

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

CFD モジュール

数値流体力学(CFD:Computational Fluid
Dynamics)のマルチフィジックスシミュレーション

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
2015 11.18

1. CFD モジュールの概要

出典：<https://www.comsol.jp/cfd-module>

流体に関する全てのアプリケーション

CFD モジュールは、複雑な流体モデリングを含むデバイスとシステムのシミュレーションを行うプラットフォームです。COMSOL Product Suite の全てのモジュールと同様、CFD モジュールは、グラフィカル・ユーザ・インタフェース (GUI) を介してモデルを入力できる定義済みフィジックスインタフェースを提供し、また、これらの入力をモデルの方程式を定式化するために使います。CFD モジュールが備えている特別なフィジックスインタフェースを使用して大半の流体の相をモデリング可能で、層流および乱流の領域、圧縮性、非等温、非ニュートン、二相流、多孔質流れなどの解析を含みます。CFD モジュールは、数値流体力学 (CFD) シミュレーションの一般的なツールとして使用可能で、また、流体が重要になるマルチフィジックスシミュレーションとして COMSOL Product Suite にある他のモジュールとの連成が可能です。

CFD モジュールの GUI では、モデリングプロセスの全ステップにアクセス可能です。下記のステップが含まれます。

*例えば、単相、二相、層流、あるいは乱流などのような流れの適切な状態の選択。 *モデルのジオメトリの作成やインポート。 *流体のプロパティの定義。 *流入口、流出口の項の追加、必要に応じて流体モデリングの重要な方程式の編集 *メッシュエレメントの選択、および、多様な位置におけるメッシュ密度の調整 *必要に応じて、ソルバの選択と調整

~~~~~ 全ての流体に最適なフィジックスインタフェースを

流体の多種多様な定義に適用するツールは搭載済みで、使いやすいフィジックスインタフェースとして提供されます。これらのインタフェースは、流体を定義する推進力、質量、そしてエネルギー方程式の不変性を定義し、他のフィジックスと連成するマルチフィジックスから構成されています。さらに、これらの方程式の安定フォームを定式化します。それらは時間依存問題もしくは、固定用の時間導関数の有限差分、空間の有限要素離散化を作成するため、COMSOL を使用します。安定した定式化は、流体種類のソルバコンフィグレーションとソルバ設定を示唆するフィジックスインタフェースにより流体プロパティとしての機能性および選択定義を適用します。オーダーメイドのフィジックスインタフェースは、以下の種類の流体において使用可能です：

