

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 2 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360034

研究課題名(和文)バルク高温超伝導磁石を用いたマウス用MRIの開発

研究課題名(英文)Development of a mouse MRI using a superconducting bulk magnet

研究代表者

巨瀬 勝美 (KOSE, Katsumi)

筑波大学・数理物質系・教授

研究者番号：60186690

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,800,000円

研究成果の概要(和文)：超伝導転移温度が93 KのEuBaCuO系のリング状バルク超伝導磁石を6個積層し、高均一NMR用超伝導磁石を用いて着磁することにより、バルク磁石内に、MR microscopyに適した均一な静磁場空間(直径8.4mm、長さ10mmの円柱状の領域において15.4ppm)を生成することに成功した。この静磁場を使用して、化学固体マウス胎児を50ミクロン立方の分解能撮像することにより、本装置の有用性を確認した。

研究成果の概要(英文)：We developed a magnetic resonance (MR) microscope using a high critical-temperature superconducting bulk magnet. The bulk magnet comprises six annular bulk superconductors (two end bulk magnets : 60 mm OD, 28 mm ID, and 23 mm height, four inner bulk magnets : 60 mm OD, 36 mm ID, and 18.5 mm height) made of c-axis oriented single-domain EuBa₂Cu₃O_y crystals. The magnet was energized using a superconducting NMR magnet for high-resolution NMR spectroscopy operating at 4.7 T. The trapped magnetic field was homogenized using a single-layer shim-coil developed in our group. The inhomogeneity of the trapped magnetic field measured with MR imaging was 15.4 ppm (peak-to-peak) in the 8.4 mm diameter and 10 mm long cylindrical region. Three-dimensional MR images of a chemically-fixed mouse fetus acquired with 50 micrometer cube voxels demonstrated the usefulness of our system.

研究分野：物理計測

キーワード：MRI 高温超伝導

1. 研究開始当初の背景

近年、有限の資源である液体ヘリウムの枯渇が懸念されているため、液体ヘリウムを使用しないNMR分光計やMRI装置のための磁石開発が加速している。すなわち、小型NMR分光計のためのNdFeB系の材料を用いた永久磁石や、MgB₂、Bi系、YBCO系の高温超伝導線を用いたMRI用磁石である。ところが、前者は、静磁場強度と静磁場安定性に問題があり、後者は、静磁場の安定性とコストに問題があった。

2. 研究の目的

これに対し、我々は、EuBaCuO系のバルク超伝導磁石を用いて上記の問題を解決し、マウスの撮像が可能なMR microscopeを開発することを、研究の目的とした。

3. 研究の方法

図1に示すように、外径60mm、内径28mm、高さ23mmのバルク磁石を両端に置き、その間に、外径60mm、内径36mm、高さ18.5mmのバルク磁石を4個積層することにより、磁石を構成した。これらは、すべて、c軸配向のEuBa₂Cu₃O_y単結晶(超伝導転移温度93K)である。



図1. 磁石を構成する超伝導バルク磁石材料

このバルク磁石を、図2に示すように、パルスチューブ冷凍機によって冷却するクライオスタット(室温ポア径23mm)内に設置し、着磁のためのNMR分光計用超伝導磁石(室温ポア径89mm、最高静磁場強度7T)の室温ポア内中央に挿入した。

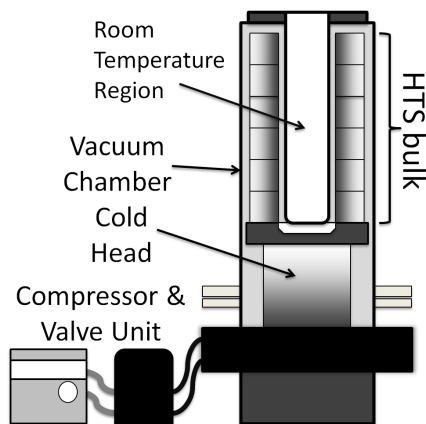


図2 クライオスタットの構造

バルク磁石の着磁方法は、以下の通りである。(1)バルク磁石に外部超伝導磁石により4.74Tの静磁場を印加して100Kまで冷却し、外部超伝導磁石の超伝導シムコイルを用いて静磁場の均一化を行う、(2)バルク磁石を50Kまで冷却する、(3)外部超伝導磁石の静磁場をゆっくりと減少させ、ゼロとする、(4)バルク磁石を外部超伝導磁石のポアからゆっくりと取り出す。そして、この過程において、水ファントムと三次元スピンエコー法による位相法を用いて、バルク磁石内の静磁場分布、共鳴周波数、勾配磁場電流効率などを計測した。

このようにして、狭い空間(室温開口径23mm)に生成された静磁場を均一化するため、シングルレイヤーシムコイル(SLSC)を開発した。SLSCは、まず複数の円形コイルの重ね合わせにより発生する磁場を表現し、それが不均一磁場を最適近似できるように、それぞれに流れる電流値を決め、これらの電流から全電流分布を求め、それからストリームラインを求めることにより、電流パターンを決定することにより作成した。なお、実際に流す電流は、その逆向きの電流となる。静磁場を均一化した後、本システムの有用性を評価するために、化学固定マウス胎児の撮像を行った。

