

銀被覆加工法を用いた新しい円筒型 高温超伝導磁気シールドの作製と評価

豊橋技術科学大学 工学部 電気・電子工学科

教授 太田昭男

(昭和63年度研究開発助成 AF-92006)

1. 緒言

超伝導体の示す完全反磁性の性質(マイスナー効果)を利用すれば、 μ メタル等の高透磁率材料と比べて、はるかに高性能な磁気シールドを作製することができる¹⁾。超伝導磁気シールドは、高温超伝導が最も早く実用化される産業用機器のひとつとして期待され、世界各国で活発な研究開発が行われている。

本報告では、超伝導線材の開発に用いられる銀被覆加工法²⁾を応用して、臨界温度 T_c が110 [K] (氷点下163 [°C])のビスマス系酸化物高温超伝導体³⁾を用いて全く新しい円筒型高温超伝導磁気シールドを試作し、その磁気遮蔽性能を磁気コイル法により系統的に評価する。また、強磁性体等と組み合わせた場合の遮蔽特性についても比較・検討する。

研究の対象とする磁気シールドは、使用する超硬ダイスの取り替えにより、断面形状を円筒形だけでなく矩形や楕円形等にも変化させることができ、また細くて長い中空ファイバー状に長尺化することも可能であるため、広範囲な用途展開が期待される。

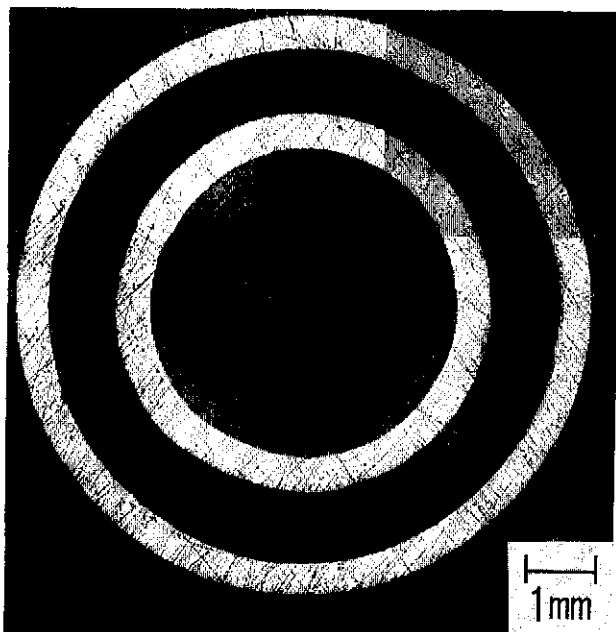


図1 試料の断面写真の一例

2. 実験方法

2.1 試験体の作製

試験体を作製するための出発原料として、同和鉱業(株)より入手した $\text{Bi}_{1.8}\text{Pb}_{0.4}\text{Sr}_{2.0}\text{Ca}_{2.2}\text{Cu}_{3.0}\text{O}_x$ 組成の共沈粉を使用する。原料を790 [°C]で仮焼した後、銀パイプ(外径9 [mm]、内径8 [mm])と銀パイプ(外径6 [mm]、内径5 [mm])を同軸状に組み合わせた隙間に封入し、銀/コンポジットを作製する。このコンポジットをスエージャーと線引き機を用いて塑性加工した後、830 [°C]で100 [h]の焼結を実施する。再び塑性加工を実施し、830 [°C]で時間を変化させて焼結して試験体試料とする。作製した試験体試料の断面写真の一例を図1に示す。

試料の臨界電流 I_c は、直流四端子法を用いて1 [$\mu\text{V}/\text{cm}$]のクライテリオンにより決定する。また臨界電流密度 J_c は、これを超伝導体部分の断面積で割って算出する。

2.2 磁気遮蔽特性の測定

試料の磁気遮蔽特性を調べるため、交流磁場のもとで磁気コイル(ピックアップ・コイル)に誘導される誘導電圧を測定する。図2に測定回路を示す。2組のコイルを組み合わせたヘルムホルツ型コイルに交流磁場(周波数: 50 [Hz])を発生させる。ヘルムホルツ型コイルの中央部に磁気シールド体を配置して液体窒素に浸し、円筒空芯部中央

