

COMSOL Multiphysics

Ver.4.2

超速入門

橋口 真宜

計測エンジニアリングシステム株式会社

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

本書の著作権は著者が有しています。複製・転用などの行為は一切不可です。

目次

本書のねらい

1. COMSOL Multiphysics とは
2. 図形・メッシュの作成による基本操作の習得
例題 1 「図形を作ってメッシュを張ってみよう」
3. シングルフィジックス
例題 2 「丸棒の変位を計算してみよう」
例題 3 「電位分布を計算してみよう」
例題 4 「温度分布を計算してみよう」
例題 5 「水の流れを計算してみよう」
4. マルチフィジックス
例題 5 「部屋の中の温風の動きと温度分布を計算してみよう」
例題 6 「加熱による構造体の変形を計算してみよう」
5. さらに進んだ解析に進むには

本書のねらい

本書は COMSOL Multiphysics の操作法を短期間に習得したい人のために作成しました。読者が目指すマルチフィジックス解析に習熟するには、まずもってシングルフィジックスの理解が重要です。計算解析を行うには形状の作成およびメッシュの作成法の習得も必要です。

従って、本書では形状作成の方法を最初に学習します。この作業を通じて、COMSOL の GUI に関する考え方のほとんどを習得できます。

続いて、複雑な現象解析の基本である構造力学、静電場、伝熱、流体力学という 4 つのシングルフィジックスについて学習を進めていくことで、フィジックスを扱う作業の流れについて理解できるようにしました。

最後に、マルチフィジックスとして、流体力学と伝熱、構造力学と伝熱について 2 例ほど例題を示します。

高度な形状作成にも進みやすいように各例題の中でブーリアン演算、ワークプレーンによる 2D 描画および押し出しによる 3D 化の手法についても説明しています。メッシュも単純なものから高度なものまで説明しています。

解析解との比較といった計算結果の妥当性の検証作業も重要です。そのあたりの方法についても触れています。

本書の内容を、何度も反復学習することで、COMSOL Multiphysics を使ったさらにハイレベルの解析にも容易に進めるものと思います。

本書に関するご意見、ご希望などありましたら、著者まで連絡をお願いします。

橋口 真宜

平成 23 年 7 月 13 日

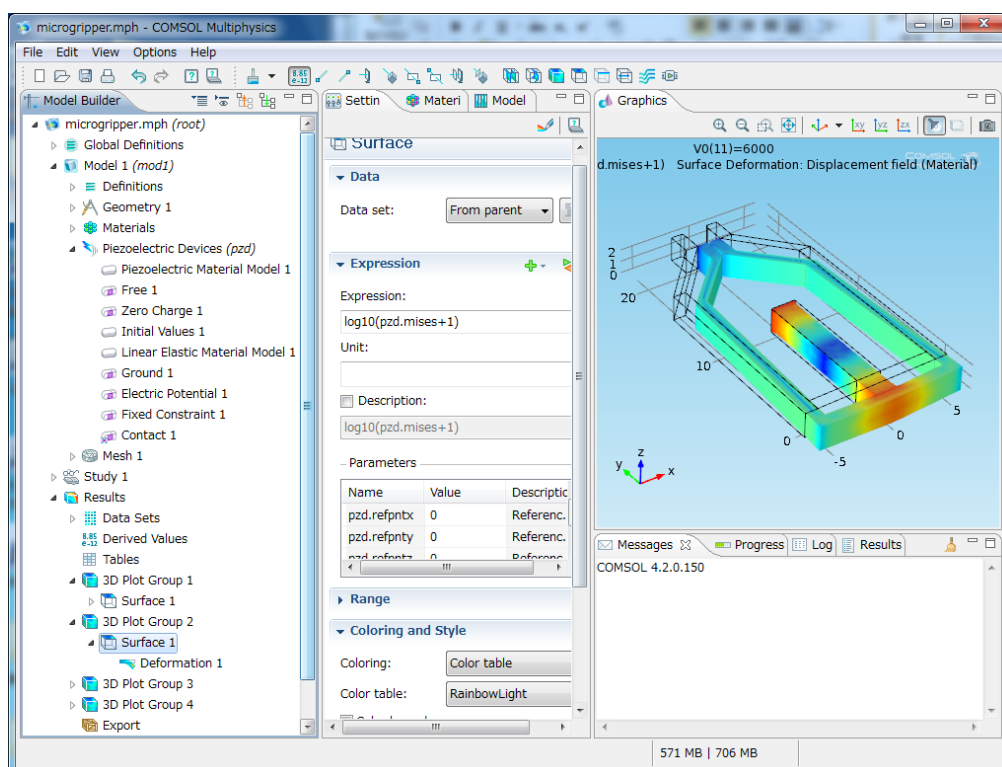
hashiguchi@kesco.co.jp

1. COMSOL Multiphysics について

- 開発元：COMSOL 社（スウェーデン）
- 国内販売総代理店：計測エンジニアリングシステム株式会社（東京）
- 特徴
 - 1) 偏微分方程式の初期値、境界値問題の数値計算を行います。
 - 2) 有限要素法で数値解を求めます。
 - 3) 形状作成～問題の定義～メッシュ作成～計算～結果の処理という一連の操作を統合グラフィカルユーザーインターフェースで実行できます。
 - 4) 複数の物理を連成して解くことができます。連成数は無制限です。
 - 5) 基本モジュールおよび専門分野別モジュールがあり、専門分野別モジュールで専門的問題解決を支援するとともに、その過程で既定外の応用が必要な場合には基本モジュールにある偏微分方程式インターフェースを使って独自の方程式を追加・連成ができます。
 - 6) 単独のフィジックスあるいはマルチフィジックスを扱う上で必要な式や変数の定義などは数式を直接入力できます。従って、変更も容易に行えます。

●GUI

モデルビルダーに問題を定義することが主な作業になります。COMSOL がプロトタイプを作成するので、解決したい問題との差異部分を定義するだけで済みます。

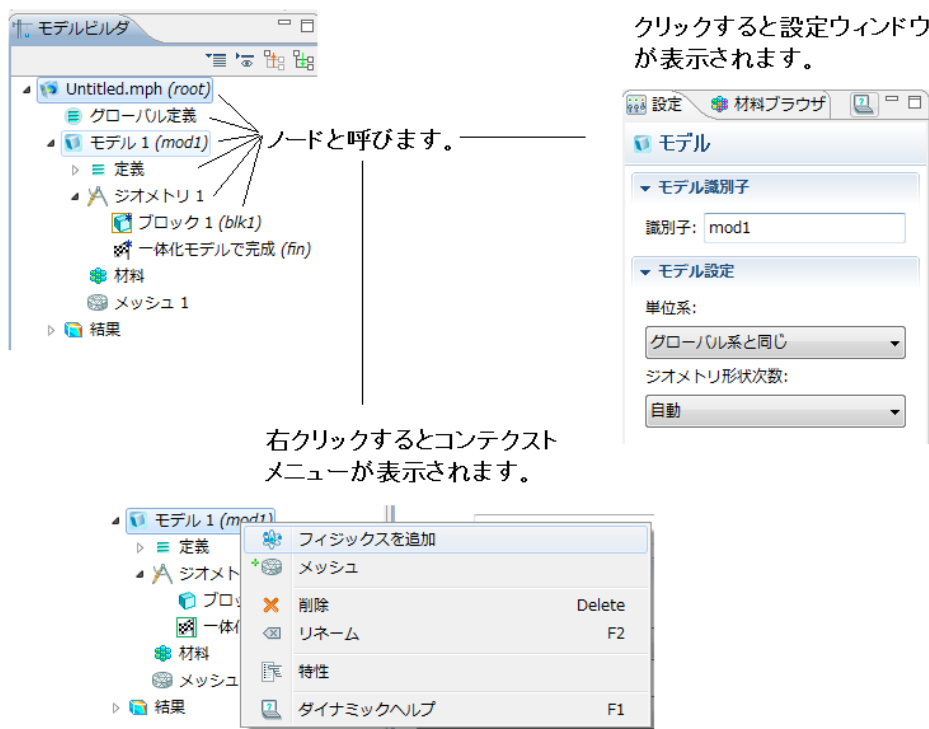


モデルビルダーの説明

1) 画面の遷移

複数のノードからなるツリー構造になっています。各ノードをクリックすれば設定ウィンドウが表示され、各ノードを右クリックすればコンテキストメニューが表示されます。

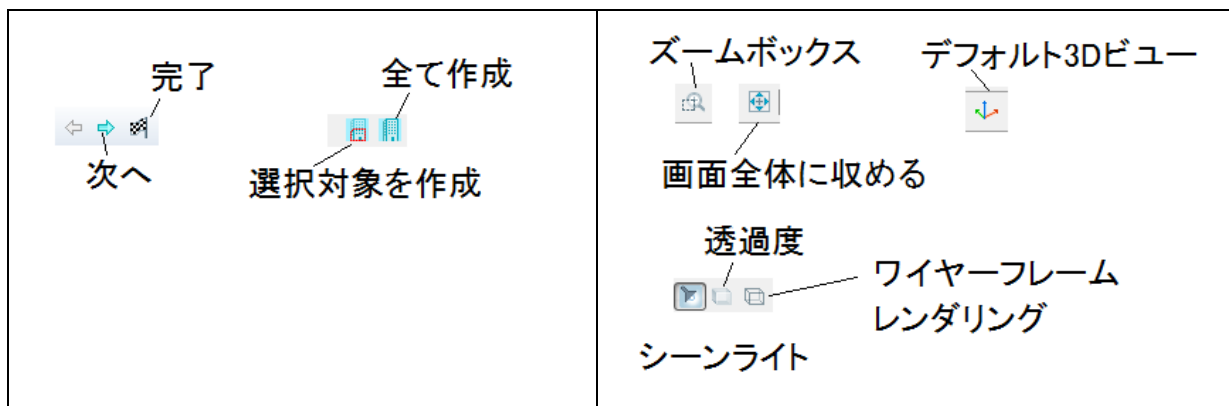
画面の遷移図



右クリックするとコンテキストメニューが表示されます。

2) 基本的なボタンの紹介

[モデルビルダー/モデルウィザード/設定ウィンドウ] [グラフィックスウィンドウ]



2. 図形・メッシュの作成による基本操作の習得

例題1 「図形を作ってメッシュを張ってみよう」

ミニマムのプロトタイプで図形とメッシュの作成を行いながら、基本操作を学習します。

ミニマムのプロトタイプの立ち上げ

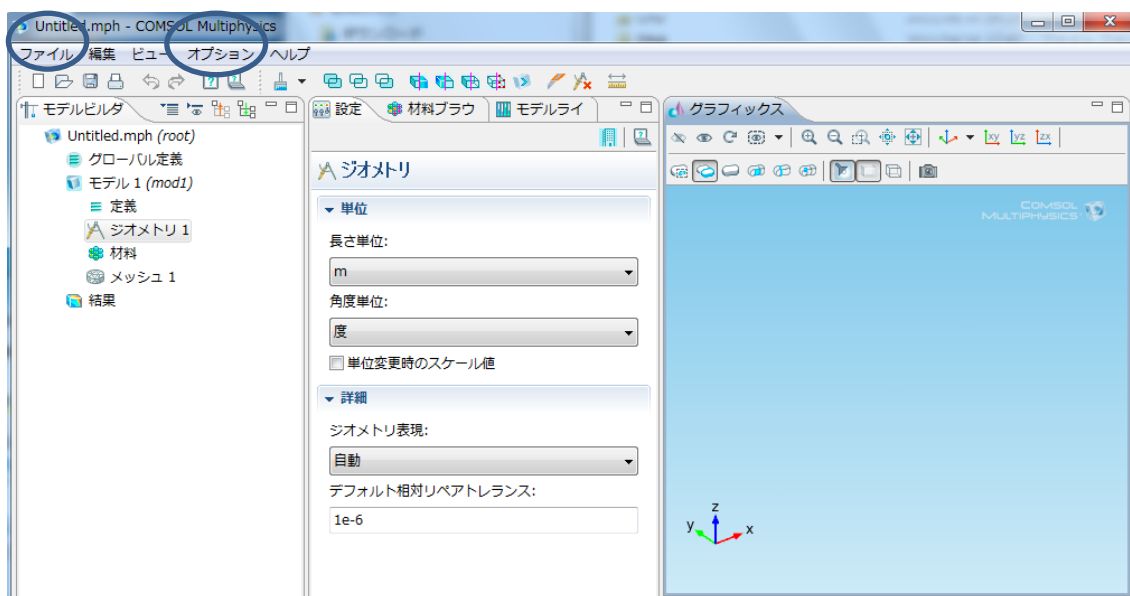
1) COMSOL Multiphysics 4.2 をクリックします。

言語の切り替えが必要なときは、**オプションメニュー** > **オプション** > **環境設定** で言語の選択を行い、初期化を完了させるために **COMSOL** を **ファイルメニュー** で閉じた後、再び、**COMSOL** を立ち上げます。

2) **モデルウィザード** で **3D** を選び、**完了** をクリックします。

もし、別の操作を行って **モデルウィザード** が表示されなくなった場合には、**root** ノードを右クリックして **モデル追加** を選択します。

3) **モデルビルダ** が以下のミニマム構成になっていることを確認します。



円柱の作成

長さ $L=1$ [m]、半径 $R=0.005$ [m]の円柱を作成します。

- 1) ジオメトリ 1 ノードを右クリックし、円筒を選び、円筒 1 ノードをクリックして設定ウィンドウを開き、

Radius R

Height L

をキーボード入力によって設定します。

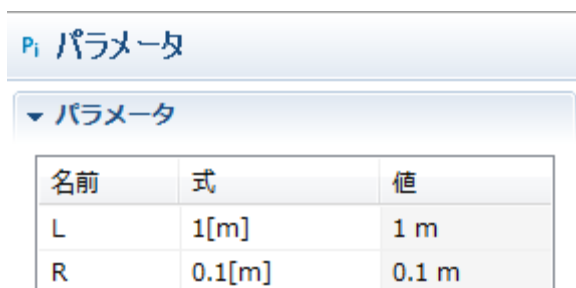


- 2) グローバル定義ノードを右クリックしてパラメータを選択し、パラメータの設定ウィンドウで

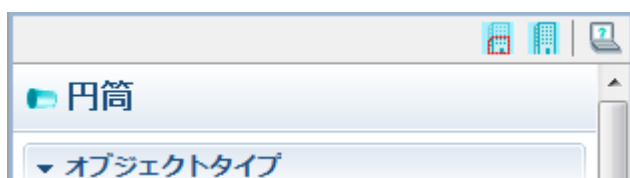
L 1[m]

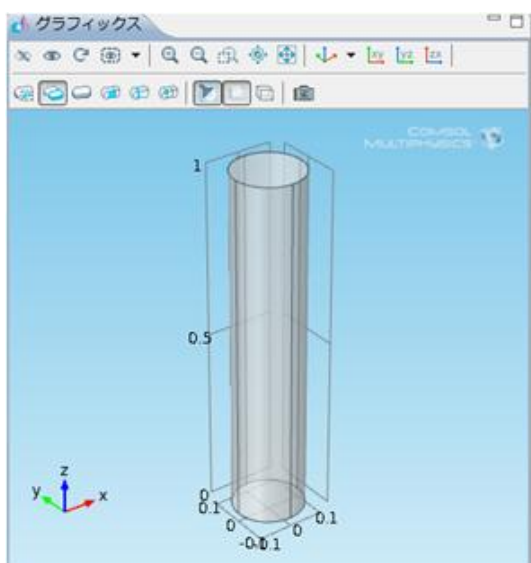
R 0.1[m]

を設定します。



- 3) 全て作成ボタンをクリックして、円柱を表示させます。
z 方向に軸をもつ円柱が完成します。





図形の観察

マウスをグラフィックスウィンドウ内にフォーカスした状態で以下を行います。

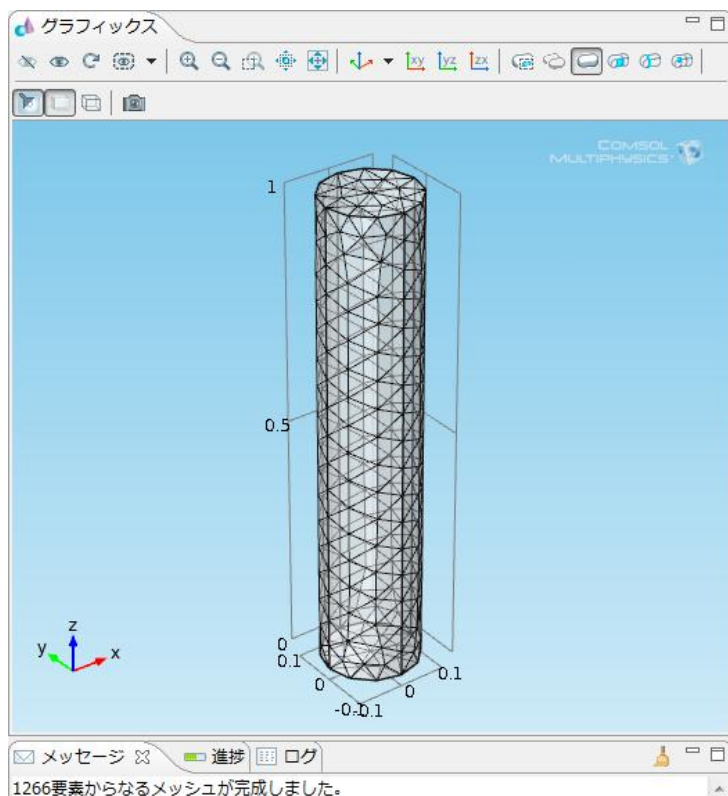
- 1) マウス左ボタンを押したままマウスを動かすと円柱が**回転**します。
座標軸も一緒に回転するので方向を見失うことはありません。
- 2) マウス右ボタンを押したままマウスを動かすと円柱が**移動**します。
- 3) マウス中央ボタンを押したままマウスを動かすと**拡大・縮小**します。
- 4) 円柱を画面全体にうまく収めるには**画面全体に表示**ボタンをクリックします。
- 5) 円柱の一部を拡大するには**ズームボックス**ボタンをクリックします。
- 6) 円柱の姿勢をデフォルトにするには**デフォルト 3Dビュー**をクリックします。
- 7) 光のオン・オフは**シーンライト**ボタンをクリックします。
- 8) 物体を半透明にするには**透過度**ボタンをクリックします。
- 9) 物体をワイヤーフレームにするには**ワイヤーフレームレンダリング**ボタンをクリックします。

ここを押さえておこう！

- ノードをクリックすると設定ウィンドウが開きます。
- ノードを右クリックするとコンテキストメニューが表示されて選択肢を選ぶことができます。
- 形状はパラメタ表現ができます。形状の寸法変更はグローバル定義パラメータの変更で実現できます。
- 形状をグラフィックスウィンドウ上に表示するには**全て作成**ボタンをクリックします。
複数の形状から物体を構築する場合には**選択対象作成**ボタンをクリックして都度、表示させながら作業を進めていきます。

メッシュの作成

- 1) メッシュノードを右クリックし、フリーメッシュ四面体を選択します。
- 2) すべて作成ボタンをクリックするとメッシュが作成され、結果がグラフィックスウィンドウに表示されます。



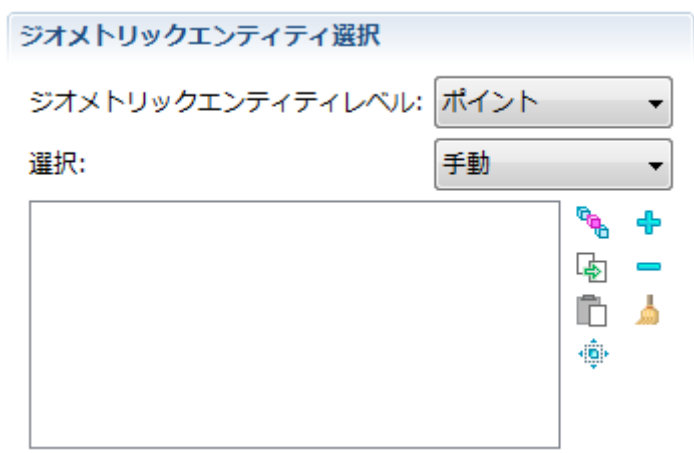
メッセージウィンドウ

要素数を確認します。上の図で、1266 要素が作成されたことがわかります。

メッシュのコントロール

メッシュの粗密をコントロールしてみることで、形状のもつジオメトリックエンティティレベル（点、辺、面、体積）と、それらの各レベルと設定項目を関係付ける方法について学習します。同時に、モデルビルダでモデルツリーを構築していくうえでの基本的な考え方、つまり、ノードを追加していくことで処理を詳細化していく、ということを見ていきます。

- 1) フリーメッシュ四面体ノードを右クリックし、サイズを追加します。
- 2) 同じ設定ウィンドウにおいて、ジオメトリックエンティティレベルをポイントにします。サイズノードの設定ウィンドウにいき白枠で囲まれた選択リストが空白の状態にあることを確認します。



グラフィックスウィンドウからの点番号の選択

グラフィックスウィンドウ内にマウスをフォーカスして左クリックで点を選択すると青色になり、続けて右クリックしますと、その点の番号が選択リストに追加されます。別の方法として、右クリックの代わりに選択リストの横にある**+**ボタンをクリックしてもよいことを確かめます。

