

COMSOL Multiphysics Ver.5.2 専門モジュールイントロダクション

伝熱モジュール

固体と流体における伝熱モデルの一般的な目的のために

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 井門内神田ビル 5F
2015 11.18

1. 伝熱モジュールの概要

出典：<https://www.comsol.jp/heat-transfer-module>

熱の生成、消費、伝導

伝熱モジュールは装置や部品あるいはプロセスにおける加熱や冷熱の効果を調べることに役立ちます。このモジュールは、構造力学、流体力学、電磁気学、化学反応などのような物理特性と連動する伝熱のメカニズム（伝導、対流、放射）を研究するために、シミュレーションツールを提供しています。ここで伝熱モジュールは、熱やエネルギーの生産、消費、伝導が研究プロセスで焦点となり、あるいは重大な影響を及ぼす場所でのあらゆる産業と応用分野のためにプラットフォームとしての機能を果たします。

材料および熱力学データ

伝熱モジュールには、正確な分析に必要な熱力学データなど多くの共通の流体とガスの物質特性を含む物資データベースが内部に蓄積されています。ここには、伝熱率、熱容量、密度が含まれています。また 材料ライブラリは、2,500 を超える固体材料のデータや代数関係の両方を持つ材料特性の源泉であり、そこでは、ヤング率や電気伝導率などの多くの特性に温度依存性があります。伝熱モジュールは、Excel® and MATLAB®から熱力学などその他の材料データのインポートを支援し、また CAPE-OPEN インタフェース接続標準を通じて、外部の熱力学データベースとの接続を支援しています。

~~~~~

### 統合ワークフロー

伝熱モジュールは、製造工程および製品設計における熱効果をシミュレーションするための専用のツールとして、モデリングの世界では独特なものです。COMSOL は、伝熱のためのシミュレーションやその応用分野に含まれるその他の全ての物理的現象のモデル設定と作用の両方に対する統合アプローチを採用しています。従って、これは、他の現象を探し求めているエンジニアや技術部門と連携をとるための標準的で強力なツールです。関係者が特別な応用分野で研究している物理特性にかかわらず、そのワークフローは、統一され、簡単で、以下の通りとなります。

\*当該装置またはシステムの図形をインポートまたは描画します。

\*一定もしくは温度依存性特性を利用する同じファイルからの材料データもしくはその関連データを選択します。

\*お客様のシステムと連成する他の物理特性に依存するかどうかは分かりませんが、個々に対応したインタフェースから、そのシステムにおける伝熱を最もうまく記述できるものの種類を決定します。

\*伝熱の効果と連成するいかなる他の物理的效果をも含めます。

\*お客様のシステム境界における条件および制限を定義します。

\*お客様のシステムをメッシュ化し、異なるシミュレーション間で同じメッシュもしくは派生したメッシュを利用します。

\*実行分析のための適切な解法と設定にともなう問題解決プロセスを実行します。

\*お客様の結果を加工し、ビジュアル化します。また、異なるシミュレーションであっても、この結果を同じグラフまたは図上に表示します。

