

氏名	たかはし けいた 高橋 圭太
本籍（国籍）	青森県
学位の種類	博士(理工学)
学位記番号	理工博 第1号
学位授与年月日	令和3年3月23日
学位授与の要件	学位規則第5条第1項該当 課程博士
研究科及び専攻	理工学研究科自然・応用科学専攻
学位論文 題目	Realization of superconducting bulk magnets with higher magnetic field gradient to provide a quasi-zero gravity space on earth (地球上で擬似無重力空間を実現する大きな磁場勾配を有する超電導バルク磁石の実現)
学位審査委員	主査 教授 内藤 智之 副査 教授 鎌田 康寛 副査 教授 松川 倫明 副査 理事・副学長 藤代 博之

論文内容の要旨

Bulk superconductors such as (RE)BaCuO (RE: rare earth elements or Y) can be utilized as a so-called trapped field magnet (TFM) that can “trap” the magnetic fields over several Tesla by exploiting the flux pinning effect of Type-II superconductors. The trapped field can be sustained inside the bulk with its induced supercurrent quasi-permanently once it is magnetized and kept at a constant temperature; hence, can replace conventional magnets as a compact and strong magnet for potential applications. It is noteworthy that there is a limit in the trapped field enhancement according to the tripartite relation between Electromagnetic field, Temperature, and Mechanical stress as the brittle ceramic nature. For more practical design, it is also desirable for the magnetic source to provide such a strong magnetic field even in an open space outside the vacuum chamber other than to be lightweight and mobile as a desktop-type apparatus. In this sense, the author newly developed two hybrid-type TFMs called as a hybrid TFM lens (HTFML) which can generate a concentrated field higher than the trapped field, and a high gradient-type TFM (HG-TFM) which can provide a higher magnetic force with its refined field gradient product, $B_z \cdot dB_z/dz$. Including the introduction in chapter 1 and the conclusion in the last chapter 8, this Ph.D thesis summarizes six papers published since 2018 to 2021, relating to the development of the HTFML in chapter 2 to chapter 5, its

applicational aspect for the magnetic separation in chapter 6, and another new concept of the HG-TFM in chapter 7. The concepts of such hybrid-type TFMs were first considered using a numerical simulation in an efficient way, and then the experimental validation was performed.

In chapters 4 and 5, the HTFML was validated experimentally. This exploits the “vortex pinning effect” of an outer bulk cylinder and the “diamagnetic shielding effect” of an inner bulk magnetic lens to generate a concentrated magnetic field higher than the trapped field from the outer TFM. This requires that, during the magnetizing process, the outer TFM cylinder is in the normal state ($T >$ superconducting transition temperature, T_c) and the inner magnetic lens is in the superconducting state ($T < T_c$) when the external magnetizing field is applied, followed by cooling to an appropriate operating temperature, then removing the external field. This is explored for two potential cases: 1) exploiting the difference in T_c of two different bulk materials (“case-1”), e.g., MgB_2 ($T_c = 39$ K) and $GdBaCuO$ ($T_c = 92$ K) or 2) using the same material for the whole HTFML, e.g., $GdBaCuO$, but utilizing the same cryostat with different cooling loops that keep the outer bulk cylinder at a temperature above T_c . As a result, the HTFML could reliably generate a concentrated magnetic field $B_c = 3.55$ T with an external magnetizing field $B_{app} = 2$ T in the “case-1”, and a higher $B_c = 9.8$ T with higher $B_{app} = 7$ T in the “case-2,” respectively. These experimental results were consistent well with the numerical estimation results in chapter 2 and 3.

In chapter 6, it was predicted by numerical simulation that the HTFML device after the magnetization process with an applied field, $B_{app} = 10$ T, can generate the maximum of $B_c = 11.4$ T, as well as an ultra-high $B_z \cdot dB_z/dz$ over 3000 T²/m, which can fulfill the requirement of the magnetic levitation of water drop as high as 1400 T²/m.

In chapter 7, state-of-the-art numerical simulations were used to investigate the magnetic properties of the proposed HG-TFM in detail. In the modelling, slit ring bulks (slit-TFMs) are tightly stacked with TFM cylinders (full-TFMs), which is useful to improve the magnetic field gradient with its inverse field through the slits. A maximum $B_z \cdot dB_z/dz = 6040$ T²/m was predicted even by using the simpler conventional field-cooled magnetization (FCM) with $B_{app} = 10$ T at 40 K, which should be the highest value ever reported compared to any other magnetic sources. The HG-TFM has an advantage on the versatility, e.g., a wider open space and its simple operation at one constant temperature.

These devices deserve to be unique that its superior magnetic properties and the versatility come from the refinement of the magnetizing method in contrast to conventional approaches that depend on the superconducting properties of the bulk itself. Now, since the prototype can be installed even in a laboratory scale and can provide the quasi-zero gravity space in an open space inside/outside the vacuum chamber, further

applicational studies would be explored in a more practical setup towards the new industrial application such as protein crystallization and cell culture.

