

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 19 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560334

研究課題名(和文) 小型・高強度・高形状自由度を有する磁場源の磁場制御に関する検討

研究課題名(英文) Study on the magnetic field control methods to develop the magnetic source with compact and high performances

研究代表者

金 錫範 (KIM, SEOKBEOM)

岡山大学・自然科学研究科・教授

研究者番号：00287963

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、高温超電導バルク体が有する利点を生かして医学分野に応用させるために磁場のon/offを含む自由度の高い磁場制御方法の開発を行った。具体的には、直流磁場のon/off制御方法、自由度の高い磁場形状を捕捉させる方法、磁場の空間均一度を向上させる方法について3次元有限要素法に基づく電磁場数値解析と実験の両面の検討を行い、本研究で開発した磁場制御方法の有効性について検討・実証した。本研究により、印加磁場より200%以上高い磁場を発生させることが確認でき、これは予想しなかった優れた結果であり、磁場のon/off制御以外に磁場の増幅が可能であることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Recently the high magnetic fields are useful in many medicine applications such as a culture of man's bone or cell. So, the techniques for magnetic field concentration are very important, and the novel electromagnets and trapped HTS bulk magnets have been fabricated and used in the cell culture and the magnetic drug delivery system (MDDS). In these applications, not only the strength of magnetic field but also the magnetic control ability including ON/OFF field switching are needed to enlarge the medicinal effects. On the other hand, superconductors have a perfect conduction and diamagnetism properties. High temperature superconducting (HTS) bulks have a strong diamagnetism and pinning force to trap the magnetic flux. So, in this study, a new field control method using the ring shaped HTS bulk with slit configuration was proposed, and we found that the HTS bulk with slit did control the applied magnetic field, and amplified magnetic fields were obtained at slit parts of HTS bulks.

研究分野：超電導工学

キーワード：磁場制御 磁場on/off 磁場増幅 高温超電導体

### 1. 研究開始当初の背景

近年、YBCO 酸化物超電導体をはじめとする高温超電導バルク体は、材料研究分野による製造プロセスの向上に伴って臨界電流密度と機械的強度面での高性能化、大型化が急速に進んでおり、その応用研究が活発になっている。高温超電導バルク体は、強力なピンニング力を有しており、直径 2.65 cm、厚み 1.5 cm の小さな YBCO 超電導バルク体を用いて、29K の温度で 17 T の強力な磁場を捕捉できることが富田氏らによって示された (M. Tomita and M. Murakami, Nature, Vol. 421, p. 517, 2003)。そこで、我々は、高温超電導バルク体の強力な捕捉磁場能力と磁気的特性を生かしたいくつかの応用機器 (小型 NMR 用マグネット、3次元アクチュエータ、強磁性体安定浮上システム) の開発を行ってきた。

一方、外部磁場を制御して移植細胞を体内で精密にコントロールすることにより、体内の必要な部位にだけ薬を集中・効率的に送り届け、薬を長時間効くようにする技術である DDS (Drug Delivery System) 分野では、印加磁場の on/off を含む正確な磁場制御技術が要求されている。そこで、本研究では、高温超電導バルク体のマイスナー効果を利用した磁場の増幅と on/off 制御が可能な新しい磁場制御方法を提案し、実験と電磁場解析による検討を行った。

### 2. 研究の目的

高温超電導バルク体は、高い磁場を捕捉する能力を有していると同時に、磁場の形状を記憶することも可能である。また、ピンニング効果による磁場捕捉能力とともに、超電導本来の特性である完全反磁性特性も持っているため、今までは難しかった鉄などの強磁性体を安定して浮上させることも可能である。従って、永久磁石を励磁させるときに磁場強度のみならずその分布も自由に制御できると考えている。また、自己細胞や組織を用いて失われた組織を再生する再生医療においては、損傷部により多くの細胞を誘導・集積させることが重要であり、高温超電導バルク体の磁場を用いて軟骨欠損部に細胞を集積させて再生する試みが行っている (超電導 Web21, 2011 年 3 月号 25 ページ)。しかし、この場合、磁場を自由に on/off させることができなく、磁場による効果を十分発揮できていないのが問題として挙げられている。

