

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 31 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2010 ～ 2012

課題番号：22760299

研究課題名（和文）

高感度地磁気 NMR・MRI の開発

研究課題名（英文）

Development of high-sensitivity Earth's field NMR・MRI system

研究代表者

赤羽 英夫 (AKABA HIDEO)

大阪大学・基礎工学研究科・准教授

研究者番号：00552077

研究成果の概要（和文）：

自然界に存在する地磁気を用いた高感度な地磁気核磁気共鳴 (NMR) 装置、またはイメージング (MRI) 装置の開発を行った。地磁気 MRI の開発では、MRI の取得方法であるグラジエントエコー法を地磁気 NMR に応用し、2次元、3次元での画像化に成功した。また、NMR 励起パルスに起因する NMR 受信システムの不感時間を、NMR 共振器の Q 特性を電子的に変更することにより、短縮することが可能となった。その結果、緩和時間が短い (<100ms) 生体サンプルの地磁気 MRI 画像を世界で初めて計測することに成功した。

研究成果の概要（英文）：

A low field NMR and MRI instrument using the Earth's magnetic field was developed. The sensitivity of NMR was enhanced with pre-polarization method and shortening the dead time of a receiver circuit to 10 ms with changing the Q factor of a resonator electronically. These developments made the Earth's field magnetic resonance imaging of biological samples possible especially for samples with short NMR relaxation time less than 100 ms.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2011 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012 年度	600,000	180,000	780,000
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：地磁気、核磁気共鳴、MRI、イメージング

1. 研究開始当初の背景

地磁気 (~40uT) は地球上のどこにでも存在し、また磁場均質性 (~1nT/m) は非常に高いことから NMR 誕生当初から地磁気を用いた NMR 技術の開発が行われてきた。地磁気ほどの低磁場では NMR 物性の一つである化学シフトは見えなくなり、外部磁場に依存しないスピン-スピ

ン結合のみが現れるという特徴がある。その分解能は少なくとも高磁場 NMR より 10 倍は良いと報告されており、分子の構造解析に使われている。

また、生体イメージングに用いられる水素原子核の緩和時間は分子運動によって大きく異なるが、低磁場ではよりそ

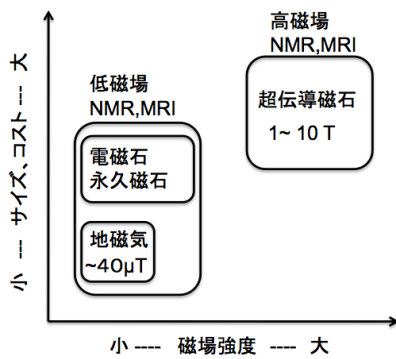


図1 地磁気 NMR の位置づけ

の変化が強調されるため高磁場 MRI よりもコントラストの良い画像が取得できる。しかし NMR の検出感度は印加磁場に比例して大きくなるため、最近まで超伝導磁石 (1~10 T) を用いた高磁場 NMR の開発の影に隠れ低磁場 NMR の開発は注目されていなかった。近年高磁場 NMR 装置開発の研究が飽和するなか、徐々に低磁場 NMR の研究が盛んになってきている。その理由は、磁化の分極を高める pre-polarization 法や dynamic nuclear polarization 法の開発、また磁化の検出感度を高める超伝導干渉素子の開発などにより低磁場での NMR の検出感度が近年飛躍的に伸びていることにある。

人工的な均質磁場を必要とする従来の NMR, MRI は導入コストが非常に高額であり場所をとるため、科学、医療、工業などの様々な分野における研究室レベルでの導入は非常に難しい。この問題点を克服するためにも、高感度な地磁気 NMR, MRI 装置の開発は装置の小型化や屋外での計測を可能にし、さらに広範囲における多種多様なサンプルの NMR 物性を計測できることから本研究の社会的重要性は非常に大きいといえる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、自然界に存在する地磁気を用いた高感度な地磁気核磁気共鳴(NMR)装置、またはイメージング(MRI)装置を開発することである。その対象は人体などの生体試料、水溶液、食品等

に含まれる水素原子核である。今回低磁場である地磁気NMRを活用するメリットとしては、装置を小型化し、低価格で作れることにあり、様々な分野での応用が期待される。本研究では、新しい技術を開発することにより、現段階では実現していない人体の部位(例えば、腕や間接など)における感度を有する地磁気NMR・MRI装置の開発を目指した。

