

高温超伝導バルクの磁気浮上特性

松本洋明* 定兼純平** 家原和也** アキラ** 原田 寛治***

Magnetic Levitation Effect of High-Tc Superconducting Bulk

Hiroaki MATSUMOTO* Junpei SADAKANE** Kazuya IEHARA** AKIRA** Kanji HARADA***

Since the discovery of high-temperature superconductivity, it has been studied for the applications and the developments in various fields. The superconducting fault-current limiter (FCL) is one of the superconducting applications, which reduces the current to the level that the circuit breaker can easily work. The temperature becomes high caused by a Joule heat when fault electric current is restrained. We need high cooling efficiency to restore the accidental status to the normal one immediately.

We took note of cavities in the bulk and measured magnetic levitation effect as the basics. I fabricated the bulks that have many cavities by varying the sintering temperature and the pressure. As the result, I understood that cooling effect was increased and levitation time improved by lowering the cavity density.

Key words: Y123 superconductors, Magnetic Levitation Effect

1. はじめに

高温超伝導体が発見されて以来、より高い臨界温度 (T_c)、より高い臨界電流密度 (J_c) を求めて、多くの研究がなされてきた¹⁾。また、ジョセフソン接合を用いた SQUID と呼ばれる超高感度の磁気センサーの研究も盛んになされている²⁾。

超伝導の応用の一つに限流器がある。限流器とは電力系統における落雷等による事故短絡電流を瞬時に抑制して、遮断を容易にする電力機器のことである。過電流が流れたときに超伝導状態から常電導状態に転移することを利用して用いられる。そのとき超伝導体は事故電流抑制時にジュール熱により高温となる³⁾。事故後の復旧を速やかにするために冷却効率を高める必要がある。

そこで本研究では Y123 バルクの密度に着目し、マイスナー効果による磁石浮上時間を測定し、密度と冷却効果の関係を調べた。密度は焼成温度とバルク作成時のプレス圧によって変化させた。その結果、低密度化することにより液体窒素による冷却効果が高まり浮上時間が向上することがわかった。

2. 実験方法

2.1 試料作製方法

試料の作製には酸化イットリウム(Y_2O_3)、炭酸バリウム($BaCO_3$)、酸化銅(CuO)を用いる。これらの材料を組成比が $Y:Ba:Cu=1:2:3$ となるように混合する。はじめ色が異なる酸化イットリウムと酸化銅を乳鉢に入れ色が均一になるまで良く混ぜた後、炭酸バリウムを加えさらに混ぜる。これを焼結させることにより超伝導物質である $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ を得ることができる。

次に不純物を取り除き目的の組成物を得るために仮焼成を行なう。仮焼成には電気炉を用い $10[^\circ C/min]$ で $900^\circ C$ まで昇温、5 時間保持した後 $10[^\circ C/min]$ で室温まで降温する。均一性を高めるために仮焼成を 5 回行った。

そして焼成温度と密度比の関係を調べるために小型の金型(直径 1.3cm)を用いてバルク状に成型する。プレス圧は 8kN とし、 $850^\circ C$ 、 $900^\circ C$ 、 $950^\circ C$ で本焼成を行った。本焼成では目的温度までは $10[^\circ C/min]$ で昇温し、20 時間保持、そして室温まで $1[^\circ C/min]$ で降温した。

またプレス圧と密度比の関係を求めるため大型の金型(直径 6.0cm)を用いて成型した。プレス圧を 25kN、40kN、60kN とし $900^\circ C$ で上記と同じプロセスで本焼成を行った。

原稿受付 平成 20 年 9 月 1 日

* 専攻科電子・情報システム工学専攻

** 電気電子工学科 5 年

*** 電気電子工学科

2.2 試料の評価方法

本研究では超伝導バルク内にある空孔に着目する。そのためバルクにどのくらいの割合で空孔が存在するかを表すために密度比を用いる。作製した試料の密度比を次式により求めた。

$$\text{密度比} = \frac{\text{バルク質量}}{\text{理論質量}} \times 100 \quad [\%]$$

ここでバルク質量とは実際のバルクの重量であり、理論質量とは Y123 の格子定数とバルクの体積から計算して求めた値である。つまり密度比が 100[%] のとき、空孔がなく完全に密に詰まっていることを意味し、50[%] のときはバルクの半分は空孔であることを意味する。体積はノギスを用いてバルクの直径と厚さを測定し、算出した。

