

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

# 粒子追跡モジュール

粒子と場の間の変換を調査するソフトウェア

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. 粒子追跡モジュールの概要

出典：<https://www.comsol.jp/particle-tracing-module>

### 粒子トレーシングによる COMSOL 環境の機能拡張

粒子トレーシングモジュールは、粒子-粒子、流体-粒子、粒子-場の連成など、流体内や電磁場の粒子の軌道を計算する COMSOL 環境の機能を拡張します。粒子の運動を駆動する場の計算のために、用途固有のモジュールは、粒子トレーシングモジュールとシームレスに組み合わせることができます。粒子には質量を設定してもしなくてもかまいません。動きは、古典力学のニュートン、ラグランジュ、またはハミルトンの定式化で定義できます。ジオメトリの壁の粒子に境界条件を適用すると、粒子を停止、固着、跳ね返り、消去、または散在的に反射させることができます。ユーザー定義の壁条件も指定できます。ここでは、衝突後の粒子速度が通常、飛来粒子の速度の関数になり、壁は法線ベクトルになります。飛来粒子が壁に衝突したときに放たれた二次粒子も取り込むことができます。二次粒子の数とその速度分布関数は、一次粒子の速度と壁ジオメトリの関数になります。粒子は、任意の式または付着確率に従って壁に付着することもあります。追加の依存変数をモデルに追加すると、粒子質量、温度、あるいは回転などの数量を計算できます。粒子は、格子の定義または任意の式のとおり、基本メッシュに従って境界と領域で一樣に放出できます。粒子と場との相互作用の具体的な内容は、さまざまな定義済みの力で記述できます。適切な式で定義した任意の力を追加できます。双方向連成を粒子と場の間の双方向連成をモデル化できます（粒子-場連成）。同じく、粒子同士の粒子連成もモデル化できます（粒子-粒子連成）。

### 強力な処理ツール

強力な処理ツールにより、計算上の粒子軌道を高度に視覚化できます。粒子軌道は、点、彗星の尾、線、またはチューブで表現できます。動画は、簡単に作成でき、グラフィカルユーザーインターフェース（GUI）による直接表示や、ファイルへのエクスポートができます。粒子の軌道は、粒子、場、あるいはその両者の組み合わせによる任意の式で色分けできます。多くの粒子の軌道をシミュレートするときは、論理式に基づいて特定の粒子軌道をフィルターで除外することができます。粒子のグループの挙動は、低次元で投影して、ポアンカレ写像または相図で視覚化できます。さらに、粒子を操作して、すべての粒子に対する何らかの数量の最大、最小、平均、または積分をプロットできます。粒子軌道データそのものを評価して、結果表に書き込むことや、ファイルへのエクスポートができます。粒子の速度とエネルギー分布は、1次元または2次元のヒストグラムで視覚化できます。

## 電界と磁場における荷電粒子

電子、個々のイオン、あるいは小さなイオンクラスターは、電界と磁場で 3 つの主な力の影響を受けます。電気力は電位の勾配、あるいは時間で変化する磁気ベクトルポテンシャルで発生します。負電荷の粒子は、電界とは逆方向に移動し、正電荷の粒子は電界と同じ方向に移動します。これらの粒子に電気力は働きかけません。磁力は荷電粒子には働きかけませんが、その軌道を大きく変化させます。磁力があると荷電粒子は通常「バナナ」軌道を描き、磁力線の周囲にその質量と比例した距離の軌道になります。衝突力は荷電粒子が背景気体と衝突すると発生します。背景圧力が高ければ高いほど、衝突力の重要性が増します。荷電種の数密度が約  $10^{13} \text{ 1/m}^3$  の場合、その場の粒子による影響は、無視できます。これにより、粒子軌道から無関係に場を計算できます。次に場で粒子の電気力、磁力、衝突力を計算します。粒子軌道は、そのスタディだけで計算できるため、効率的で、計算上コストのかからない繰り返しソルバを使用できます。

