

0.12 T コンパクト MRI による積雪の水分特性曲線の計測 Measurement of water retention curve of snow by 0.12 T MRI

安達聖 (防災科学技術研究所雪氷防災研究センター), 尾関俊浩 (北海道教育大学),
巨瀬勝美 (筑波大学 数理物質科学研究科 電子・物理工学専攻)

Satoru Adachi, Toshihiro Ozeki, Katsumi Kose

1. はじめに

我々はこれまでに 0°C 以下の低温室に設置した小型永久磁石と、常温の実験室に設置した制御用コンソールを組み合わせた雪氷用 MRI の開発を行ってきた。静磁場強度 1 T の永久磁石を使用した MRI では、 $(0.1\text{ mm})^3$ の空間分解能での積雪の 3 次元データセットの取得や、海氷内のブラインチャンネルの可視化を行った¹⁾。

近年、我々は全層雪崩の要因ともなるぬれ雪中の水分の移動に注目し、MRI によるぬれ雪中の水分の分布の可視化を試みた。1 T 永久磁石を用いた MRI では撮像視野が 3 cm 球程度と水分の分布を可視化するには不足であるため、より広い撮像視野を有する永久磁石を用いた MRI を新たに開発した。また本研究では、骨密度計測に用いられる低磁場 MRI 法を応用し、積雪中の水分の分布および、その体積含水率の計測を行った。また、それらの計測結果により得られた水分特性曲線の推定結果を報告する。

2. 研究方法

2.1 計測積雪試料

本実験で使用した MRI は -1°C の低温室に設置した永久磁石と、常温の実験室に設置した制御用コンソールを組み合わせた低温室用コンパクト MRI である。永久磁石内に設置している NMR 信号検出部と制御用コンソールは低温室壁面のダクトからケーブル通し接続している。図-1 に示す永久磁石は静磁場強度：0.12 T，磁極間ギャップ：17 cm，静磁場均一領域：直径 100 mm 球，高さ 47 cm，幅 34 cm，奥行き 36 cm，総重量は 160 kg である。RF プロブは直径 120 mm，高さ 120 mm のアクリル製の円筒の巻き枠に直径 1.5 cm の被服銅線をピッチ 4 mm，23 ターン巻き，幅 165 mm，奥行き 165 mm，高さ 215 mm の真鍮製のシールドボックス内に固定したものを使用した。撮像シーケンスには， $\text{TR/TE}=200\text{ ms}/16\text{ ms}$ ， $\text{NEX}:4$ ，イメージマトリクス： $128\times128\times16$ ，面内分解能 $(1\text{ mm})^2$ ，奥行き分解能 8 mm の 3D スピンエコー法を用いた。



図-1 0.12 T 永久磁石

サンプルホルダーは直径 105 mm，高さ 163 mm の円筒形の容器を用いた。積雪試料はふるいで粒径を 0.5，2.0 mm に揃えたざらめ雪を，直径 5 cm，高さ 20 cm，密度 550 kg m^{-3} の円筒形に加工した。

2. 2 MRI による含水率計測法

本研究で得られる MR 画像の空間分解能では積雪の微細構造を描出するには十分でない。しかし、画像コントラストにより積雪試料に含まれる水分の分布を表現することは可能である。すなわち水分量が多い範囲は白く明るく描出され、水分量が減るに従い黒く暗く描出されることから MR 画像から容易に水分の分布を読み取ることができる。

MR 画像から体積含水率を求める方法として、骨密度計測に用いられる低分解能 MRI 法²⁾を応用した。積雪試料と硫酸銅水溶液で満たした標準試料の MR 画像から、測定範囲の輝度値の比により体積含水率を求める。積雪試料中の体積含水率は以下の式で求められる。