マイスナー効果による磁石の浮上特性を Fig.1 に示す。まずバルクを液体窒素中で冷却し、ネオマックス磁石の上に乗せ、浮上時間および浮上高さを計測した。大型バルクの場合は、バルクの上に磁石を乗せ測定した。一つの試料に対し 5 回測定し、その平均を求めた。

液体窒素による保冷効果を確認するためにバルクに保持される液体窒素の量を測定した。まず冷却前にバルクの重量を測る。次にバルクを液体窒素中に入れ気泡が出なくなるまで十分に冷却した後、再びバルクの重量を測定し、その重量の差を求めた。

また走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いて試料表面の観察を行った。SEM を用いてバルクの空孔などを調べた。

3. 実験結果と考察

3.1 焼成温度と浮上特性

本焼成温度と密度比の関係を Fig.2 に示す。この図より焼成温度が高いほど密度比も高くなっていることが分かる。これは高温で焼結すると、結晶粒がより収縮するためだと思われる。

密度比と浮上時間の関係を Fig.3 に示す。密度比の低下に伴い、浮上時間が向上する傾向にあることがわかる。密度比が低いということはバルクに多数の空孔があると考えられる。この空孔内に液体窒素が入り込み保冷効果が高まったためではないかと考えられる。

密度比と浮上高さの関係を Fig.4 に示す。低密度化することにより浮上時間が向上した一方、浮上高さは低くなる結果となった。

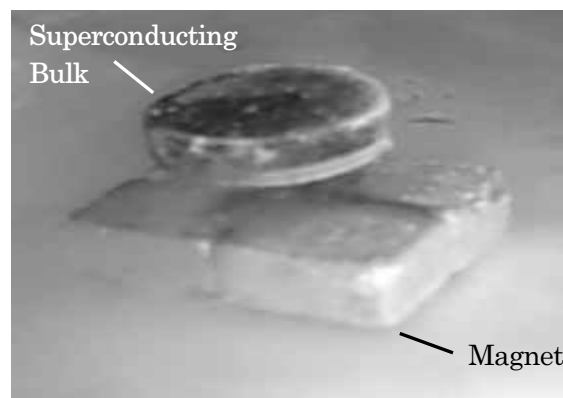


Fig.1 Magnetic levitation by Meissner effect

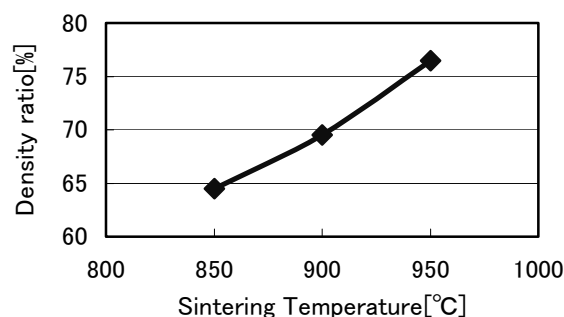


Fig.2 The relation of sintering temperature and density ratio

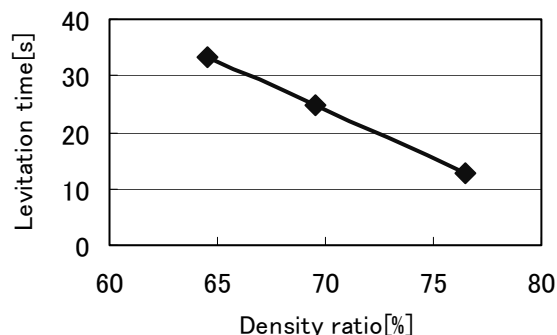


Fig.3 The relation of density ratio and levitation time

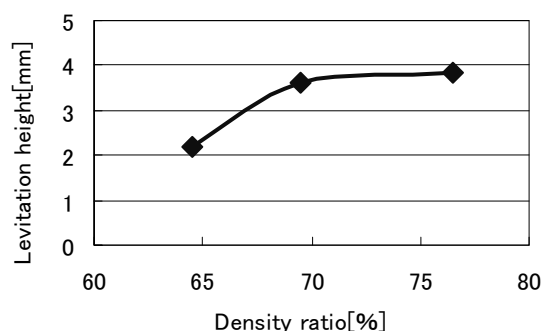


Fig.4 The relation of density ratio and levitation height

3.2 プレス圧と浮上特性

大型バルクを用いて測定したプレス圧と密度比の関係を Fig.5 に示す。この図からプレス圧を低くすることによって密度比が下がることがわかった。これによりプレスでの成型時の密度が本焼成後にも影響することが分かった。