Single-Phase Flow: CFD モジュールは、流れ全ての速度領域をモデリングするための多種多様な Navier-Stokes 方程式で解析します。低速度の流体、ゆっくりとした流れ (Stokes 流れ) のモデリング、層流かつ弱圧縮性の流れ、そして乱流が含まれます。乱流は、 $k-\epsilon$ 、low-Reynolds $k-\epsilon$ 、 $k-\omega$ 、SST (Shear Stress Transport)、そして Spalart-Allmaras 乱流モデルを含む、Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) 方程式を使用してモデリングされます。

Navier-Stokes 方程式の全ての変数と乱流モデリングの条件を操作するオプションを使用できます。例えば、連成した他のフィジックスインタフェースのモデルの変数を基にした方程式を含めることも可能です。乱流モデリングのソリューションプロセスの補助として、多数の追加ツールが内蔵されています。これらのツールには、壁関数、境界のレイヤーメッシング、ハイブリッドメッシュの仕様、そしてメッシュ密度とメッシュ配置に適用する他のツールが含まれます。

Nonisothermal Flow: 伝熱との連成時において、温度 - 浮力は、層流 - 乱流内ではデフォルトで考察されます。CFD モジュールは、非等温流と共益熱伝達の定義済みマルチフィジックスインタフェースを含みます。このモジュールは、例えば、マッハ 0.3 以下の流れのような、弱圧縮性流を定義するために任意のマルチフィジックス連成が可能です。

Compressible Flow: CFD モジュールは、マッハ 0.3 以上の圧縮性流をモデリングすることも可能です。伝熱、圧縮、もしくは摩擦により生じた温度変化は、例えば、衝撃波のような圧縮性効果をもたらします。COMSOL Multiphysics 内蔵のアダプティブメッシングは、衝撃波と液体流れのプロファイルの広範囲にわたる変化の解析に役立ちます。

Two-Phase Flow: フィジックスインタフェースとそれがサポートする方程式により、二相流モデリングを自由に作成可能です。これが、2 種以上の不混和流体を分離する移動境界の追跡を含む場合、CFD モジュールは、フェーズフィールド法とレベルセット法を使用します。

CFD モジュールは、気泡流、混合モデル、および Euler-Euler モデリング法を通じて、多数の粒子、液滴または気泡の懸濁液を含んでいる流れ記述可能な、分散二相流モデリングのフィジックスインタフェースも含んでいます。この Euler-Euler 法では、頻繁に衝突し、相間で相対速度が大きく変化する高濃度の気泡を解析可能です。伝熱モジュールには、空気の凝縮と湿度のモデリングインタフェースが含まれ、相の変化は COMSOL Multiphysics で定義済みのステップ関数を使用して記述されます。

Porous Media Flow: CFD モジュールを使用して、また Darcy の Darcy の Brinkman の拡張を活用することにより、多孔質媒体内の单相流、二相流の輸送モデリングが可能です。Darcy の法則は、多孔質媒体の細孔が粘性の効果を打ち消すのに十分なほど小さい場合に適していて、一方で Brinkman 方程式は粘性効果を考慮しており、流れは圧力差により発生します。内部条件では、フリーチャンネル流体流れと多孔質媒体の界面をモデリング可能です。

