

# 高温超電導体の磁気シールド 解析に関する研究

木村 昭穂, 松坂 知行

## Study for Magnetic Shielding Analysis of Oxide Superconductor

Akio KIMURA and Tomoyuki MATUZAKA

### Abstract

An oxide superconductor has been studied and improved for practical application so far, and expected to be used for many applications. Magnetic shielding is one of their aspects, and noticed for its possibility of applications using the diamagnetic characteristics of superconductors. This paper presents the behavior of magnetic shielding on the basis of finite element model.

### 1. はじめに

酸化物系の超電導体は、液体窒素温度で超電導になることから、実用化へ向けた導体開発に力が注がれていると同時に、応用についても各方面で模索されている。なかでも磁気遮蔽は、超電導体を持つ反磁性の磁気的性質の応用として注目されている。その主な理由は、高いエネルギー密度を得るためにより大きな磁界が必要となった事による機器からの漏れ磁束の増加、リニアモータのように漏れ磁束密度の比較的大きな機器が増加しつつあることや、医療用高感度磁気センサーを利用した生体磁気計測のための磁場雑音の低減の要求からである。このような事から、電気機器や電力設備における漏れ磁界を減少させるためや、医療測定機器等の磁気遮蔽用としての応用が考えられている。磁気遮蔽の現象そのものについて従来の方法と比較を行う為には、解析的な立場からも検討が必要である。そこで、有限要素法を用いた数値解析手法

により、磁気シールドの効果について検討を行った。

### 2. 超電導体解析のための基礎方程式

本解析に適用している高温超電導体のモデルは、常電導体を支配する Maxwell 方程式, Ohm 方程式と, Ginzburg-London 理論<sup>1-3</sup> により表される。一般的な場合に全電流密度  $J$  は、常電流密度と超電流密度の和として、次式のように表される。ただし、 $J_n$  は常電導電流密度、 $J_s$  は超電導時のマイスナー電流密度である。

$$J = J_n + J_s \quad (1)$$

常電流密度は、Maxwell 方程式と Ohm の法則に従い、次式のように表される。ただし、 $\sigma'$  は常電導電流に伴った電導度である。

$$J_n = \sigma' E \quad (2)$$

超電導電流の電気力学を記述している London の式は、次式のように表される。ただし、 $\lambda_L$  は London の進入深さである。

$$\text{rot } J_s = -\frac{E}{\mu_0 \lambda_L^2} \quad (3)$$

$$j_s = \frac{E}{\mu_0 \lambda_L^2} \quad (4)$$

磁界印加時にマイスナー電流により超電導体に進入する磁束は排斥され、表面からの距離  $\lambda$  の磁束の進入に留まる。この進入長  $\lambda_L$  は、伝導電子密度  $n_s$ 、空気の透磁率  $\mu_0$ 、クーパー対電子の電荷  $e^*$ 、質量  $m^*$  より、次式のように表される。

$$\lambda_L = \sqrt{m^* / \mu_0 n_s e^{*2}} \quad (5)$$

以上の事を考慮すると高温超電導体の2次元場の支配方程式は、次式のように表される。

$$-\frac{\partial}{\partial x} (v_y \frac{\partial A}{\partial x}) - \frac{\partial}{\partial y} (v_x \frac{\partial A}{\partial y}) = J_o - \frac{v_o A}{\lambda_L^2} \quad (6)$$

但し、 $A$  は  $z$  方向成分の磁気ベクトルポテンシャル、 $J_n$  は  $z$  成分の電流密度

(6) 式をガラキン法を用いて定式化すと、次式のように表される。

$$G_i = \iint_s (v_y \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial A}{\partial x} + v_x \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial A}{\partial y}) dx dy - \iint_s N_i J_n dx dy + \iint_s \frac{v_o}{\lambda_L^2} N_i A dx dy \quad (7)$$