4. 研究成果

図3に、本静磁場着磁法によってバルク磁石内の中心の領域(直径8.4mm、長さ10mmの円柱状の領域)に生成された静磁場分布を示す。このときの静磁場不均一性は、63.2ppm(peak-to-peak、以下同様)であった。それに対し、SLSCを適用して静磁場分布を計測したところ、静磁場不均一性は、15.4ppmと4倍程度減少し、静磁場均一性は大幅に改善された。

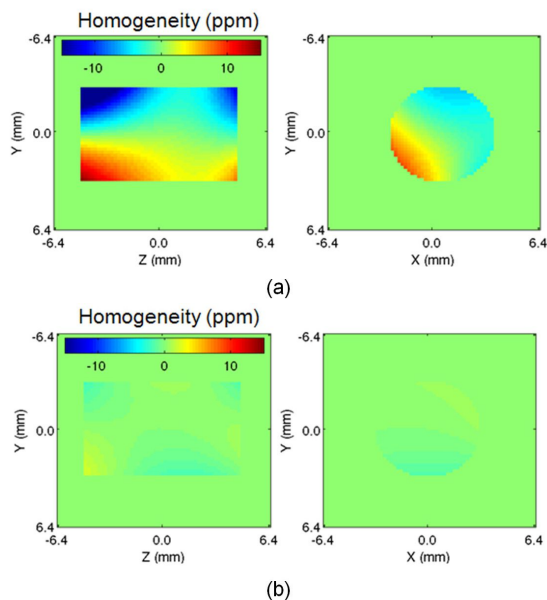


図3 バルク超伝導磁石内の静磁場分布(上はSLSCの電流ゼロ、下は最適電流の時)

図4に、化学固定マウス胎児 (Jcl:ICR mouse, 14 days post conception) の三次元画像 (撮像条件: TR = 200 ms, TE = 20 ms, image matrix = 256×128×96, voxel size = (50 μm)³, number of excitations = 8, 全計測時間 5.5 h) から選んだ正中断面, 頭部断面, 肝臓断面を示す. このように, 先行研究にくらべて, 信号の消失や画素強度の不均一性が少なく, SNR も高い画像が得られ, 本研究で開発したシステムを有用性が示されたと結論した.

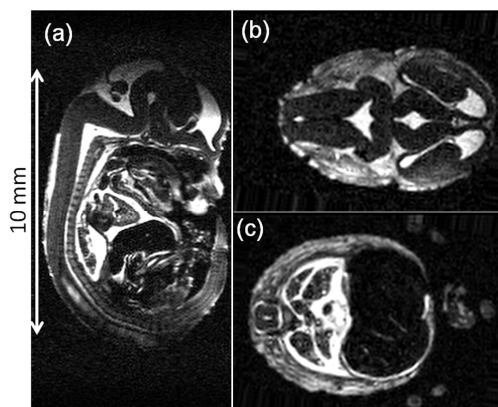


図4 化学固定マウス胎児の正中断面像(左) 頭部断面(右上), 肝臓断面(右下)

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4件)

D. Tamada, K. Kose

Two-dimensional Compressed Sensing using the Cross-sampling Approach for Low-field MRI Systems

IEEE Transactions on Medical Imaging, 査読有 33,1905-1912 (2014)

S. Hashimoto, K. Kose, T. Haishi

Comparison of Analog and Digital Transceiver Systems for MR Imaging

Magn Reson Med Sci, 査読有 13, 285-291 (2014)

D. Tamada, T. Nakamura, Y. Itoh, K. Kose

Experimental evaluation of the magnetization process in a high T_c bulk superconducting magnet using magnetic resonance imaging.

Physica C, 査読有 492, 174-177 (2013)

D. Tamada, K. Kose, T. Haishi

A New Planar Single-Channel Shim Coil Using Multiple Circular Currents for Magnetic Resonance Imaging

Applied Physics Express, 査読有 Vol.5, No.5, 056701 (2012)

〔学会発表〕(計18件)

