

廃棄物最終処分場における気液二相流の数値解析

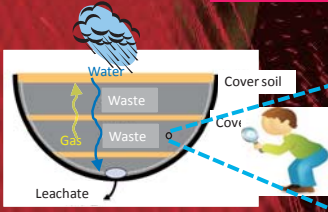
○鈴木和将(埼玉県環境科学国際センター)、水藤寛(岡山大学)

内部メカニズムを解明する上で、場での流れの物理的な現象が重要

Simulation of two-phase flow

- 間隙構造モデル: 0.001m × 0.001m × 0.001m
- 繰り返し回数: 5000回
- 時間刻みΔt: 1.0 × 10⁻⁷秒
- 境界条件: 側面はすべり壁、上下面は自由流出条件

研究の背景・目的(着眼点)



ミクروسケール (Pore scale)

従来

- 浸透流方程式では、Navier-stokes方程式の移流項が無視された形になっている
- 間隙内のメニスカスに由来するマイクロな流れのメカニズムが取り入れられていない

本研究

- Navier-stokes方程式を用い、移流項の離散化に高い精度を満たすCIP法を適用する
- 表面張力を考慮するために、表面張力を体積力で表現するCSFモデルを組み込む

埋立層内のメカニズムを解明するため、高品質な数値シミュレーション手法を構築する

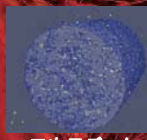
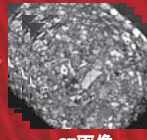
間隙形状のモデル化

数値シミュレーションのため、画像処理により複雑な間隙形状を表現する手順を構築した

μフォーカスX線CT

画像処理 (Scan IP, +FE Module)

緑色のメッシュ部分が埋立層内部の固相部分



コアサンプル

CT画像

三次元データ

画像処理マスクの作成

六面体メッシュの作成

支配方程式

連続の式

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

Navier-stokes方程式

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \Delta \mathbf{u} - \mathbf{g} + \frac{1}{\rho} \mathbf{F}_{sv} - \alpha \chi_f \mathbf{u}$$

水分量移動の式

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \theta = 0$$

CIP法

表面張力項

埋め込み境界法

【移流計算の問題点】

次の時刻での空間上の値を求めたい。

本稿は初期のプロファイル、輸送は移流後の初期値

【CIP法】

元のプロファイルを維持しながら、移動することが可能となる

CSFモデル

本研究では、BrackbillによるCSF(Continuous Surface Force)モデルを採用した。CSFモデルは、界面に働く表面張力を体積力 F_{sv} で表現するモデルである。

$F_{sv} = \sigma \kappa \delta_n$

ここで、 σ は表面張力係数、 κ は曲率、 n は法線ベクトル、 δ はデルタ関数である。

$\frac{\partial \delta}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \delta = -\kappa \delta$

CIP法の概要①

白丸をそのままついで移動させたい。プロファイルは、なまっています。

移流方程式は、三次元座標系において以下のように書く。

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla f = 0$$

ここで、 f は物理量、 \mathbf{u} は流体速度を表している。また、この式を微分して物理量の空間一階微分に際する方程式を導く。

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla f = 0$$

移流方程式は、三次元座標系において以下のように書く。

$$f^{(n+1)} = \alpha_1 \delta^2 + \alpha_2 \delta + \alpha_3 \delta^3 + f^{(n)}$$

$$f^{(n+1)} = \alpha_1 \delta^2 + \alpha_2 \delta + \alpha_3 \delta^3$$

ここで、

$$a_1 = \frac{2(f^{(n)} - f_{min}^{(n)})}{D} \frac{(f_{min}^{(n)} + f_{max}^{(n)})}{2}$$

$$a_2 = \frac{2(f_{min}^{(n)} - f_{max}^{(n)})}{D}$$

$$a_3 = \frac{2(f_{min}^{(n)} - f_{max}^{(n)})}{D} - 2(f_{min}^{(n)} + f_{max}^{(n)})$$

$t = \Delta t, D = -\Delta x$

参考文献: 1)矢野 等, CIP法とlevelによるCSFシミュレーション, 森北出版株式会社(2007)

ただし、 \mathbf{u} は流速、 p は圧力、 ν は動粘性係数、 \mathbf{F}_{sv} は表面張力、 θ は水分量である。これらの方程式を差分法によって離散化し、SMAC法を用いて流体方程式の計算を行った。また、圧力Poisson式はGP-BiCG法を用いて解いた。

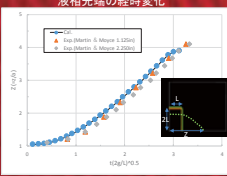
検証

自由表面流れ(CIP法)の検証 ダムブレイク問題(実験結果²⁾との比較)

自由表面流れの検証問題のひとつであるダムブレイク現象を取り上げ、本手法の妥当性を検討した。既往の実験結果と比較して検証した

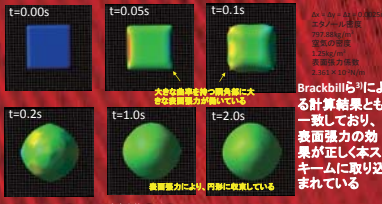


液相先端の経時変化を見ても、本数値計算は、水理実験を良好に再現しており、本手法の妥当性が確認できた。また、移流項の離散化にCIP法を用い、他の離散化方法(上流差分法等)と比較して、高い精度で計算できることを確認した。本手法により、自由表面の挙動を精度よく捉えることが可能となった。



CSFモデルの検証

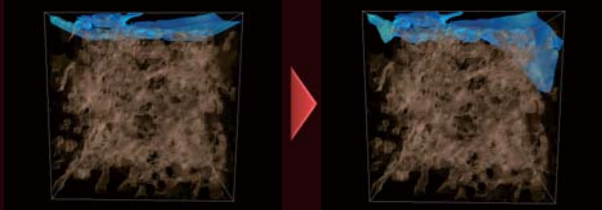
表面張力によるエタノール変形解析(無重力場)



Brackbill³⁾による計算結果とも一致しており、表面張力の効果は正しく本スキームに取り込まれている

数値シミュレーション結果

埋立処分場内部保有水の移動をシミュレーション解析した。初期条件として上部に水分量を与えた場合の間隙気液二相流数値解析例を示す。右図に水みちを想定した間隙率の大きいモデルを、下図に間隙率の小さいモデルを示す。



間隙構造モデル: 0.001m × 0.001m × 0.001m
繰り返し回数: 110,000回
時間刻みΔt: 1.0 × 10⁻⁷秒
境界条件: 側面はすべり壁、上下面は自由流出条件

間隙率が大きく異なる内部構造において、流体の物性値が異なる自由表面の挙動を精度よく捉えることができた。

種々雑多なものが埋め立てられ、複雑な間隙構造(形状、大きさ等)を形成する処分場内においてこそ、本手法は、間隙内流れを評価するうえで強力なツールとなる。