

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 4 日現在

機関番号：37111
研究種目：基盤研究(C)
研究期間：2012～2014
課題番号：24560929
研究課題名(和文) 微小液滴の多孔体への浸潤過程の直接数値計算

研究課題名(英文) Direct numerical simulation

研究代表者

松隈 洋介 (MATSUKUMA, Yosuke)

福岡大学・工学部・教授

研究者番号：70282241

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：多孔体中または多孔体上の気液二相流を、二相格子ボルツマン法(LBM)で、複雑な形状を持つ固体表面の濡れの境界条件を考慮して計算した。多孔体を模擬した複雑な境界は、離散要素法(DEM)を用いて作成し、その壁面抵抗を実際の多孔体と比較することにより、構造の妥当性を確認した。次に、液体の粘度と多孔体の粒径をパラメータとして、多孔体上におかれた液滴の挙動を計算した。壁面が親水性の場合、初期に多孔体上におかれた液滴が多孔体内へと浸透する様子が確認でき、その挙動は粘度に支配的であることが分かった。これらの数値計算の結果を、ガラスビーズとシリコンオイルを用いた実験と比較したところ、良い一致が得られた。

研究成果の概要(英文)：Gas-liquid flows in/on porous structures are simulated by using of the two-phase Lattice Boltzmann method (LBM), in which the wetting boundary conditions on solid wall with complex geometry are incorporated. The complex geometry simulating the packed bed is numerically constructed by the discrete element method (DEM). It is confirmed that structure of the simulated packed bed is similar to the actual bed by comparison of wall friction factor. Next the behaviors of droplet on the porous structures are simulated with different viscosity and particle diameter. The droplets set on the porous structure at initial stage penetrated into the porous structure as time marching on and spread in the bed. It was shown that the droplet behavior depends on its viscosity. These simulation results were compared with experiment using glass beads and silicon oil and showed good agreement. The applicability of LBM to Gas-liquid flows in/on porous structures was confirmed.

研究分野：数値流体力学

キーワード：多孔質体 液滴 濡れ性 粘度

1. 研究開始当初の背景

多孔体へ液滴が浸潤していく様子は、燃料電池ガス拡散層内での凝縮水の移動、インクジェット印刷での印刷紙への液滴の着弾と浸潤や塗布など様々な工業用途で見られ、その詳細なメカニズムの解明が望まれており、様々な研究が実験と解析より進められている。しかし、その詳細なメカニズムと、液滴が浸潤する速度がどのような物性値や表面の性状に依存しているのかは、必ずしも明らかに成っていない。

2. 研究の目的

マイクロスケールの多孔質媒体表面及び内部における気液二相流は、インクジェット印刷や塗布・含浸など様々な工業用途で見られる。その最適な操作条件を知るためにその詳細なメカニズムの解明が望まれている。微小流路を有する多孔質媒体は界面張力や濡れ性によって液相が移動する表面張力支配の系であるため、重力や圧力、電磁気力等の外力が無くても、マイクロスケールの複雑流路内の流れに対して固体壁の濡れ性の影響を調べることは重要である。しかしながら、多孔質内部の流動は時間と空間のスケールが微小な現象であり、流路形状も複雑であるため数値計算による解析が有効であると考えられる。そこで本研究では、多孔質表面に置かれた液滴が固体表面の濡れ性により内部へ浸潤する過程を格子ボルツマン法(LBM)により解析した。さらに計算体系と同様な形状の装置を再現し、液滴が浸潤する様子を観察する実験を行い数値計算の妥当性を検証した。これらの実験と数値計算より、液滴が多孔体内へ浸潤する速度を支配する因子を特定することを本研究の目的とする。

3. 研究の方法

(1) 実験

実験に使用したガラスビーズの粒子径は、 $d = 44 \sim 88, 74 \sim 177, 150 \sim 250, 250 \sim 420 \mu\text{m}$ のものを使用し、その平均粒子径 d_{Ave} を Table 1 に示す。また、装置の概略図を Fig.1 に示す。粒子充填層には $d_{\text{Ave}} = 64, 108, 187, 335 \mu\text{m}$ の異なるガラスビーズを用いて、電気炉で 710°C で焼結したものを使用した。液体は粘度 $\mu = 0.32, 0.54 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ のシリコンオイルを使用した。マイクロシリンジで粒子充填層に対して 5.0 mm の高さからシリコンオイル $3 \mu\text{l}$ を滴下し、浸潤していく様子を顕微鏡で撮影した。

