

組成の異なる金属ガラスが有する比透磁率と磁気シールド性能の評価

Evaluation of relative permeability and magnetic shielding performance of Glassy alloy varying in composition

田代 晋久^{*1}(正員), 脇若 弘之^{*1}(正員), 中野 亮^{*1}, 五十嵐 貴教^{*2}, 石川 智仁^{*2}, 牧野 彰宏^{*3}Kunihisa TASHIRO (Mem.), Hiroyuki WAKIWAKA (Mem.), Ryo NAKANO,
Takanori IGARASHI, Tomohito ISHIKAWA, Akihiro MAKINO

Glassy alloys have exceptional soft magnetic properties. It has an advantage that shaping is possible by thermal spraying method and ideal coercive force of Glassy alloys is zero as same as other amorphous metals. Glassy alloy's magnetic properties will be improved by control of internal stress and grant of induced magnetic anisotropy with heat treatment. In this paper, we fabricated ring and cylinder samples of two kinds Glassy alloys and evaluated its magnetic property. As a result, we found the relative permeability of ring samples is about 400 and that of cylinder samples is about 120. Residual magnetization of cylindrical magnetic shield is about 0.10 mT. Transverse shielding factor for AC magnetic field is about 10.

Keywords: Glassy alloy, composition, relative permeability, magnetic shielding.

1 緒言

磁気シールド性能は使用する磁性材料の透磁率だけでなく、磁性体の形状に依存する[1]。高い透磁率を有し、様々な形状に加工可能な材料によって磁気シールドの設計自由度は大きく向上する。著者らは金属ガラスの有する優れた軟磁気特性の可能性と、溶射により自由な形状が製作可能な利点を生かし、磁気シールド材料への応用を検討している[2]。臨界冷却速度の問題から、従来の Fe 基および Co 基強磁性非晶質合金の形状は、薄帯、線材、あるいは粉末に限られていた。一方、Fe 基および Co 基金属ガラスでは、バルク材の製作も可能である。また、非晶質合金と同じく理想的な金属ガラスの保磁力はゼロであり、熱処理等による内部応力制御や誘導磁気異方性の付与により、軟磁気特性の向上が期待できる[3]。

これまで、溶射によって製作した金属ガラス製円筒磁気シールドの製作及び性能評価を通し、熱処理の有用性及び比透磁率を明らかにした[2]。同様にアルミ円筒に溶射を用いて円筒磁気シールドを製作し、そのシールド性能についても評価した[4]。得られる比透磁率向上のため、組成及び熱処理の比較・検討を行っている[5, 6]。

本報告では、金属ガラスを HVOF 溶射[7]で製作した

連絡先: 田代 晋久, 〒380-8553 長野県長野市若里 4-17-1,
信州大学工学部 電気電子工学科
e-mail: tashiro@shinshu-u.ac.jp

^{*1}信州大学 ^{*2}㈱トピー工業 ^{*3}東北大学

リング試料(以降、リング試料)及び金属ガラスを HVOF 溶射で製作した円筒試料(以降、円筒試料)を製作し、2種類の形状での磁気特性を比較した。熱処理条件を同一とした場合に、組成の差異による磁気特性についても比較・検討した。磁気シールド材料として広く用いられる PC permalloy との比較を通して、磁気シールド性能についても評価したので報告する。

2 原理

2.1 リング試料の比透磁率・増分透磁率

Fig. 1 にリング試料の比透磁率測定方法の原理を示す。励磁コイルに電流 I (A) を流す。励磁コイルが作る磁界 H (A/m) はアンペールの周回積分から式(1)で与えられる。ここで、 N_1 (turn) は励磁側コイルの巻数、 D (m) はリング試料の平均直径である。検出コイルで計測される磁束密度 B (T) はファラデーの電磁誘導の法則から式(2)で与えられる。ここで、 V (V) は検出コイルの出力電圧、 f (Hz) は電圧の周波数、 N_2 (turn) は検出コイルの巻数、 A (m²) は磁性体の断面積である。式(1)(2)で求められた H (A/m)、 B (T) 及び真空の透磁率 $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m を式(3)に代入することで比透磁率を算出することができる。本論文では、マイナーループに対する比透磁率を対象とする。すなわち、比透磁率を正弦波の励磁電流に対応した正弦波の誘起電圧により算出する。磁気シールドの応用では、初透磁率あるいは直流偏磁を含む増分透磁率 μ_Δ が重要となる。増分透磁