Rotating Machinery: 回転機械インタフェースは、流体ドメイン内で回転するプロペラの羽根や、ミキサーの翼などのような大規模なジオメトリ変更が可能です。回転部品を定義するモデリングツールを含んでいます。冷凍ローターインタフェースでは、シミュレーション中のジオメトリ変更を実行するのではなく、流体方程式に追加条件を課すことによって回転を解析します。このフィジックスインタフェースは、実際の回転現象を解く時よりも少ない計算リソースを使いながら、遠心力やコリオリ力を定常 Navier-Stokes 方程式に追加します。そしてタービン、遠心分離機やミキサーのようなアプリケーションのモデリングにより近似値を提供します。旋回流インタフェースは、回転流れのモデリングでも使用可能です。このフィジックスインタフェースにおいて、面外旋回速度成分、完全な 3D モデルと比べて、計算量が低減された 2D ジオメトリで軸対称モデリングが行えます。

Thin-Film Flow: CFD モジュールに含まれる専門的なフィジックスインタフェースは、例えば潤滑モデリングなどのように、2 表面間もしくは、1 表面上の薄層内に制限された液体流れ、もしくは気体流れをモデリングします。

Non-Newtonian Flow: CFD モジュールには、Carreau と、べき法則のモデリングが含まれるだけでなく、独自作成の方程式を定義可能で、ポリマーや他の非ニュートン性流体の粘性とせん断率を定義している外部データの読み込みも可能です。例えば、この方法で粘弾性モデリングを定義するとします。ステップ関数は、COMSOL Multiphysics に内蔵され、例えば Bingham 流体を定義する時のように、流体プロパティの大規模変更もしくは突然の変更をモデリングする時に使用することができます。

Flow Through Thin Screens: 多孔板、グリル、そして金網を含むモデリングプロセスは、内蔵された薄層機能を使用して容易に作成可能です。これは薄層を通過する流れ、また薄層を介した層流もしくは乱流流れの影響を考慮した屈折と抵抗係数の相互関係を含んでいます。

Fluid Flow and Heat Transfer: CFD モジュールは、層流と乱流の流体流れを含む、完全連成された固体と流体の伝熱を定義する共役伝熱インタフェースを含みます。デフォルトでは、このモジュールは非等温流の解析を行い、たとえば伝熱モジュール内の表面放射インタフェース、ジュール加熱、そして化学種輸送インタフェース内の反応熱などのフィジックスインタフェースとの連成が可能です。多孔質媒体の伝熱フィジックスインタフェースは、固体マトリクス伝導と流体相の伝導および対流を連成します。その一方で、液体により生じた蛇行パスと、これにより発生する散逸熱を組み合わせます。

Reacting Flow: 希薄液と濃縮液内において化学種輸送により発生する層流-乱流、その両方と連成可能な専門的なインタフェースが含まれています。そして Chemical Reaction Engineering Module との化学反応を定義しているインタフェースと連成することが可能です。