(2) 数値解析

数値解析には格子ボルツマン法(LBM)を用いた。LBM は流体を有限個の速度を持つ多数の仮想粒子の集合体で近似し、各粒子の衝突と並進を粒子の分布関数を用いて逐次計算する手法である。微視的変数である分布関数より巨視量の流速、圧力、密度を求める。LBM は以下の特徴を持つ。

1. 複雑な境界形状を持つ流動場に対してもアルゴリズムが簡素

2. 圧力を陰的に解く必要がなく計算が速い。

3. 並列計算に適している。
本研究では大きな密度比の気液二相流を扱うことができる稲室らのモデル[1]を用いた。多孔質媒体への液滴浸潤の挙動解析を行うため Fig.2 に示す $96 \times 96 \times 64$ 格子の計算体系で三次元解析を行った。直径 8 格子の球形粒子充填層を離散要素法(DEM)で作製し、その表面に直径 40 格子の液滴を静置した状態から計算を開始した。本計算では重力は無視し、毛管力のみによる浸潤を想定し計算を行った。計算結果を画像で出力し、液面高さの経時変化を計測した。

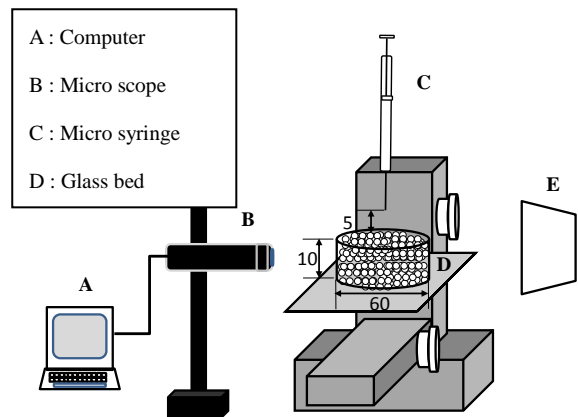


Fig.1 Schematic of experimental apparatus

Table 1 Average particle size

$d [\mu\text{m}]$	$d_{\text{Ave}} [\mu\text{m}]$
44~88	64
74~177	108
150~250	187
250~420	335

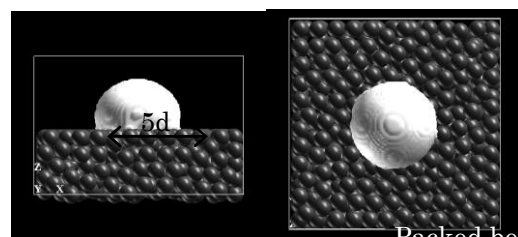
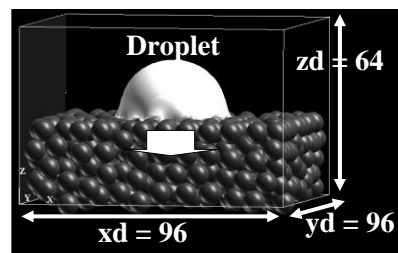


Fig. 2 Computational domain and initial setup (Left: x-z plane, Right: x-y plane)

4. 研究成果

(1) 実験

Fig.3 に浸潤時間と粒子充填層に滴下した液滴の高さのデータを示す。液滴の高さ h^* は初期高さ h_0 、浸潤時間 t^* は液滴の初期高さ h_0 が半分の高さになる時間 $t_{1/2}$ で無次元化している。Fig.2 より無次元化した液滴高さは $t^* < 1$ の期間では、粒子径および粘度に関係なく1本の直線で表すことができる。また、 $t^* = 1$ の時から次第に高さの減少が緩やかになる傾向が見られた。 $t^* < 1$ の期間では $d_{Ave} = 64 \mu\text{m}$ 以外ではほぼ一致している。ここで、粒子径と $t^* < 1$ および $t^* > 1$ の場合の液滴の浸潤速度のデータを Fig.4 に示す。Fig.4 より粒子径が大きくなると速度は大きくなる傾向が見られた。粘度で比較した場合、粘度が大きくなると速度が小さくなる傾向が見られた。また、 $t^* < 1$ および $t^* > 1$ で比較した場合、 $t^* > 1$ より $t^* < 1$ の速度が大きくなることが見られる。そして、 $t^* > 1$ の $d_{Ave} = 64 \mu\text{m}$ の2つの点ははずれるが、速度はほぼ一本の線で表すことができる。この結果から、浸潤速度は液体の粘度に反比例し、多孔体の平均粒子径の1/3乗に比例することが分かった。