## 粒子トレーシングの解決

粒子ごとに、常微分方程式で位置ベクトルの各成分を求めます。すなわち、粒子ごとに 3 次元で 3 つ、2 次元で 2 つの常微分方程式を解きます。時間ステップごとに、粒子に働きかける力を現在の粒子の位置の計算上の場から問い合わせます。粒子-粒子連成力をモデルに組み込むと、それらは合力に追加されます。粒子の位置は更新され、シミュレーションの指定終了時刻になるまでプロセスは繰り返します。粒子トレーシングモジュールは非常に汎用的な定式化で粒子軌道を計算するため、電磁場の荷電粒子運動、大規模な惑星の動きや銀河の動き、層流の粒子運動、乱流、二相流体システムなどのモデル化に粒子トレーシングインタフェースを使用できます。

## 流体における粒子追跡の調査

微視的な粒子と肉眼で見える大きさの粒子の動きは、流体に浸した粒子に働く抗力の影響を受けます。システムには、泡、粒子、または液滴からなる離散相と、粒子が浸された連続相という 2 つの相があります。粒子の追跡手法を有効にするため、システムを希釈流か分散流にします。すなわち、離散相の体積分率を連続相の体積分率よりはるかに小さく設定します（通常は 1% 未満）。粒子の体積分率が小さくなければ、流体システム

は高密度流に分類され、別のモデル化手法が必要になります。粒子追跡手法では、粒子が占有する流体に取って代わらないことが前提です。

少量の流れでは、連続相で粒子の動きに影響が出ますが、その逆はありません。これを、通常「一方向性連成」と呼びます。このようなシステムのモデル化では、先に連続相を解決し、次に分散相の軌道を計算するのが一般には最も効率的です。

低濃度流では、連続相は、粒子の動きを左右し、一方、粒子運動は連続相を邪魔します。これを、一般には「双方向連成」と呼びます。この影響をモデル化するには、連続相と分散相を同時に計算する必要があります。したがって、計算需要は、低濃度流のモデル化では、分散流のモデル化よりもはるかに高くなります。

## 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を展開し単相流の中の層流をダブルクリックします。すると、追加フィジックス選択リストに表示されます。別の方法として、層流を選択し、追加ボタンを押す方法があります。

4. 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 - パラメータおよび変数

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。

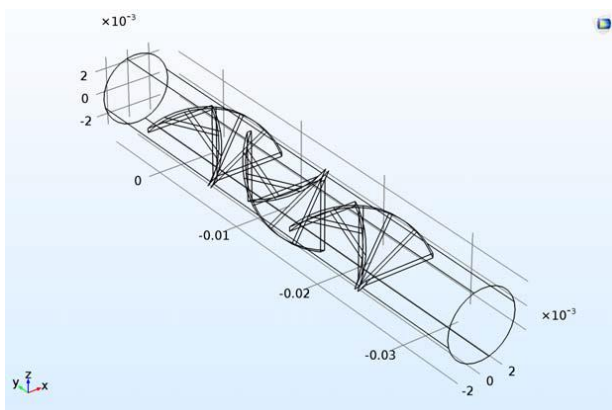
Linux および Mac : デスクトップのトップに近いところにあるコントロールを使います。

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。

設定			
パラメータ			
▼ パラメータ			
名前	式	値	説明
Ra	3[mm]	0.003 m	Tube radius
u_av	1[cm/s]	0.01 m/s	Mean velocity

## ジオメトリ

1. ホームツールバー上でウィンドウズをクリックし、アプリケーションライブラリを選択します。
2. アプリケーションライブラリフォルダ ¥Particle\_Tracing\_Module\_Module¥Applications をブラウズし、laminar\_static\_particle\_mixer\_designer.mph をダブルクリックします。
- 3 インポートをクリックします。
4. ワイヤフレームレンダリングをクリックすると下記のような図を確認できます。