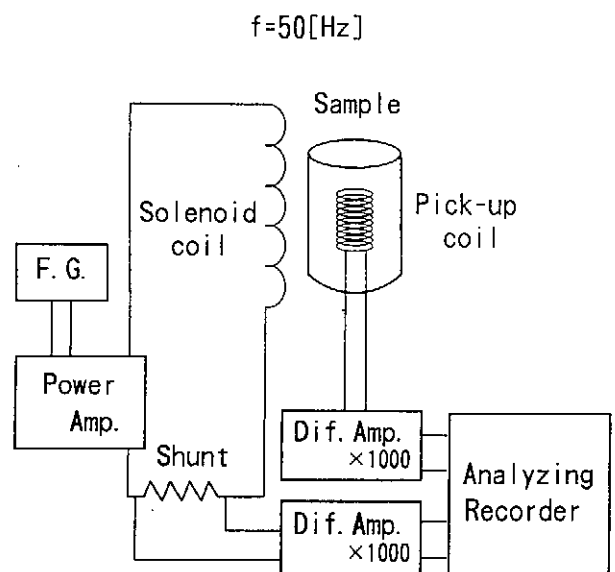


図2 磁気遮蔽特性の測定回路

に配置した磁気コイルに誘導される誘導電圧 V_s を差動増幅器で増幅し、アナライジング・レコーダーで測定する。磁気シールド体が無い場合の誘導電圧 V_{ex} と比較して磁気遮蔽率 η を

$$\eta = \left(1 - \frac{V_s}{V_{ex}}\right) \times 100 \quad [\%] \quad (1)$$

により決定する。

印加磁場が磁気シールド体内部に進入したときの磁界の波形についても考察する。波形観察の方法は、測定回路(図2)に示す磁気コイルの誘導電圧波形とシャント抵抗を流れる電流波形を、それぞれ増幅器で増幅してアナライジング・レコーダーで記録する。記録されたデータは、実測値から磁場の大きさに変換して評価する。