搭載済み関数の他にも、モデリング変数の任意関数式を定義すること、材料プロパティや境界条件を定義するソースや受信条件を移植するために編集フィールドに入力することも可能です。例えば、構造、温度、シア率や他のモデリングとの連成の影響を定義している各自の関数を活用して、フィジックスプロパティを定義することも可能です。境界条件または、他のフィジックスモデリング変数の関数であり、他のフィジックスとも連成可能なソースや受信条件を定義可能です。これは、煩わしいユーザサブルーチンを使用することなく、GUI 上で直接行うことができます。ドメインクロスセクション以上、もしくはドメインコントロール値内の平均的な値のようなモデリング変数の任意方程式を定義可能という特性により、レイノルズ、マッハ、グラスホフ数の様々な代表値を使用する流体を特徴づけることができます。

ソースや受信条件を追加したり、フィジックスプロパティをファンクションとして定義するステップとして、前回までにすでに定義されているフィジックスインタフェース内の基本的な方程式を操作することができます。それらは、流体定義の修正や他のフィジックスインタフェースとの規格外連成を実装するために行われます。

数多くのフィジックスインタフェースは、精巧な境界条件の定義をサポートします。定義された Slip と No Slip との境界条件以外では、Sliding -Moving Wall 条件をシミュレーションするためウォールを設定することが可能ですし、Leaking そして Open でも同様に可能です。そこでは、液体は自由な境界を作成すると想定されます。Wall ファンクションとそれに関連する同調パラメータは、乱流モデルとして定義されます。出入口の速度や速度プロファイルは、Pressure, Stresses, Mass Flow 条件とともに構成されます。これ

は、ある境界の出口フローから他の境界の入口フローにリンクされる Periodic Flow / 周期的流れ境界条件でも同様に構成されます。Periodic/周期的境界条件は、反復的な単位セルアセンブリから構成されるジオメトリ内の単位セルをモデリングする時に大変便利です。

マルチフィジックスと総合的シミュレーションの統合プラットフォーム

流体は多種多様なプロセスやアプリケーションの統合であり、他のプロセスの影響を考慮しながら、理解、最適化される必要があります。コンピュータハードドライブの効率的な冷却方法、加速度計の制動フィルムにおけるエネルギー分散方法、化学反応装置の異なる部分を通じた種の移動方法などが例として挙げられます。その中で流体は、他のフィジックスによって定義されたプロセスの主要因になっています。しかし実際には、電子装置から発生される熱は流体濃度に影響を及ぼします。また、加速度計の弾性は、流体を強制振動させ、その反応は化学成分を変化させます。潜在的に流体の流れに圧力を加えることとなります。これが意味することは、全体的なプロセスの完全にそして正確な定義の影響を含めなければならないということです。

COMSOL Multiphysics と CFD モジュールは、関連する全てのフィジックスとのシームレスな連成や GUI 上のモデル方程式への無制限での直接的なアクセスも可能になり、プロセス定義をサポートします。両方間で自由に連成された流体構造連成 (FSI) 定式化を設定可能です。これにより、流体構造が変更される場合、また、この変更に対する構造反応が流体に影響を及ぼす場合、そのシナリオをモデリングすることが可能となります。CFD モジュール内の全てのフィジックスインタフェースは、数値流体力学が考慮されるべきアプリケーションと一般的なプラットフォームを提供する COMSOL Product Suite 内の他の全てのモジュールとを連成することも可能です。

