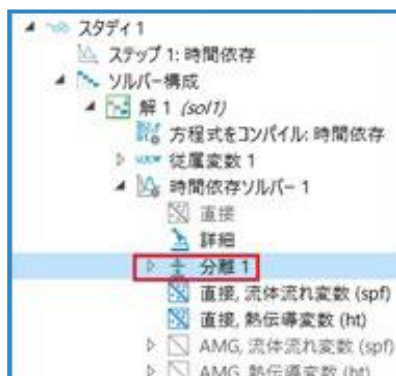


※マルチフィジックス機能に関して

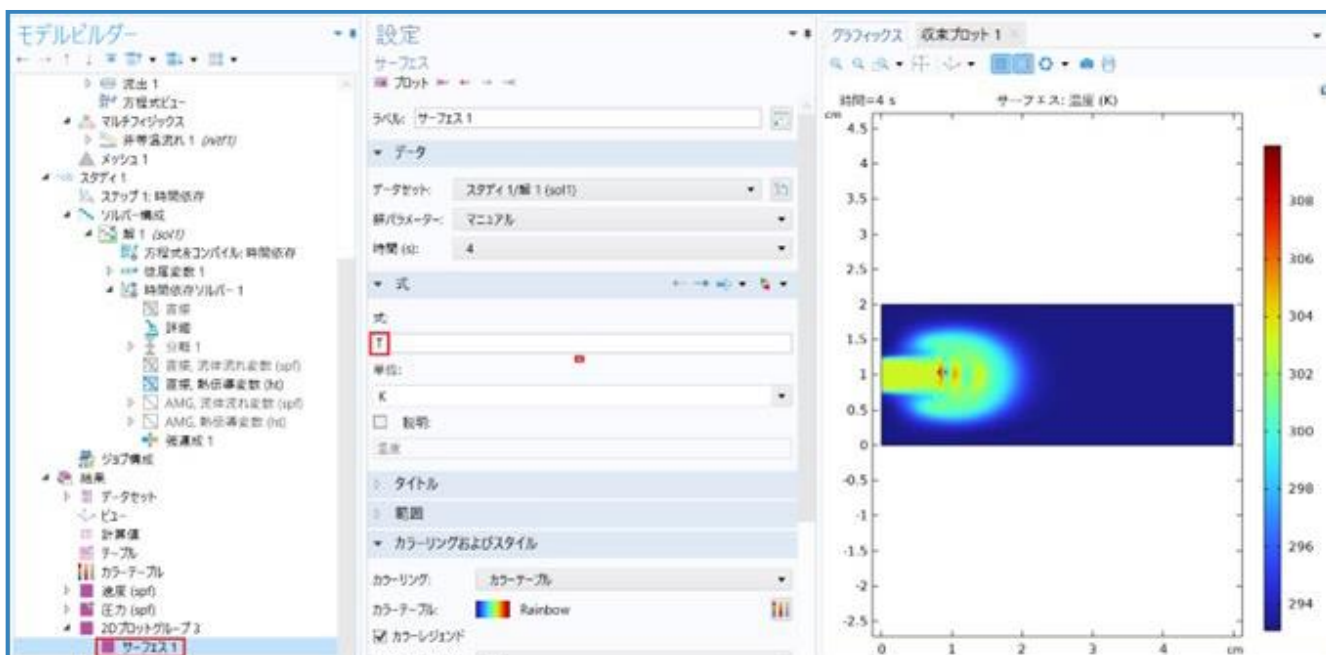
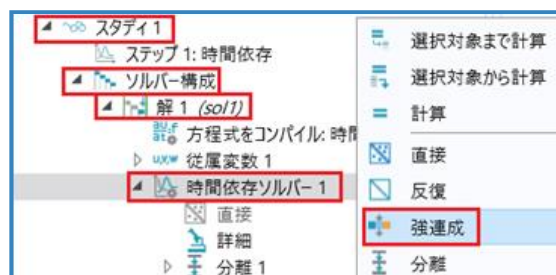
層流と伝熱のインターフェイスを設定した場合、“マルチフィジックス”が表示され、“マルチフィジックス”を右クリックすると、連成設定が表示され、ここからも連成の設定が可能になります。例えば、“流れカップリング”を選択すると層流 (spf) の流体速度が伝熱 (ht) の流体速度の値と一致する設定が自動的に行われます。



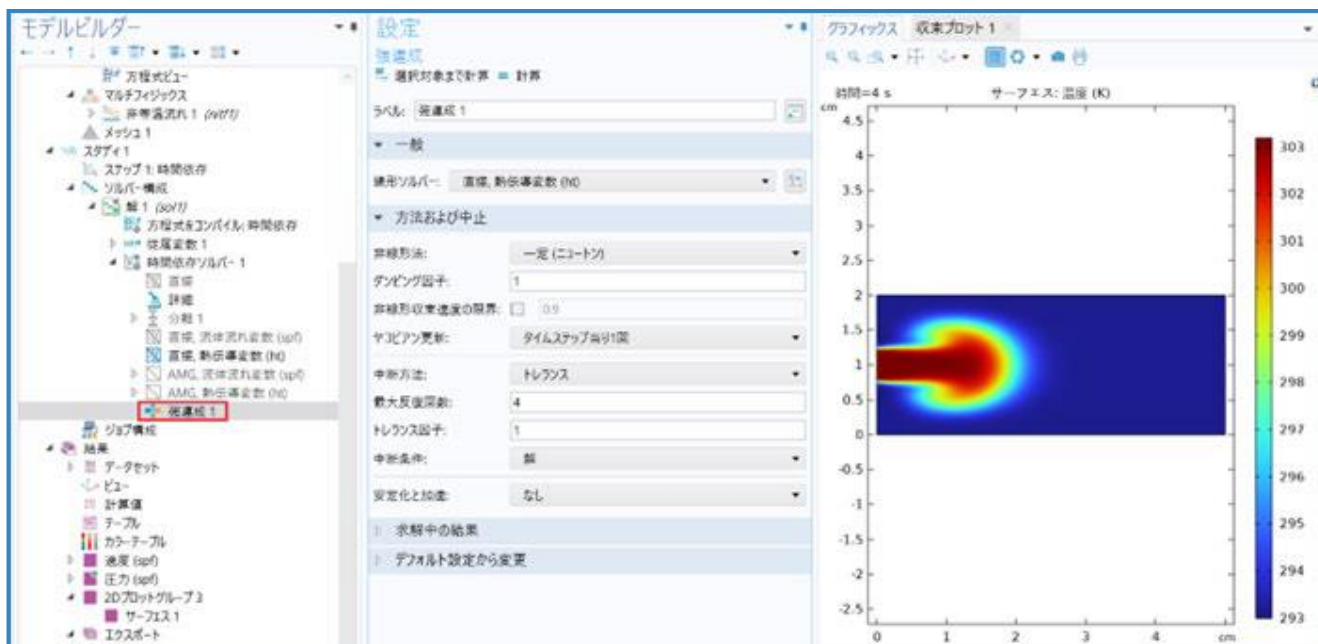
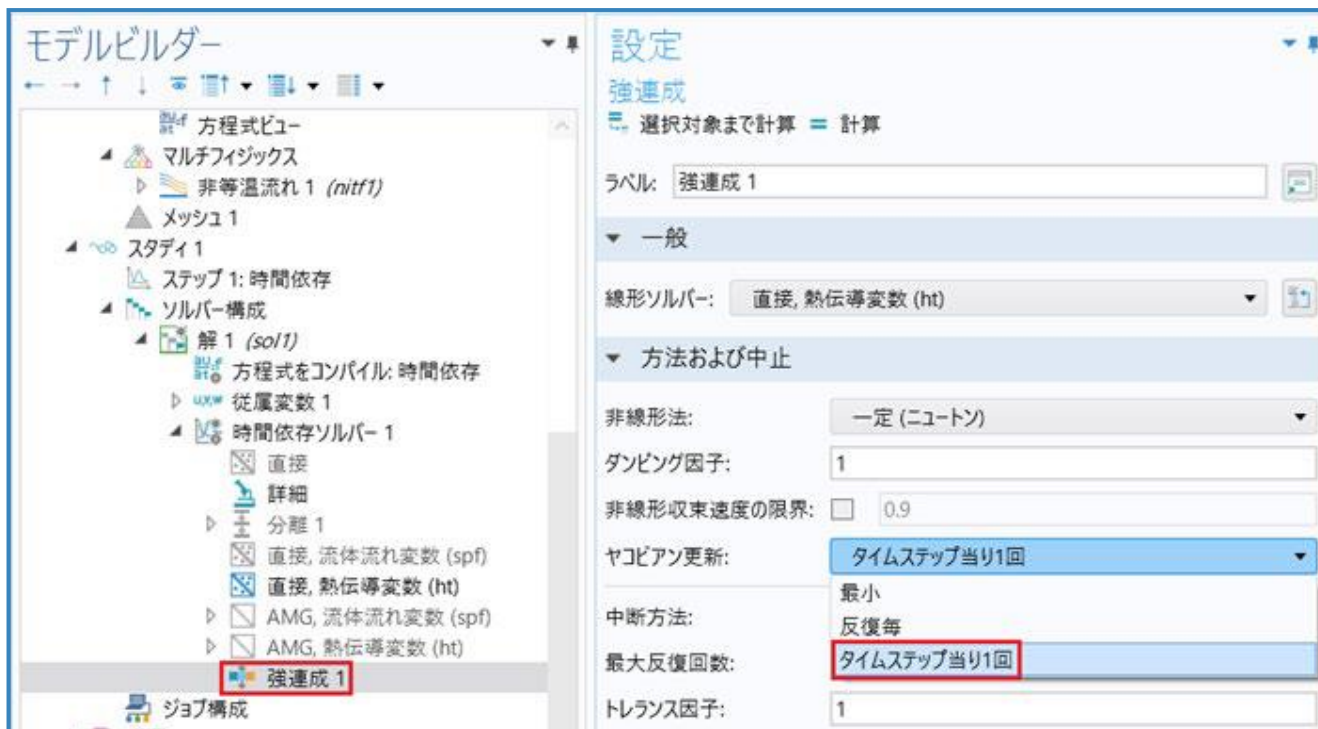
この時ソルバーは自動的に分離ソルバーが選択され、温度分布の結果は手動で関連付けを行った場合と異なります。



そこで、強連成ノードを追加し、再度計算してみると、今度は下図のような結果となります。



この場合、設定ウィンドウ>方法及び中止セクションのヤコビアン更新を「タイムステップ当り 1 回」に変更することで、手動で関連付けを行った場合の温度分布に近づきます。



連成解析の自由課題【固体の伝熱と熱膨張の連成解析】自習用

～伝熱と固体力学の連成問題を解いてみましょう～

※操作手順後半の説明中の熱膨張機能は構造力学モジュールが必要です。

3.3 固体の伝熱と熱膨張の連成解析

それでは、実践演習を行ってみましょう。こちらは伝熱と固体力学の連成モデルの解析であり、固体の温度上昇に伴い、加熱部分が膨張する現象を解析していきます。

※このモデルでは構造力学モジュールが必要となります。

3.3.1 伝熱問題の定義と分析

3.3.2 伝熱問題の COMSOL Multiphysics® における表現

3.3.3 伝熱問題の COMSOL Multiphysics® における操作

3.3.4 連成の方法

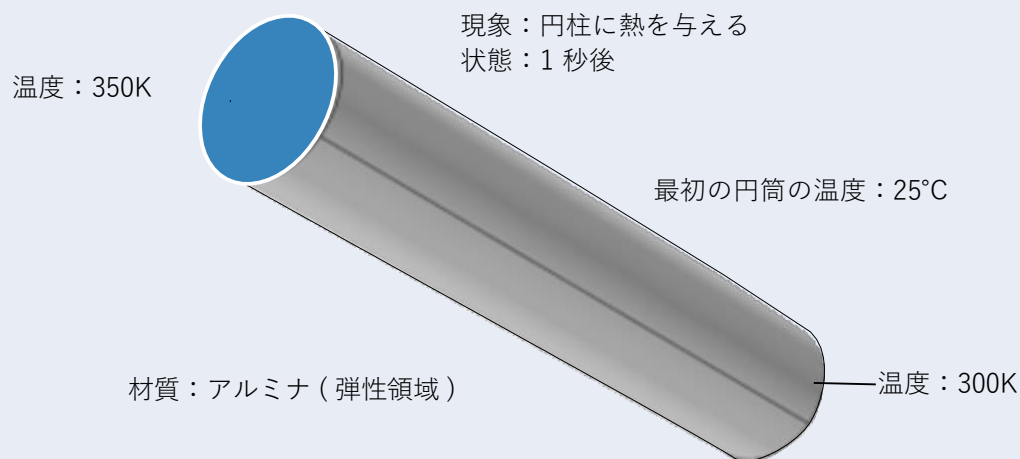
まず、3.3.1 において「問題の定義と分析」を読んで把握した後、3.3.2 および 3.3.3 を読む前に一旦、問題の「COMSOL Multiphysics における表現」を自分なり考えた後に、答え合わせする形で 3.3.2 および 3.3.3 を読むと考える力が付きますのでお勧めします。

3.3.1 問題の定義と分析

初めに、問題を定義していきます。連成の例として、物体の伝熱とそれによる熱膨張を定義する場合の手順を説明します。また、その問題の概略図を下の図に示します。

(3.3.1 ～ 3.3.3 では伝熱の設定のみ行い、熱膨張に関する設定は 3.3.4 に行います。)

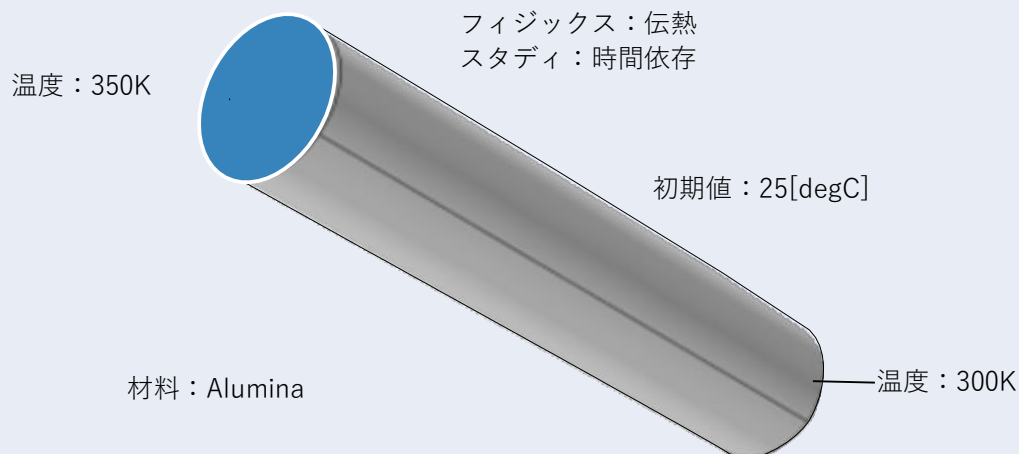
- Q1. 何をしたいか。
A1. 物体に熱を加えた時の物体内の温度分布を見たい。
- Q2. どの状態か。
A2. 1 秒後の状態。
- Q3. 扱う固体の形は。
A3. 円柱。
- Q4. 固体の材質は。
A4. アルミナで弾性領域。
- Q5. 最初の円筒の温度は何 K か。
A5. 全体が 25°C。
- Q6. どのように熱を加えるか。
A6. 上面温度を 350K で一定とする。
また、反対側の底面を 300K で一定とする。



3.3.2 COMSOL Multiphysics® における表現

問題の定義と分析の内容を COMSOL Multiphysics® における表現に置き換えます。各設問において、適切な表現を各一覧表から選びます。一覧表 P(フィジックス) では物理現象、一覧表 S(スタディ) では解析の種類、一覧表 G(ジオメトリ) では図形、一覧表 M(マテリアル) では材料、一覧表 B(境界条件) では境界条件を選択します。

- Q1. 物体に熱を加えた時における現象を解析するには、どのインターフェイスがよいか。
A1. 一覧表 P(フィジックス) から判断し、伝熱(固体) が適している。
- Q2. 1 秒後の状態をどのように設定するか。
A2. 一覧表 S(スタディ) から判断し、時間依存を設定する。
- Q3. 円柱は COMSOL Multiphysics 上ではどのように表しているか。
A3. 一覧表 G(ジオメトリ) から判断し、円柱は円筒で表現される。
- Q4. アルミナ(弾性領域) は COMSOL Multiphysics 上ではどのように表しているか。
A4. 一覧表 M(マテリアル) から判断し、円柱は Alumina で表現される。
- Q5. 初期温度を設定するには、どのノードを選べばよいか。
A5. 一覧表 B(境界条件) から判断し、初期値を使う。
- Q6. 端面の温度を設定するには、どのノードを選べばよいか。
A6. 一覧表 B(境界条件) から判断し、温度を使う。



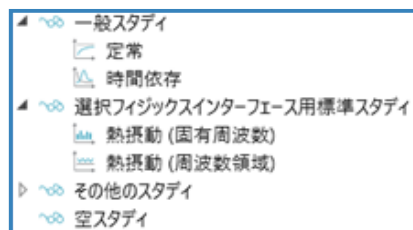
一覧表 P (フィジックス)

フィジックスの追加画面



一覧表 S (スタディ)

スタディの追加画面



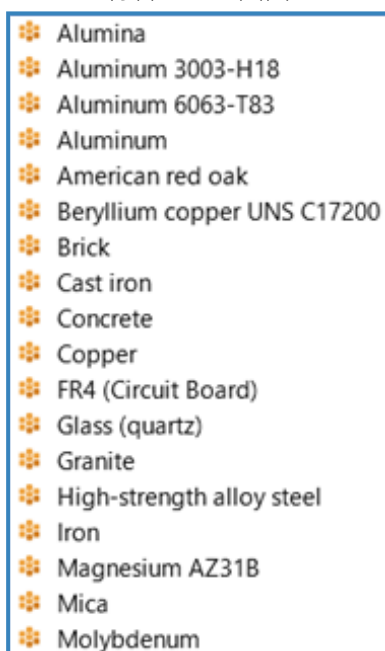
一覧表 G (ジオメトリ)

ジオメトリコンテキストメニュー



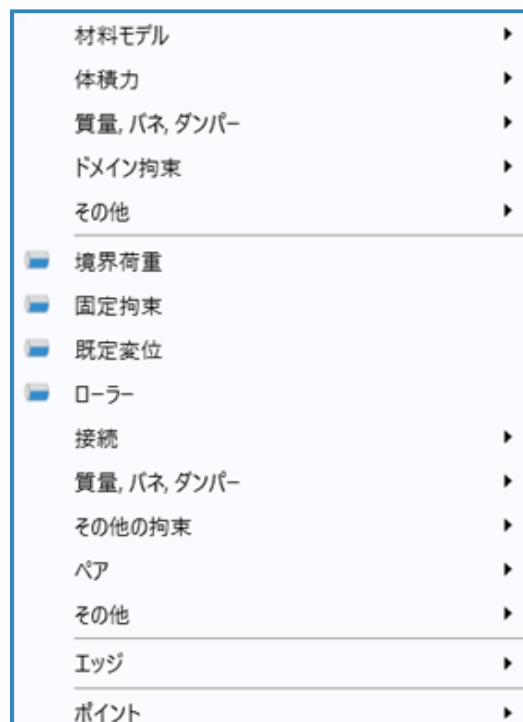
一覧表 M (マテリアル)

材料の追加画面



一覧表 B (境界条件)

フィジックスコンテキストメニュー



3.3.3 COMSOL Multiphysics® における操作

COMSOL Multiphysics® で操作して、問題を解きます。

- S1. 初期設定において、固体力学を設定（円筒を用いるので 3 次元）
“空間次元”：3D “フィジックス”：伝熱（固体）追加 “スタディ”：時間依存 完了
- S2. ブロックの設定
“ジオメトリ”を右クリック 円筒 半径 10[mm] 高さ 100[mm] を入力 選択対象作成
- S3. 材質の設定
“材料”を右クリック 材料追加 Alumina をダブルクリック
- S4. 初期温度の設定
“伝熱（固体）” “初期値” 初期温度を設定 25[degC] と入力）
- S5. 温度の設定
“伝熱（固体）”を右クリック “温度”を選択 350[K] と入力上面を選択（説明では境界 4 を選択）
“伝熱（固体）”を右クリック “温度”を選択 300[K] と入力底面を選択（説明では境界 3 を選択）
- S6. メッシュ
“メッシュ選択” “より細かい”
- S7. 計算
“スタディ”の時間依存を選択 時間指定 range(0, 0.1,1) 計算（時間刻みを 0.1 秒として 0 秒から 1 秒までの計算を行う）

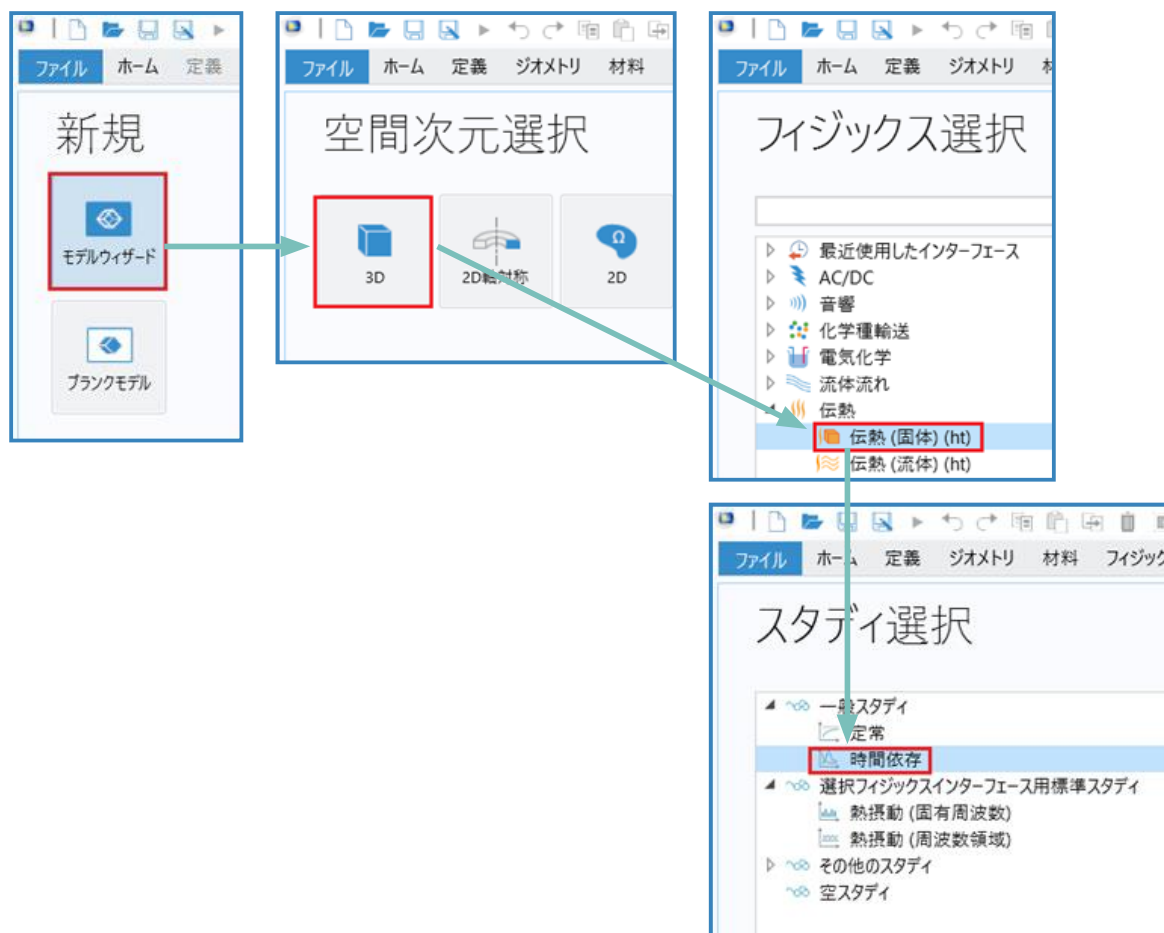
操作手順【固体の伝熱と熱膨張の連成解析】

前半の説明：伝熱解析

詳細な操作手順を説明します。

S1. 初期設定において、伝熱を設定（円筒を用いるので 3 次元）

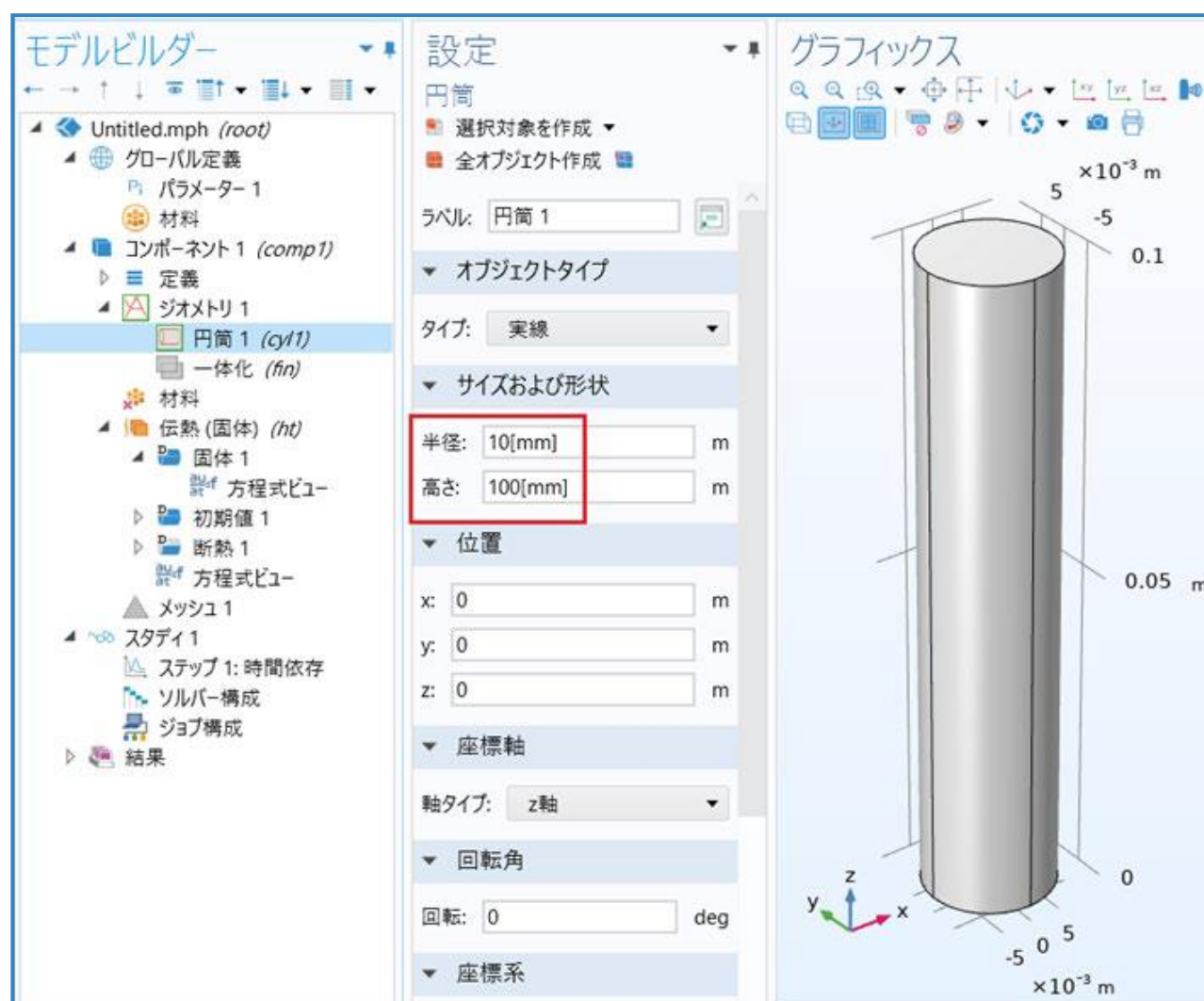
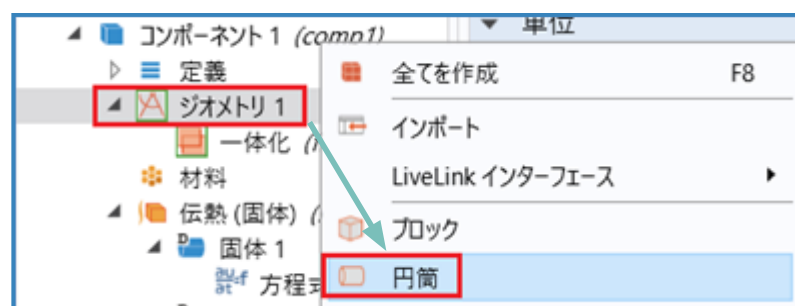
2.2 を参照してください。“空間次元”は 3D、“フィジックス”は伝熱（固体）、“スタディ”は時間依存を設定します。