磁気コイルの巻き数を n 、断面積を S とすれば、電磁誘導の法則より磁気コイルの電圧 $V(t)$ とシールド体内部の磁場 $B(t)$ の間には

$$V(t) = -nS \frac{dB(t)}{dt} \quad (2)$$

の関係が成り立つ。したがって、 $B(t)$ は $V(t)$ の時間積分によって表されるが、シールド体が無い場合の印加磁場と誘導電圧の関係を用いれば

$$B(t) = -2.86 \times 10^6 \int V(t) dt \quad (3)$$

となる。また、強磁性体との複合磁気シールド体についても上記と同様の波形観測を行い、遮蔽特性を評価する。

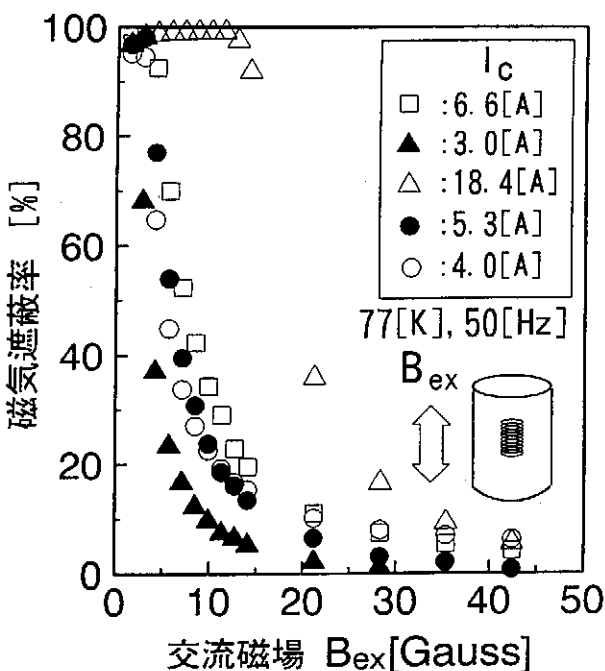


図3 磁気遮蔽率の磁場依存性

3. 実験結果と考察

3.1 磁気遮蔽率の磁場依存性

磁気遮蔽率 η の印加磁場依存性を図3に示す。図3より、 I_c の高い試料ほど高磁界までシールドできることがわかる。ちなみに、 $I_c = 18.4$ [A] (すなわち $J_c = 92.4$ [A/cm²]) の試料の場合には約12 [G] までシールド効果可能である。図3に示す磁気遮蔽特性をさらに検討するため、超伝導体内部の磁束密度分布について考察しよう。銀は非磁性であるから、超伝導円筒を囲む銀部分は磁束の運動に関しては全く影響を及ぼさない事に注意してほしい。いま、外部磁場 B_{ex} を印加すると、磁束は超伝導円筒の外壁から内部に進入するが、磁束が円筒の内壁に達するまでは磁気コイルのある空芯部は完全に遮蔽されている。しかし、磁場 B_{ex} が上昇してある閾値 B_p を越えると磁束は空芯部にまで進入し、遮蔽は不完全になる。この閾値は、磁束が内壁に到達したときの外部磁場の大きさとして計算され、超伝導体の磁束分布を説明する臨界状態モデル^{4,5)}によれば

$$B_p = \mu_0 J_c d \quad (4)$$

となる。式(4)より、 I_c の高い試料ほど B_p は高くなり高磁場まで遮蔽されることになり、図3の結果と符合する。ちなみに、 $I_c = 18.4$ [A] の試料に対する B_p 値は、11.7 [G] である。

3.2 シールド内部の磁場波形

3.1節では外部磁場 B_{ex} が B_p を越えない範囲での遮蔽特性について考察したが、本節では B_{ex} が上昇して B_p を越え磁束が空芯部に進入している場合を考えよう。図4は、 $I_c = 18.4$ [A] の試料において、磁場実効値 B_{ex} が15 [G] 及び30 [G] の場合の空芯部における内部磁場波形を示す。正弦波は外部磁場を表しており、内部磁場はある間隔をもってこれについてくるが、外部磁場がピークを過ぎて減少すると内部磁場は変化せず一定になる。外部磁場が内部磁場に対してある間隔 Δ を越えると、内部磁場はこの間隔を保ちながらついてくる。この振る舞いが周期的に繰り返されることになる。臨界状態モデルに基づいた波形解析の結果によれば、間隔 Δ は式(4)で定義した B_p 値と一致するため、試料の B_p 値 = (11.7 [G]) を矢印で図4の波形上に表示する。間隔 Δ が B_p によって定性的に説明できることは明らかである。図5は同じ外部磁場のもとで、異なる試料の結果を示す。 I_c の高い試料ほど間隔 Δ は大きくなるが、これは B_p の振舞いと一致する。以上の結果より、磁束が空芯部に進入しているところでは、 B_p がきわめて重要な値であることが分かる。

磁束が空芯部に進入している場合の磁気遮蔽率 η は、理

論的には

$$\eta = \left[1 - \sqrt{1 - \frac{\theta_1}{\pi} + \frac{1}{2\pi} \sin 2\theta_1} \right] \times 100 \quad [\%] \quad (5)$$

となる。ここで、 θ_1 は

$$B_{ex} = \frac{2B_p}{1 - \cos \theta_1} \quad (6)$$

より決定される。全ての試料の磁気遮蔽率 η の規格化磁場依存性と理論式(6)の比較を図6に示す。 $B_{ex} > B_p$ の場合には空芯部にまで磁束が進入するが、このときの遮蔽特性は臨界状態モデル^{4,5)}から求めた理論曲線と定性的に一致する。理論曲線との僅かなずれは、臨界電流と遮蔽電流の流れる方向の違いによるものと考えられる。図6の結果から、

遮蔽特性は B_p 値(すなわち試料の臨界電流密度 J_c と超伝導層の厚さ d)によって決定されるため、目的に応じたシールド体を作製することが可能となる。

3.3 複合型磁気シールドの遮蔽特性

超伝導磁気シールドの遮蔽性能を向上させるため、試験体の外側に軟鉄製の円筒を重ねた複合型磁気シールドを構成し、その磁気遮蔽性能を測定した。複合型磁気シールドの内部磁場波形を図7に示す。試験体のみの場合の波形(図4)と異なり、外部磁場がピークに達した後減少に転じると内部磁場もともに減少するが、これは軟鉄のヒステリシスによる振舞いを反映したものと考えられる。図8に示すように、複合型磁気シールドの場合には約120[G]まではほぼ完全な磁気遮蔽が達成され、試験体のみの場合と比べて遮蔽磁場範囲は約10倍に拡大される。

