

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	
Title(English)	Numerical Study of Viscous Dissipation in Immiscible Two-Phase Flow through Porous Media
著者(和文)	WANGKAILIN
Author(English)	Kailin Wang
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京科学大学, 報告番号:甲第258号, 授与年月日:2025年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:末包 哲也,伊井 仁志,野崎 智洋,長澤 剛,兒玉 学
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Institute of Science Tokyo, Report number:甲第258号, Conferred date:2025/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	審査の要旨
Type(English)	Exam Summary

(博士課程)

論文審査の要旨及び審査員

報告番号	甲第	号	学位申請者氏名	WANG KAILIN		
論文審査 審査員		氏名	職名		氏名	職名
	主査	末包 哲也	教授	審査員	兒玉 学	准教授
	審査員	伊井 仁志	教授			
		野崎 智洋	教授			
		長澤 剛	准教授			

論文審査の要旨 (2000 字程度)

本論文は「Numerical Study of Viscous Dissipation in Immiscible Two-Phase Flow through Porous Media(多孔質内の非混和性二相流の粘性散逸に関する数値的研究)」と題し、全5章で構成される。

第1章「Introduction (序論)」では、多孔質内の二相流の研究の状況を概観し、本論文の研究の意義について述べている。多孔質の構造的な複雑性から、多孔質内の二相流の記述にはダルシー則と呼ばれる、体積平均化された現象論的なモデルが用いられている。単相流の場合は、空隙スケールでの粘性散逸がマクロスケールでの浸透率に対応付けられる。同様に、二相流では、界面張力に伴ったハインスジャンプ、メニスカス再配置、メニスカス合体といった空隙スケールイベントが、マクロスケールでは多孔質構造に固有の相対浸透係数でモデル化される。本研究では、数値シミュレーションにより、これらの空隙スケールイベントに伴う粘性散逸を定量的に評価するとともに、マクロスケールにおける相対浸透係数との関係を明らかにすることを目的であると述べている。

第2章「Simulation method and governing equation (基礎方程式とシミュレーション手法)」では、本研究に用いたシミュレーション手法を紹介し、解析結果の妥当性を検証している。従来の数値シミュレーションでは多孔質内二相流を高粘性比、高密度比、および、表面張力支配の条件で、非物理的な疑似流速が発生することを説明したうえで、疑似流速を低減するために、1)高性能 GPU での並列計算が可能な弱圧縮スキームを使用し、2) FAVOR 法、セルマージ法、埋め込み境界法を組み合わせることで多孔質の複雑な境界物体形状を再現するとともに、3) 運動量方程式を用いて解かれ、正確に瞬時的な表面エネルギーの変化率を求めることができる連続体表面力モデル導入している。円管内のキャピラリー流などをベンチマーク問題として、系に対するエネルギー保存を定量的に評価できることなど、手法の妥当性を示している。

第3章「Viscous dissipation of pore-scale events (空隙スケールイベントの粘性散逸)」では、ハインスジャンプ、メニスカス再配置、メニスカス合体といった空隙スケールのイベントが生じる単純な多孔質構造を用いて、空隙スケールイベントのエネルギー輸送を定量的に評価した。イベントの発生前には、外力仕事により系にもたらされるエネルギーは主に界面エネルギーとして蓄積され、一部が粘性散逸する。イベントが発生すると、界面エネルギーが急激に減少し、粘性散逸と運動エネルギーが増大する。従来の定説ではハインスジャンプが粘性散逸

に大きく寄与すると考えられており、イベント中の最大流速は 0.05 m/s に達し、1回のイベントで 10^{-9} J オーダーの粘性散逸を引き起こしている。同様に、メニスカス再配置は、最大流速 0.12 m/s で 10^{-9} J オーダーの粘性散逸を引き起す。一方、従来、重要視されていなかったメニスカス合体は、これら2つのイベントに比べて短い時間スケールで発生し、最大速度が 1.2 m/s に達するとともに、 10^{-6} J オーダーの粘性散逸を引き起すことを発見している。

第4章「Study on viscous dissipation of two-phase flow in a heterogeneous porous media (不均質多孔質の二相流の粘性散逸に関する研究)」では、様々な大きさの空隙とスロートから構成される二次元マイクロ流路を対象として、広いキャピラリー数 (Ca 数) と粘性比に対して数値シミュレーションを行っている。従来の研究において、Ca 数と粘性比の組み合わせにより、流動様式はキャピラリーフィンガリング、ヴィスカスフィンガリング、安定置換の3種類とその遷移領域に区分できることが知られている。空隙スケールイベントは低 Ca 数において多孔質の二相流の相対浸透係数を著しく低下させることを述べている。一方、Ca 数の増加とともに空隙スケールイベントの影響は低下し、高 Ca 数で消失する。メニスカス合体はすべての Ca 数にわたり粘性散逸を著しく増加させるが、ハynesジャンプやメニスカス再配置に比べ、発生頻度が低い。安定な粘性条件では、イベントに伴う粘性散逸は、中程度の Ca 数で消失する。一方、不安定な条件ではヴィスカスフィンガリングの前面に形成される液膜によってイベントの発生頻度が増加し、高い Ca 数においても相対浸透係数の低下を招く。以上の議論を通じて、各流動様式における相対浸透係数と空隙スケールイベントに伴う粘性散逸の関係を明らかにしている。

第5章「Conclusion (結論)」では、本研究の成果を概観し、得られた知見と工業上の意義、ならびに今後取り組むべき研究の方向性を総括している。

以上を要するに本論文は多孔質内二相流の界面張力に伴う空隙スケールイベントが相対浸透係数に与える物理的なメカニズムを解明しており、工学上および工業上貢献するところが大きい。よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として十分な価値を有するものと認められる。

注意: 「論文審査の要旨及び審査員」は、東京科学大学リサーチリポジトリ (T2R2) にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。