そこで、本研究では、高温超電導バルク体が有する様々な利点を産業と医学分野に応用させるために下記の研究内容について実験と電磁場数値解析の両面から検討する。

- ①高温超電導バルク体を用いて直流磁場の on/off 制御方法を確立
- ②高温超電導バルク体内に自由度の高い磁場形状を捕捉させる方法を確立

### ③超電導マグネットの空間磁場均一度を向上させる方法を確立

### 3. 研究の方法

小型で高磁場発生が可能であると同時に磁場を自由に制御できる磁場源は様々な分野で非常に有効に使われると思われる。特に、医療用として人体内で使われる様々な構造と機能を有する MEMS の駆動と制御を人体の外から非接触で行えるため、その用途は非常に幅広く使われると期待している。高温超電導バルク体は、上記の仕様を満足させ、実現できる非常に有効な材料だと考えている。そこで、本研究では、高温超電導バルク体を産業・医学分野に適用させるために必要な磁場制御方法の確立を目指して行った。まず、最初に、図 1 のような形状の異なる高温超電導バルク体を用いて実験的に検討した。図 1 の (a) のようなバルク体を用いると磁場の遮蔽が可能なのものの、磁場の ON/OFF 制御のためには、印加磁場に対してバルク体を機械的にスライドさせる必要があり、そのためにはかなりの力が要求される。また、このような形状のバルク体においては、磁場の増幅効果は期待できない。さらに、図 1 の (b) のようにリング形状にした場合においても磁気遮蔽効果は得られるが on/off 制御が難しく、磁場増幅効果も期待できない。一方、リング形状のバルク体に図 1 の (c) のようにスリットを入れることで磁気遮蔽の原因となる遮蔽電流 (図 1 の (d)) がスリット部分に印加磁場と同じ向きの磁場を発生させるためにスリット部での磁場増幅が可能となり、バルク体を回転させることで磁場の on/off 制御が可能となる。そこで、本研究では、磁場の増幅能力の向上を目的としたバルク体の形状最適化について検討したので、得られた研究成果について後述する。

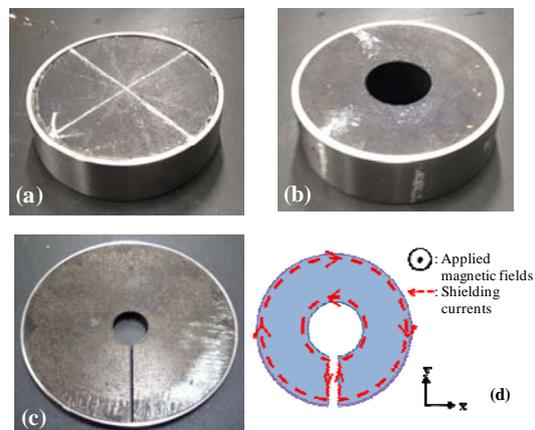


図 1 形状の異なる高温超電導バルク体 (a) ディスク形状、(b) リング形状、(c) スリット入りリング形状、(d) スリット入りリング形状高温超電導バルク体に流れる遮蔽電流の概念図

#### 4. 研究成果

##### (1) 直流磁場の on/off 制御方法

一般的にディスク型の超電導バルク体を用いた場合、完全反磁性特性により磁場を遮蔽することはできるものの、磁場の on/off を含む制御は出来ない。そこで、リング形状の高温超電導バルク体にスリットを入れ、このバルク体を印加磁場に対して回転させることで磁場の on/off 制御が可能となった。そして、スリット形状の高温超電導体の内径やスリットの角度の依存性について電磁場数値解析による検討を行った結果、内径とスリットの角度を最適化することが出来た。また、磁場の on/off 制御をより効果的に行うために、図2のような階段形状のバルク体や複数の形状の異なるバルク体を組み合わせることでターゲット部分だけに絞った磁場の on/off 制御を可能とした。さらに、本研究により、スリット部では印加磁場より高い磁場を発生させることが確認でき(図3)、これは予想しなかった優れた結果であり、磁場の on/off 制御以外に磁場の増幅が可能であることが明らかになり、200%以上の磁場増幅が得られた。

