



## 環境地質モデリング

### はじめに

COMSOL Multiphysicsは、科学と工学分野において幅広い適用性を持つマルチフィジックスシミュレーション用ソフトウェアです。COMSOL Multiphysicsの主な特長は、偏微分方程式(PDE)システムで記述される連成プロセスをシミュレートできる能力にあります。これらのシステムは以下の様な地球物理学アプリケーションの広範囲で見られます。

- 流体力学と土質力学
- 地中流と汚染
- 電氣的、電磁方法
- 熱-水力-地球化学-機械プロセス
- 生物地球化学プロセス

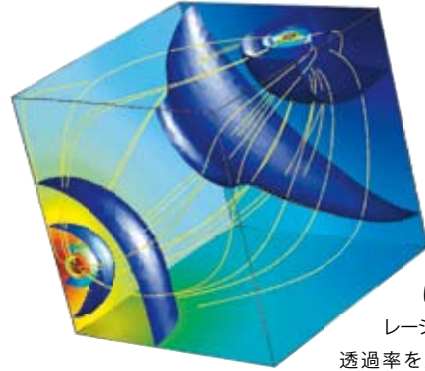
### COMSOL Multiphysics環境

COMSOL Multiphysicsとその専門モジュールは、使い易いモデリング/シミュレーション用の統合環境を提供します。専用モジュールには化学工学モジュール、電磁気学モジュール、構造力学モジュールなどがあります。

COMSOL Multiphysicsは不均質/非連続的/異方性の構造を簡単に取り扱うことができます。統合GUIは形状モデリングを含むすべてのモデリングプロセス機能を含んでいます。非構造格子に対する2D、3Dの適応メッシュ生成は計算コストを最小化するために形状に適応させ、最大均一量に指数的に拡大します。COMSOL Multiphysics関数は、MATLABプログラミング環境において利用できます。これはMATLABの統計や確率を扱うツールボックスを利用できる場合、パラメータ化されたシミュレーションまたは確率的シミュレーションするのに非常に有用となります。材料特性は数学式として自由に定義できます。また原位置調査で保存したデータファイルを

#### 主な特長

- 方程式ベースモデリングとマルチフィジックス
- 流動、電磁気学、物質/熱移動、構造力学用の定義済みアプリケーション
- 強力な反復及び非線形ソルバ
- 測定データに簡単アクセスできるオープンな環境
- MATLAB・Simulinkと互換



[図1]

COMSOL Multiphysicsは任意の非線形多孔質媒体流れモデルを扱います。図は非線形ダルシーの法則モデルによる多孔質媒体流れのシミュレーションです。ここでは圧力依存の透過率を定義するために気体の状態方程式が使われています。等圧表面/流線/圧力場が可視化されています。

