

研究の窓



超強力なバルク超伝導磁石の 開発と産業応用

材料物性工学科 教授 藤代博之

1. はじめに

1911年に水銀において初めて発見された電気抵抗がゼロになる超伝導現象は、その後、数多くの金属系化合物においても確認され、超伝導に転移する温度 T_c は年々上昇して1980年代にやっと絶対温度23 K (ケルビン) に達した。1986年に酸化物系超伝導体が発見されて世界的な超伝導フィーバーが起こり、わずか数ヶ月で T_c が液体窒素温度 (77.3 K; 摂氏 -196°C) を超え、現在では $T_c = 130\text{ K}$ を超える酸化物超伝導体が発見されている。超伝導体を用いた応用機器には、超伝導磁気浮上列車 (リニアモーターカー) や医療用 MRI (磁気共鳴イメージング) などがあるが、これらの機器は従来の金属系超伝導線材 (NbTi や Nb₃Sn など) を用いている。高い T_c を利用した酸化物系超伝導線材の産業応用は、超伝導状態で流せる電流の大きさ (臨界電流密度 J_c) が近年著しく向上し、近い将来、金属系超伝導線材に置き換わる可能性もある。一方、酸化物超伝導体独自の応用として、Nd-Fe-B 系永久磁石の約10倍の強さを有する強い磁場を発生する疑似永久磁石がある。本研究グループは酸化物超伝導バルクを用いた超強力磁石応用について研究を行い、「パルス着磁法」を用いて5.20 T (テスラ: 1 T = 10000 G (ガウス)) の世界最高の磁束を捕捉することに成功した。本稿ではこの開発の経緯と産業応用への取り組みを紹介する。

2. 研究の背景

酸化物超伝導バルクとは、RE (Y や Sm, Gd などの希土類元素)、Ba (バリウム)、Cu (銅)、O (酸素) からなる REBa₂

Cu₃O₇ 酸化物超伝導体の主相 (RE123相) と、微細に分散した RE₂BaCuO₅ 非超伝導体の不純物相 (RE211相)、Ag, Pt などの金属添加物からなる複合材料 (セラミックス) の塊 (かたまり: バルク) である。RE123相は摂氏 -183°C (絶対温度90 K) で超伝導を示すため液体窒素中で超伝導となり、RE211相は磁束を捕捉するピン止め点として働く。市販されている超伝導バルクのサイズは直径30~50 mm、厚さ15 mm程度である。一般に超伝導バルクを磁化する (磁石として用いる) 場合には、数 T 程度の強い磁場の中で、超伝導バルクの温度を超伝導転移温度 T_c 以下に冷却し、その後、外部磁場を取り除いて着磁を行うが (これを「磁場中冷却法」という)、磁場の印加には高価な超伝導マグネットを必要とするため一部の研究機関でしか実現できない。この方法を用いて29 Kで17 T を超える磁場の捕捉が報告されているが、限られた空間内で実現した結果であり産業応用にはほど遠い。これに対し「パルス着磁法」は、安価な銅線を使ったコイルとパルス電源を用いるため、100 V の電源があればどこでも超伝導バルク磁石を実現できる利点がある (図1)。パルス着磁法は超伝導バルクを冷凍機を用いて $T_c = 30\text{ K} \sim 50\text{ K}$ に冷却し、10 ミリ秒程度の強いパルス磁場を印加することで、超伝導バルク中のピン止め中心となる RE211相に磁場を捕捉させ強力な磁石にする。強いパルス磁場を加えると、バルク内での磁束の急激な運動による大きな温度上昇のために、磁場中冷却法よりも捕捉磁場 B_T が小さいという欠点があった。これまで報告されたパルス着磁法での最高捕捉磁場は最大3.8 T であり、捕捉磁場の