すでに選択した点は青色になっています。その点を左クリックすると緑色になり、続けて右クリックすると選択リストからその番号が削除されることも確かめてください。

同じ操作によって、2～3個の点を選択リストに追加してください。

選択リストの横にある**×**ボタンを押すと選択リストの番号をすべてクリアします。

再び複数の点を選択リストに選択した後、選択リストに表示されている番号の一つを左クリックでハイライトさせ、選択リストの横にある**-**ボタンをクリックするとその番号を選択リストから削除できることを確かめます。

選択リストからの点番号の選択

別の方法として、**ビューメニュー** > **選択リスト**を選択すると番号一覧表が表示されます。その番号表で所望の番号を左クリックし、グラフィックスウィンドウで所望の点が青色になっていることを確認後、選択リストの横にある**+**ボタンをクリックすると選択リストにその番号が追加されます。

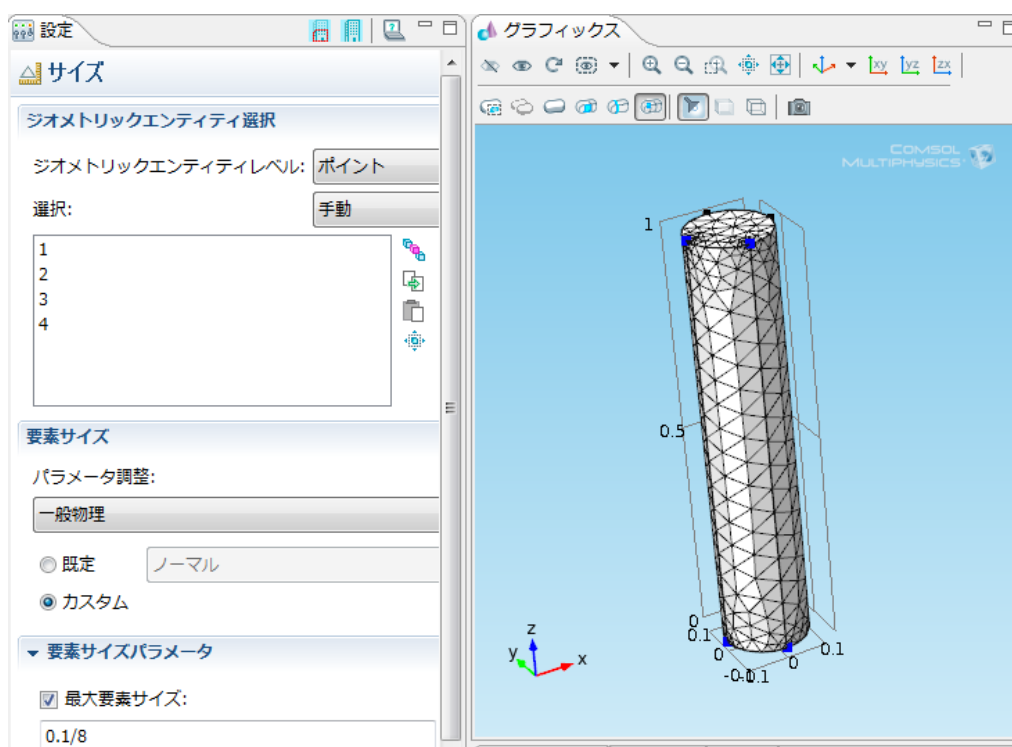
この操作法は、複雑な形状の点を選択する場合に便利です。

点番号 1,2,3,4 のメッシュのコントロール

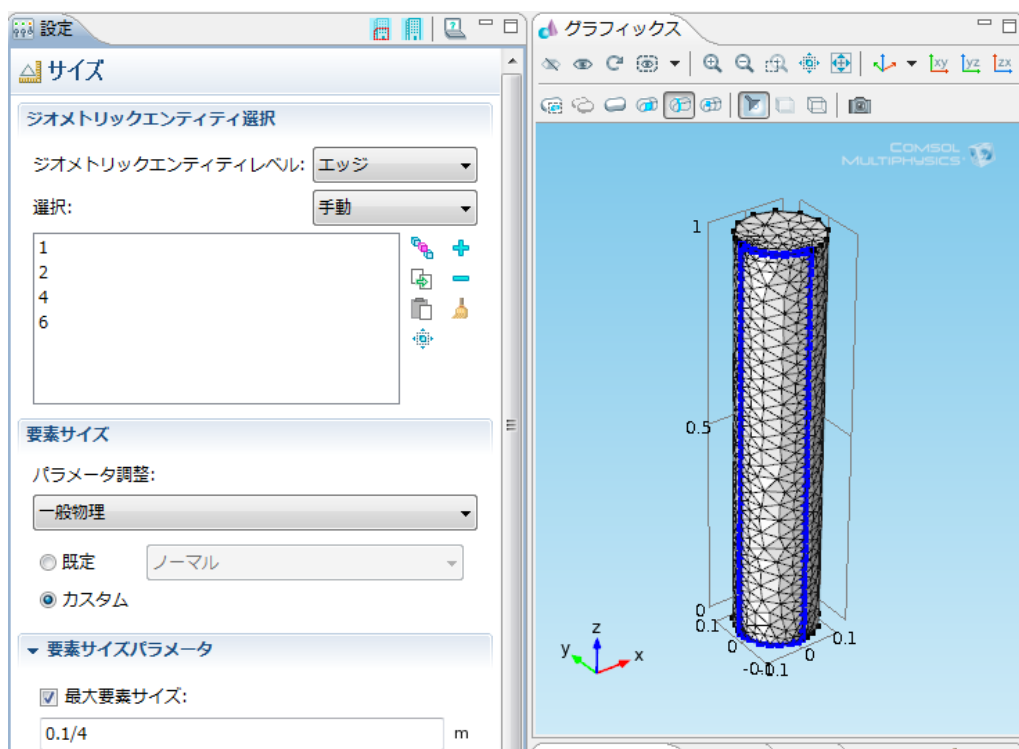
さて、以上の操作によって点番号 1,2,3,4 が選択リストにあるものとします。

以後の設定はこの 4 つの点についてのコントロールを決めることになります。

- 3) **カスタム**に行き、**最大要素サイズ**を現状の数値の 1/8 にします。**最大要素サイズ**にチェックを入れ、0.1/8 を設定します。COMSOL ではこのように計算式を直接記述できるので、意図を明示した形で残しておくことができます。
- 4) **選択対象作成**ボタンをクリックします。
4 つの点 1,2,3,4 の近傍のメッシュが密になったことがわかります。
メッセージウィンドウで要素数が変化したことを確認します。

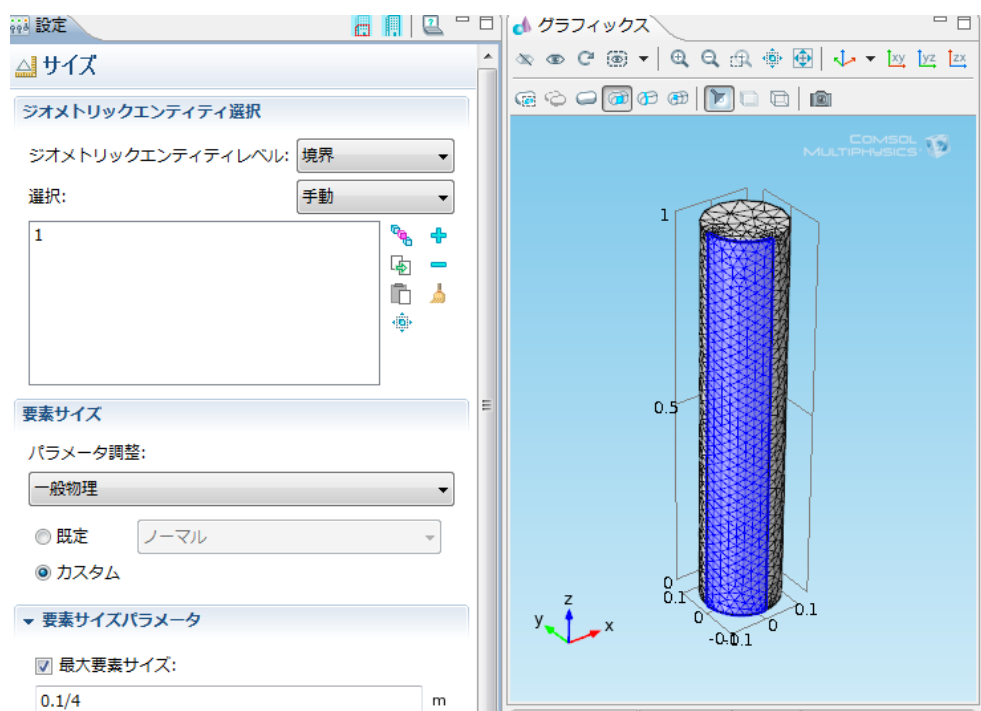
エッジ 1,2,4,6 のメッシュのコントロール

- 5) フリーメッシュ四面体ノードを右クリックして、**サイズ**を追加し、**サイズ**ノードの設定ウィンドウで**ジオメトリックエンティティレベル**を**エッジ**にし、すでに選択した 4 つの点 1,2,3,4 を結ぶエッジ 4 本のエッジ番号 1,2,4,6 を選択リストに追加します。
- 6) **カスタム**に行き、**最大要素寸法**を現状の 1/4 にして、**選択対象作成**ボタンをクリックします。



面1のメッシュのコントロール

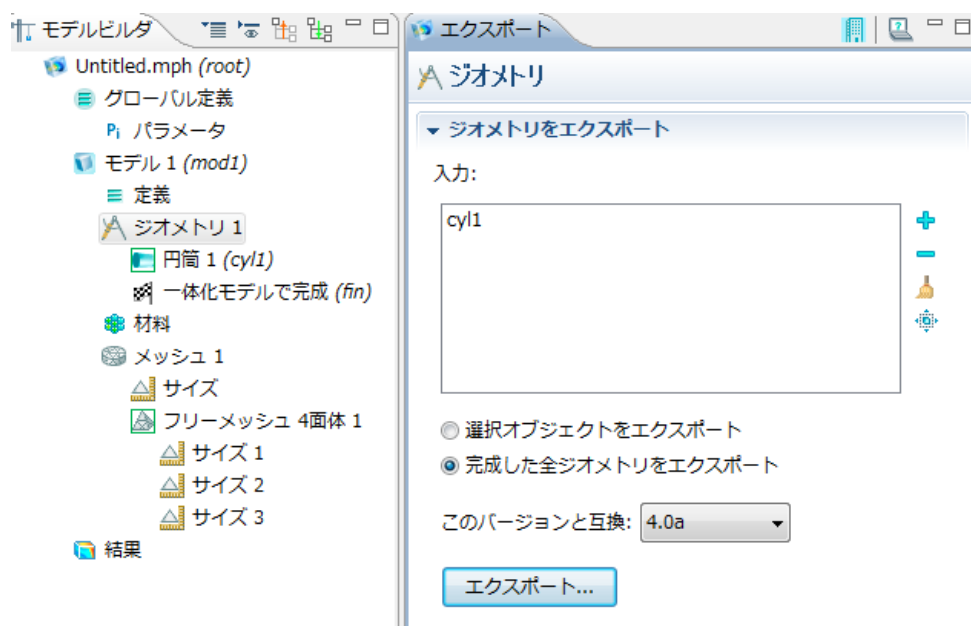
- 7) フリーメッシュ四面体ノードを右クリックして、サイズを追加し、サイズノードの設定ウィンドウでジオメトリックエンティティレベルを境界（面のこと）にし、選択済みの4本のエッジで囲まれた面番号1を選択リストに追加します。
- 8) カスタムに行き、最大要素寸法を現状の1/4にして、選択対称作成ボタンをクリックします。
メッセージウィンドウでメッシュ数が変化したことを確認します。



作成した形状の保存 (ファイル拡張子: **mphbin**)

形状の再利用を考えます。

- 1) 形状の再利用を考える場合にはジオメトリノードを右クリックし、**エクスポート**を選びます。
- 2) 保存先をブラウザし名前を付けて外部ファイルとして保存します。拡張子**mphbin** (binはバイナリデータの意味)が自動的に付加されます。



mph ファイルの保存 (ファイル拡張子: mph)

ここで作業を行った COMSOL Multiphysics ファイルを保存します。

- 1) ファイルメニューで名前を付けて保存をクリックします。
- 2) ファイルの拡張子として、mph が自動的に付加されます。

読み込んだ形状はこのファイルの中に組み込まれていますので、管理するファイルは mph のみです。

COMSOL の終了

ファイルメニューで終了をクリックします。

作業の再開

次回このファイルを立ち上げるときは COMSOL を立ち上げ、ファイルメニューで開くをクリックし、保存したファイル名を指定すれば作業を再開できます。

ここを押さえておこう！

- 1) 設定ウィンドウに選択リストがある場合には、グラフィックスウィンドウ、あるいはオプションメニュー>選択リストから、ジオメトリ番号を入力します。
- 2) ジオメトリックエンティティレベルをポイント、エッジ、境界、ドメインに切り替えてやれば、各レベルにおける番号を参照・選択できます。
- 3) メッシュは既定サイズを変更してメッシュの密度を変更することもできますがポイント、エッジ、境界(面)の順にメッシュをコントロールすれば要素数が急激に増えることなく、メッシュの分布をコントロールできます。

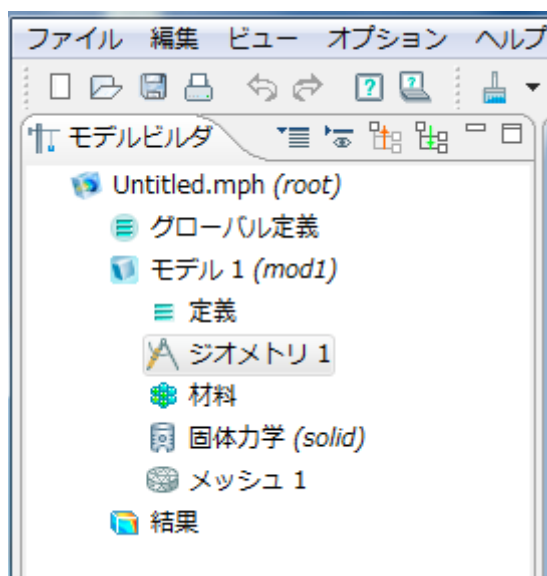
3. シングルフィジックス

例題2 「丸棒の変位を計算してみよう」



固体力学(solid)インターフェースの利用

- 1) COMSOL 4.2 を立ち上げます。
- 2) 空間次元を 3D とし、次へボタンをクリックし、フィジックスを追加で構造力学>固体力学(solid)を右クリックし、選択フィジックスリストに追加します。
- 3) 次へボタンをクリックし、スタディタイプを選択で定常をクリックし完了ボタンをクリックします。
- 4) モデルビルダのプロトタイプ構成が以下のようになっていることを確認します。



形状の読み込み（あるいは作成）

- 1) ジオメトリノードを右クリックして、インポートを選択します。
- 2) 例題 1 で作成した形状データ(Cylinder.mphbin)のファイル名を指定後、インポートボタンをクリックします。
すると、グラフィックスウィンドウに円柱が表示されます。
あるいは、例題 1 の手順で円柱を作成します。

固体力学(solid)の設定

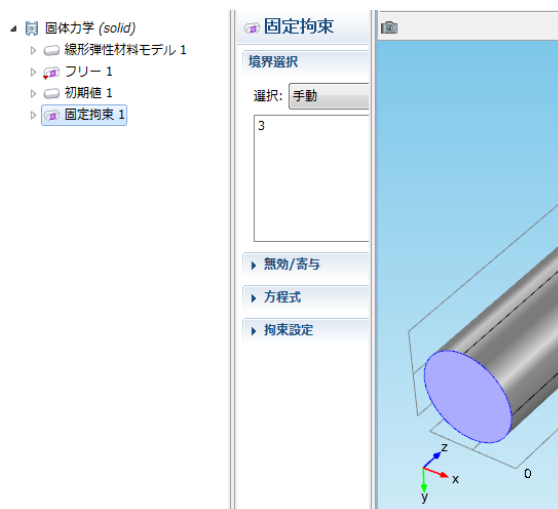
- 1) 固体力学ノードを展開し、以下であることを確認します。

- ▲ 固体力学 (solid)
 - ▷ 線形弾性材料モデル 1
 - ▷ フリー 1
 - ▷ 初期値 1

デフォルトの境界条件がフリーであるので、以下で
下面拘束用の**固定拘束**、上面へ荷重をかけるための**境界荷重**を各々、追加します。

固定拘束

- 2) 固体力学(solid)を右クリックし、**固定拘束**を選択します。
- 3) **固定拘束**ノードの設定ウィンドウに行き、**面番号 3**のみを選択リストに設定します。



境界荷重

- 4) 固体力学(solid)を右クリックし、境界荷重を選択します。
- 5) 境界荷重ノードの設定ウィンドウで境界面 4 のみを設定します。
- 6) 荷重タイプを力 大きさにし、

F_{tot} に

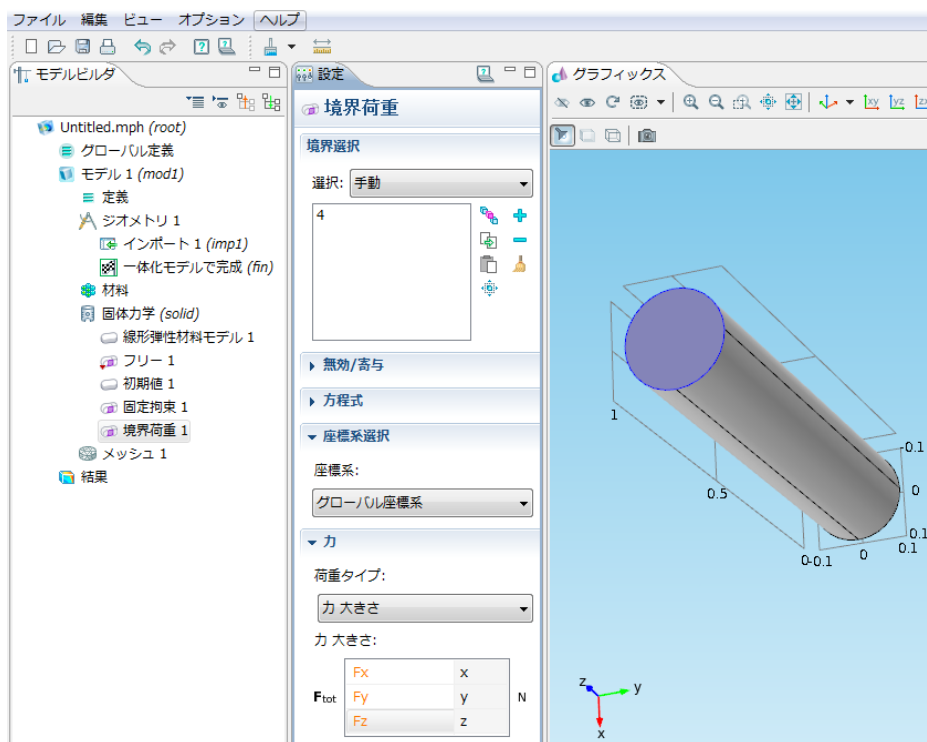
F_x

F_y

F_z

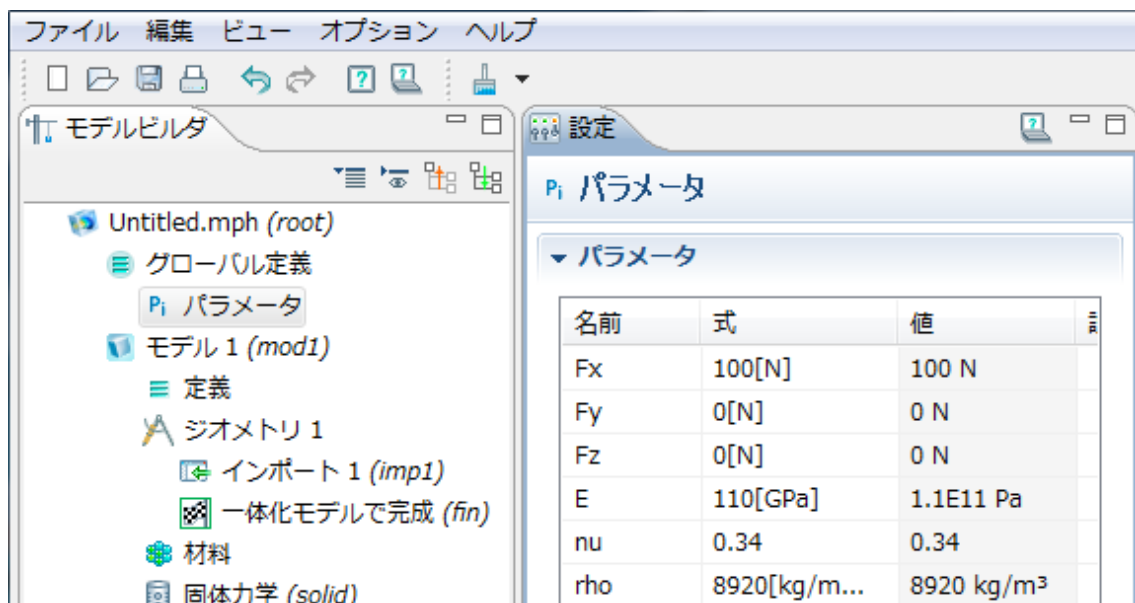
を設定します。

(この時点では F_x, F_y, F_z を変数定義していないのがオレンジ色になります。)



