

混合ハイブリッド有限要素法による気液2相流解析

大成建設株式会社 正会員 小野 誠
 大成建設株式会社 正会員 鈴木 俊一
 大成建設株式会社 正会員 井尻 裕二
 株式会社テクノアルファ 非会員 久保 紳

1. はじめに

放射性廃棄物処分の安全評価では地下水流動解析によって得られた流跡線を核種移行経路として抽出するのが一般的であり、抽出された核種移行経路を対象とした核種移行解析による評価が必要とされているⁱ⁾。また、余裕深度処分等で検討されている埋設施設においては、複数のバリア材が用いられるため透水性が不均質であるとともに、施設内の金属腐食等によって水素ガスが発生することが想定されているⁱⁱ⁾。そのため、ガスと水の2相が存在する不均質場における不飽和透過特性を考慮した地下水流動解析によって、地下水およびガスの流速ベクトルを精度良く得ることが重要となっている。

本検討では、従来の手法よりも精度良く流速ベクトルが得られる手法として知られる混合ハイブリッド有限要素法ⁱⁱⁱ⁾を適用した2相流解析手法を用いて、多孔質媒体中の気液2相流挙動について解析検討を実施した。

2. 支配方程式と空間離散化

本検討では、当温条件での多孔質媒体内における水とガスの2相流れを対象とし、いずれの相の流れもダルシー則に従うと仮定した。混合ハイブリッド有限要素法では、いずれの流体についても流速分布を表すためにRaviart-Thomas型形状関数を用いた有限要素法を流れの式に適用し、コントロールボリュームでの物理量保存を満足するよう有限体積法を適用する。以下に重み関数 χ_h および ϕ_h を用いて混合ハイブリッド有限要素法の形式で空間離散化した α 相の支配方程式を以下に示す。

・ダルシー則

$$\int_{\Omega} (\mathbf{K}_{\alpha}^{-1} \mathbf{q}_{h,\alpha}) \cdot \chi_h d\mathbf{x} = \int_{\Omega} p_{h,\alpha} \nabla \cdot \chi_h d\mathbf{x} - \sum_{K \in \mathcal{T}_h} \int_{\partial K} (Tp_{h,\alpha} \bar{\mathbf{n}}_K) \cdot \chi_h dl - \int_{\Omega} (\rho_{\alpha} g \nabla z) \cdot \chi_h d\mathbf{x} \quad \text{式(1)}$$

・物理量保存式

$$\int_{\Omega} \frac{\partial(\phi \rho_{\alpha} S_{\alpha})}{\partial t} \phi_h d\mathbf{x} + \int_{\Omega} \nabla \cdot (\rho_{\alpha} \mathbf{q}_{h,\alpha}) \phi_h d\mathbf{x} = \int_{\Omega} f_{\alpha} \phi_h d\mathbf{x} \quad \text{式(2)}$$

ここで、 Ω は有界領域、 T_h は有限要素空間、 K は任意の要素、 ∂K は要素境界、 ρ は流体密度、 $\mathbf{n}$ は境界面の法線ベクトル、 g は重力加速度、 z は要素位置の z 座標、 ϕ は間隙率、 S は飽和度、 f は生産／消滅項である。添え字 α は相($\alpha = w$: 濡れ相, n : 非濡れ相)を表し、 $\mathbf{K}_{\alpha} (= \mathbf{K} k_r / \mu)$ は α 相の透過係数、 $\mathbf{K}$ は固有透過係数、 k_r は相対透過係数、 μ は粘性係数である。なお、 $\mathbf{q}_h$ はダルシーフラックスの近似解、 p_h は要素圧力の近似解、 Tp_h は要素境界圧力の近似解であり、これらが混合ハイブリッド有限要素法における未知数である。

3. 解析解との比較による検証

本手法の2相流挙動に関する精度確認のため、毛管圧を考慮した2相置換問題の準解析解である McWhorter and Sunada Solution^{iv)}を対象とした数値解析を実施した。解析条件は表1に示すとおりである。なお、不飽和透過特性については、以下に示す式(3)のBrooks-Coreyモデルを適用した。図1に示す結果のとおり、本手法により得られる数値解と解析解はほぼ一致しており、十分な精度を有していることが確認された。

キーワード 混合ハイブリッド有限要素法, 2相流解析

連絡先 〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1 大成建設(株)技術センター土木技術研究所 mono@ce.taisei.co.jp

・Brooks-Corey モデル

$$P_c(S_w) = P_d \left(\frac{S_w - S_{wr}}{1 - S_{gr} - S_{wr}} \right)^{-\frac{1}{\lambda}}, \quad k_{rw} = \left(\frac{S_w - S_{wr}}{1 - S_{gr} - S_{wr}} \right)^{\frac{2+3\lambda}{\lambda}}, \quad k_{rg} = \left(1 - \frac{S_w - S_{wr}}{1 - S_{gr} - S_{wr}} \right)^2 \left[1 - \left(\frac{S_w - S_{wr}}{1 - S_{gr} - S_{wr}} \right)^{\frac{2+\lambda}{\lambda}} \right]$$

