

MRI による積雪 3 次元構造の可視化

尾関俊浩 (船舶技研)・八久保晶弘 (北見工大)・巨瀬勝美 (筑波大)
中坪俊一・西村浩一 (北大低温研)

1. はじめに

地上に降り積もった雪「積雪」は複雑な形状をもつ無数の氷粒子と空気の 2 相混合物で、「新雪」、「しまり雪」、「ざらめ雪」、「しもざらめ雪」に大きく分類することができる。同じ密度の積雪でも、雪質の違いによって粒子同士の結合や空隙の形は多様であり、その複雑なネットワーク構造が、熱や水蒸気などの輸送機構、さらには力学的性質などの積雪の物性を決定する最大の要因となる。

積雪構造の観察には、1950 年代に開発された、空隙をアニリンで固定して厚さ 200~300 μm の「薄片」を作成する手法 (木下・若浜, 1959) が現在でも用いられている。この他、アニリンで固定した積雪試料の断面を染料で着色して観察する「片薄片」の方法 (例えば成田, 1971) もある。しかし求められる情報はいずれも 2 次元であるため、積雪内部の 3 次元構造の定量化と理解には程遠く、積雪物性の研究進行のうえで大きな障害となっていた。

積雪の 3 次元構造を求める試みは、1990 年代に入りスイス、フランス、アメリカなどで行われている。いずれも先に述べた片薄片を微小間隔で連続的に作成し、重ね合わせることでおおよその構造を求めるという手法 (2 次元情報の外挿) であるが、技術の熟練に要する時間に加えて膨大な作業量が必要となり、いまだに十分な成果を得るに至っていないのが現状である。

本研究では、画像医学診断の分野で広範に用いられるようになった核磁気共鳴映像法 (NMRI) を適用し、積雪 3 次元ネットワーク構造の可視化とその定量化を行うことを目的とする。NMR は「原子核は静磁場の中で磁場の強さに比例した周波数で歳差運動を行う」という性質を利用して、原子核の位置における磁場の強さを計測する手法で、これに一定の勾配磁場をかけて位置情報を求めるイメージング法 NMRI は、ここ数年目覚ましい発展を続けている。氷からの信号強度そのものは微弱であるが、本研究では積雪の間隙を液体で満たし、それをイメージングする手法を開発・適用する。

2. イメージング手法の開発

初期実験の測定対象は、人工的に作成した氷球と、天然で採取したしもざらめ雪の結晶を容器に充填し、容器内でのパッキング状態を可視化することを目標とした。可視化システムは筑波大物理工学系先端 NMR 映像法研究室が実験用に開発した NMRI システム (最大直径 40mm 長さ 30-40mm の 3 次元領域を 100 μm の解像度で画像化が可能) を用いた。

予備実験として表面張力が大きく積雪内部の空隙に良く浸透する液体 (ドデカン: $\text{C}_{12}\text{H}_{26}$) について、その信号強度を確認の上で、どの程度の画像が得られるか確認を行った。サンプルはドデカンに常磁性緩和試薬である Iron Acetylaetonate ($\text{C}_{15}\text{H}_{21}\text{O}_6\text{Fe}$) を微量加え T1 を短縮した溶液を内径 18mm、外径 20mm の

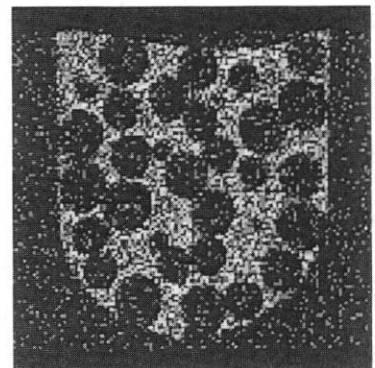


図 1 : ドデカンを用いたナイロン球の NMR イメージング画像。

NMR 用試験管に入れ、さらに直径 3.2mm のナイロン球を充填したものをを用いた。撮像は 3 次元で行い、約 30 分で 1 画素 $200\mu\text{m}^3$ の画像を取得した。図 1 は 3 次元データセットの 1 例で、スライス厚さ $200\mu\text{m}$ 、面内画素サイズ $200\mu\text{m}$ の画像である。ナイロン球からは信号がないので黒い円形の像が得られた。この結果より、ドデカンを用いて本実験で想定した画像が取得可能であることがわかった。

続いて測定領域の大きさに対応し、容器の外縁に冷媒を循環させてサンプル温度を一定に維持する冷却システム (1 時間程度容器内を $-5\sim-10^\circ\text{C}$ に維持) を開発した。ドデカンの融点は -12°C であるから、このシステムで試料温度を調節することにより、氷と液体のドデカンを共存させ画像を取得することが可能となった。

3. 実験結果

積雪の可視化実験には、液体窒素内に注射器から水滴を落下させる手法で作成した「氷球」と天然で採取された「しもざらめ雪」を試料容器に充填し、間隙をドデカンで満たしたものをを用いた。容器は二重管のため、測定領域は直径 20mm 長さ 40mm であった。

図 2 は直径約 3mm の氷球試料について約 60 分のサンプリングで取得した 3 次元データセットで、スライス厚さ $200\mu\text{m}$ 、面内画素サイズ $200\mu\text{m}$ の画像である。図 2 の数字は 128 枚で構成されるデータセット中何枚目の断層であるかを表しており、A と B は 1 画面 0.2mm 、B と C は 5 画面 1mm 離れた画像である。氷からは信号が無く、ドデカンからは信号が得られることから、画像内の黒円が氷球の像である。A、B、C の白円内や矢印で示した氷球を見比べるとスライス位置により氷球の径が変化している様子が分かる。これらの 3 次元情報より、雪粒子の立体形状や配位数等の 3 次元ネットワーク構造を知ることができる。