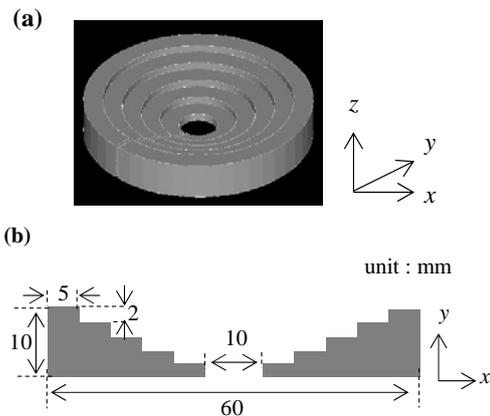


図2 階段形状に積層したスリット入り高温超電導バルク体の (a) 立体面図、(b) 断面図

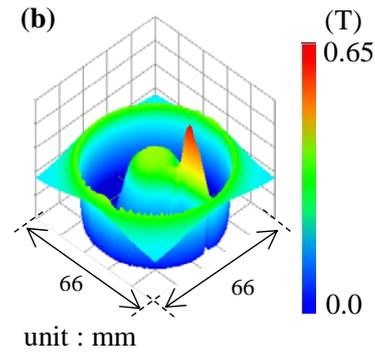
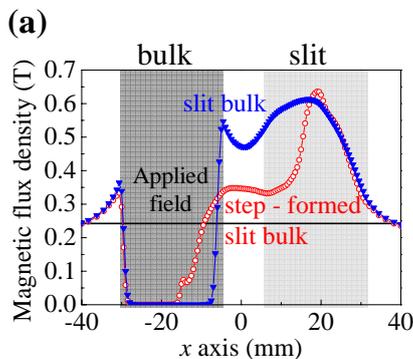


図3 電磁場数値解析による (a) スリット入りと階段形状の高温超電導バルク体による半径方向への磁場分布と、(b) 3次元磁場分布特性

##### (2) 自由度の高い磁場形状を捕捉させる方法

磁場の形状を自由に制御できる方法について検討を行い、物理的が外力として薬物を目的の部位に誘導することで、これまでの DDS より効率の良い薬物治療が可能である磁気誘導 DDS (Magnetic Drug Delivery System; MDDS) への適用を考慮した研究を行った。これまでは超電導バルク体を用いてバルク体表面から 50 mm 上部においてもナノ磁性体粒子を蓄積できる強度の磁場を発生させることが可能であることは確認されている。しかしながら、超電導バルク体は磁場を捕捉することで磁場源としては使えるものの磁場制御はできない短所を有している。そこで、我々は、超電導コイルを磁場源として、積層構造の超電導線材やバルク体と超電導コイルを組み合わせることで、超電導線材やバルク体の完全反磁性特性を利用することで柔軟な磁場制御が可能であることを示した。さらに、長手方向への磁場勾配を向上させるために超電導線材やバルク体に強磁性体を加えることで大きい磁気勾配を得ることに成功し、提案した方法の形状最適化を図った。

##### (3) 磁場の空間均一度を向上させる方法

高温超電導バルク体は、強力なピン止め効果により印加された磁場に対して強度と形状をそのまま捕捉することができる。一方、超電導バルク体に印加する磁場の均一度より高い磁場均一度を得ることはできないのが現状である。現有している超電導マグネットの発生磁場の空間均一度は 600 ppm/cm<sup>3</sup> 以下であるため、これ以上の磁場均一度をバルクマグネットに捕捉させることはできない。そこで、本研究では、一度磁場を捕捉したバルク体に対して再度磁場を印加する方法でバルク体の磁場均一度を向上させる方法を開発した。電磁場数値解析により 150 ppm/cm<sup>3</sup>

以上の磁場均一度を得ることが可能であることが示された。

#### 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 19 件)

- ① S.B. Kim, I. Eritate, T. Abe, S. Shima, M. Takahashi, The fundamental study to control the magnetic field for MDDS using shielding currents of HTS tapes and bulks, *Physica C*, 査読有, Vol. 506, pp. 27-32 (2014)  
DOI: 10.1016/j.physc.2014.08.001
- ② S.B. Kim, T. Ikegami, Y. Fujii, M. Takahashi, H. Onodera, Development of the non-contact rotating system using combined ring-shaped HTS bulks and permanent magnets, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 査読有, Vol. 24, No.3, p.6800105 (2014) DOI: 10.1109/TASC.2013.2284021
- ③ S.B. Kim, H. Kajikawa, H. Ikoma, J.H. Joo, J. M. Jo, Y. J. Han, H. S. Jeong, Study on the electrical contact resistance properties with various winding torques for non-insulated HTS coils, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 査読有, Vol. 24, No.3, p.4600405 (2014)  
DOI: 10.1109/TASC.2013.2283103
- ④ S.B. Kim, N. Hayashi, H. Kitamura and I. Eritate, Study on the remagnetization process to improve the field homogeneity of the stacked HTS bulk magnets, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 査読有, Vol. 24, No.3, p.4301405 (2014) DOI: 10.1109/TASC.2013.2290591
- ⑤ S. Noguchi, S.B. Kim, S.Y. Hahn, Y. Iwasa, Passive Shimming by Eliminating Spherical Harmonics Coefficients of all Magnetic Field Components Generated by Correction Iron Pieces, *IEEE Trans. Magn.*, 査読有, Vol. 50, No.2, p.7014904 (2014)  
DOI: 10.1109/TMAG.2013.2276736
- ⑥ D. Ishizuka, S.B. Kim, N. Hayashi, H. Kitamura, D. Miyazawa, Numerical study on split coil-shaped HTS bulks to improve the field homogeneity for compact NMR relaxometry magnets, *Physics Procedia*, 査読有, Vol. 58, pp. 290-293 (2014)  
DOI: 10.1016/j.phpro.2014.09.072
- ⑦ H. Kitamura, S.B. Kim, N. Hayashi, D. Ishizuka, D. Miyazawa, The study to improve the field homogeneity of the HTS bulk magnets for NMR Relaxometry device by passive compensation methods, *Physics Procedia*, 査読有, Vol. 58, pp. 298-301 (2014)  
DOI: 10.1016/j.phpro.2014.09.074
- ⑧ H. Nakano, S.B. Kim, S. Ozasa, M. Sawae, The dynamic characteristics of 3-D superconducting actuator using the magnetized