$$\text{体積含水率} = \frac{\rho_c}{\rho_p} \times \frac{\rho_{e2}}{\rho_{e1}}$$

ρ_c , ρ_p , ρ_{e1} , ρ_{e2} はそれぞれ図-2 に示す範囲を指す。

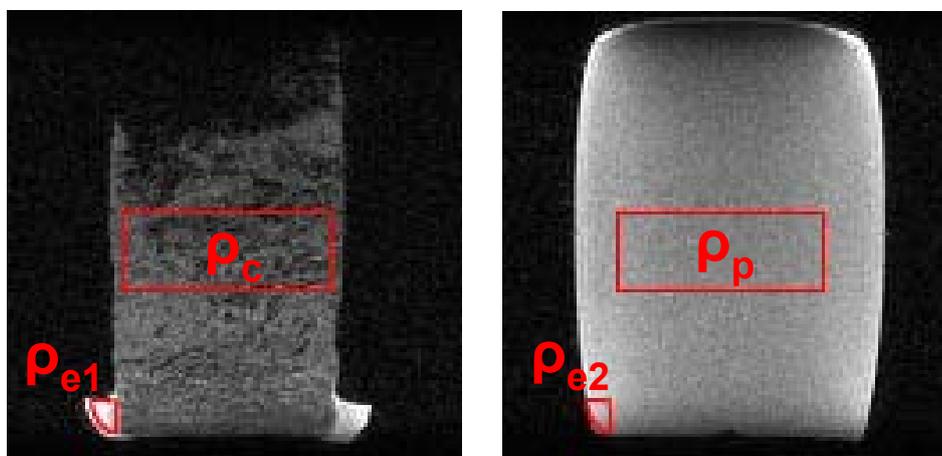


図-2 積雪試料と標準試料の MR 画像

左：積雪試料 右：標準試料

ρ_c と ρ_p , ρ_{e1} と ρ_{e2} は同範囲

3. 計測結果

サンプルホルダーの内壁に積雪試料が接しないよう収め、積雪試料の上部および側面を濡らさぬよう 5mol/m^3 に調整した硫酸銅水溶液（以下、水溶液）をサンプルホルダーの壁面をつたわせ注ぎ入れた。吸水特性曲線の計測のため、積雪試料の下部から水溶液を浸透させ、水溶液の自由水面がサンプルホルダーの底部から 1cm 程度になるまで注ぎ入れた。その後、30分放置し積雪試料内に浸透した水溶液が定常状態に達してから MR 撮像を行った。MR 撮像終了後、排水特性曲線の計測のため、サンプルホルダーに水溶液を注ぎ入れ、積雪試料全体に浸透させた。30分放置した後、サンプルホルダーの底部から 1cm 程度水溶液を残し排水し、さらに 30分放置した後 MR 撮像を行った。図-3 に MR 画像の 1 例として粒径 0.5 mm のざらめ雪の撮像結果を示す。

図-4, 5 に低分解能 MRI 法により体積含水率を計測した結果を示す。図-4, 5 はそれぞれ粒径 0.5 mm, 2.0 mm, 密度 550 kg m^{-3} のざらめ雪を使用し、自由水面を基準に高さ 1cm 毎の体積含水率の変化を示した。粒径 0.5 mm の試料においては、吸水曲線では自由水面からの高さ 5cm から含水率が減少し、排水曲線では高さ 6 cm から減少が見られ、両曲線の変化に差が見られる。しかし、粒径 2.0 mm の試料では吸水および排水曲線は重なりあい両曲線に差は見られない。