S2. 円筒の設定

“コンポーネント>ジオメトリ”において扱う系の図形を設定します。半径が 10[mm] の円形断面で、高さが 100[mm] の円筒を作成します。

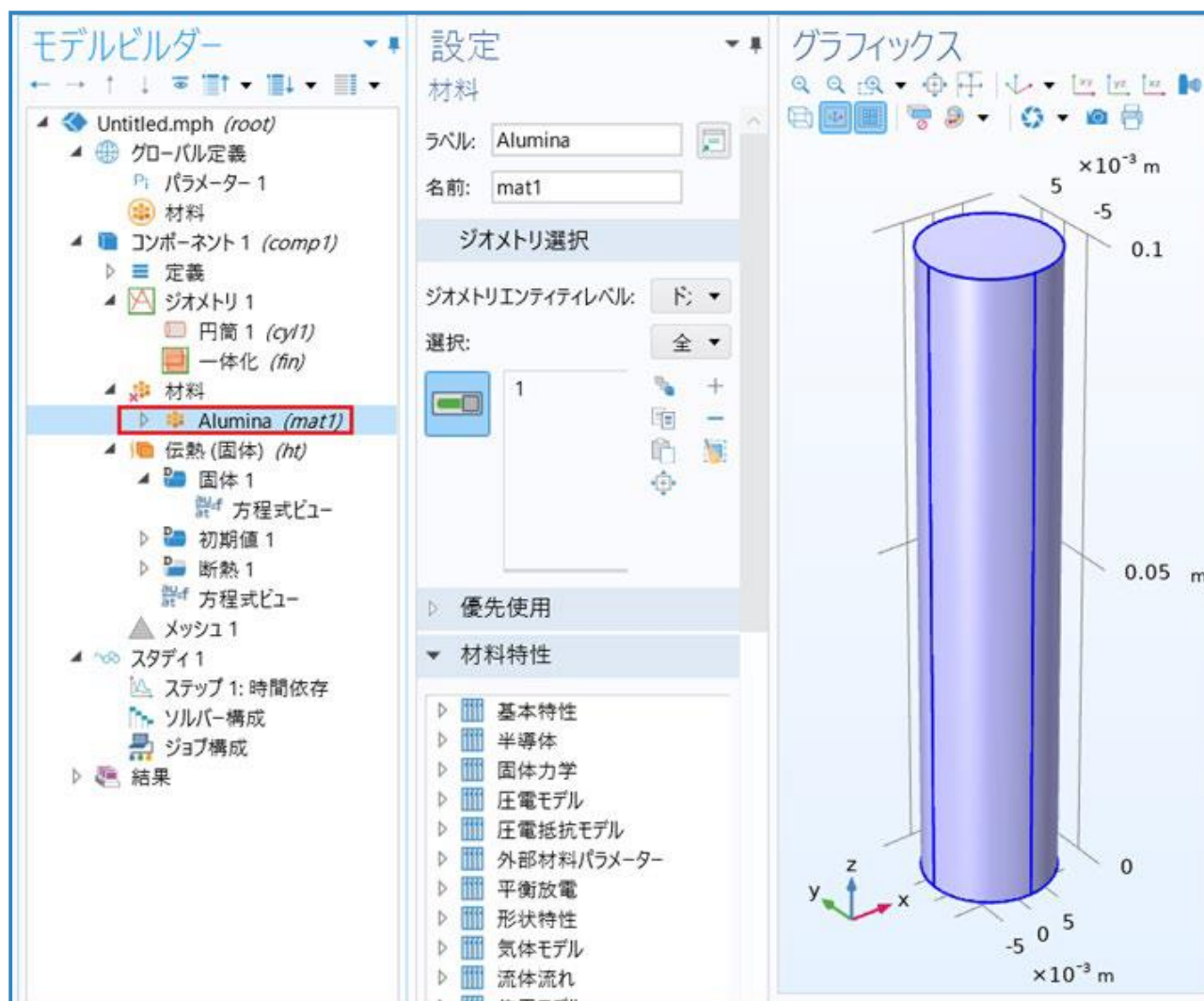
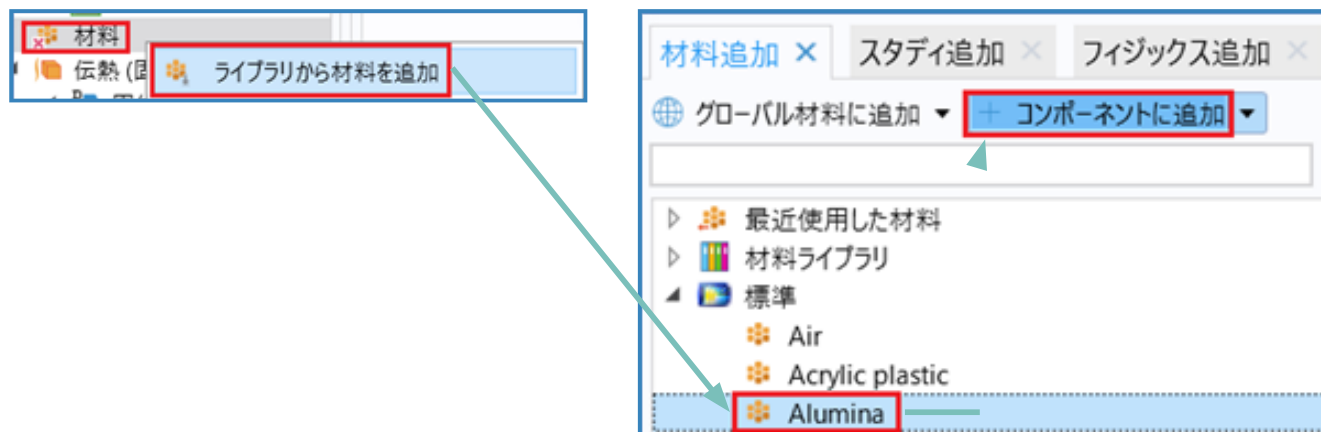
“ジオメトリ”を右クリックし、円筒を選択します。サイズで各長さを設定し、設定画面の上部にある“全オブジェクト作成”を選択することでグラフィックス上に直方体を作成できます。今回は、単位が mm であるため、数字のあとに [mm] を追加して、単位を変換します。



S3. 材料の設定

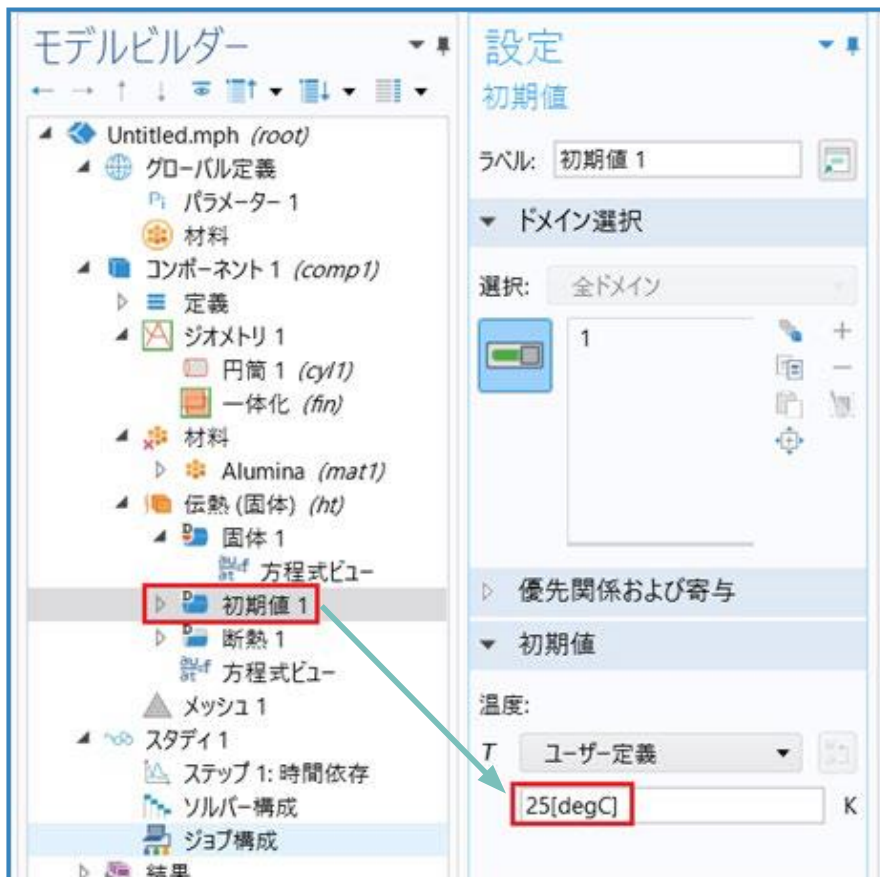
系内ジオメトリの材料を設定します。(熱膨張 Step1-S3_V60.mph)

1. “材料” を右クリックして “ライブラリから材料を追加” を選択すると、画面右側に材料の種類が表示されます。COMSOL Multiphysics® の標準的な材料は、「標準」から選択できます。材料ライブラリーはオプションの追加モジュールです。
2. アルミナはCOMSOL Multiphysics® では Alumina と英語で表記されるため、Alumina を標準から選択し、ダブルクリックまたは “コンポーネントに追加” をクリックすると Alumina が材料に追加されます。



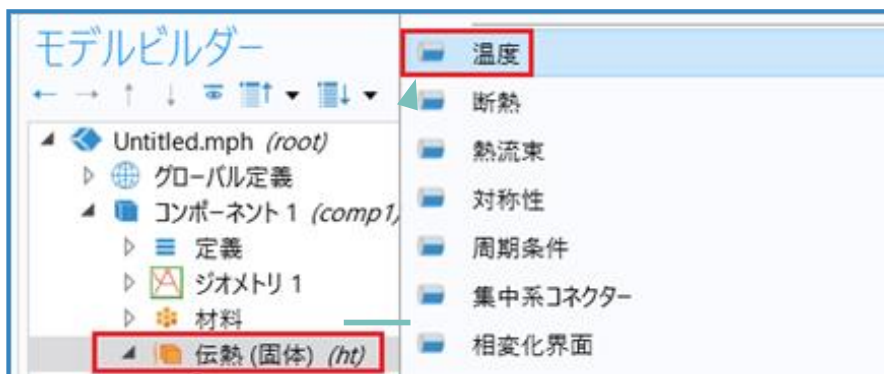
S4. 初期温度の設定

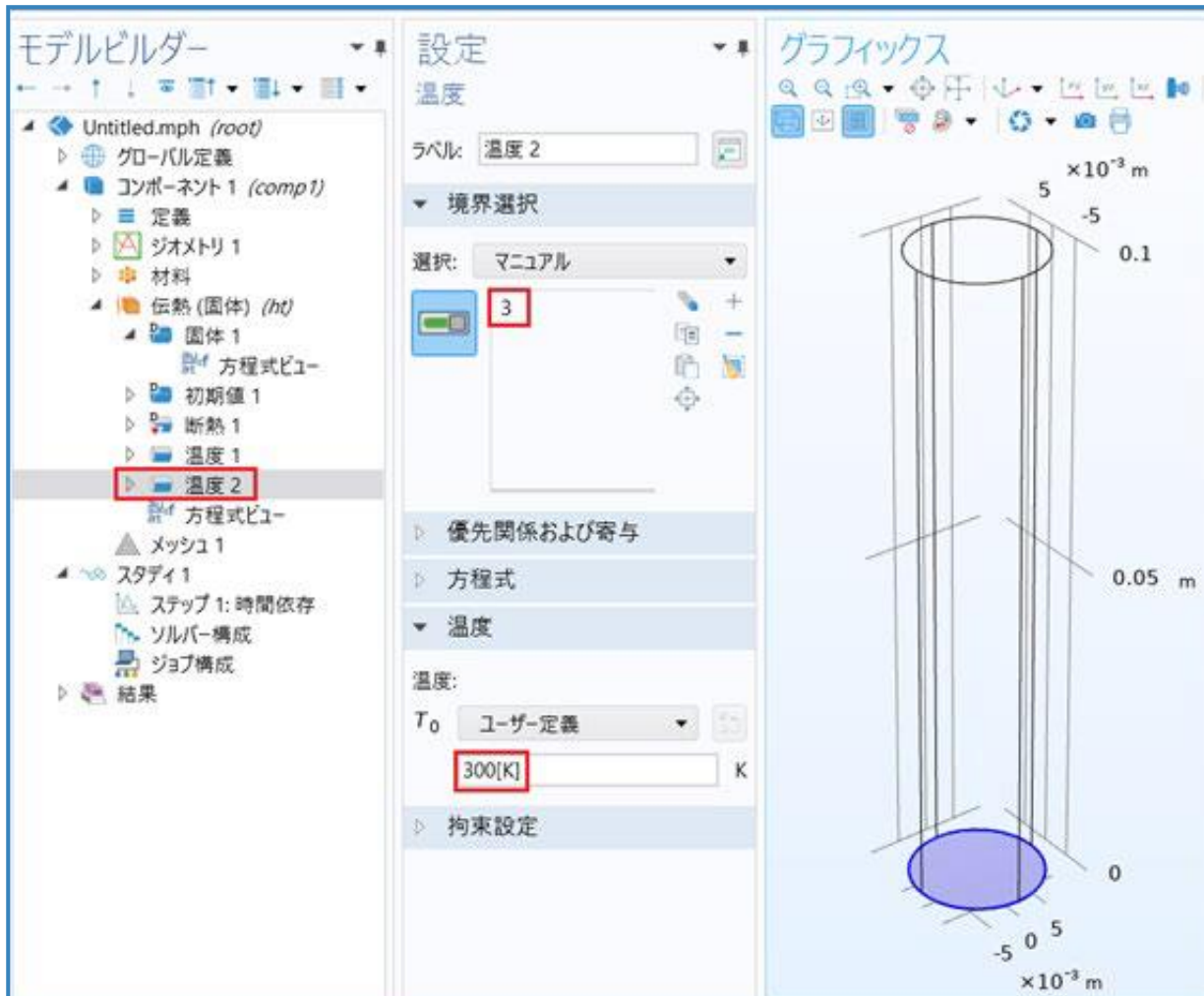
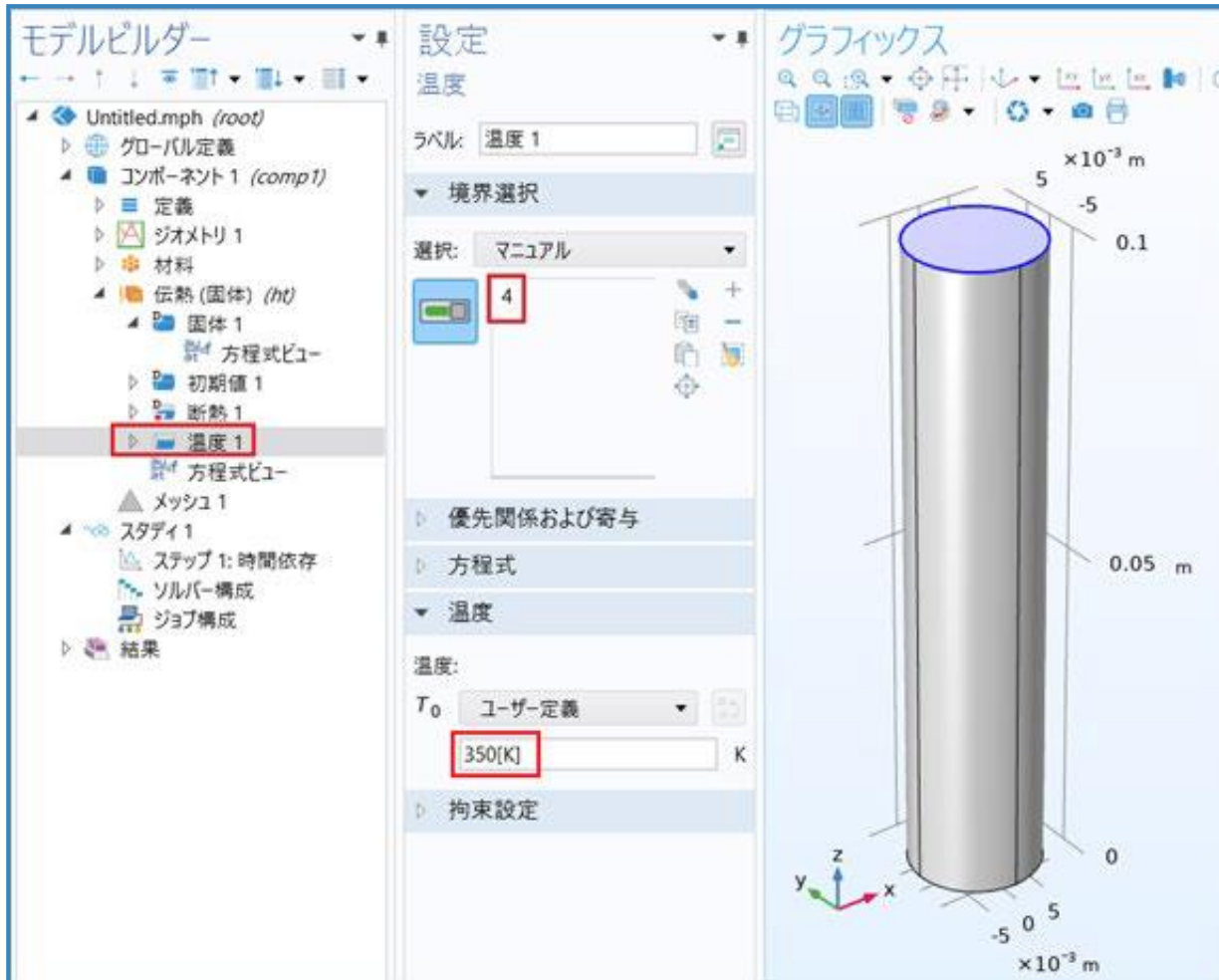
“伝熱 (固体)(soild)” にデフォルトで表示される “初期値” を選択し、初期値に 25[deg C] と入力します。



S5. 温度の設定

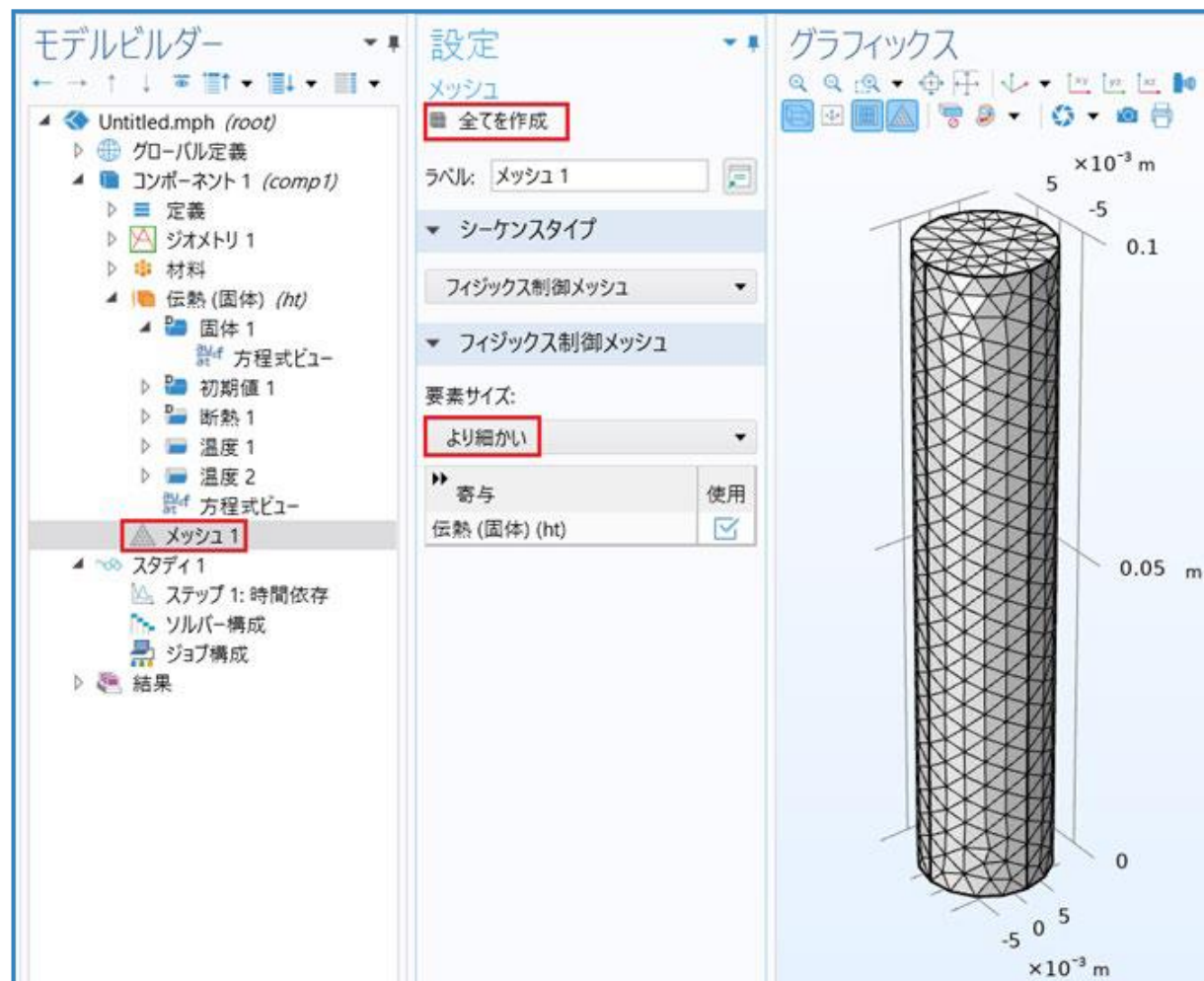
“伝熱 (固体)(soild)” を右クリックして “温度” を選択します。その後、温度設定で T0 に 350[K] 入力します。そして、グラフィックス上で境界 4 を選択します。また、同様に、反対側の底面（境界番号 3）の温度 T0 に 300[K] と設定します。[degC] をつけないときは K として解釈されます。反対側の底面を選択する際は、ワイヤフレームレンダリングにし、マウスの中央ホイールを使用するなどして選択します。





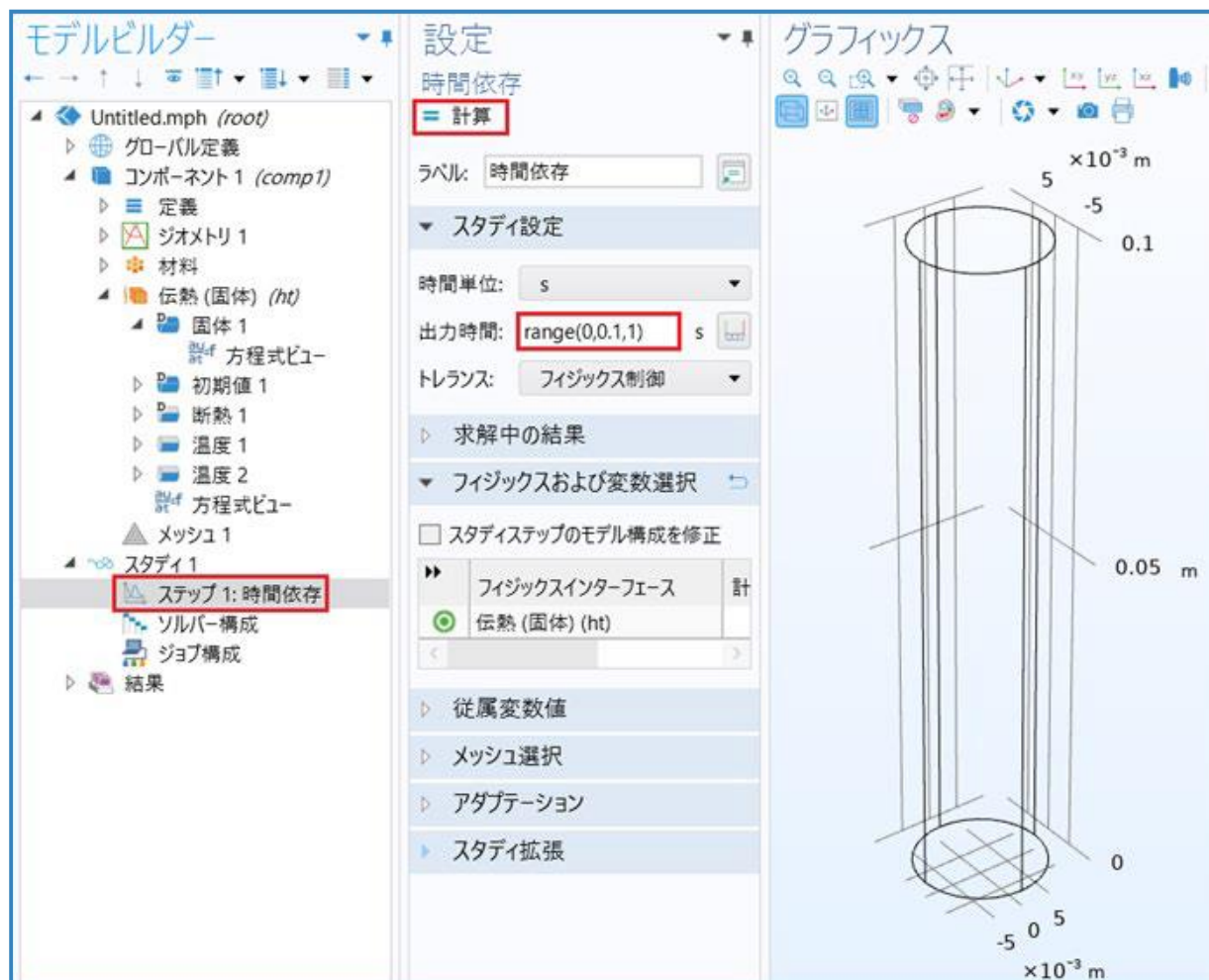
S6. メッシュの設定

計算するために必要なメッシュを作成します。“メッシュ”を選択して、要素サイズを“より細かい”に設定します。そして、“全てを作成”をクリックするとグラフィックにメッシュが作成されます。