## 材料

1. ホームツールバー上で、「ブランク材料を追加」をクリックします。
2. 設定ウィンドウで下記の設定を行います。

▼ 材料コンテンツ					
特性	名前	値	単位	特性グループ	
動粘度	mu	1e-3	Pa·s	基本	
密度	rho	1000	kg/m <sup>3</sup>	基本	

## 物理インターフェイス

放射線状の速度を入り口側で表現します。

- 1 境界から流入口を選択します。
- 2 23 だけ選択されます。
- 3 流入口の境界条件の設定ウィンドウにて、速度の部分で  $U_0$  を  $\text{type } 2*(1-(x^2+z^2)/Ra^2)*u_{av}$  に書き換えます。
- 4 境界条件から流出口を選択します。
- 5 20 番の境界のみ選択します。ここでは 23 番の流入口と異なる条件を設定します。

## メッシュ

メッシュは、モデル領域で確実に小片運動するために正確である必要があります。

このケースでは、メッシュが混合刃でうまくいくようにすることに注意してください。

- 1 メッシュを右クリックして、その他の操作からフリーメッシュ 3 角形を選択します。
- 2 5, 16-18, と 53-55 を選択します。
- 3 フリーメッシュ 3 角形を右クリックしてサイズを選択します。
- 4 フリーメッシュ 3 角形の上のサイズをクリックしてください。
- 5 要素サイズで、次で校正を流体力学、サイズをきわめて細かいに選択してください。
- 6 フリーメッシュ 3 角形の上にあるサイズを選択します。
- 7 要素サイズを極めて細かいに設定した後、カスタムを選択し、曲率因子を 0.15 とします。
- 8 メッシュ右クリックして、フリーメッシュ 3 角形を選択してください。
- 9 23 の境界のみ選択してください。
- 10 フリーメッシュ 3 角形 2 を右クリックしてサイズを選択してください。
- 11 要素サイズで、次で校正を流体力学、サイズをきわめて細かいに選択してください。
- 12 全て作成をクリックします。

## スタディ

- 1 計算をクリックします。

## モデルウィザード

- 1 ホームを右クリックしてフィジックスを追加します。
- 2 流体流れに関する粒子トレーシングを選択します。
- 3 ソルバーのスタディ 1 のチェックマークをはずします。
- 4 コンポーネントを追加します。
- 5 時間依存を設定します。
- 6 スタディの設定画面で流体流れに関する粒子トレーシングはチェックマークします。

- 7 スタディを追加します。
- 8 ホームの上で表示されるウインドウを削除するために Physics と Study を追加します。

#### フィジックスインターフェイス

- 1 ドメインから抗力を選択します。
- 2 ドメイン 1 のみ選択します。
- 3 設定ウインドウで速度場を速度場 (spf)、動粘度は動粘度 (spf/fp1) に変更します。
- 4 境界から入口を選択します。
- 5 23 のみ選択します。
- 6 入口の設定画面で、初期位置密度、 $N$  は 3000、 $\rho$  は spf、 $U$ 、速度は初期化から速度場 (spf) を選択します。
- 7 境界から粒子カウンターを選択します。
- 8 20 番の境界のみ選択します。
- 9 粒子カウンターの設定において、出特性を流入口 1 にします。
- 10 粒子特性をクリックします。dp を  $5E-7$ [m] と入力します。

#### スタディ 2

- 1 スタディ 2 を展開して、時間依存を選択します。
- 2 従属変数値の計算対象外の値をユーザー制御に変更します。
- 3 方法を解に変更して、計算リストでスタディ 1 を選択します。
- 4 設定にてボトムを選択し、時間依存は 0.2 から 5 を入力します。
- 5 計算をクリックします。

#### 結果

- 1 粒子追跡の設定ウインドウ中で、カラーレジェンドを展開します。
- 2 ボタンを押します。
- 3 流体流れに関する粒子トレーシングの中の粒子特性を選択します。
- 4 結果 > 粒子軌跡 > カラー表式を選択
- 5 表式を置換を選択し、モデル > コンポーネント > 層流 > 速度 > せん断速度 をダブルクリックします。
- 6 最後に PLOT ボタンを押します。