COMSOL では、CFD モジュールにおいて別の方法にて、フローモデリングを実装することが出来るモジュールをご提供します。その一方で、両方の方法からのメリットを活用して容易に連成することも可能です。一つの例は、Pipe Flow Module です。パイプ接合部分の定義として、エッジに沿った接線の平均速度と共に、エッジ要素を使用して発達の流れを 2D または 3D のパイプネットワークをモデリングします。これにより、タンクに接続中のパイプネットワーク内フローモデリングの実装が可能になります。また、これにより大規模な 3D メッシュが必要となるネットワーク内のパイプ接続部分のメッシングを回避することができます。COMSOL が備えている特徴は、完璧な 2D、3D ジオメトリメッシュを作成し、パイプネットワークを接合するために、エッジから表面へそして表面からエッジへ、エッジから容積へそしてその逆へと、そのデータマッピングをシームレスに実装

可能だということです。このようにして、パイプのネットワーク内の一定ユニットの数値流体力学プロパティを考慮しつつ、両方の接合部分の操作状態を調整することが可能になります。

全てのフィジックスは、標準的グラフィカルユーザインタフェースとワークフローを使用してモデリングされるため、CFD エンジニア達は、構造的、電気的もしくは化学的プロパティのようなコンポーネントやプロセスにおいて、異なる特徴分析を行っているエンジニア達と、容易にコミュニケーションが可能です。ここですべきことは、ファイルを送付し、未解析分のフィジックスのスイッチを切り、他のフィジックスインタフェースを1つ、2つ追加し、そしてモデリングを続けるだけです。もちろん、これらの新しいフィジックスは、コンポーネントやプロセスのマルチフィジックスシミュレーション流体を定義したインタフェースとの連成を実現します。

最終的な CFD ソリューションへのステップ

機器内もしくは、プロセス内で数値流体力学 (CFD) をシミュレーションすることは、時として、最終的かつ正確なソリューションワークフローのステップになります。CFD モジュールは、そのワークフローの全ステップをサポートするための多様なツール、フィーチャー、設定そしてインタフェースが内蔵されています。

CAD Import Module もしくは、LiveLink™ 製品のいずれかでは、サードパーティの CAD ソフトウェアでシミュレーションしようとするプロセス、コンポーネントやジオメトリのパートを取り込む作業のサポートをします。これらの製品は、CFD シミュレーションのメッシングを複雑にする、流れにとってあまり重要ではない小さなフィーチャーや構造を縮小するためのジオメトリ操作を可能にします。

CFD モジュール内で、3D CAD で設計された形状を設定した後、即座に 3D シミュレーションを実行することはお勧めしません。COMSOL Multiphysics では、3D ジオメトリを使用した 2D モデリングワークスペース作成をサポートしています。代表的な横断面作成の 2D ジオメトリでの作業を行うことにより、まずシミュレーション内の多数のパラメータに慣れることができます。3D モデルの計算で必要となる大規模な計算リソースを使用することなく、以下のことが可能です：