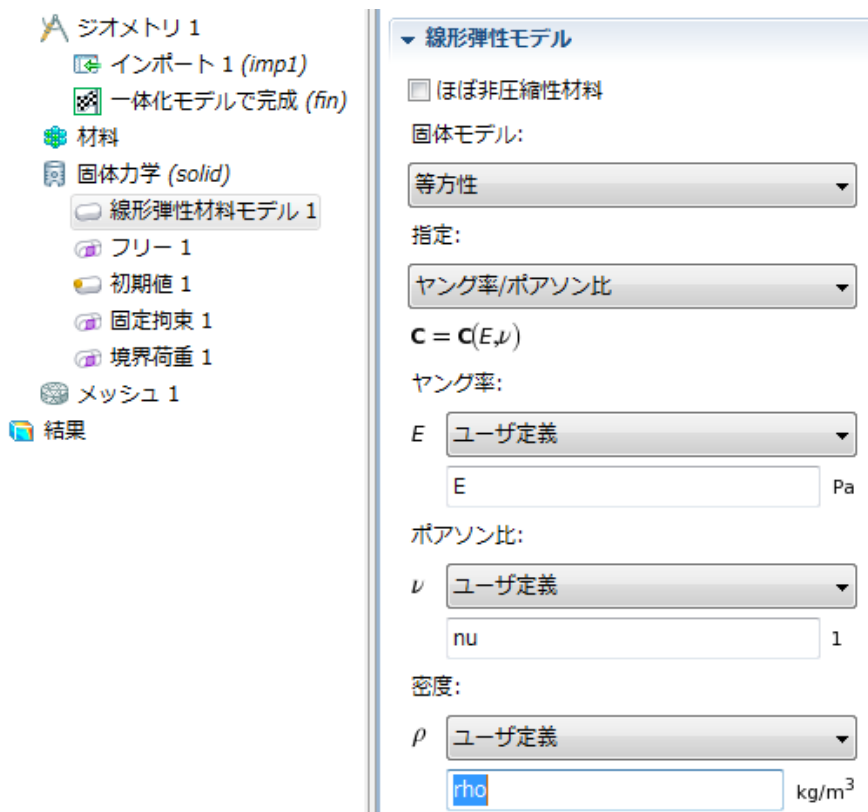
定数の定義

- 1) グローバル定義ノードを右クリックし、パラメータを選択します。
- 2) パラメータに以下の通り設定します。[]は局所単位を表しています。
COMSOLはSI単位系で計算を行います。[]内の単位が非SI単位系でも自動的にSI単位系に変換します。その結果が値に表示されます。



線形弾性材料モデルの定義

- 1) 線形弾性材料モデルノードの設定ウィンドウにいきます。
- 2) 線形弾性モデルセクションで、ヤング率、ポアソン比、密度をいずれもユーザー定義にし、以下の通り、ヤング率に E、ポアソン比に nu、密度に rho を設定します。



メッシュの作成

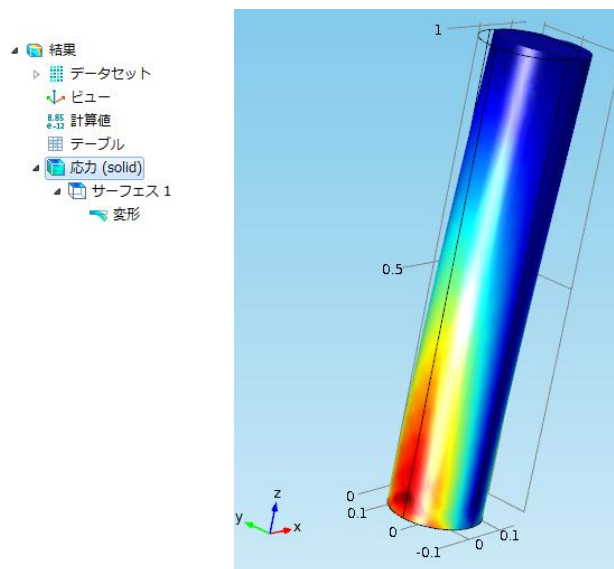
- 1) メッシュ 1 ノードを右クリックし、フリーメッシュ四面体を選択します。
- 2) 全て作成ボタンをクリックします。

計算

- 1) Study を右クリックして、計算をクリックします。
- 2) 進捗ウィンドウで進行状況を確認します。

結果の表示

計算が終了すると、COMSOL が結果の下に 3D プロットグループを追加し、ミーゼス応力分布のカラー表示と変形の様子を表示します。



計算結果の検討

丸棒の断面二次モーメント $I = \pi d^4/32$

ヤング率 E

丸棒の長さ L

先端荷重 P

としたとき、

先端のたわみは近似的に（梁の理論の仮定成立の範囲内で）

$$\frac{PL^3}{3EI}$$

であることがわかっています。

今回の計算結果と比較してみます。

- 1) **グローバル定義** > **パラメータ** に長さ L 、直径 d 、断面二次モーメント I 、たわみ δ を追加します。

L 1

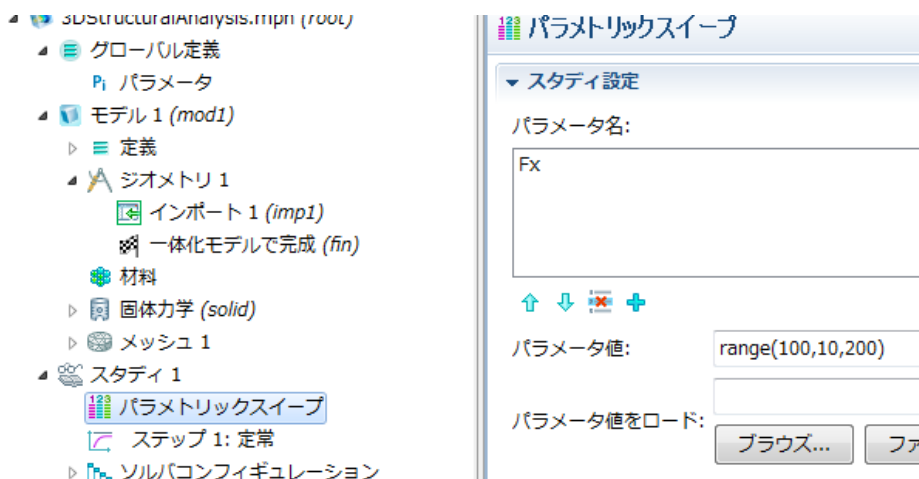
d 0.1*2

I $\pi*d^4/64$

δ $Fx*L^3/(3*E*I)$

名前	式	値
Fx	100[N]	100 N
Fy	0[N]	0 N
Fz	0[N]	0 N
E	110[GPa]	1.1E11 Pa
nu	0.34	0.34
rho	8920[kg/m^3]	8920 kg/m ³
L	1[m]	1 m
d	(0.1*2) [m]	0.2 m
I	$\pi*d^4/64$	7.854E-5 m ⁴
delta	$Fx*L^3/(3*(E*I))$	3.858E-6 m

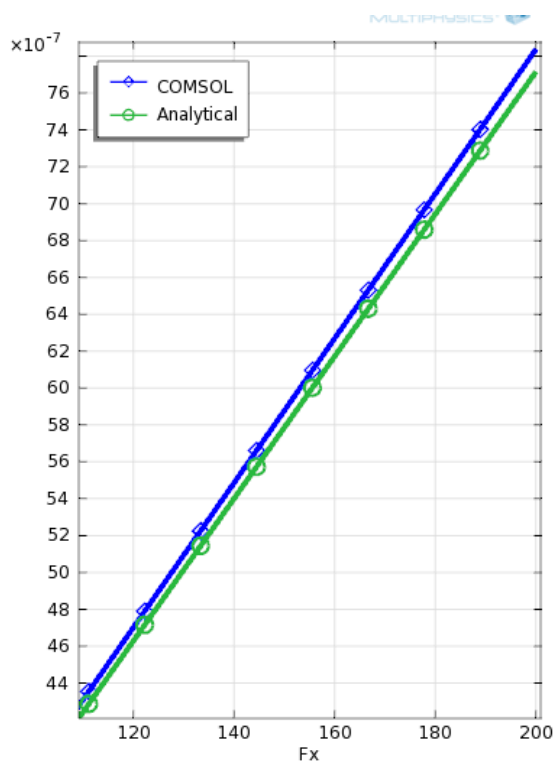
- 2) スタディノードを右クリックし、**パラメトリックスイープ**を選択します。
パラメトリックスイープノードの設定ウィンドウで**+**ボタンを使って
Fx をパラメータ名リストに設定します。
Fx の範囲は `range(100,10,200)` とします。



- 3) スタディノードを右クリックして、**計算**を実行します。
- 4) **結果**ノードを右クリックし、**表示グループ 1 D**を選択します。
- 5) **表示グループ 1 D**を右クリックして**グラフ(ポイント)**を選びます。
- 6) **グラフ(ポイント)**をクリックして設定ウィンドウに行き、
選択リストの中をクリックするとグラフィックスウィンドウが
表示されるので、点番号8を選びます。
Y 軸データに、`solid.disp` を設定します。
- 7) **表示グループ 1 D**を右クリックして**グラフ (ポイント)** を選びます。
- 8) **グラフ(ポイント)**をクリックして設定ウィンドウに行き、
選択リストの中をクリックするとグラフィックスウィンドウが
表示されるので、点番号8を選びます。

Y 軸データに、delta を設定します。

8) プロットボタンをクリックします。



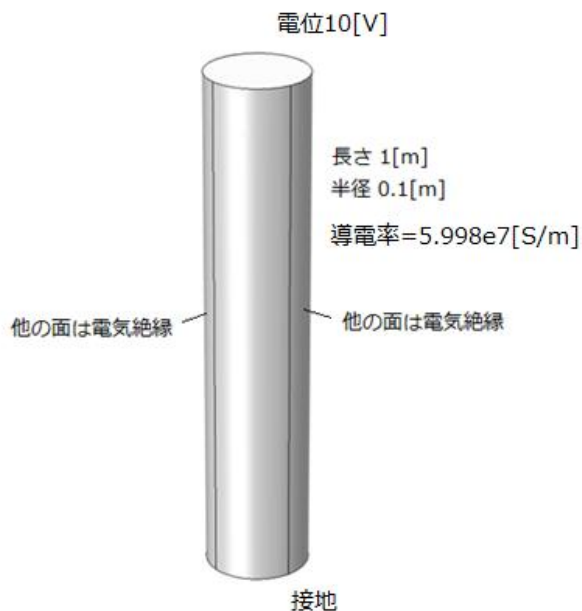
COMSOL の計算結果は梁の理論値と良好な一致を与えることがわかります。

ここを抑えておこう！

- 1) ユーザー定義にすることで、物性値を直接、設定できます。
- 2) その際、設定内容を変数にし、グローバル定義のパラメータでそれらの変数を定義しておけば、条件を変更する場合に、パラメータの値の変更のみで済みます。
- 3) デフォルト設定を確認し、実現したい問題設定との差異を分析すれば、どのような項目を設定すればよいかが明確になります。
- 4) COMSOL は式を自由に記述できます。
- 5) グローバル定義のパラメータに記載したパラメータを使ってパラメトリックスタディができます。

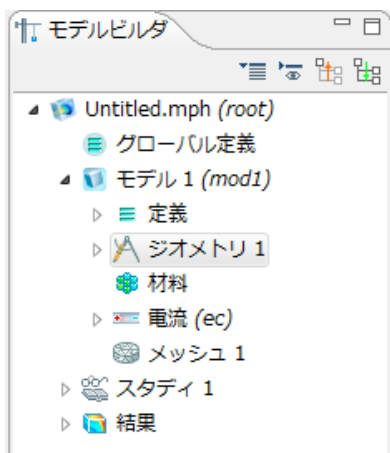
例題3 「電位分布を計算してみよう」

ここでは導体の中に生じる電位、電流を計算してみましょう。



電流(ec)インターフェースの利用

- 1) COMSOL 4.2 を立ち上げます。
- 2) 空間次元を 3D とし、次へボタンをクリックし、フィジックスを追加で ACDC > 電流(ec)を右クリックし、選択フィジックスリストに追加します。
- 3) 次へボタンをクリックし、スタディタイプを選択で定常をクリックし完了ボタンをクリックします。
- 4) モデルビルダのプロトタイプ構成が以下のようになっていることを確認します。

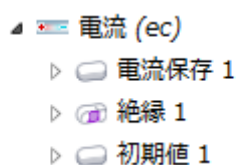


形状の読み込み（あるいは作成）

- 1) ジオメトリノードを右クリックして、**インポート**を選択します。
- 2) 例題 1 で作成した形状データ(Cylinder.mphbin)のファイル名を指定後、**インポート**ボタンをクリックします。
すると、グラフィックスウィンドウに円柱が表示されます。
あるいは、例題 1 の手順で円柱を作成します。

電流(ec)の設定

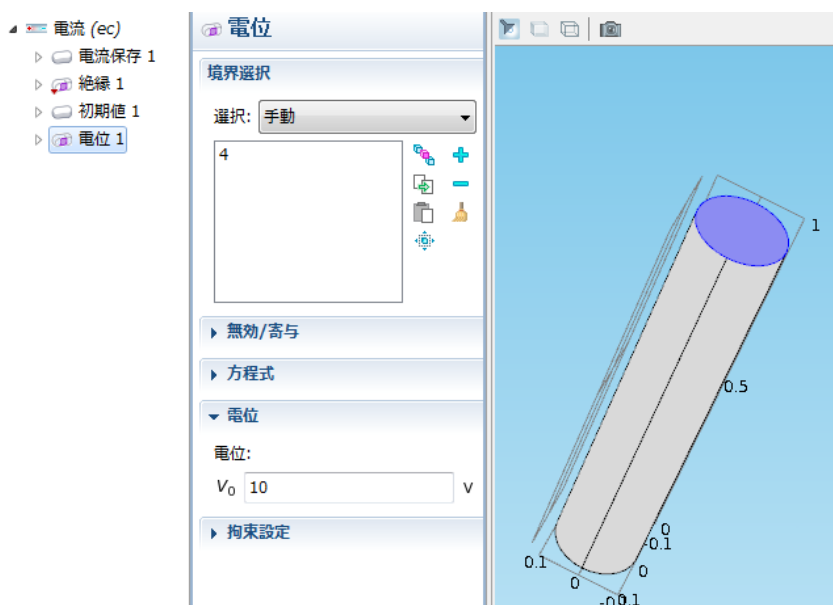
- 1) **電流(ec)**ノードを展開し、以下であることを確認します。



このことから、ここでの作業は、電位、接地について行えばよいことがわかります。

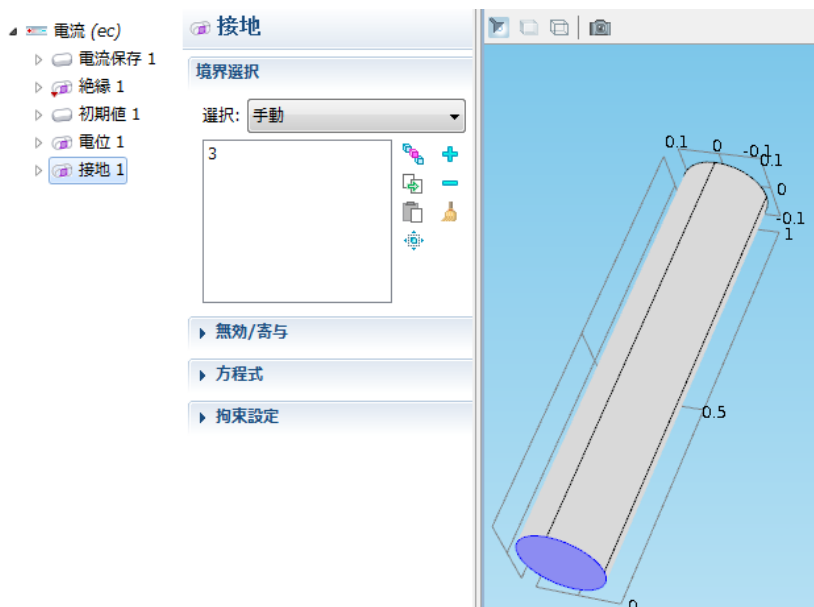
電位の設定

- 1) **電流(ec)**ノードを右クリックし、**電位**を選択します。
- 2) **電位**ノードをクリックして設定ウィンドウに行き、面番号 4 を選択します。**電位 V_0** に 10[V]を設定します。



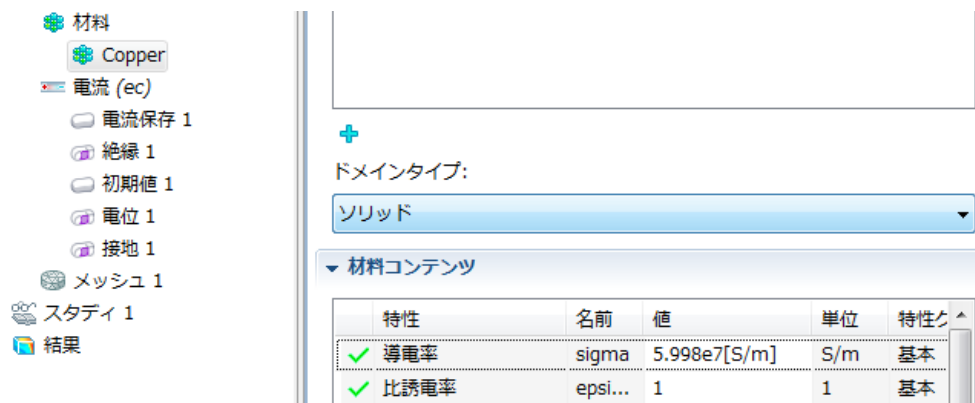
接地の設定

- 1) 電流(ec)ノードを右クリックし、**接地**を選択します。
- 2) 接地ノードの設定ウィンドウに行き、面番号3を選択します。



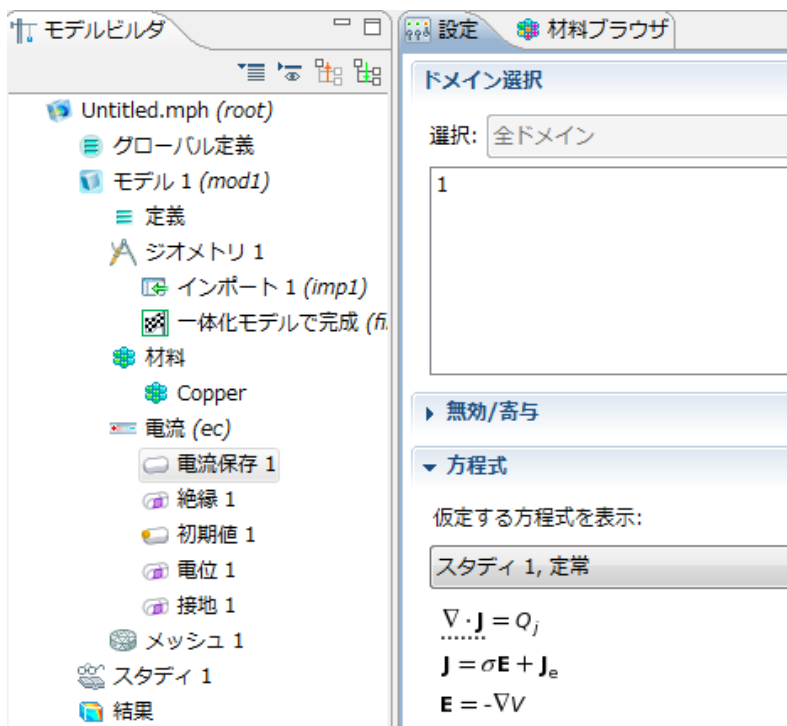
材料の設定

- 1) 材料ノードを右クリックして、**材料ブラウザをオープン**を選択します。
- 2) 標準材料ライブラリを展開し、**Copper**を選択し、右クリックで選択リストに設定します。
- 3) 材料コンテンツの内容を確認し、導電率 σ に $5.998e7$ [S/m]、比誘電率 ϵ_r に **1** が設定されていることを確認します。左にある緑のチェックは必要な物性値がすべて定義されていることを示しています。

