SQUIDを用いた超低磁場MRIに関する研究

研究の概要

1～3Tの高磁場を用いた従来のMRIには、医療応用に加えて、食品異物検査への適用可能性（下図参照）がある。しかしながら、従来のMRIは高価で、高消費電力、広いスペースが必要なため、大幅な低コスト化、省エネ化、コンパクト化が必要であった。

そこで、本プロジェクトでは、超高感度で、かつ低消費電力で動作する超伝導磁気センサSQUIDを用いた超低磁場MRI技術を開発し、食品異物検査への適用を提案する。SQUID磁気センサの周波数を選ばない高感度特性から、従来より6桁小さい地磁気レベルの超低磁場でのMRI撮影が原理的に可能となる。

平成24年度までの研究では、液体窒素（約－200℃）で動作するSQUID磁気センサを用いた超低磁場MRIシステムを試作し、本技術の実現可能性研究に取り組んだ。

解説：異物（ゴム、ガラス、プラスチックのボールと針）の入ったコンニャクのMRI画像（従来MRI装置使用）。下は豆腐のMRI（黒い部分は豆腐の中の水分）

1. 研究背景・目的

核磁気共鳴（NMR）
・・・磁場中における核スピンの共鳴現象を利用した分子構造解析法

磁気共鳴画像法（MRI）
・・・NMRを応用して体内の^{1}Hを検出し、輪切り画像化する手法

＜従来のMRI＞

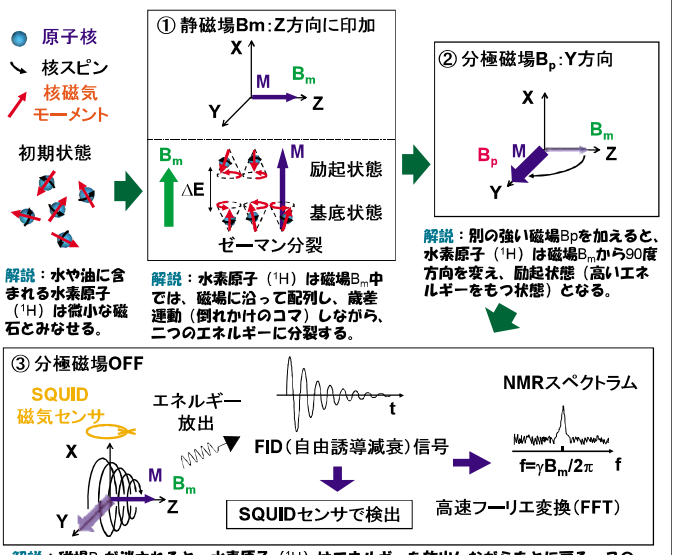
⇩ 解決策

＜超低磁場MRI＞

- 低コスト、低消費、小型化が可能
- 異物の種類に対してコントラストが得られる
- 新たな知見が得られる可能性が有る

そこで本研究では、周波数に依存せず高感度な超伝導磁気センサSQUIDを用いた超低磁場MRI技術の開発を目的とした。

2. NMRの原理



解説：水や油に含まれる水素原子（^{1}H）は微小な磁石とみなせる。

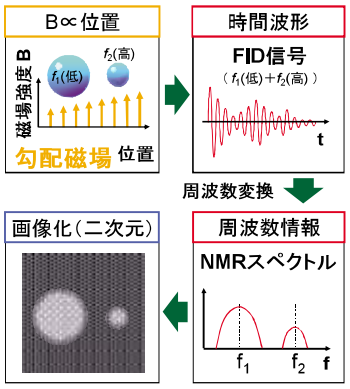
解説：水素原子（^{1}H）は磁場B_m中では、磁場に沿って配列し、歳差運動（倒れかけのコマ）しながら、二つのエネルギーに分裂する。

解説：別の強い磁場Bpを加えると、水素原子（^{1}H）は磁場B_mから90度方向を変え、励起状態（高いエネルギーをもつ状態）となる。

解説：磁場B_pが消されると、水素原子（^{1}H）はエネルギーを放出しながらもとに戻る。このとき放出されるエネルギーをSQUID磁気センサで計測、信号処理を行い、NMR信号を得る。

3. MRIの原理

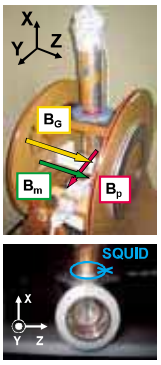
信号周波数：磁場の強度に比例（$f=\gamma B$）



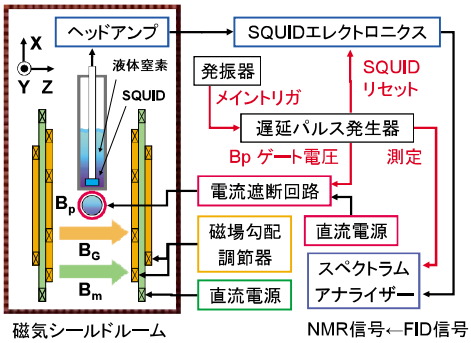
解説：磁場に強弱を与えると、歳差運動の回転速度が異なり、位置情報が加わる → 画像化