* 流体のプロパティがシミュレーション全体に及ぼす影響の調査 * 使用すべき乱流モデルの決定 * 適切なメッシングおよびレイヤーメッシングの境界設置の決定 * 使用ソルバと設定の選択 * 流体流れにおけるマルチフィジックス連成の影響の検討 * 3D モデル上で予測可能な正確性の見積もり

システムの理解を進めながら、2D モデリングから得た知識と最適化設定を使用することで、3D シミュレーションを実装することが可能です。これは、対称もしくは線対称の 3D CAD で設計した形状の操作、全てを 3D でモデリングすることの回避、そして実質的な計算条件の削減を行う上でも大変役立ちます。

メッシングと強力なソルバにて柔軟さを提供するツール

メッシングは、デバイスやプロセス内での数値流体力学の大変重要なステップです。このメッシュでは、正確性が要求されますが、コンピュータリソースを流出するほどの微細さは要求されません。COMSOL マルチフィジックスは、液体シミュレーション上で最適なメッシュが実装できるよう、多様なツールをご提供しています。これには、構造化、非構造化およびスウェプトメッシュが含まれ、モデリング時におけるドメインのジオメトリサイズとそれらの割合のフレキシビリティを可能にします。また、フローの方向性への影響も含まれます。CFD モジュールでもまた、壁のような境界に沿ったメッシュの構造レイヤーを挿入するため、また全体としてハイブリッドメッシュを作成するために構造、非構造メッシュで覆った連成を実装するため、境界レイヤーメッシングを使用します。

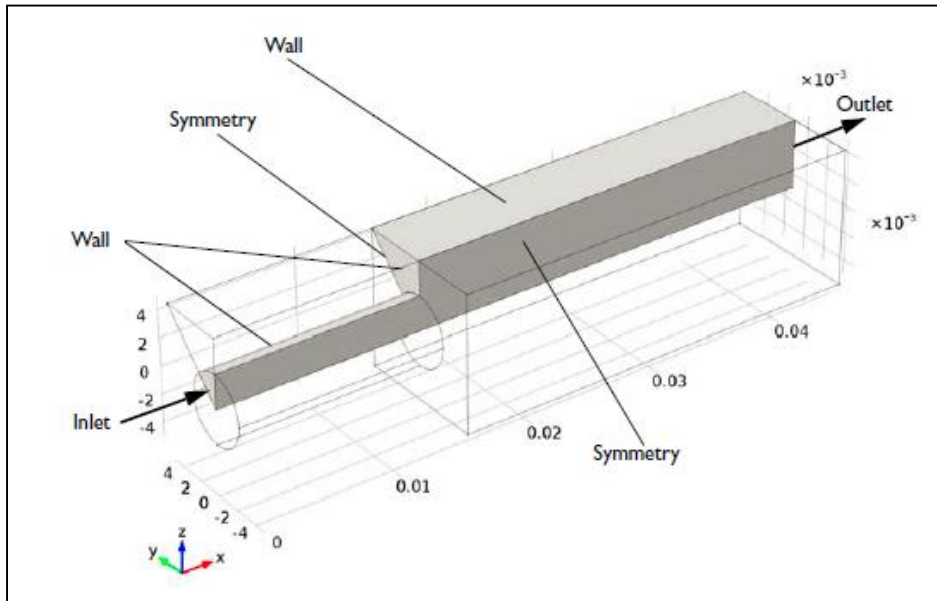
CFD モジュールでは、COMSOL マルチフィジックス内に含まれる、リニア、非リニア、時間依存、そしてパラメトリックソルバを利用します。2D および小規模な 3D モデルを解析する直接的ソルバを含み、容易に収束可能な特性を備えています。また、大規模でより複雑なモデルの反復ソルバも含んでいます。プレコンディショニングおよびマルチグリッドソルバは、ソリューションを確定するために他のソルバと連成が可能です。クロスウィンドと流線拡散のような高性能ソルバ機能や平滑メソッドが使用可能で、これらの値は、他のソルバ設定と同様微調整することができます。CFD モジュールは、全く同一のシミュレーション内で別の要素を実装することも可能です。それは、低次要素を圧力のような変数解析で実装するために、またより高次要素を他の変数解析で実装するために適用することも可能ということです。

ソルバスキームによって、より近似値な解析プロセスの初期値を取得することができます。ある特定のモデリングドメインに内蔵されている層流場解析のように、フロー解析が容易に実装可能になるソルバスキーム設定が含まれています。また、乱流定義に対する最初の推測として、このソリューションを適用するソルバスキーム設定も含まれます。Frozen Rotor インタフェースを使用するソリューションは、回転モデリングドメインのシミュレーションの最初の予測数値として使用可能です。これにより多数の数値リソースを削減することができます。