論文審査結果の要旨

小型・強磁場-超電導バルク磁石の特性向上と生命・医科学分野等への産業応用を目標に、新しい超電導バルク磁石構造及び着磁技術の提案を主題としている。

強力な磁場による磁気力は、地球上の重力に反発力として作用させることで、種々の反磁性体（水や金属、タンパク質など）に対し擬似的な微小重力状態を実現する、いわゆる磁気浮上現象は、地球上で不純物や欠陥の少ないクリーンな環境下での結晶成長や細胞培養を行えるとして、生命・医科学分野等への適用が期待される。(RE)BaCuO系(REは希土類元素またはY、転移温度90K)に代表される超電導バルクは、「磁束ピン止め効果」により外部磁場を捕捉すると小型でありながらNdFeB系永久磁石の30倍以上の強磁場を発生するバルク磁石(TFM)となる。2014年には世界最高の捕捉磁場17.6T(テスラ)が26Kで樹立され、TFMが従来の磁石(電磁石や超電導コイル)には実現できない価格とサイズを有するとして注目されている。しかし、10Tを超える高捕捉磁場を目指した基礎研究では、熱的不安定性や機械強度の脆弱性が課題となっている。一方、バルク磁石を用いた応用機器に関する研究では、破壊リスクのない数テスラ領域で簡便に扱うために液体窒素温度(77K)を含む比較的高温での運転が前提となっている。以上より、小型バルク磁石のポテンシャルを十分に発揮できる強磁場特性と汎用性の両方に優れたデスクトップ型磁場装置の実現は、新たな応用研究・産業分野の創出に貢献することが期待される。

物体に作用する磁気力 F_m は、高さ方向の磁場 B_z と磁気勾配 dB_z/dz に比例して増大するため、磁気設計においては各特性の一方あるいは両方の向上が求められる。本研究では、 B_z と dB_z/dz のそれぞれに優れた2種のハイブリッド型バルク磁石である磁気収束型バルク磁石レンズ(HTFML)と高勾配型バルク磁石(HG-TFM)を提案し、研究をシミュレーション解析及び実験により実施した。両装置は、無冷媒冷凍機を搭載したデスクトップ型磁場装置であり、真空容器外の解放空間において強磁場及び磁気力勾配を提供する。研究の結果、以下の成果を得た。

I. 着磁磁場より大きな収束磁場を発生する磁気収束型バルク磁石レンズ(HTFML)の提案と実証

HTFMLは、従来の円筒バルクが供給する捕捉磁場を転移温度以下に冷却したバルク磁気レンズが反磁界効果により収束することで、着磁に要した外部磁場より大きな磁場をしかも永続的に発生できる。HTFMLの解析モデルを構築し、着磁シーケンスの提案と着磁過程の模擬を可能とした。さらに、HTFMLの実証実験において、(RE)BaCuO系バルクを用いて外部磁場7Tに対し収束磁場9.8Tの発生に成

功した。バルクの臨界電流密度特性に依らない捕捉磁場向上の新たなアプローチとして、更なる強磁場発生の可能性を見出した。

II. 小型汎用磁気分離装置の実現に向けた HTFML における非常に大きな磁気力勾配特性の推定

実験を模擬したモデルを元に、磁場分布の詳細な解析を行った。その結果、HTFMLは従来の10 T級超電導磁石の約6倍となる $3000 \text{ T}^2/\text{m}$ 程度の磁気力勾配 $B_z \cdot dB_z/dz$ を発生できることを新たに予見し、水の磁気浮上に必要な $1370 \text{ T}^2/\text{m}$ を満たす擬似微小重力環境の提供が可能であることを解析により示した。具体的な応用として小型汎用磁気分離装置を提案し、可搬かつ量産性に優れるHTFMLを産業分野に適用できることを明らかにした。

III. 擬似無重力環境の汎用化に向けた高磁気勾配型バルク磁石(HG-TFM)の提案

磁気レンズを用いるHTFMLでは、段階的な温度制御を要する複雑なゼロ磁場中冷却着磁(ZFCM)を行う必要があった。また、磁気レンズや補強治具の存在が真空容器外の解放空間を狭める問題がある。新規に提案したHG-TFMでは、従来の円筒バルクに対し逆磁場を発生するスリット入り円筒バルクを積層しており、磁気勾配が急峻となるよう磁場分布の制御が可能である。数値解析の結果から、外部磁場10 T、40 Kにおける従来の簡便な磁場中冷却着磁(FCM)後において、大型超電導磁石で実現できている値の約2倍となる $B_z \cdot dB_z/dz = 6040 \text{ T}^2/\text{m}$ を解析により得た。本装置は5~30 mm程度の室温ボア空間を有する小型で冷媒フリーな汎用性に優れたデスクトップ型磁石であり、擬似微小重力環境を適用でき得る医療・生命分野等において新たな応用研究や産業分野の創出が期待される。

よって、本論文は博士（理工学）の学位論文として合格と認める。

原著論文名（3編）

- 1) "A new concept of a hybrid trapped field magnet lens", Keita Takahashi, Hiroyuki Fujishiro and Mark D Ainslie, *Superconductor Science and Technology*, **31** (2018) 044005, 2018年4月
- 2) "Simulation study for magnetic levitation in pure water exploiting the ultra-high magnetic field gradient product of a hybrid trapped filed magnet lens (HTFML)", Keita Takahashi, Hiroyuki Fujishiro and Mark D Ainslie, *Journal of Applied Physics*, **127** (2020) 185106, 2020年5月
- 3) "A conceptual study of a High Gradient Trapped Field Magnet (HG-TFM) toward providing a quasi-zero gravity space on Earth", Keita Takahashi, Hiroyuki Fujishiro and Mark D Ainslie, *Superconductor Science and Technology*, **34** (2021) 035001, 2021年2月