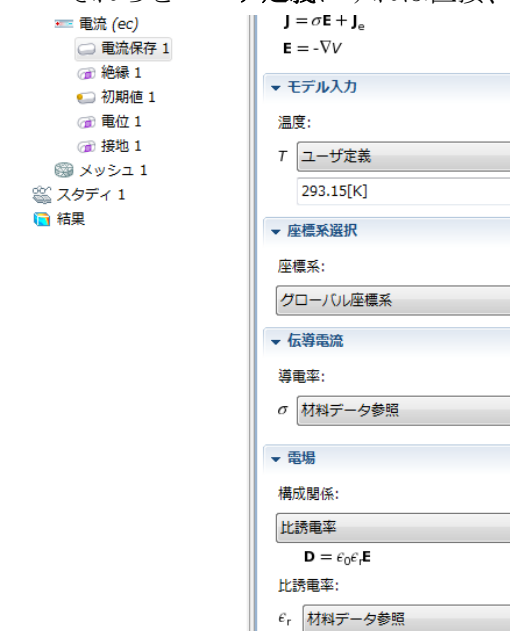


電流保存の確認

- 1) 電流保存 1 ノードをクリックし、設定ウィンドウに行きます。
- 2) 方程式セクションを開いて、電流保存 1 ではアンダーライン（点線）部分の電流に関する設定をおこなうことを確認します。COMSOL は方程式を確認できるので現在設定している項目との関係を明確に把握することができます。

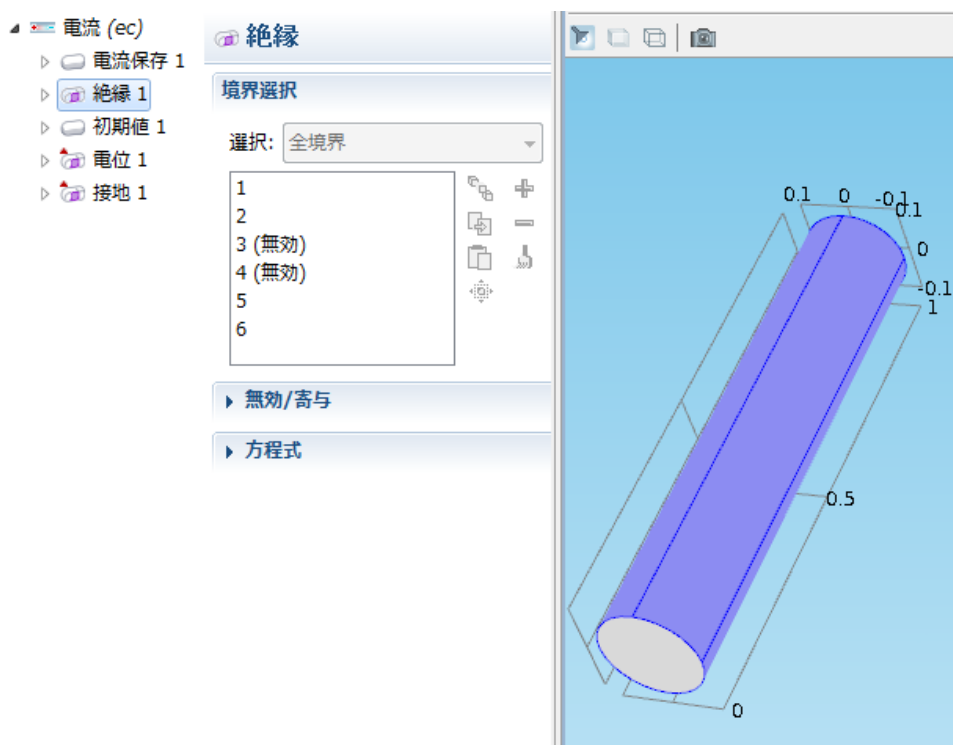


- 3) 導電率、比誘電率が材料データ参照になっていることを確認します。それらをユーザー定義にすれば直接、数値を設定することもできます。



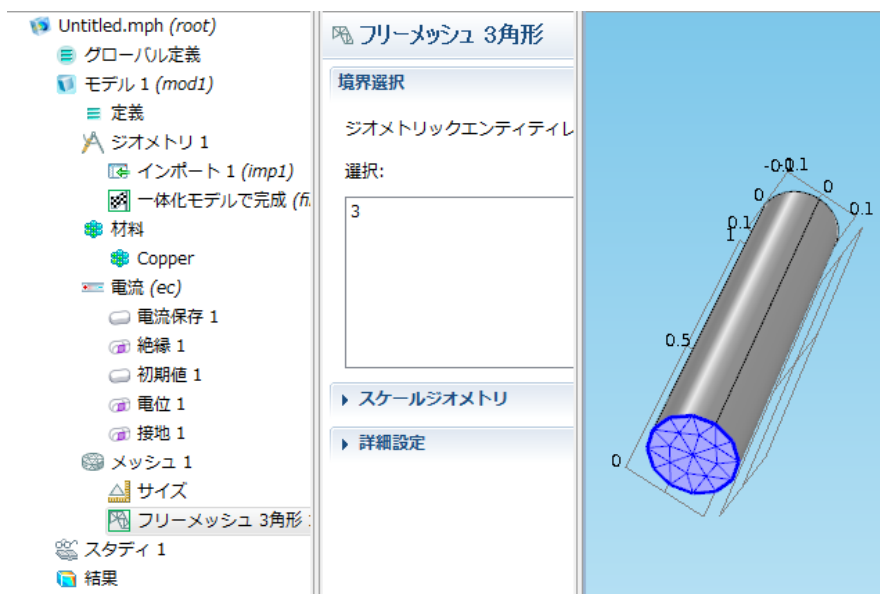
絶縁の確認

- 1) 絶縁ノードをクリックして設定ウィンドウに行きます。
- 2) 絶縁ノードはデフォルト境界が絶縁であることを示しています。
絶縁ノードは直接、編集できませんが、ここで示したように他の境界条件を設定すると、都度、該当する境界面番号の箇所が(無効)になります。
面番号 3, 4 以外が電気絶縁壁であることを示しています。

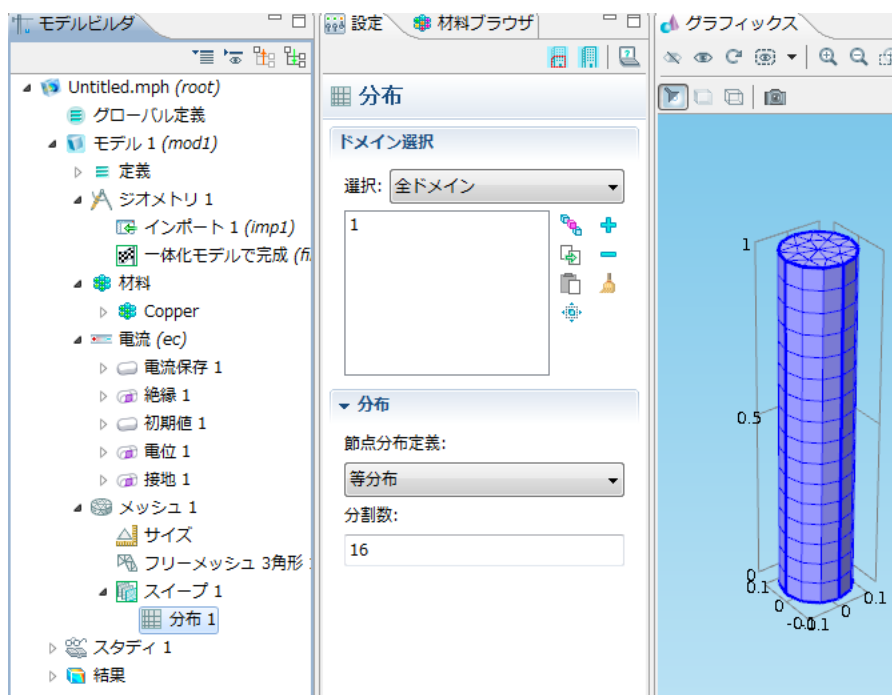


メッシュの作成

- 1) メッシュノードを右クリックし、**その他の操作**>**フリーメッシュ 3 角形**を選択します。
- 2) **フリーメッシュ 3 角形**ノードをクリックして設定ウィンドウに行きます。
- 3) 面番号 3 を選び、**選択対象作成**ボタンをクリックします。



- 4) メッシュを右クリックし、**スイープ**を選択します。
- 5) スイープノードを右クリックして、**分布**を選択します。
- 6) **分布**ノードをクリックして設定ウィンドウに行き、ドメイン選択リストにドメイン番号1が設定されていることを確認し、**分布**セクションの分割数に16を設定します。
- 7) **全て作成**ボタンをクリックします。



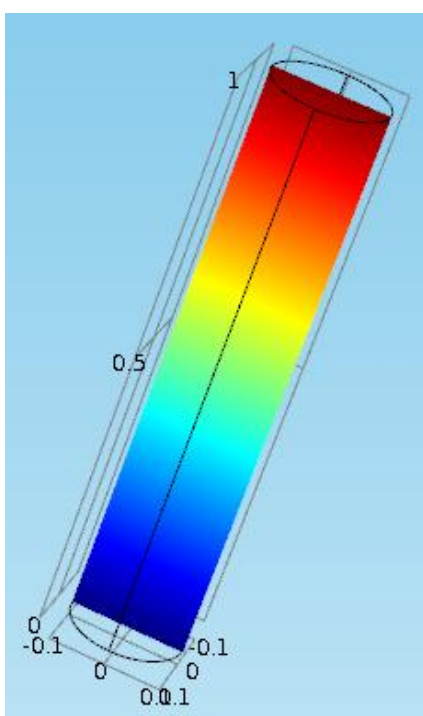
計算の実行

- 1) スタディノードを右クリックし、**計算**を実行します。
- 2) メッセージウィンドウで計算時間を確認します。

結果の表示

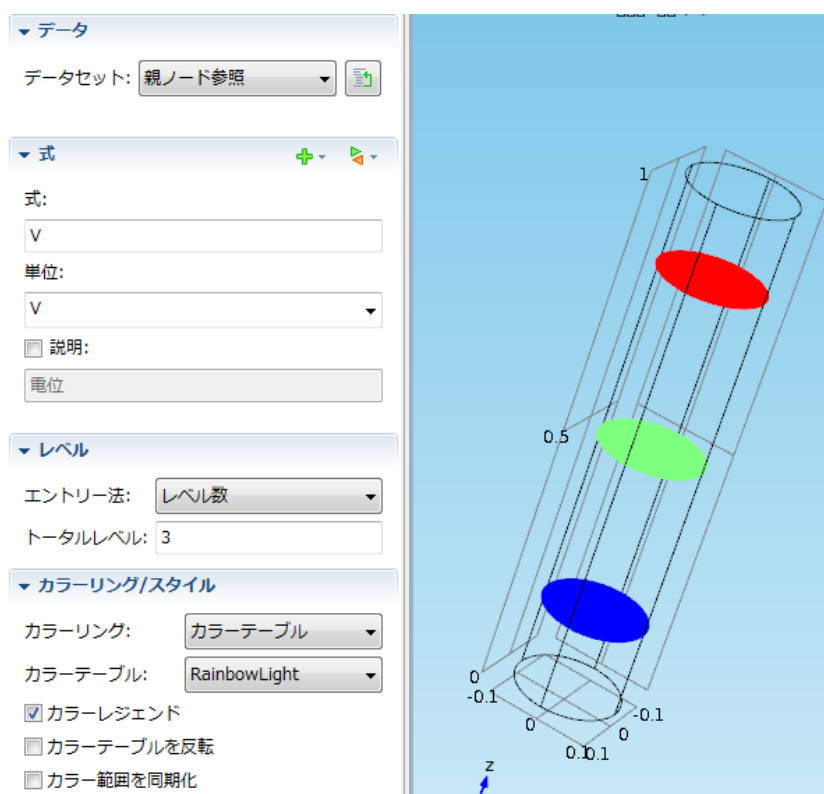
計算が終了すると、**結果の電位(ec)**ノードの設定内容が表示されます。

- 1) **結果の電位(ec)**ノードで**断面1**、**断面3**の各ノードを右クリックして削除します。
- 2) **プロットボタン**をクリックし、**電位V**をグラフィックスウィンドウに表示します。



等値面の表示

- 1) **結果ノード**を右クリックし、**表示グループ(3D)**を選択します。
- 2) **表示グループ(3D)2**を右クリックし、**等値面**を選択します。
- 3) **等値面ノード**をクリックして設定ウィンドウに行き、**レベルセクション**で
トータルレベルを3に変更し、**カラーリング/スタイル**で**カラーテーブル**を Rainbow
Light に変更後、**プロットボタン**をクリックします。



V = IRとの関係

導電率 σ [S/m]と抵抗 [Ω]の関係は、棒の長さ L [m]、断面積 A [m^2]としたとき、

$$R[\Omega] = L/(\sigma A)$$

の関係があります。

一方で、電位の計算の結果から電流密度が求まります。

ここでは両者の関係を調べます。

- 1) グローバル定義>パラメータで以下を設定します。

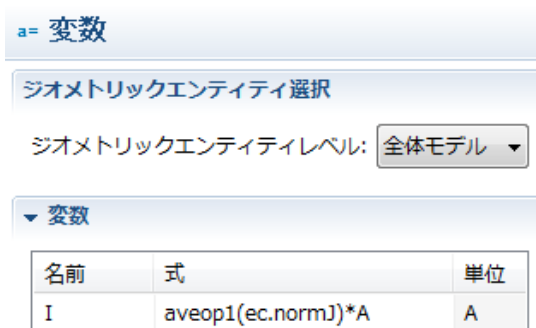
P1 パラメータ

パラメータ

名前	式	値	説明
d	$(0.1*2)[m]$	0.2 m	
A	$\pi*d^2$	0.1257 m^2	
L	1[m]	1 m	
sigma	5.998e7[S/m]	5.998E7 S/m	
Resist	$1/\sigma*L/A$	1.327E-7 Ω	

- 2) モデル1 ノードの下の定義ノードを右クリックし、モデルカップリング>平均を選択します。

- 3) 平均 1 ノードをクリックして設定ウィンドウに行き、ドメイン番号 1 を選びます。
- 4) モデル 1 ノードの下の定義ノードを右クリックし、変数を選びます。
- 5) 変数 1a ノードをクリックして設定ウィンドウに行き、以下を設定します。



I は、ec.normJ という変数であらわされる電流密度を 3) で定義した平均演算子 aveop1 を使って体積平均したものに面積 A を掛け算したものであることを示しています。

- 6) スタディノードを右クリックし、解の更新を実行します。
この操作によれば、再計算を行うことなく、計算後に追加した上記の変数 I が利用可能になります。
- 7) 結果の下の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。
- 8) グローバル評価ノードの設定ウィンドウで、式に 10/I を設定します。ここで、10 は丸棒の上面に印加した電位 10[V] の意味であり、 $R=V/I$ の関係を使っています。
- 9) = ボタンをクリックすると、右のウィンドウに 1.3267e-7 と表示されます。



- 10) この結果と、すでに計算したパラメータでの抵抗値と比較すると一致します。

Resist	1/sigma*L/A	1.327E-7 Ω
--------	-------------	------------

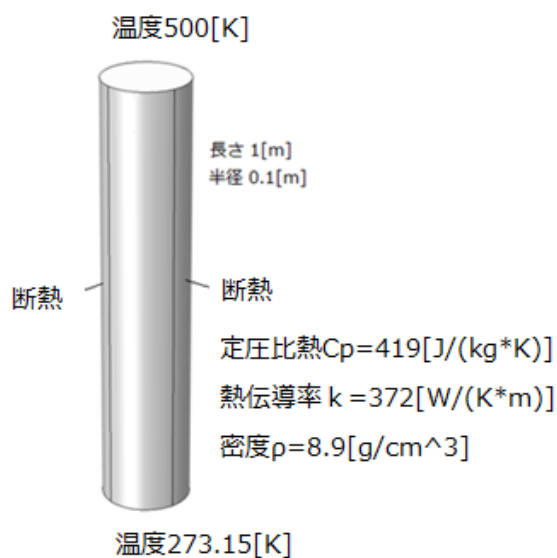
つまり、COMSOL 3次元計算結果によって得た詳細な電流密度の空間分布を丸棒内部で平均した結果が、 $V=IR$ という集中定数系で表現された結果と一致することになります。COMSOL で計算をすれば、既知の集中定数系の結果を見直すことにもつながります。

ここを押さえておこう！

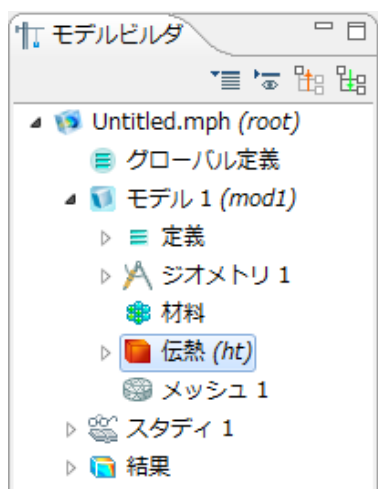
- 1) **材料**ノードで、材料物性値を定義できます。
物性値を必要とするノードは定義された材料物性値を参照します。
- 2) COMSOL の**モデルカップリング**に用意されている積分演算子を使うことで、
詳細な3次元計算結果から、集中定数系の結果を考え直すことが可能です。
- 3) **解の更新**を利用することで、再計算をすることなく、データ処理用の変数を
定義・利用できます。

例題4 「温度分布を計算してみよう」

銅製の丸棒が、底面 273.15[K]、上面 500[K]に保持されているときの、内部の温度分布を計算してみましょう。

伝熱(ht)インターフェースの利用

- 1) COMSOL 4.2 を立ち上げます。
- 2) 空間次元を 3Dとし、次へボタンをクリックし、フィジックスを追加で
伝熱>伝熱(固体)(ht)を右クリックし、選択フィジックスリストに追加します。
- 3) 次へボタンをクリックし、スタディタイプを選択で定常をクリックし
完了ボタンをクリックします。
- 4) モデルビルダのプロトタイプ構成が以下のようになっていることを確認します。

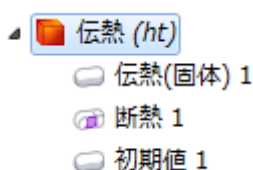


形状の読み込み（あるいは作成）

- 1) ジオメトリノードを右クリックして、**インポート**を選択します。
- 2) 例題 1 で作成した形状データ(Cylinder.mphbin)のファイル名を指定後、**インポート**ボタンをクリックします。
すると、グラフィックスウィンドウに円柱が表示されます。
あるいは、例題 1 の手順で円柱を作成します。

伝熱(ht)の設定

- 1) **伝熱(ht)**ノードを展開し、以下であることを確認します。



このことから、ここでの作業は、上面の温度、下面の温度について行えばよいことがわかります。

材料の設定

- 1) **材料**ノードを右クリックし、**材料**を選択します。
- 2) **材料 1**ノードの設定ウィンドウを見ると、**材料コンテンツ**セクションが以下のようにになっています。

▼ 材料コンテンツ				
	特性	名前	値	単位
	熱伝導率	k		W/(m*K)
	密度	rho		kg/m^3
	定圧比熱容量	Cp		J/(kg*K)

このように、**モデルビルダ**に物理ノードを付けたあとで**材料**>**材料**を実行すれば計算を行う上でどのような物性値が必要かを一覧表で教えてくれます。

この機能は専門外の分野の解析を行う際に非常に便利です。

必要な数値を準備し、**材料コンテンツ**に書き込みます。

- 4) **材料コンテンツ**に以下のように数値を設定します。

▼ 材料コンテンツ				
	特性	名前	値	単位
	熱伝導率	k	372	W/(m*K)
	密度	rho	8.9[g/cm^3]	kg/m^3
	定圧比熱容量	Cp	419	J/(kg*K)

密度の場合で示すように、局所単位系[]を付けておけば、SI 単位系に自動変換されます。

- 5) 設定ウィンドウのジオメトリックエンティティセクションのジオメトリックエンティティレベルがドメイン、選択リストにドメイン番号 1 が設定されていることを確認します。

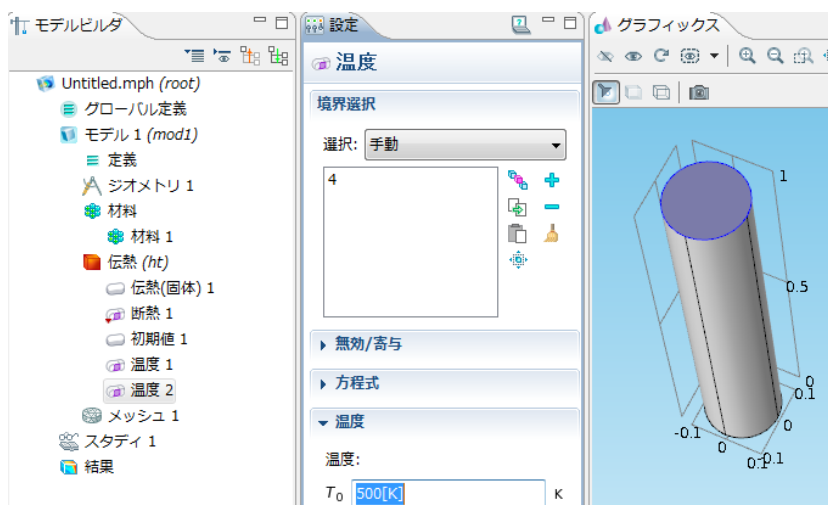
下面温度の設定

- 1) 伝熱(ht)ノードを右クリックし、温度を選択します。
- 2) 温度 1 ノードをクリックして設定ウィンドウに行き、面番号 3 を選択します。
- 3) 温度セクションの温度 T₀ に 273.15[K]を設定します。