大型バルクを用いて測定した密度比と浮上時間の関係を Fig.6 に示す。プレス圧による密度比の変化でも焼成温度変化時と同様に低密度化することにより浮上時間が向上することが分かった。

密度比とバルク内に保持される液体窒素量の関係を Fig.7 に示す。Fig.7 よりバルク内に液体窒素が入り込んでいることが確認できた。これは密度比の低下に伴い、単位体積あたりの液体窒素保持量が増加していることを示している。

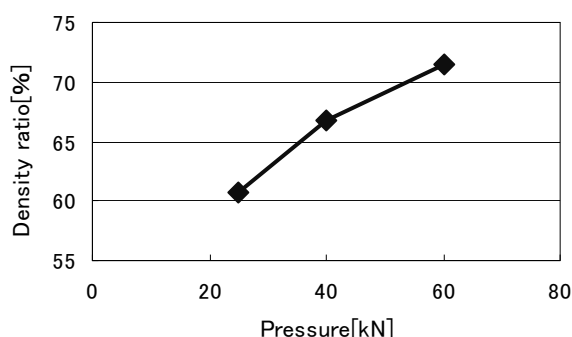


Fig.5 The relation of pressure and density ratio

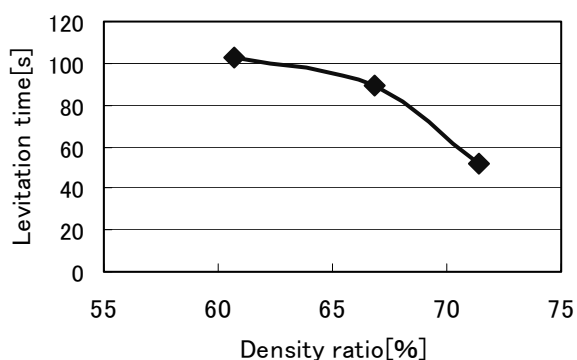


Fig.6 The relation of density ratio and levitation time

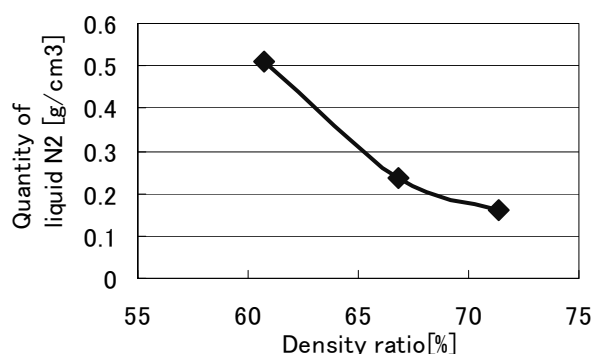
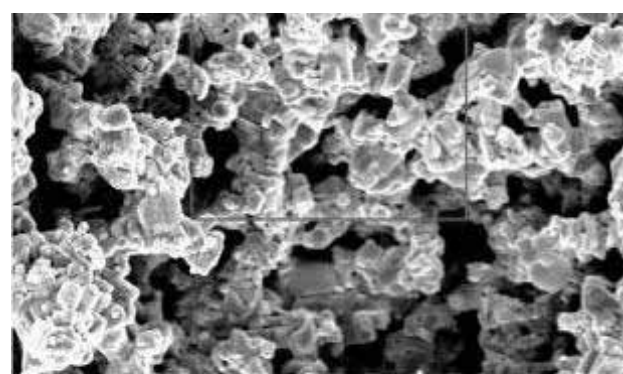


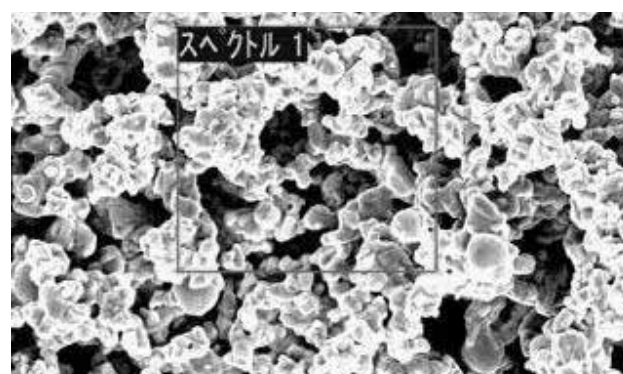
Fig.7 The relation of density ratio and quantity of liquid N₂