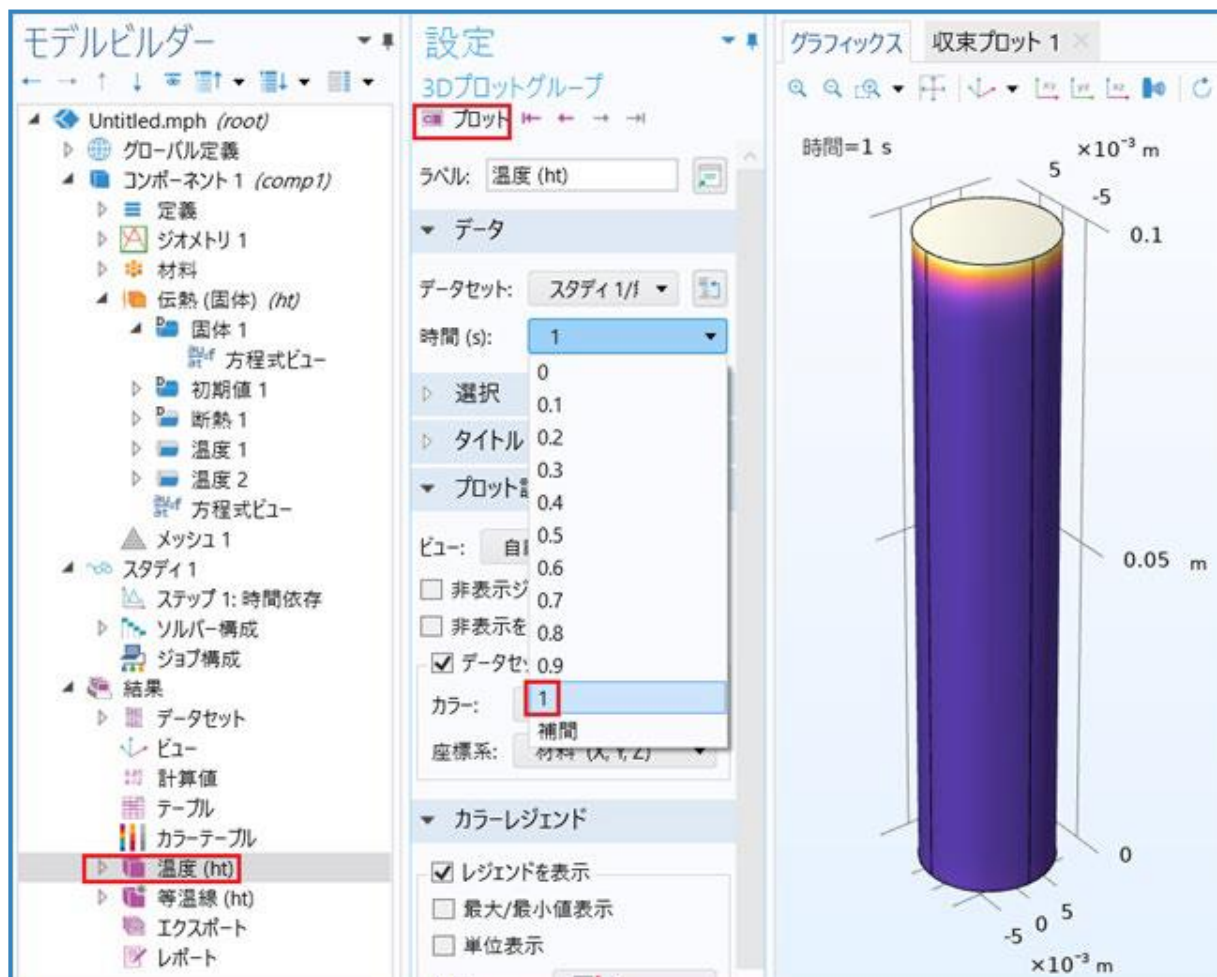
S7. 計算

“ スタディ>ステップ 1：時間依存 ” を選択し、時刻指定を $\text{range}(0,0.1,1)$ と入力します。これは、計算結果の表示用出力間隔を 0.1 秒にして、0 ～ 1 秒の時刻を計算するという意味になります。そして “ 計算 ” をクリックします。



S8. 結果

“結果”で、解析した現象の結果がグラフィックス上に表示されます。“結果>温度>サーフェス”を選択すると、温度分布が表示されます。時刻指定は、温度の設定にある時刻で行い、時刻を 1 にして、“プロット”を選択すると 1 秒後の結果が表示されます。



3.3.4 連成の方法

3.3.1 ～ 3.3.3 において、物体の伝熱の問題を考えましたが、本来ならば熱膨張による物体の変形が起こるはずです。そこで、先ほどの伝熱の問題に熱膨張のフィジックスを追加して、物体に熱が加わった場合どのように変形するか解析します。この系において、伝熱と構造変形がお互いに作用して起こっているため、連成計算を行う必要があります。

1) 問題の定義と分析

- Q1. 何をしたいか。
- A1. 物体に熱を加えて起こる物体の変形を解析したい。
- Q2. どこで保持するのか。
- A2. 底面（ヒータの反対側）。

2) COMSOL Multiphysics® における表現

- Q1. 加熱による変形を解析するには、どのインターフェイスがよいか。
- A1. 一覧表 P から判断し、固体力学＞線形弾性材料 1 ＞熱膨張が適している。
- Q2. 保持するために必要な条件とは。
- A2. 一覧表 B から判断し、固体力学＞拘束条件を使う。

3) COMSOL Multiphysics® における操作

- S1. 固体力学＞線形弾性材料＞熱膨張を設定
コンポーネントを右クリック 固体力学を追加
線形弾性材料 1(デフォルトノード)を右クリック 熱膨張を選択 円筒を選択
- S2. 固定拘束の設定
固体力学を右クリック 固定拘束 境界面 3 を選択
- S3. 計算
スタディにおける計算を選択

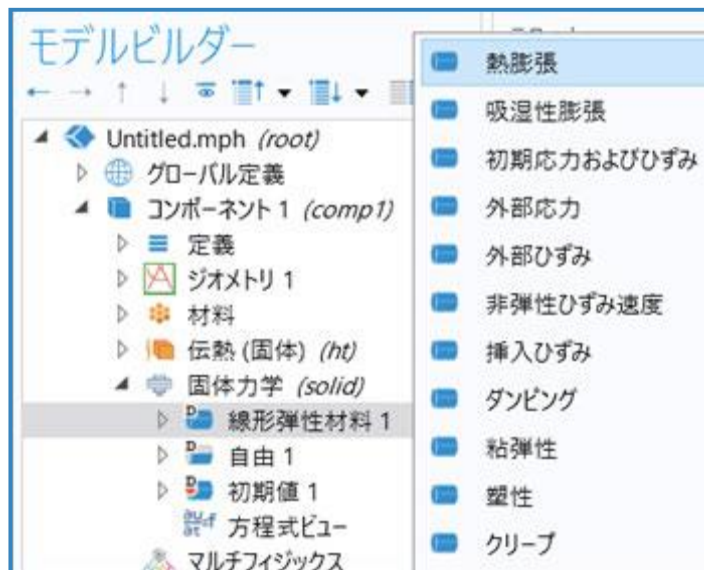
一覧表 P(フィジックス)

フィジックスの追加画面



一覧表 B(境界条件：サブノード)

フィジックスコンテキストメニュー



操作手順【固体の伝熱と熱膨張の連成解析】

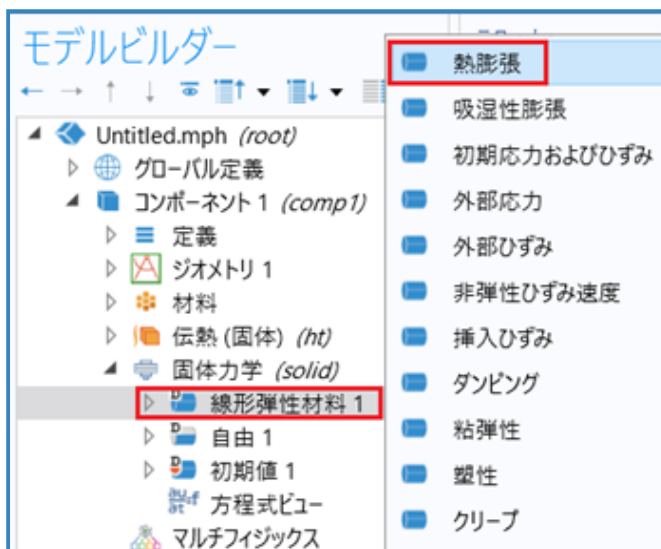
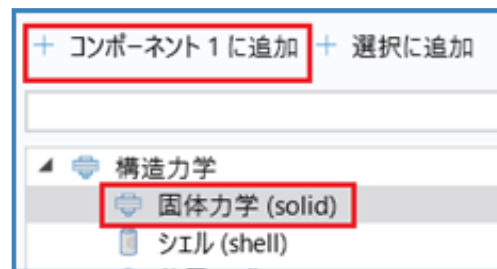
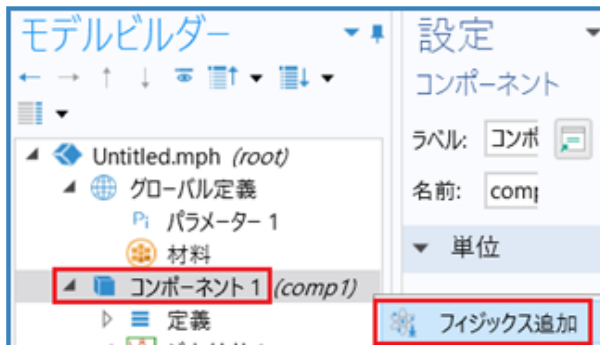
後半の説明：熱膨張解析の追加

詳細な操作手順を説明します。

※次ページからの説明中の熱膨張機能は構造力学モジュールが必要です。

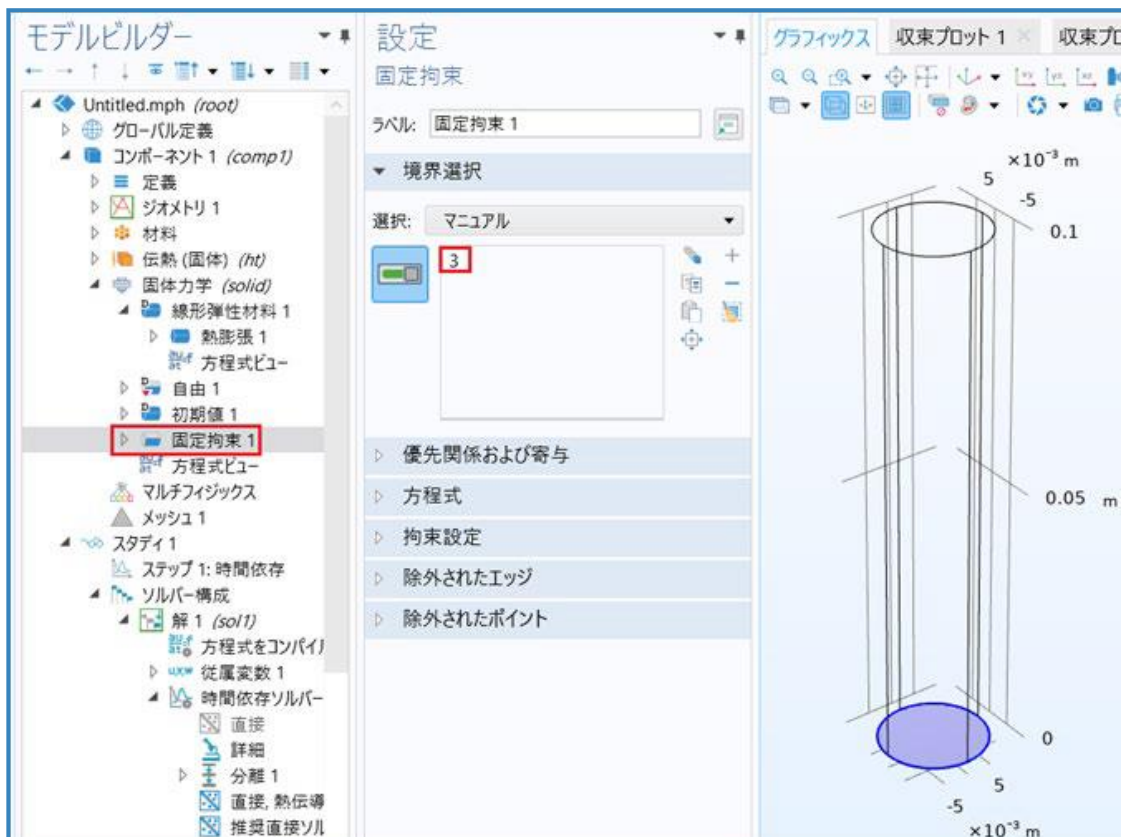
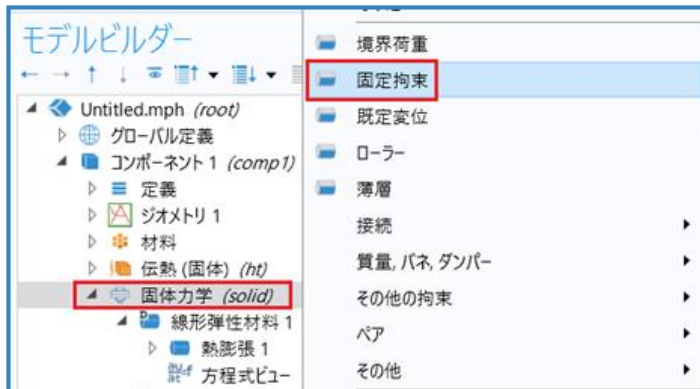
S1. 固体力学＞線形弾性材料 1 ＞ 熱膨張を設定

“コンポーネント” を右クリックして“フィジックスを追加”を選択します。画面右にフィジックスの一覧が出てくるので、“固体力学”を追加します。そして、モデルビルダにおいて“固体力学＞マルチフィジックス”を右クリックして、熱膨張を選択します。熱膨張の“ドメイン選択”において円筒全体を設定します。



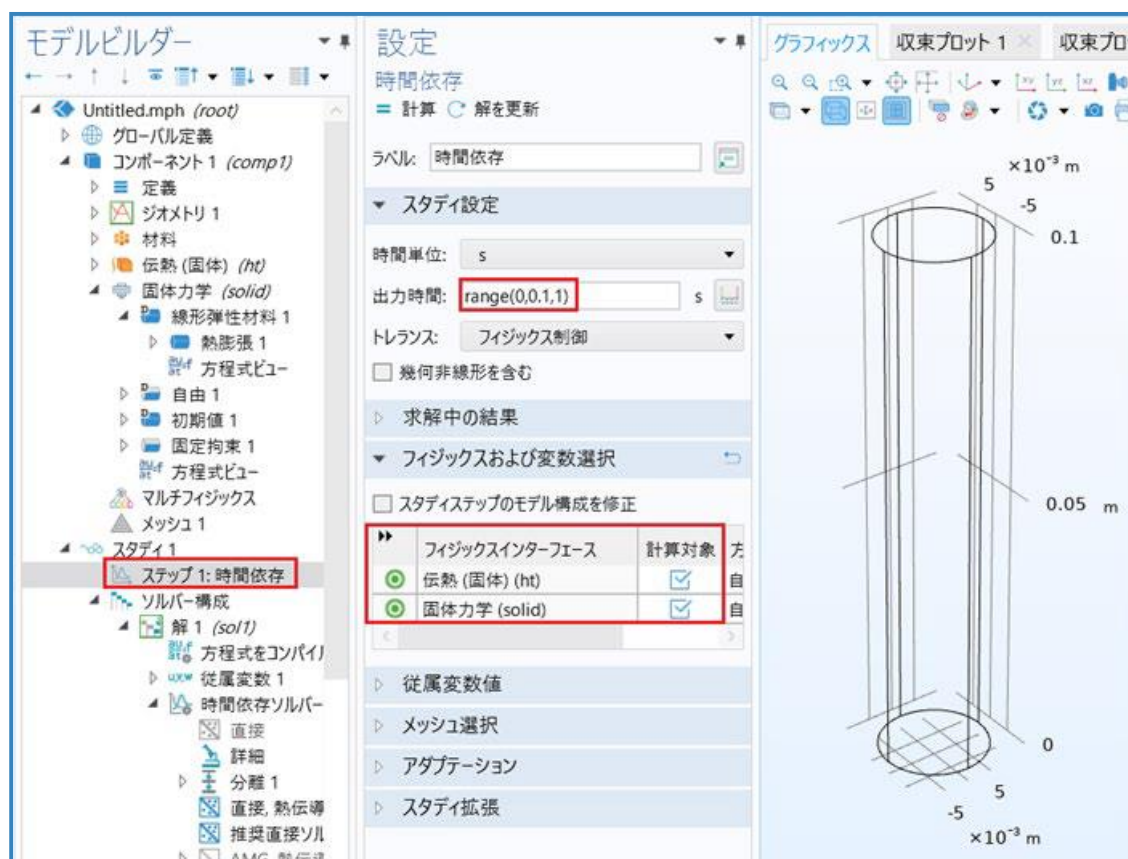
S2. 固定拘束の設定

“固体力学 (solid)” を右クリックして “固定拘束” を選択します。そして、設定で固定したい底面（本題では境界 3）を選択します。このとき、グラフィックスウィンドウ内の “ワイヤーフレームレンダリング” ボタンをクリックし、マウスポインタを境界 3 の上に置いて、マウスの中央ホイールを回転させることで、境界 3 を選択できます。



S3. 計算

設定した現象の解析を行います。“計算”をクリックします。



※温度の設定について

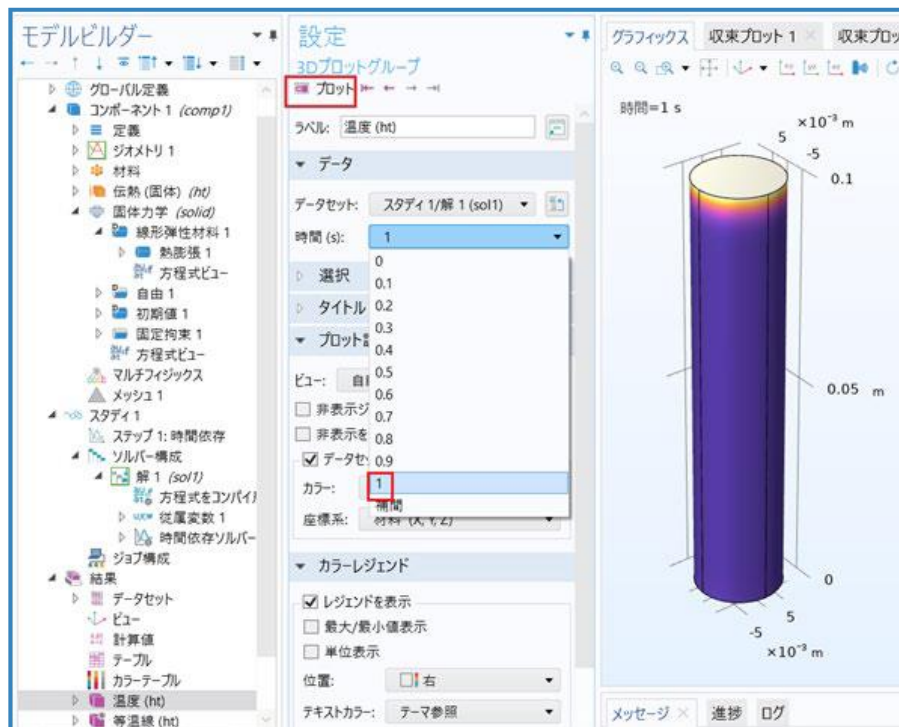
初期温度 25[degC] (298.15[K]) に対して、大きすぎる温度の入力の場合、収束しづらい場合があります。そのため今回は、初期温度にごく近い 300[K] と 350「K」という入力にしています。

※ソルバーについて

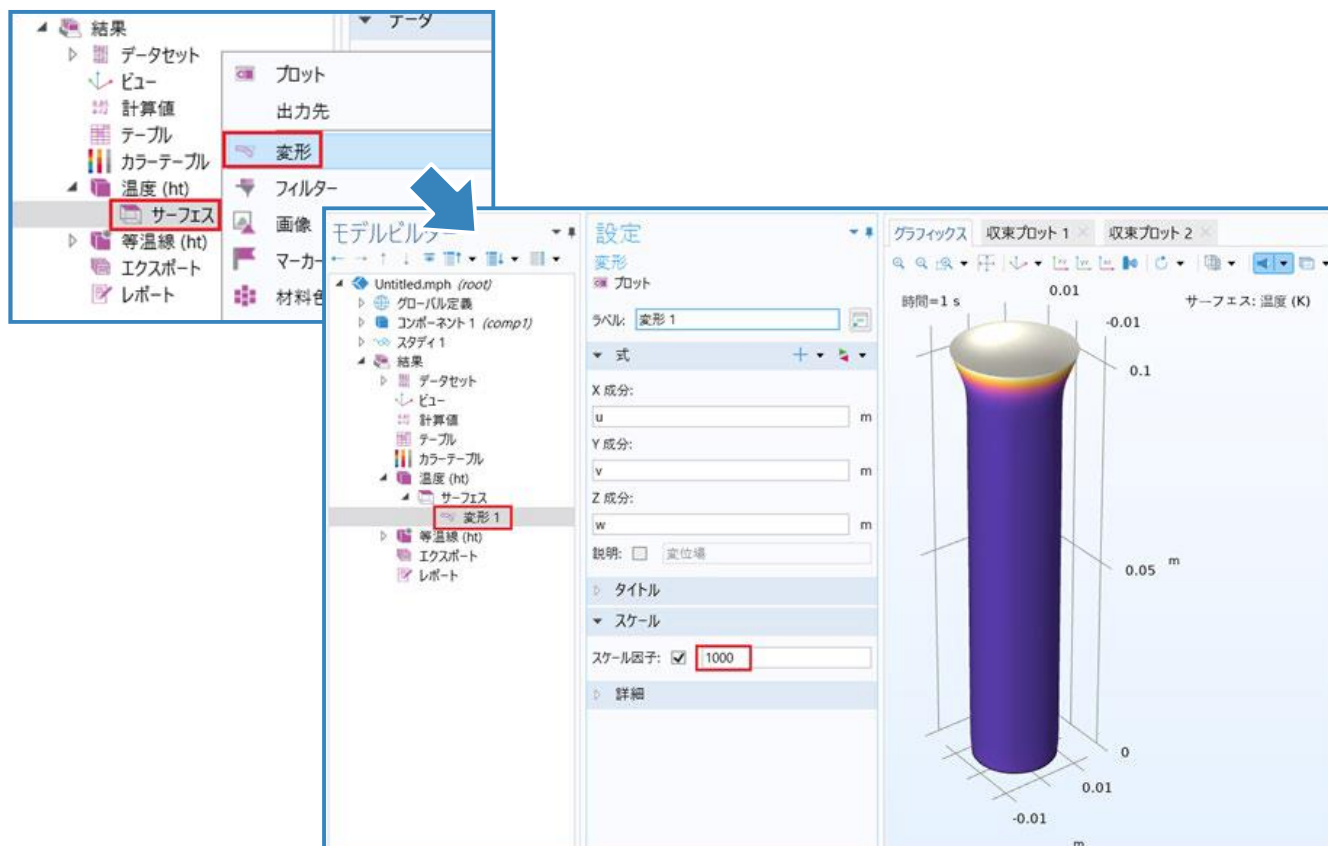
デフォルトソルバーは“一般化 α ”です。この計算時間はおよそ 15 分でした。“BDF”を使うと 1 分に短縮されました。現象が振動的な場合には、一般化 α を使う必要も出てきます。

S4. 結果

“結果”で、解析した現象の結果がグラフィックス上に表示されます。“結果>温度>サーフェス”を選択すると、温度分布が表示されます。設定において、時刻を 1 にして、“プロット”を選択すると 1 秒後の結果が表示されます。



“結果>温度>サーフェス>変形”を選択すると変形したジオメトリが表示されます。円筒上部が膨張しているのがわかります。また、設定のスケールファクターを変化させると、その数値に応じて変形がグラフィックス上に表示されます。(例えば、数値が 1000 であれば、1000 倍に表示されます)



3.4 電磁場と伝熱の連成解析

それでは、実践演習を行ってみましょう。こちらは磁場と伝熱の連成モデルの解析であり、導電性円筒に、誘導される渦電流によって熱を発生し、円筒が加熱される現象を解析していきます。

※このモデルでは AC/DC モジュールが必要となります。

3.4.1 電磁場問題の定義と分析

3.4.2 電磁場問題の COMSOL Multiphysics® における表現

3.4.3 電磁場問題 COMSOL Multiphysics® における操作

3.4.4 連成の方法

まず、3.4.1 において「問題の定義と分析」を読んで把握した後、3.4.2 および 3.4.3 を読む前に一旦、問題の「COMSOL Multiphysics における表現」を自分なり考えた後に、答え合わせする形で 3.4.2 および 3.4.3 を読むと考える力が付きますのでお勧めします。

3.4.1 電磁場問題の定義と分析

初めに、問題を定義していきます。連成の例として、電磁場の発生と誘導される渦電流による加熱を定義する場合の手順を説明します。また、その問題の概略図を下の図に示します。

(3.4.1 ～ 3.4.3 では電磁場の設定のみを行い、誘導加熱に関する設定は 3.4.4 にて行います。)

Q1. 何をしたいか。

A1. 電流が流れる銅チューブにより発生する電磁場および導電性物体に誘導される渦電流を調べたい。

Q2. 扱う部品の形は。

A2. チューブリング状のコイルと円筒。

Q3. 部品の材質は。

A3. 銅。

Q4. 電磁場はどのように発生する。

A4. 銅チューブに交流電流をかける。

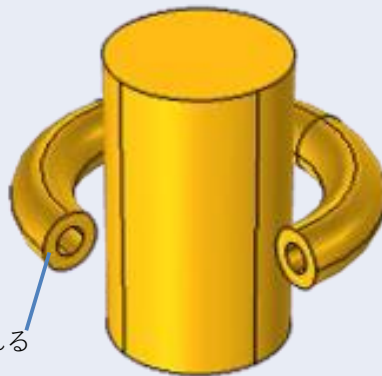
Q5. 交流電流の周波数領域は。

A5. 500[Hz]。

現象：電流が流れる銅チューブにより発生する電磁場

状態：周波数領域

銅チューブに交流電流が流れる
2e3[A] 500[Hz]



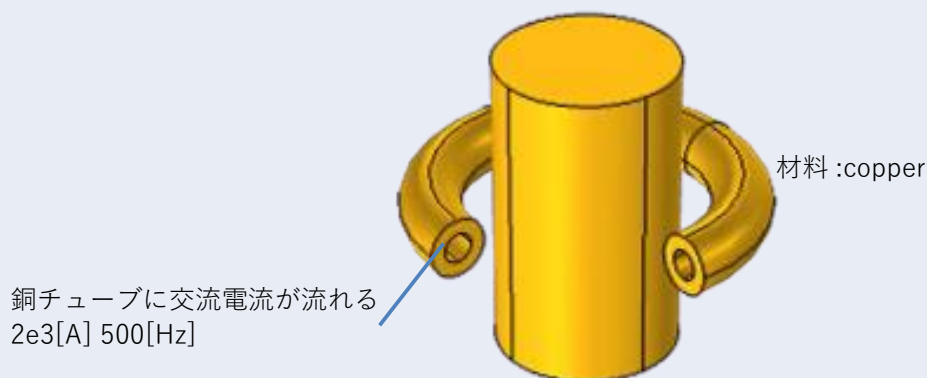
材料:銅

3.4.2 電磁場問題の COMSOL Multiphysics® における表現

問題の定義と分析の内容を COMSOL Multiphysics® における表現に置き換えます。各設問において、適切な表現を各一覧表から選びます。一覧表 P(フィジックス) では物理現象、一覧表 G(ジオメトリ) では図形、一覧表 M(マテリアル) では材料、一覧表 B(境界条件) では境界条件を選択します。

- Q1. 電磁場の発生および誘導電流を解析するには、どのインターフェイスがよいか。
- A1. 一覧表 P(フィジックス) から判断し、AC/DC モジュールが適しているので、その中の磁場インターフェイスを使用する。
- Q2. チューブリング状と円筒は COMSOL Multiphysics はどのように表しているか。
- A2. 一覧表 G(ジオメトリ) から判断し、円と矩形で表現される。下記は、重要な考え方となる。ジオメトリを作成する前に、ジオメトリの対称性を利用できるかどうか。
- このモデルには、チューブリング状と円筒の対称性を利用して、2次元軸対称によって解析を実行できる。3次元のチューブリング状と円筒は2次元軸対称にて、それぞれ円と矩形を使って表現する。この方法によって計算量を削減できる。さらに、電磁場の解析に対して、電磁場の伝搬の考えるために、コイルと導電性物体に加え、周りの領域も必要となる。もう一つの矩形により、周りの領域を表現する。
- Q3. 銅は COMSOL Multiphysics はどのように表しているか。
- A3. 一覧表 M(マテリアル) から判断し、Copper で表現される。さらに、周りの領域を、材料 FR4 とする。
- Q4. 交流電流を持っているコイルのため、どのノードを選べばよいか。
- A4. 一覧表 B(境界条件) から判断し、コイルを使う。
- Q5. 周波数をどのように設定するか。
- A5. 一覧表 S(スタディ) から判断し、周波数領域を設定する。