式(3)

表 1 McWhorter 問題の解析条件

流体特性	密度	$\rho_w=\rho_n=1000\text{kg/m}^3$
	粘性係数	$\mu_w=\mu_n=0.01\text{Pa}\cdot\text{s}$
媒体特性	固有透過係数	$K=10^{-10}\text{ m}^2$
	間隙率	$\varphi=0.30$
	残留湿潤相飽和度	$S_{wr}=0.00$
	残留非湿潤相飽和度	$S_{gr}=0.00$
不飽和透過特性	毛管圧特性	(Brooks-Corey)
	相対透過係数特性	$P_d=5.0\text{E-}3\text{ MPa}$ $\lambda=2.00$
境界条件	$x=0$	$S_w=1.0$, $P_n=0.2\text{MPa}$
	$x=2.6$	$S_w=0.01$
初期条件	$t=0$	$S_w=0.01$

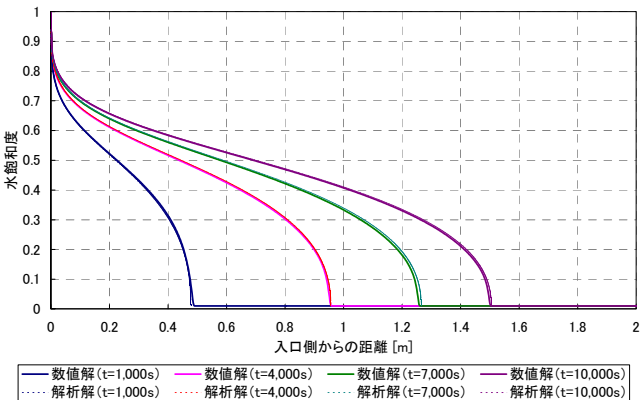


図 1 McWhorter 問題の数値解と解析解の比較

4. 気液 2 相挙動に関する試解析

気液 2 相を対象とした挙動として、図 2に示す外部からの出入りのない条件で、水とガスが接している状態を初期条件とする解析検討を実施した．媒体の不飽和透過特性は図 3に示す．この問題では、図 4に示すように比較的重い水が下方へ、軽いガスが上方へと移動する適切な結果が得られた．

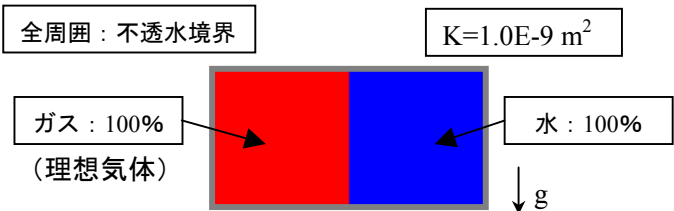


図 2 気液 2 相問題の解析条件

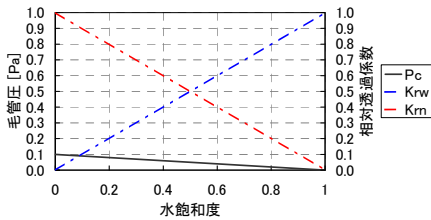


図 3 媒体の不飽和透過特性

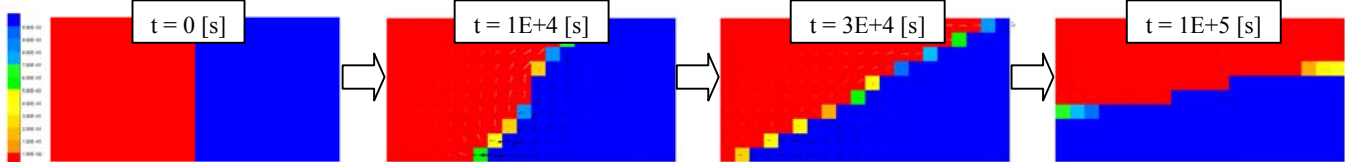


図 4 気液 2 相問題の解析結果

5. まとめ

多孔質媒体中のダルシー則に従う 2 相流解析に混合ハイブリッド有限要素法を適用し、McWhorter 問題や気液 2 相流の試解析において、適切な解析結果が得られることを確認した．今後は、複数のバリア材によって構成される不均質場を対象とした 2 相流問題への適用を目指した解析技術の向上を図るとともに、ベントナイトの膨潤挙動を視野に入れた解析評価手法について開発検討を進めていく予定である．

参考文献

i) 土木学会 エネルギー委員会 低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分に関する研究小委員会 (2008) : 余裕深度処分の安全評価における地下水シナリオに用いる核種移行評価パラメータ設定の考え方

ii) 原子力安全委員会 (2010) : 余裕深度処分の管理期間終了以後における安全評価に関する考え方

iii) Arnold, D.N., and F.Brezzi (1985) : Mixed and nonconforming finite element methods: Implementation, post processing and error estimates, Math. Modell. Numer. Anal., 19, 7-32

iv) McWhorter and Sunada (1990) : Exact Integral Solutions for Two-Phase Flow, Water Resources Research, Volume 26, Issue 3, p. 399-413