3. 研究の方法

本研究課題は2つのサブプロジェクトから構成されている。

(1) 地磁気 NMR の検出感度向上

地磁気による原子核スピンの磁化は非常に微小であるため、磁化の検出の前に比較的大きな外部磁場を用いて磁化偏極を行った。このマグネットは NMR の検出には用いないため磁場の均質性が必要なく簡単なソレノイドコイルで十分である。そのため、磁場補正コイル (shim coil) を必要とせずコンパクトな設計が可能であった。ソレノイドコイルに DC パルス電流 (<15 A) を印加しサンプルに 50mT の静磁場を照射した。印加時間は原子核スピンの NMR 緩和時間に依存し、およそ 0.1~6 秒とした。磁場照射終了直後に磁化読み取りの為に RF パルスを送受信用ラジオ波 (RF) コイルに印加し磁化の位相を揃えた。地磁気下の NMR 周波数 (~1.5 kHz) において位相が揃った磁化 (NMR 信号) を送受信用 RF コイルで検出し小信号増幅アンプで増幅した。NMR 信号の読み取りには磁場が均質な地磁気を使った。

(2) 地磁気 MRI 装置の作製

MRI では、磁場勾配を用いるため

NMR 信号の減衰は一段と早まる。地磁気 NMR では共鳴周波数が $\sim 1.5\text{kHz}$ と小さいため、共振器に入力した RF パルスの減衰時間（リングング時間）は長く 30msec 程度であった。そのため、NMR 信号が生成してから最初の 30msec は、RF パルスの減衰信号が支配的となり NMR 信号を計測できていない。そこで、共振器の特性を変化させリングング時間を短縮する技術を地磁気での NMR 周波数 $\sim 1.5\text{kHz}$ 領域において開発した。また同時に、イメージング・シーケンスを可能にするソフトウェアの開発も行った。

4. 研究成果

(1) 地磁気 NMR の検出感度向上

地磁気NMR装置の主な構成は、RF送受信用ソレノイドコイル (635 mH, 280 Ω)、pre-polarization 用ソレノイトコイル (54 mH, 1.78 Ω , 4.9 mT/A)、pre-polarization 用コイル駆動制御回路、RF共振回路、小信号増幅回路($\sim 80\text{ dB}$)からなり、それぞれ自作で開発したものである。試料空間はおよそ直径76 mm x 長さ140 mmとなっている。装置制御信号出力、FID信号取り込みには、AD/DAボード (NI DAQCard-6024E)を用いた。図2に全体の構成図を示す。制御ソフトは、National Instrument社製の LabVIEWを用いて開発した。

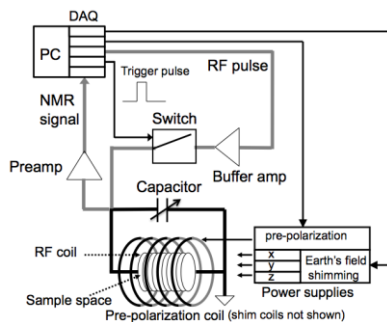


図2 地磁気 NMR 装置の構成

水溶液の検出限界を評価するため、500 ml 容器と 100 ml 容器に水 10 \sim 500 ml を入れ水素原子核の FID 信号を測定した。積算無しの場合の測定限界は 0.5 ml であった。図3には水 100ml からの FID 信号の結果を示す。NMR 信号は直接 AD ボードで取り込むため、信号の周

期は地磁気でのラーモア周波数となっている。室温では水の T_2 は 2.4s であったが、FID 信号の減衰から求めた $T_2^* \sim 0.10\text{s}$ と短縮されていた。これは、磁場の不均質性による効果が FID 信号の減衰に支配的であったためと考えられる。そこで、線幅 4.9Hz より磁場の不均質性を評価すると、試料領域(直径74x 長さ140 mm)において 170 nT 程度であった。

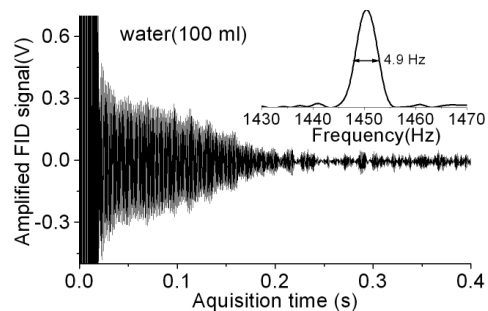


図3 水 100ml からの NMR 信号(積算無)

(2) 地磁気 MRI 装置の作製

3D 勾配エコー法を用いた地磁気 MRI を可能にするため、より均質性の高い磁場が必要となったため、グラジエント用のコイルを設計し、そのコイルを用いて磁場均質性の向上を行った。その結果、およそ 2Hz 程度まで NMR 信号の線幅を短縮することが可能となった。また、NMR 信号取得開始時間を早めるため、トランジスタを用いた Q スイッチ回路を開発した[図4参照]。