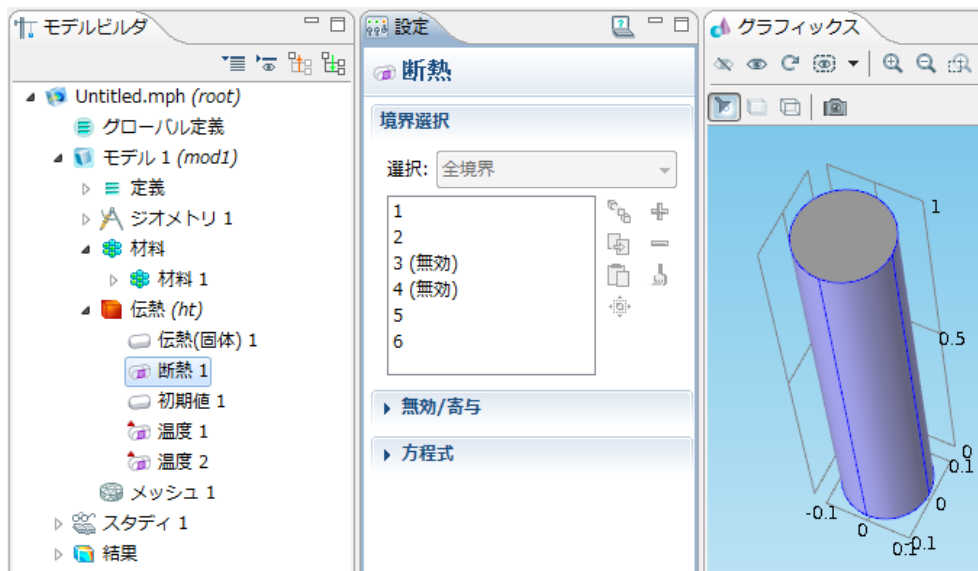
上面温度の設定

- 1) 伝熱(ht)ノードを右クリックし、温度を選択します。
- 2) 温度 1 をクリックして設定ウィンドウに行き、面番号 4 を選択します。
- 3) 温度セクションの温度 T₀ に 500[K]を設定します。



断熱の確認

- 1) 断熱 1 ノードをクリックして、設定ウィンドウに行きます。
- 2) 面番号 3,4 は (無効) になっており、ほかの面はデフォルト設定である断熱になっていることを確認します。



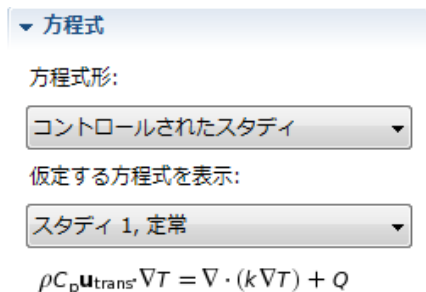
伝熱 (固体) の確認

- 1) 伝熱(固体)1 ノードをクリックし、設定ウィンドウに行きます。
- 2) 熱伝導率、密度、比熱が材料データ参照となっていることを確認します。
すでに定義した材料 1 の内容が参照されます。



方程式の参照

- 1) 伝熱(ht)ノードをクリックし、設定ウィンドウに行きます。
- 2) 方程式セクションを展開します。



密度 ρ 、比熱 C_p 、熱伝導率 k が方程式の中でどのように使われているかを理解できます。発熱項 Q についての表示も含まれていることがわかります。

メッシュの作成

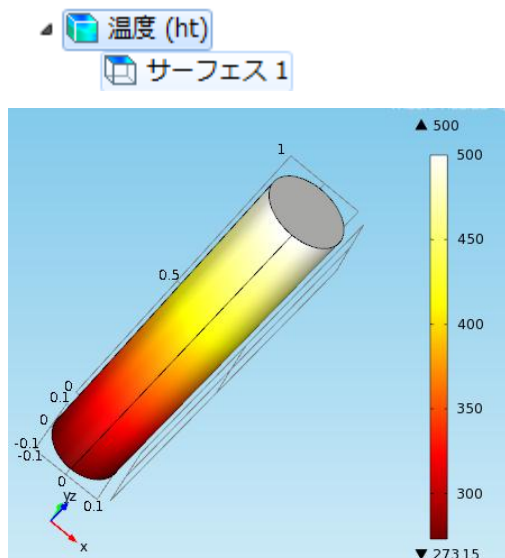
- 1) メッシュ 1 を右クリックし、フリーメッシュ 4 面体を選択します。
- 2) 全て作成ボタンをクリックします。

計算の実行

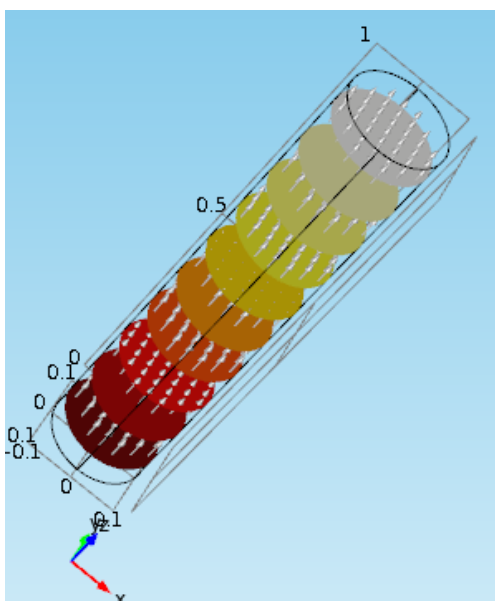
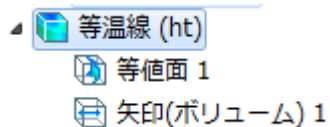
- 1) スタディ 1 を右クリックして計算を実行します。
- 2) 進捗ウィンドウを確認します。

結果の表示

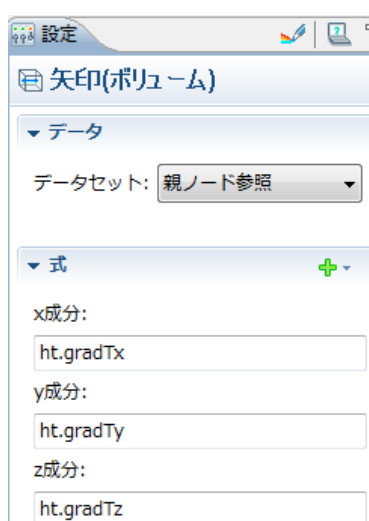
- 1) 温度(ht)ノードを選択してプロットボタンをクリックする。
(計算を終了時点で、このノードの内容がデフォルト表示としてプロットされる。)



- 2) 等温線(ht)ノードを選択し、プロットボタンをクリックします。
(ノードを選択した時点で内容が表示される。内容を変更した場合にはプロットボタンをクリックすると変更された内容が表示されます。)



- 3) 矢印 (ボリューム) 1 ノードをクリックし設定ウィンドウで温度の勾配ベクトルが設定されていることを確認します。



熱流束の評価

長さ L だけ離れた位置の温度差を知れば、熱流束 q を次式で計算できます。

$$q = -k \frac{T_{High} - T_{Low}}{L}$$

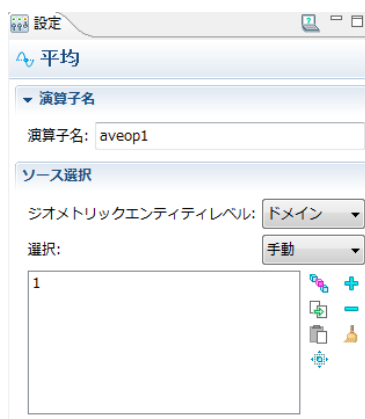
- 1) グローバル定義ノードを右クリックしてパラメータを選択します。
- 2) パラメータで以下を設定します。

P1 パラメータ

▼ パラメータ

名前	式	値
k	372[W/(m*K)]	372 W/(m·K)
Thigh	500[K]	500 K
Tlow	273.15[K]	273.2 K
L	1[m]	1 m
q	$-k*(Thigh-Tlow)/L$	-84390.0 W/m ²

- 3) モデル 1 の下の定義ノードを右クリックし、モデルカップリング>平均を選択します。
- 4) 平均 1 (aveop1) ノードを右クリックし、ドメイン番号 1 を選択します。



- 5) モデル 1 の下の定義ノードを右クリックし、変数を選択します。
- 6) 変数 1a ノードをクリックして設定ウィンドウに行き、以下を設定します。

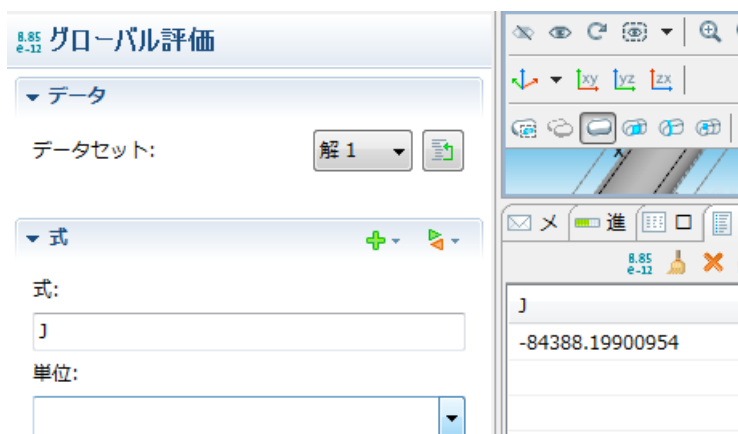
▼ 変数

名前	式	単位	説明
J	$aveop1(-ht.kzz*Tz)$	W/m ²	

ht.zz は熱伝導率の z 方向成分（ここでは等方性としているので熱伝導率 k のこと）であ

り、 T_z は T の z 方向偏微分 $\frac{\partial T}{\partial z}$ です。

- 7) スタディノードで**解を更新**を実行し、新変数 J を利用できるようにします。
- 8) 結果ノードの下の**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。
- 9) **グローバル評価 1** をクリックして設定ウィンドウに行き、式に J を設定し、**=**ボタンをクリックします。すると**結果**ウィンドウに以下が表示されます。

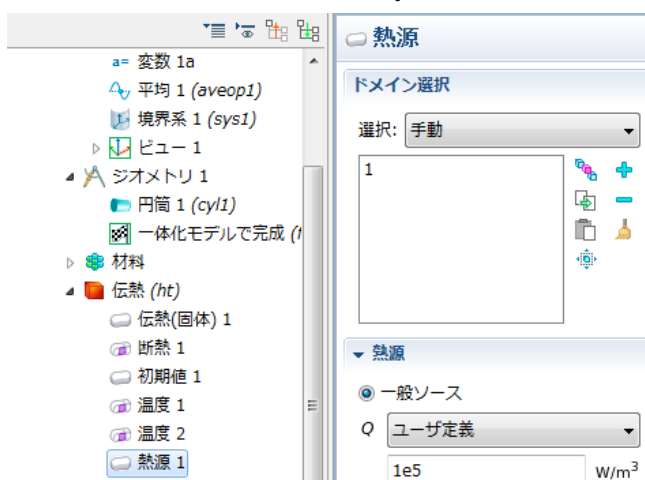


この結果は、パラメータでの計算値 $-84390.0[\text{W}/\text{m}^2]$ と一致します。

上で示した熱流束の評価式は長さ L での温度分布が直線分布である場合にのみ成立します。温度分布が線形でない場合にはこのような式は使えないので、ここで示した丸棒という形状の簡単なものにおいても COMSOL による解析が有効なものとなります。

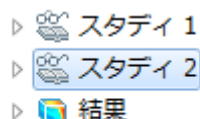
線形でない温度分布の例

- 1) **伝熱(ht)**ノードを右クリックし**熱源**を選びます。
- 2) **熱源 1** をクリックし、設定ウィンドウでドメイン番号 **1** を選択します。
- 3) **熱源**セクションで**一般ソース Q** に $1e5[\text{W}/\text{m}^3]$ を設定します。



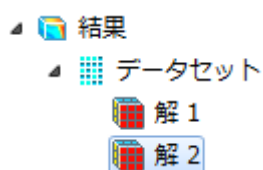
4) root ノードを右クリックし、**スタディを追加**を選択し、**スタディタイプ**を選択で定常を選択し、**完了**ボタンをクリックします。

5) モデルビルダに**スタディ 2**ができたことを確認します。



6) **スタディ 2** ノードを右クリックして**計算**を実行します。

7) **結果**ノードの**データセット**ノードを展開すると**解 2**が追加されたことがわかります。



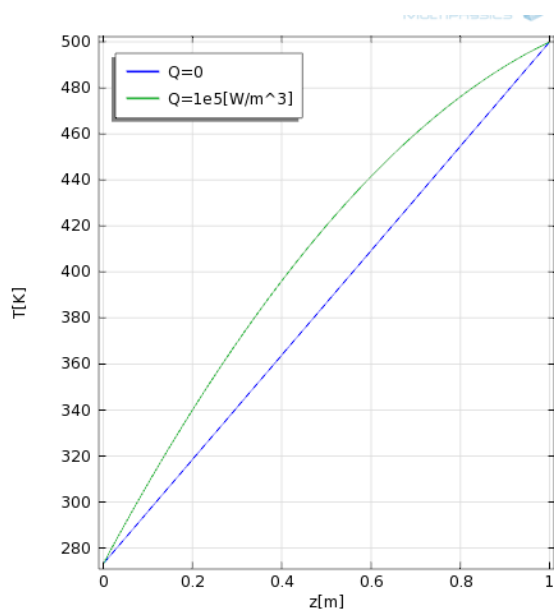
8) **結果**ノードを右クリックし、**表示グループ(1D)**を選択します。

9) **表示グループ(1D)**ノードを右クリックし、**グラフ(ライン)**を選択します。

10) **グラフ (ライン) 1** ノードをクリックして設定ウィンドウに行き、**データセット**を解 1 にし、**選択リスト**にエッジ番号 1 を選択します。

11) **表示グループ(1D)**ノードを右クリックし、**グラフ(ライン)**を選択します。

12) **グラフ (ライン) 2** ノードをクリックして設定ウィンドウに行き、**データセット**を**解 2**にし、**選択リスト**にエッジ番号 1 を選択します。



図のタイトルや軸の説明は表示グループの設定ウィンドウで、凡例の記述はグラフ (ライン) の設定ウィンドウで行います。

図のタイトルや軸の設定

1) 表示グループノードの設定ウィンドウに**表示設定**セクションがあります。

2) もし必要であれば、**座標軸**セクションにある**手動座標限界**にチェックを入れて、座標軸の範囲の設定を行います。

凡例の設定

1) グラフノードをクリックして設定ウィンドウに行きます。
2) レジェンドセクションで**レジェンド表示**にチェックを入れ、

のように、凡例の内容を記述します。

表示させる各グラフについてこの設定を行います。

ここを押さえておこう！

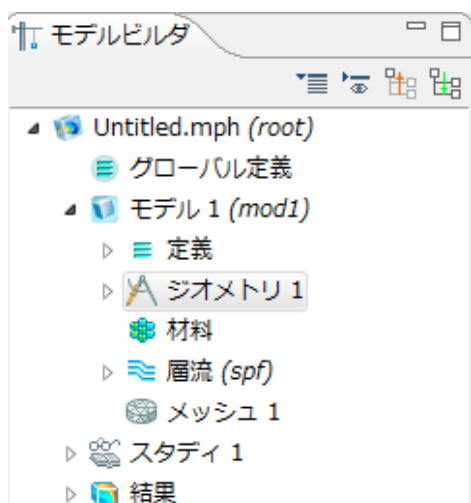
- 1) 形状の作成過程でできたエッジ上の物理量の分布は
表示グループ(1D) > グラフ(ライン)を使って表示できます。
- 2) タイトルや軸の範囲の設定は**表示グループノード**の設定ウィンドウで行います。
- 3) グラフの凡例は**グラフ(ライン)**の設定ウィンドウの**レジェンド**セクションで行います。

例題5 「水の流れを計算してみよう」

円管内部の水の流れを計算してみましょう。

層流(spfi)インターフェースの利用

- 1) COMSOL 4.2 を立ち上げます。
- 2) 空間次元を 3D とし、次へボタンをクリックし、フィジックスを追加で
流体流れ>単相流>層流(spfi)を右クリックし、選択フィジックスリストに追加します。
- 3) 次へボタンをクリックし、スタディタイプを選択で定常をクリックし
完了ボタンをクリックします。
- 4) モデルビルダのプロトタイプ構成が以下のようになっていることを確認します。



形状の読み込み（あるいは作成）

- 1) ジオメトリノードを右クリックして、インポートを選択します。
- 2) 例題 1 で作成した形状データ(Cylinder.mphbin)のファイル名を指定後、インポートボタンをクリックします。
すると、グラフィックスウィンドウに円柱が表示されます。
あるいは、例題 1 の手順で円柱を作成します。

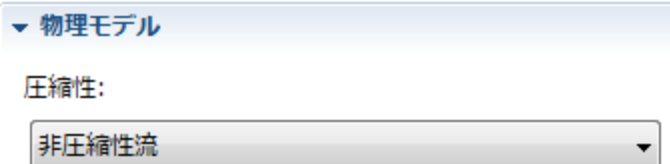
層流(spfi)の設定

- 1) 層流(spfi)ノードを展開し、以下であることを確認します。



このことから、ここでの作業は、流入口、流出口について行えばよいことがわかります。

- 2) 層流(spfi)ノードをクリックし、設定ウィンドウで、ドメイン番号 1 が選択リストに選択されていることを確認します。
- 3) 物理モデルセクションで圧縮性を非圧縮性流にします。



パラメータの設定

- 1) グローバル定義ノードを右クリックし、パラメータを選択します。
- 2) パラメータノードで以下を設定します。

名前	式	値	説
d	$(0.1 \cdot 2)[m]$	0.2 m	
L	1[m]	1 m	
A	$\pi \cdot d^2 / 4$	0.0314159...	
Uin	0.005[m/s]	0.005 m/s	
mu0	$1e-3[Pa \cdot s]$	0.001 Pa·s	
rho0	1000[kg/m ³]	1000 kg/m ³	
Re	$\rho_0 \cdot U_{in} \cdot d / \mu_0$	1000	

ここで、 Re はレイノルズ数です。 $Re=1000$ なので層流であることがわかります。

材料の定義

- 1) 材料ノードを右クリックし、**材料**を選択します。
- 2) 材料1ノードをクリックし設定ウィンドウでドメイン番号1が選択されていることを確認します。
- 3) 材料コンテンツセクションで密度に ρ , 粘性係数に μ を設定します。
各々、パラメータですすでに定義した変数です。

▼ 材料コンテンツ				
	特性	名前	値	単位
✓	密度	ρ	ρ_0	kg/m^3
✓	粘性係数	μ	μ_0	$\text{Pa}\cdot\text{s}$

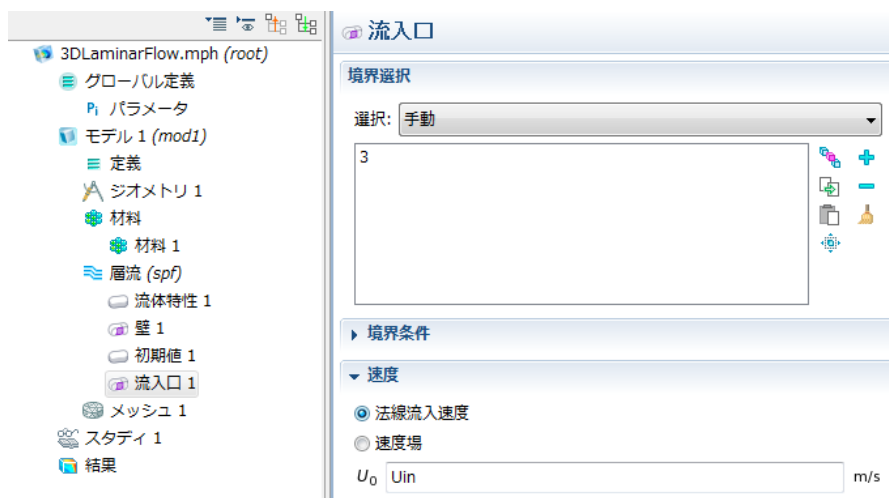
流体特性の設定

流体特性1ノードをクリックして設定ウィンドウに行き、
密度、粘性係数が材料データ参照になっていることを確認します。

▼ 流体特性	
密度:	
ρ	材料データ参照 ▼
粘性係数:	
μ	材料データ参照 ▼

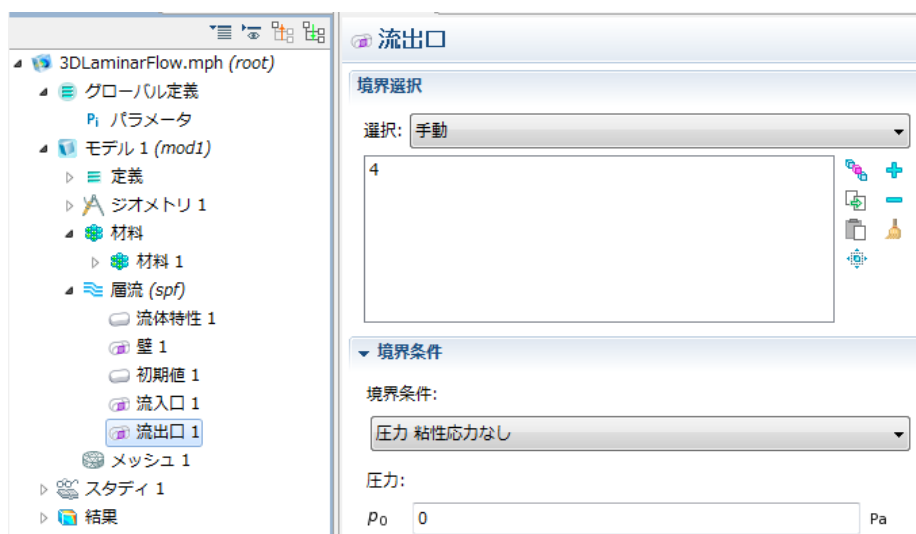
流入口の設定

- 1) 層流(**spf**)ノードを右クリックし、**流入口**を選択します。
- 2) 流入口1ノードをクリックし、設定ウィンドウに行きます。
- 3) 面番号3を選択リストに選択します。
- 4) 速度セクションで法線流入速度 U_0 に U_{in} を設定します。
 U_{in} はパラメータで設定した変数です。



