

A numerical study of porous flows by the lattice Boltzmann Method

岩室 嘉晃[1], 新村 裕昭[2], 小屋口 剛博[2]

Yoshiaki Iwamuro[1], Hiroaki Niimura[2], Takehiro Koyaguchi[3]

[1] 東大・新領域・複雑理工学, [2] 東大・新領域

[1] Complexity Science and Engineering, Univ. of Tokyo, [2] Univ. Tokyo, [3] Frontier Sciences, Univ Tokyo

1. はじめに

多孔質媒体中の浸透流は火山学上の様々な局面において重要な役割を果たす。例えば、噴火タイプは火道から浸透流としてガスが抜けることによって大きく影響を受ける。浸透流による脱ガス過程は、パミス、スコリア中の気泡の繋がり、火道周囲の岩盤の粒形サイズ、クラックのサイズに依存する。一般に、浸透流の性質については浸透率というパラメータを通して評価することができる。浸透率は、空隙率、空隙の特徴長さ、サイズ分布、つながりの湾曲度、異方性になど多くの要因によって支配されるため、複雑な構造をもつ多孔質媒体の浸透率を、解析的に求めることは難しい。本研究の目的は、媒体の内部構造の統計的な特徴と、浸透率の関係性を明らかにすることである。

2. 計算手法

本研究では計算手法として非圧縮性流体の2次元格子ボルツマン法を用いる。格子ボルツマン法では、複雑な境界形状を比較的容易に与えることができ、多孔質媒体中の流体解析に適している。プログラムでは任意の境界形状を、正方格子のメッシュで分割して与えている。計算領域全体で横 $3N$ *縦 N のメッシュを用意し、多孔質媒体の領域は中央の $N*N$ の部分に配置し、その左右に整流領域としてそれぞれ $N*N$ の流体領域を配置した。ここで N はメッシュの数であり、8~729の範囲で変化させた。浸透率を求めるには、初期条件として流体の部分で均等な圧力を与え、計算開始後に計算領域全体の左右の端で、一定圧力差の境界条件を与える。このとき多孔質媒体の前で計測される圧力降下と、後方で得られる平均流束から、ダルシーの法則より浸透率を求めることが出来る。

3. 結果・考察

本プログラムが簡単な流れ場において解析解と一致するかを検証した。本プログラムによる数値計算の結果、2次元クエット流(2次元平行平板中の流体にずり応力を加えたときの流れ)、2次元平行平板ポワズイユ流(2次元平行平板中の流体に圧力差を与えたときの流れ)、2次元キャビティ流(3方を境界壁で囲んだ2次元正方領域に流体を満たし、その上面にずり応力を加えたときの流れ)において、理論解や他の数値計算による計算結果とよく一致した。以上の結果より本プログラムは、速度一定、圧力一定の境界条件、及び流体の挙動をよく再現することができると思う。

多孔質媒体中では流体の流れが複雑に曲げられるため、複雑な構造をもつ媒体の浸透率を求めるために必要な、メッシュ分解能についての考察を行った。多孔質媒体には複雑な境界形状を有するもの(例として、シェルピンスキーのカーペット図)を用い、媒体中で最も狭い流路の部分のメッシュ数を変えて浸透率を計算した。最も狭い流路の部分において3メッシュ以上取った場合、浸透率がほぼ一定となった。そのため、複雑な境界を持つ多孔質媒体に対しては、最も狭い流路の部分で少なくとも3メッシュとる必要があることがわかった。

この計算に最低限必要なメッシュと、計算機の記憶容量に対応した最大計算可能メッシュサイズより、計算することの出来る空隙のスケール比の幅が見積もられる。現在の境界形状の与え方でサイズを拡大した場合、1台の計算機(1.5GBメモリ)では、 $4200*1400$ メッシュ(多孔質媒体部分で $1400*1400$)まで計算可能である。よって媒体中で100倍のスケール比をもった空隙を分布させることができる。例えば、一般的な砂岩は2~1/16mmの粒径分布で構成されており、その粒径のサイズ比は30倍程度であるため、流路のサイズ比もおおよそ30倍程度であると考えられる。したがって、本プログラムではそのような砂岩中の流体の挙動を計算することが出来る。また、火道壁のような多孔質媒体では、クラックによる空隙を考慮する必要があるが、クラックに関するスケール比はより大きいと考えられる。その場合はプログラムの並列化によって対処することが出来る。格子ボルツマン法は並列化による計算効率向上が非常に大きいと考えられるため、この手法を発展させることにより、よりスケール比の大きな媒体に対して計算を行うことが可能となる。