率は B - H 特性の任意の点における微小な磁界変化 ΔH (A/m) に対する微小な磁束密度変化 ΔB (T) の比で式(4)のように定義される[8]。本論文では磁壁移動の可逆領域に対応する比透磁率の下限値を増分透磁率と定義する。

$$H = \frac{N_1 I}{\pi D} \quad (\text{A/m}) \quad (1)$$

$$B = \frac{V}{2\pi N_2 A} \quad (\text{T}) \quad (2)$$

$$\mu_r = \frac{B}{\mu_0 H} \quad (3)$$

$$\mu_\Delta = \frac{\Delta B}{\mu_0 \Delta H} \quad (4)$$

2.2 円筒試料の比透磁率

Fig. 2 に円筒形状の磁性体の比透磁率測定方法の原理を示す。Fig. 2 (a)に示すように励磁用の導線に電流 I (A)を流す。この時導線が作る磁界 H (A/m)は式(5)で与えられる。ここで、 r (m)は導線からの距離である。Fig. 2 (b)に示すように円筒形状の磁性体を配置する。磁性体内部を通る磁束 φ (Wb)は式(6)で与えられる。ここで、 D_o (m)は円筒の外径、 D_i (m)は円筒の内径、 h (m)は円筒の長さである。Fig. 2 (c)に示すように検出コイルとして円筒形状の磁性体にコイルを巻きつける。励磁用の導線に流す電流が交流である場合、検出コイルに誘起される電圧 V_2 (V)は式(7)で与えられる。このように、誘起電圧、円筒の寸法及び励磁側の電流から比透磁率を見積もることができる。

$$H = \frac{I}{2\pi r} \quad (\text{A/m}) \quad (5)$$

$$\varphi = BS = \int_{D_i/2}^{D_o/2} \frac{\mu_r \mu_0 h I}{2\pi} dr = \frac{\mu_r \mu_0 h I}{2\pi} \ln \frac{D_o}{D_i} \quad (\text{Wb}) \quad (6)$$

$$V_2 = \left| N_2 \frac{d\varphi}{dt} \right| = N_2 \frac{\mu_r \mu_0 h I}{2\pi} \ln \frac{D_o}{D_i} \frac{dI}{dt} \quad (\text{V}) \quad (7)$$

2.3 円筒磁気シールド

磁気シールドの性能評価にはシールド比(Shielding Factor, SF)が用いられる。シールド比は式(8)のように定義されている。ここで H_{ex} (A/m)は外部磁界、 H_{in} (A/m)はシールドの内部磁界である。

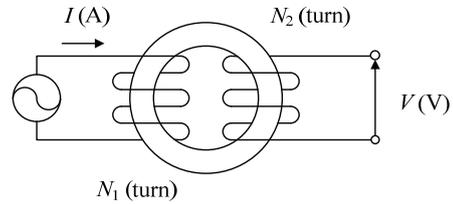
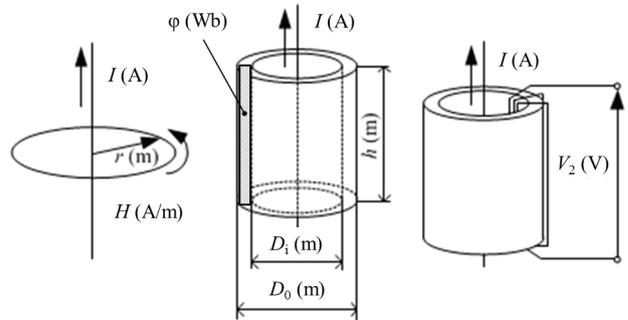


Fig. 1 Schematic design of measurement setup for ring samples.



(a) Magnetic field (b) Magnetic flux (c) Induce voltage

Fig. 2 Schematic design of measurement setup for tube samples.

