

氏名(本籍)	安達聖(北海道)		
学位の種類	博士(工学)		
学位記番号	博甲第5279号		
学位授与年月日	平成22年3月25日		
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当		
審査研究科	数理物質科学研究科		
学位論文題目	低温室用コンパクトMRIの開発と雪氷への応用		
主査	筑波大学教授	理学博士	巨瀬勝美
副査	筑波大学教授	工学博士	喜多英治
副査	筑波大学教授	理学博士	高田義久
副査	北海道教育大学准教授	博士(理学)	尾関俊浩

論文の内容の要旨

雪氷の三次元構造を理解することは、雪崩などの自然災害を予防する上で有用であり、また学問的にも大変興味深い。そこで、雪氷の三次元構造の観測には、1950年代より、その空隙にアニリンなどの有機溶媒を染みこませ、その凍った切断面を数10 μ mの間隔で連続的に観察し、その二次元断面から三次元構築を行う試みが行われてきた。ところが、この作業には多大な労力を要し、また三次元構築の精度に問題があった。さらに、アニリンは有毒であるという問題もあった。そこで、非破壊で三次元計測が可能なX線CTによる雪氷の三次元構造計測が試みられた。これに対し、筆者らのグループは、雪氷の三次元構造計測にMRIを初めて適用し、雪氷と融水の識別においては、MRIがX線CTを画像コントラストの点で遙かに凌駕することなどを指摘してきた。ところが、これまでの雪氷のMRI撮像は、常温の室内で行われていたため、この方法には、雪氷サンプルが温度変化により変質する可能性がある、長時間の安定した温度制御が困難などの問題点が存在していた。これに対し、小型永久磁石、勾配コイル、RFコイルなどによるMRI信号検出系を低温室内に設置して、低温室内で雪氷サンプルを長期間安定に撮像するアイデアが提起された。本研究は、このアイデアに基づき、MRIシステムを低温室に構築する際の諸問題を解決してシステムの評価を行い、さらに、このシステムを用いて、MRIの雪氷への応用を行うことを研究の目的とした。

基本となるMRIシステムは、静磁場強度1.0T、ギャップ間隔60mm、静磁場均一性15.3ppm(直径30mm球領域、磁石温度25 $^{\circ}$ C)の永久磁石磁気回路、6チャンネルシムコイル、勾配磁場プローブ、MRIコンソールから構成されている。そして、永久磁石を中心とした信号検出系は低温室(-5~+10 $^{\circ}$ C)、MRIコンソールを中心としたシステム制御系は、低温室に隣接する常温の部屋に設置し、それらを各種の信号線で接続した。

さて、本研究では、まず、線形領域が広く画像歪みが少ない勾配磁場を生成する3軸勾配磁場プローブを開発した。静磁場に沿った方向の勾配磁場コイルの設計には、遺伝的アルゴリズムを使用し、最適化を行った。いっぽう、静磁場に垂直な方向の勾配磁場コイルの設計には、ターゲットフィールド法を用いた。次に、この勾配磁場プローブを使用して、 T_1 の長いサンプルに対しても高いSNR(信号対雑音比)を実現する三次元強制回復スピネコー法(3D-DESE法)を実装した。次に、この撮像シーケンスと、空間座標が確定した三次元格子ファントムを用いて、静磁場分布を定量的に計測し、磁石温度の低下(10、5、0、-5 $^{\circ}$ C)

と共に、静磁場均一性がどのように変化するかを評価した。その結果、静磁場均一性は、17mm × 19mm × 17mm (x, y, z 方向) の直方体の領域において、-5℃において全幅で 120ppm、10℃において全幅で 70ppm となり、さらにその変化を 25℃に外挿することにより、工場で調整された均一度と同等の値が実現されていることを示し、静磁場不均一性が、温度と共に直線的に変化することを明らかにした。

また、個々の 2 次シムコイルの作る磁場分布を同様の手法により計測して、永久磁石の静磁場不均一性を補正するための最適電流の組み合わせを求め、これを用いて、-5℃において、シムコイルを使用することにより、静磁場不均一性を 3 倍程度改善できることを示した。そして、雪氷サンプルにおける信号観測に使用するドデカンの T_2 計測と、ドデカンを用いた 3D-DESE 撮像により、本システムにおいては、直径 30mm 程度の RF コイルを用いた場合、数時間の撮像時間によって、 $(80\mu\text{m})^3$ 程度の空間分解能が実現されることを示した。

次に、北海道の 4 カ所から、しまり雪、しもざらめ雪、かたしもざらめ雪、ざらめ雪の試料を採取し、本研究で開発した MRI システムを用い、 $(120\mu\text{m})^3$ の空間分解能で、ドデカンに浸した試料の三次元撮像を行った。その結果、さまざまな興味深い三次元構造が可視化され、本システムの有用性を実証することに成功した。

以上の結果から、永久磁石を用いることにより、氷点下の低温室内に、実用的な MRI を構築することが可能であり、また、このシステムは、雪氷研究などの氷点下における物質現象の解明や、生命現象の解明などにも有用であると結論した。

審 査 の 結 果 の 要 旨

本論文で得られた成果は、MRI の雪氷の三次元計測への応用を切り開くものであり、雪質の定量的分類や、雪氷の強度の評価に、極めて有用な指標である。また、雪氷中の融水の三次元的可視化は、他の手法では全く計測できない手法であり、今後大いに期待される研究分野である。

よって、著者は博士 (工学) の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。