## 製造工程および製品設計での熱効果をシミュレーションするための統合プラットフォーム

COMSOL Multiphysics および豊富な拡張機能モジュールとともに、COMSOL は、その研究のどんな物理現象に関わらず、そのプロセスや設計の全ての面で統合ツールを提供します。ある日のシステム装置のジュール加熱、そして、翌日のシステムを通過する空気による冷却、さらに翌々日、この装置が被る熱応力をモデル化することができます。

伝熱の大部分は他の物理的效果が考慮される重要な物理的效果です。温度場は熱応力を生み出し、電磁場は抵抗、伝導、マイクロ波、高周波加熱を作り出します。さまざまな構成要素や部品を流れる流体は、これらの冷却に必要な不可欠のものですが、温度変化は、鋳造や溶接など熱処理の段階で、材料特性や材料の物理的動きに大きな影響を及ぼします。伝熱モジュールには、伝熱をその他の現象と組み合わせて簡単にモデル化するための多くのユーザーインタフェースが含まれており、COMSOL®製品群のほかのどんなモジュールとも組み合わせることができます。

### 伝熱のメカニズム

伝熱モジュールの重要な基盤は、熱もしくはエネルギー収支の保存に関係した計算を行う機能で、そこでは、機械損失、潜熱、ジュール加熱、あるいは反応熱のようなさまざまな現象が利用できます。伝熱モジュールは、物理特性インタフェースとして知られている既成のインタフェースを提供しています。この物理特性インタフェースは、グラフィカルユ

ユーザーインタフェース (GUI) を経由してモデル入力を受け取り、エネルギー収支を定式化するためにこれらの入力を利用するように設定されています。COMSOL 製品群の中の全ての物理特性インタフェースと同様に、熱伝達機構を修正し、詳細な熱源を定義し、あるいは他の物理特性と結びつけることができるような柔軟性を持たせるために、基本的な方程式を扱うことができます。

## 伝導

伝熱モジュールには、固体および流体、あるいは、両方の組合せにおける伝導による伝熱が含まれており、通常、温度の関数として変数依存性を定義するために熱伝導率を無制限に利用できます。任意形状における曲線座標の自動計算は、異方性材料特性を定義する機能と組み合わせ、複合材料のような異方性構造での熱効果の高品質な表現法を提供します。

## 放熱

放熱モデル支援ツールが、伝熱モジュールの数多くのシナリオのために提供されており、ここには、この現象をモデル化し、対流や伝導と連結するために特化した解法などが含まれています。伝熱モジュールは、透明体、不透明体、関与媒体における表面から周辺への放熱、周辺から表面への放熱、表面から表面への放熱をモデル化するツールを提供しています。

このモジュールは表面から表面への対流をモデル化するためにラジオシティ法を採用しており、同じモデルで5 スペクトルバンドまで同時に考慮できる波長によって決まる表面特性を説明します。これは太陽放射のモデル化に適しており、そこでは、短波長（太陽光スペクトルバンド）の表面の吸光係数が、より長い波長（周囲のスペクトルバンド）の表面放射率と異なっている場合があります。さらに、透明性の特性は、それぞれのスペクトルバンドのために定義することができます。伝熱モジュールは、関与媒体における放射熱伝達をモデル化することもでき、こうした媒体における熱放射の吸収、放射、分散を考察します。

## 対流

システムの中に流体が存在することで、圧力と粘性効果を介して、伝熱のアプリケーションやエネルギー寄与に対して、常に対流が生じます。伝熱モジュールは、これらのプロセスを支援し、強制的な対流と自由もしくは自然対流の原因を解明します。伝達モジュールには、共役伝熱のための特有な物理特性インタフェースがあります。そこでは固体および流体材料が全く同一のシステムでモデル化が実現されます。伝熱モジュールには、流体を説明するために、高レイノルズ数および低レイノルズ数  $k-\epsilon$  乱流モデルを使って、層流