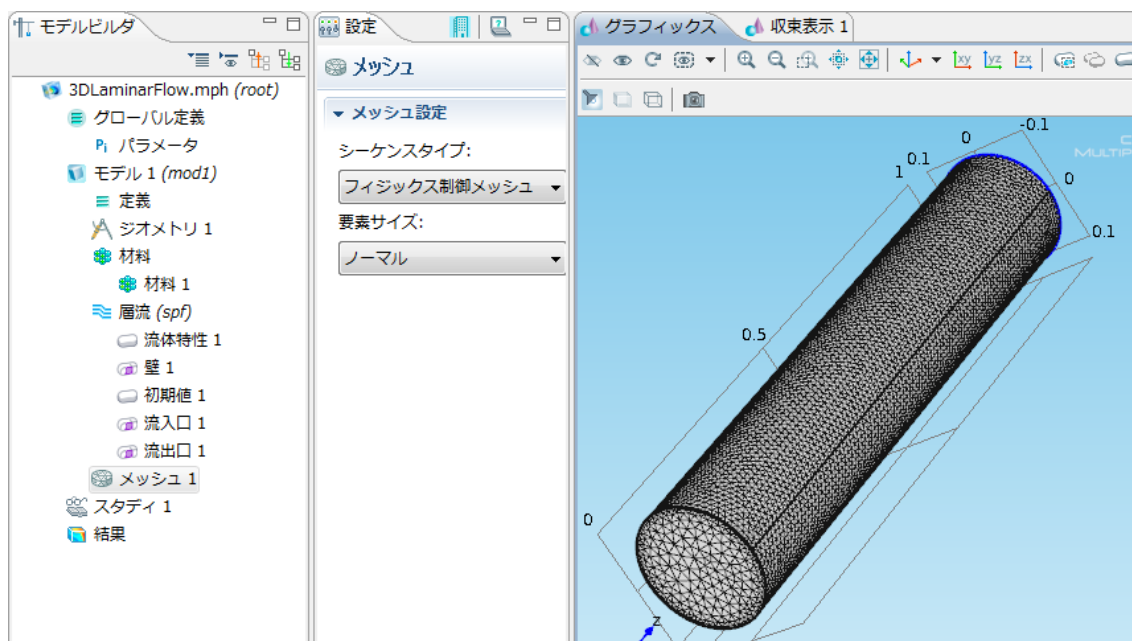
流出口の設定

- 1) 層流(sp f)ノードを右クリックし、流出口を選択します。
- 2) 流出口 1 ノードをクリックして設定ウィンドウに行き、面番号 4 を選択します。



メッシュの作成

メッシュ 1 ノードをクリックし、設定ウィンドウでメッシュ設定セクションのシーケンスタイプがフィジックス制御メッシュになっていることを確認後、全て作成ボタンをクリックします。



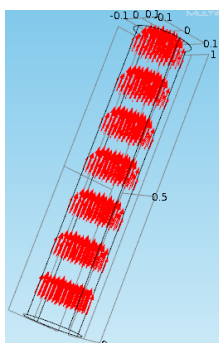
完成したメッシュを観察すると、すべりなし壁近傍のメッシュが細くなっていることがわかります。フィジックス制御はすべりなし壁近傍で速度が急激に変化する境界層が発達することを考慮してメッシュを自動作成するという意味です。

計算の実行

- 1) スタディ 1 ノードを右クリックし、**計算**を実行します。
- 2) 計算の収束状況が表示されます。

結果の表示

- 1) 結果ノードを右クリックし、**表示グループ (3D)** を選択します。
- 2) **表示グループ(3D)3** ノードを右クリックして矢印 (**ボリューム**) を選択します。
- 3) 矢印 (**ボリューム**) 1 ノードをクリックし、**カラーリング/スタイル**セクションで **スケールファクタ**を 2 にします。
- 4) **プロット**ボタンをクリックします。



ハーゲンポアズイユ流れの解析解との比較

完全発達した層流ではナビエ・ストークス方程式の厳密解を求めることができます。

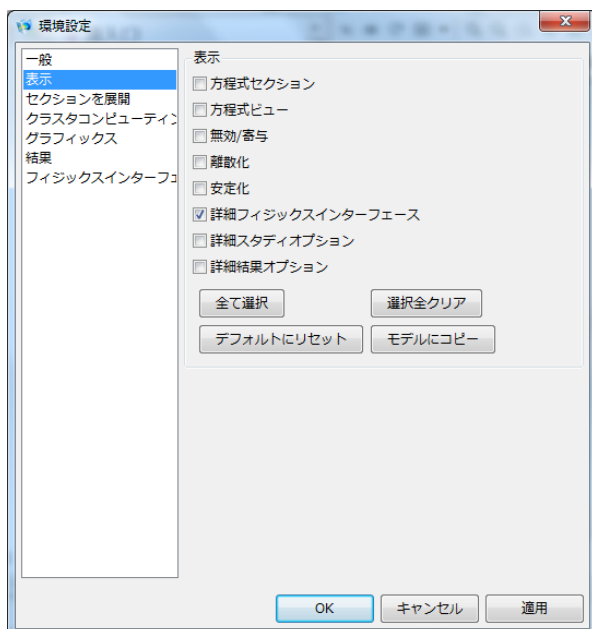
断面内の速度分布は次式で表されます。(流体力学 神部勉著 裳華房)

圧力勾配を P 、円管半径を a としたとき、

$$u(r) = P/(4\mu)(a^2 - r^2)$$

但し、 r は円管中心軸から測った半径方向距離です。

- 1) オプションメニューの**環境設定**>**表示**で
詳細フィジクスインターフェースにチェックを入れ、
適用ボタンをクリックし、OK ボタンで閉じます。



- 2) **流入口 1** ノードの設定ウィンドウに行き、**境界条件**セクションを
層流流入に変更します。
- 3) **平均速度**に U_{in} を設定します。
- 4) **外部エッジゼロ拘束**にチェックを入れます。

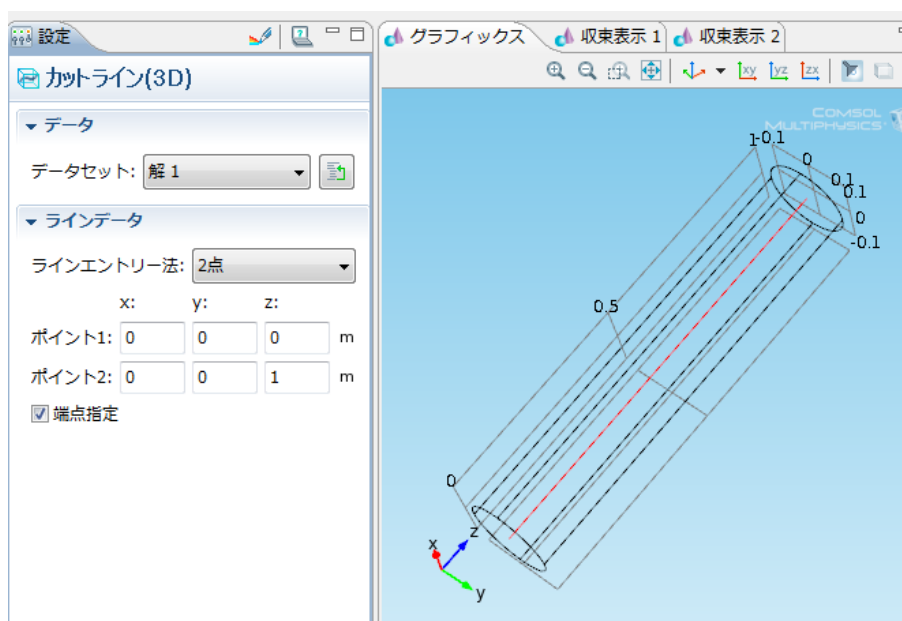


5) **スタディ 1** ノードを右クリックして計算を実行します。

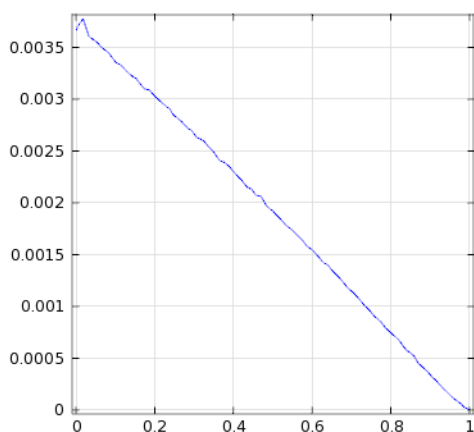
先ほどの計算時間よりかなり短くなります。先ほどの流入口での条件設定では U_{in} を一様に設定しましたが、壁でのすべりなし条件と矛盾しますので、そこの収束に時間を要しましたが、今回の設定ではすべりなし壁条件を満たすように長さ 1 [m] の助走区間を付けましたので収束が良いためです。また、ハーゲン-ポアズイユ流の前提条件である完全発達した層流も実現できたと考えられます。

圧力勾配

- 1) **データセット** ノードを右クリックし、**カットラインライン(3D)** を選択し、円管の中心軸を規定する始点(0,0,0)、終点(0,0,1)を設定し、**プロット** ボタンを押します。



- 2) 結果ノードを右クリックし、表示グループ (1D) を選択します。
- 3) 表示グループ(1D) 4を右クリックし、グラフ (ライン) を選択します。
- 4) グラフ (ライン) 1 の設定ウィンドウでデータセットを
カットラインライン(3D)1 にします。
- 5) y-軸データで式に p を設定し、プロットボタンを押します。
圧力はほぼ直線分布を示しています。



p の代わりに pz を設定し、プロットボタンをクリックすると、管路のほとんどの領域で負の圧力勾配 P が約 0.004 [Pa/m] であることがわかります。

- 6) モデル 1 の定義ノードを右クリックし、変数を選択し、以下を設定します。

a= 変数

ジオメトリックエンティティ選択

ジオメトリックエンティティレベル: 全体モデル ▼

▼ 変数

名前	式	単位
r2	x^2+y^2	m ²
P	0.004[Pa/m]	N/m ³
U_HP	$P/(4*\mu_0)*(0.1^2-r^2)$	m/s

- 7) データセットノードを右クリックし、カットライン(3D)を選択します。
 カットライン(3D)の設定ウィンドウで以下を設定します。

▼ ラインデータ

ラインエントリー法: 2点 ▼

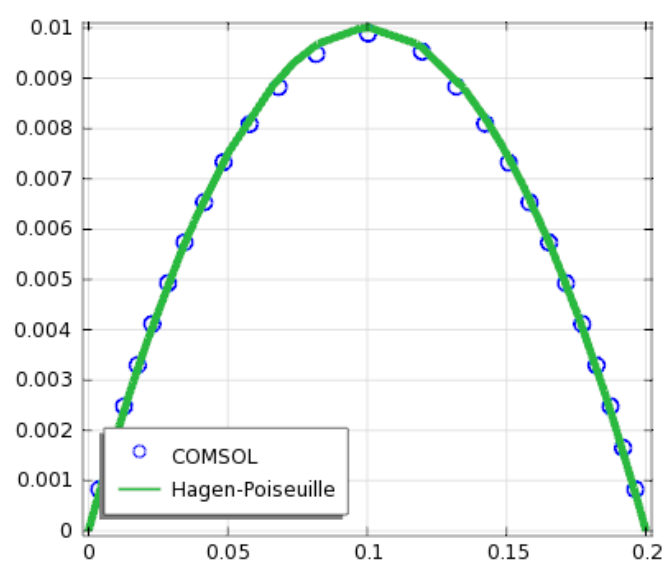
	x:	y:	z:	
ポイント1:	0	-0.1	1	m
ポイント2:	0	0.1	1	m

端点指定

- 8) 結果ノードを右クリックし、表示グループ(1D)を選択し、
 表示グループ(1D)の設定ウィンドウでデータセットを
 カットライン(3D)2 にします。
- 9) 表示グループ(1D)を右クリックしてグラフ (ライン) を選択し、
 グラフ (ライン) 1 の設定ウィンドウで式に w を設定します。
 レジェンドを COMSOL にします。
- 10) スタディノードを右クリックし、解を更新を実行します。
- 11) 表示グループ(1D)を右クリックしてグラフ (ライン) を選択し、
 グラフ (ライン) 2 の設定ウィンドウで式に U_HP を設定します。
 レジェンドを Hagen-Poiseuille にします。

横軸に y 座標値、縦軸に速度の z 方向成分をプロットしています。

Hagen-Poiseuille 流では最大速度は平均速度の 2 倍になることがわかっています。
 軸上で、平均速度 0.005[m/s] の 2 倍である 0.01[m/s] になっていることがわかります。



COMSOL の計算結果と厳密解はよく一致します。

ここを押さえておこう！

- 1) 流体流れの問題では境界層をよく理解することが重要です。
- 2) 境界層を計算で解像するには層内にメッシュを集中させる必要があります、そのために**フィジックス制御**が用意されています。
- 3) 壁ですべりなし条件を設定している場合、入口速度分布の与え方をよく考える必要があります。ここでは**層流流入**を紹介しましたが、**Hagen-Poiseuille** 分布を与えるのも一つの考え方です。
- 4) 変数では空間変数(x,y,z)を使って式を定義することができます。時間を考える場合には t を使うことができます。

4. マルチフィジックス

例題5 「部屋の中の温風の動きと温度分布を計算してみよう」

この例題は、流体と伝熱の連成を取り扱います。

座標系：下図の通り。

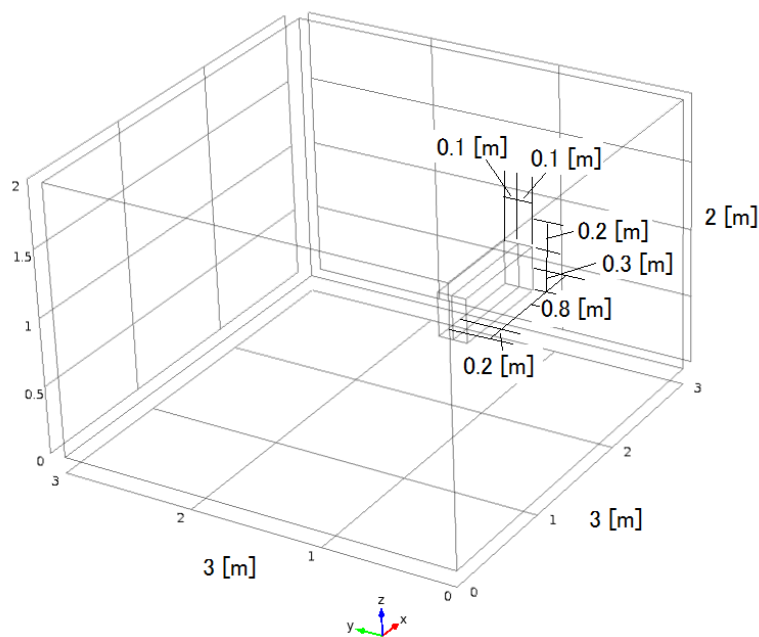
部屋の大きさ：3[m]×3[m]×2[m]

エアコン：0.8[m]×0.2[m]×0.3[m]

前面(y=0.2[m]面)から吹き出し。温度 30[degC]。

側面(x=1.0[m]面)に幅 0.1[m]、高さ 0.3[m]の排気口あり。

壁への取り付けコーナー位置：(0.2[m], 0[m], 1.5[m])

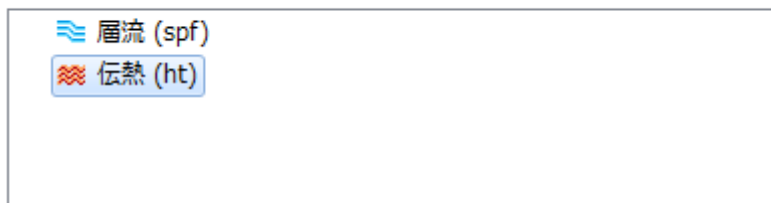


ここでは層流(spfn)インターフェースと伝熱()インターフェースを使います。

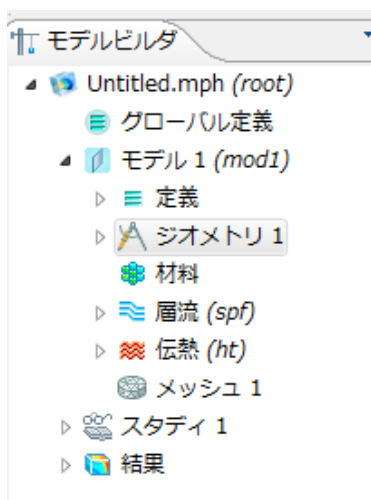
層流(spfn)インターフェースおよび伝熱(流体)(ht)インターフェースの利用

- 1) COMSOL 4.2 を立ち上げます。
- 2) 空間次元を 3D とし、次へボタンをクリックし、フィジックスを追加で
 流体流れ>単相流>層流(spfn)を右クリックし、選択フィジックスリストに追加します。
 伝熱>伝熱(流体)(ht)を右クリックし、選択フィジックスリストに追加します。

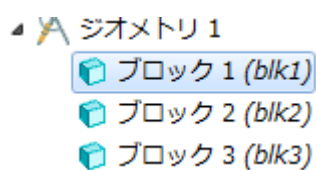
- 選択フィジックス -



- 3) 次へボタンをクリックし、スタディタイプを選択で定常をクリックし完了ボタンをクリックします。
- 4) モデルビルダのプロトタイプ構成が以下のようにになっていることを確認します。

形状の作成

- 1) ジオメトリノードを右クリックして、ブロックを3個、選択します。



- 2) ブロック 1 の設定ウィンドウで以下を行います。
幅 3[m]、深さ 3[m]、高さ 2[m]をベース位置 (コーナー) (0,0,0)に設定。

▼ オブジェクトタイプ

タイプ: ソリッド

▼ サイズおよび形状

幅: 3

深さ: 3

高さ: 2

▼ 位置

ベース: コーナー

x: 0

y: 0

z: 0

3) ブロック 2 の設定ウィンドウで以下を行います。

幅 0.8[m]、深さ 0.2[m]、高さ 0.3[m]をベース位置 (コーナー) (0.2,0,1.5)に設定。

▼ オブジェクトタイプ

タイプ: ソリッド

▼ サイズおよび形状

幅: 0.8

深さ: 0.2

高さ: 0.3

▼ 位置

ベース: コーナー

x: 0.2

y: 0

z: 1.5

4) ブロック 3 の設定ウィンドウで以下を行います。

幅 0.3[m]、深さ 0.1[m]、高さ 0.3[m]をベース位置 (コーナー) (0.2,0,1.5)に設定。

▼ オブジェクトタイプ

タイプ: ソリッド

▼ サイズおよび形状

幅: 0.3

深さ: 0.1

高さ: 0.3

▼ 位置

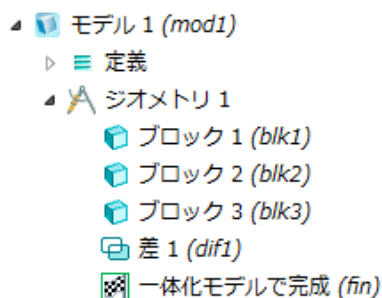
ベース: コーナー

x: 0.2

y: 0

z: 1.5

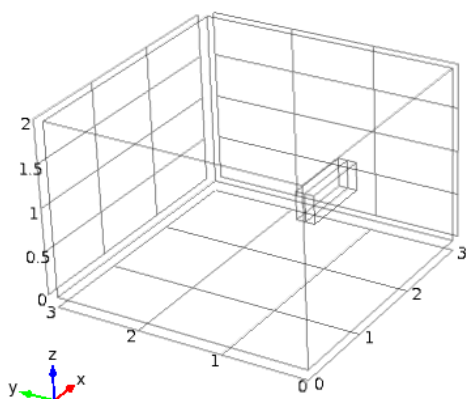
5) ジオメトリ 1 ノードを右クリックして、ブーリアン演算>差を選択します。



- 6) 差 1 ノードの設定ウィンドウで以下を行います。
 追加するオブジェクトの選択リストの中をクリックしてアクティブにして
 部屋(blk1)を左クリック、右クリックで選択します。
 続いて、差し引くオブジェクトの選択リストの中をクリックしてアクティブにし、
 エアコン(blk2, blk3)を左クリック、右クリックで選択します。