玉田大輝, 巨瀬勝美, 柳陽介, 伊藤佳孝, 仲村高志

高温超伝導バルク磁石と高次シムコイルを用いた高分解能 NMR/MRI の実現

平成 26 年 11 月 4 日, 第 53 回 NMR 討論会, 大阪大学コンベンションセンター, 大阪, L1-4

玉田大輝, 巨瀬勝美

「k-space power distribution を用いた Compressed Sensing サンプリグ最適化手法の検討」

平成 26 年 9 月 19 日, 第 42 回日本磁気共鳴医学会大会, ホテルグランヴィア京都, 京都, 371

玉田大輝, 巨瀬勝美

「高次の静磁場不均一性を考慮した Self-Calibrated Compressed Sensing アルゴリズムの開発」

平成 26 年 9 月 19 日, 第 42 回日本磁気共鳴医学会大会, ホテルグランヴィア京都, 京都, 261

玉田大輝, 仲村高志, 巨瀬勝美

「高温超伝導バルク磁石におけるマイスナー効果を考慮した勾配磁場コイルの開発」

平成 26 年 8 月 12 日, 第 18 回 NMR マイクロイメージング研究会, 金沢勤労者プラザ, 金沢, 57-60

巨瀬勝美, 拝師智之

「9.4T/54mm ボア縦型超伝導磁石を用いた MR microscope の構築」

平成 26 年 8 月 12 日, 第 18 回 NMR マイクロイメージング研究会, 金沢勤労者プラザ, 金沢, 53-56

S. Hashimoto, K. Kose, T. Haishi

Comparison of Analog and Digital Transceiver Systems for Magnetic Resonance Imaging.

12 May, 2014, 22th Annual Meeting & Exhibition (ISMRM), Milano, ITALY. p1285

玉田大輝, 巨瀬勝美, 柳陽介, 伊藤佳孝, 仲村高志

「高温超伝導バルク磁石を用いた高分解能 MRI High-Resolution Magnetic Resonance Imaging Using a High T_c Bulk Superconducting Magnet」

平成 25 年 11 月 12 日, 第 52 回 NMR 討論会. 石川県立音楽堂, 金沢, 62

玉田大輝, 巨瀬勝美

「Compressed Sensing アルゴリズムを用いた三次元 MR Microscopy」

平成 25 年 9 月 20 日, 第 41 回日本磁気共鳴医学会大会, アステイ徳島, 徳島

玉田大輝、巨瀬勝美
「Cross Sampling を用いた静磁場不均一下における圧縮センシングアルゴリズムの開発」
平成 25 年 9 月 20 日，第 41 回日本磁気共鳴医学学会大会，アステイ徳島，徳島

D. Tamada, T. Nakamura, K. Kose
MR microscopy using a high Tc superconducting bulk magnet.
25-29 August, 2013, 12th International Conference on Magnetic Resonance Microscopy, Fitzwilliam College, Cambridge, UK. p85

玉田大輝，巨瀬勝美，柳陽介，伊藤佳孝，仲村高志
「新規設計による高温超伝導バルク磁石を用いた MRI の開発」
平成 25 年 8 月 2 日，第 17 回 NMR マイクロイメージング研究会，キャンパスイノベーションセンター，田町，9-12

M. Horiga, K. Ishizawa, K. Kose
Development of Gradient Coil Probes for Vertical Wide Bore Superconducting Magnets with Solenoid RF Coils and Optimized Planar Gradient Coils
20-26 April, 2013, 21th Annual Meeting & Exhibition (ISMRM), Salt lake city, USA. p2712

D. Tamada, T. Nakamura, K. Kose
Measurements of the Magnetic Field Distribution in the High Tc Superconducting Bulk Magnet During the Magnetization Process
20-26 April, 2013, 21th Annual Meeting & Exhibition (ISMRM), Salt lake city, USA. p2771

D. Tamada, T. Nakamura, K. Kose
MR Microimaging Using a High Tc Superconducting Bulk Magnet with Compressed Sensing
20-26 April, 2013, 21th Annual Meeting & Exhibition (ISMRM), Salt lake city, USA. p0136

巨瀬勝美，堀賀雅史，玉田大輝，下家祐人，寺田康彦，橋本征太郎，拝師智之
「NMR Microscopy による生体組織の microstructure の抽出」
平成 24 年 9 月 8 日，第 40 回日本磁気共鳴医学学会大会，国立京都国際会館，京都

玉田大輝，巨瀬勝美
「Cartesian サンプルリング法による Compressed Sensing を用いた MR マイクロコピーの検討」
平成 24 年 9 月 7 日，第 40 回日本磁気共鳴医学学会大会，国立京都国際会館，京都

玉田大輝，巨瀬勝美，拝師智之
「シングルチャンネルシムコイルを用いた 1 T 永久磁石の静磁場シミング」

平成 24 年 9 月 7 日，第 40 回日本磁気共鳴医学学会大会，国立京都国際会館，京都

玉田大輝，巨瀬勝美
「MR マイクロコピーのための GPGPU 用いた Compressed Sensing アルゴリズムの開発」
平成 24 年 8 月 3 日，第 16 回 NMR マイクロイメージング研究会，滋賀医科大学クリエティブモチベーションセンター，大津

6. 研究組織

(1) 研究代表者

巨瀬 勝美 (KOSE, Katsumi)
筑波大学・数理物質系・教授
研究者番号：60186690

(2) 研究分担者

仲村 高志 (NAKAMURA, Takashi)
理化学研究所・分子構造解析ユニット・専任技師
研究者番号：60321791

寺田 康彦 (TERADA, Yasuhiko)
筑波大学・数理物質系・助教
研究者番号：20400640

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

玉田 大輝 (TAMADA, Daiki)