$$SF = \frac{H_{ex}}{H_{in}} = \frac{\mu_0 H_{ex}}{\mu_0 H_{in}} \quad (8)$$

円筒磁気シールド内の径方向シールド比(Transverse Shielding Factor, TSF)は、式(9)で与えられる。 TSF はFig. 3 に示す外部磁界方向、シールド内部の磁界方向の場合のシールド比を指す。 TSF は式(10)で与えられる S_{opT} 及び、式(11)で与えられる S_T で表現される。ここで S_T は無限長円筒シールドでのシールド比、 S_{opT} は開口端の影響を考慮したシールド比、 k_T は定数、 L (m)は円筒の長さ、 l (m)は開口端からの距離、 t (m)が磁性体の厚みである。 k_T は、理論値($k_T = 3.832$)および実測から得られた推奨値($k_T = 3.52$)が示されている。理論式として $k_T = 3.52$ を採用した[9, 10]。

$$\frac{1}{TSF} = \frac{1}{S_T} + \frac{1}{S_{opT}} \quad (9)$$

$$S_{opT} = \frac{3}{\exp\left[-k_T\left(\frac{2l}{D_i}\right)\right] + \exp\left[-k_T\left(\frac{2(L-l)}{D_i}\right)\right]} \quad (10)$$

$$S_T = 1 + \frac{\mu_1 t}{D_i} \quad (11)$$

3 実験方法

3.1 比透磁率・増分透磁率測定

Table 1 に試料の組成及び熱処理条件を、Table 2 に試料の寸法を示す。2 種類の形状の試料を用意した。一方は円環形状(Ring)のもの、他方は円筒形状(Tube)のものである。組成は 2 種類あり、それぞれ $Fe_{76}Si_{5.7}B_{9.5}P_{5.8}C_{3.8}$ (以降, C), $Fe_{72}Si_{9.6}B_{14.4}Nb_4$ (以降, Nb)である。結晶化温度とガラス遷移温度の差で表される過冷却液体温度領域 ΔT_x は, C 及び Nb のどちらも溶射に十分な $50\text{ }^\circ\text{C}$ 程度である[11, 12]。金属ガラスは過冷却液体での低粘性流動性を持ち、低温高速な溶射プロセスの抛って大気中においても酸化を抑えて緻密なガラス相被膜を形成することが可能である[7]。内部応力除去のため、熱処理($450\text{ }^\circ\text{C} \times 1\text{ h}$)を施してある。Fig. 4 に試料の外観を示す。

Fig. 5(a)にリング試料の増分透磁率及び比透磁率測定概略図を示す。励磁用コイルと検出コイルをそれぞれ 100 回巻きつけた。励磁側には、発振器(NF 社製, WF1946)とシャント抵抗を接続し、シャント抵抗の両端電圧をオシロスコープ(Tecktronix 社製, TPS2014)を用いて測定し、励磁電流を計測した。印加磁界 H (A/m) は $2 \sim 400\text{ A/m}$ の範囲で変化させた。周波数 f (Hz) は 100 Hz で実験を行った。検出側には FFT アナライザ(ONO SOKKI 社製, CF-930)を接続し出力電圧を測定した。

Fig. 5(b)に円筒試料の増分透磁率及び比透磁率測定概略図を示す。円筒形状での増分透磁率及び比透磁率を測定するため、励磁用に導線を円筒試料の中に通し、30 回巻の検出コイルを巻いた。励磁側の導線に交流電流を流し、検出コイルの出力電圧から比透磁率を求めた。この時の電流の周波数は 60 Hz である。電流の大きさを 100 mA から 1 A まで 100 mA ごとに変化させた。なお、比較として同形状の PC permalloy 円筒シールド (Tube PC)を用意し、比透磁率、増分透磁率、および後述の磁気シールド性能を評価した。

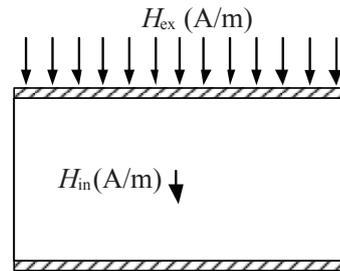


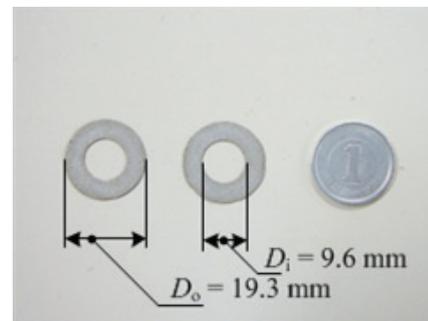
Fig. 3 Definition of external magnetic field and internal magnetic field for cylindrical magnetic shield.

Table 1 Specifications of samples.