### 3. 解析結果

図1は、本解析に用いた磁気シールドの為の

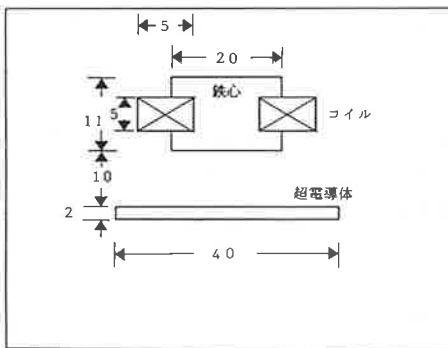


図1 超電導体の解析モデル  
Fig.1 The model for analysis of superconductor

構成図を示したものである。鉄心にコイルを巻き、直流磁場を発生させて、超電導体に垂直磁場を加えたときの、磁気効果について解析を行った。また鉄心と超電導体との距離は、任意に変えて行った。

図2は、超電導付近の分割図の一部分を示したものである。超電導体から1mm離れた位置に置ける任意の節点を印したものである。また、左から任意の節点の番号を1~21とした。

図3は、超電導体が存在しない場合の等ポテンシャル線を示したものである。これは、超電導体が存在しないときの磁束分布を知る為に行った。

図4は、鉄心から2mm離れた位置に置ける各節点の磁束密度を示したものである。図から判るように  $x$  方向成分の磁束密度は、鉄心の幅の両端に置いて大きくなり、中心で小さくなっている。 $y$  方向成分の磁束密度は、鉄心の部分では大きく、その両端で急激に減少している。最大磁束密度は約  $50 [10^{-3} \text{ T}]$  である。

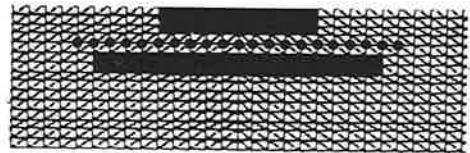


図2 超電導体付近の分割図  
Fig.2 Element subdivision for the area near superconductor

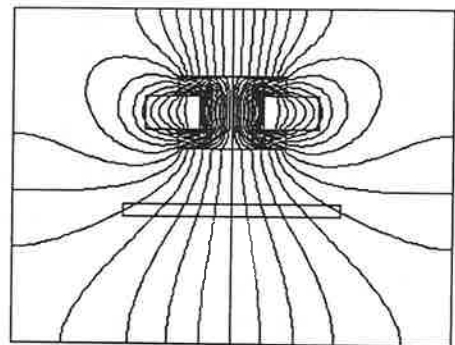


図3 磁束分布図(超電導体なし)  
Fig.3 Distribution of magnetic flux

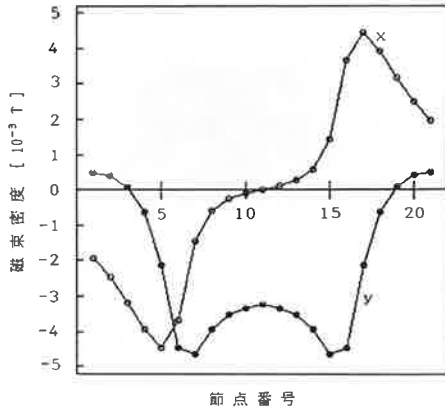


図4 磁束密度分布 (2 mm)  
Fig. 4 Magnetic flux density

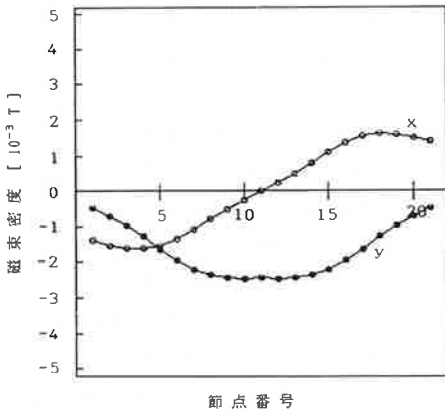
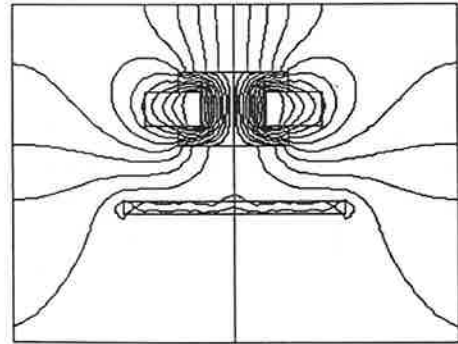