や乱流をモデル化する物理特性インタフェースがあります。あらゆる流れの場合において、温度差で生じる自然浮力効果は、非等温流を仮定することによって評価されます。伝熱モデルを CFD モジュールと結合することにより、交互に起きる乱流モデル、多孔質媒体の流れ、二層流などの流体の流れに関する詳細なシミュレーションが可能になります。

加えて、伝熱モジュールは、対流モデルを単純化するための機能を備えております。対流の起きる場所では、流体力学の完全なモデルが提供されておらず、計算的に高コストになる場合があります。この機能は伝熱係数の内蔵ライブラリーによって利用でき、強制対流もしくは自然対流を通して、システム周辺と境界の間の熱の移動をシミュレーションするために利用できます。また、このモジュールには、割れ目あるいは平面（水平、傾斜、垂直）や異なる外部流体（空気、水、油）のような、さまざまなタイプの幾何学的図形のための関係性も含まれています。

### 多孔質媒体における伝熱

自由媒体での層流および乱流の流体における伝熱の概念はよく知られていますが、伝熱モジュールは、多孔質媒体における伝熱をモデル化するための強力なインタフェースを備えており、多孔質母材を固形化した空隙のある細孔相における伝導と対流の双方を説明します。それぞれの固体および流体物質から自動的に計算される効果的な伝熱特性を定義するために、さまざまな平均的モデルを選択することができます。また、空隙を通過する流れで生じる蛇行性経路によって引き起こされる多孔質媒体における熱拡散のために予め定義された特性にアクセスすることもできます。

### 生体熱

伝熱モジュールは生体熱方程式のための物理特性インタフェースを提供しています。生体熱方程式インタフェースは、マイクロ波加熱、抵抗加熱、化学反応による加熱、放射加熱であるかどうかに関わらず、人間の細胞やその他の生物系における熱効果をシミュレーションするための完全なツールです。COMSOL 環境では常に、温度変化が簡単に強固に連結したマルチフィジックスシミュレーションのための電気材料特性のような他の物理的材料特性に還流されます。生体熱は、細胞の壊死など、さまざまな相変化現象と組み合わせることが可能です。

### 相変化

相変化は伝熱解析における破壊的な特性です。それは、フェーズ間の一時的な形状の接触、あるいは、材料の固体、液体、気体相の間の桁違いに異なる伝導性や熱容量または流動作用のような材料特性における突然の変化など、予測の困難な変質が起こることがあります。

相変化はまた多くの熱収支に影響を及ぼす潜熱を引き起こします。多くのさまざまな特性やユーザーインタフェースを通じて、COMSOL Multiphysics と伝熱モジュールは、移動メッシュを用いて体積変化をモデル化する機能などで、こうした破壊について説明する機能を備えています。また、材料特性の突然の変化を説明するために熱力学特性の自動定義機能も支援しており、相変化の間隔をコントロールすることによって、連続性を維持することができるようになっていきます。