向上が強く望まれていた。

3. 研究成果

我々はまず、超伝導バルク表面の複数点の温度と磁場の測定を行い、パルス着磁において超伝導バルクの温度がどのくらい上昇するのか、印加パルス磁場 B_{ex} と捕捉磁場 B_T および温度上昇 ΔT の関係はどうか、などの基礎的な実験を系統的に行った。実はこのような測定例は、過去にほとんど存在しなかったのである。これまでの研究から、バルク温度 T_S の低温化と、複数回の同一強度のパルス磁場印加による ΔT の低減が、捕捉磁場 B_T を向上させる重要な点であることが明らかになった。そこでバルク温度 T_S と印加磁場 B_{ex} を最適化した2段階着磁法 (MMPSC 法: Modified Multi-Pulse Technique with Stepwise Cooling) を新しく考案した。この方法は、まず冷凍機を用いて比較的高温 ($T_S = 45\text{K}$) に超伝導バルクを冷却して、比較的弱いパルス磁場 ($B_{ex} = 4.5\text{T}$) を2回印加して、バルク中心に約1 Tの磁場を捕捉させる。次にバルクを低温 ($T_S = 28\text{K}$) に冷却し、最適な強いパルス磁場 ($B_{ex} = 6.7\text{T}$) を2回印加する。この方法を用いて2005年2月に、29Kに冷却した RE=Gd 系バルク表面で $B_T = 4.47\text{T}$ の磁場捕捉に成功した[1,2]。さらに7月に、同じバルクを用いて $B_T = 5.20\text{T}$ を達成した。図2に捕捉磁場向上の推移を示す。最初の段階で、ある程度の磁束を超伝導バルク中に捕捉させることで温度上昇を低減させ、その後の低温において、最適な磁場を印加することで捕捉磁束を向上させることがポイントである。同じサイズの超伝導バルクを磁場中冷却法で着磁する場合には、強い電磁力に対するバルクの機械的強度の問題から $B_T = 7\text{T}$ が捕捉限界である。従って今回の成果は、パルス着磁法による捕捉磁場が一段と磁場中冷却法に近づいたと言える。(超伝導バルクは真空容器内に保持されているので、バルク表面から約4 mm離れた室温空間では、残念ながら約2.5Tの磁場しか実際には活用出来ない。) 最近では捕捉磁場向上の研究の他に、応用を目指して複数の超伝導バルクを平面上に配列して、パルス着磁法で着磁を行う新しいタイプの超伝導バルク磁石の

開発も行っており、パルス着磁法の基礎と応用研究において岩手大学が世界を一步リードしている。

安価で簡便なパルス着磁法で5 Tを超える捕捉磁場を実現したことは、バルク超伝導体の産業応用を大きく進展させると考えている。図3にデモンストレーションとして、超伝導バルク磁石の容器表面 (2.5T) に磁氣的に吸着した千円札の様子を示す。紙幣の印刷には偽造防止のため磁性インクが使用されているため、千円札を磁氣的に保持することが出来る。超伝導バルクを冷却するための冷凍機を連続運転する必要があるが、停電がなければ磁場の減少もなく長時間安定して運転できることを確認した。

現在、愛知県のイムラ材料開発研究所(株)と6 T以上の捕捉磁場を目指した共同研究を行っている。さらに九州電力(株)とは、磁性を帯びた材料に有害物質などを付着させ磁気力を用いて分離する「環境浄化用磁気分離」装置の応用に関する共同研究を行い、湖水やダムの水質浄化への取り組みを行っている。大阪大学とは、磁気力を用いて必要な量の薬を患部へ素早く輸送する「ドラッグデリバリーシステム(DDS)」などの医療分野への応用を目指した研究を共同で行っている。

4. 終わりに

2002年の秋に、ある学会でパルス着磁における温度変化のシミュレーションに関するポスター発表を見た。当時、パルス着磁に興味も関心もなかったが、それまで低温での材料の温度計測を長年行っていた経験から、シミュレーションの結果を見て、「こんなことは実際には起こらない！」と直感的に感じた。と同時に、これは自分たちの技術で現象を正確に測定できると考え、数日のうちに測定プログラムと装置を作り実験を開始し、3年後に世界記録更新に至った。あのポスター発表を見なかったら、現在私の主要なテーマになっているこの研究は行っていなかったと思うと、偶然と、直感と、経験との不思議なマッチングを感じる。偶然の出会いから始まった本研究の一端を、一祐会会員の皆様にご紹介出来たことを光榮に思うとともに、もし「超伝導バルク磁石がこんなところにも使えるのでは！」という新しいアイデアがあれば

ば、ぜひご一報を頂きたいと考えている (fujishiro@iwate-u.ac.jp)。本研究は、平成11~16年に実施された岩手県地域結集型共同研究事業での基礎的成果を進展させ、夢県土いわて戦略的研究推進事業(岩手県)と科学研究費補助金(文部科学省)の助成を受けて実施している。紙面をお借りして関係各位に謝意を表す。

の岩手日報1面に紹介されました。(岩手日報のホームページ (<http://www.iwate-np.co.jp/>) から「過去のニュース」へ入り検索できます。)