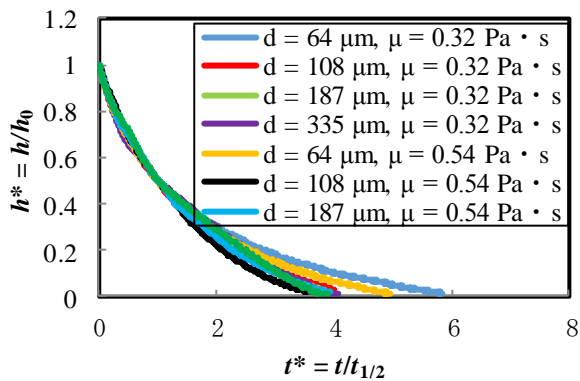


Fig. 3 Permeation action of dimensionless droplet height

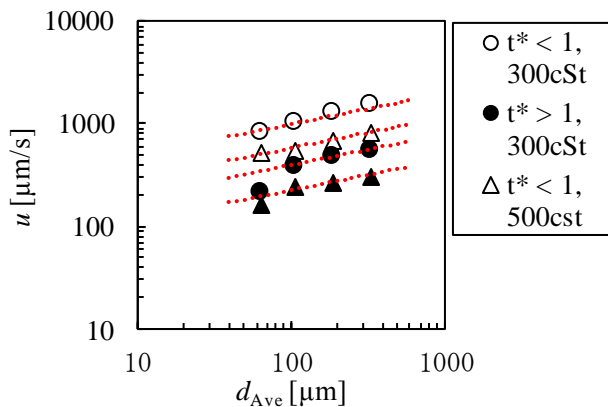


Fig. 4 Permeation speed in the average particle diameter

(2) 数値計算

Fig.5 に実験および解析より得た液滴浸潤過程の比較画像を示す。解析結果(左側)と実験結果(右側)の比較により、充填層上部での液滴の形状が類似していることが分かる。また、解析結果からは、多孔体内部の空隙が大きい部分を選択的に液が浸透し、結果として複雑な界面形状を形成していることが分かった。計算結果から得た液面高さと液滴幅の経時変化を前節の実験より得たデータの一例を Fig.6 および Fig.7 に示す。浸潤挙動の全体の傾向として、多孔質表面に着弾してから浸潤開始直後は比較的液面の低下が速く、後半はゆるやかになる結果は、実験とほぼ一致した。また、無次元化した液滴高さの経時変化は、実験と数値計算でほぼ一致しており、計算モデルの妥当性が確認できた。