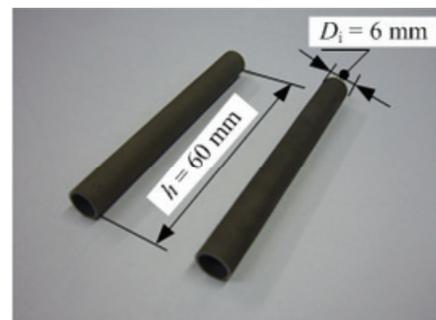
Sample name	Composition	Heat treatment	ΔT_x ($^\circ\text{C}$)
Ring C	$Fe_{76}Si_{5.7}B_{9.5}P_{5.8}C_{3.8}$	$450\text{ }^\circ\text{C} \times 1\text{ h}$	about 50
Tube C			
Ring Nb	$Fe_{72}Si_{9.6}B_{14.4}Nb_4$	(Unknown)	-
Tube Nb			
Tube PC	$Fe_{14}Ni_{78}Mo_{4.5}Cu_{3.5}$	(Unknown)	-

Table 2 Size of tube samples.

Parameter	Value	
	Ring	Tube
Inner diameter, D_i (mm)	9.6	6
Outer diameter, D_o (mm)	19.3	7.2
Mean diameter, D (mm)	14.5	6.6
Height, h (mm)	0.2	60
Cross section, A (mm^2)	0.97	36



(a) Ring



(b) Tube

Fig. 4 Photos of samples.

3.2 磁気シールド性能評価

磁気シールド性能は、外部磁界が直流であるか交流であるかによって大きく変化する。外部磁界が地磁気などの直流の場合、磁性体の有する残留磁化によってシールド性能が制限される[10, 13]。送配電線から発生する商用周波数の磁気ノイズなどの交流磁界の場合には、磁性材料の透磁率や電気抵抗率に依存する。外部磁界が直流磁界の場合と交流磁界の 2 つの場合に分けてシールド性能を評価した。直流に対するシールド性能は、試料に直流磁界を印加した際の内部磁束密度を測定し、磁性体に起因する残留磁束密度を測定することで評価した。Fig. 6 に示すように対向配置磁石を用いた磁界発生装置の中心軸からの距離を変化させながら円筒中心における内部磁束密度を測定した。磁界発生装置として、軟磁性体を挟み込んだ対向配置磁石[14, 15]を使用した。この磁界発生装置は、円筒形状であり、その側面から磁界が発生する。円筒中心からの距離 r (m) を変化させることでシールドへ印加する磁界の大きさを変化させることが可能である。今回用いる磁界測定器(KANETEC 社製, TM-701)の分解能が μT オーダであるため、外部磁界の大きさは mT オーダとして実験を行った。交流に対するシールド性能は、増分透磁率及び比透磁率測定の結果及び式(9)～(11)を用いてシールド性能を見積もった。

4 実験結果

4.1 比透磁率・増分透磁率

Fig. 7(a)にリング試料の比透磁率測定結果を示した。図中のエラーバーは 3 回の実験結果を加算平均し、その時の振れ幅を示したものである。10 A/m 以下の磁界に対し、比透磁率は一定となった。これより、増分透磁率 μ_Δ は、Ring C で 400 程度と見積もられた。Ring Nb は、Ring C の値の 1 割程度低い 370 となった。

Fig. 7(b)に円筒試料の比透磁率測定結果を示した。Tube PC の比透磁率は、 $H = 10 \text{ A/m}$ 程度で最大値をとり、それ以上の磁界では減少するという結果が得られた。Tube Nb, Tube C で得られる比透磁率ほぼ一定であり、それぞれの値は 120 程度、110 程度であった。リング試料での μ_Δ は 10 A/m 以下の磁界範囲であったため、円筒試料での μ_Δ は $H = 10 \text{ A/m}$ での比透磁率と定義した。Tube C は Tube Nb の 1 割程度小さな値となった。それに対し、Tube PC の増分透磁率は 4600 程度と 30 倍程度の値を得られた。