HTS bulk by sandwiched electromagnets, *Physics Procedia*, 査読有, Vol. 58, pp. 294-297 (2014) DOI: 10.1016/j.phpro.2014.09.073

⑨ S.B. Kim, T. Kimoto, S. Hahn, Y. Iwasa, J. Voccio, M. Tomita, Study on optimization of YBCO thin film stack for compact NMR magnets, *Physica C*, 査読有, Vol. 484, pp. 295-299 (2013)

DOI: 10.1109/TASC.2011.2181472

⑩ S.B. Kim, T. Kaneko, A. Saito, H. Kajikawa, J.H. Joo, J.M. Jo, Y.J. Han, H.S. Jeong, The study on improving the self-protection ability of HTS coils by removing the insulation and lamination of the various metal tapes, *Physica C*, 査読有, Vol. 484, pp. 310-315 (2013)

DOI: 10.1109/TASC.2011.2181472

⑪ S.B. Kim, J. Matsunaga, A. Doi, T. Ikegami, H. Onodera, Study on the characteristics of magnetic levitation for permanent magnets and ferromagnetic materials with various sizes using stacked HTS bulk annuli, *Physica C*, 査読有, Vol. 484, pp. 316-320 (2013)

DOI: 10.1109/TASC.2011.2181472

⑫ S.B. Kim, Y. Yano, N. Hayashi, J.H. Joo, Experimental and analytical studies on non-uniformity properties of HTS bulk annuli for high magnetic performance applications, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 査読有, Vol. 23, No. 3, p.4602804 (2013)

DOI: 10.1109/TASC.2011.2181472

⑬ S.B. Kim, J. Matsunaga, Y. Fujii, H. Onodera, The levitation characteristics of ferromagnetic materials by ring-shaped HTS bulks with two trapped field distributions, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 査読有, Vol. 23, No. 3, p.4603204 (2013)

DOI: 10.1109/TASC.2011.2181472

⑭ S.B. Kim, T. Kaneko, H. Kajikawa, J.H. Joo, J.M. Jo, Y.J. Han, H.S. Jeong, The transient stability of HTS coils with and without the insulation and with the insulation being replaced by brass Tape, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 査読有, Vol. 23, No. 3, p.7100204 (2013)

DOI: 10.1109/TASC.2011.2181472

⑮ S.B. Kim, T. Ikegami, J. Matsunaga, Y. Fujii, H. Onodera, The levitation characteristics of the magnetic substances using trapped HTS bulk annuli with various magnetic field distributions, *Physica C*, 査読有, Vol. 494, pp. 270-275 (2013)  
DOI: 10.1109/TASC.2011.2181472

⑯ S.B. Kim, H. Kajikawa, H. Ikoma, J.H. Joo, J.M. Jo, Y.J. Han, H.S. Jeong, The improved transient stabilities of HTS coils by removing the insulation and inserting the metal tapes, *Physics Procedia*, 査読有, Vol. 45, pp. 249 -252 (2013)  
DOI: 10.1109/TASC.2011.2181472

⑰ S. B. Kim, A. Saito, T. Kaneko, J. H. Joo, J. M. Jo, Y. J. Han, H. S. Jeong, The characteristics of the normal-zone propagation of the HTS coils with inserted Cu tape instead of electrical insulation, *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, 査読有, Vol. 22, No. 3, p 4701504 (2012)

DOI: 10.1109/TASC.2011.2174559

⑱ S. B. Kim, Y. Uwani, J. H. Joo and R. Kawamoto, A study on characteristics of the trapped magnetic field for HTS bulk superconducting actuator operated in AC, *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, 査読有, Vol. 22, No. 3, p 4700304 (2012)