4. 低磁場SQUID-MRIシステム

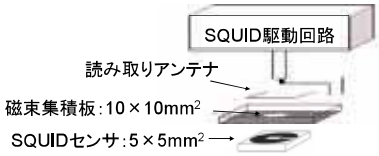
装置外観



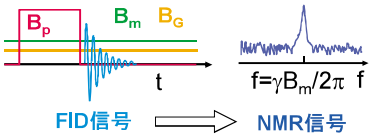
装置概略図



rf-SQUID磁気センサ



パルスシーケンス



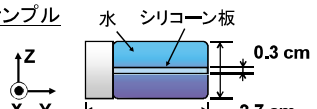
解説：液体窒素（約－200℃）で動作するSQUID磁気センサを用いた、超低磁場MRI撮影用の異物検査装置を磁気シールドルーム（外部磁気雑音を遮蔽）内に試作した。

解説：上記の原理を実現する、パルスシーケンス（磁場パルスのオン・オフを順次制御）を開発した。

5. 実験パラメータ

静磁場 B_m	45 μT
分極磁場 B_p	32 mT
B_p印加時間	5000ms
勾配磁場 $B_G(X)$	0 nT/cm
勾配磁場 $B_G(Y)$	0 nT/cm
勾配磁場 $B_G(Z)$	8～11 nT/cm
サンプル	水道水20mℓ

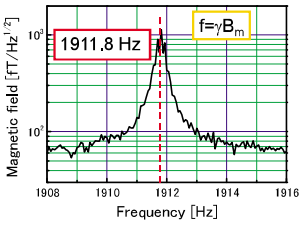
サンプル



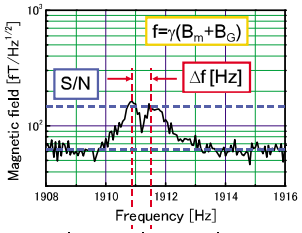
解説：試験サンプルは水（^{1}Hを多く含む）とし、Hを含まないシリコーンを異物を模擬して使用

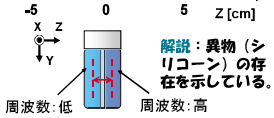
6.1 平成24年度までの研究成果：勾配磁場印加時のNMR信号計測結果

勾配磁場 $B_G(Z)$：0 nT/cm



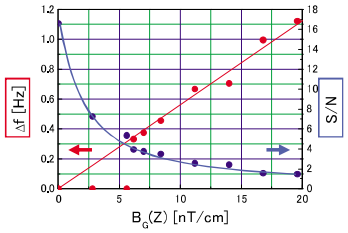
勾配磁場 $B_G(Z)$：11.2 nT/cm





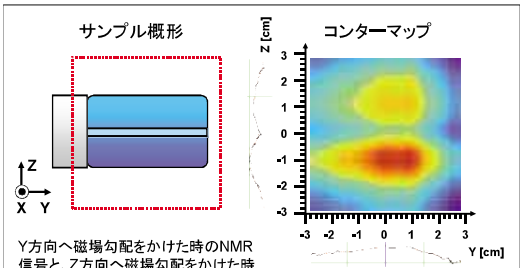
解説：異物（シリコーン）の存在を示している。

勾配磁場とピーク間周波数（Δf）及び信号雑音比（S/N）の関係



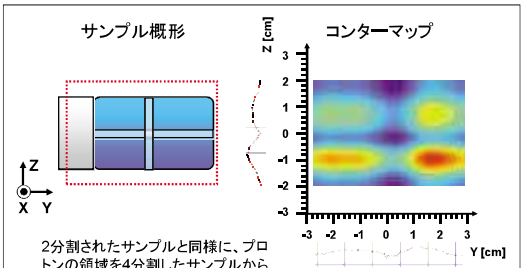
- 勾配磁場を印加しない場合、静磁場及びプロトンの核磁気回転比に対応する周波数を持つNMR信号が1912Hzに得られた。
- 勾配磁場を印加した場合、試験サンプルのそれぞれの水の回転速度が異なり、水の中心距離に対応する2つのピークを持つNMR信号が得られた。
- 二つのピークの周波数の差Δfは勾配磁場強度に比例したが、勾配強度が6.16 nT/cm以下ではピークが分裂しなかった。
- 信号雑音比（S/N）は勾配磁場が強くなると減少した。
- 以上より、高い分解能とS/Nを得るには、信号の強度を高める必要がある。

6.2 平成24年度までの研究成果：準二次元MRI画像の撮影



Y方向へ磁場勾配をかけた時のNMR信号と、Z方向へ磁場勾配をかけた時のNMR信号を掛け合わせることで、準二次元MRI信号が得られた。

解説：試験サンプル中央の異物（シリコーン）が現れている。



2分割されたサンプルと同様に、プロトンの領域を4分割したサンプルからも、分割した領域と位置に対応する画像が得られた。

解説：試験サンプル中央の二つの異物（シリコーン）が現れている。

7. 平成24年度以降の取組

- 強力な永久磁石を用いて、MRI画像の分解能（S/N）を高める。
- MRI画像撮影の自動化
- コンペア対応のパルスシーケンスの検討
- 検出・判別可能な異物の調査、最適シーケンスの検討（従来MRI装置を使用）

8. 外部発表

[1] D. Zhang, S. Fukumoto, S. Tsunaki, Y. Hatsukade, and S. Tanaka, "Improvement of Signal to Noise Ratio of HTS-rf-SQUID for Ultra-Low Field NMR/MRI by 77K LC Resonant Circuit", 24th International Symposium on Superconductivity (ISS2011), Program & Abstracts, p.269, 26 Oct., 2011, Tokyo, Japan.

豊橋技術科学大学　田中三郎、廿日出好