CFD シミュレーションの正確性の拡張とデータ定義

CFD モジュールでは、下記のような流体のプロパティを算出します：フローパターン；圧力損失；流量-抵抗-揚力に依存する物体力；温度分布；系内の液体の多様な成分。さらに表面、流線、リボン、矢印、定性的粒子トレーシングのプロットだけでなく、アニメーションを含む定性的ポストプロセスを提供します。基本方程式の全てのパラメータを変数からのデータおよび追加条件は、他のパラメータもしくは変数に対する拡張やプロットにアクセスできます。これには、抵抗係数や揚力係数のような派生数値のポストプロセスも含まれます。CFD アプリケーションを解析する時に、粒子トレーシングモジュール内のフィジックスとカップリング、連成することで、粒子衝突やそれ自身の推進力を利用して、流体そのもの (Lagrange-Euler), およびお互いの粒子の影響の両方を考慮する事ができます。

2. チュートリアル バックステップ



出典：INTRODUCTION TO CFD Module p.25 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流体流れ>单相流を展開し層流 (spf) 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。

グローバル定義 - パラメータ

最初の作業は、入り口の速度の為のパラメータを定義することです。こうすることで、このパラメータをパラメータスタディで利用することができます。

1. ホームツールバーのパラメータボタンをクリック（モデルビルダー上であれば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。

Linux および Mac : デスクトップのトップに近いところにあるコントロールを使います。

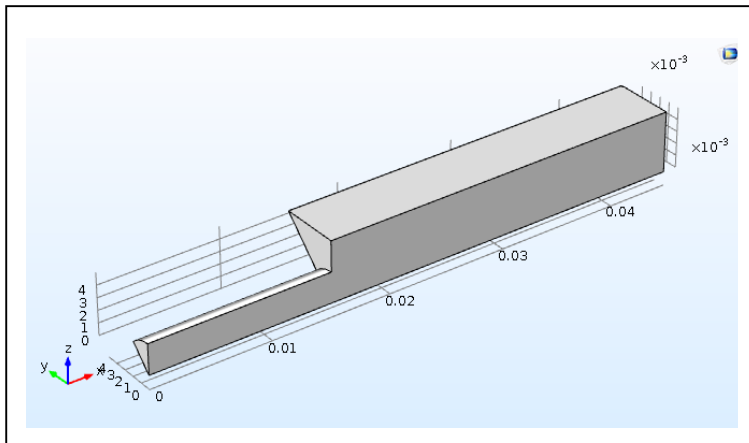
2. パラメータの下の設定ウィンドウで、以下を入力します。

- 名前の項目に v0 を入力
- 式の項目に 1[cm/s]を入力
- 説明の項目に Inlet velocity を入力

▼ パラメータ			
名前	式	値	説明
v0	1[cm/s]	0.01 m/s	Inlet velocity

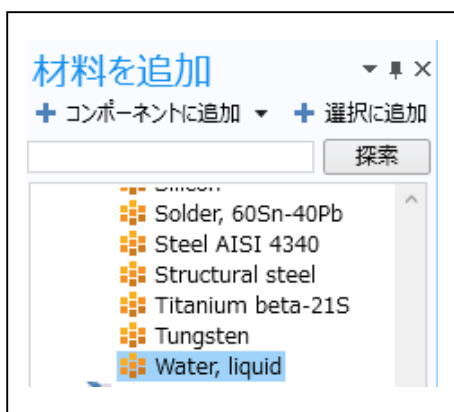
ジオメトリ

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¥CFD_Module¥Single-Phase_Tutorials をブラウズし、backstep_geom_sequence.mph をダブルクリックします。
2. 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。



材料

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 Water, liquid を選択し、コンポーネント 1 に追加します。

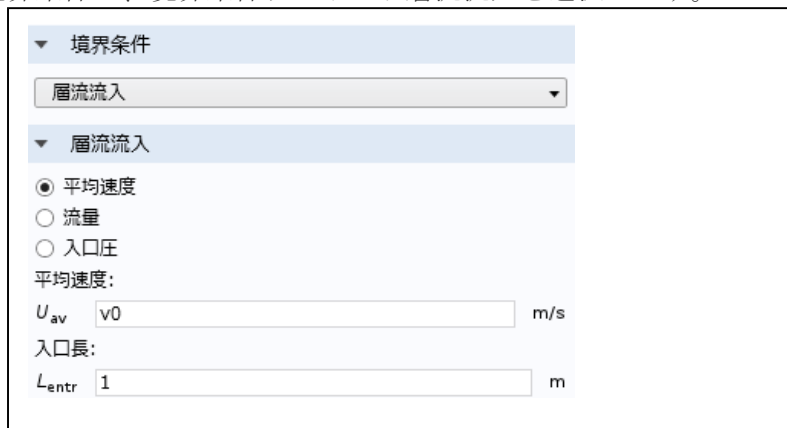