4.2 直流磁界に対する磁気シールド性能

Fig. 8 に直流磁界に対するシールド性能実測結果を示す。図中の実線は今回用いた磁界測定器の確度を踏まえ、信頼できるデータの下限值を示した。外部直流

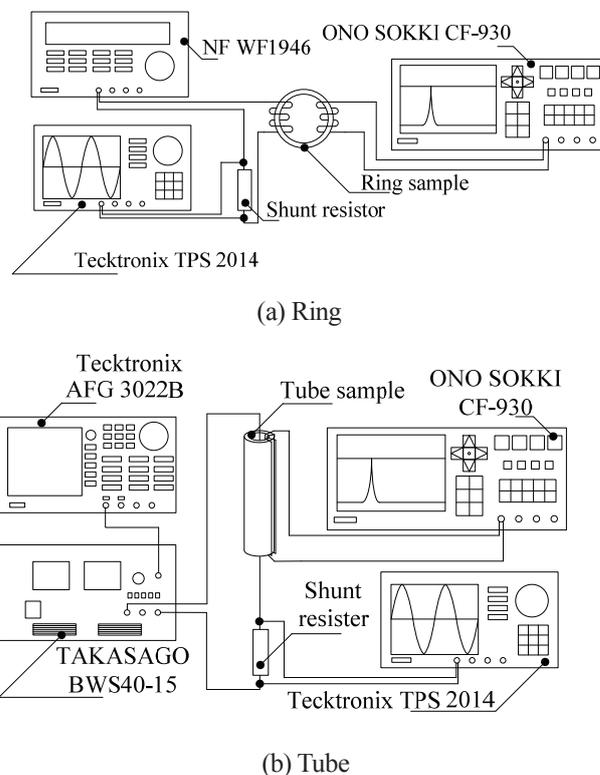


Fig. 5 Schematic design of measurement setup for relative permeability.

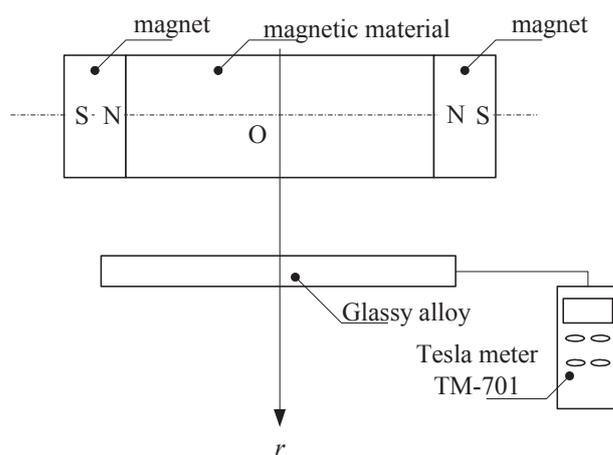


Fig. 6 Schematic design of measurement of inner magnetic flux density for the tube samples.

磁界が 10 mT 以下から内部磁束密度はほぼ一定となる。この値を磁性体に起因する残留磁束密度 $\mu_0 H_r$ (T) とした。Table 4 に各試料で得られた残留磁束密度を示した。より小さな値を得られたのは Tube Nb であり、その値は 0.10 mT であった。Tube C の残留磁束密度は、0.22 mT となった。比較のため準備した Tube PC では、残留磁束密度の値が 0.01 mT で一定となった。

4.3 交流磁界に対する磁気シールド性能評価

Fig. 9 に Fig. 7 で得られた比透磁率を基に式(9)~(11) を用いて TSF を見積もった交流磁界に対するシールド性能を示す。TSF は Tube PC で 200 以上、Tube Nb および Tube C で 10 以上と推定された。Table 3 に今回用いた磁界測定器の確度を踏まえた直流磁界に対する残留磁束密度結果と、交流磁界に対する TSF をまとめた。

Table 3 Measured shielding performance.

Sample name	Residual magnetic flux density, $\mu_0 H_r$ (mT)	TSF
Tube C	0.22	> 10
Tube Nb	0.10	
PC permalloy	< 0.05	> 200

5 考察

Table 4 にリング試料及び円筒試料で実測された増分透磁率をまとめた。比較のため Tube PC についての増分透磁率も記載した。PC Permalloy の増分透磁率は一般的に 10,000 程度と言われているが、3 割程度の値となった。円筒試料と比較し得られる増分透磁率がリング試料で得られた増分透磁率の 3 割程度の値であった。組成の違いによる増分透磁率の差異は 1 割から 2 割程度であった。今回の組成では、組成による差異に比べ、形状の差異によって増分透磁率への影響が大きいことが明らかになった。

これらの原因として考えられるのは、確証はないが可能性の一つとして内部応力低減のための熱処理の最適条件が形状によって異なることが挙げられる。円環形状と円筒形状では、円筒形状のものが磁気特性が劣る結果から内部応力が残留していると考察した。