フィジックス：磁場インターフェイス
スタディ：周波数領域



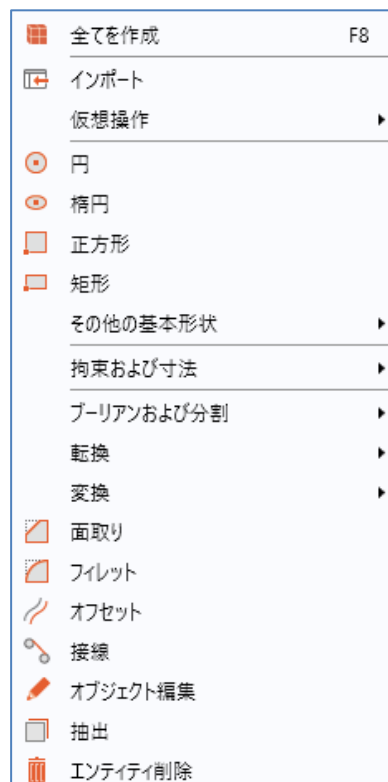
一覧表 P(フィジックス)

フィジックスの追加画面



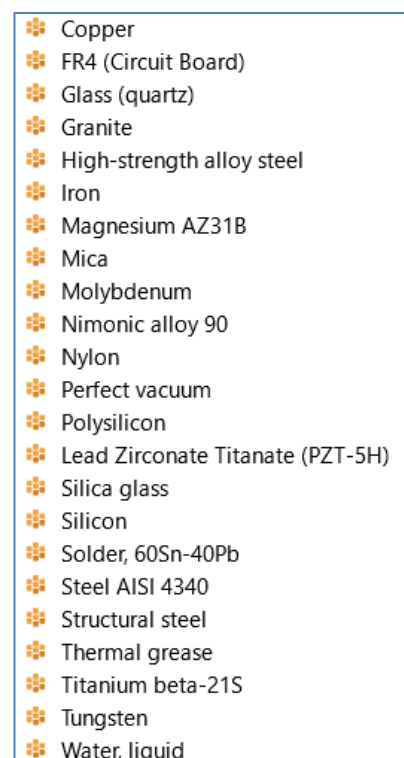
一覧表 G(ジオメトリ)

ジオメトリコンテキストメニュー



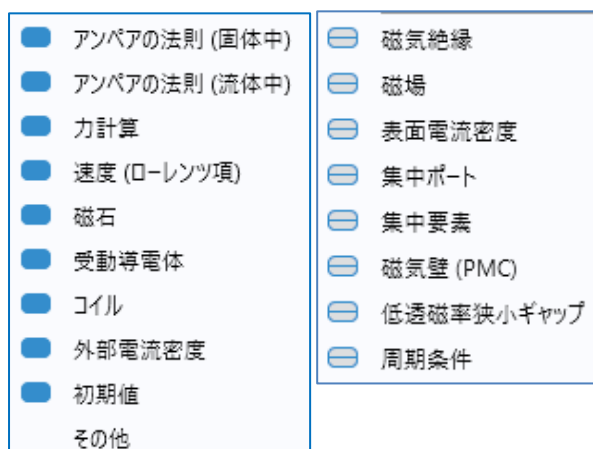
一覧表 M(マテリアル)

材料の追加画面



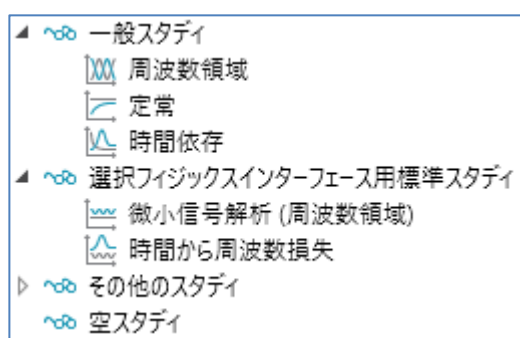
一覧表 B(境界条件)

フィジックスコンテキストメニュー



一覧表 S(スタディ)

スタディの追加画面



3.4.3 COMSOL Multiphysics® における操作

COMSOL Multiphysics® で操作して、問題を解きます。

- S1. 初期設定において、磁場を設定
 - “空間次元”：2D 軸対称
 - “フィジックス”：ACDC > 磁場 追加
 - “スタディ”：周波数領域 完了
- S2. 円と矩形の設定
 - “ジオメトリ”を右クリック 矩形 1 を追加
(解説では、幅 = 0.2 m、高さ = 0.5 m、位置 $z = -0.25$ m とします)
 - “ジオメトリ”を右クリック 矩形 2 を追加
(解説では、幅 = 0.03 m、高さ = 0.1 m、位置 $z = -0.05$ m とします)
 - “ジオメトリ”を右クリック 円 1 を追加
(解説では、半径 = 0.01 m、中心角 = 360 deg、中心 $r = 0.05$ m とします)
 - “ジオメトリ”を右クリック 円 1 を追加
(解説では、半径 = 0.005 m、中心角 = 360 deg、中心 $r = 0.05$ m とします)
- S3. 材質の設定
 - “材料”を右クリック ライブラリから材料を追加 Copper と FR4 をダブルクリック
- S4. CopperとFR4のアンペアの法則の設定
 - “磁場”を右クリック “アンペアの法則 (固体中)”を追加
(解説では、アンペアの法則 (固体中) 1にて、ドメイン2、3を選択)
 - “磁場”を右クリック “アンペアの法則 (固体中)”をもう一回追加
(解説では、アンペアの法則 (固体中) 2にて、ドメイン1、4を選択)
- S5. コイルの設定
 - “磁場”を右クリック “コイル”を選択
 - “導電体モデル”単導電体 “コイル励振”電流 “コイル電流” $2e3[A]$
(解説では、ドメイン 3 を選択)
- S6. メッシュ
 - “シーケンスタイプ”フィジックス制御メッシュ
 - “要素サイズ”普通
- S7. 計算
 - “スタディ”の周波数領域を選択 周波数 500[Hz] と入力 計算を選択
- S8. 結果表示
 - “結果” “磁束密度ノルム” “誘導される渦電流”

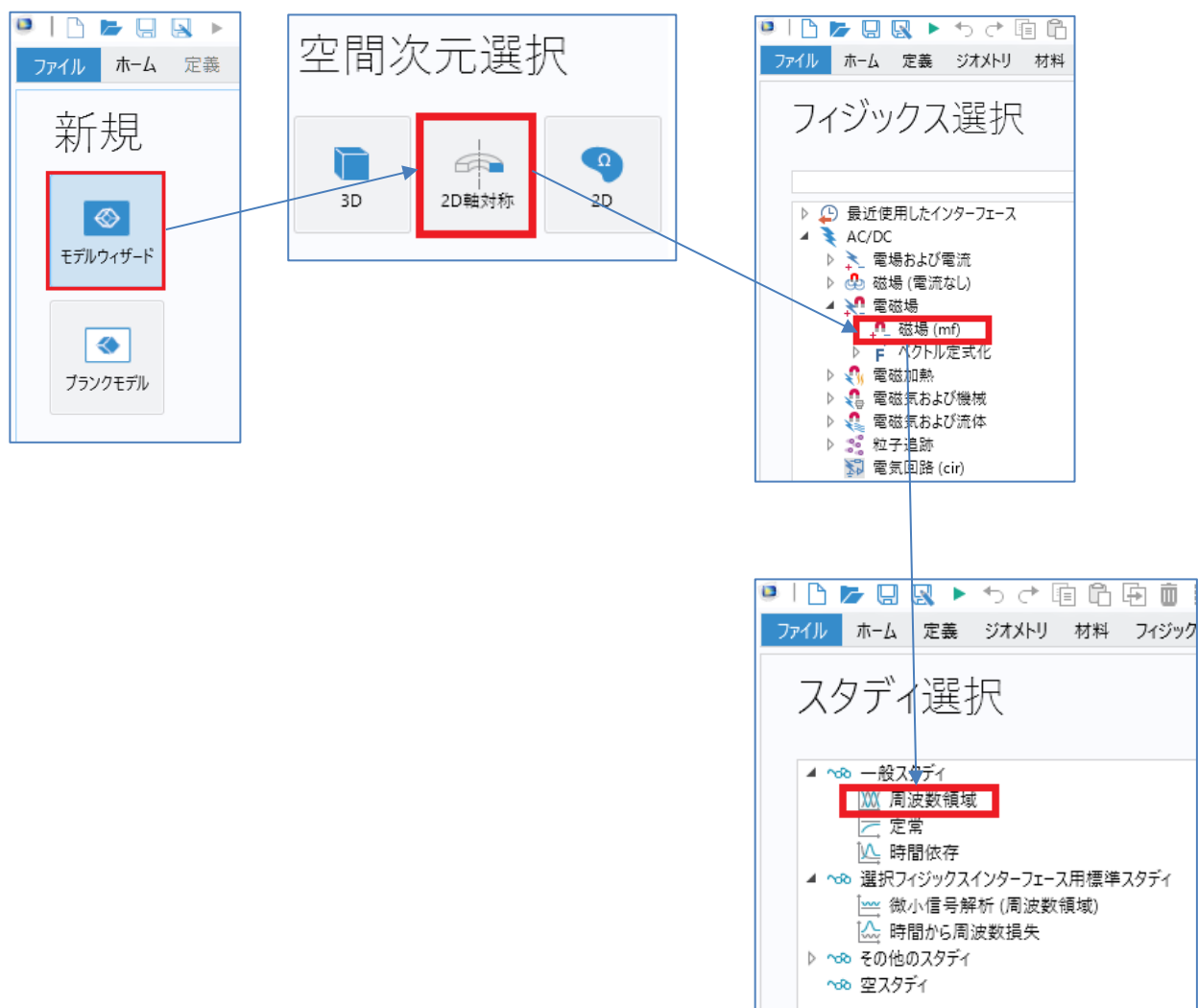
操作手順【電磁場解析】

前半の説明：電磁場解析

詳細な操作手順を説明します。

S1. 初期設定において、磁場を設定（2 次元）

2.2 を参照してください。“空間次元”は 2D 軸対称、“フィジックス”は磁場、“スタディ”は周波数領域を設定します。

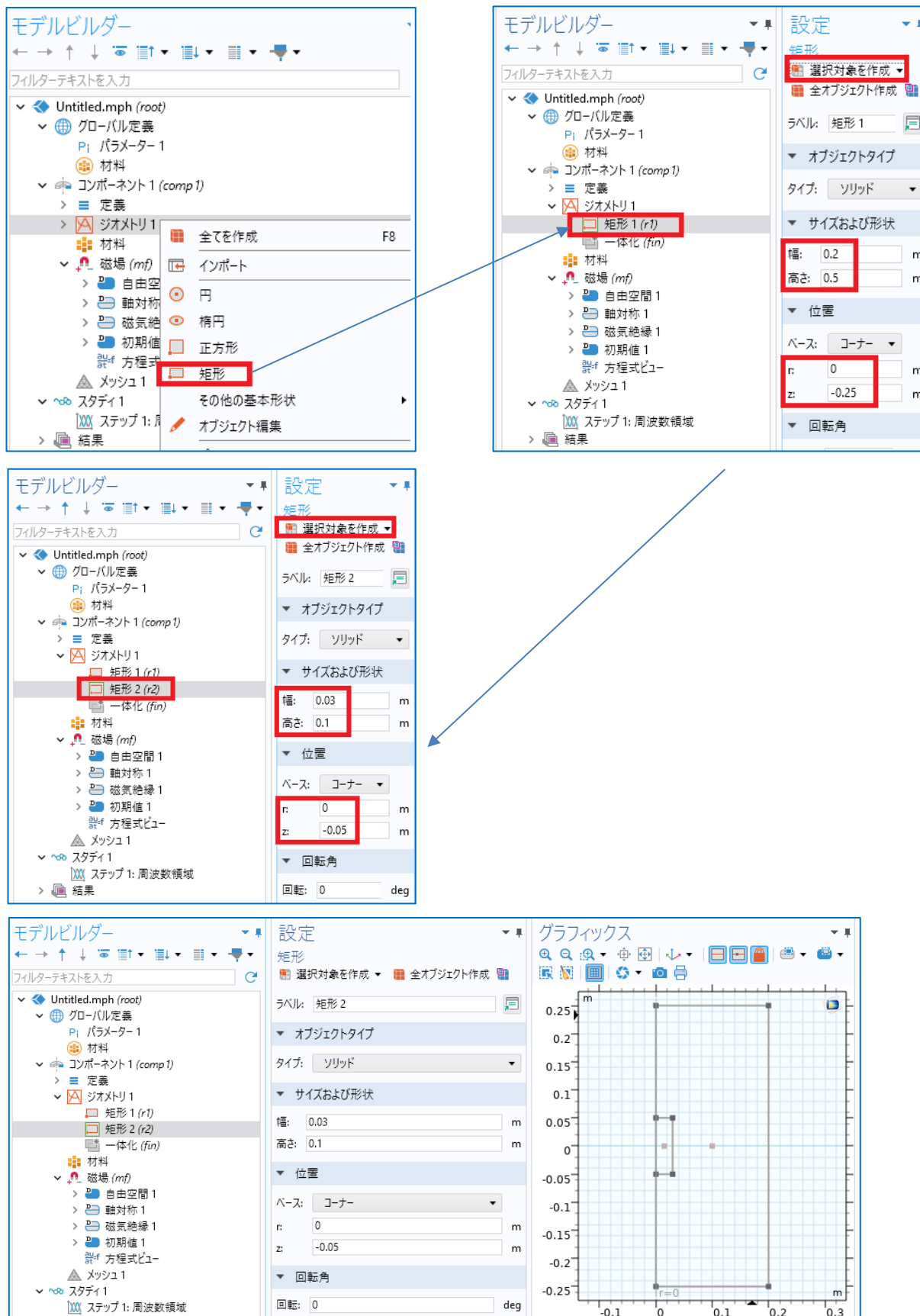


S2. ジオメトリの設定

“コンポーネント>ジオメトリ”において扱う系の図形を設定します。

まず、幅が 0.2m、高さが 0.5m の矩形 1 と幅が 0.03m、高さが 0.1m の矩形 2 を作成します。

“ジオメトリ”を右クリックし、矩形を選択します。サイズで各長さを設定し、設定画面の上部にある“選択対象を作成”を選択することでグラフィックス上に矩形を作成できます。単位が無記入の場合は自動的に初期に指定した単位系（デフォルトでは 国際単位系 (SI)）における値となります。

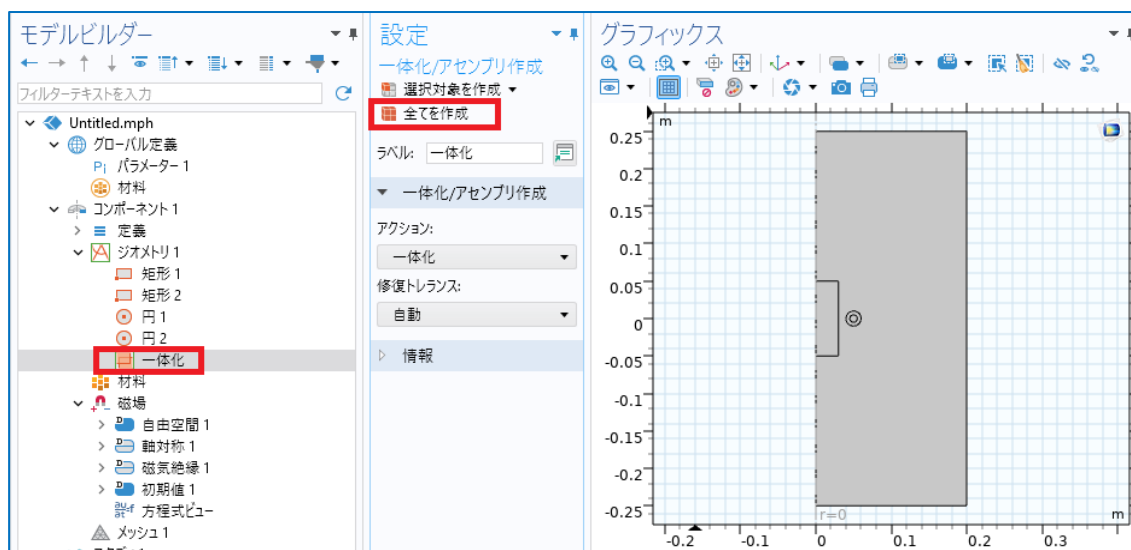


次に、半径が 0.01m の円 1 と半径が 5 mm の円 2 を作成します。

“ジオメトリ”を右クリックし、円を選択します。[] を利用して、デフォルト単位 m と異なる単位を指定できます。



ジオメトリ>一体化設定ウィンドウにおいて、“全てを作成”を選択することでグラフィックス上にジオメトリの全体を表示できます。

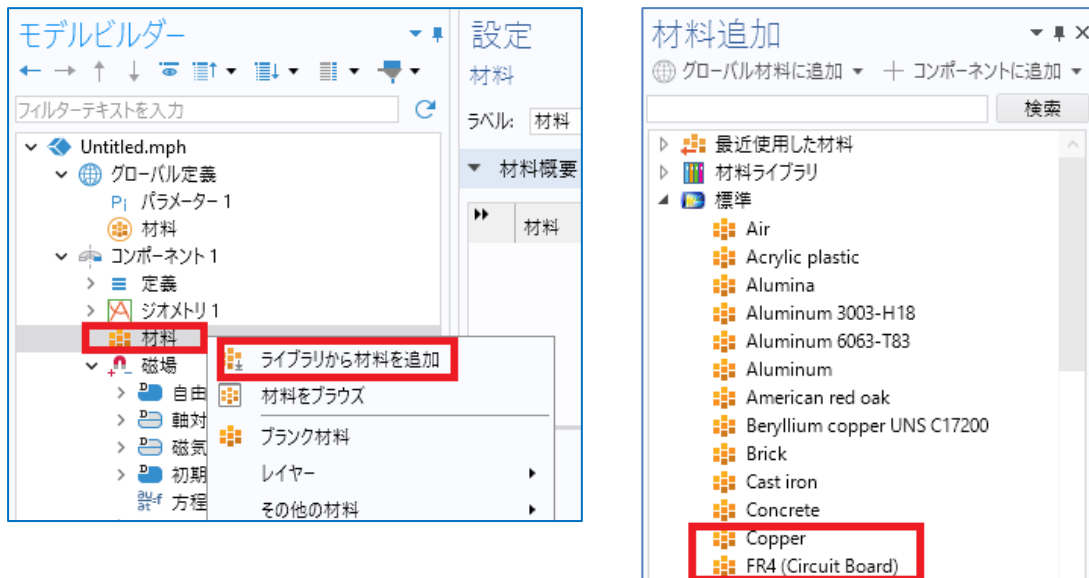


S3. 材料の設定

系内ジオメトリの材料を設定します。

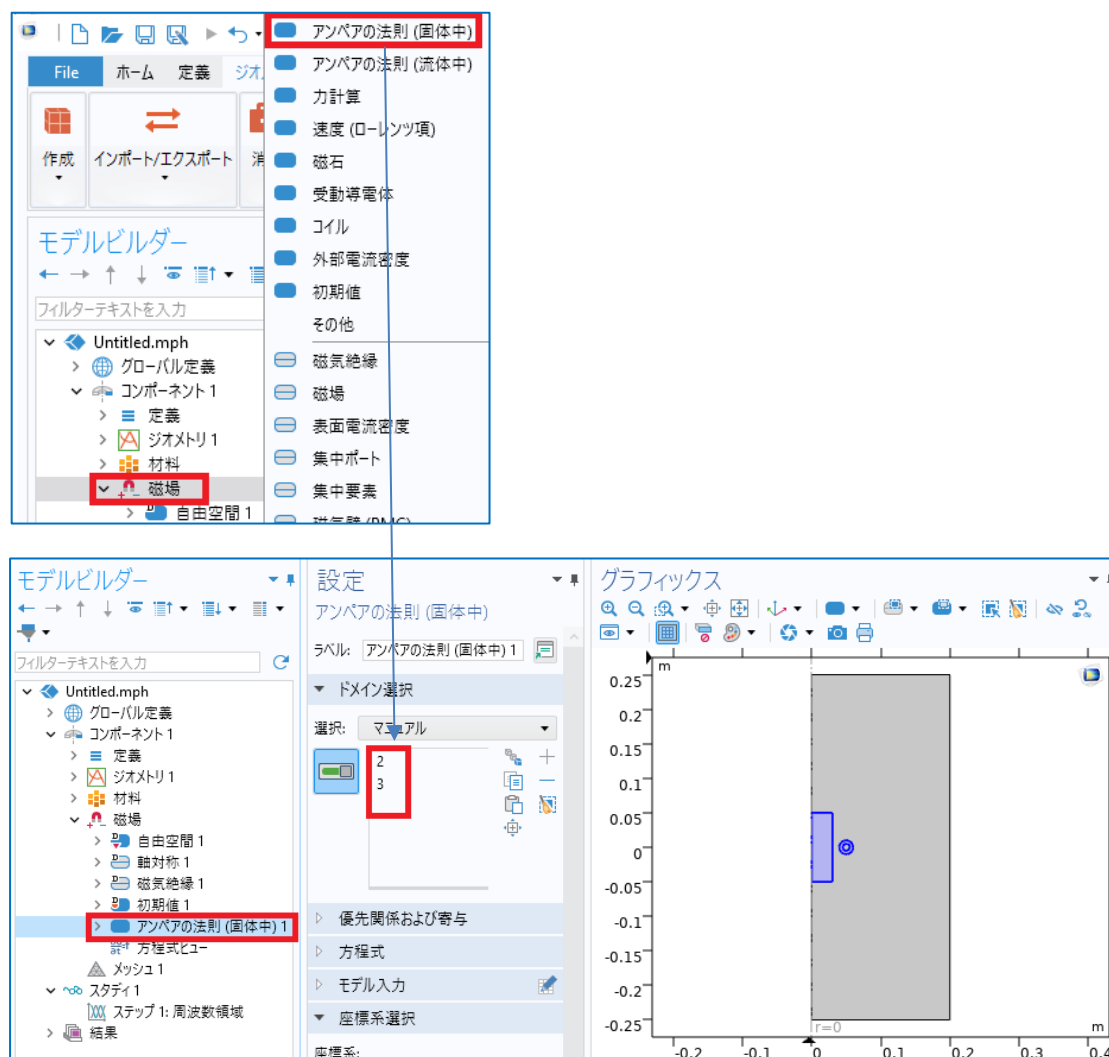
“コンポーネント>材料”を右クリックして“ライブラリから材料の追加”を選択すると、画面右側に材料の種類が表示されます。COMSOL Multiphysics®の標準的な材料は、材料ライブラリーの標準にあります。

チューブリング状コイルと導電性円筒（ドメイン 2 と 3）の材料は銅です。銅は COMSOL Multiphysics®では Copper と英語で表記されるため、Copper を標準から選択し、“コンポーネントに追加”をクリックして銅が材料に追加されます。周りの領域の材料（ドメイン 1）は FR4 です。チューブリング状コイルの中の材料（ドメイン 4）も FR4 です。上記の Copper の追加方法と同じように、FR4 を追加します。

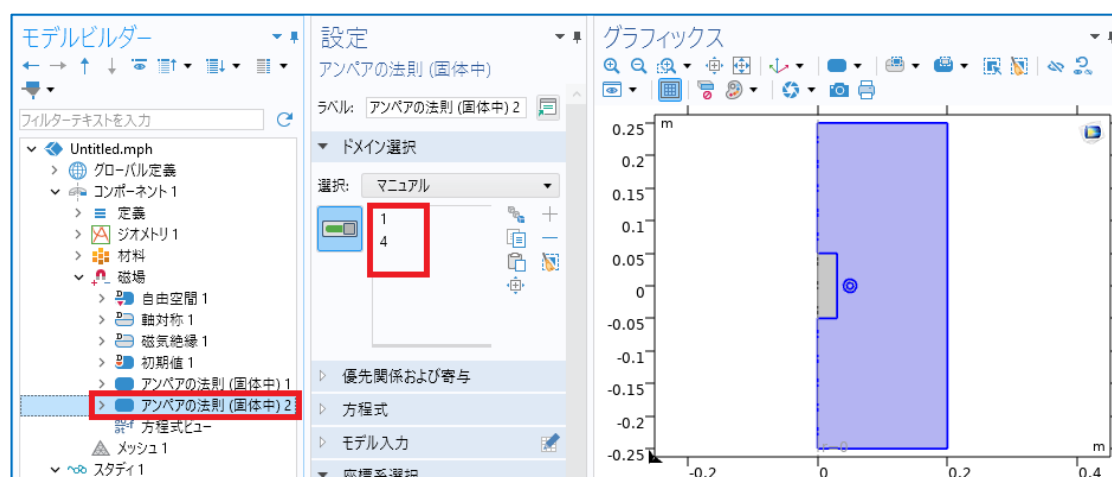


S4. CopperとFR4のアンペアの法則の設定

“磁場(mf)”を右クリックして“アンペアの法則（固体中）”を選択します。そして、アンペアの法則（固体中）1の設定でドメイン2、3を選択します。

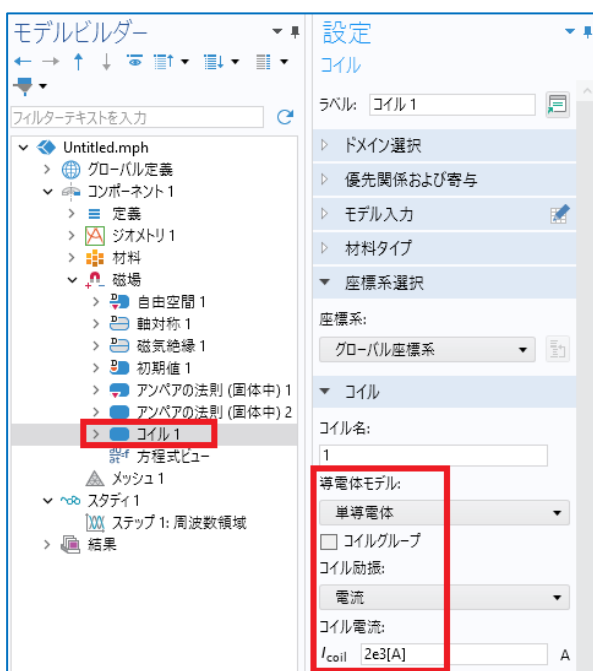
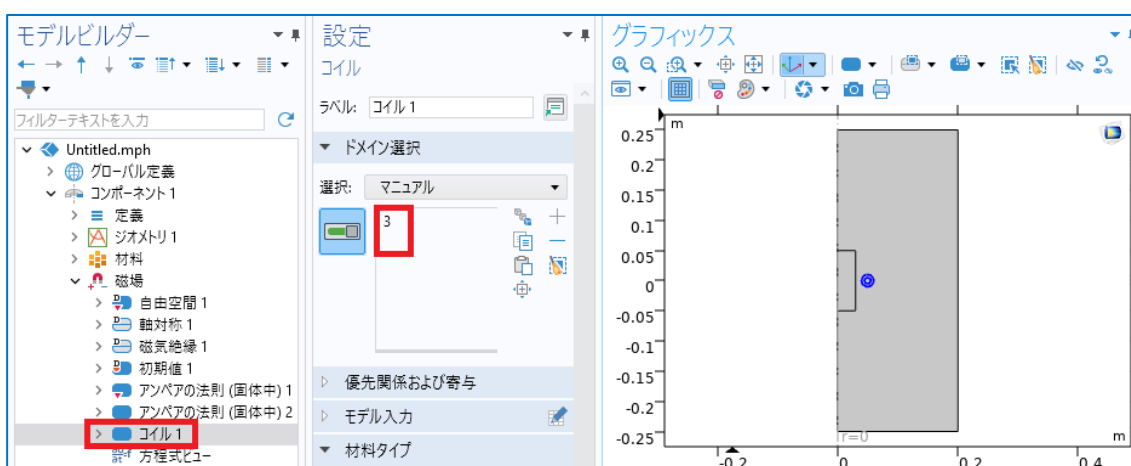
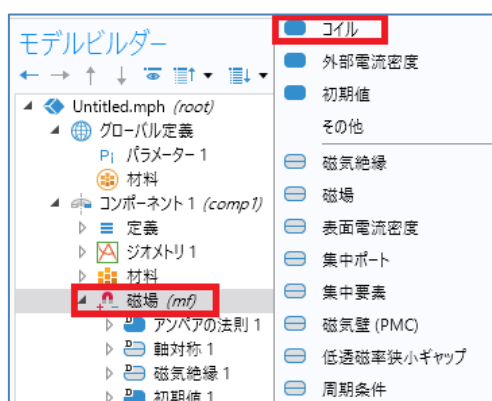