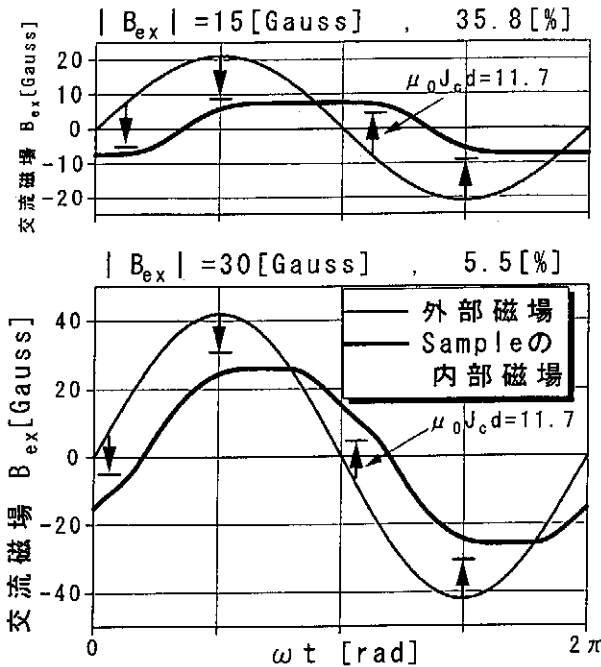


図4 異なる外部磁場のもとでの内部磁場波形

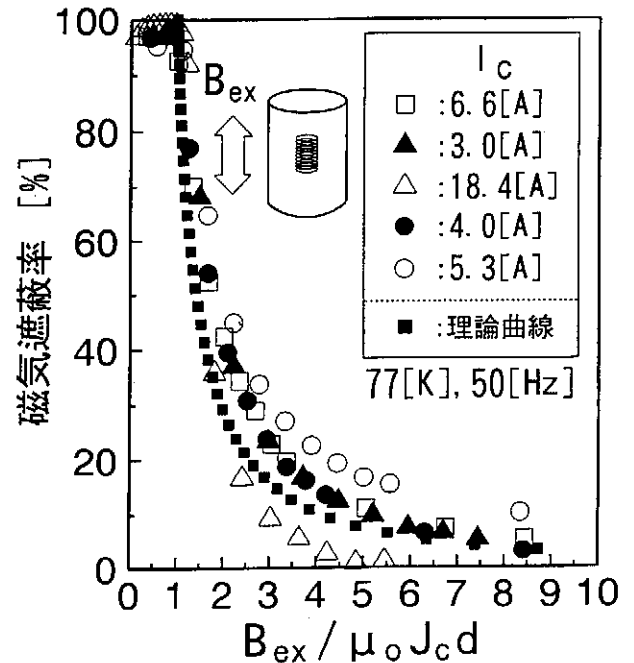


図6 磁気遮蔽率の規格化磁場依存性

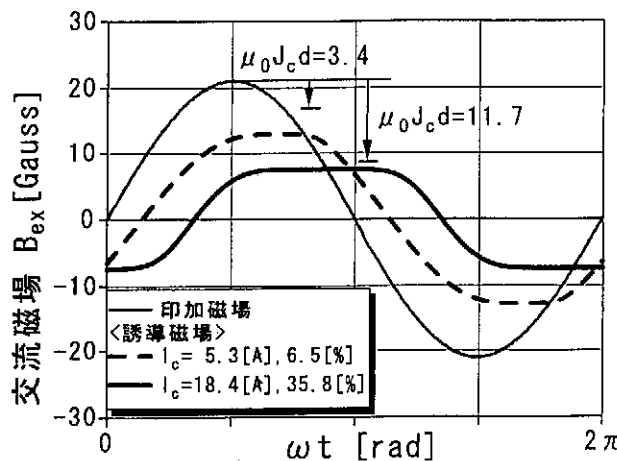


図5 異なる試料に対する同じ外部磁場のもとでの内部磁場波形

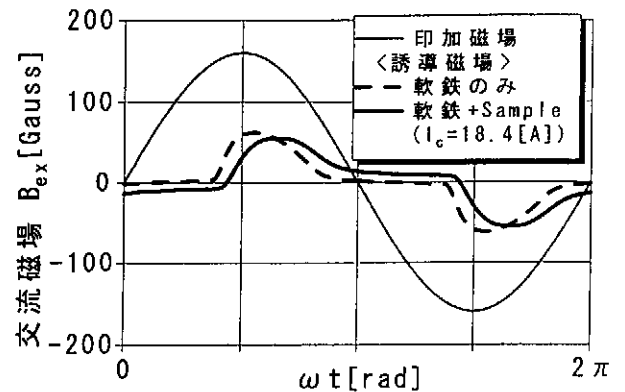


図7 軟鉄との複合による内部磁場波形の変化

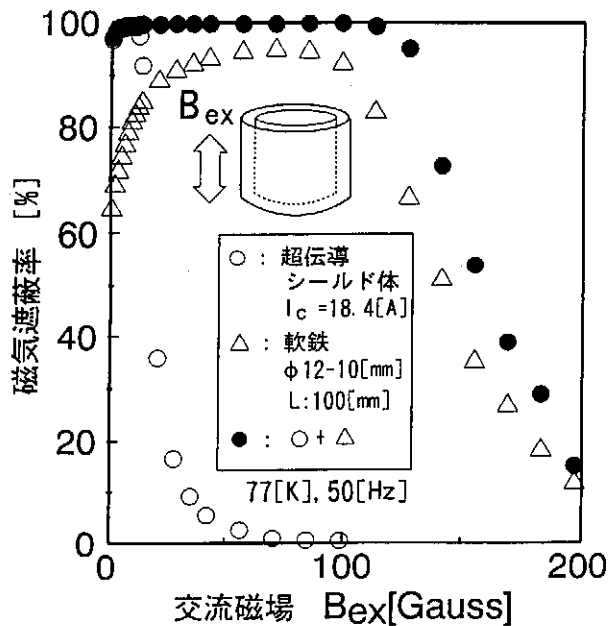


図8 軟鉄との複合による磁気遮蔽性能の向上

4. 結論

長尺化が容易で、様々な形状に柔軟に対応できる銀被覆加工法を用いて超伝導磁気シールドを作製し、その磁気遮蔽特性を系統的に研究した。作製した磁気シールドの遮蔽特性は、臨界状態モデル^{4,5)}に基づいた理論式にしたがい、臨界電流密度 J_c と超伝導体の厚さにより決定されるため、目的に応じたシールド体を作製することができる。