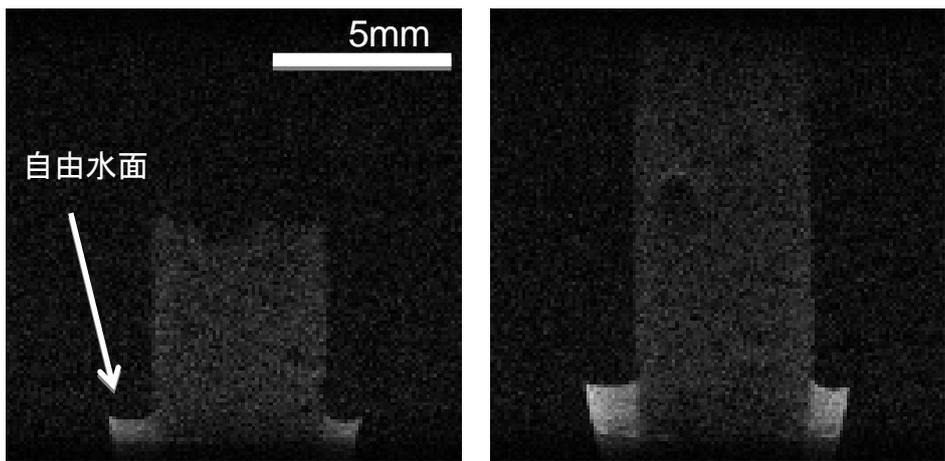


図- 3 積雪試料の MR 画像 (粒径 0.5 mm)
 左：吸水時の MR 画像 右：排水時の MR 画像

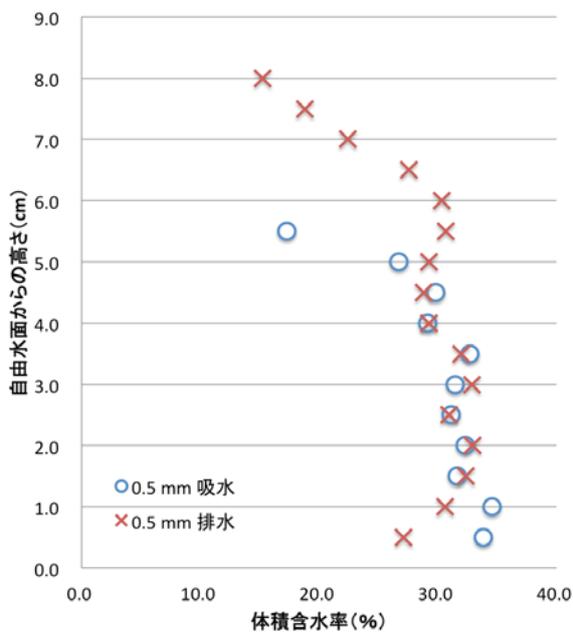


図- 4 水分特性曲線 (粒径 0.5 mm)

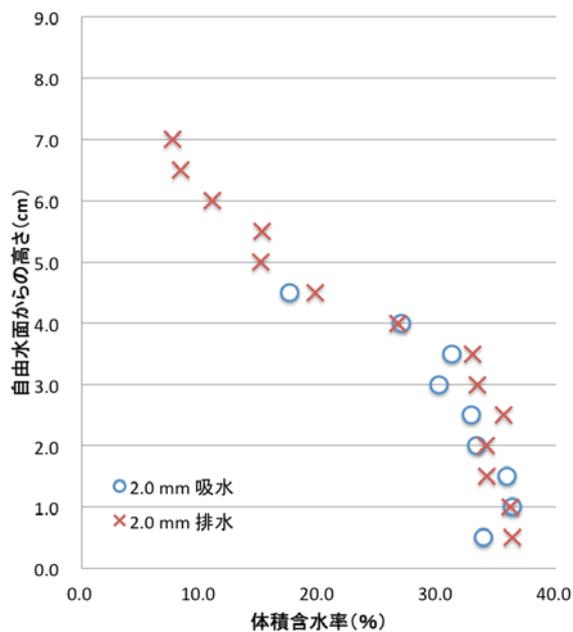


図- 5 水分特性曲線 (粒径 2.0 mm)

4. まとめ

0.12 T コンパクト MRI により，積雪中の水分の分布の可視化を行った．また，低磁場 MRI 法を用いることで，積雪試料の体積含水率を非破壊で計測することができた．さらに，同一の積雪試料から吸水特性曲線および排水特性曲線の計測を行うことが可能となり，両特性曲線間の差が雪粒子の粒径に依存することが示唆された．

今後は，積雪試料の粒径，密度，雪質などを変化させ水分特性曲線の計測を行い，ぬれ雪中の水の移動モデルに適用していく予定である．また，より鮮明な MR 画像の取得と撮像時間の短縮のため，静磁場強度 0.21 T の永久磁石を用い計測を行う予定である．

謝辞

株式会社エム・アール・テクノロジー拝師智之社長より、計測に使用した 0.12T 永久磁石を提供していただいた。株式会社エム・アール・テクノロジー富樫数馬氏には本装置の運搬に協力していただいた。心より感謝いたします。

参考文献

- 1) S.Adachi, T.Ozeki, R.Shigeki, S.Handa, K.Kose, T.Haishi, M.Aoki, Development of a compact magnetic resonance imaging system for a cold room. Review of Scientific Instruments 80, 2009, 054701
- 2) K.Kose, Y.Matsuda, T.Kuriyama, S.Hashimoto, Y.Yamazaki, T.Haishi, S.Utsuzawa, H.Yoshioka, S.Okada, M.Aoki, T.Tsuzaki, Development of a Compact MRI System for Trabecular Bone Volume Fraction Measurements. Magnetic Resonance in Medicine 52, 2004, 440-444