“磁場(mf)”を右クリックして“アンペアの法則（固体中）”を選択します。そして、アンペアの法則（固体中）2の設定でドメイン1と4を選択します。



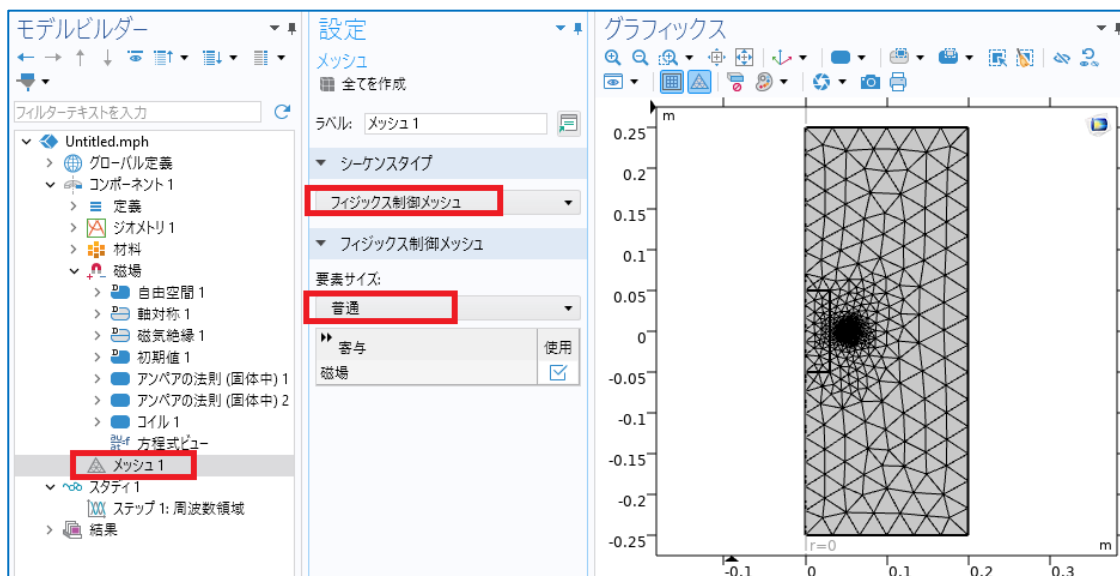
S5. コイルの設定

磁場(mf)を右クリックして“コイル”を選択します。そして、設定でリング状ドメイン3を選択します。“導電体モデル”を単導電体にします。“コイル励振”を電流にします。“コイル電流”に $2e3[A]$ を入力します。



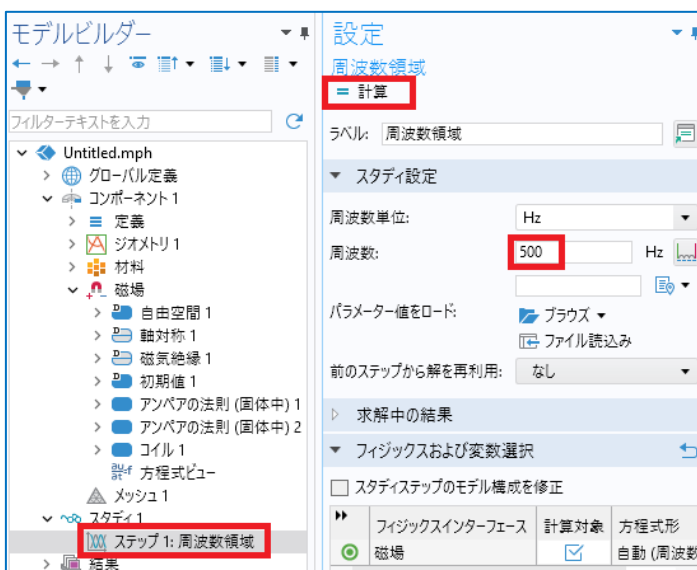
S6. メッシュの設定

デフォルト設定を利用します。“シーケンスタイプ”はフィジックス制御メッシュです。“要素サイズ”は普通です。



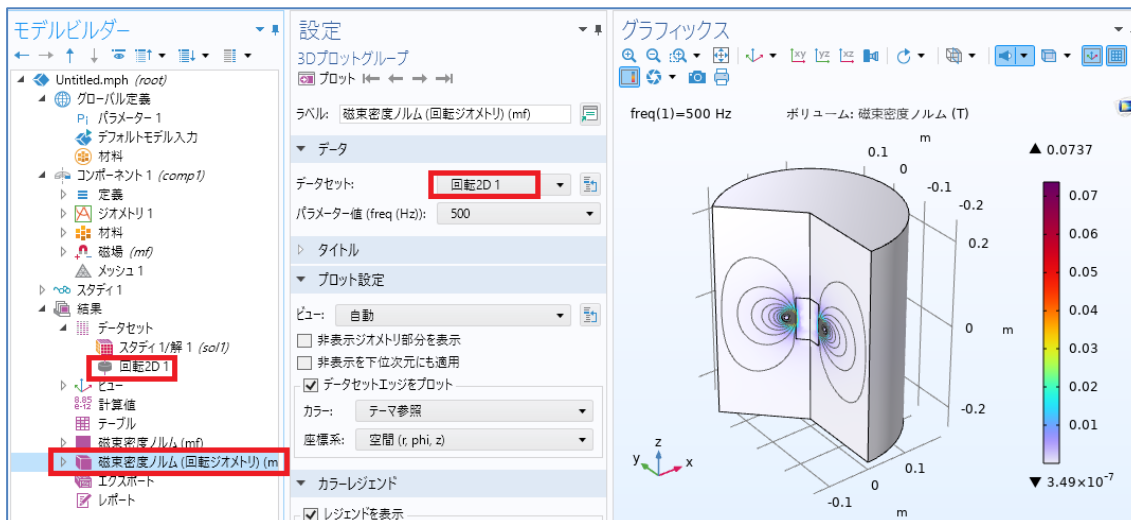
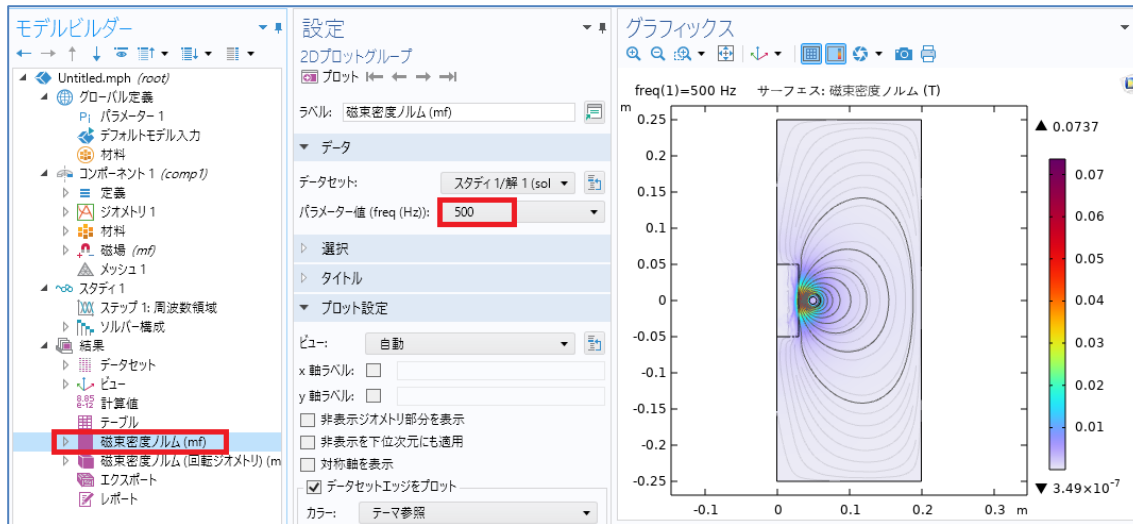
S6. 計算

設定した現象の解析を行います。“周波数領域”の設定がされているので、“スタディ 1 > ステップ 1: 周波数領域”を選択して、周波数 500[Hz] と入力します。そして“計算”をクリックします。

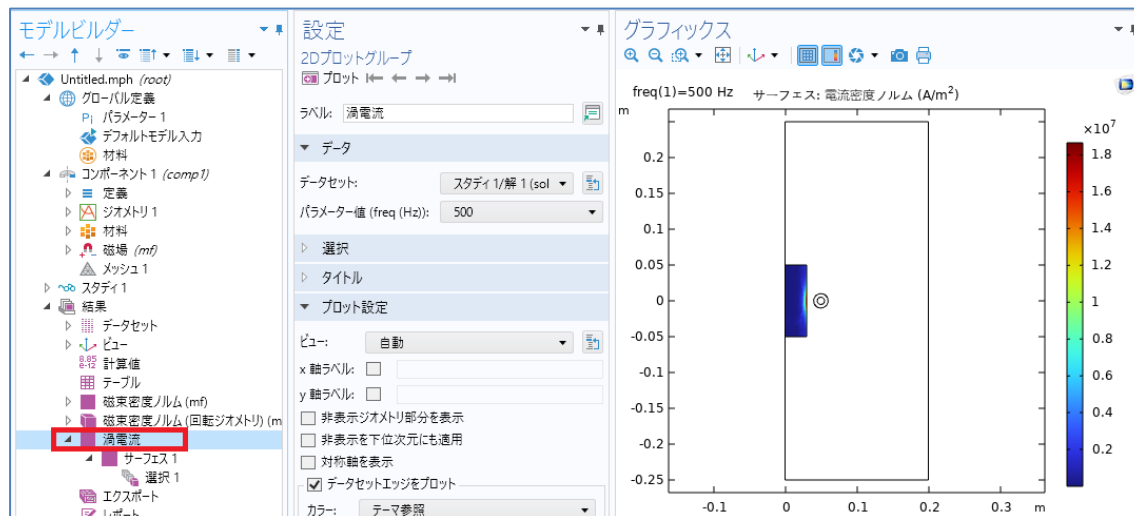


S7. 結果表示

“結果”で、解析した現象の結果がグラフィックス上に表示されます。“結果> 2D プロットグループ磁束密度ノルム”を選択すると、2次元の磁束密度ノルム分布を表したグラフィックスが表示されます。“結果> 3D プロットグループ磁束密度ノルム”を選択すると、3次元の磁束密度ノルム分布がわかります。3D プロットグループ設定ウィンドウにおいて、データセットは、回転 2D となります。回転 2D は、2D 軸対称の計算に対して、自動的に生成されるデータセットです。これによって、3次元の結果を表示することが出来ます。



更に、2D プロットグループを追加し、誘導される渦電流を表示します。結果を右クリックし、2D プロットグループを選択します。2D プロットグループを右クリックし、サーフェスを選択します。サーフェス設定ウィンドウにおいて、式に $mf.normJ$ を入力します。また、サーフェスのサブノート「選択」を利用し、導電性物体ドメイン 2 のみに渦電流を表示します。



3.4.4 連成の方法

3.4.1 ～ 3.4.3 において、電磁場の問題を考えましたが、最終目的は、誘導される渦電流による加熱を解析することです。そこで、加熱現象に対する伝熱のフィジックスを追加し、物体の温度変化を解析します。この系において、電磁場と伝熱の連成計算を行う必要があります。

1) 問題の定義と分析

Q1. 何をしたいか。

A1. 加熱される物体の温度変化を解析したい。

Q2. どのように物体を加熱するか。

A2. 誘導渦電流により熱源がある。

Q3. 他の伝熱条件は。

A3. 銅チューブ本体の降温のため、チューブ中に、水が流れる。
周りの環境温度は、室温となる。

Q4. どの状態か。

A4. 初期温度は室温、加熱 10 時間後の状態。

現象：誘導される渦電流による銅円筒を加熱する

状態：10 時間後

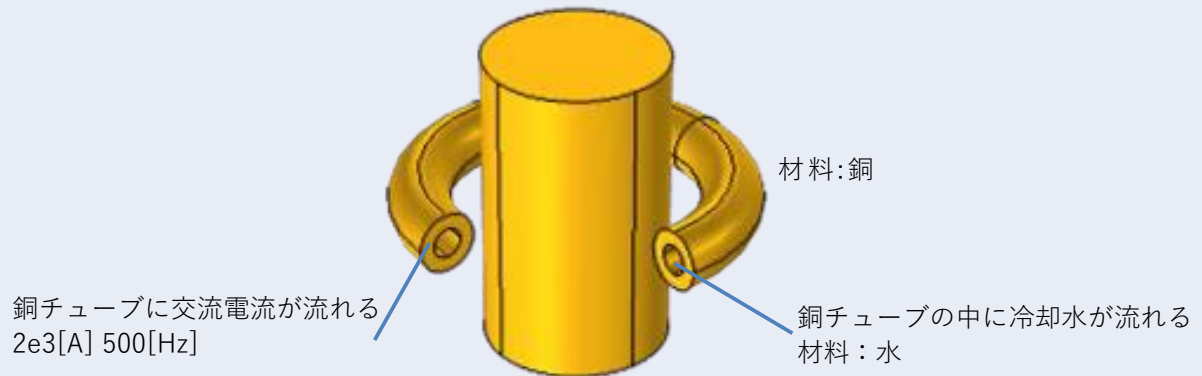


2) COMSOL Multiphysics における表現

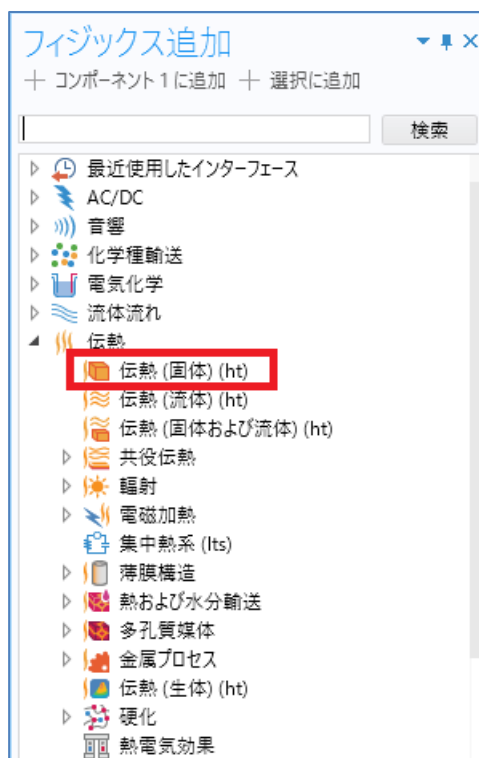
3.4.1 ~ 3.4.3 において、電磁場の問題を考えましたが、最終目的は、誘導される渦電流による加熱を解析することです。そこで、加熱現象に対する伝熱のフィジックスを追加し、物体の温度変化を解析します。この系において、電磁場と伝熱の連成計算を行う必要があります。

- Q1. 加熱される物体の温度変化を解析するには、どのインターフェイスがよいか。
- A1. 一覧表 P(フィジックス) から判断し、伝熱モジュールが適しているので、その中の伝熱 (固体) インターフェイスを使用する。
- Q2. どのように誘導渦電流の熱源を設定するか。
- A2. 一覧表 MP(マルチフィジックス) から判断し、電磁加熱を使う。
- Q3. どのように他の伝熱条件を設定するか。
- A3. 一覧表 B(境界条件) から判断し、熱源を利用し、降温水を設定する、温度を利用し、周りの環境温度を設定する。
- Q4. 10 時間後の状態をどのように設定するか。
- A4. 一覧表 S(スタディ) から判断し、時間依存を設定する。

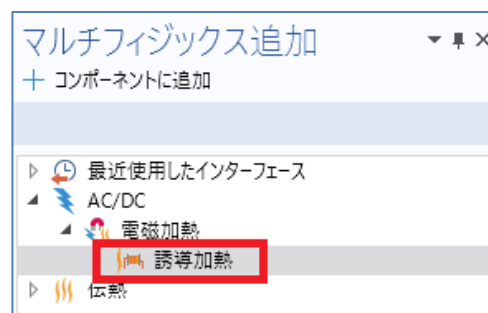
フィジックス：磁場インターフェイス（設定済）+ 伝熱（固体）インターフェイス
スタディ：時間依存



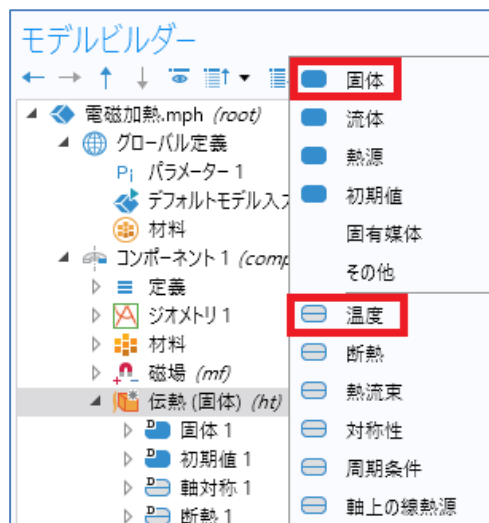
一覧表 P(フィジックス)
フィジックスの追加画面



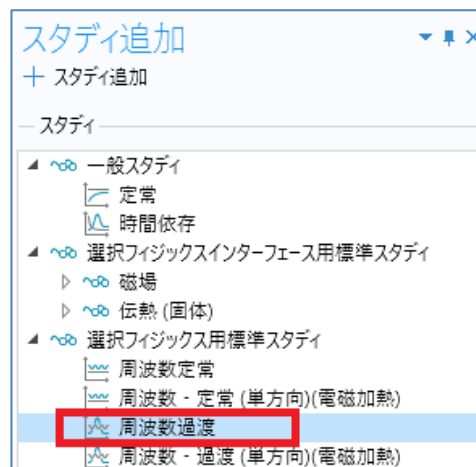
一覧表 MP(マルチフィジックス)
マルチフィジックスの追加画面



一覧表 B(境界条件)
フィジックスコンテキストメニュー



一覧表 S(スタディ)
スタディの追加画面



COMSOL Multiphysics® における操作

COMSOL Multiphysics® で操作して、問題を解きます。

- S1. フィジックスの追加
伝熱 > 伝熱（固体）を選択
- S2. マルチフィジックスの追加
AC/DC > 電磁加熱 > 誘導加熱を選択
- S3. 伝熱境界条件の設定
“伝熱”を右クリック “熱源”と“温度”を選択
- S4. 材料の追加
材料水を追加
- S5. 磁場境界条件の追加
“磁場”を右クリック “アンペアの法則”を追加 導電モデルを“線形性抵抗”にする
- S6. スタディの追加と計算
スタディタイプ “周波数過渡”を選択
時間指定 range(0,10[min],10[h]) の計算
(時間刻みを 10 分として 0 分から 10 時間までの計算を行う)
周波数指定 500[Hz]
- S7. 結果表示
3D プロットグループ温度分布 1D プロットグループポイントの温度変化

以下は、誘導加熱の解析のスタディの選択に対して、重要な説明となります。ご参考して頂ければ幸いです。

誘導加熱にて、四つのスタディタイプを選択することが可能です。最終的な定常状態の結果のみ検討する場合には、全ページの一覧表 S(スタディ) のように、周波数定常、或いは周波数一定常（単方向）を利用し、解析を実行します。

時間依存変化の結果を検討する場合には、周波数過渡、或いは周波数一過渡（単方向）を利用し、解析を実行します。また、温度依存物性値であるかどうかによって、選択すべきスタディタイプが異なります。例えば、温度上昇する際の導電率の変化を評価する必要がある場合、周波数定常 / 周波数過渡スタディタイプを使うべきです。一方、温度に対しての物性値変化を無視できる場合、単方向の周波数定常 / 周波数過渡スタディタイプを使用することが十分と考えられます。

今回の解析には、温度依存物性値を考えるために、周波数過渡タイプを使います。

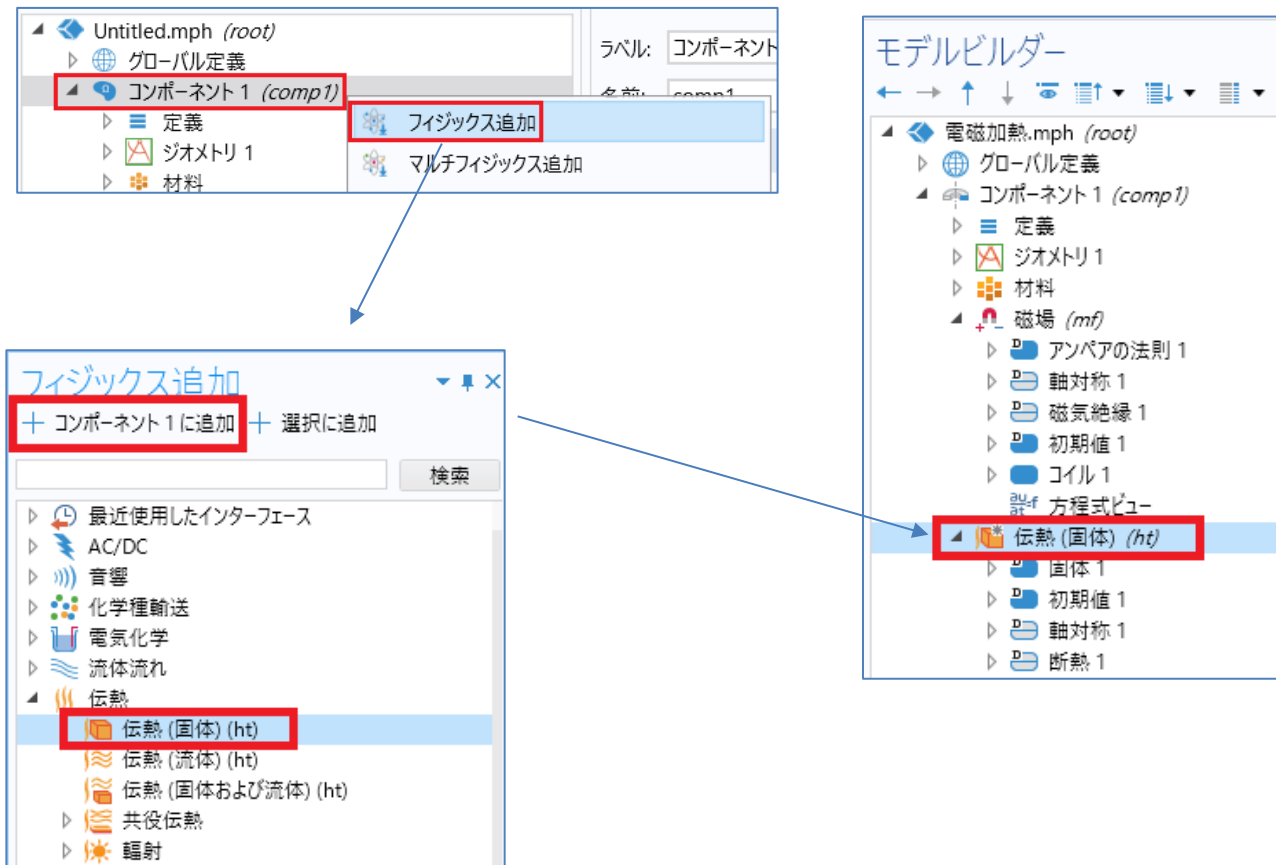
操作手順【誘導加熱解析】

後半の説明：誘導加熱解析

詳細な操作手順を説明します。

S1. フィジックスの追加

コンポーネント 1 を右クリックし、“フィジックス追加”を選択すると、画面右側にフィジックス追加する項目が表示されます。その中で、伝熱 (固体) (ht) を選択して、フィジックスに追加します。



S2. マルチフィジックスの追加

コンポーネント 1 を右クリックし、“マルチフィジックス追加”を選択すると、画面右側にマルチフィジックス追加する項目が表示されます。その中で、AC/DC > 電磁加熱 > 誘導加熱を選択して、マルチフィジックスに追加します。後半の一覧表 MP(マルチフィジックス) をご参照ください。

S3. 伝熱境界条件の設定

グローバル定義の下、パラメーターの所に、いくつかのパラメーターを定義します。Mt は冷却水の質量流量です。Tin は冷却水の入口温度です。Ac は冷却水管の断面積です。

“伝熱 (固体) (ht)” を右クリックして、“熱源” を選択し、チューブ中の水領域、ドメイン 4 を選択します。一般ソースがユーザーによって定義されます。式 $Mt \cdot ht \cdot Cp \cdot (T_{in} - T) / (2 \cdot \pi \cdot r \cdot Ac)$ を入力します。ht.Cp は熱容量です。r は r 方向座標です。*ht は伝熱インターフェイスの識別子となります。準備として、モデルビルダーのウィンドウ枠の「他オプション表示」ボタン (人間の目の形) をクリックし、「方程式ビュー」にチェックを入れます。

モデルビルダー

- 電磁加熱.mph (root)
 - グローバル定義
 - コンポーネント 1 (comp)
 - 定義
 - ジオメトリ 1
 - 材料
 - 磁場 (mf)
 - 伝熱 (固体) (ht)**
 - 固体 1
 - 初期値 1
 - 軸対称 1
 - 断熱 1

