

Darcy-Brinkman 式による浸透流解析と LES のカップリング計算 LES coupled with seepage flow analysis by the Darcy-Brinkman equations

○藤澤和謙*, 村上 章*, 福元 豊**

K. Fujisawa, A. Murakami, Y. Fukumoto

1. はじめに

多孔質体の中を流れる浸透流と流体領域（流体のみで占められた領域）の水の流れを同時に解析することは、幅広い応用性を有する。例えば、その応用先には、自然斜面に存在するパイプ流が斜面の安定性に与える影響の評価、河川及び地下水に渡る物質移動、堤体等の土構造物の侵食といった問題が挙げられる。実際に著者らは、これらの問題への応用を考えており、本論では、流体領域の流れに Large Eddy Simulation (LES) を適用するとともに、多孔質体中の浸透流と同時に解析する数値解法を提案し、その結果を報告する。

2. 支配方程式と数値解析手法

流体領域における支配方程式は非圧縮性流体の Navier-Stokes 式であるが、LES の定式化にあたって Navier-Stokes 式にフィルター操作を行い、サブグリッドスケールの流れにコヒーレント構造モデル (Coherent Smagorinsky Model, 以下 CSM¹⁾) を適用すると以下となる。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + (\nu + \nu_{SGS}) \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} \tag{2}$$

$$\nu_{SGS} = C\Delta^2 \sqrt{2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij}} \tag{3}$$

$$C = C_1 |F_{CS}|^{3/2}, \quad C_1 = 1/20, \quad F_{CS} = Q/E \tag{4}$$

ここに、 \bar{u}_i 、 \bar{p} 、 ρ 、 ν はそれぞれフィルター後の流速と圧力（ピエゾ圧）、密度、動粘性係数、 Q 及び E は流速の関数として与えられるモデル変数であり、 x_i と t は直角座標と時間を意味する。CSM は、壁境界に壁法則や Smagorinsky モデルのモデル係数の減衰などを必要としないことに加えて、安定性の高いモデルである。そのため、必ず壁境界を有する本解析にも容易に適用することが出来る。

多孔質領域の流れに Darcy-Brinkman 式を適用すると、流体領域および多孔質領域における流れの支配方程式は、以下のようにまとめられる。

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{5}$$

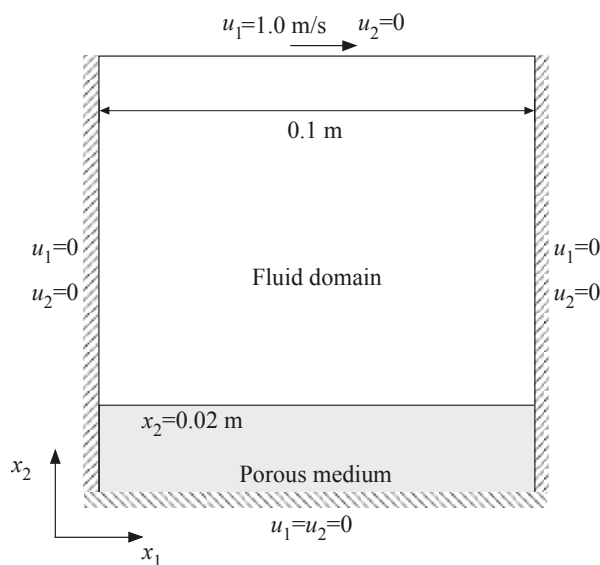


図1 解析領域と境界条件

Fig.1 Computational domain and boundary conditions

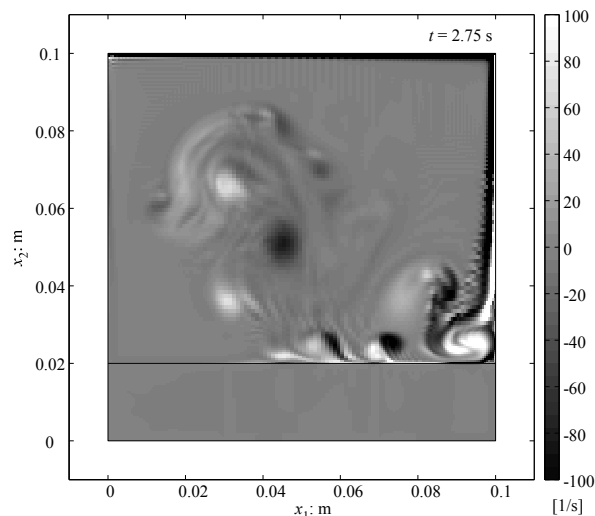


図2 渦度分布 (2.75 秒後)

Fig.2 Distribution of vorticity at $t=2.75$ s

*京都大学 Kyoto University, **長岡技術科学大学 Nagaoka University of Technology

Keywords: 浸透流, 数値流体力学

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{u_i u_j}{\lambda} \right) = -\frac{\lambda}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \hat{\nu} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\lambda \nu}{K} u_i \quad (6)$$

$$\hat{\nu} = \begin{cases} \nu + \nu_{SGS} & \text{in Fluid domain} \\ \nu & \text{in Porous media} \end{cases} \quad (7)$$