3. 「材料を追加」をクリックし、材料追加ウィンドウを閉じます。

層流

入り口 1

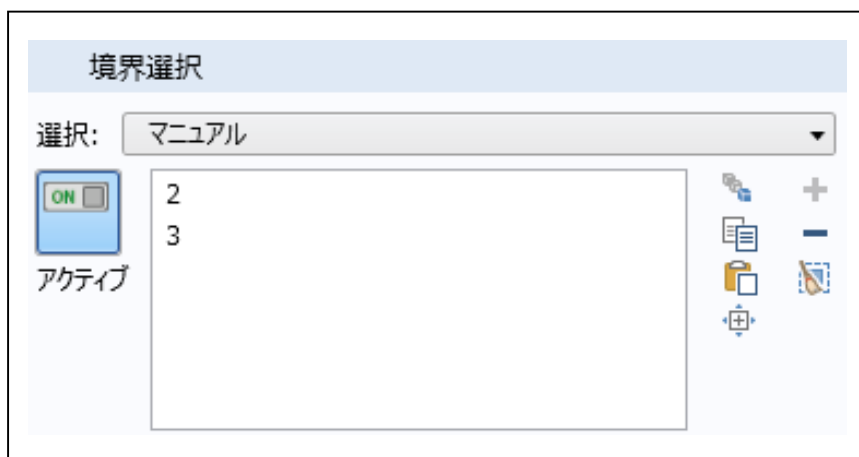
1. フィジックスツールバー上で境界をクリックし流入口を選択します。
2. 境界 1 を選択します。これが入り口になります。
3. 境界条件で、境界条件リストより層流流入を選択します。



4. 層流流入で、 U_{av} のテキスト項目に、 $v0$ と入力します。（ $v0$ はグローバル定義のパラメータで定義した値です）

対称性 1

1. フィジックスツールバーで「境界」をクリックし、「対称性」を選択します。
2. 境界の 2 と 3 のみ選択します。

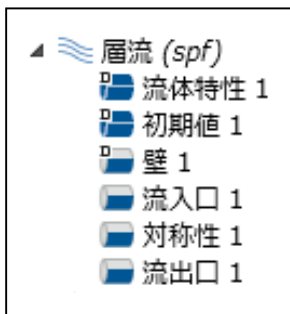


流出口 1

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。デフォルトの流出口の条件は、相対圧 0 です。
2. 流出口の設定画面で、境界 7 のみ選択します。
3. 流出口の設定画面で、圧力条件の箇所、法線流れのチェックボックスを選択します。



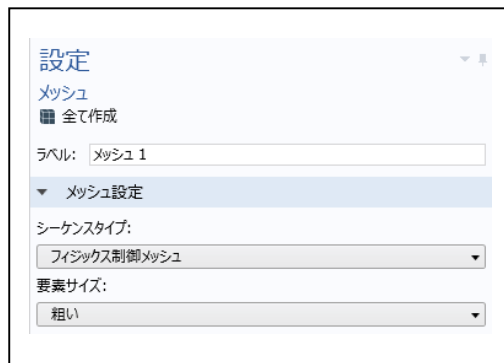
モデルビルダーの層流の下のノードのシーケンスは以下の図のようになります。



他の全ての境界はデフォルトの壁条件になります。

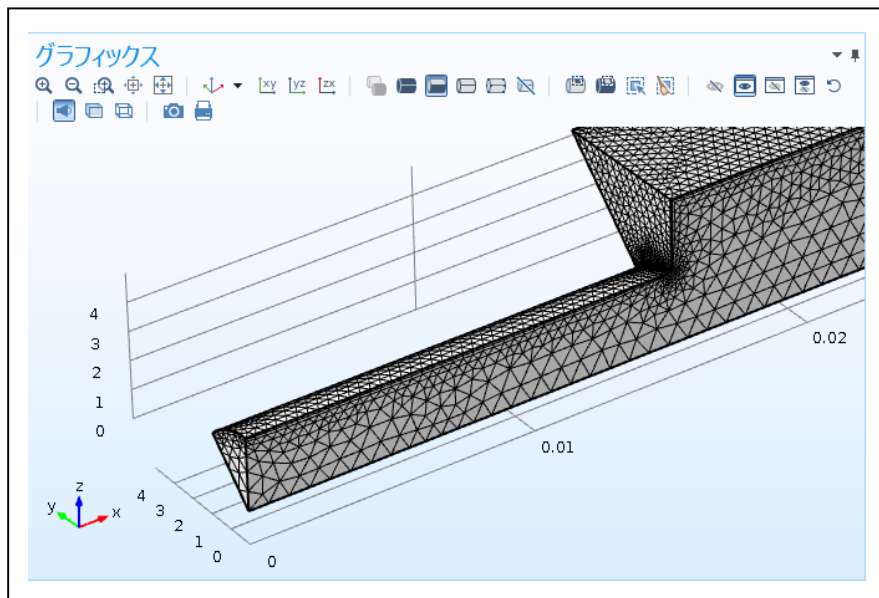
メッシュ

1. モデルビルダーで「メッシュ1」をクリックします。
2. メッシュの設定画面でメッシュ設定の箇所、要素サイズのリストより粗いを選択します。フィジクス制御メッシュは自動的に壁近辺のほうが流れ中心より細かいメッシュを生成します。



3. 全て作成をクリックします。

下図は壁の境界層メッシュを示しています。グラフィックのツールバーの拡大アイコンを利用してメッシュを拡大し、形状に合っていることを確認します。



スタディ 1

1. モデルビルダーで、スタディ 1 を右 CLK し、計算を選択します。

計算が選択されたとき、COMSOL は自動で問題に合ったソルバーを選択します。

結果

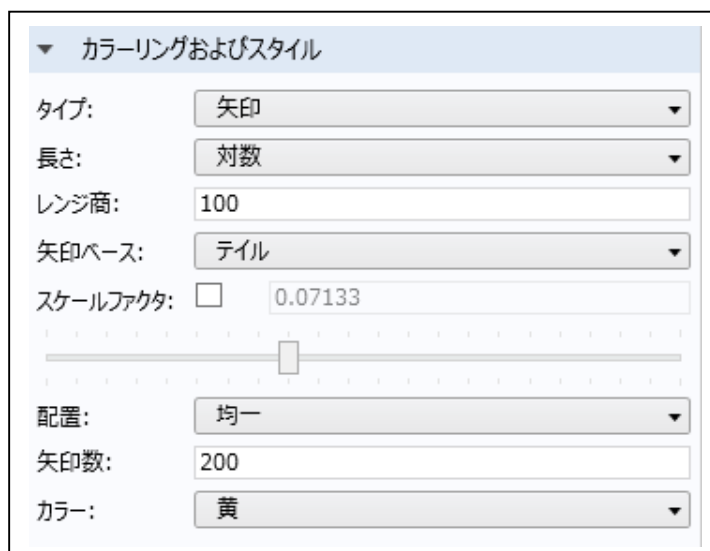
2つのグラフが自動的に作成されます。1つは速度の断面でのグラフで、もう1つは壁上での圧力分布図です。

速度 (spf)

- 1) モデルビルダーで、結果の下の速度 (spf) を展開します。
- 2) 断面 1 で右クリックし、削除を選択します。はいをクリックします。
- 3) 速度 (spf) ツールバーで面をクリックします。
- 4) 速度 (spf) ツールバーで矢印 (面上) をクリックします。
- 5) 矢印 (面上) の設定画面で以下を設定します。

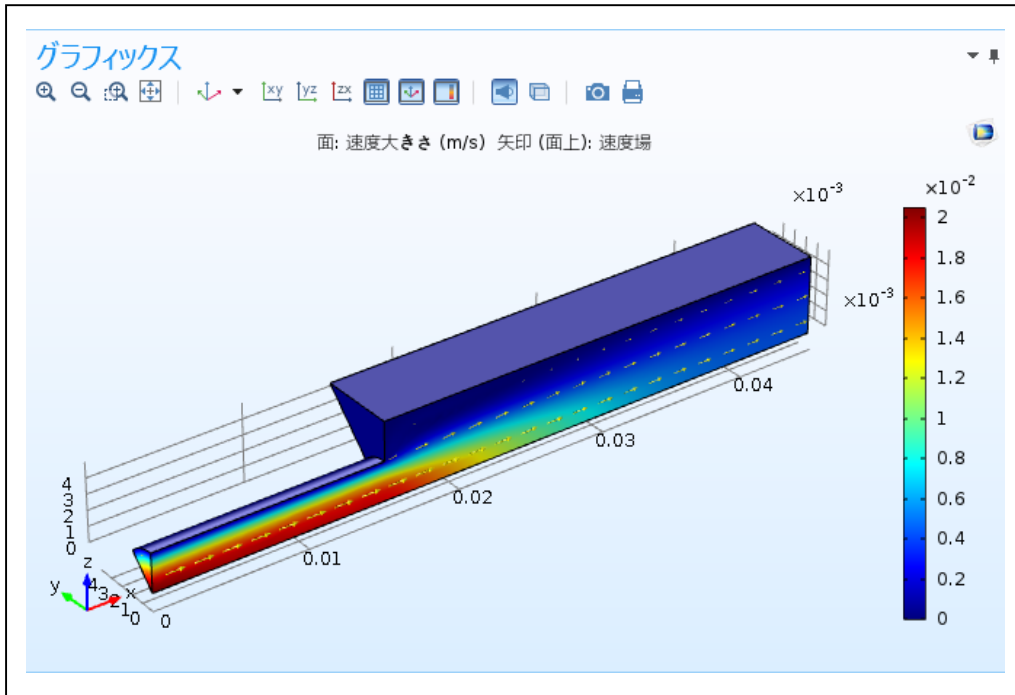
カラーリングおよびスタイルの長さのリストより対数を選択します。

カラーのリストより黄を選択します。



6) プロットボタンをクリックし、グラフィックス画面のツールバーより、画面にわたってズームをクリックします。

結果がグラフィックス画面に表示されます。



以上