設定

熱源

ラベル: 熱源 1

ドメイン選択

選択: マニュアル

4

優先関係および寄与

方程式

材料タイプ

材料タイプ: 固体

熱源

熱源: 一般ソース

Q₀ ユーザー定義

$Mt \cdot ht \cdot Cp \cdot (T_{in} - T) / (2 \cdot \pi \cdot r \cdot Ac)$ W/m³

設定

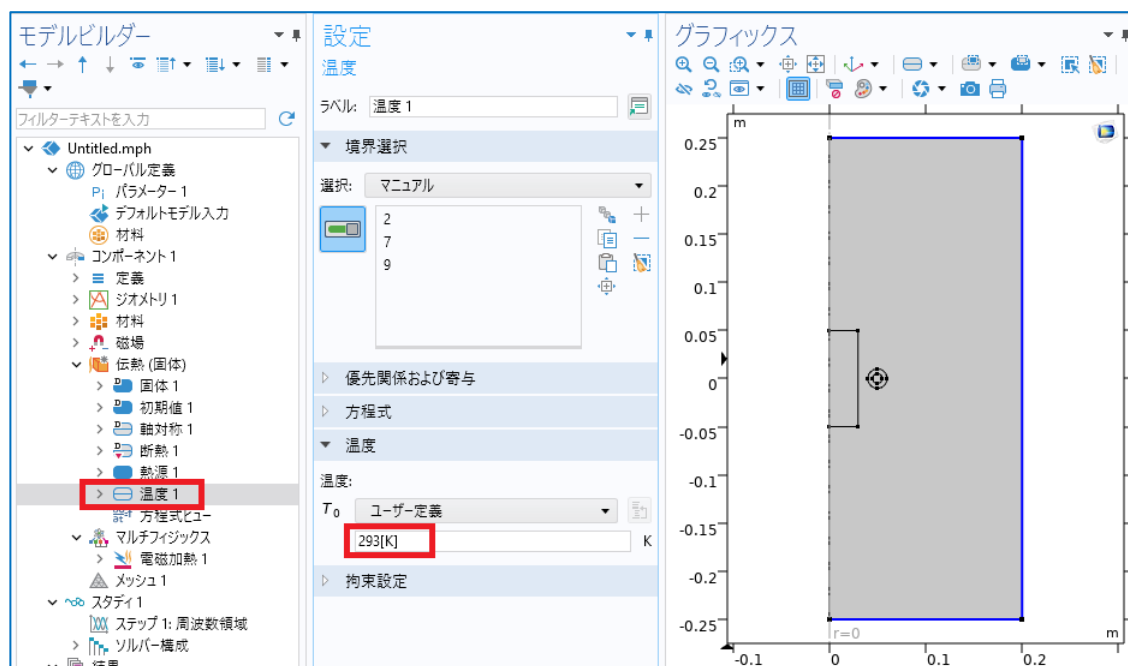
パラメーター

ラベル: パラメーター 1

パラメーター

名前	式	値
Rc	5[mm]	0.005 m
Ac	$\pi \cdot Rc^2$	$7.854E-5 \text{ m}^2$
Mt	1[kg/min]	0.016667 kg/s
Tin	10[degC]	283.15 K

もう一つの伝熱境界条件を追加します。“伝熱(固体)(ht)”を右クリックして、“温度”を選択し、外回りの境界 2、7、9 を選択します。

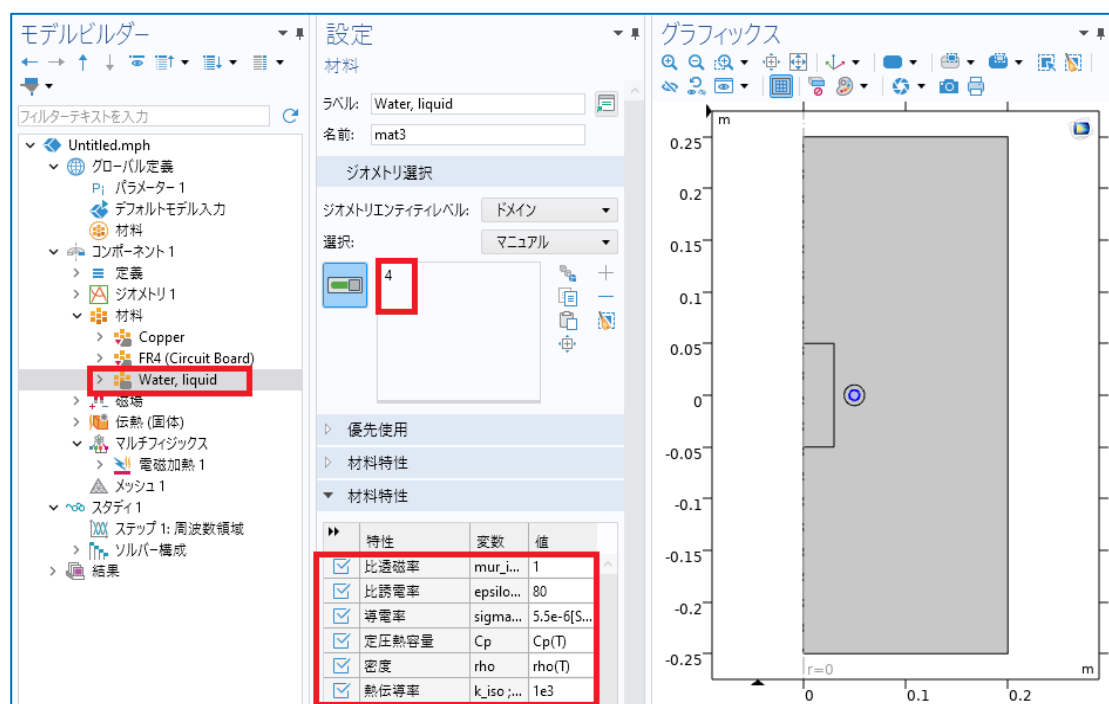


S4. 材料の追加

前半と同じように、“ライブラリから材料の追加”を利用し、材料水を追加します。

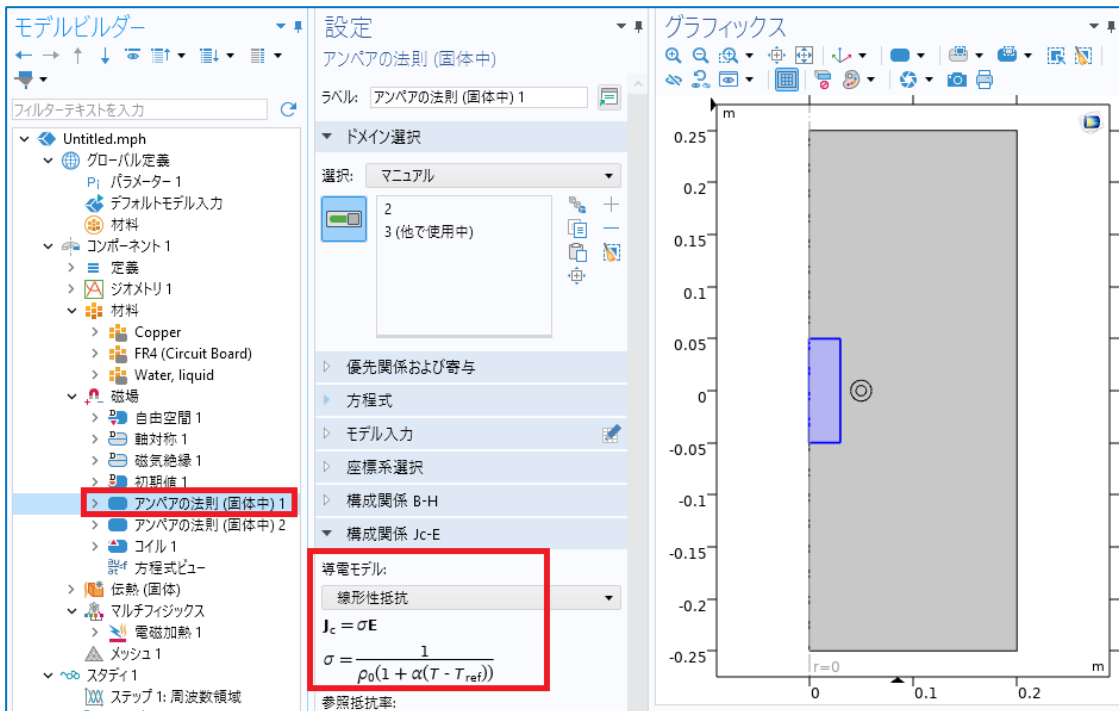
水は COMSOL Multiphysics® では Water,liquid と英語で表記されるため、Water,liquid を標準から選択し、“コンポーネントに追加”をクリックして水が材料に追加されます。

比透磁率が 1、比誘電率が 80、熱伝導率が 1e3 にします。ドメイン 4 を選択します。



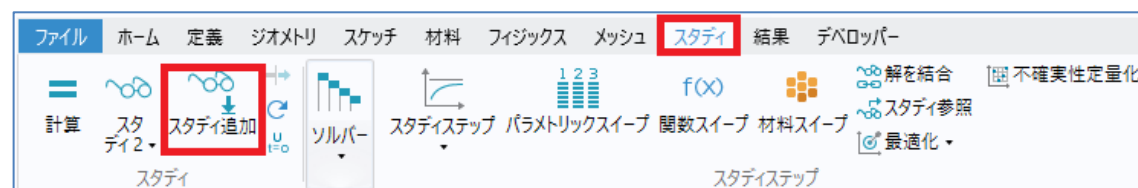
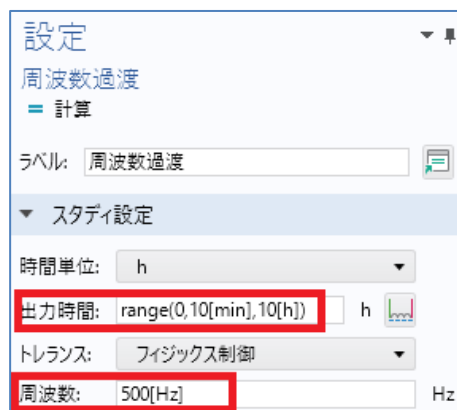
S5. 線形性抵抗条件の追加

“磁場”> “アンペアの法則（固体中）1”にて、導電モデル“線形性抵抗”を選択します。温度依存物性値を考えます。



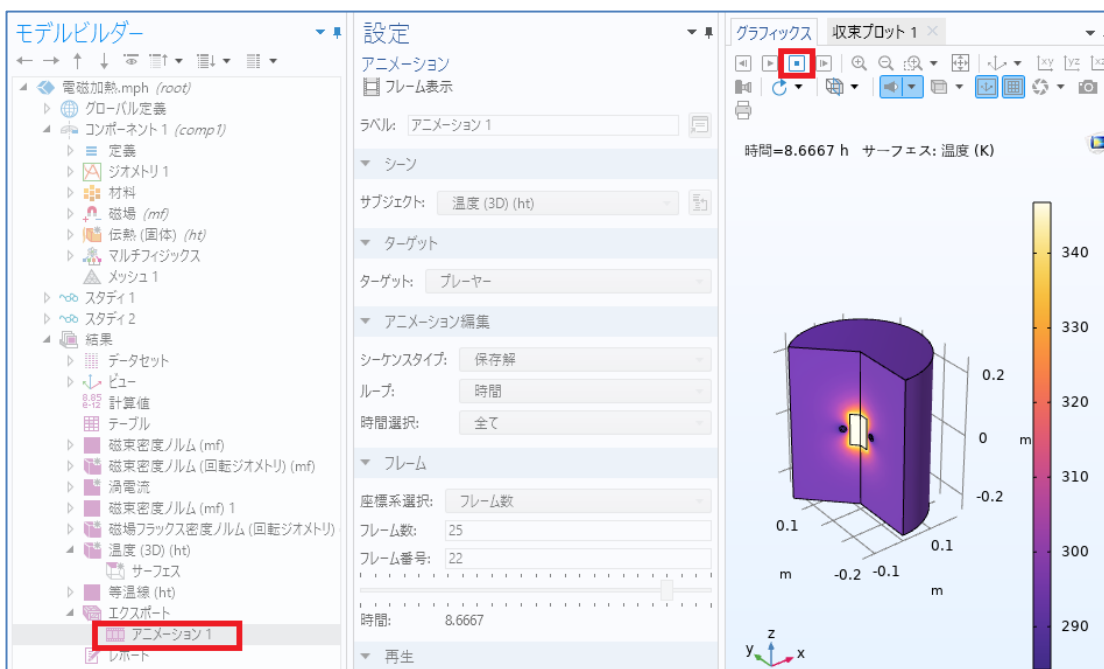
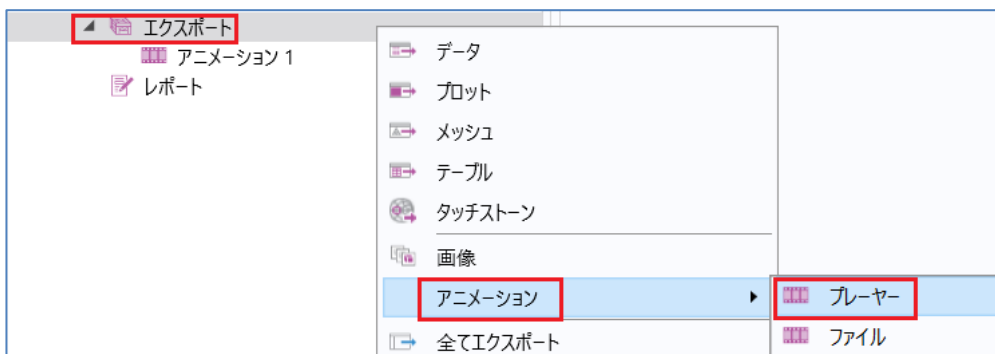
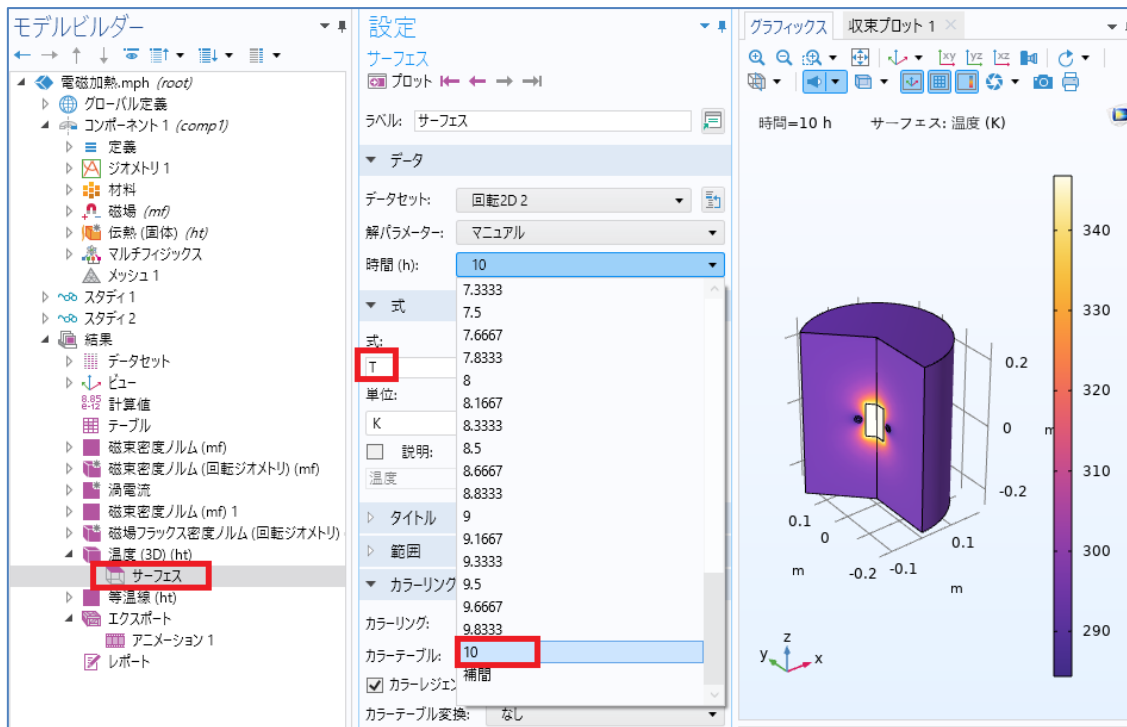
S6. スタディの追加と計算

リボンメニューに、スタディ>スタディ追加ボタンを押すと、画面右側にスタディ追加する項目が表示されます。後半の一覧表 S(スタディ) の通り、スタディタイプ周波数過渡を追加します。出力時間に range(0,10[min],10[h]) を入力します。周波数に 500[Hz] を入力します。そして、“計算” ボタンをクリックします。

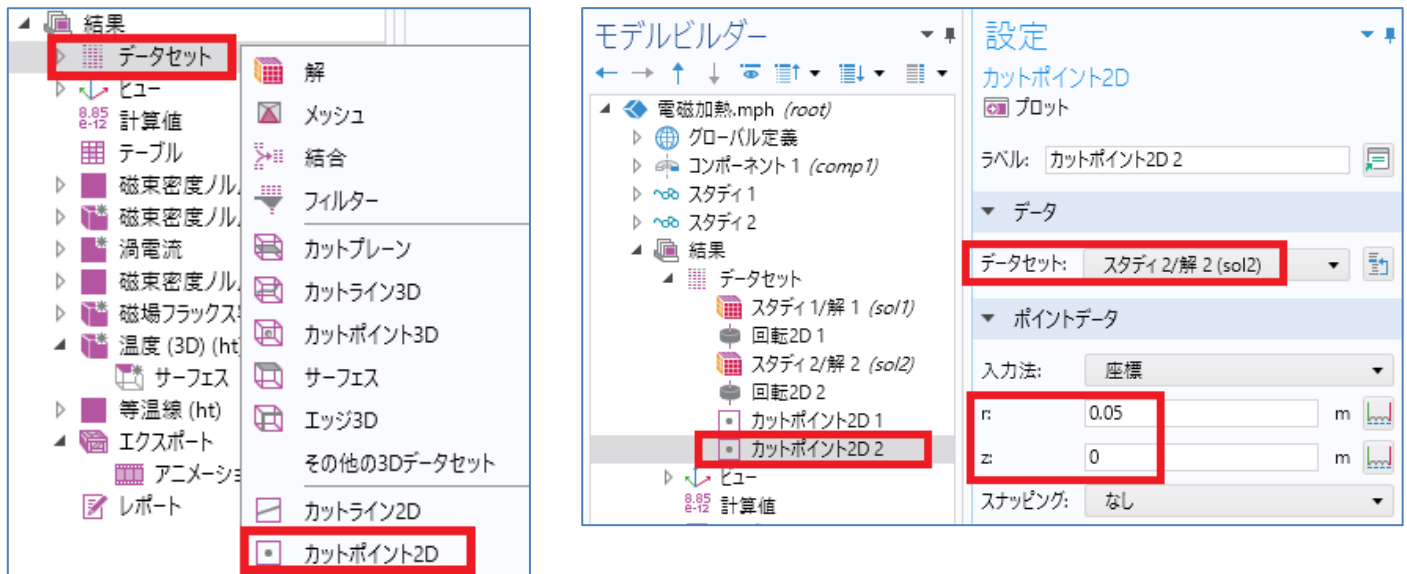


S7. 結果表示

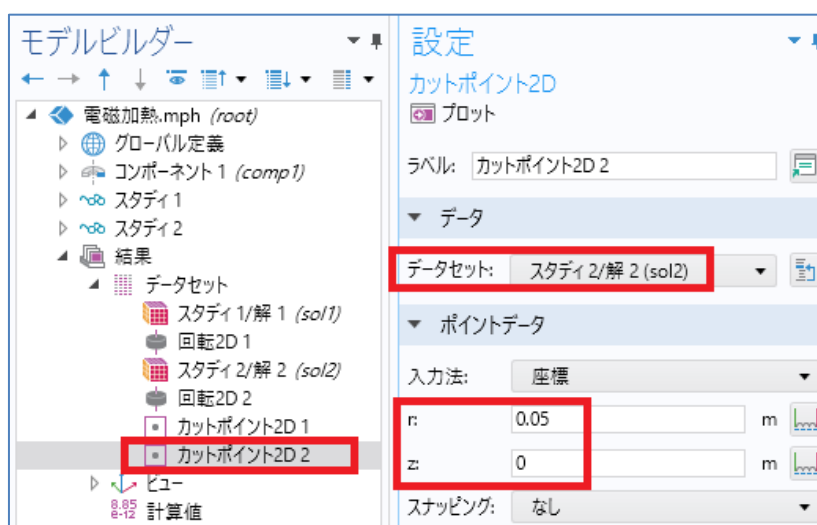
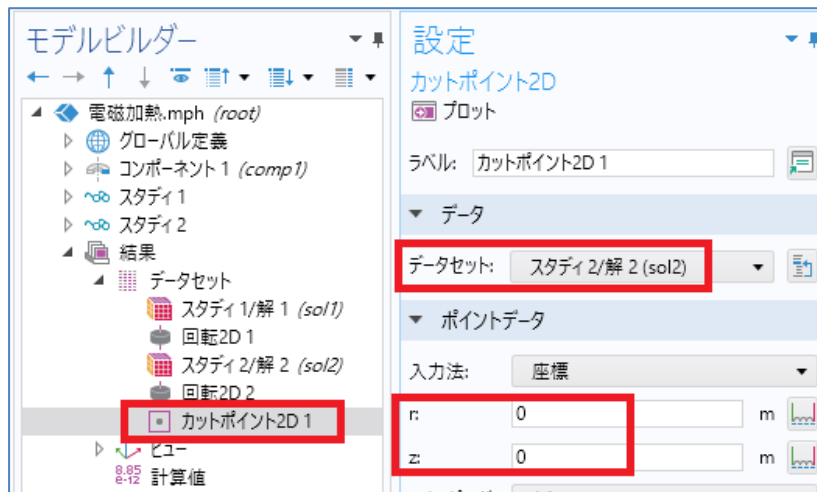
“結果 > 3D プロットグループ温度”を選択すると、3次元の温度分布がわかります。温度分布の時間変化を見たい場合には、“結果 > エクスポート”を右クリックして“アニメーション > プレーヤー”を選択します。そして、“サブジェクト：温度 (3D)(ht)”として再生ボタンを選択すると、温度分布のアニメーションが再生されます。



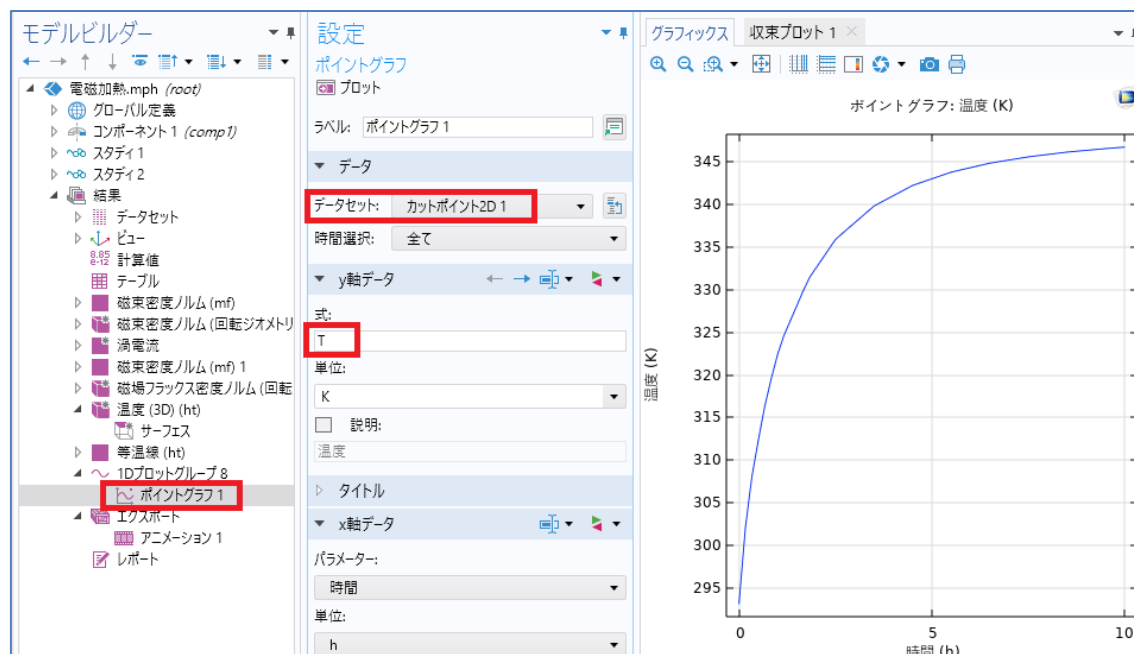
1D プロットグループにて、ポイントの温度変化を表示します。その前に、結果>データセットを右クリックし、二つのカットポイント 2D を作成します。



一方の r 座標および z 座標をそれぞれ 0、0 とし、もう一方の r 座標および z 座標をそれぞれ 0.05、0 にします。

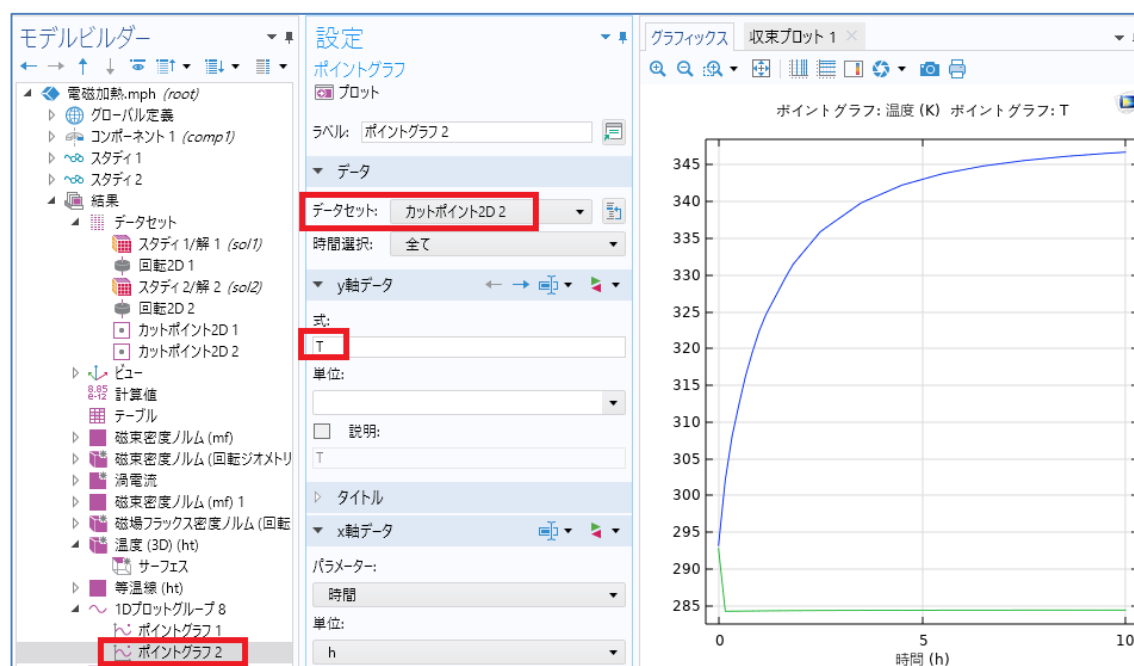


結果を右クリックし、1D プロットグループを選択します。1D プロットグループを右クリックし、ポイントグラフを選択します。ポイントグラフ設定ウィンドウにおいて、データセットをカットポイント 2D1 にし、式に T を入力します。