図5 磁束密度分布 (1 cm)  
Fig. 5 Magnetic flux density

図5は、鉄心から1 cm離れた位置に置く各節点磁束密度を示したものである。図から判るように  $x$  方向成分の磁束密度は、図4と同様の傾向にあることを示している。 $y$  方向成分の磁束密度は、鉄心の部分では大きく両端で減少している。最大磁束密度は約  $25 [10^{-3} \text{ T}]$  である。

解析は、超電導体を鉄心から 2 mm, 1 cm 離れた位置にあるときについて行った。

図6は、超電導体が鉄心から 1 cm 離れた位置に置けるときの磁束分布を示したものである。また、解析に用いた超電導の電子濃度は、 $n_s$



(  $n_s = 5 \times 10^{18}$  )

図6 磁束分布図  
Fig. 6 Distribution of magnetic flux

$= 5 [10^{18}]$  と仮定して行った。図より超電導体の中心を境に両端に磁束が押し曲げられ、超電導体内に磁束の進入が殆どないことがいえる。

図7は、超電導体から 1 mm 離れた位置の磁束密度の成分を示したものである。 $x$  方向成分の磁束密度が超電導体の両端において急激に大きくなっている。これは超電導体によって磁束が両側に押し曲げられたからである。 $y$  方向成分の磁束密度が中心付近に置いて上向きであるのは、超電導体のマイスナー電流による磁界によって発生した、反磁界の作用によるものと思われる。この上向きの磁界によってコイルの磁

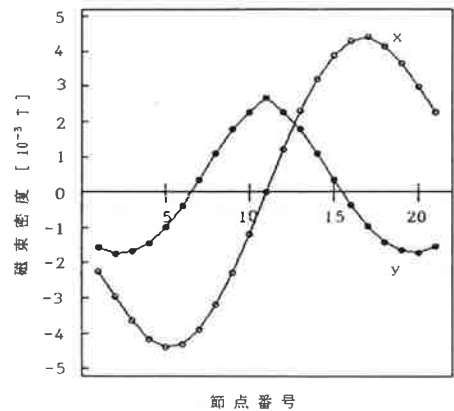


図7 磁束密度分布  
Fig. 7 Magnetic flux density

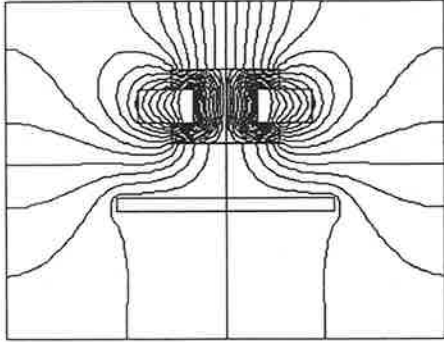


図8 磁束分布図  
Fig. 8 Distribution of magnetic flux

束が両側に押し曲げられたものと思われる。

図8は、マイスナー電流を考慮しないで、磁気抵抗率を用いて解析したときのものである。比透磁率は  $\eta_r = 0.02$  [H/m] として行った。磁束分布は、図5と同様に超電導体を中心に両端に押し曲げられている。

図9は、超電導体から1mm離れた位置に置けるときの各節点の磁束密度を示したものである。磁束が両端に押し曲げられるので、 $x$ 方向成分の磁束密度が両端で大きいことがいえる。図から判るように $y$ 方向成分の磁束は、超電導体の幅に置いて小さい事がいえる。

図10は、超電導体が鉄心から2mmの位置に置けるときの磁束分布を示したものである。

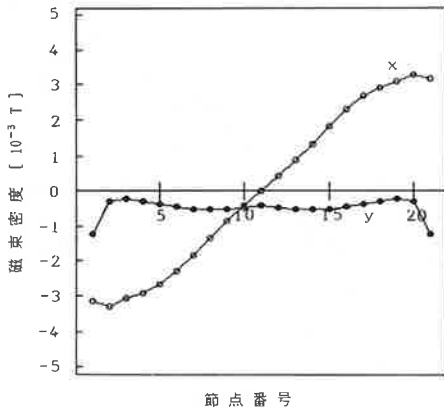
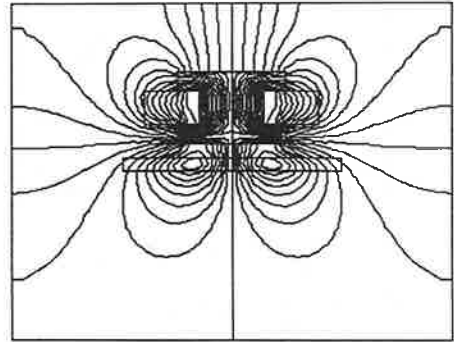