3.3 SEMによる表面観察

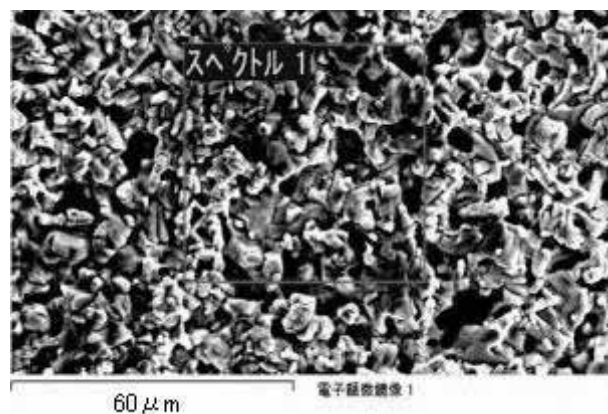
大型バルクの試料 SEM 写真を Fig.8 に示す。SEM 写真から実際にバルク内の空孔の様子を見ることができる。約 5 μm の超伝導の粒子が焼結することにより結合してバルクを形成している。その粒子と粒子の間に空孔が存在している。これらの空孔はプレス圧が低いときには大きく多数存在している。これはプレス圧が低いとき密度比も低くなった結果を裏付けている。



(a) Pressure 25[kN]



(b) Pressure 40[kN]



(c) Pressure 60[kN]

Fig.8 SEM images of bulks

バルク作製時の本焼成温度あるいはプレス圧を変化させることにより、密度を変化させることができる。そして密度を低くすることによりバルク内に空孔ができそこに液体窒素が保持され浮上時間が向上した。これは空孔内に液体窒素が入ることにより保冷効果が高まったためだと思われる。

液体窒素中で 77[K] に冷却されたバルクは臨界温度である約 90[K] になるまで浮上し続けると考えられる。Y123 の主成分である銅と液体窒素の単位体積あたりの比熱をくらべると銅 : $3.392 \text{ [J/cm}^3 \cdot \text{K]}$ 、液体窒素 : $0.839 \text{ [J/cm}^3 \cdot \text{K]}$ である。超伝導から常伝導に転移するまでに 13[K] の温度上昇を必要とするので、それぞれ必要な熱量は銅 : $44.1 \text{ [J/cm}^3]$ 、液体窒素 : $10.9 \text{ [J/cm}^3]$ と銅のほうが大きい。しかし液体窒素には気化熱があり単位体積あたり $160.6 \text{ [J/cm}^3]$ である。そのため合計すると銅 : $44.1 \text{ [J/cm}^3]$ に対し液体窒素 : $171.5 \text{ [J/cm}^3]$ となり液体窒素をバルク内に保有することにより保冷効果が高まる。

密度比の低下に伴い浮上高さが低下した。そもそもマイスナー効果とは超伝導体内部への外部磁場の侵入を完全に排除して内部磁場を 0 にすることである。そのため磁石の上に超伝導バルクを乗せると磁石の磁束を排除し、その反発力で浮上する。ここでバルクを低密度化すると常伝導である空孔の割合が増加する。常伝導は磁束を通すため一部で磁束が貫通し反発力が弱まり、浮上高さが低くなったと考えられる。

5. 結 論

焼成温度を低くするかプレス圧を低くすることにより、バルクの密度を低くすることができる。低密度化で多数の空孔があるバルクは、空孔に液体窒素を保持することができ保冷効果が高まる。そのためバルクの浮上時間が向上した。

また液体窒素中において多孔質のバルクは空孔内に液体窒素が入り込むため冷却効率が上がると思われる。ただし低密度化することによりバルクの強度の低下や浮上高さの低下を伴うことが分かった。

参 考 文 献

- 1) 下山淳一, 岸尾光二 : 酸化物超伝導体研究における物質化学の歩み, 応用物理, vol. 73, No. 1 (2004) 14-21
- 2) 円福敬二 : 磁性ナノ粒子をマーカーにした SQUID 免疫検査システム, 応用物理, vol. 73, No. 1 (2004) 28-31
- 3) D Cardwell, D Ginley, R F Giese : Handbook of Superconducting Materials, vol I I, (2003) 1625-1632