### 接触熱抵抗

2つの固体がお互いに接触しているとき、伝熱に対する抵抗は通常、これらがどれほど固く押しつけられているかどうかの関数、および、それぞれの表面粗度の関数です。この粗度は伝熱を妨げる表面の間に小さな隙間を生み出し、固体間の結びつきは、この隙間の大きさを縮小します。物理特性インタフェースは、この負荷応力、すなわち隙間の比伝導率に依存する接触伝熱係数をシミュレーションするため、そしてまた、小さな隙間によって分断された表面の間の表面から表面への放熱効果を評価することにより、伝熱モジュールで提供されています。伝熱モデルを構造力学モジュール<sup>®</sup>と統合することで、熱膨張など、この接点における熱と力学的特徴の間で、直接的にカップリングする機能を提供しています。

### 薄層と電子殻（シェル）

お客様の装置あるいはプロセスが、他のシステムよりも形状的にかなり小さい材料もしくは領域から構成されている場合があります。そうした事例にはPCB（プリント基板）上の薄い銅層や圧力容器の壁あるいは薄い絶縁層などがあります。伝熱モジュールで可能な専門的なモデリングツールが、これらの特性をシミュレーションし、計算資源を保存します。高伝導性の電子殻（シェル）は、伝熱の勾配が層またはシェルの接線方向で重要であり、その厚さを横切らないような場所でのシミュレーションで用いられ、この層またはシェルの幅をメッシュ化する必要性を避けます。それにもかかわらず、これらの解法から得られた結果を層もしくはシェルに関連した3D実体と連成させます。これは、2つの大きな領域の間や領域とその周辺の間にある薄い壁、あるいは、他の固体表面に組み込まれた層のいずれかの可能性が考えられます。類似の方法で、薄い熱抵抗層のための物理特性インタフェースが低伝導性材料を説明する簡単な方法を提供しています。

### 熱電効果マルチフィジックスノード

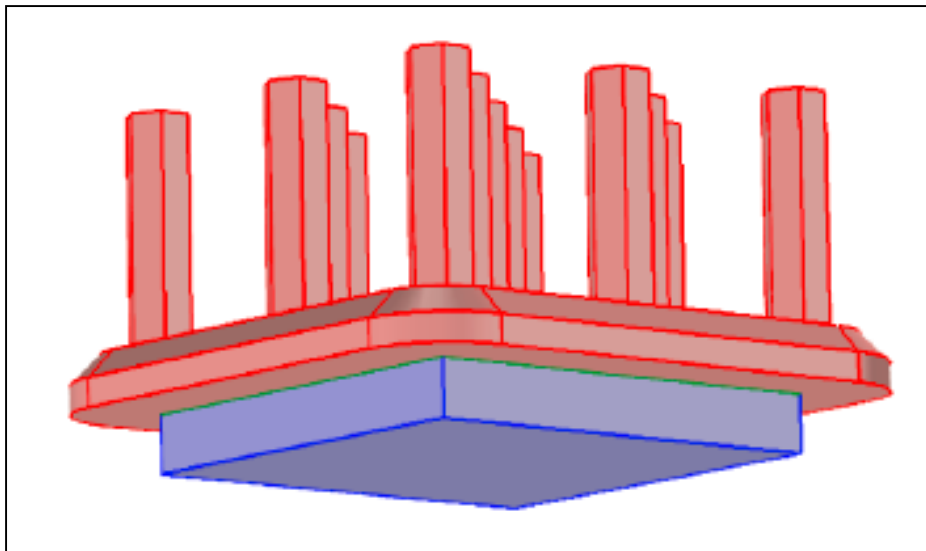
熱電効果を生じる材料は、温度差を電圧に変換でき、電荷を含む熱流束を生じさせます。反対に、電圧をこれらの材料に印加すると、材料中に温度差を生じさせます。熱電材料

でできたデバイスは、回路の冷却やポータブルな冷蔵庫、熱電対発電機としてよく使われています。

熱電効果マルチフィジックスインタフェースは、電流と固体中伝熱インタフェースの組み合わせです。境界条件や輻射に関する設定について、伝熱モジュールのフルレンジの機能を利用できます。他の COMSOL のフィジックスインタフェースと組み合わせるのと同様に、熱電効果インタフェースは他のいかなるフィジックスインタフェースとも組み合わせることができます。2つの共通な熱電材料～テルル化ビスマスとテルル化鉛～に対する材料プロパティを利用できます。熱電材料としてユーザ定義も簡単に加えることができます。

## 2. チュートリアル

### ヒートシンク



出典：INTRODUCTION TO Heat Transfer Module p.21 以降

COMSOL を起動し、層流の定常解析を行います。

#### 手順

##### モデルウィザード

1. デスクトップの COMSOL アイコンをダブルクリックします。ソフトウェアが起動すると画面にモデルウィザードを使う（COMSOL モデルを新規作成）かブランクモデルを使う（手動で COMSOL モデルを新規作成）かを選択する画面が表示されます。ここではモデルウィザードを選択します。COMSOL がすでに起動している場合にはファイルメニューで新規を選択後にモデルウィザードを選択します。

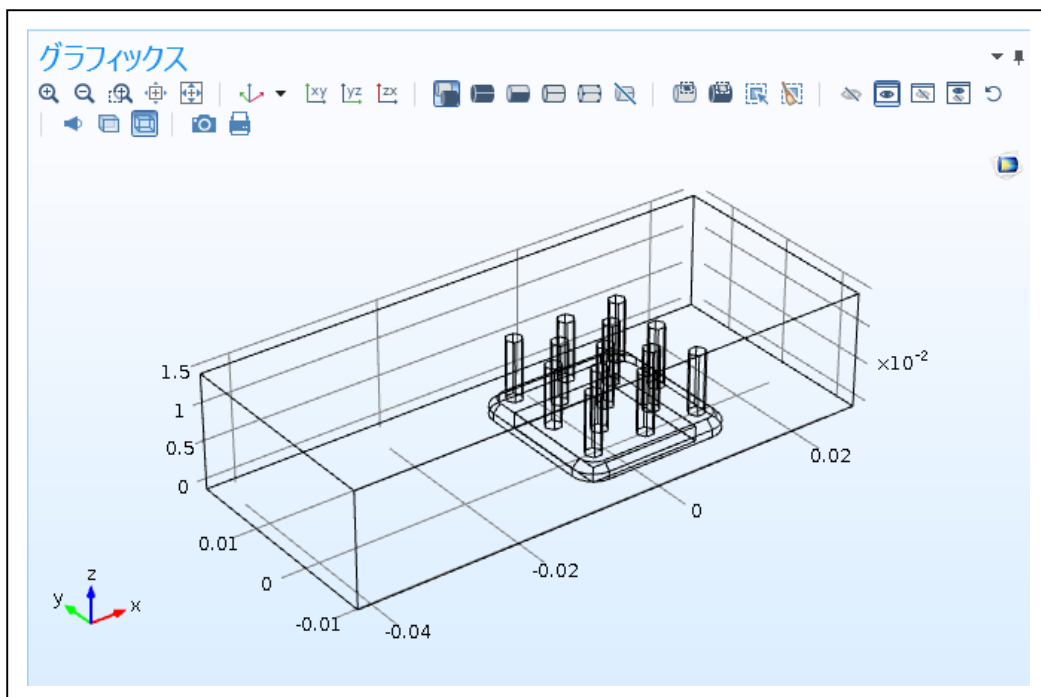


2. 空間次元を選択ウィンドウで 3D をクリックします。
3. フィジックスを選択ツリーで伝熱>共役伝熱を展開し層流をクリックします。