- 7) 全て作成ボタンをクリックします。



パラメータの設定

- 1) グローバル定義を右クリックし、パラメータを選択します。
- 2) パラメータの設定ウィンドウで以下を設定します。

▼ パラメータ		
名前	式	値
g0	g_const	9.807 m/s ²
rho0	1.25[kg/m ³]	1.25 kg/m ³
eta0	1e-3[Pa*s]	0.001 Pa*s
alpha0	0.2e-3[1/K]	2.0E-4 1/K
T0	20[degC]	293.2 K

rho0 は空気の密度、eta0 は空気の粘性係数、alpha0 は空気の体積膨張係数です。T0 は部屋の初期温度です。g0 は重力加速度であり、COMSOL は g_const という形でもっています。

層流(spf)の設定

- 1) 層流(spf)ノードを選択し、設定ウィンドウに行きます。
- 2) 物理モデルセクションの圧縮性を非圧縮性流にします。

流体特性の設定

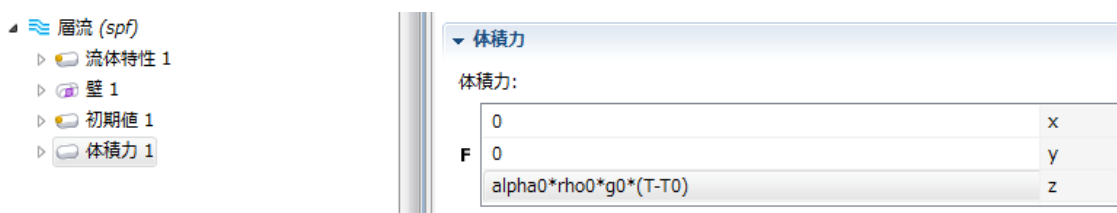
- 1) 流体特性 1 ノードの設定ウィンドウに行きます。
- 2) 密度、粘性係数を以下のように設定します。

ここではブシネスク近似の考え方に従って、密度を一定値 rho0 に設定しています。粘性係数も一定値 eta0 に設定します。



浮力項の設定

- 1) 層流(spf)ノードを右クリックし、**体積力**を選択します。
- 2) 体積力ノードをクリックして設定ウィンドウに行き、ドメイン選択リストにドメイン番号1を入れます。
さらに、**体積力**セクションで浮力を以下のように設定します。
F の x,y,z 各成分に 0, 0, $\alpha_0 \cdot g_{\text{const}} \cdot \rho_0 \cdot (T - T_0)$ を設定します。



温度 T が初期温度 T_0 よりも高くなると上向きの力がかかる、あるいは温度 T が T_0 より低くなると下向きの力がかかることがわかります。この表現はブシネスク近似と称されるものです。

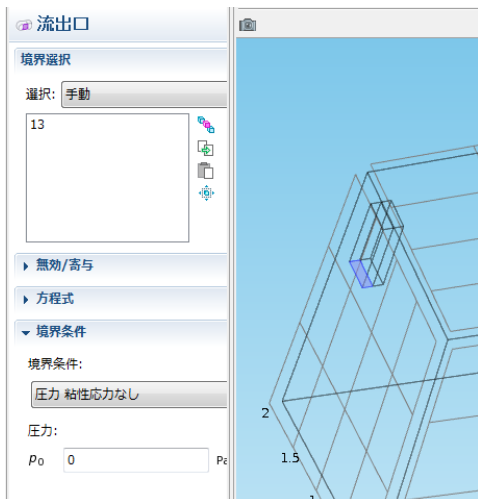
流入口の設定 (吹き出し口)

- 1) 層流(spf)ノードを右クリックし、**流入口**を選択します。
- 2) 流入口ノードの設定ウィンドウに行き、選択リストに面番号12を選択します。
速度セクションを**速度場**に変更し、 u_0 に(0.002, 0.05, -0.01)を設定します。



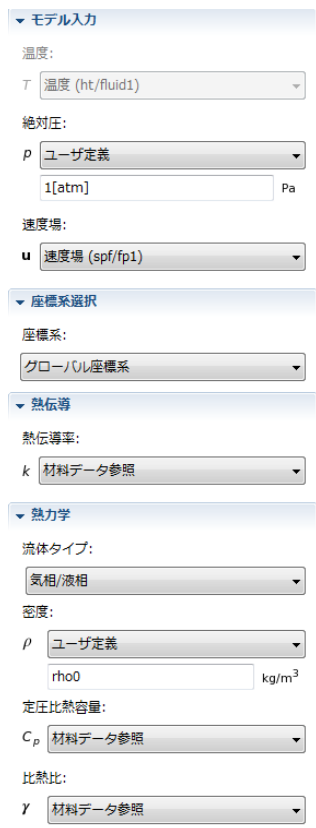
流出口の設定

- 1) 層流(sp1)ノードを右クリックし、流出口を選択します。
- 2) 流出口ノードの設定ウィンドウに行き、面番号 13 を選びます。



伝熱(ht)の設定

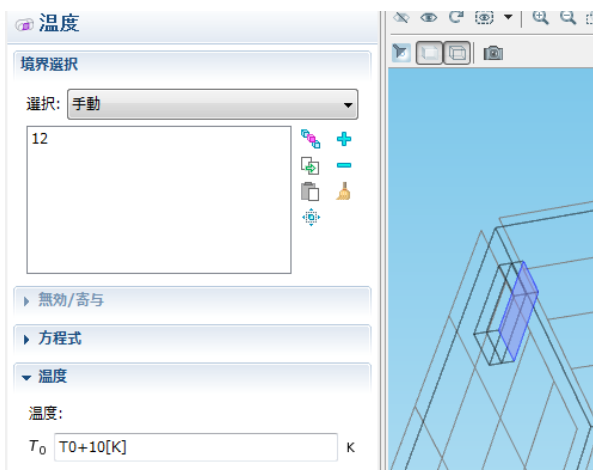
- 1) 伝熱 (流体) 1 ノードをクリックし、設定ウィンドウに行きます。
- 2) 設定ウィンドウのモデル入力セクションで速度場を速度場(sp1/fp1)にします。
密度のみユーザー定義に変更し、rho0 を入力します。



温度の設定（吹き出し口）

- 1) 伝熱(ht)ノードを右クリックし、**温度**を選択します。
- 2) **温度 1** ノードをクリックし、設定ウィンドウに行き、以下を行います。

選択リストに面番号 12 を選び、**温度**に $T_0+10[\text{K}]$ を設定します。



流出の設定（排気口）

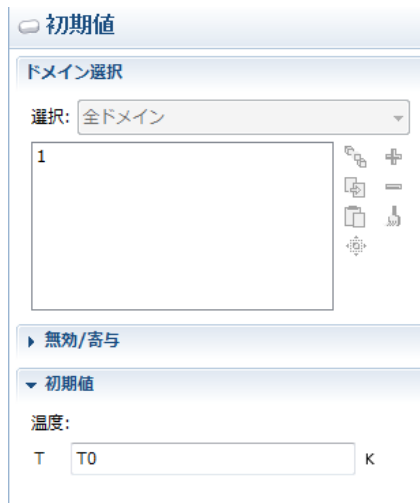
- 1) 伝熱(ht)ノードを右クリックし、**流出**を選択します。
- 2) **流出 1** ノードをクリックし、設定ウィンドウに行き、以下を行います。

選択リストに面番号 13 を選びます。



初期温度の設定

- 1) 初期値 1 ノードをクリックします。
- 2) 初期値 1 の設定ウィンドウで、温度を T_0 にします。



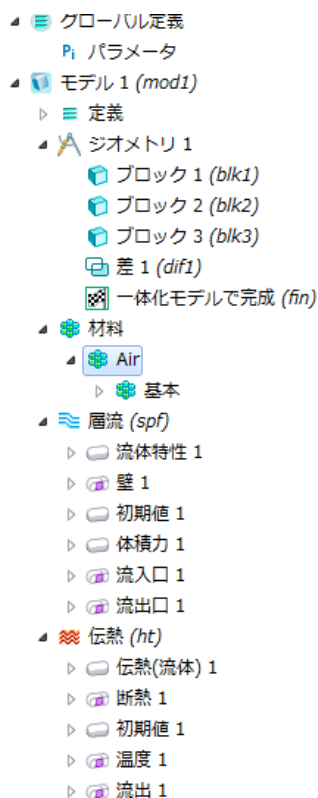
材料の設定

- 1) 材料ノードを右クリックし、材料ブラウザをオープンを選択します。
- 2) 材料ブラウザをオープンノードをクリックし、設定ウィンドウに行き、標準材料ライブラリから Air を右クリックで選択します。

▼ 材料コンテンツ			
	特性	名前	値
✓	比熱比	gamma	1.4
✓	定圧比熱容量	Cp	Cp(T[1/K])[J/(kg*K)]
✓	熱伝導率	k	k(T[1/K])[W/(m*K)]

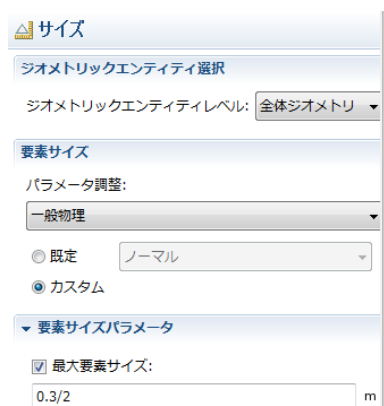
先ほど、伝熱で材料ライブラリ参照にした物性値 3 個がここに設定されていることを確認します。定圧比熱と熱伝導率は温度の関数になっています。

いままでの設定で以下のモデルツリーが完成したことを確認します。

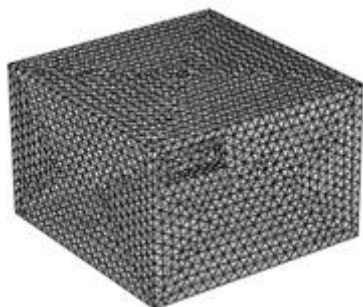


メッシュの作成

- 1) メッシュノードをクリックし、設定ウィンドウに行き、フリーメッシュ四面体を選択します。
- 2) フリーメッシュ四面体を右クリックしてサイズを選択します。
- 3) サイズ1の設定ウィンドウで、カスタムを選択して、最大要素サイズをデフォルトの半分である $0.3/2$ を設定します。



- 4) 全て作成ボタンをクリックします。



計算の実行

- 1) スタディを右クリックし、**計算**を選択します。
- 2) 収束状況を示すグラフが表示されます。

結果の表示

- 1) **結果**ノードの下の**等温線**ノードを右クリックして、**流線**を選択します。
- 2) **流線 1**ノードをクリックして設定ウィンドウで式の x,y,z 各成分に、 u,v,w を設定します。
面番号 **12** を選択リストに設定します。
ラインの色は赤にします。

▼ データ

データセット: 親ノード参照

▼ 式

x成分: u

y成分: v

z成分: w

説明: 速度場

選択

選択: 手動

12

▼ ポジショニング

ポジショニング: 選択境界

数: 20

▼ カラーリング/スタイル

タイプ: ライン

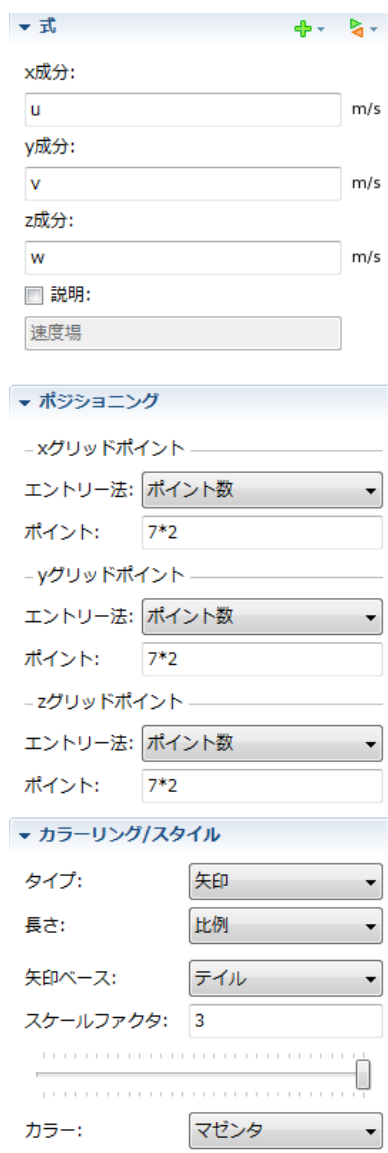
カラー: 赤

3) 矢印 (ボリューム) 1 ノードをクリックし、設定ウィンドウで以下のようにします。

ベクトルのポイント数を*2 をつけて2倍にします。

カラーリング/スタイルセクションで長さを比例にし、スケールファクタを3にします。

カラーはマゼンタにします。



▼ 式

x成分: u m/s

y成分: v m/s

z成分: w m/s

説明:
速度場

▼ ポジショニング

-xグリッドポイント

エントリー法: ポイント数

ポイント: 7*2

-yグリッドポイント

エントリー法: ポイント数

ポイント: 7*2

-zグリッドポイント

エントリー法: ポイント数

ポイント: 7*2

▼ カラーリング/スタイル

タイプ: 矢印

長さ: 比例

矢印ベース: テイル


スケールファクタ: 3



カラー: マゼンタ

- 4) 等値面 1 ノードをクリックし、設定ウィンドウで以下のようにします。
レベルセクションでトータルレベルを 10、
カラーリング/スタイルセクションでカラーテーブルを
RainbowLight にします。

等値面

▼ データ

データセット: 親ノード参照 

▼ 式  

式:
T

単位:
K

説明:
温度

▼ レベル

エントリー法: レベル数

トータルレベル: 10

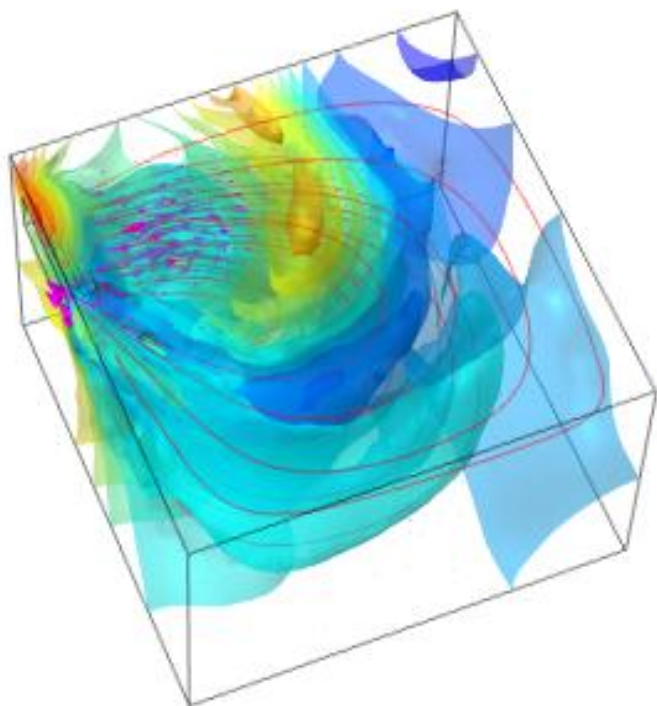
▼ カラーリング/スタイル

カラーリング: カラーテーブル

カラーテーブル: RainbowLight

—

5) プロットボタンをクリックします。



ここを押さえておこう！

- 1) 連成計算の準備においてはフィジックス追加で複数のフィジックスを選択しますが、これを行わない場合には、**モデルビルダー**の**モデルノード**を右クリックしてフィジックスの追加を選択すれば、プロトタイプの構築後でもフィジックスの追加ができます。
- 2) 層流インターフェース側は体積力の設定に温度Tを使っており、このTの記述によって、伝熱インターフェースの温度Tを参照するという宣言が行われています。
- 3) 一方で、伝熱インターフェース側では、**spf/fp1** を使うことで、層流インターフェースの速度成分(**u,v,w**)を参照ということが定義されています。

例題6 「加熱による構造体の変形を計算してみよう」

構造体を加熱しますと一般に熱膨張を生じ、変形します。

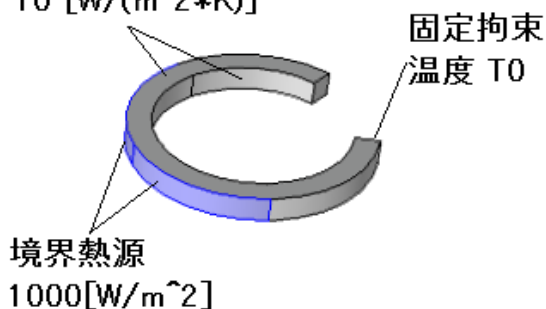
ここではその現象を計算してみます。この例題は

熱応力インターフェースで解析できます。このインターフェースは単独で固体力学と伝熱の解析機能を併せ持っています。

熱流束

熱伝達係数

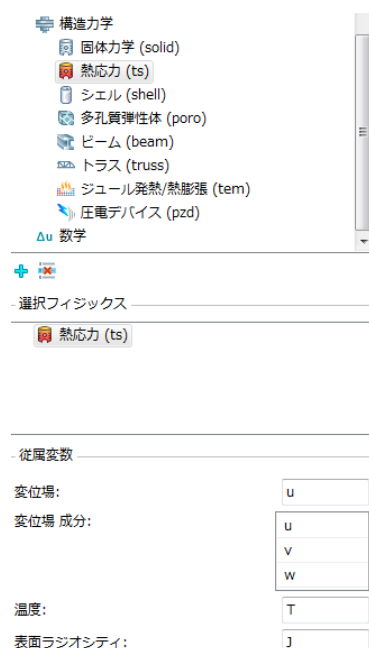
10 [W/(m²*K)]



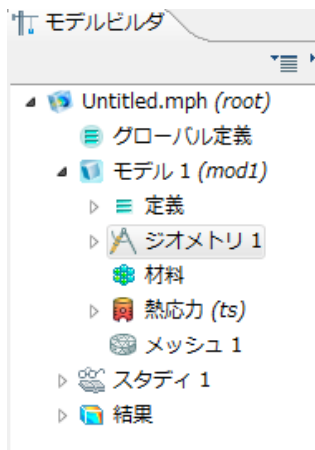
初期温度 $T_0=20[\text{degC}]$

熱応力(ts)インターフェースの利用

- 1) COMSOL 4.2 を立ち上げます。
- 2) 空間次元を 3D とし、次へボタンをクリックし、フィジックスを追加で
構造力学>熱応力(ts)を右クリックし、選択フィジックスリストに追加します。

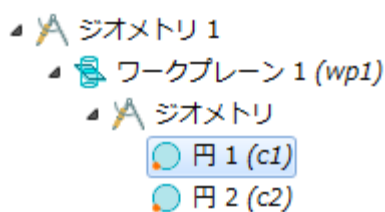


- 3) 次へボタンをクリックし、**スタディタイプ**を**選択**で**定常**をクリックし完了ボタンをクリックします。
- 4) **モデルビルダ**のプロトタイプ構成が以下のようにになっていることを確認します。



形状の定義

- 1) ジオメトリノードを右クリックして**ワークプレーン**を選択します。ワークプレーンを使うと**2D**図形を描画できます。
- 2) ワークプレーンノードの下の**ジオメトリ**で以下の作業をします。
- 3) ジオメトリノードを右クリックして**円**を**2**個選択し以下のことを行います。



- 円 1 (c1)**ノードをクリックして設定ウィンドウで半径 0.1, セクタ角 300



- 円 2 (c2)**ノードをクリックして設定ウィンドウで

半径 0.08, セクタ角 300

円

▼ オブジェクトタイプ

タイプ: ソリッド

▼ サイズおよび形状

半径: 0.08 m

セクタ角: 300 deg

▼ 位置

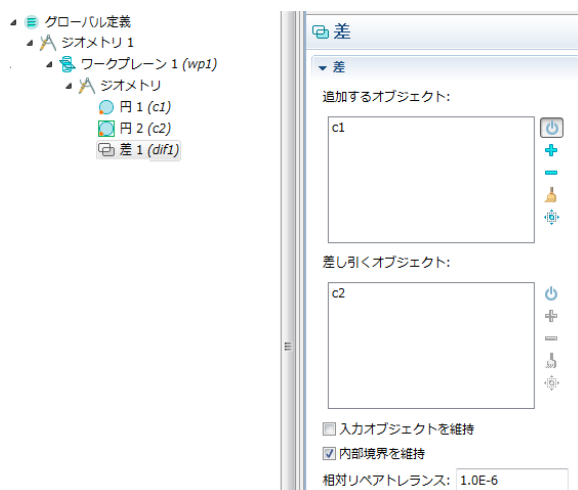
ベース: 中心

x: 0 m

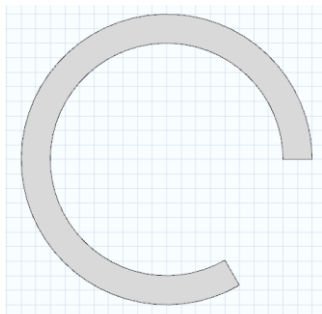
y: 0 m

とします。

- 4) ジオメトリを右クリックして、**ブーリアン演算** > **差** を選択します。
設定ウィンドウで追加するオブジェクトに C1 を、差し引くオブジェクトに C2 を設定します。