図9 磁束密度分布  
Fig. 9 Magnetic flux density



( $n_s = 5 \times 10^{18}$ )  
図10 磁束分布図  
Fig. 10 Distribution of magnetic flux

超電導体の電子濃度は  $n_s = 5 [10^{18}]$  である。図より印可磁場がマイスナー電流による磁界より大きいときには、超電導が破壊されコイルの磁束が進入する事がいえる。

図11は、各節点の磁束密度を示したものである。 $x$ 方向成分は両端で大きく、 $y$ 方向成分は両端付近で下向きの磁束が急に大きくなっている。これは、超電導体が端から壊れることを示している。また超電導体の中央付近で上向きの磁束が大きくなっているのは、導体の下より進入した磁束によるものと思われる。

図12は、超電導体の電子濃度が  $n_s = 5 [10^{28}]$

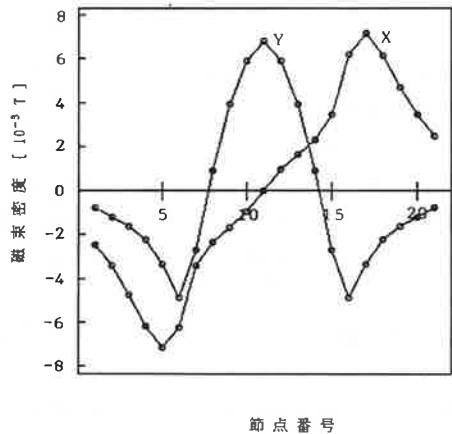
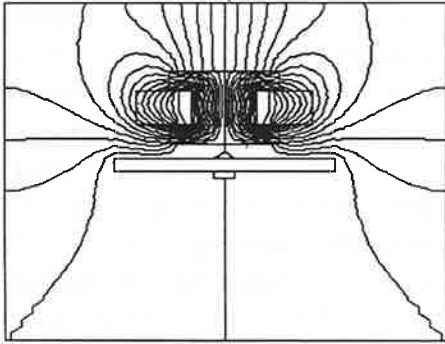


図11 磁束密度分布  
Fig. 11 Magnetic flux density



( $n_s = 5 \times 10^{23}$ )

図 12 磁束分布図  
Fig. 12 Distribution of magnetic flux

のときの磁束分布を示したものである。超電導体側のコイルの磁束が両端に押し曲げられて、超電導体として働いていることが判る。これより、電子濃度が増すと、マイスナー電流が大きくなり、超電導を維持することが判る。

図 13 は、各節点の磁束密度の大きさを示したものである。 $x$  方向成分の磁束密度が超電導体の両端で大きく、中央で小さくなっている。同様に  $y$  方向成分の磁束密度は、全般的に小さくなっている。コイルの磁束が、超電導体の磁界によって、 $x$  方向に押し曲げられた事によるものである。

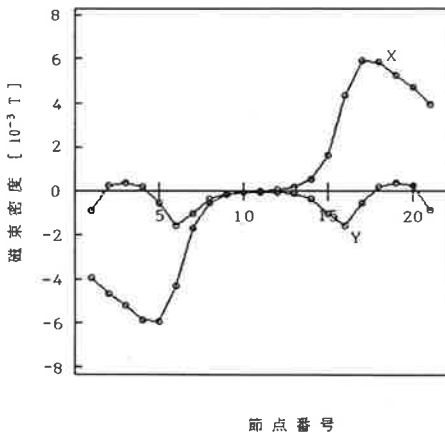
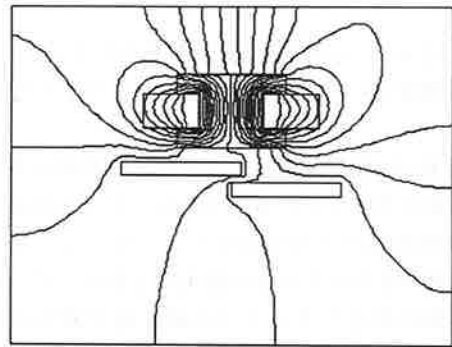