1D プロットグループを右クリックし、もう一つのポイントグラフを選択します。

ポイントグラフ設定ウィンドウにおいて、データセットをカットポイント 2D2 にし、式に T を入力します。



第 4 章

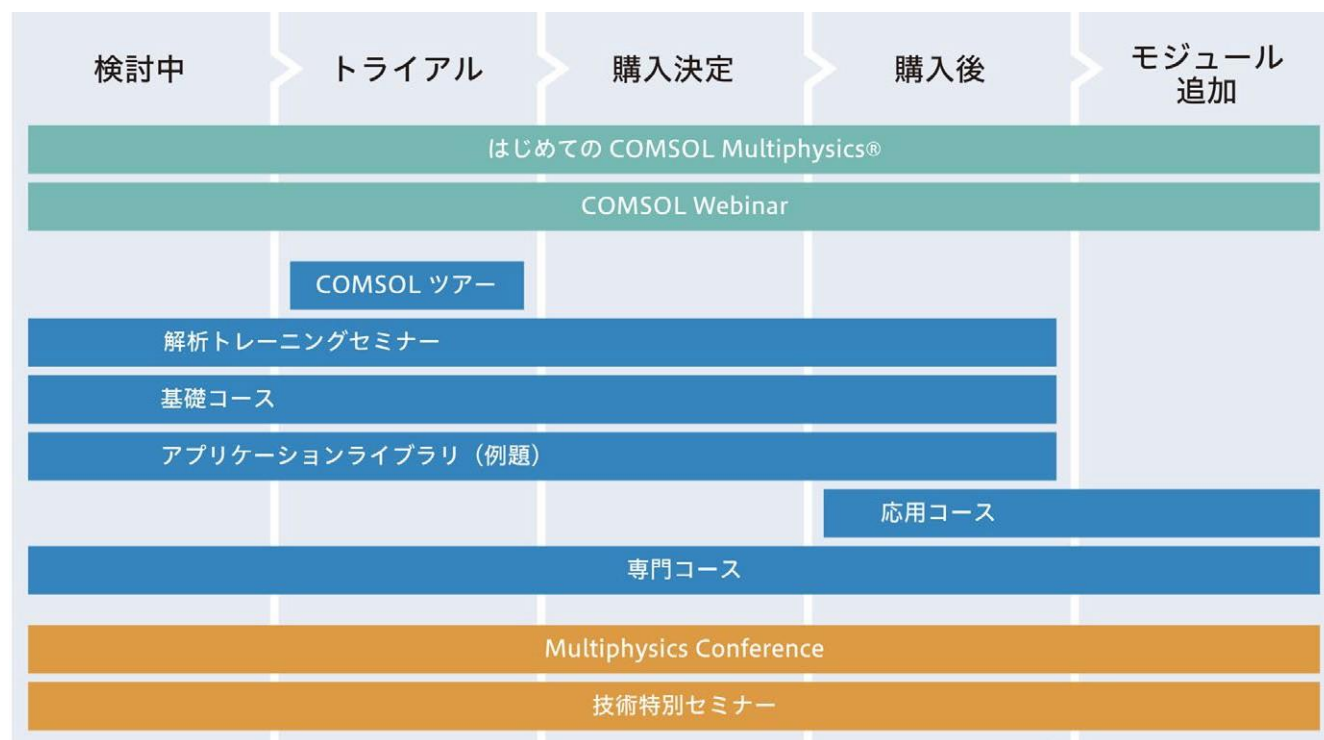
COMSOL Multiphysics® を より深く理解するために

COMSOL Multiphysics® を使用される方、
使用を検討している方に

4.1 COMSOL Multiphysics® を使用している方、使用を検討する方に

今まで、簡易な例題を通して COMSOL Multiphysics® の使用方法を説明してきました。COMSOL を用いることにより、複雑な物理現象を非常に簡易な操作で解析が可能であることがわかっていただけたら幸いです。そして、COMSOL Multiphysics® に関してより深く学びたい、使用を検討したいと思われたら、弊社の [無料セミナー] の受講・[無料トライアル版] や、COMSOL 社のラーニングセンター (<https://www.comsol.jp/learning-center>) の利用をお勧めします。

無料セミナーは、スタートアップセミナー、基礎コース、応用コース、専門コースに分類されます。これらのセミナーでは例題を解いて頂きながら COMSOL の操作手順を学びます。



4.2 無料セミナーに関して

無料セミナーに関しては、下記の弊社 HP のセミナーページをご覧ください。

<https://kesco.co.jp/seminar/>

4.3 無料トライアル版に関して

お試しに COMSOL Multiphysics® を使用したいという方に、無料トライアル版をご用意しております。下記のフォームからお問い合わせください。

<https://kesco.co.jp/trial/>

4.4 詳細な使用手順書および参考資料の検索

総合カタログおよび使用手順書

COMSOL Multiphysics® に関しての詳細な説明は、Reference manual という手順書に記載されています。Reference manual は COMSOL Multiphysics® をダウンロードした際に、PC 内において COMSOL のフォルダ内に保存されており、以下に詳細な保存場所を示します。COMSOL Multiphysics® に関してわからないことがございましたら、初めに Reference manual をご参照ください。

Reference Manual の保存フォルダ：(COMSOL インストールフォルダ)

¥COMSOL¥COMSOL62¥Multiphysics¥doc¥pdf¥COMSOL_Multiphysics¥ COMSOL_ReferenceManual.pdf

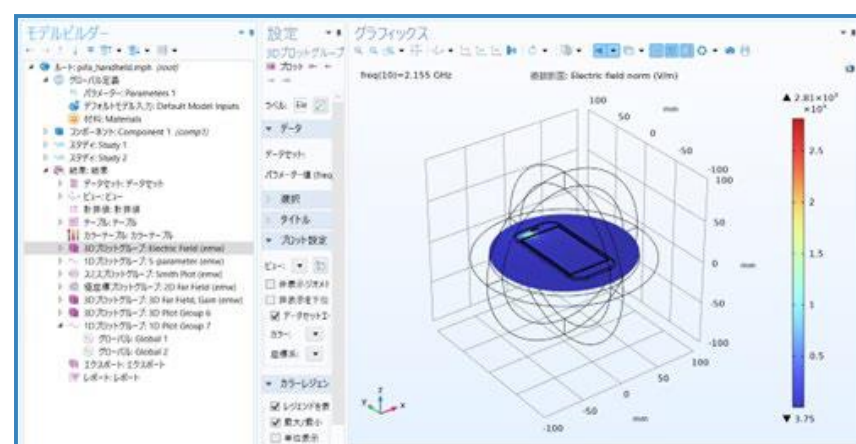
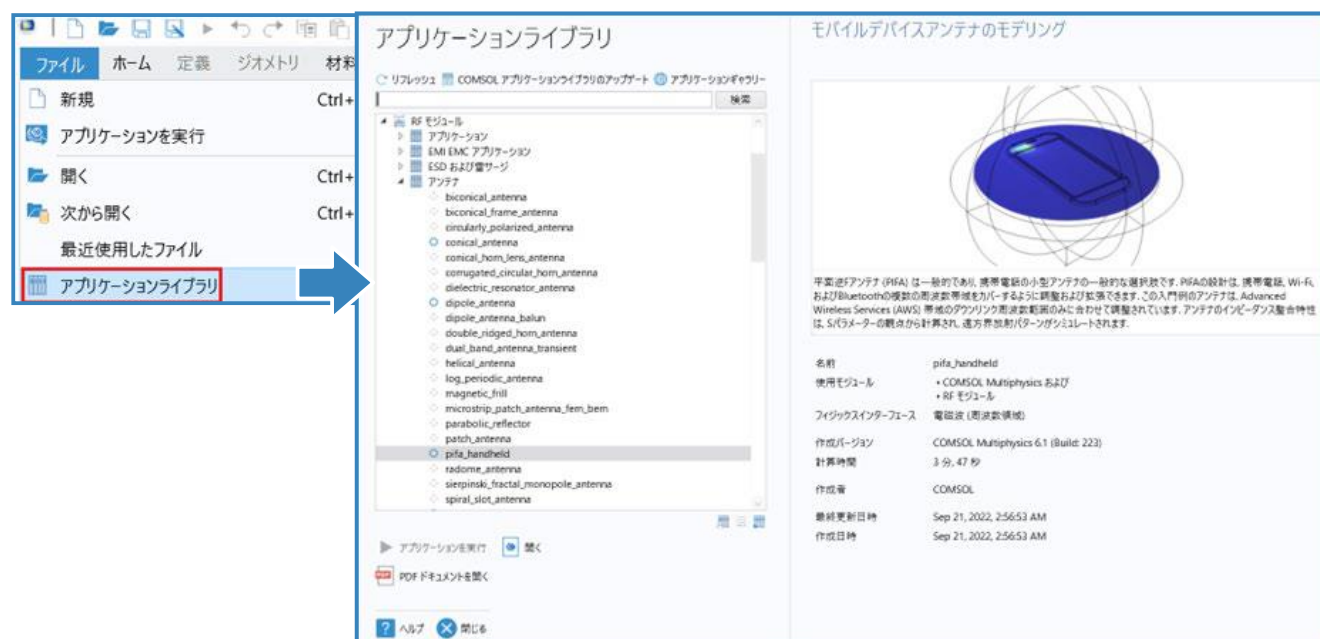
COMSOL 社が公開している情報

COMSOL 社の HP には、COMSOL に関する記事や、操作に関しての webinar(オンラインセミナー) が公開されており、これらを参照することにより効率よく学習できます。

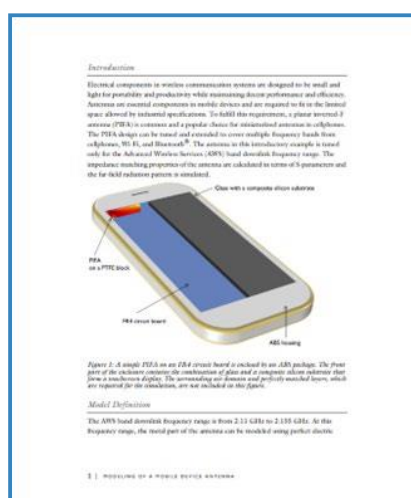
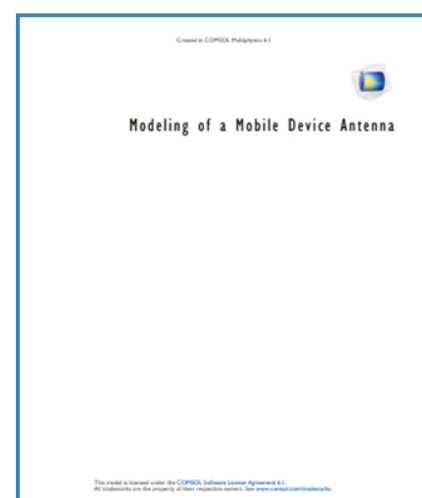
- COMSOL 社のホームページトップ：<https://www.comsol.jp/>
- COMSOL blog：<https://www.comsol.jp/blogs/>
- ラーニングセンター：<https://www.comsol.jp/learning-center>

4.6 各モジュールのサンプルに関して

COMSOL Multiphysics® ではソフトウェア内に例題を用意しております。”ファイル>アプリケーションライブラリ”を選択することで、サンプルが表示されます。その中から、お客様が使用したいモジュールを選択して頂くと各モジュールのモデルフィジックスが編集可能な状態で開かれます。pdf には問題の説明と操作手順が記載されています。サンプルはモデルとして完成しており、計算実行およびモデルの編集ができます。



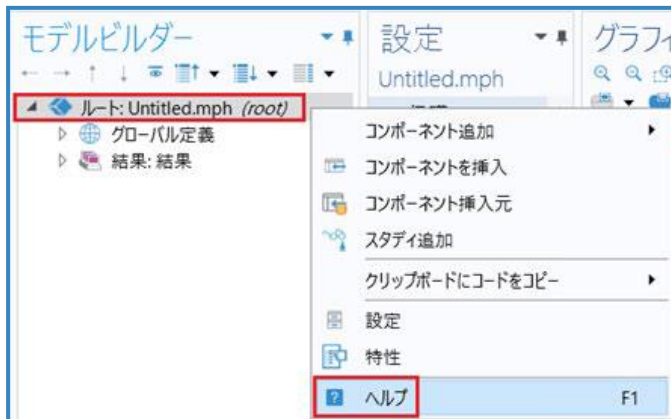
モデル画面



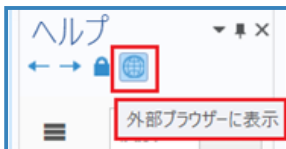
pdf ドキュメント

4.7 ダイナミックヘルプの日本語化に関して

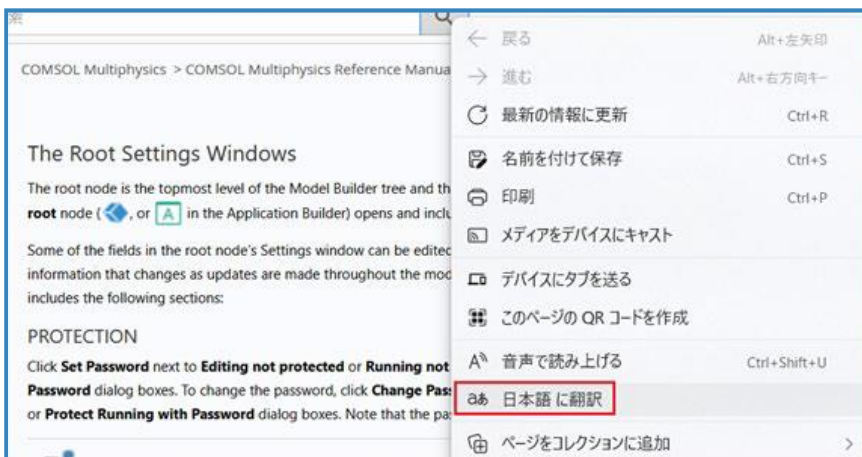
モデルビルダにおいて、ノードを右クリックしてヘルプをクリックすることで、ウィンドウ右側部分にダイナミックヘルプを表示できます。



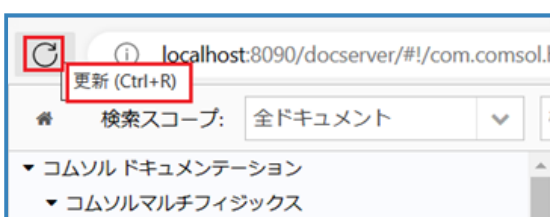
モデルビルダにおいて、ノードを右クリックしてヘルプをクリックすることで、ウィンドウ右側部分にダイナミックヘルプを表示できます。



Web ブラウザの機能を使用し、日本語化できます。



英語に戻すには、ページを更新します (Microsoft Edge, Google Chrome で確認済)。



4.8 お問い合わせ

COMSOL Multiphysics® に関するお問い合わせは、こちらからお願いします。計

測エンジニアリングシステム（株）Web サイト

[CONTACT/ お問い合わせ] <https://kesco.co.jp/contact/>

おわりに

今から数十年前、科学系雑誌の中に超並列コンピューターについての記事がありました。

当たり前ですが、コンピューターを使って問題を解くためにはソフトウェアが必要です。このソフトウェアの開発には現代でも膨大なコストがかかりますが、ソフトウェアに自動作成させようというのが著者のアイディアでした。

ユーザーは解きたい問題の内容や条件、求めたい結果を日常言語で書いて入力するだけ。あとは自動的に作成されたプログラムが計算を実行して結果の評価を待つだけ。こんな夢の未来像が描かれていました。

もちろん現在はここまで実現していません。条件設定は問題ごとに手作業が必要で、自動化できていません。

しかし「COMSOL Multiphysics®」は共通のプラットフォームで問題設定ができ、どんなものでも定形フォームのデータに変換して共通ソルバーで実行できる環境をサポートしています。

「夢の未来像」に最も近いソフトウェアといえるでしょう。

本書でお話した内容は、最先端のソフトウェア「COMSOL Multiphysics®」のほんの一端でしかありません。

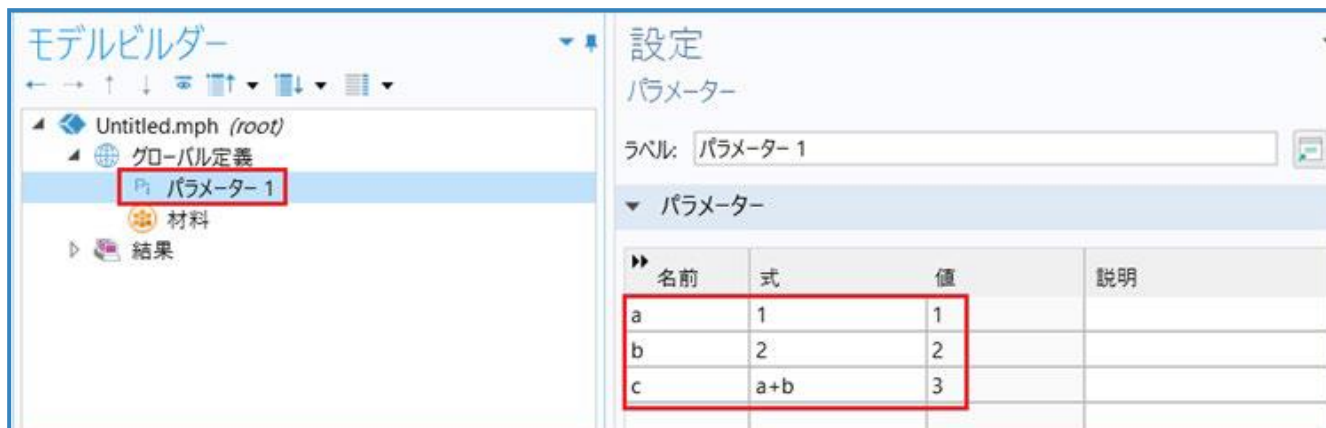
ご関心をお持ちの方は次のステップをご用意していますので、当社開催のセミナーやイベントへの参加をぜひご検討ください。

付録 関数

付録では、パラメータや数式、グラフの設定を説明します。COMSOL Multiphysics® で解析するときその力を十分に引き出すためには、いくつかの道具を習得する必要があります。付録で習得していきましょう。

付録1 パラメータの使用法に関して

- 1) パラメータにおいて式の定義を与えます。パラメータの設定において、新しい文字の定義において、上で設定した文字を使うことが可能です。例として、 $a=1$ 、 $b=2$ 「 $c=a+b$ 」とした場合、 c は「 $a=2$ 」、 $b=3$ という上に書かれた結果を用いて数値が定義されます。



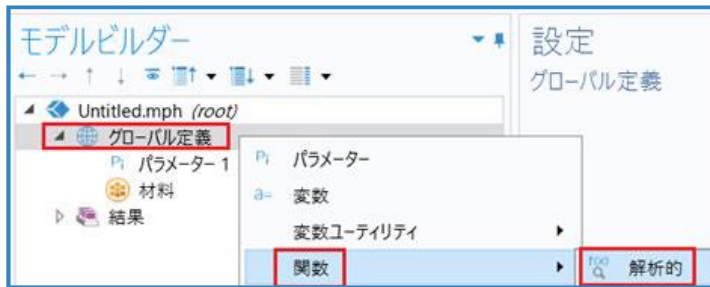
- 2) さらに下図では、 d と「 e 」をそれぞれ「 $c*a$ 」、 $d+a$ にすると、値は上側の設定を保存して計算されます。



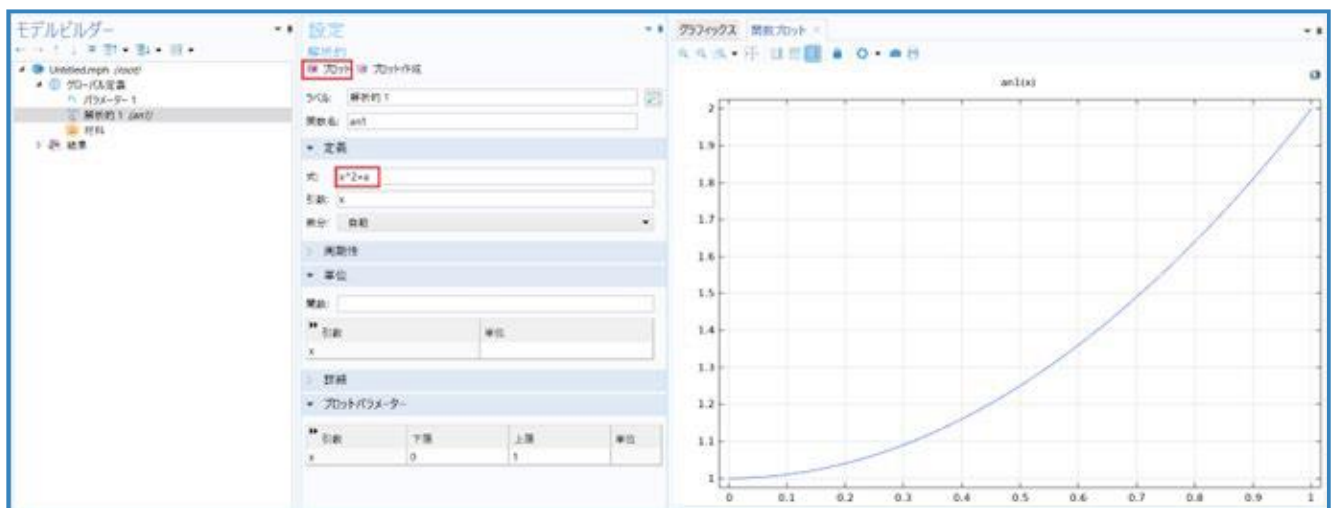
付録 2 関数の表示

1) 次に、関数の表示に関して説明します。

“グローバル定義”を右クリックして、“関数>解析的”を選択します。

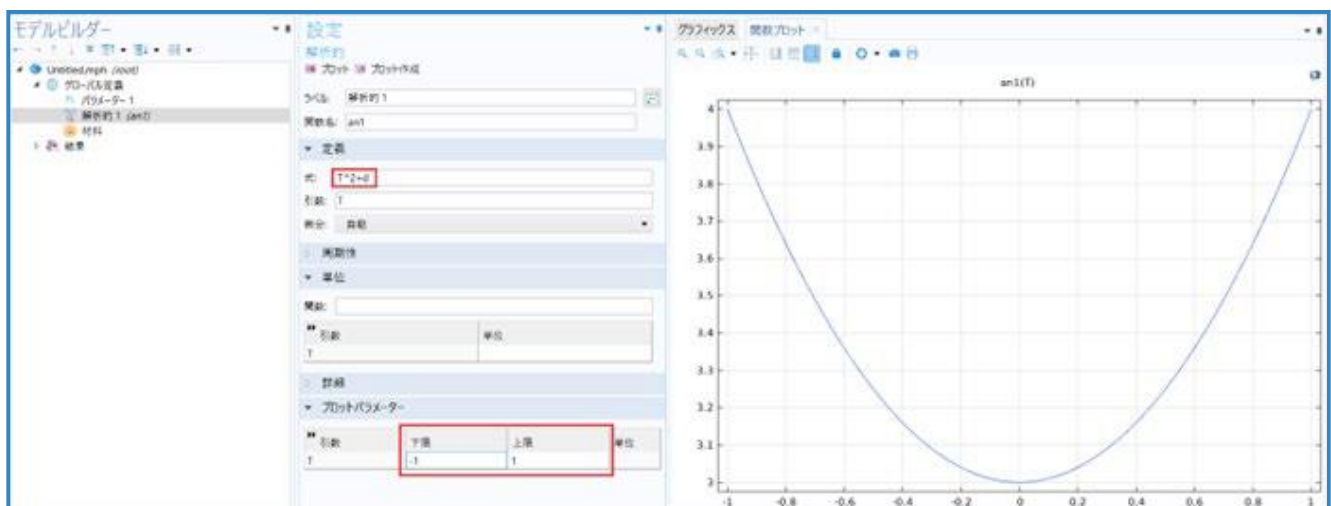


2) “解析的”の中にある「定義」の式を「 x^2+a 」とし、“プロット”を押すと下図のように簡単にグラフも書くことができます。COMSOL は各ノードの「式」を変形させることで表示したいグラフを示すことができます。



3) 式は、例えば温度関数の場合、式を「 T^2+d 」にした後に、「プロットパラメータ」で「引数」の上限および下限を単位と共に記載すると、下図のように表示範囲を設定できます。

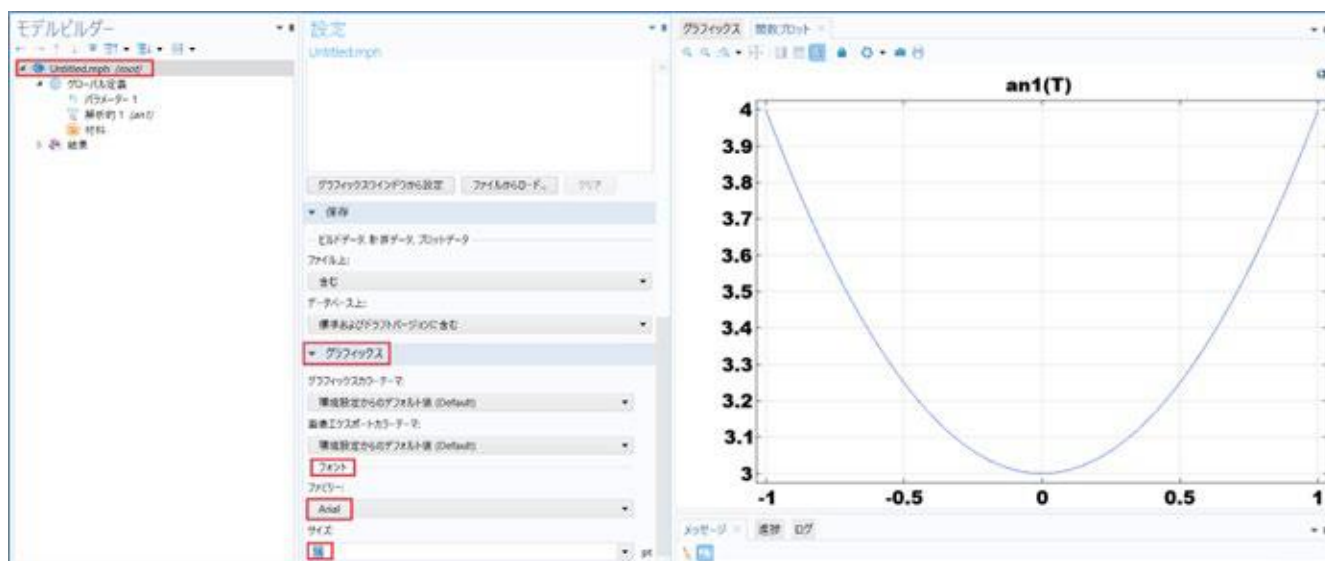
※ COMSOL はデフォルトでは SI 単位で計算します。SI 単位でない場合は単位を加える必要があります。



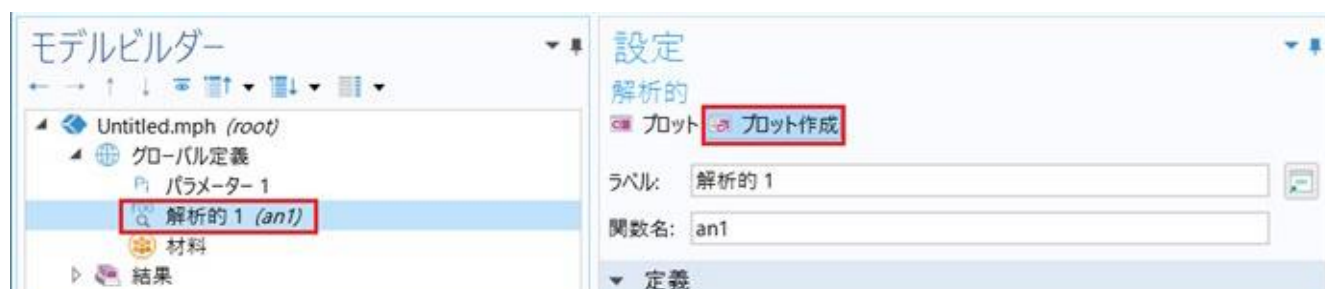
付録 3 文字の表記

グラフの文字に関してもフォントとサイズを変更することも簡単にできます。

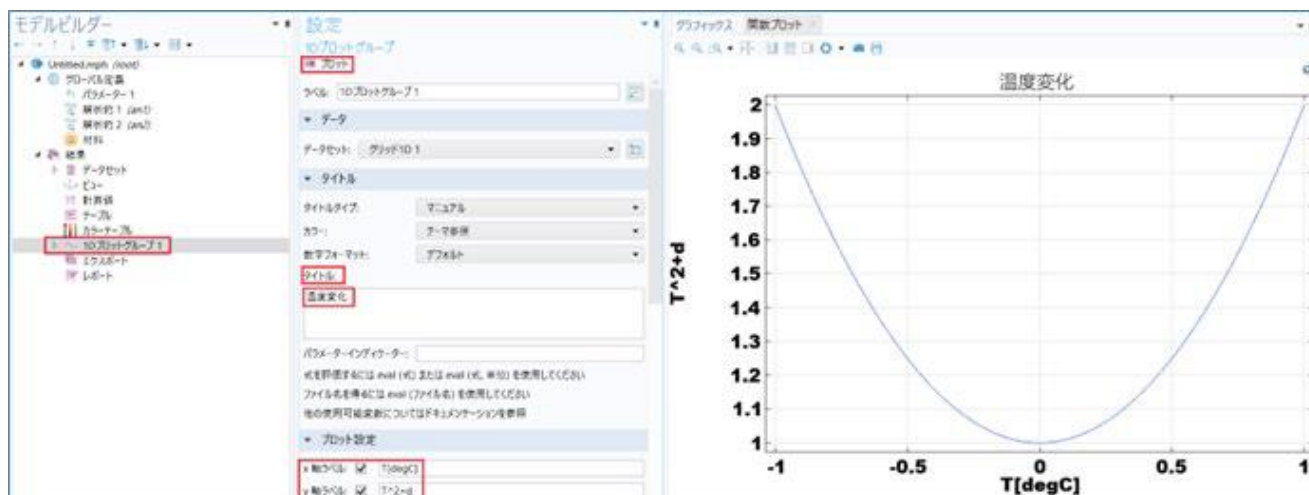
- 1) 「Untitled.mph」（このファイルの親ノード）をクリックすれば、グラフィックスセクションの「フォント」で変更できます。



- 2) グラフのタイトルや軸のラベルの変更も下図のように変更します。



- 3) そうすると“結果”に1Dプロットグループ”というノードができます。「タイトル」「プロット設定」において下図のように入力し、“プロット”をクリックすれば変更できます。



付録 4 数式、関数の表記

以下の表に、COMSOL Multiphysics で使用される。数式、関数、物理定数、演算子を記載しました。
(COMSOL Reference Manual より抜粋)

Unary, Binary, and List Operators and Their Precedence Rules

TABLE 5-1: UNARY OPERATORS

OPERATOR	DESCRIPTION
+	Unary plus
-	Unary minus
!	Logical not

The binary operators include arithmetic and logical operations.