超伝導磁気シールドのみの場合には、最大約 12 [G] までシールド効果が得られたが、試料の外側に軟鉄を重ねた複合型シールドとすると、約 120 [G] までシールド効果が観測され、試料のみの場合と比べて約 10 倍の改善がなされた。今回作製した試料の J_c 値は最大で $J_c = 92.3$ [A/cm²] であり、実用化を目指すには J_c 値の一層の向上を図る必要がある。併せて、超伝導磁気シールドを強磁性材料と組み合わせるとすれば、遮蔽性能の飛躍的な向上も期待できる。

本研究は天田金属加工機械技術振興財団の助成によって実施されたことを付記するとともに、同財団に深謝いたします。

参考文献

- 1) 星野友和：電気学会論文誌 D113 巻 8 号 (1993)、pp. 947.
- 2) A.Oota, J.Iwaya, P.Songsak, T.Saigou and M. Funakura : PhysicaC214 (1993), pp.9.
- 3) H.Maeda, Y.Tanaka, M.Fukutomi and T.Asano : Jpn. J.Appl.Phys.27 (1988)、pp.L209
- 4) C.P.Bean : Rev.Mod.Phys.36 (1964), pp.31.
- 5) W.J.Carr, Jr : AC Loss and Macroscopic Theory of Superconductors (Gordon and Breach, New York, 1983), pp.39.