4. 追加をクリックし、スタディをクリックします。
5. プリセットスタディの下のスタディツリーで定常を選択します。
6. 完了をクリックします。



## ジオメトリ

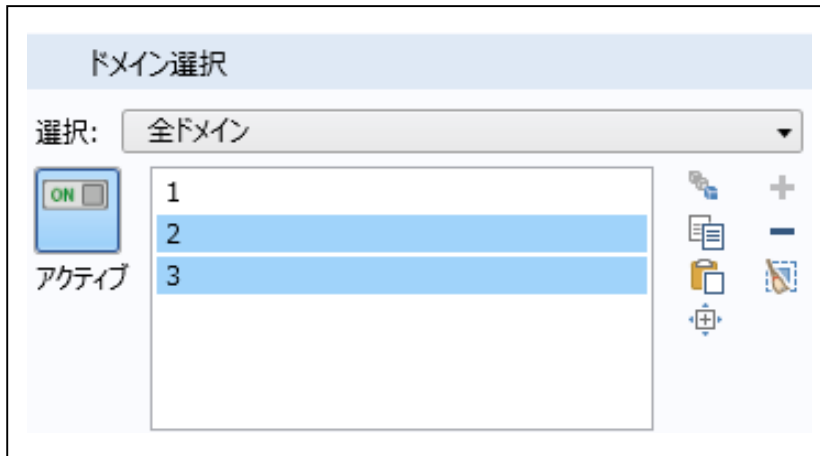
1. ジオメトリツールバー上でシーケンス挿入を選択します。
2. アプリケーションライブラリフォルダ  
¥Heat\_Transfer\_Module¥Tutorials, \_Forced\_and\_Natural\_Convection をブラウズし、  
heat\_sink\_geom\_sequence.mph をダブルクリックします。
3. ホームツールバーで、全オブジェクトを作成をクリックします。
4. 以降の作業の為、グラフィックス画面で、ツールバーより、ワイヤフレームレンダリングアイコンをクリックし、画面にわたってズームのアイコンをクリックします。



## 層流 (spf)

1. モデルビルダのコンポーネント 1 より層流 (spf) をクリックします。
2. 層流の設定画面で、ドメイン選択部分に移動します。

3. 選択リストより 2,3 を選択します。



4. 選択より削除をクリックし 2,3 を削除します。(1 のみ残します)
5. 選択を作成をクリックします。
6. 選択を作成画面で、テキスト欄に Air を入力します。
7. OK をクリックします。

## 伝熱 (ht)

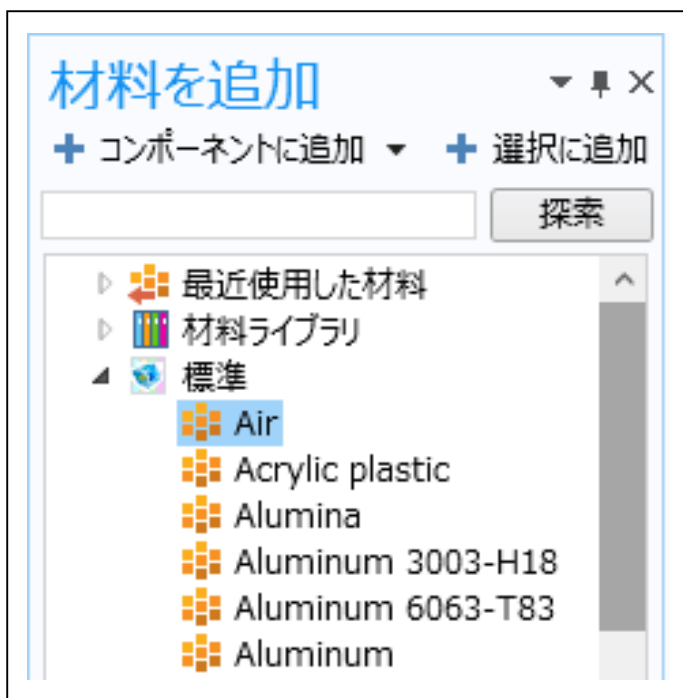
### 伝熱 (流体) 1

1. モデルビルダの伝熱(ht)より伝熱(流体)1 をクリックします。
2. 伝熱(流体)の設定画面で、ドメイン選択部分に移動します。
2. 選択リストより Air を選択します。

## 材料

### Air

1. ホームツールバー上で、「材料を追加」をクリックします。
2. 標準で Air を選択します。
3. コンポーネントに追加をクリックします。



4. 材料の設定画面でジオメトリトリックエンティティ選択部分に移動します。
5. 選択リストより Air を選択します。

### Aluminum 3003-H18

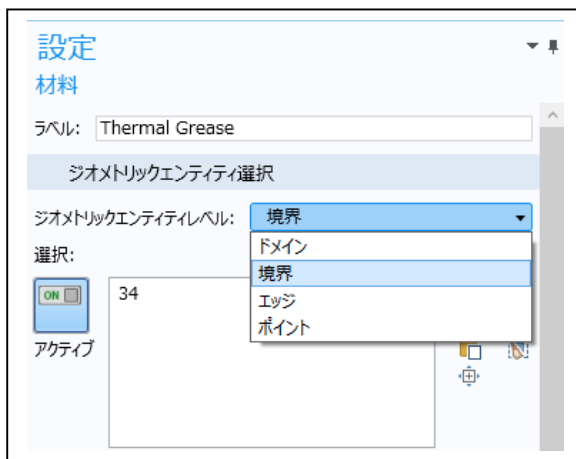
1. 材料を追加画面で、標準より、Aluminum 3003-H18 をクリックします。
2. 材料を追加画面で、コンポーネントに追加をクリックします。
3. グラフィックス画面で、ヒートシンク部分をクリックし、領域 2 を選択します。

### Silica Glass

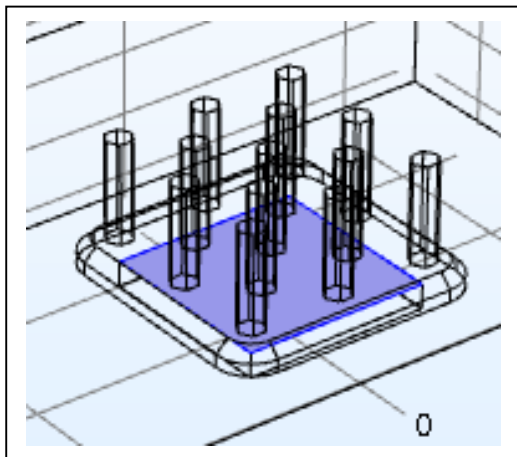
1. 材料を追加画面で、標準より、Silica Glass をクリックします。
2. 材料を追加画面で、コンポーネントに追加をクリックします。
3. グラフィックス画面で、チップ部分ををクリックし、領域 3 を選択します。

### Thermal Grease

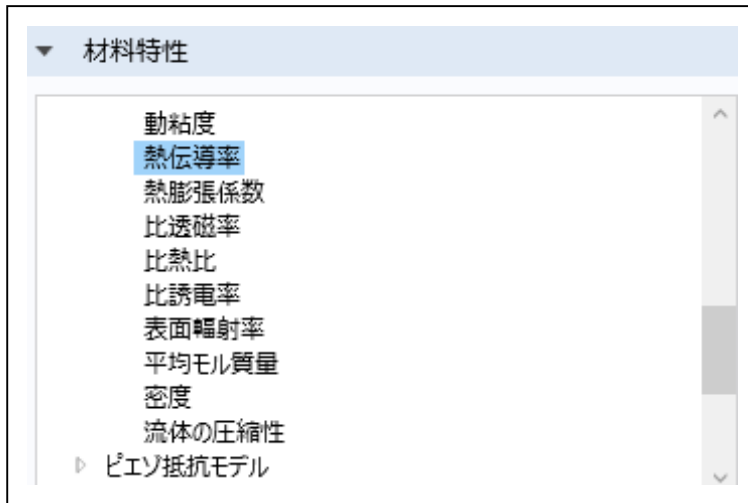
1. 材料ツールバー上で、「ブランク材料」をクリックします。
2. 材料の設定画面で、ラベルに Thermal Grease と入力します。
3. ジオメトリックエンティティの選択部分に移動し、ジオメトリックエンティティレベルのリストより境界を選択します。



4. 境界 34 (ヒートシンクとチップの間) を選択します。