2. H. Fujishiro *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.* 44 (2005) L1221.
3. 私たちの研究室の研究内容は、ホームページ (<http://ikebehp.mat.iwate-u.ac.jp/>) に掲載しています。

参考資料：

1. 本研究の内容は2005年8月28日付け

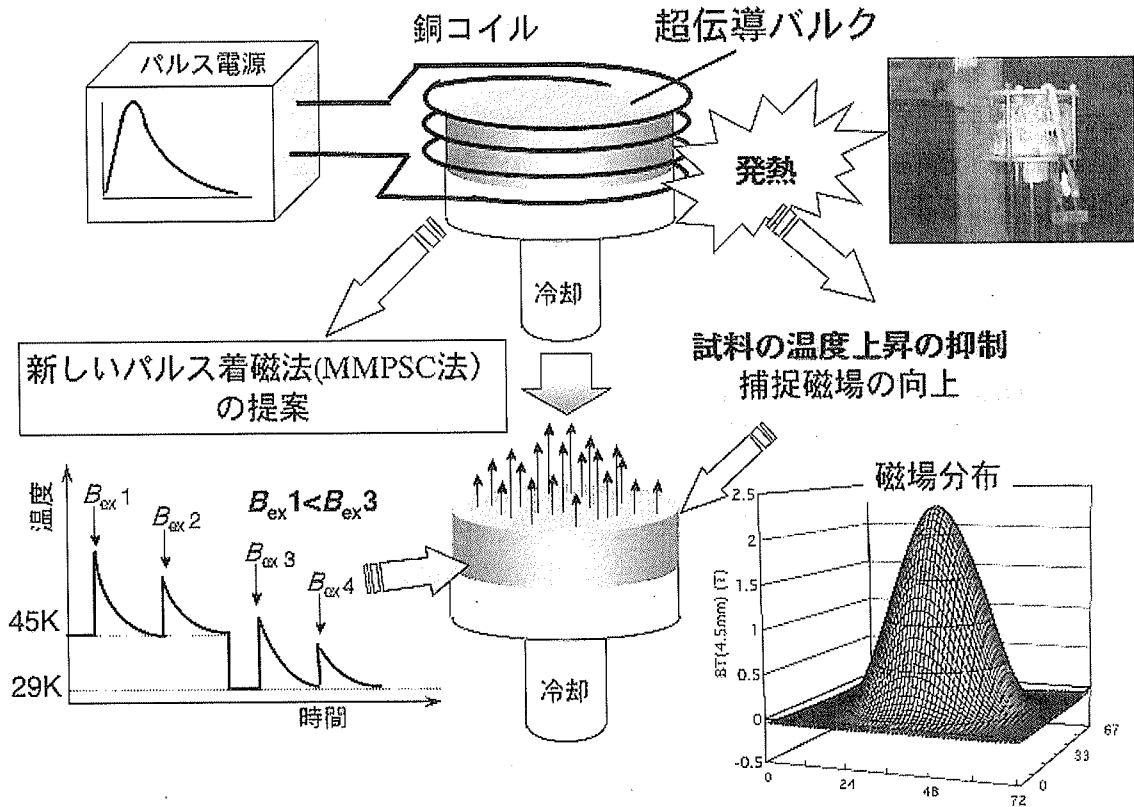


図1 パルス着磁法のご概念と新しい着磁法の紹介

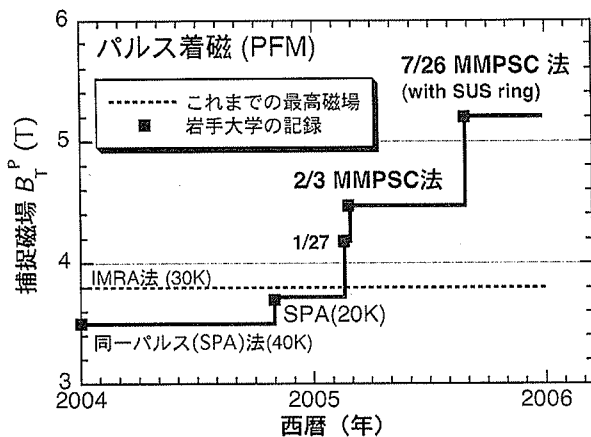


図2 パルス着磁法による捕捉磁場向上の推移



図3 超伝導バルク磁石に磁氣的に吸着した千円札