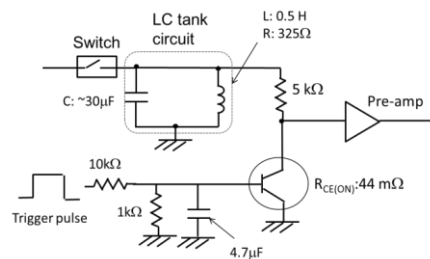


図4 トランジスタを用いた Q スイッチ回路

この回路ではパルス生成時にトラン

ジスタを ON にすることで LC 共振回路に並列に R を付加することにより Q 値を低い値 (~1.04) にすると同時にプリアンプの入力を GND に落とすことでプリアンプの飽和現象を防いだ。NMR 信号の受信はトランジスタを OFF にすることで LC 共振回路の Q 値を高い値 (~15.6) に制御し行った。その結果、データ取得開始時間をパルス生成から約 10 ms まで短縮できた。

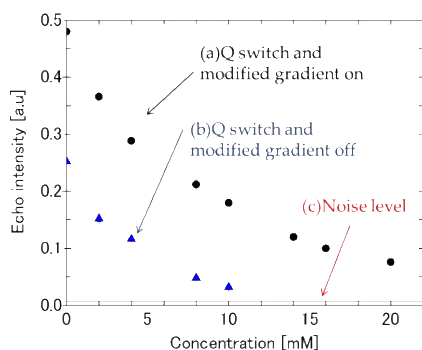


図 5 Q スイッチによる信号強度の向上
(a) Q スイッチあり、(b) Q スイッチなし

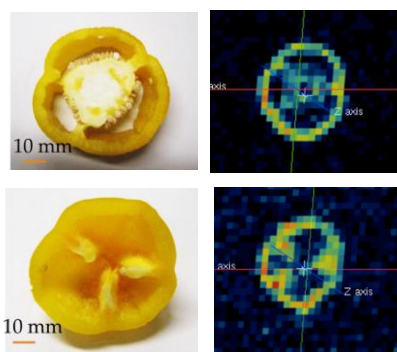


図 6 パプリカの 3DMRI 画像: スライス画像を表示

各濃度調整を行った CuSO_4 水溶液について、Q スイッチを ON にし、勾配磁場反転を滑らかに行い不感時間 10 ms で取得した場合と、Q スイッチを OFF にし、通常の勾配磁場反転を行い、不感時間 30 ms で取得した場合の勾配エコー信号強度のプロットを図 5 に示す。その結果、信号強度を 3 倍程度向上することが出来た。図 6 にパプリカを用いて 3DMRI 画像を取得した例を示す。実の部分に含まれる水分から NMR 信

号が観測され、空洞の部分からは NMR 信号が観測できていないことが分かる。断面画像表示において、実の部分の形状がはっきりと画像化出来た。また、緩和時間が短い (<100ms) 生体試料に関しても、画像化することが可能であった。このことより、生体サンプルからの地磁気 MRI を取得できる高感度な NMR 技術の開発を行い、当初目標を達成することが出来た。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① H. Sato-Akaba H. Itozaki, Development of the Earth's Field NMR Spectrometer for Liquid Screening, Applied Magnetic Resonance, 査読有, vol. 43, (2012), 579-589.
- ② 赤羽英夫 糸崎秀夫, 核スピンを利用したセキュリティ技術、生産と技術、査読無、64 巻、(2012)、30-35.
- ③ 赤羽英夫 糸崎秀夫, 地磁気 NMR を用いたボトル内の液体物の検査、ケミカルエンジニアリング、査読無、56 巻、(2011)、644-647.

[学会発表] (計 4 件)

- ① 山根 知明 赤羽英夫 糸崎秀夫, 地磁気 MRI における総受信回路の不感時間低減による高感度化、第 51 回 NMR 討論会、2012. 11. 8、名古屋
- ② 赤羽英夫 糸崎秀夫, Earth field's NMR for liquid screening, Magnetic Resonance Detection of Explosive and Illicit Substances, 2011.9.20, Istanbul, Turkey.
- ③ 赤羽英夫, 磁気共鳴法のセキュリティ技術への応用、第 15 回 ESR フォーラム、2011.6.17、大学コンソーシアム大阪
- ④ 渡邊翔大 赤羽英夫 糸崎秀夫, Screening bottled liquids using Earth's Field NMR, 第 49 回 NMR 討論会、2010. 11. 15、東京

6. 研究組織

(1) 研究代表者

赤羽 英夫 (Akaba Hideo)

大阪大学・大学院基礎工学研究科・
准教授

研究者番号：00552077