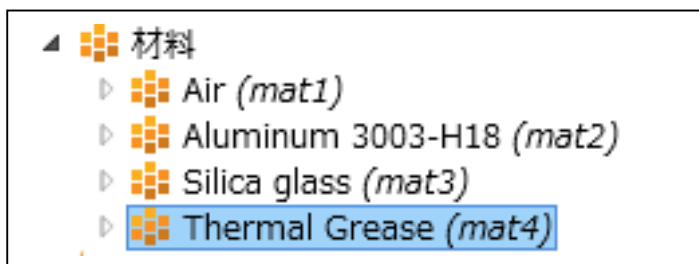
5. 材料特性をクリックして展開し、基本特性より熱伝導率をクリックします。



6. 材料に追加をクリックします。
7. 材料コンテンツ部分に移動し、テーブルで、熱伝導率を  $2[\text{W/m/K}]$  と入力します。

| ▶▶                                  | 特性   | 名前 | 値       | 単位     |
|-------------------------------------|------|----|---------|--------|
| <input checked="" type="checkbox"/> | 熱伝導率 | k  | 2[W/... | W/(... |

最終的に物性の設定は以下になります。

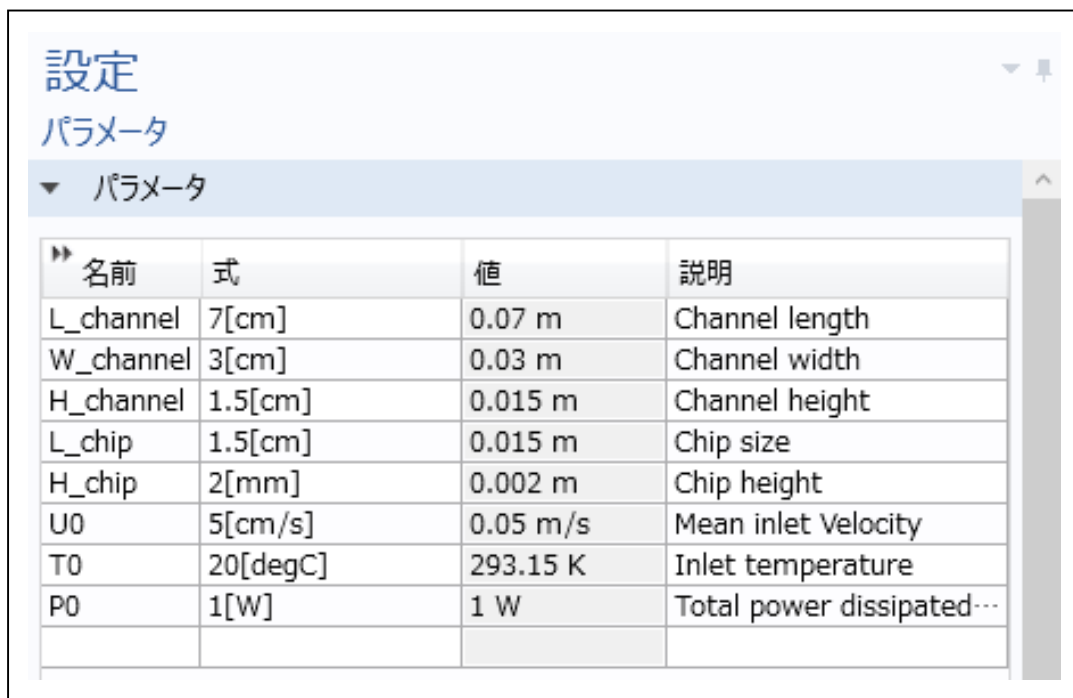


## パラメータ

1. ホームツールバーのパラメータボタンをクリックします。
2. パラメータの設定ウィンドウで、テーブルに以下の項目を追加入力します。

| 名前 | 式        | 説明                                                |
|----|----------|---------------------------------------------------|
| U0 | 5[cm/s]  | Mean inlet velocity                               |
| T0 | 20[degC] | Inlet temperature                                 |
| P0 | 1[W]     | Total power dissipated by the electronics package |

最終的に、以下となります。



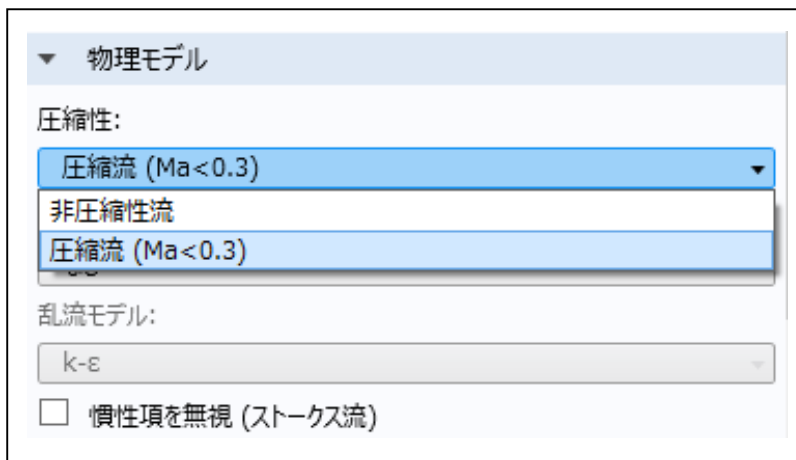
| 名前        | 式        | 値        | 説明                        |
|-----------|----------|----------|---------------------------|
| L_channel | 7[cm]    | 0.07 m   | Channel length            |
| W_channel | 3[cm]    | 0.03 m   | Channel width             |
| H_channel | 1.5[cm]  | 0.015 m  | Channel height            |
| L_chip    | 1.5[cm]  | 0.015 m  | Chip size                 |
| H_chip    | 2[mm]    | 0.002 m  | Chip height               |
| U0        | 5[cm/s]  | 0.05 m/s | Mean inlet Velocity       |
| T0        | 20[degC] | 293.15 K | Inlet temperature         |
| P0        | 1[W]     | 1 W      | Total power dissipated... |

