

バルク金属複合ガラスの電気伝導メカニズム

Electrical conductivity of a bulk metallic glass composite

東北大・金研

藤田 武志, Ke Wang, 陳 明偉
岡田 宏成, 小山 佳一

T. Fujita, L. H. Qian, M. W. Chen, H. Okada, K. Koyama
Institute for Materials Research, Tohoku University

1. はじめに

金属ガラスは、高強度・低ヤング率をしめすため高性能小型部品として MEMS へ組み込まれることが応用として考えられている。しかし、一般に金属ガラスの電気抵抗は一般金属より2桁高いため電気部品としての応用は限られてくる。低い伝導特性はアモルファス構造が由来であり、金属粒子を複合することで改善することが考えられる。また、複合することにより、機械的特性、特に延性を改善することができるので、複合化は金属ガラスの特性改善に非常に有効である。本報告書では、Ni基バルク金属ガラス中に α 黄銅を分散した金属複合ガラスの電気伝導特性を評価し、その伝導機構について調査した。

2. 実験方法

$\text{Ni}_{59}\text{Zr}_{20}\text{Ti}_{16}\text{Si}_2\text{Sn}_3$ (at %) の金属ガラスに 40vol% の α 黄銅を分散した試料を作製した。ガスアトマイズして作製した $\text{Ni}_{59}\text{Zr}_{20}\text{Ti}_{16}\text{Si}_2\text{Sn}_3$ 粒子と α 黄銅 $\text{Cu}_{80}\text{Zn}_{20}$ (at %) 粒子を温間押出加工により固化成形した。具体的な作製方法については文献[1]に記述がある。走査電子顕微鏡 (SEM) による組織観察と電気抵抗測定を行った。

電気抵抗率は、直流4端子法で測定を行った。温度は ^3He 冷凍機を使用して 4.2K から 300K の条件で測定した。電気抵抗測定は、試料押出方向と押出垂直方向について調べた。

3. 実験結果と考察

図 1 は試料の典型的な光学写真であり、(a)は押出方向から(b)は断面のから撮影した物である。どちらも黄銅粒子が均一に分布しているのがわかる。界面においてボイドなどは見つかって居らず、緻密に成形されていることがわかる。また、金属ガラスはガラス構造を有しており、黄銅粒子との界面には 100nm 程度の間層層が生成している。

比較のために、黄銅粒子を含まない $\text{Ni}_{59}\text{Zr}_{20}\text{Ti}_{16}\text{Si}_2\text{Sn}_3$ (at %) の金属ガラスの電気抵抗を図 2 にしめす。室温での電気抵抗は $1.75 \pm 0.02 \times 10^{-6} \Omega\text{m}$ であり、負の温度依存性を示している。Ziman の理論によれば温度依存性は T^2 の関数で表すことができ、次の式に当てはめることができる。

$$\rho(T) = a + bT + cT^2 \quad (1)$$

ここで、 $a = 1.77$, $b = -1.23 \times 10^{-4}$, $c = 1.19 \times 10^{-7}$ である。30K 以下では近藤効果に起因した温度依存性が表れている。フィッティングにおいては 50K から 300K までのデータを使用している。

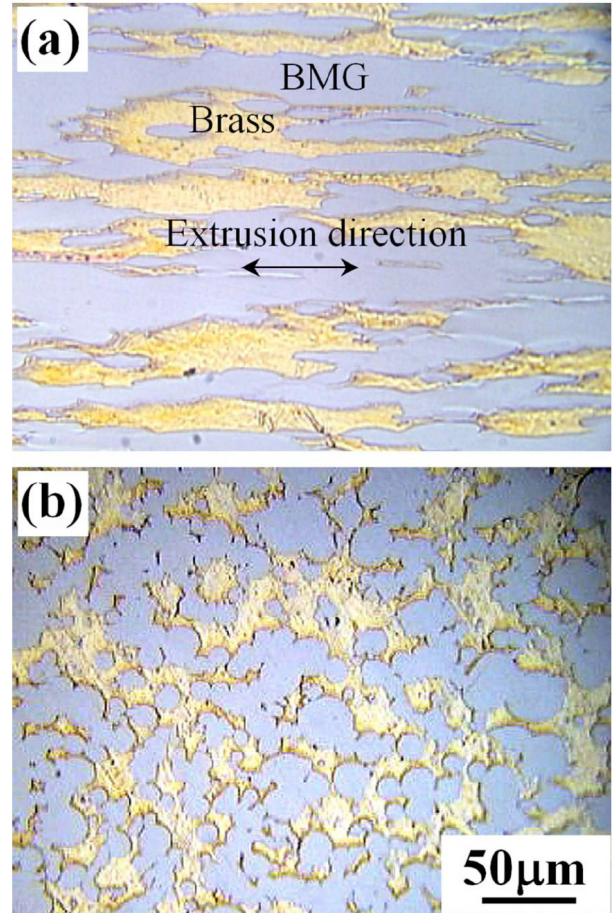


Fig. 1 Optical micrographs of the BMG composite on (a) the longitudinal section and (b) transverse section.

