

# 自然積雪の3次元間隙構造に基づくフィンガー流の数値計算の試み

○勝島隆史(森林総研)・安達聖・山口悟(防災科研・雪氷)・尾関俊浩(北海道教育大)・熊倉俊郎(長岡技科大)

## 1. 研究背景と目的

自然積雪での乾雪への浸透に際して形成するフィンガー流の大きさは、どの程度の大きさを持ち、雪の物性値の何に関係するのか？筆者らは、これを明らかにするためにMRIによる高速3次元撮像手法を乾雪への浸透に適用して、フィンガー流の発達を非破壊的観察を行った。しかし自然積雪を用いた浸透実験では、鉛直方向に対する間隙の差異によって形成するキャピラリーバリアー（以下、CB）が各所に顕在するため、MRIの撮像画像からフィンガー流の大きさを明瞭に判読できたケースは少なく、実験結果から雪の物性値との関係を導くことは困難であった。これを解決する別の手段としてフィンガー流の発達を再現する数値計算が考えられるが、これまでに提案されたモデルは、何らかの仮定に基づいて間隙や毛管力の大きさやばらつきを計算に取り入れる必要があることから、予測に使用することは困難であった。

本研究では、自然積雪に形成するフィンガー流の大きさを明らかにするために、間隙の3次元構造を計算に直接使用することで、間隙の種々の仮定を全て排除した、フィンガー流の発達を間隙スケールで直接計算する新しい手法の開発を試みた。

## 2. 研究手法

多孔質体中の流体が別の流体に置換する過程をモデル化したインベーシオンパーコレーションに基づいて計算手法の開発を行った。Glass et al.,(2003)は、巨視的に見た間隙の集合体を1つの計算要素と定義し、水ポテンシャルが最小となる要素から順に水が浸入すると仮定したモデルを提案し、土壌中のフィンガー流の発達の再現に成功した。本研究では、これを拡張し、個々の間隙の大きさや接続関係を計算に直接使用する“Pore-scale” modified invasion percolation model（以下、PMIPモデル）を新たに開発した。

具体的には、まずX線 $\mu$ CTにより解像度 $20\mu\text{m}$ で取得した $500\times 500\times 3016$ ピクセルの雪の3次元データに対して、気相に該当するピクセルを3D watershed segmentation法を用いて個々の間隙に分割し、間隙に内接する最大の球の半径を

求めるとともに、各間隙がどの間隙に接続するかを求めることで、間隙の3次元構造を計算した。得られた内接球の半径からJurin's lawにより間隙の持つ毛管ポテンシャルを、内接球の高さ方向の中心位置から重力ポテンシャルを求め、この2つの和を個々の間隙が持つ水ポテンシャルとした。そして、計算領域上端に位置する間隙を全て含水させ、計算領域内の含水した間隙に接続する間隙のうち、最小の水ポテンシャルを持つ間隙を探査し、これに水が浸入する操作を繰り返すことで、浸潤前線が前進する状態を表現した。

## 3. 結果

図1に、MRIによる浸透実験の結果と、PMIPモデルによる計算結果を示す。図では、3次元データを鉛直方向に投影したものを実寸大で示した。MRIの実験結果は、密度 $169\text{kg/m}^3$ のこしまり雪を対象として、 $4.5\text{mm/hr}$ のフラックスで水を上端に供給した時の、供給開始から43分後のスナップショットを示した。MRIによって観察したフィンガー流の発達や撮像領域の中央部のCBでの側方流の形成が、計算において概ね再現されていた。計算されたフィンガー流の水平断面の太さは鉛直方向に変化しており、間隙の鉛直分布が反映されたものと思われる。

**謝辞** 本研究はJSPS科研費16K12860の助成を受けたものです。

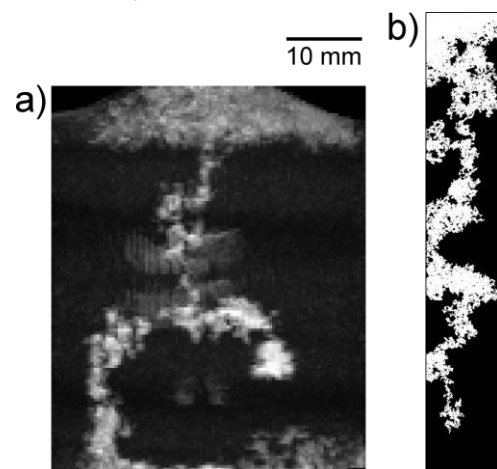


図1 乾雪内部に形成するフィンガー流  
a)MRIによる実験結果  
b)PMIPモデルによる計算結果