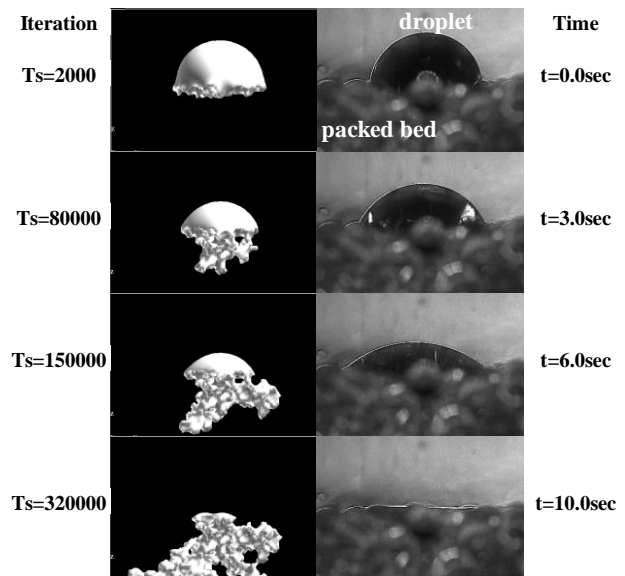


Fig.5 Comparison of simulation and experimental results

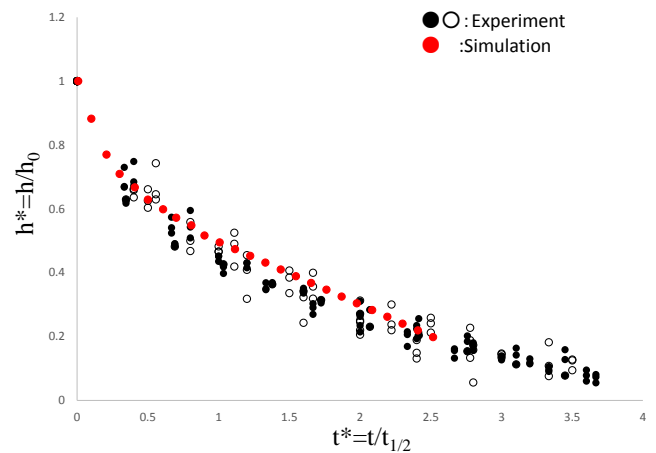


Fig.6 Comparison of time transient of droplet height between simulation and experiment

さらに、横から見た時の多孔体と接する液滴の長さを液滴幅と定義し、その経時変化の解

析と実験の比較を Fig.6 に示す。液滴着弾後に液滴幅が広がり、その後一定値を保つ様子が、定量的に一致した。

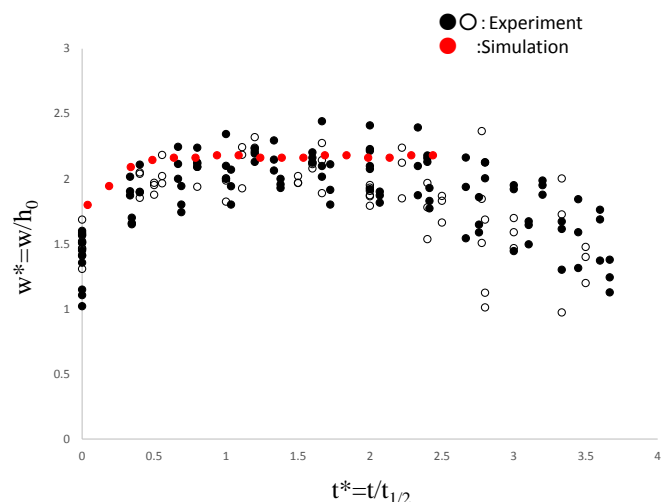


Fig.7 Comparison of time transient of droplet width between simulation and experiment

まとめ

多孔体中または多孔体上の気液二相流を、二相格子ボルツマン法 (LBM) で、複雑な形状を持つ固体表面の濡れの境界条件を考慮して計算した。液体の粘度と多孔体の粒径をパラメータとして、多孔体上におかれた液滴の挙動を計算した。壁面が親水性の条件の場合、初期に多孔体上におかれた液滴が多孔体内へと浸透する様子が確認でき、その挙動は粘度に支配的であることが分かった。また、ガラスビーズとシリコンオイルを用いた実験と比較したところ、浸潤速度は液体の粘度に反比例し、多孔体の平均粒子径の 1/3 乗に比例することが分かった。これらの解析と実験の結果を比較したところ、良い一致が得られ、多孔体内へと液滴が浸潤する計算モデルを作成できた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 3 件)

- ① 久保川悠生、松隈洋介、内山弘規、焼結ガラスビーズ多孔体への液滴浸潤速度に及ぼす粒子径の影響、化学工学会第 46 回秋季大会、九州大学伊都キャンパス (福岡県・福岡市)、2014 年 9 月 17 日
- ② 松隈洋介、久保川悠生、安永覚、切通貴浩、内山弘規、廣橋由美子、峯元雅樹、焼結ガラスビーズ多孔体への液滴浸潤速度に及ぼす粘度の影響、化学工学会第 79 年会、岐阜大学柳戸キャンパス (岐阜県・岐阜市) 2014 年 3 月 19 日

- ③ 松隈洋介、糸賀亮介、峯元雅樹、多孔体への駆逐浸潤過程の数値計算、化学工学会第 44 回秋季大会、東北大学川内北キャンパス (宮城県・仙台市) 2012 年 9 月 19 日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松隈 洋介 (MATSUKUMA, Yosuke)

福岡大学・工学部・教授

研究者番号：70282241