

氏名(本籍)	増 ^{ます} 本 ^{もと} 秀 ^{ひで} 史 ^{ふみ} (広島県)		
学位の種類	博士(工学)		
学位記番号	博甲第5281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	固体MRIにおけるスライス選択法の研究		
主査	筑波大学教授	工学博士	村上浩一
副査	筑波大学教授	理学博士	秋本克洋
副査	筑波大学教授	博士(工学)	佐々木正洋
副査	筑波大学講師	理学博士	松井茂

論文の内容の要旨

本論文では第1章でMRI (Magnetic Resonance Imaging: 核磁気共鳴映像法) における基本事項が述べられている。MRIで信号を得るために利用しているNMR (Nuclear Magnetic Resonance: 核磁気共鳴) 現象の量子力学的な導入と古典的な取り扱いを述べ、どこでNMR現象が起きているのかを知る方法について説明している。その後、NMR信号の減衰を引き起こす緩和現象について述べ、最後に計算機シミュレーションを用いてMRIで得られる画像を算出する方法を紹介している。第2章では第1章で説明したMRIの基本事項に基づいてMRIにおけるスライス選択法概念と液体MRIで標準的に用いられている手法について述べている。第3章では固体MRIを実現するために著者らが用いたMagic Echo line narrowingについて紹介し、その特徴と、どのようにしてline narrowingを達成するのかについて述べている。第4章では著者らが提案し、固体MRIで初めてスライス形状を任意に調整できることを示した固体MRI用スライス選択法Magic Echo DANTEについて述べ、Simulation結果や実験結果による有用性の検証を行っている。第5章では提案した手法を信号減衰の速い固体に適用する場合の問題点を挙げ、これを解消するために改良を施した手法についても説明している。最後に実験による裏づけにより、改良法の有用性を示している。第6章が総括となっている。

MRIはNMR現象を利用して物体を非接触、非破壊的に画像化する手法であり、主に医療用として広く利用されている。そのほぼ全ては撮像対象を液体とする技術であり、固体成分の画像化は行われていない。人体のほとんどを占めている水は、MRIによる画像化には適している。しかし、例えばアキレス腱や肝硬変そのものといった体内の固体状組織のMRIによる画像化も望まれている。

MRIではNMR信号を空間的に分解することによって物体の画像を得ている。すなわち、NMR信号を勾配磁場と呼ばれる外部磁場により変調し、NMR信号の空間位置を探るものである。NMR信号の起源となる核スピンの存在しない領域からは信号は得られず、核スピンの存在する場所からのみ信号が得られ、得られた信号をマッピングすることで画像としている。勾配磁場による変調を行って信号を得て画像化するには、必要なデータを揃えてFourier変換を行わなければならない。信号変調の原理的な要請から3次元の物体をMRIで画像化するにはFourier変換に必要なデータを揃えるのに膨大な時間がかかる。

スライス選択法は3次元の物体の全体からNMR信号を得るのではなく、物体中のスライス状の領域から

のみ選択的に NMR 信号を得ることで 1 次元分のデータ収集時間を削減し、MRI による計測時間を著しく減少させることを可能にする手法である。そのため MRI における 3 次元の物体の画像化の際には必須の技術となっている。液体を撮像対象とする既存の MRI 技術では、スライス選択法は確立された技術として利用されているが、固体 MRI の領域では技術的な困難から一般的に用いられているスライス選択法は存在しない。

固体 MRI の技術的困難とは、固体における NMR 信号の減衰が著しく速いことである。液体における NMR 信号はミリ秒のオーダーで減衰し、データ収集に差し支えないのに対し、固体における NMR 信号はマイクロ秒オーダーで減衰し、励起後すぐにノイズレベルに消えてしまう。このため固体では画像化に必要なデータを得ることが困難となり、現況では固体 MRI は実用化に至っていない。固体での NMR 信号の減衰が液体でのそれに比べて 1000 倍も速いのは、液体中で起きている motional narrowing と呼ばれる現象が固体では起こっていないためである。

固体 MRI を実現するためには、核スピン間の双極子相互作用の信号に与える影響を人工的に消失させる必要がある。これを line narrowing と呼ぶ。固体 MRI における line narrowing の手法として、松井研究室で開発され、最も評価の高い手法が Magic Echo 系列を用いた line narrowing 法である。固体中で NMR 信号は核スピン間の双極子相互作用の影響で、マイクロ秒オーダーで急激に減衰する。その後 Magic Sandwich と呼ばれる特殊な外部磁場の組み合わせを照射すると、照射後の数十マイクロ秒で減衰した NMR 信号が 1 度だけ回復し、また減衰する Magic Echo と呼ばれる信号が現れる。Magic Sandwich を繰り返し印加すると Magic Echo を繰り返し発生させることができ、信号を繰り返し取得することが可能である。一つ一つの Magic Echo はマイクロ秒オーダーの減衰を続けるが、Magic Echo 系列全体としてはミリ秒で減衰する信号となる。著者らはこの Magic Echo を用いて固体 MRI 用のスライス選択法を開発した。

固体 MRI 用のスライス選択法としてこれまでいくつかの手法が提案されているが、各々固有の問題がある。勾配磁場の下でスピロックキングを行う方法は選択性があまり良くない。多重パルス line narrowing と DANTE を一般化して結び付けた方法は技術的な困難が伴う。Off-resonance spin tipping は横磁化ではなく縦磁化の形でスライスが選択される。そしてどれ一つとして液体 MRI で一般的に用いられているスライス選択法では可能な、スライス形状を理想形である矩形に近づけることができない。これらの問題により、固体 MRI 用に提案されているスライス選択法は広く利用されていない。そこで著者らはスライス形状を実験者の意図通りに調整することが可能な固体 MRI 用スライス選択法を提案し、更に有用性を高める改良を行った。

審 査 の 結 果 の 要 旨

本研究は、現在主として医療の分野で活躍している MRI が液体成分しか撮像できないことに着目して、固体成分も撮像可能な MRI の開発を目指したものである。開発すべき重要な要素技術としてスライス選択法を取り上げ、Magic Echo line narrowing 法と DANTE と呼ばれる選択励起法を巧妙に組み合わせることにより、その開発を行った。computer simulation と 2 種類のテストサンプルを用いた実験により、開発したスライス選択法の有用性を確認している。著者らの開発したスライス選択法は、固体 MRI においては初めてスライス形状を任意に変えることを可能としたものであり、その持つ意義は極めて大きい。

更に、著者らは、開発したスライス選択法を緩和時間の短い固体成分に適用した場合に障害となる測定感度低下の問題を解決するため、改良型 Magic Echo DANTE スライス選択法の開発も行い、その適用範囲の拡大を図っている。著者らの開発したスライス選択法は、今後、固体 MRI において標準的な方法として用いられるものと期待される。

論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、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。