図 13 磁束密度分布  
Fig. 13 Magnetic flux density

酸化物超電導体は、大きな物を作ることが困難であるので、磁気遮蔽用として利用する場合には、重ねる等して利用しなければならない。そのような事から、超電導体を重ねたならば、磁束分布がどのようになるか行ってみた。

図 14 は、超電導体を 2 個重ね合わせたときに、接合部分から磁束がどのように漏れるかを知るために行ったものである。超電導体間の隙間を 1 mm として行った。図から判るように隙間から磁束が漏れていることがいえる。

図 15 は、超電導体の上側の部分の各節点の番号の磁束分布を示したものである。節点の番号



( $\mu r = 0.002$ )

図 14 磁束分布図  
Fig. 14 Distribution of magnetic flux

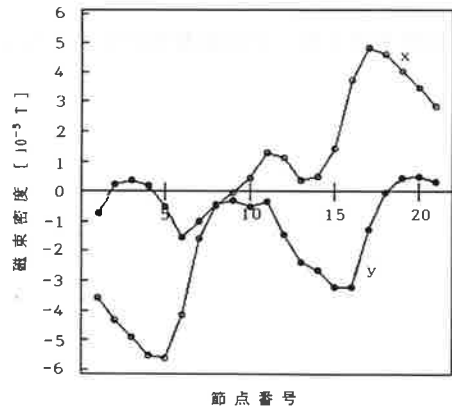


図 15 磁束密度分布  
Fig. 15 Magnetic flux density

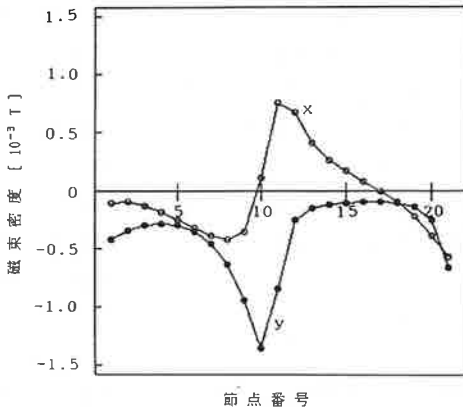


図 16 磁束密度分布  
Fig. 16 Magnetic flux density

15 付近の  $y$  方向成分の磁束密度が大きいのは、垂直間方向への磁束の流れが生じたからである。

図 16 は、超電導体の下側の部分の各節点番号の磁束分布を示したものである。 $x, y$  方向成分の磁束密度が中央付近で大きくなっているのは、接合部分からの漏れ磁束によるもので、超電導体が存在しないときの最大磁束密度の約 22% の磁束が漏れている。このような事から、重ねて使用する場合には、何か工夫が必要であることがいえる。

#### 4. ま と め

有限要素法を用いて超電導体の定式化をし、

解析を行った。有限要素法を用いて超電導体を解析する場合には、超電導体をマイスナー電流で取り扱う方法と、磁気抵抗率で取り扱う方法とがある。マイスナー電流を用いて解析すると、マイスナー電流による反磁界によって磁束が、超電導体に進入しにくいことがいえる。また磁気抵抗率を用いて解析すると、マイスナー電流が流れないので、反磁界作用による効果が現れないことがいえる。しかし、その違いを確認するためには、磁束分布だけではなく、超電導体の表面近くの磁束密度を調べてみる必要がある。有限要素法を用いて超電導体を解析する場合には、マイスナー電流を用いた解析が、超電導体の反磁性体としての電気的特性を表しているように思われる。今後実験的な立場からも検討することが必要である。

#### 参 考 文 献

- 1) 島本進, 安河内昇: 超電導入門, 産業図書, 昭和 53 年
- 2) 鳥居, 大崎, 正田酸: 化物系超電導体の生磁気遮蔽効果解析のための数値モデル, シミュレーション学会論文, p. 73-80 (1991)
- 3) M. Marinescu, N. Marinescu, J. Tenbrink, H. Krauth: PASSIVE AXIAL STABILIZATION OF A MAGNETIC RADIAL BEARING BY SUPERCONDUCTORS, IEEE. Trans. Mag. Vol. 25, 3233-3235, 1989