

Phase-Field法を用いた流体解析

B4 坂井 祐仁
(a19.appt@g.chuo-u.ac.jp)

研究背景

東日本大震災に代表されるように、日本は地震が頻発する国であり、沿岸部では津波による土木構造物の甚大な被害が想定されています。そのため、津波の挙動や津波が構造物に与える影響を検討することは非常に重要な課題です。
流体の解析手法として既往の研究では、その理解のしやすさからVOF法(Volume of Fluid Method)が用いられています。しかし、VOF法には時間発展に伴い、自由表面位置の特定が難しくなるといった欠点を持ちます。そこで、VOF法の代替手法としてPhase-Field法に着目しました。

数値解析手法

支配方程式(Navier-Stokes方程式)

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - f_i \right) + \frac{\partial p}{\partial x_i} - \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) = 0$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad u_i: \text{流速} \quad p: \text{圧力} \quad \rho: \text{密度} \\ \mu: \text{粘性係数} \quad f_i: \text{物体力}$$

離散化手法

空間方向：SUPG/PSPG法に基づく安定化有限要素法
時間方向：Crank-Nicolson法

支配方程式(Allen-Cahn方程式)

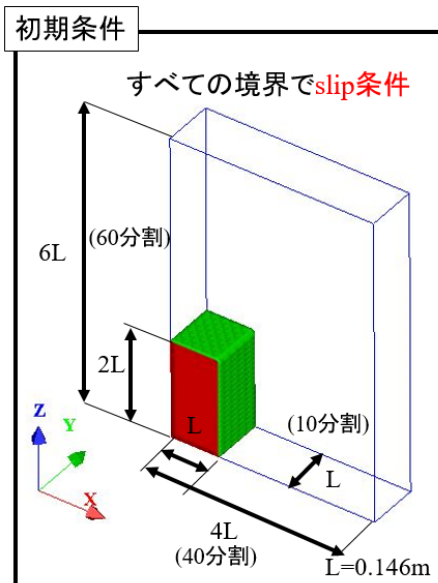
$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + u_i \frac{\partial \phi}{\partial x_i} = -M_a \left\{ \xi(\phi) - k_\phi \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x_i^2} + \kappa \left| \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right| \right) \right\}$$

離散化手法

空間方向：SUPG法に基づく安定化有限要素法
時間方向：Crank-Nicolson法

数値解析例(解析条件)

3次元ダムブレイク問題を対象としてVOF法とPhase-Field法の比較を行いました。



メッシュデータ

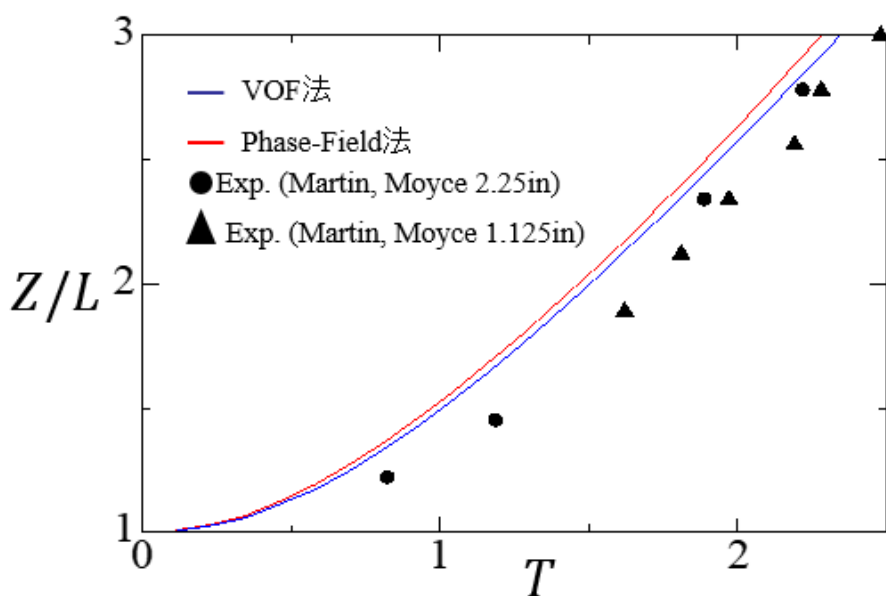
- 正四面体一次要素
- メッシュ幅: 1.46×10^{-2} m
- 要素数: 1.44×10^5
- 節点数: 27511点

解析条件

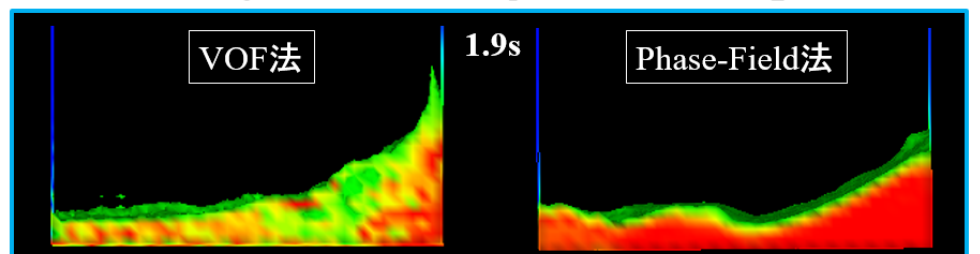
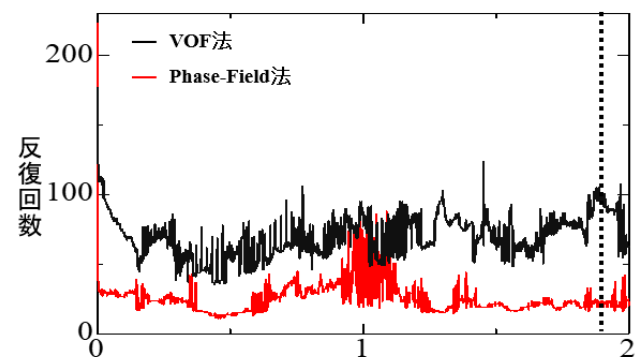
- 時間増分量: 1.0×10^{-3} (s)
- ステップ数: 2.0×10^3

	密度 [kg/m ³]	粘性係数 [Pa·s]
液体	998	1.01×10^{-3}
気体	1.205	1.81×10^{-5}

数値解析例(解析結果)



横軸に無次元時間(T), 縦軸に水際線の位置をとったのが上記のグラフになります。
Phase-Field法の解析結果が実験解とおおむね一致していることを確認しました。



上記のグラフは、横軸に時間、縦軸に反復回数を示しています。1.9秒におけるVOF法、Phase-Field法の可視化が下に示す写真です。
Phase-Field法はVOF法に比べて、反復計算の回数が少なく、界面をシャープに保てるのがわかります。

結論・今後の課題

- Phase-Field法は、VOF法に比べて、時間が経過しても界面の形状を正確に再現できており、安定して計算できることを確認しました。
- 今後は、Phase-Field法を用いた流体構造連成解析を行っていきます。