ここに、 λ と K は間隙率と固有透水係数を意味する。なお、流体領域では、 $\lambda=1$, $1/K=0$ である。

3. 数値解析結果

ここでは、計算領域の下部に多孔質領域を有するキャビティ流れを上述の手法によってシミュレートする。解析対象は、高さと幅が0.1 mの正方形領域であり、底面に0.025 mの厚さの多孔質領域がある(図1参照)。多孔質体の透水係数は0.002 m/s, 間隙率は0.5とした。上面の定値の関係を示す。境界条件は、水平方向に1.0 m/sの流速を与え、側面及び下面はノンスリップ境界とした。動粘性係数は水を想定して、 $1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ とした。本計算のレイノルズ数 Re は100,000に対応する。

図2と図3に計算された流体領域の渦度分布を示す。計算の初期は、右側面に一つの渦が発生するが、時間とともにその渦は下方に移動した。渦が流体領域と多孔質領域の境界に近づくと、その境界に沿っていくつかの渦が連なるように発達した($t=2.75$ 秒)。この計算で設定したレイノルズ数の大きさ($Re=100,000$)となると定常状態に落ち着くことなく、常にいくつかの渦が出現と消滅を繰り返す流れが流体領域において計算される($t=8.50$ 秒)。

図4には、2.75秒後と8.50秒後の多孔質領域の流速分布を示す。同図からは、流体領域で渦の発生している箇所において、多孔質体の表面に水の流入と流出が生じることが見てとれる。このように、本計算手法では、LESによってグリッドスケールで解像される渦が多孔質体中の浸透流に与える影響を首尾よく計算することが可能となる。

4. まとめ

CMSを導入したLESとDarcy-Brinkman式による浸透流解析をカップリングすることで、流体領域の乱流と多孔質領域の浸透流の安定的な連成計算を可能とした。その結果は、グリッドスケールにおいて解像可能な渦の影響が、多孔質中の浸透挙動に与える影響が首尾よく計算されることを示した。本研究をさらに発展させるには、粗度の影響を考慮できる解析方法を模索することに加え、Darcy-Brinkman式を不飽和領域にまで拡張することが必要と考える。

参考文献

- 1) Kobayashi, H.: The subgrid-scale models based on coherent structures for rotating homogeneous turbulence and turbulent channel flow, Phys. Fluids, Vol.17, 045104, 2005.

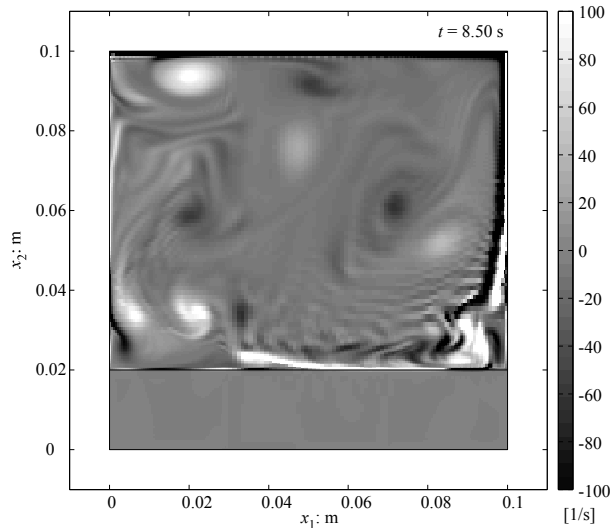


図3 渦度分布 (8.50 秒後)
Fig.3 Distribution of vorticity at $t=8.50$ s

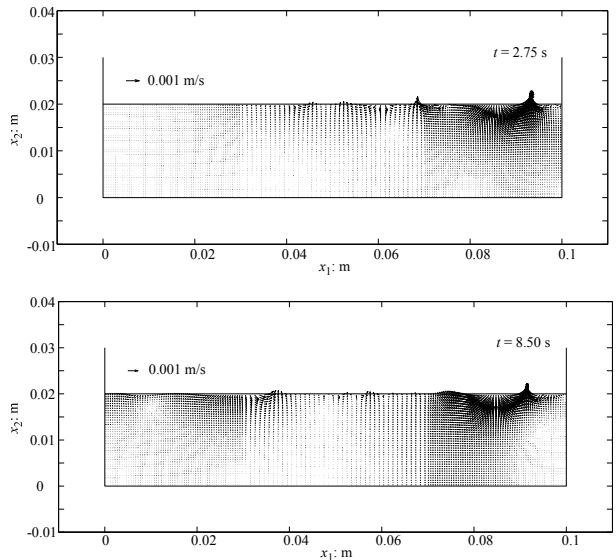


図4 多孔質領域の流速分布 (2.75, 8.50 秒後)
Fig.4 Seepage velocity in the porous medium ($t=2.75, 8.50$ s)