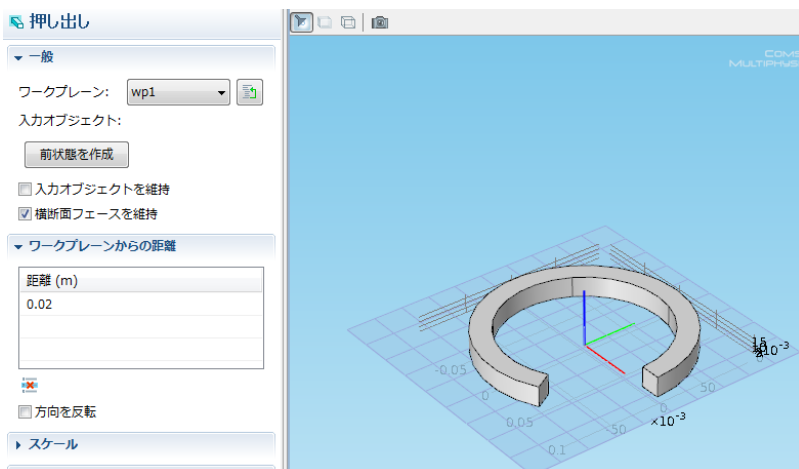


- 5) **全て作成** ボタンをクリックします。



- 6) ワークプレーンノードを右クリックして、**押し出し** を選択します。

7) 押し出し 1 ノードで距離に 0.02 を設定し、**全て作成**ボタンをクリックします。



材料の設定

- 1) 材料ノードを右クリックし、**材料ブラウザをオープン**を選択し、設定ウィンドウに行きます。
- 2) 標準材料ライブラリから **Aluminium** を右クリックで選択します。
材料コンテンツセクションに以下の数値が設定されています。

材料コンテンツ				
特性	名前	値	単位	特
✓ 定圧比熱容量	Cp	900[J/(kg*K)]	J/(k...	基
✓ 熱伝導率	k	160[W/(m*K)]	W/(...	基
✓ 熱膨張係数	alpha	23e-6[1/K]	1/K	基
✓ 密度	rho	2700[kg/m^3]	kg/...	基
✓ ヤング率	E	70e9[Pa]	Pa	ヤ
✓ ポアソン比	nu	0.33	1	ヤ

熱応力(ts)の設定

- 1) 熱線形弾性 1 ノードをクリックし、設定ウィンドウでひずみ参照温度 **Tref** に **T0** を設定します。
- 2) 他の項目はデフォルトのままです。

▼ 線形弾性モデル

ほぼ非圧縮性材料

固体モデル:

等方性

指定:

ヤング率/ポアソン比

$C = C(E, \nu)$

ヤング率:

E 材料データ参照

ポアソン比:

ν 材料データ参照

密度:

ρ 材料データ参照

▼ 熱膨張

熱膨張係数:

α 材料データ参照

ひずみ参照温度:

T_{ref} T0

▼ 熱伝導

熱伝導率:

k 材料データ参照

▼ 熱力学

定圧比熱容量:

C_p 材料データ参照

初期値の設定

- 1) 初期値 1 ノードをクリックして設定ウィンドウに行きます。
- 2) 温度 T に T0 を設定します。

▼ 初期値

変位場:

u	0	X	m
	0	Y	
	0	Z	

温度:

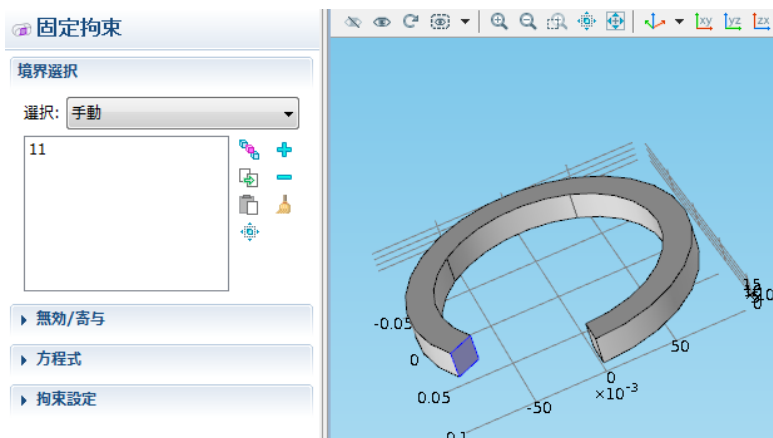
T T0 K

固定拘束

- 1) 熱応力ノードを右クリックし、固体力学 > 固定拘束を選びます。

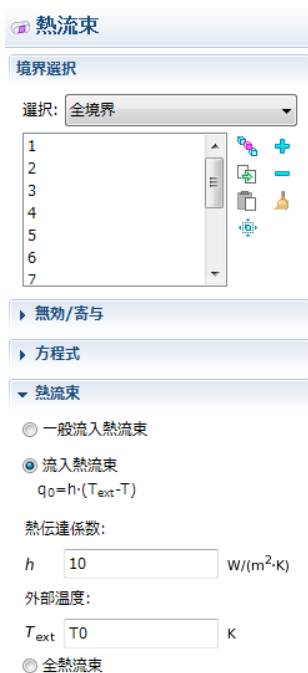
- 4 熱応力 (ts)
 - ▷ 熱線形弾性 1
 - ▷ フリー 1
 - ▷ 断熱 1
 - ▷ 初期値 1
 - ▷ 固定拘束 1

- 2) 固定拘束 1 ノードをクリックし、設定ウィンドウで
選択リストに面番号 11 を設定します。



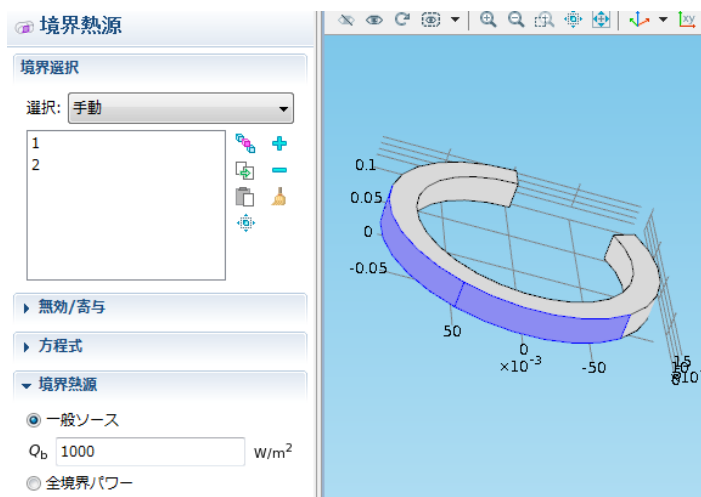
熱流束の設定

- 1) 熱応力ノードを右クリックし、**伝熱>熱流束**を選択します。
- 2) 熱流束 1 ノードをクリックし、設定ウィンドウの選択リストで
全境界を選択します。
- 3) 熱伝達係数 h に 10 を、外部温度 T_{ext} に T_0 を設定します。



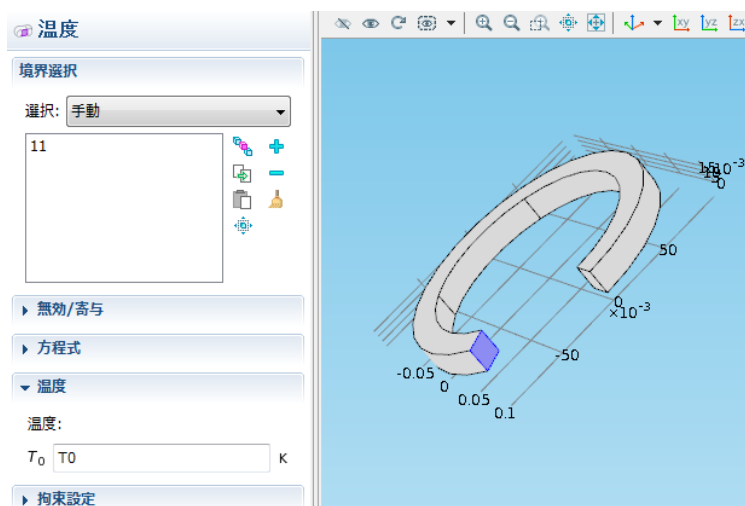
境界熱源の設定

- 1) 熱応力ノードを右クリックし、**伝熱>境界熱源**を選択します。
- 2) **境界熱源 1** ノードをクリックし、設定ウィンドウで面番号 1,2 を**選択リスト**に設定し、**境界熱源 Q_b** に 1000 を設定します。



温度の設定

- 1) 熱応力ノードを右クリックし、**伝熱>温度**を選択します。
- 2) **温度 1** ノードをクリックして設定ウィンドウに行き、面番号 11 を**選択リスト**に設定し、**温度 T_0** に T_0 を設定します。



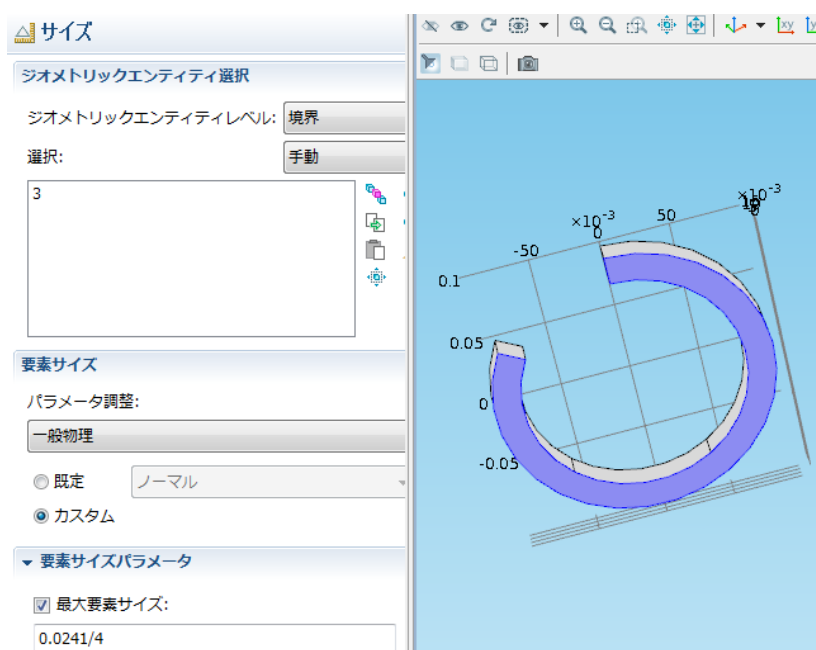
パラメータの設定

- 1) グローバル定義を右クリックしパラメータを選択します。
- 2) パラメータの設定ウィンドウで以下を入力します。

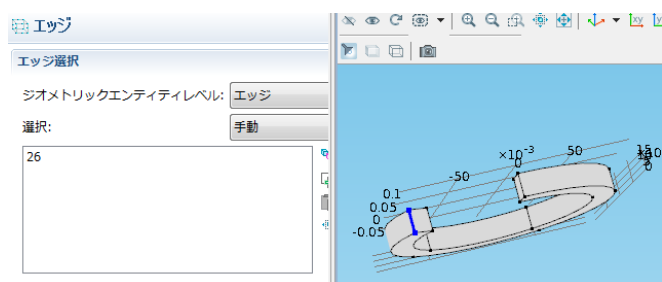
▼ パラメータ		
名前	式	値
T0	20[degC]	293.2 K

メッシュの生成

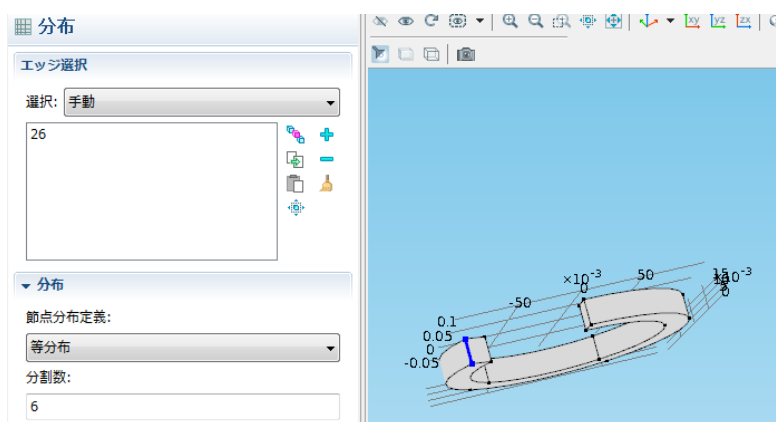
- 1) メッシュ 1 ノードを右クリックし **その他の操作 > フリーメッシュ 3 角形** を選択します。
- 2) フリーメッシュ 3 角形 1 ノードをクリックし、設定ウィンドウで面番号 3 を **選択リスト** に設定し、**カスタム** で **最大要素サイズ** に $0.0241/4$ を設定します。



- 3) メッシュ 1 ノードを右クリックし、**その他の操作 > エッジ** を選択します。
- 4) **エッジ 1** ノードの設定ウィンドウでエッジ番号 26 を選択します。



- 5) エッジ1ノードを右クリックし、**分布**を選択します。
- 6) 分布1ノードの設定ウィンドウで以下を行います。
エッジ番号26が選択されていることを確認し、
等分布で分割数6とします。



- 7) メッシュ1ノードを右クリックし、**スイープ**を選択します。
- 8) **全て作成**ボタンをクリックします。

ここまでの操作で、**モデルビルダ**のツリー構造が以下のようにになっていることを確認します。

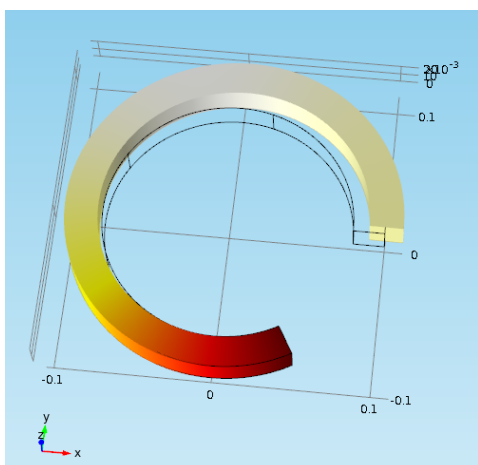


計算の実行

- 1) スタディ 1 ノードを右クリックし、**計算**を実行します。
- 2) 計算の収束状況が表示されます。

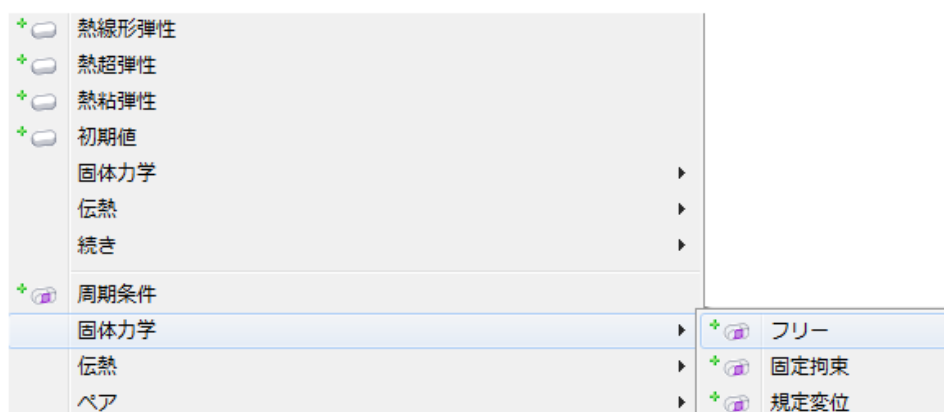
結果の表示

結果ノードの下の温度ノードの表示結果を示します。
 カラー分布が温度であり、変形形状も示されています。
 黒線のワイヤーフレームは初期形状です。



ここを押さえておこう！

- 1) 熱応力インターフェースのように一個のインターフェースであるのに、その中にマルチフィジックスが含まれているものがあります。
- 2) このようなインターフェースでは、例えば境界条件を選択する場合に、

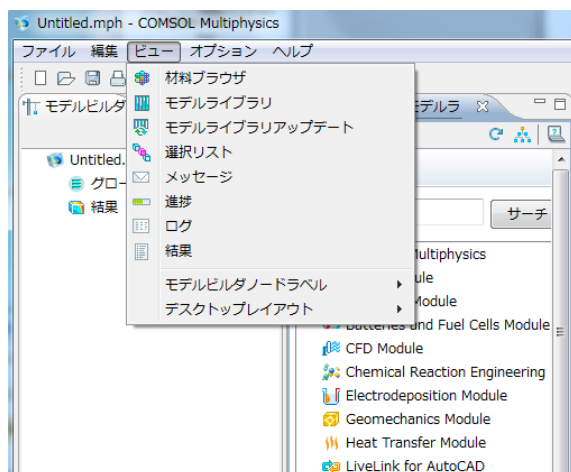


のように、コンテキストメニューで固体か伝熱かを判断する必要があります。

5. さらに進んだ解析に進むには

COMSOL Model Library にある事例の研究

COMSOL を立ち上げてビューメニューでモデルライブラリをオープンを選択します。



すると、以下のような一覧表が表示されますので、その中から自分の目的にあった例題を探します。



各例題とも、問題の説明、関連する方程式などの説明、操作手順がついています。各例題を書き換えることで、実用的な問題の解決に利用可能です。

COMSOL Conference CD-ROM 論文集の活用

これは無料で配布しています。この中には COMSOL を使った解析事例が多数、掲載されています。中には、COMSOL Conference の発表時に使ったパワーポイントまで入っているものがあります。

日本では毎年12月初めに東京で COMSOL Conference を実施しますが、その内容も CD-ROM に含まれています。

マニュアルの参照

COMSOL Multiphysics は基本モジュールと専門分野別モジュールから構成されています。基本モジュールは専門分野別モジュールの基礎になっているものです。従って、形状作成、メッシュ、ソルバー（マトリクス解法）などの共通部分について調べたい人は、基本モジュールに関するマニュアルを参照します。

C:\¥COMSOL42>doc>pdf>mph (=multiphysics の意味) で

COMSOLMultiphysicsUsersGuide.pdf

COMSOLMultiphysicsReferenceGuide.pdf

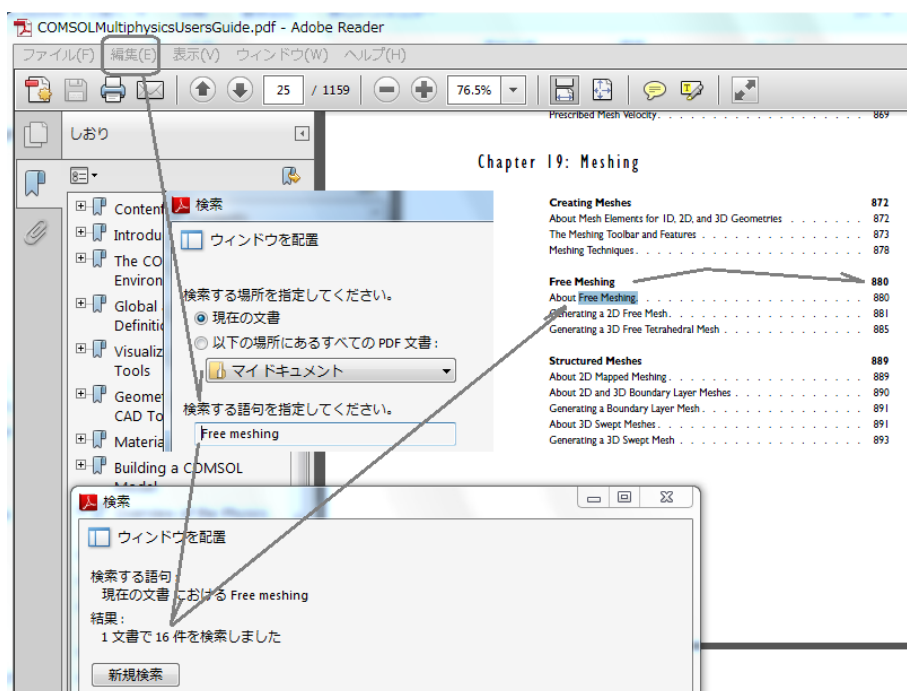
専門分野別モジュールのマニュアルは

C:\¥COMSOL42>doc>pdf の下にある各々のマニュアルを参照します。

これらのファイルを立ち上げると、以下のような PDF 画面に表示されます。

編集メニュー > **高度な検索** を選択し、検索する語句の指定を行います。

その語句を含む部分が青色にハイライトされて表示されますのでページ番号をクリックすると該当ページに行くことができます。



よく参照するページは自身で印刷し、手元に持っておくと良いでしょう。

COMSOL を利用する際に多言語が使えますが、マニュアルが英語であり、上記の語句検索機能を活用するには、英語モードでの COMSOL GUI の利用にも慣れておくと良いでしょう。

<ノート>

第1版（平成23年7月13日）