## 層流 (spf)

### 層流

空気流れの密度変化を考慮する為、圧縮性の設定を変更します。

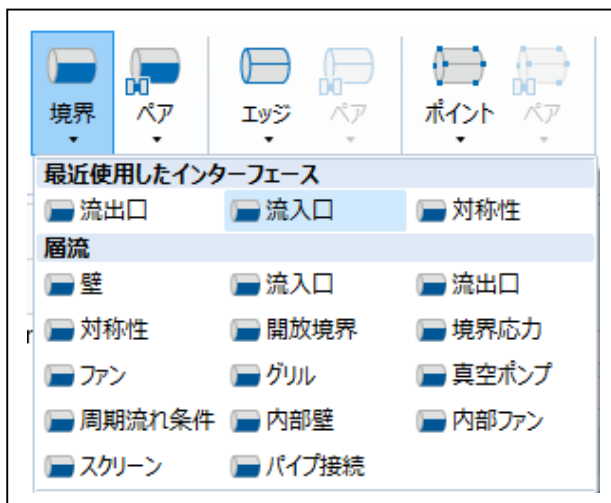
1. モデルビルダのコンポーネント 1(comp1)より層流(spj)をクリックします。
2. 層流の設定画面で、物理モデル部分に移動します。
3. 圧縮性選択リストより圧縮流 ( $Ma < 0.3$ ) を選択します。



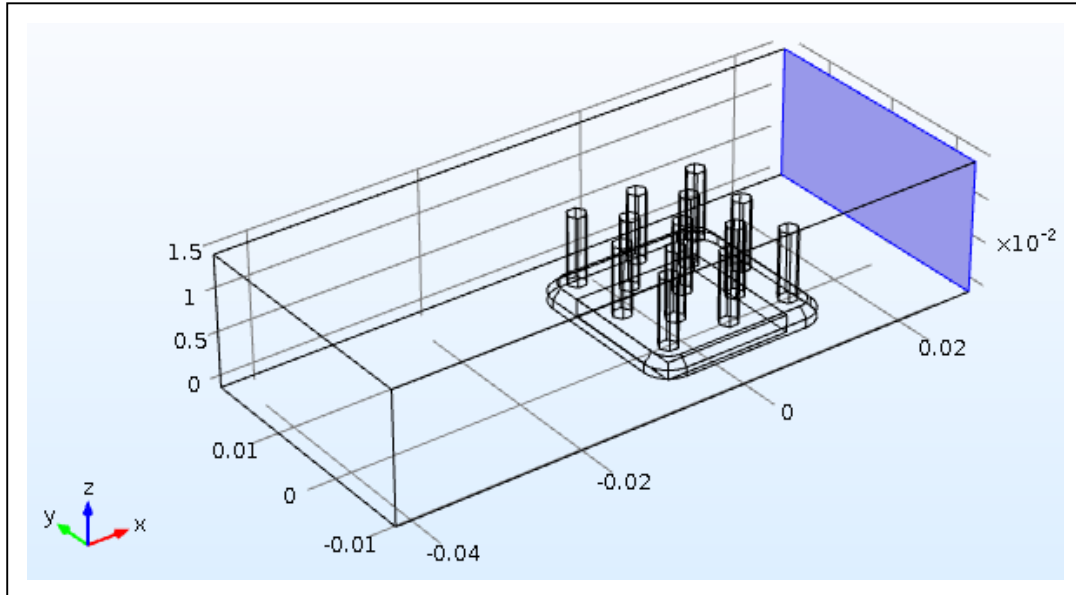
### 流入口 1

すべりなしが流れのデフォルトの境界条件です。流入口と流出口の境界条件を以下に設定します。

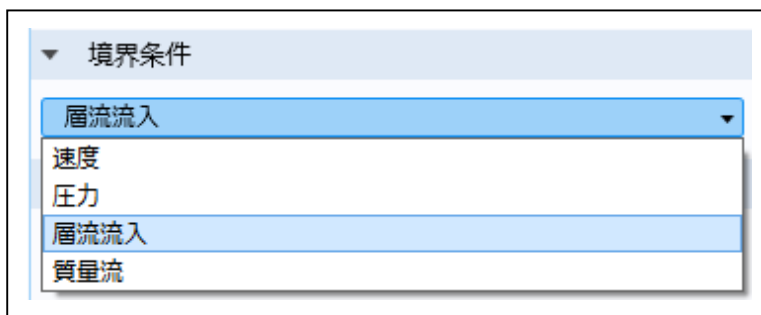
1. フィジックスツールバーで境界をクリックし、流入口を選択します。



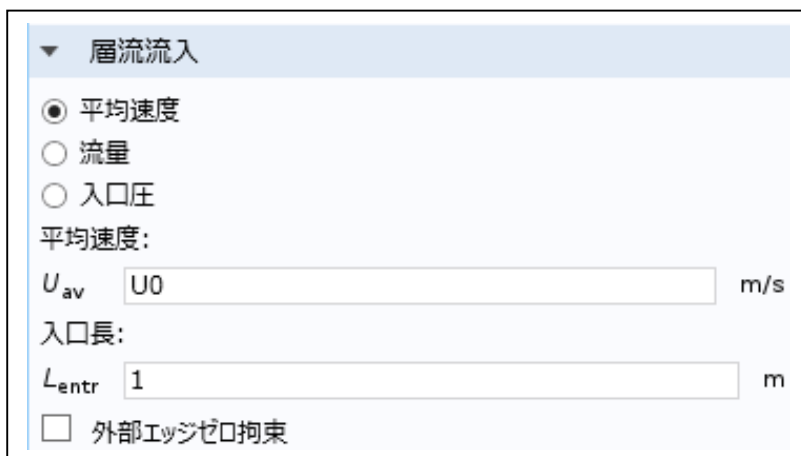
2. 流入口に境界 121 を選択します。流入口の設定画面で、境界選択に表示されることを確認します。



3. 境界条件リストより層流流入を選択します。



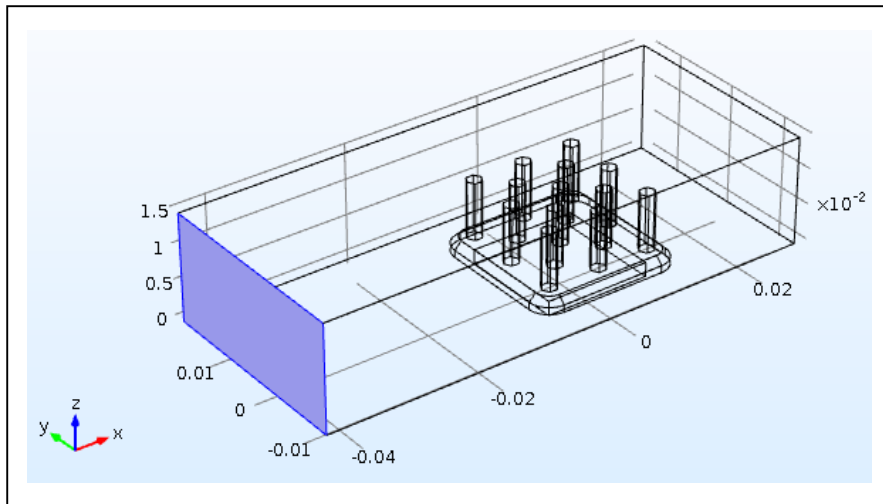
4. 層流流入の  $U_{av}$  に  $U0$  と入力します。



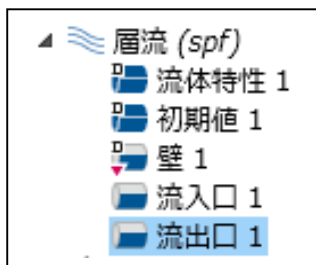


## 流出口 1

1. フィジックスツールバーで境界をクリックし、流出口を選択します。
2. 流出口に境界 1 を選択します。流出口の設定画面で、境界選択に表示されることを確認します。



モデルビルダーの層流に関するノードのシーケンスは以下の図のようになります。



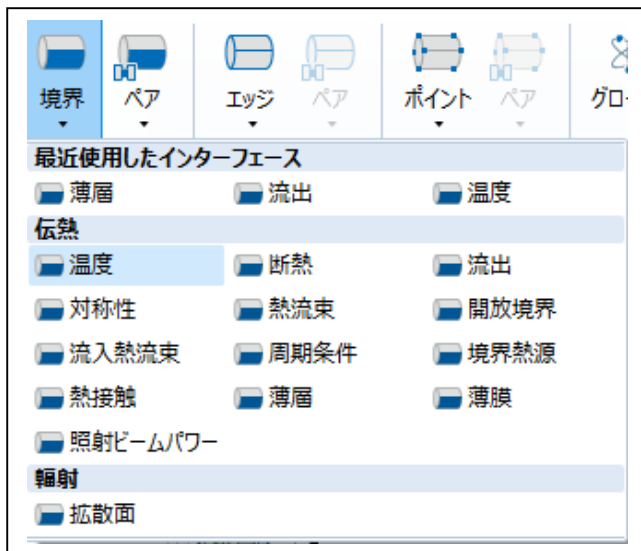
注意：ノードの左上の D はデフォルトノードを意味しています。

## 伝熱 (ht)

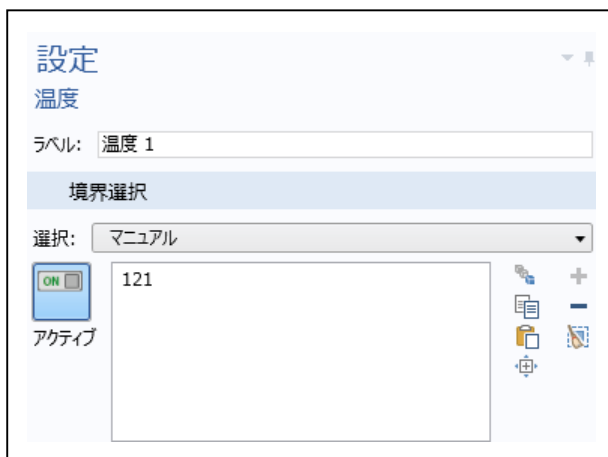
断熱が温度のデフォルトの境界条件です。入口温度と出口の境界条件を以下に設定します。

### 温度 1

1. フィジックスツールバーで境界をクリックし、温度を選択します。



2. 入口に境界 121 を選択します。温度の設定画面で、境界選択に表示されることを確認します。



3. 温度の  $T_0$  に  $T_0$  と入力します。

## 流出 1

1. フィジックツールバーで境界をクリックし、流出を選択します。流出に境界 1 を選択します。流出の設定画面で、境界選択に表示されることを確認します。

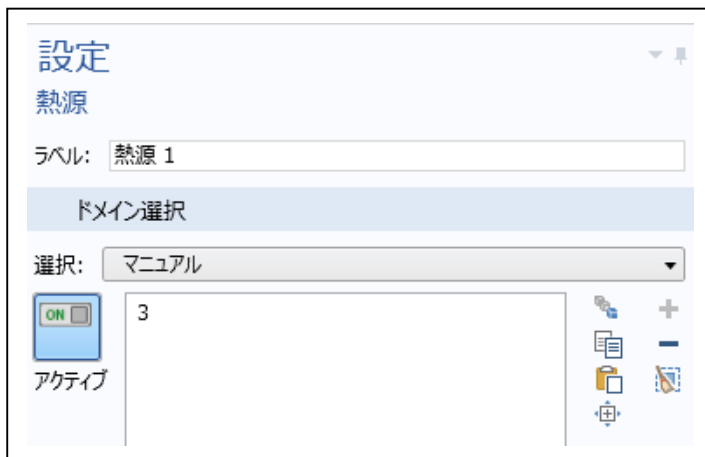
次にパワーパラメータ P0 を電気部品での総発熱量を定義する為に使用します。

## 熱源 1

1. フィジックツールバーでドメインをクリックし、熱源を選択します。



2. 電気部品に該当するドメイン 3 を選択します。熱源の設定画面で、ドメイン選択に表示されることを確認します。



3. 入口に境界 121 を選択します。温度の設定画面で、境界選択に表示されることを確認します。熱源で、総伝熱率を選択します。P<sub>0</sub>に P0 と入力します。



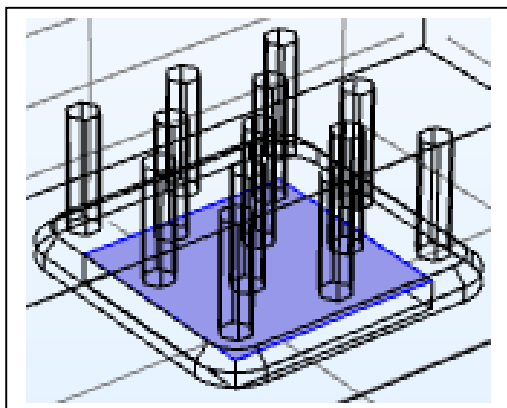
最後にサーマルグリースの薄層を追加します。