TABLE 5-2: BINARY OPERATORS

OPERATOR	DESCRIPTION
+	Plus
-	Minus
*	Multiply
/	Divide
^	Power
==	Equal
!=	Not equal
>	Greater than
>=	Greater than or equal to
<	Less than
<=	Less than or equal to
&&	Logical and
	Logical or

In addition, you can use e or E to represent the power of 10 using a scientific notation (E notation). The following examples are equivalent and all represent 5.6·10⁷: 5.6*10^7, 5.6e7, and 5.6E7.

A comparison using a binary operator can be, for example $x < 1$, which returns 1 (true) if x is smaller than 1 and 0 (false) otherwise. For a composite comparison such as $0 < x < 1$, you can achieve it using $(0 < x) * (x < 1)$. An expression like $0 < x < 1$ is possible to use but is evaluated as $(0 < x) < 1$, which for an x in the interval is interpreted as $1 < 1$ and thus returns 0 instead of 1 for all such value of x .

For simulating “if statements”, use the if operator instead of logical expressions. If you use logical expressions, values that are Inf can propagate to NaN, making a plot empty, for example.

The following operators are used for precedence, grouping, lists, and unit definitions:

TABLE 5-1: UNARY OPERATORS

OPERATOR	DESCRIPTION
()	Parentheses for controlling precedence in expressions
{ }	Vector and tensor expressions
,	Element separator in lists
.	Scoping operator
[]	Unit

The following list shows the precedence order for the operators above:

TABLE 5-4: PRECEDENCE LEVELS

PRECEDENCE LEVEL	SYMBOL	DESCRIPTION
1	() {} .	Grouping, lists, namespace
2	^	Power
3	! - +	Unary: logical not, minus, plus
4	[]	Unit
5	* /	Multiplication, division
6	+ -	Addition, subtraction
7	< <= > >=	Comparisons: less than, less than or equal, more than, more than or equal
8	== !=	Comparisons: equal, not equal
9	&&	Logical and
10		Logical or
11	,	Element separator in lists

Mathematical and Numerical Constants

The following table includes the built-in mathematical and numerical constants. The names of these constants are reserved names. You cannot use such reserved constant names when creating user-defined variables and parameters.

TABLE 5-5: MATHEMATICAL AND NUMERICAL CONSTANTS

NAME	DESCRIPTION
eps	Floating-point relative accuracy (machine epsilon, 2^{-52} or about $2.2204 \cdot 10^{-16}$, for double floating-point numbers).
i, j	Imaginary unit, -1 .
inf, Inf	Infinity, ∞ . A value larger than what can be handled with floating-point representation. Use the isinf and isnan operators to test if expressions are evaluated as infinity or not-a-number, respectively.
NaN, nan	Not-a-number. An undefined or unrepresentable value such as the result of $0/0$ or inf/inf .
pi	Pi (about 3.141592653589793).

Mathematical Functions

The following list includes the built-in mathematical functions that you can use when defining parameters and variables or directly in expressions in the physics interface or feature settings, for example. The function names are reserved names that cannot be used for user-defined functions, but they can be used for variable and parameter names. These functions do not have units for their input or output arguments (unless where noted for trigonometric functions).

TABLE 5-6: BUILT-IN MATHEMATICAL FUNCTIONS

NAME	DESCRIPTION	SYNTAX
<code>abs</code>	Absolute value	<code>abs(x)</code>
<code>acos</code>	Inverse cosine (in radians)	<code>acos(x)</code>
<code>acosh</code>	Inverse hyperbolic cosine	<code>acosh(x)</code>
<code>acot</code>	Inverse cotangent (in radians)	<code>acot(x)</code>
<code>acoth</code>	Inverse hyperbolic cotangent	<code>acoth(x)</code>
<code>acsc</code>	Inverse cosecant (in radians)	<code>acsc(x)</code>
<code>acsch</code>	Inverse hyperbolic cosecant	<code>acsch(x)</code>
<code>arg</code>	Phase angle (in radians)	<code>arg(z)</code>
<code>asec</code>	Inverse secant (in radians)	<code>asec(x)</code>
<code>asech</code>	Inverse hyperbolic secant	<code>asech(x)</code>
<code>asin</code>	Inverse sine (in radians)	<code>asin(x)</code>
<code>asinh</code>	Inverse hyperbolic sine	<code>asinh(x)</code>
<code>atan</code>	Inverse tangent (in radians)	<code>atan(x)</code>
<code>atan2</code>	Four-quadrant inverse tangent (in radians)	<code>atan2(y,x)</code>
<code>atanh</code>	Inverse hyperbolic tangent	<code>atanh(x)</code>
<code>besselj</code>	Bessel function of the first kind	<code>besselj(n,z)</code>
<code>bessely</code>	Bessel function of the second kind	<code>bessely(n,z)</code>
<code>besseli</code>	Modified Bessel function of the first kind	<code>besseli(n,z)</code>
<code>besselk</code>	Modified Bessel function of the second kind	<code>besselk(n,z)</code>
<code>binomial</code>	Binomial coefficient $\binom{n}{k}$	<code>binomial(n,k)</code>
<code>ceil</code>	Nearest following integer	<code>ceil(x)</code>
<code>conj</code>	Complex conjugate	<code>conj(x)</code>
<code>cos</code>	Cosine	<code>cos(z)</code>
<code>cosh</code>	Hyperbolic cosine	<code>cosh(x)</code>
<code>cot</code>	Cotangent	<code>cot(x)</code>
<code>coth</code>	Hyperbolic cotangent	<code>coth(x)</code>
<code>csc</code>	Cosecant	<code>csc(z)</code>
<code>csch</code>	Hyperbolic cosecant	<code>csch(x)</code>
<code>erf</code>	Error function	<code>erf(x)</code>
<code>erfinv</code>	Inverse error function	<code>erfinv(x)</code>
<code>exp</code>	Exponential function e^x . That is, <code>exp(1)</code> is the mathematical constant e (Euler's number)	<code>exp(x)</code>
<code>factorial</code>	Factorial of nonnegative integer	<code>factorial(n)</code>
<code>floor</code>	Nearest previous integer	<code>floor(x)</code>
<code>gamma</code>	Gamma function	<code>gamma(x)</code>

TABLE 5-6: BUILT-IN MATHEMATICAL FUNCTIONS

NAME	DESCRIPTION	SYNTAX
gcd	Greatest common divisor	gcd(a,b)
imag	Imaginary part	imag(x)
legendre	Legendre polynomial and associated Legendre polynomial of integer degree and order (see legendre for more information)	legendre(l,x) legendre(l,m,x)
log	Natural logarithm	log(x)
log10	Base-10 logarithm	log10(x)
log2	Base-2 logarithm	log2(x)
max	Maximum of two arguments	max(x,y)
min	Minimum of two arguments	min(x,y)
mod	Modulo operator	mod(x,y)
poweps	Power for use with derivatives of expressions that need to be evaluated near zero (see poweps and sqrtps for more information)	poweps(x,n)
psi	Psi function and its derivatives (psi(0,x) is the digamma function)	psi(k,x)
random	Random function, uniform distribution	random(x,y,...)
randomnormal	Random function, normal (Gaussian) distribution	randomnormal(x,y,...)
range	Create a range of numbers (see Entering Ranges and Vector-Valued Expressions)	range (start,step,end)
real	Real part	real(x)
round	Round to closest integer or to closest number with specified precision p (number of decimal digits). For negative p , round to closest integer number divisible by $10^{(-p)}$.	round(x) round(x,p)
sec	Secant	sec(z)
sech	Hyperbolic secant	sech(x)
sign	Signum function	sign(x)
sin	Sine	sin(z)
sinh	Hyperbolic sine	sinh(x)
sphericaly	Spherical harmonic function (see sphericaly for more information)	sphericaly (l,m,theta,phi)
sphericalyr	Real spherical harmonic function (see sphericalyr for more information)	sphericalyr (l,m,theta,phi)
sqrt	Square root	sqrt(x)
sqrtps	Square root for use with derivatives of expressions that need to be evaluated near zero (see poweps and sqrtps for more information)	sqrtps(x)
tan	Tangent	tan(z)
tanh	Hyperbolic tangent	tanh(x)
zernike	Zernike polynomial function (see zernike for more information)	zernike(n,m,r,phi)

Physical Constants

Physical constants are fundamental, universal constants that represent physical quantities. COMSOL Multiphysics includes the most widely used physical constants as built-in constants. Table 5-7 lists all supported physical constants with their names, symbol (variable name), value, and SI unit. The values are taken from Ref. 1 and include the SI unit.

TABLE 5-7: PHYSICAL CONSTANTS

NAME	SYMBOL	VALUE
Acceleration of gravity	g_const	9.80665[m/s ²]
Avogadro constant	N_A_const	6.02214076e23[1/mol]
Boltzmann constant	k_B_const	1.380649e-23[J/K]
Characteristic impedance of vacuum (impedance of free space)	Z0_const	376.730313461...[ohm] ($\mu_0 \cdot c$)
Electron mass	me_const	9.10938356e-31[kg]
Elementary charge	e_const	1.602176634e-19[C]
Faraday constant	F_const	96485.33289[C/mol]
Fine-structure constant	alpha_const	7.2973525664e-3
Gravitational constant	G_const	6.67408e-11[m ³ /(kg*s ²)]
Molar volume of ideal gas (at 273.15 K and 1 atm)	V_m_const	22.413962e-3[m ³ /mol]
Neutron mass	mn_const	1.674927471e-27[kg]
Permeability of vacuum (magnetic constant)	mu0_const	$2 \cdot \alpha_{\text{const}} \cdot h_{\text{const}} / c_{\text{const}} / e_{\text{const}} / e_{\text{const}}$ (H/m)
Permittivity of vacuum (electric constant)	epsilon0_const	$1 / \mu_0_{\text{const}} / c_{\text{const}} / c_{\text{const}}$ (F/m)
Planck's constant	h_const	6.62607015e-34[J*s]
Planck's constant over 2 pi	hbar_const	1.05457180e-34[J*s]
Proton mass	mp_const	1.672621898e-27[kg]
Speed of light in vacuum	c_const	299792458[m/s]
Stefan-Boltzmann constant	sigma_const	5.670367e-8[W/(m ² *K ⁴)]
Universal gas constant (molar gas constant)	R_const	8.3144598[J/(mol*K)]
wien displacement law constant	b_const	2.8977729e-3[m*K]

REFERENCE

1. *The NIST Reference on Constants, Units, and Uncertainty*, <http://physics.nist.gov/cuu/Constants/index.html>

Built-In Operators

There are special built-in operators available for modeling and for evaluating results; these operators are similar to functions but behave differently. Many physics interfaces use these operators to implement equations and special functionality. See Table 5-8 and the detailed descriptions that follow.

TABLE 5-8: BUILT-IN OPERATORS

OPERATOR	DESCRIPTION	LINK TO MORE INFORMATION
<code>adj(expr)</code>	Evaluate expression using the adjoint sensitivity.	adj
<code>at</code>	Access the solution at any time.	at
<code>atlocal</code>	Evaluate expression at given local coordinates in each mesh element.	atlocal
<code>attimemax</code> <code>attimemin</code>	Evaluate an expression at the time where another expression achieves its maximum or minimum.	attimemax and attimemin
<code>atxd</code> , <code>atonly</code> , <code>nox</code>	Evaluation of expressions in extra dimensions.	atxd , atonly , and nox
<code>ballint(r,expr)</code> , <code>ballavg(r,expr)</code> , <code>circint(r,expr)</code> , <code>circavg(r,expr)</code> , <code>diskint(r,expr)</code> , <code>diskavg(r,expr)</code> , <code>sphint(r,expr)</code> , <code>sphavg(r,expr)</code>	Evaluate the integral or average of the expression on the specified shape with radius r .	ball , circle , disk , and sphere
<code>bdf(expr,i)</code>	Apply backward differentiation formula of order i on expression.	bdf
<code>bndenv(expr)</code>	Evaluate the expression expr at the coordinates of a particle or ray at a boundary.	env , bndenv , and noenv
<code>centroid(expr)</code>	Evaluate the expression expr in the centroid of the mesh element to which the point belongs.	centroid
<code>circumcenter(expr)</code>	Evaluate the expression expr in the circumcenter of the mesh element to which the point belongs.	circumcenter
<code>d(f,x)</code>	Differentiation operator. Differentiation of f with respect to x .	Differentiation Operators: d , pd , dtang , and frame.dt
<code>depends(expr)</code> <code>depends(expr,var)</code>	True if expression expr depends on the solution or var , respectively.	depends
<code>dest(expr)</code>	Evaluate parts of an integration coupling expression on destination side.	dest
<code>down(expr)</code>	Evaluate expression as defined in adjacent downside.	up and down
<code>dtang(f,x)</code>	Tangential differentiation of an expression f defined on a boundary with respect to a spatial dimension x .	Differentiation Operators: d , pd , dtang , and frame.dt

OPERATOR	DESCRIPTION	LINK TO MORE INFORMATION
<code>elemint(gporder,expr)</code>	Integrate expression over each mesh element using the specified Gauss point pattern.	elemint
<code>elemavg(gporder,expr)</code>	Evaluate elementwise average of expression using the specified Gauss point pattern.	elemavg
<code>elemgpmin(gporder,expr)</code>	Evaluate elementwise minimum of expression over Gauss points with the specified pattern.	elemgpmin
<code>elemgpmax(gporder,expr)</code>	Evaluate elementwise maximum of expression over Gauss points with the specified pattern.	elemgpmax
<code>emetric(exprx,expy)</code> <code>emetric(exprx,expy,exprz)</code>	The square of the length of the global vector (exprx , expy , exprz) computed in the mesh element's own metric.	emetric
<code>env(expr)</code>	Evaluate the expression expr at the coordinates of a particle or ray in a domain.	env , bndenv , and noenv
<code>error('string')</code>	Generates an error with error message string .	error
<code>frame.dt(expr)</code>	Compute time derivative with respect to a specified frame	Differentiation Operators: d , pd , dtang , and frame.dt
<code>fsens(p)</code> <code>fsensimag(p)</code>	Functional sensitivity with respect to control variable p . Functional sensitivity with respect to imaginary part of control variable p .	fsens and fsensimag
<code>gpeval(gporder,expr)</code> <code>gpeval(gporder,expr,exorder)</code>	Evaluate expression in the specified Gauss point pattern and extrapolate the result to the input evaluation points.	gpeval
<code>if(cond,expr1,expr2)</code>	Conditional expression evaluating the second or third argument depending on the value of the condition.	if
<code>integrate(expr,var,lower,upper)</code>	Evaluate integral of general expression with respect to an integration variable over a real interval specified by lower and upper limits.	integrate
<code>isdefined(variable)</code>	Returns one where the variable is defined and zero where it is not defined.	
<code>isinf(expr)</code>	True if expression evaluates to infinity.	isinf and isnan
<code>islinear(expr)</code>	True if expression is a linear function of the solution.	islinear
<code>isnan(expr)</code>	True if expression evaluates to NaN (not-a-number).	isinf and isnan
<code>jacdepends(expr)</code> <code>jacdepends(expr,var)</code>	True if the derivative of the expression expr with respect to the solution depends on the solution or var , respectively.	jacdepends

OPERATOR	DESCRIPTION	LINK TO MORE INFORMATION
<code>laginterp(order,expr)</code>	Map an expression to a Lagrange field of a specified order and then evaluate on that field in each mesh element.	laginterp
<code>lindev</code>	Evaluate an expression linearized at the linearization point (when a linearization point is stored in the solution).	lindev
<code>linper</code>	Mark a load term to be used in a Linear perturbation solver.	linper
<code>linpoint</code>	Access the linearization point (when a linearization point is stored in the solution).	linpoint
<code>linsol</code>	Access the standard solution (for example inside <code>linpoint</code> or <code>lintotal</code>).	linsol
<code>lintotal</code>	Access the sum of the linearization point and linear perturbation.	lintotal
<code>lintotalavg</code>	Evaluate average of <code>lintotal(expr)</code> over all phases.	lintotalavg
<code>lintotalpeak</code>	Evaluate maximum of <code>lintotal(expr)</code> over all phases.	lintotalpeak
<code>lintotalrms</code>	Evaluate RMS of <code>lintotal(expr)</code> over all phases.	lintotalrms
<code>linzero</code>	Evaluate expression with zero solution.	linzero
<code>mean(expr)</code>	Mean value of expression as evaluated on adjacent boundaries.	mean
<code>nif(cond1,expr1,...,condn,exprn,exprn+1)</code>	Nested if operator. Evaluating the expr after the first cond to return true.	nif
<code>noenv(expr)</code>	Evaluate an expression expr that is defined only on particles or rays, not the domain or boundary where the particles or rays are located.	env , bndenv , and noenv
<code>nojac(expr)</code>	No contribution to the Jacobian.	nojac
<code>pd(f,x)</code>	Differentiation operator. Differentiation of f with respect to x . No chain rule for dependent variables.	Differentiation Operators: d, pd, dtang, and frame.dt
<code>ppr</code>	Polynomial-preserving derivative recovery.	ppr and pprint
<code>pprint</code>	Polynomial-preserving derivative recovery within each domain group.	ppr and pprint
<code>prev(expr,i)</code>	Evaluate expression at the i th previous time step.	prev
<code>reacf(u) reacf(u,dim)</code>	Accurate evaluation of reaction forces and fluxes.	reacf
<code>realdot(a,b)</code>	Treat complex numbers a and b as real 2-vectors and return their dot product.	realdot
<code>residual(expr)</code>	Evaluate last computed residual.	residual

OPERATOR	DESCRIPTION	LINK TO MORE INFORMATION
<code>scope.atenti(ent, expr)</code> <code>scope.ati(coordinate exprs, expr)</code>	Evaluate the mesh-independent expression expr at an <i>i</i> -dimensional entity with number ent .	entity at
<code>scope.ati(coordinate exprs, expr, 'evaltype')</code>	Evaluate the expression expr at an <i>i</i> -dimensional entity in the point with coordinates given by the coordinate expressions coordinate exprs . For example, comp1.at3 for a 3D entity in a component with the name comp1 .	spatial at
<code>sens(expr, i)</code>	Evaluate expression using the forward sensitivity for the parameter given by the second argument.	sens
<code>setconst(const, value)</code>	Define temporary constant in withsol and withparam .	setconst
<code>setind(par, index)</code> <code>setval(par, value)</code>	Specify parameter index or parameter value in withsol and withparam .	setind and setval
<code>shapeorder(variable)</code>	The element order used for discretization of a variable.	shapeorder
<code>side(entity, expr)</code>	Evaluate expression as defined in the adjacent entity.	side
<code>stddev(operator, arg1, arg2, ...)</code>	Evaluate the standard deviation for an integration, projection, or summation operator	stddev
<code>subst(expr, expr1_orig, expr1_subst, ...)</code>	Substitute variables in an expression with other variables or expressions.	subst and substval
<code>substval(expr, val1_orig, val1_subst, ...)</code>	Evaluate an expression with the current values of variables.	subst and substval
<code>sum(expr, index, lower, upper)</code>	Evaluate sum of general expression for all indices from lower to upper.	sum
<code>test(expr)</code>	Test function operator.	test
<code>timeint, timeavg</code>	Integrate or compute the average of a time- dependent expression over a time interval.	timeint and timeavg
<code>timemax, timemin</code>	Evaluate the maximum or minimum of an expression over time.	timemax and timemin
<code>treatasconst(expr)</code>	Treat expr as independent of the solution.	treatasconst
<code>try_catch(tryExpr, catchExpr)</code>	Attempt to evaluate tryExpr ; but if this fails for any point, catchExpr is evaluated instead.	try_catch
<code>uflux(u), dflux(u)</code>	Evaluate the flux associated to a dependent variable <i>u</i> into the domains on the up and down sides of a boundary, respectively.	Boundary Flux Operators: uflux and dflux

OPERATOR	DESCRIPTION	LINK TO MORE INFORMATION
up(expr)	Evaluate expression as defined in adjacent upside.	up and down
var(expr,fieldname1,fieldname2, ...)	Variation operator.	var
with	Access specific solutions during results evaluation.	with
withparam(tag,expr)	Access the solution parameters for the solution defined by solver tag.	withparam
withsol(tag,expr)	Access solution defined by solver tag.	withsol

付録 5 変数の設定と物理定数の値の確認

グローバル定義＞パラメーターでの変数入力の際は、値の欄にて計算結果を確認できます。

▼ パラメーター		
名前	式	値
A	N_A_const	6.02214076E23 1/mol
a1	3+2i	3+2i
a2	3+2j	3+2i
B	sin(pi/2)	1
b1	exp(a1)	-8.35853265093537+18.2637270406668i
B1	sin(3.1/2)	0.999783764189357
pi0	pi	3.14159265358979

変数の確認

変数 a1 を $3+2i$ とし、変数 b を $\exp(a)$ としたとき、値の欄にて計算結果を確認できます。
変数 a2 は虚数単位として j を使用した例です。値では i に変換されています。

物理定数の確認

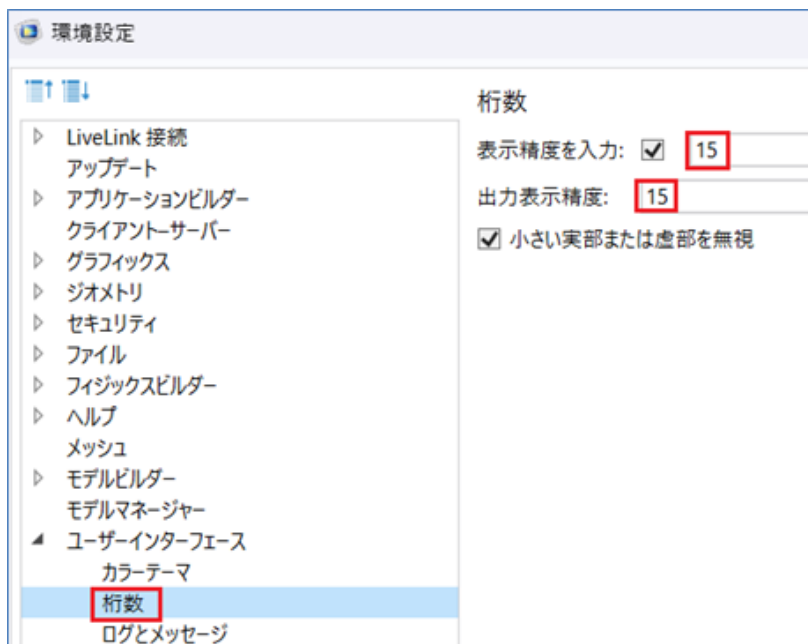
変数 A をアボガドロ定数 (N_A_const) としたときに、実際の値を確認できます。

π を使った場合と実際に数値を入力した場合の計算結果の差

$\sin(\pi/2)$ と $\sin(3.1/2)$ の計算結果には若干の差が出るので、有効数字には特に注意が必要です。

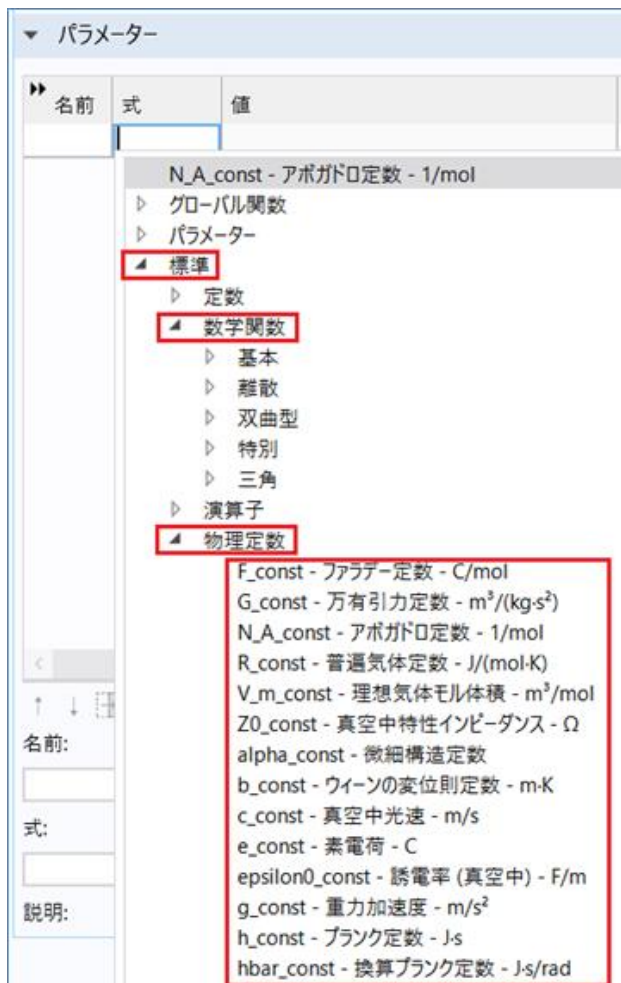
表示精度の最大値

表示精度の最大値は 15 です。

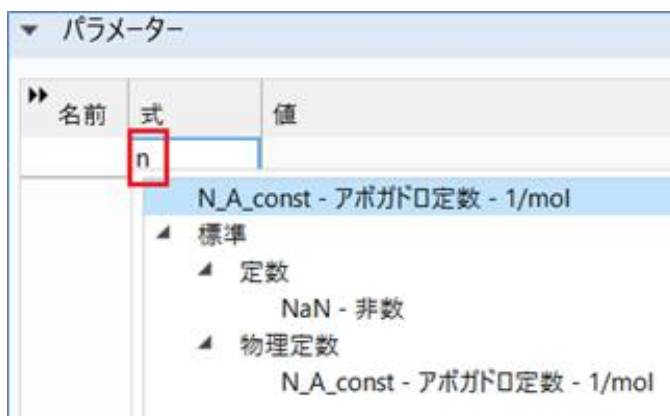


付録 6 物理定数・関数群の一覧表示と検索

パラメーターの式の欄においては、空白の状態ですべての物理定数や関数群の一覧を表示できます。



途中まで定数の名前を憶えていて、後ろの方を忘れて出てこないときには、ctrl キーを押した後に、space キーを押すことで、候補を表示できます。アボガドロ定数は大文字 N から始まることも確認できます。



はじめての COMSOL Multiphysics®

2015 年 10 月 29 日 初版発行

2024 年 3 月 1 日 第 9 版1刷発行

COMSOL Multiphysics® 日本総代理店
計測エンジニアリングシステム株式会社

東京都千代田区内神田 1-9-5 SF 内神田ビル 5F
代表 Tel. 03-5282-7040

<https://www.kesco.co.jp>

本書の内容の無断複製・転載などをご遠慮ください。