DOI: 10.1109/TASC.2011.2181472

⑲ S. B. Kim, T. Kimoto, Y. Yano, S. Hahn, Y. Iwasa, Numerical and experimental study to fabricate the new type compact NMR device using stacked HTS bulks, *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, 査読有, Vol. 22, No. 3, p 4302004 (2012)

DOI: 10.1109/TASC.2011.2182170

〔学会発表〕(計 60 件 : 国内 19 件、国際 41 件)

① D. Miyazawa, S. B. Kim, H. Kitamura, D. Ishizuka, K. Hojo, Numerical study to obtain the improved field homogeneity and enlarged inner diameter of HTS bulk magnet for compact NMR, 27th International Symposium on Superconductivity, SAP-28, Tokyo, Japan, 2014, 11, 25-27

② M. Sawae, S. B. Kim, S. Ozasa, H. Nakano, H. Kobayashi, The dynamic characteristics on the wall traveling of the HTS bulk superconducting actuator, 27th International Symposium on Superconductivity, SAP-29, Tokyo, Japan, 2014, 11, 25-27

③ S. Shima, S. B. Kim, T. Abe, I. Eritate, N. Yabe, N. Sanada, The development of Magnetic field control methods for magnetic targeting system using slit configuration HTS bulks, 27th International Symposium on Superconductivity, SAP-30, Tokyo, Japan, 2014, 11, 25-27

④ A. Nakashima, S. B. Kim, I. Eritate, N. Sanada, T. Abe, S. Shima, N. Yabe, M. Takahashi, Development of field control method and basic design of HTS magnet for MDDS, 27th International Symposium on Superconductivity, SAP-32, Tokyo, Japan, 2014, 11, 25-27

⑤ T. Abe, S. B. Kim, I. Eritate, M. Takahashi, S. Shima, A. Nakashima, Development of magnetic field control system using HTS bulk for ON/OFF magnetic switching and magnetic amplification, 2014 Applied Superconductivity Conference, Charlotte, U.S.A., 2014.08.10-15

⑥ I. Eritate, S. B. Kim, T. Abe, M. Takahashi, S.

Shima, A. Nakashima, Development of magnetic field control system using HTS bulks and HTS coil for MDDS, 2014 Applied Superconductivity Conference, Charlotte, U.S.A., 2014.08.10-15

⑦ D. Ishizuka, S. B. Kim, N. Hayashi, H. Kitamura, D. Miyazawa, Study on the shape optimization of the HTS bulk magnets with active compensation for compact NMR relaxometry magnets, 2014 Applied Superconductivity Conference, Charlotte, U.S.A., 2014.08.10-15

⑧ H. Kitamura, S. B. Kim, N. Hayashi, D. Ishizuka, D. Miyazawa, The study to improve the field homogeneity of the NMR relaxometry magnets using the packaged HTS bulks with various iron rings, 2014 Applied Superconductivity Conference, Charlotte, U.S.A., 2014.08.10-15

⑨ N. Hayashi, S. B. Kim, H. Kitamura, I. Eritate, The study on the remagnetization process to improve the field homogeneity of stacked HTS bulk magnets, 23rd International conference on magnet technology, Boston, U.S.A., 2013. 07.14-19

⑩ S. B. Kim, H. T. Ikegami, J. Mastunaga, Y. Fujii, H. Onodera, Development of the non-contact rotating system using combined ring-shaped HTS bulks and permanent magnets, 23rd International conference on magnet technology, Boston, U.S.A., 2013. 07.14-19

⑪ 安部 冬馬, 襟立 育也, 高橋 将人, 志摩 翔太, 金 錫範, 小野寺 宏, 磁場制御のための高温超電導バルク体の形状最適化に関する研究, 第 37 回日本磁気学会学術講演会, 3pE-4, 北海道大学, 日本, 2013. 9.3-6

〔図書〕(計 1 件)

超伝導現象と高温超伝導体, 金 錫範 その他 63 名による共著, 株式会社エヌ・ティー・エス, 2 編 3 章 5 節 NMR 用マグネットシステム, pp. 218-229 (2013)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.ase.ec.okayama-u.ac.jp/>

<http://soran.cc.okayama-u.ac.jp/view?l=ja&u=215a11277e8f1e6574506e4da22f6611&k=%E9%87%91%E3%80%80%E9%8C%AB%E7%AF%84&kc=1&sm=keyword&sl=ja&sp=1>

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

金 錫範 (SEOKBEOM KIM)

岡山大学・大学院理自然科学研究科・教授

研究者番号 : 00287963