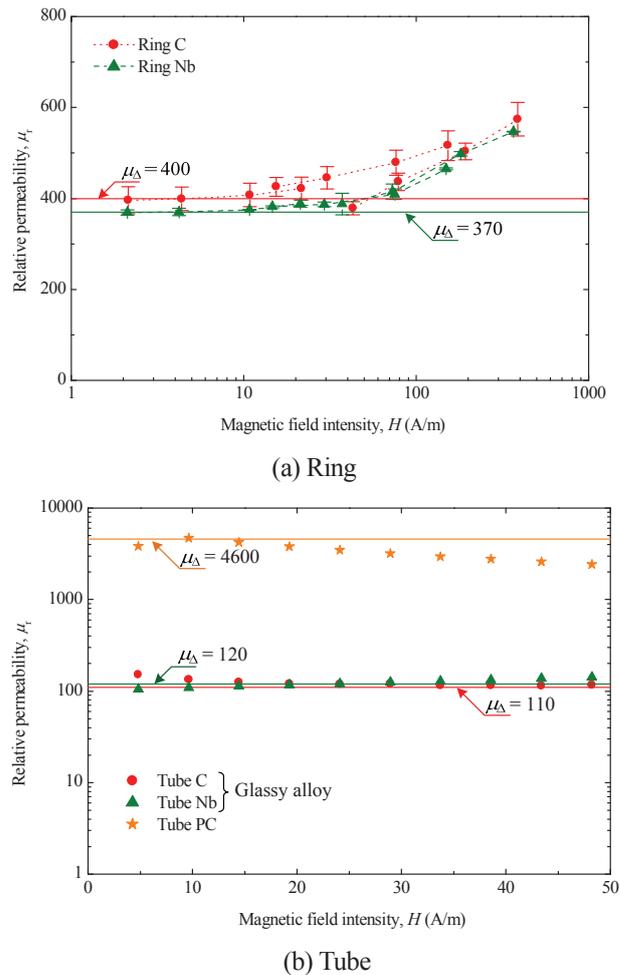


Fig. 7 Measured values of relative permeability as a function of magnetic field intensity.

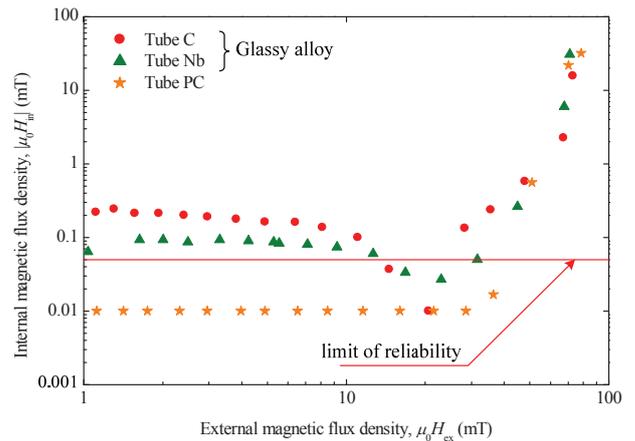
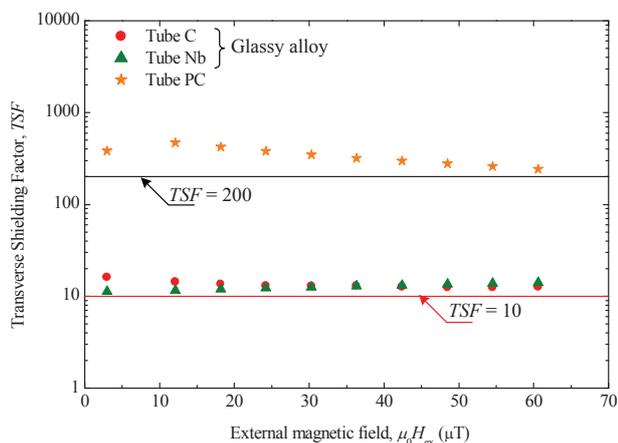


Fig. 8 Measured magnetic flux density values inside cylindrical magnetic shields as a function of magnetic field intensity.

Table 4 Measured value of μ_A .

Composition	Incremental permeability, $\mu_A @ H=10A/m$	
	Ring	Tube
$Fe_{76}Si_{5.7}B_{5.7}P_{9.5}C_{3.8}$	400	110
$Fe_{72}Si_{9.6}B_{14.4}Nb_4$	370	120
$Fe_{14}Ni_{78}Mo_{4.5}Cu_{3.5}$	-	4600

Fig. 9 Estimated values of TSF as a function of external magnetic flux density at 60 Hz.