#### 薄層 1

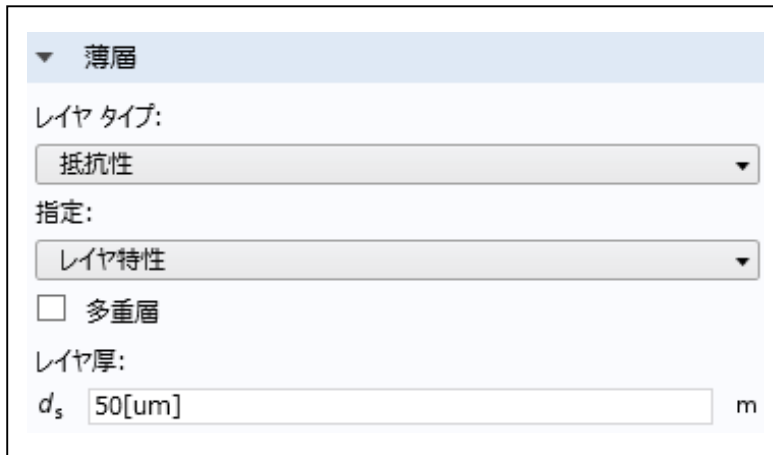
1. フィジックスツールバーで境界をクリックし、薄層を選択します。



2. 境界 34 (電気部品とヒートシンクの間の境界面) を選択します。薄層の設定画面で、境界選択に表示されることを確認します。



3. 薄層で  $d_s$  に 50[um] と入力します。



薄層

レイヤタイプ:  
抵抗性

指定:  
レイヤ特性

多重層

レイヤ厚:  
 $d_s$  50[um] m

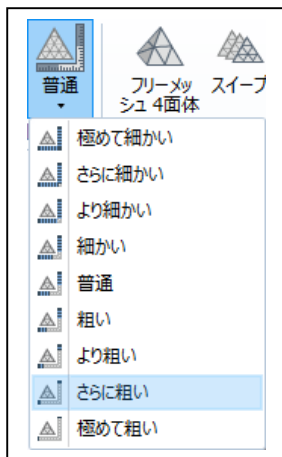
モデルビルダーの伝熱に関するノードのシーケンスは以下の図のようになります。



## メッシュ

### フリーメッシュ四面体とサイズ

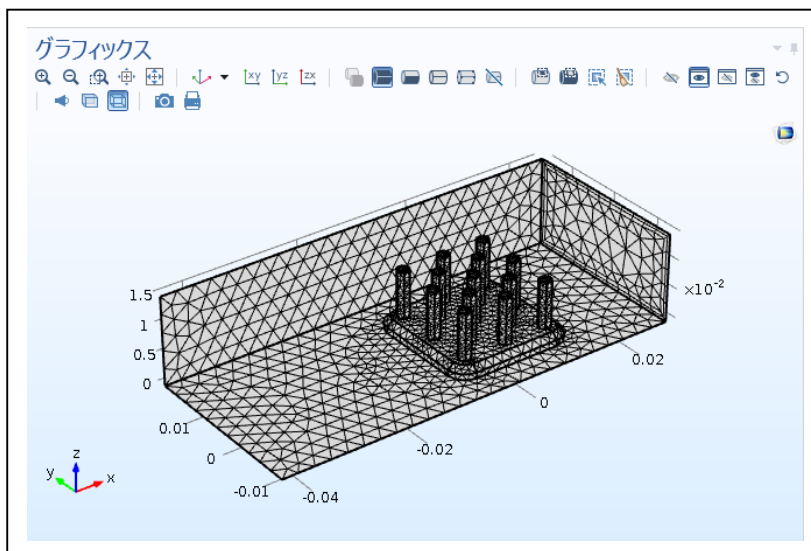
1. メッシュツールバーで普通をクリックします。さらに粗いを選択し、メッシュサイズを変更します。



2. メッシュを生成をクリックします。

メッシュをビューを見やすくする為に、いくつかの境界を隠します。

3. グラフィックス画面で、クリックして非表示ボタンをクリックし、境界1（左側）と境界2（正面）と境界3（上面）を選択します。メッシュは下図のように表示されます。



もっと正確な数値計算結果を得る為に、このメッシュは、他のメッシュサイズを選択することもできます。しかし、より多くの計算時間とメモリーが必要になります。

## スタディ

1. スタディツールバーで計算をクリックします。



計算には約2分かかり、2GBのメモリーが必要です。デフォルトのグラフが自動で生成されます。最初のグラフは壁境界の温度を示します。2つ目のグラフは等温線を示します。3つ目のグラフは5つの断面での速度を示します。最後のグラフは壁境界の圧力を示します。次に温度をプロットし、速度の矢印を追加でプロットします。

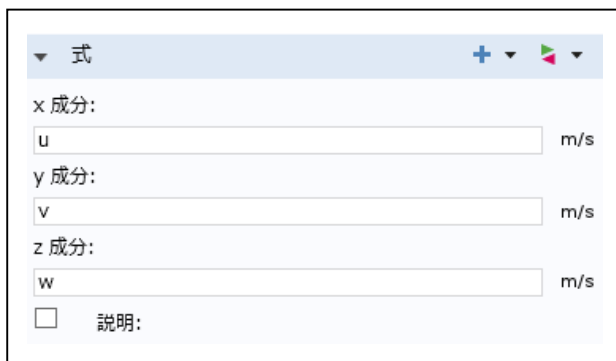
## 結果

### 温度 (ht)

1. モデルビルダーで温度 (ht) グループを選択します。温度 (ht) ツールバーで矢印 (ボリューム上) をクリックします。

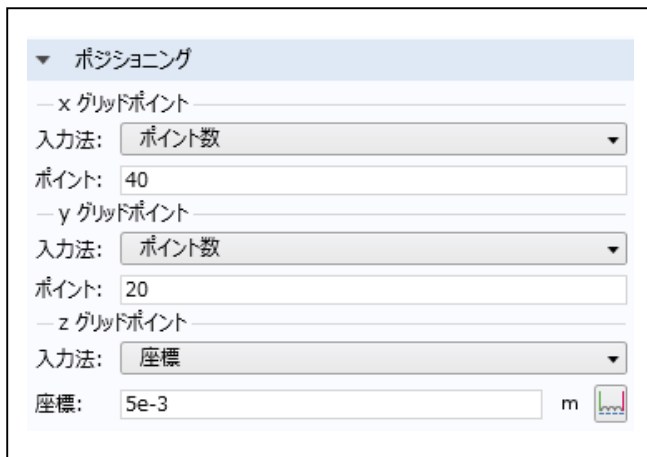


2. 矢印 (ボリューム上) の設定画面で、式の項の右上部分の表式を置換をクリックします。リストより、モデル>コンポーネント1>層流>速度 圧力>u, v, w-速度場 を選択します。ダブルクリック又はEnterを押して式を追加します。



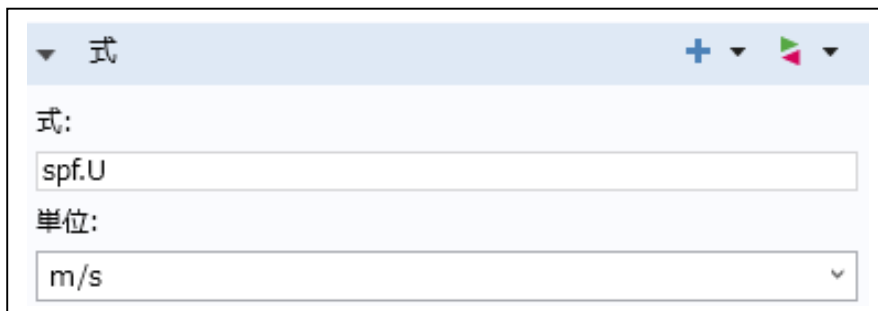
3. ポジショニングの設定で、以下を設定します。

- x グリッドポイントのポイントに 40 と入力します。
- y グリッドポイントのポイントに 40 と入力します。
- z グリッドポイントの入力法のリストで座標を選択します。
- 座標に 5e-3 または 5[mm] と入力します。



4. 温度 (ht) ツールバーで、カラー表式をクリックします。

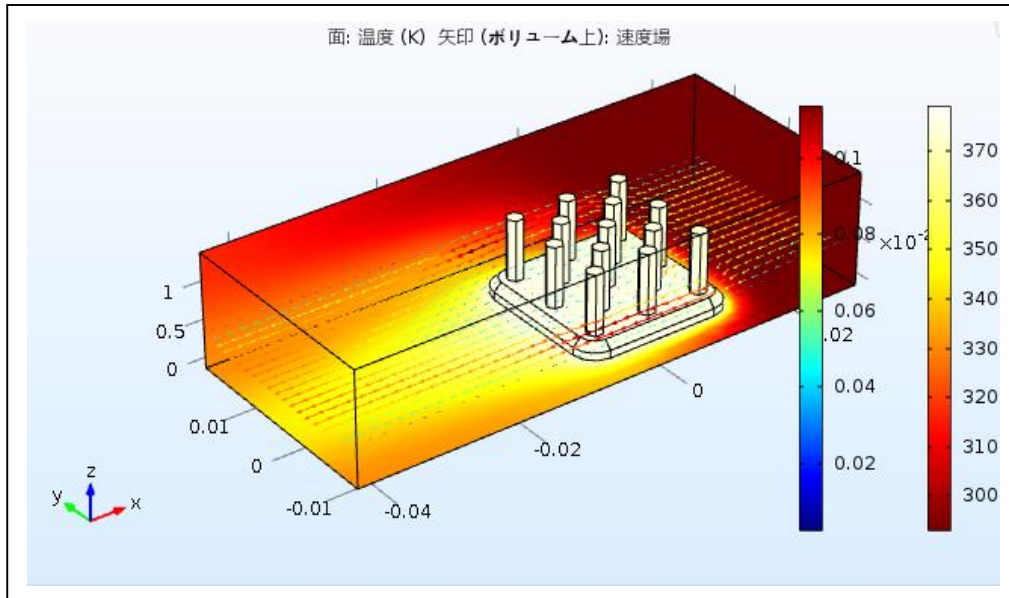
5. 式の右上の角の部分の表式を置換をクリックします。リストより、モデル>コンポーネント 1>層流>速度 圧力>spf.U-速度大きさ を選択します。又は spf.U と入力します。





6. プロットボタンをクリックします。

結果がグラフィックス画面に表示されます。



以上