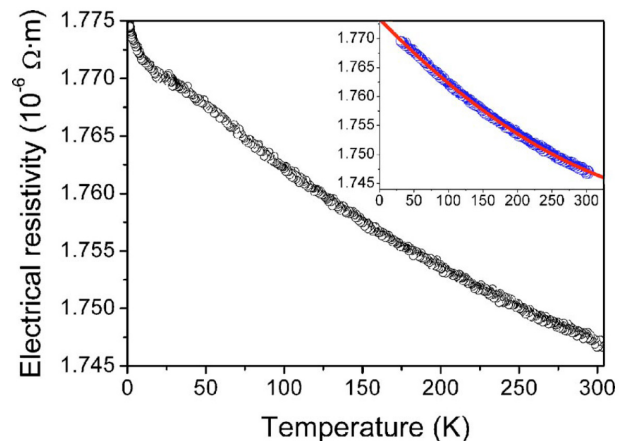


Fig. 2 Temperature dependence of electrical resistivity of the monolithic Ni-based BMG in a temperature range from 2 to 300 K.

図3にはバルク複合金属ガラスの電気抵抗の押出方向と垂直方向での温度依存性を示す。どちらも 70 K まで線形的に下がっている。温度依存係数は Ni 基金属ガラスよりもずっと大きく、黄銅との値に非常に近くなっていた。室温での抵抗は金属ガラスだけの抵抗値より一桁小さく、黄銅のみの 2.5 倍の値であった。

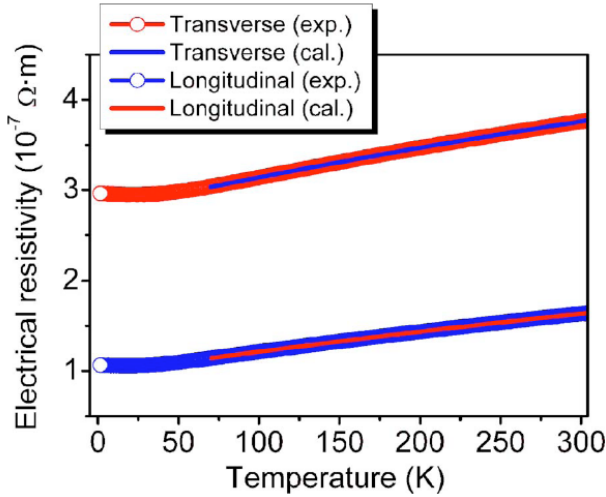


Fig. 3 Electrical resistivity of the BMG composite in the longitudinal and transverse directions at temperatures ranging from 2 to 300 K. The solid lines represent the calculated results based on the GEM equation.

バルク金属複合ガラスの電気伝導をパーコレーション理論に基づいた有効媒質近似が有効であることがわかった。有効媒質近似の式は一般には次のように表される[2]。

$$\frac{(1-\phi)(\sigma_l^t - \sigma_m^t)}{\sigma_l^t + [(1-\phi_c)/\phi_c]\sigma_m^t} + \frac{\phi(\sigma_h^t - \sigma_m^t)}{\sigma_h^t + [(1-\phi_c)/\phi_c]\sigma_m^t} = 0 \quad (2)$$

ϕ は高伝導率物質の体積分率、 σ_l は低伝導物質の伝導度、 σ_h は高伝導物質の伝導度、 σ_m は有効媒質の伝導度、 ϕ_c は電気伝導度が急上昇しはじめる伝導相の体積分率で、パーコレーション現象のしきい値、 t は臨界指数である。ここでは高伝導率物質を黄銅とし、低伝導物質を Ni 基金属ガラスとして式(2)へ当てはめた。室温と 70 K のデータを用いて、 ϕ_c と t を計算したところ押出方向ではそれぞれ 0.07 と 0.11 で断面方向では 0.11 と 0.19 であった。ここで黄銅の抵抗値として $1/\sigma_h(T) = \rho_h(T) = 3.64 + 8.75 \times 10^{-3} T$ ($\times 10^{-8} \Omega\text{m}$)を用いた。また Ni 基金属ガラスの伝導度 $1/\sigma_l(T) = \rho_l(T) = 1.77 - 1.23 \times 10^{-4} T + 1.19 \times 10^{-7} T^2$ ($\times 10^{-8} \Omega\text{m}$)を使用した。これらの値を式(2)に代入し、実験値と比較した物を図 3 に示している。実験値と計算値は非常に良く一致しており、パーコレーション理論に基づいた有効媒質近似が有効であることがわかった。

4. まとめ

Ni 基バルク金属複合ガラスの電気抵抗を評価した。金属粒子の分散により抵抗値は著しくさがり、伝導特性

を改善した。高伝導物質のしきい値が 11%と小さいことがわかった。ガラス複合材料の電気伝導特性がパーコレーション理論に基づいた有効媒質近似が有効であることがわかり、これによりバルク金属複合ガラスの電気特性の定量評価に大いに役立てることができる。例えば、金属ガラスに金属相を導入することで引張延性が著しく改善するので[3]このパーコレーション理論に基づいた有効媒質近似と併用することで優れた線材や電子部品への応用と設計が可能になると思われる。

参考文献

- [1] D. H. Bae, M. H. Lee, D. H. Kim, and D. J. Sordet, Appl. Phys. Lett. **83**, 2312 (2003)
- [2] D. S. Mclachlan, M. Blaszkiewicz, and R. E. Newnham, J. Am. Ceram. Soc. **73**, 2187 (1990).
- [3] D. C. Hofmann, J-Y. Suh, A. Wiest, G. Duan, M-L. Lind, M. D. Demetriou and W. L. Johnson, Nature **451**, 1085 (2008)