使って材料特性や線源分布、例えば多孔質媒体の透過率、粘性、誘電率、抵抗率等を定義することができます。

### 方程式ベースモデリングとマルチフィジックス

COMSOL Multiphysicsのマルチフィジックス機能により流動、対流-拡散-反応、電磁モデルを次の様な他の物理現象に連成できます。

- 構造力学の変位場
- 重力場
- 音波伝播
- 一般固有モード解析
- 熱解析

全ての連成は高非線形にでき、常に根底にある方程式システムにアクセスできます。独自の式、例えば岩盤破砕流れに対するレイノルズ式を加えることも簡単にできます。

### アプリケーション分野

次項では様々な地球物理学アプリケーション分野のモデリングとシミュレーションにおけるCOMSOL Multiphysicsの使用法を紹介します。

### 多孔質媒体と地中流出

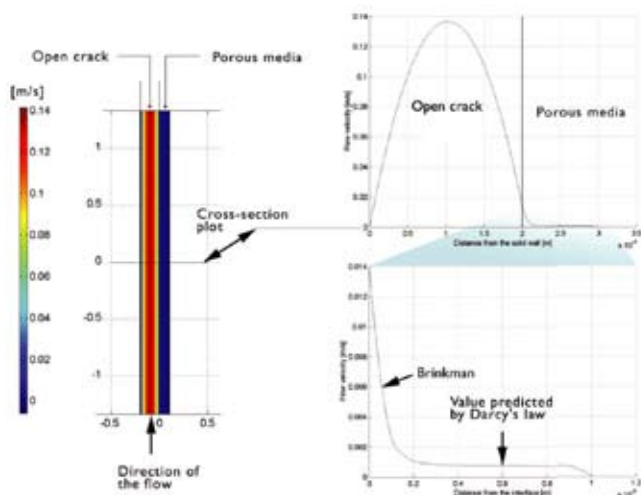
COMSOL Multiphysicsと化学工学モジュールを使って種々の流れモデルの効果を調べることができます。運動量バランスに対する基礎方程式は以下になります。

- ダルシーの法則またはポテンシャル流れ方程式
- ダルシーの法則のブリンクマン拡張
- 汎用ナビエ・ストークス方程式

COMSOL Multiphysicsは、線形または非線形ダルシーの法則を使って多孔質媒体流れをモデル化できます(図1)。線形ダルシーの法則に対しては、多孔質媒体の空隙率 $k$ と流体粘度 $\mu$ を定義します。これらの特性は数式または空間座標の関数として定義することもできます。ダルシーの法則式を非線形にするために圧力 $p$ の依存性やその勾配を入力することができます。

$$\nabla \cdot \left( -\frac{k(p, \nabla p)}{\mu(p, \nabla p)} \nabla p \right) = 0$$

この非線形PDEは、状態方程式を指定することで気体圧縮率のモデル化に利用でき、粘性、透過率の変化も考慮することができます。またCOMSOL Multiphysicsはブリンクマン拡張したダルシーの法則を解き、運動量の粘性輸送を説明します(図2)。



[図2]

COMSOL Multiphysicsの非線形多孔質媒体流れモデル。

図はクラック内の自由流れと周囲の多孔質構造内の多孔質媒体流れを連成したシミュレーション結果を示します。ダルシーの法則により断面に沿って速度は一定であると予測されるのに対し、ブリンクマン拡張ではクラック表面付近での流速場は著しく変化することを示しています。

## 非ニュートン流体

汎用ナビエ・ストークス方程式は流れモデルで最も一般的な式です。

$$\nabla \cdot \mu(\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T) + \rho(\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} + \nabla p = \mathbf{F}; \quad \nabla \cdot \mathbf{v} = 0$$

これらの式は非ニュートン流体を記述する非線形粘度 $\mu = \mu(\dots)$ に有効です。化学工学モジュールは、幾つかの非ニュートン流体の定式化の他、上記すべての運動量バランス用の定義済みアプリケーションインタフェースを持っています。また特殊アプリケーション用の独自の非標準方程式システムを定義することもできます。

## 対流-拡散-反応プロセス

COMSOL Multiphysicsは化学種の質量バランスと対流、拡散、反応プロセスによるトレーサー輸送をモデル化します。対流-拡散-反応方程式はいくつでも定義できます。

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + \nabla \cdot (-D_i \nabla c_i + c_i \mathbf{v}) = R_i$$

これらの式は、あらゆる流れのモデルだけでなく、伝熱や構造力学分析にも連成することができます。

## 電磁気モデル

COMSOL Multiphysicsと電磁気学モジュールは、電磁気場シミュレーション用の定義済みアプリケーションを多数用意しています。これらは誘電分極(IP)モデリング等の電磁気探査シミュレーションに有益です。ユーザーはGUI及びプログラミング環境でフォワードモデリングができます。またプログラミング環境ではリバースモデリングのための行列や最適機能も利用できます。以下の様なフォワードモデリングのための便利なアプリケーションインタフェースが含まれます。

- IPモデリングを含む電場と電流に対する静止または低周波電気応答
- 時間領域電磁気学による誘導電流
- 損失媒質に対する複素数誘電率/透磁率の調和的電気応答
- 電気スカラーポテンシャルと任意に結合された磁気ベクトルポテンシャル
- 2DのTMモードとTEモード
- 完全3Dの電磁気ベクトル波モード

形状モデリング用のCADツールにより、任意の電極構成とトポグラフ構造が可能です。任意の抵抗率とインピーダンス分布だけでなく、点光源を使うことが可能です。