6 結言

本論文では、2種類の組成が異なる金属ガラスをHVOF溶射で製作したリング試料及び円筒試料の比透磁率及び磁気シールド性能について評価を行った。以下に得られた結果を示す。

- (1) 組成の差異による増分透磁率・比透磁率の違いは1～2割程度であった。
- (2) 形状の差異(円環形状及び円筒形状)による増分透磁率・比透磁率の違いは、3割程度となった。
- (3) 形状の差異による増分透磁率・比透磁率の違いが大きく表れるのは内部応力によるものと考察した。
- (4) PC Permalloyと比較し、直流および交流に対する磁気シールド性能は10倍以上劣る結果となった。今後は組成および製作・熱処理条件の検討を行っていく予定である。

(2015年4月20日受付)

参考文献

- [1] A. Marger, Magnetic shieldings, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.6, pp.67-75, 1970.
- [2] 中野亮, 田代晋久, 脇若弘之, 五十嵐貴教, 石川智仁, 牧野彰宏, 金属ガラスを用いた円筒磁気シールド性能評価, 電気学会マグネティックス研究会, MAG-13-095, 2013
- [3] 牧野彰宏, 尾藤輝夫, 金属ガラスの軟磁気特性, 金属, Vol. 75, No. 2, pp. 95-100, 2005
- [4] 中野亮, 田代晋久, 脇若弘之, 五十嵐貴教, 石川智仁, 牧野彰宏, アルミパイプに溶射した金属ガラス円筒磁気シールドの性能評価, 電気学会マグネティックス/モータドライブ/リニアドライブ合同研究会, MAG-14-142, MD-14-107, LD-14-086, 2014
- [5] 内田寛文, 吉澤隆明, 脇若弘之, 田代晋久, 五十嵐貴教, 本江克次, 村田晃徒, 牧野彰宏, 逆磁歪効果を用いた力センサに有用な磁性材料の検討, 第25回「電磁力関係のダイナミクス」シンポジウム, pp38-41, 2013
- [6] 中島浩二, 藤田行俊, 石川智仁, 五十嵐貴教, 木村久道, 牧野彰宏, 井上明久, 高速なプラズマ炎により溶射されたFe基金属ガラス膜の磁気特性, 紛体粉末冶金協会講演概要集, Vol.2008, p.196, 2008
- [7] 五十嵐貴教, 中島浩二, 石川智仁, 杉山雅治, 福本昌宏, 木村久道, 牧野彰宏, 井上明久, 金属ガラス溶射コーティング技術の開発とその応用, 紛体および粉末冶金, Vol.56, No.11, pp.683-692, 2009
- [8] 太田 恵造, 磁気工学の基礎 I -磁気の物理-, 共立出版株式会社, p.32, 2000
- [9] 松村啓志郎, 岡野恵至, 田代晋久, 脇若弘之, 有限要素法を用いた多角柱磁気シールドの性能評価, 電気学会マグネティックス研究会, MAG-10-169, MBE-10-170, 2010
- [10] 岡野恵至, 田代晋久, 脇若弘之, 磁気シールドシートを用いた多層円筒磁気シールド内部の残留磁束密度の考察, 電気学会マグネティックス研究会, MAG-11-053, 2011
- [11] 藤田行俊, 石川智仁, 中島浩二, 五十嵐貴教, 木村久道, 牧野彰宏, 井上明久, 軟磁性体, 特許第 5170776 号, 2013
- [12] 井上明久, 軟磁性金属ガラス合金, 特許第 3929327 号, 2007
- [13] 岡野恵至, 中野亮, 田代晋久, 脇若弘之, 開口部を有する磁気シールド消磁の検討, 電気学会マグネティックス研究会, MAG-13-2, 2013
- [14] 田代晋久, 脇若弘之, 丸野将太郎, 対向配置磁石型非接触エネルギー伝送装置の試作, 日本 AEM 学会誌, Vol.21, No.2, 2013
- [15] 丸野将太郎, 田代晋久, 脇若弘之, 対向配置磁石を用いた交流磁界発生装置用磁性材料形状の最適化, 電気学会マグネティックス研究会, MAG-12-084, 2012