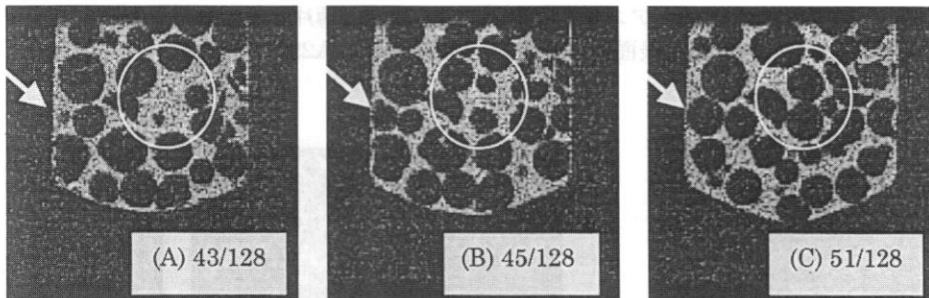


図 2 : 氷球の NMR による 3 次元イメージング。
A、B、C はそれぞれ 43、45、51 番目の断層。

図 3 は試料容器にしもざらめ雪の結晶を充填して、約 30 分で 3 次元の撮像を行った 1 例である。画素サイズは 1 画素 $200\mu\text{m}^3$ と図 2 の氷球と同じであるが、サンプリング時間が短いため SN 比は劣っている。しもざらめ雪は板状もしくはコップ状の結晶形であるため、 $200\mu\text{m}$ でスライスされた画像では黒い線状の影となって映っていることがわかる。なお、試料上部の黒い影は撮像時にドデカンが十分に融解しておらず信号が弱かったことによる。

図 4 は氷球を覆っているドデカンが時間とともに融けてゆき、その後氷球が融解する様子を撮像した例である。撮像は約 110 分で 1 画素 $400\mu\text{m}^3$ の 3 次元画像を 17 セットの時系列データとして取得した。図 4A、B、C はそれぞれ 3、6、15 番目のデータセットから同じ断層を取り出した画像である。A ではドデカンが融けておらず、全体的に黒く映っているが、B ではドデカンが融けたことにより、黒い氷球の画像がドデカンの中に鮮明に見て取れる。C では温度の上昇により外縁から氷球が融けだしている様子が見て取れる。また画像の所々

に明るい箇所が見られ、融解水からの信号であることがうかがえる。

このような融解過程の連続観測は従来のアニリン薄片法では不可能であったが、本実験の特徴である非破壊非接触の方法であれば測定可能である。同様にして結晶成長の連続観測を行うことも可能であり、雪の変態過程の研究推進に大きく貢献すると考えられる。

以上の結果より、現段階ではまだ画像の SN 比は充分ではないが、この可視化システムによって積雪の三次元画像を取得可能と考えられることから、さらに使用可能 T1 の短縮と、信号加算により SN 比の改善を行うべきとの結論を得た。

4. 今後の展望

本手法の最も特筆すべき特徴は、積雪構造の非接触 3 次元計測という点にある。アニリン法のような切断面という 2 次元平面でとらえた情報量は、本来の 3 次元構造が持っていた情報量に比べはるかに少なく、内部構造を完全には与えてくれないという本質的な困難がある。本研究に基づく測定手法が確立され、構造に関わる 3 次元情報が求められるようになると、形の定量化で用いられるトポロジー、スペクトル、グラフ理論、エントロピー、フラクタルなどの解析手法も適用が可能となる。つまり、定性的な「新雪」、「しまり雪」、「ざらめ雪」、「しもざらめ雪」などの雪質分類に初めて定量的指標が与えられるわけで、その学問的意義はきわめて大きい。さらに、温度や上載荷重などの外的因子によって変化する過程も可視化・定量化が可能となるわけで、積雪という 3 次元ネットワーク構造をもつ複雑系そのものに加え、力学的・熱的・電気的物性の理解が飛躍的に進展すると期待される。

参考文献

1. 木下誠一・若浜五郎, 1959. アニリン固定法による積雪の薄片. 低温科学, A18, 77-96.
2. 成田英器, 1971. 積雪の比表面積の測定 II. 低温科学, A29, 69-81.

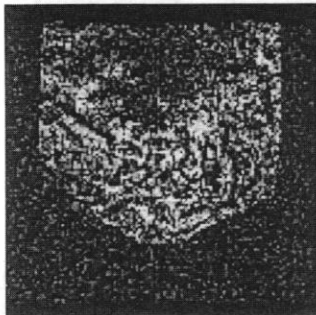
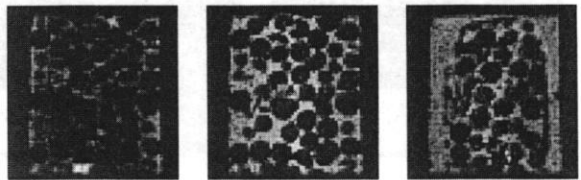


図3:しもざらめ雪のNMRイメージング画像.



(A) 3 / 17 (B) 6 / 17 (C) 15 / 17

図4:氷球サンプルの融解過程のNMRイメージング.
(A)ドデカン融解前, (B)ドデカン融解後, (C)氷球融解.