

Co 基アモルファスワイヤの特異な応力磁化特性

Special Stress-Magnetization Properties in Co-Based Amorphous Wire

藤井 淳・永田恒廣・小西亮介・斉藤皓彦*・J. N. Nderu**・山崎二郎**

鳥取大学工学部電気電子工学科, 鳥取市湖山町南 4-101 (〒680)

*鳥取大学教育学部, 鳥取市湖山町南 4-101 (〒680)

**九州工業大学工学部電気工学科, 北九州市戸畑区仙水町 1-1 (〒804)

J. Fujii, T. Nagata, R. Konishi, A. Saito,* J. N. Nderu,** and J. Yamasaki**

Dept. of Electrical and Electronics Engineering, Faculty of Engineering, Tottori University,
101 Minami 4-chome, Koyama, Tottori 680

*Faculty of Education, Tottori University, 101 Minami 4-chome, Koyama, Tottori 680

**Kyushu Institute of Technology, Tobata, Kitakyushu 804

Changes in stress-magnetization properties due to annealing of Co-based amorphous wire were investigated. The magnetostriction constant of a Co-based amorphous wire $[(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}]$ changed from negative to positive as a result of annealing at 260°C, which is below the Curie temperature. Peculiar stress-magnetization properties—a magnetization increase with low tensile stress and then a decrease with high tensile stress—appeared as a result of annealing at 220°C and 240°C. This phenomenon can be partly understood as a reflection of the combined influence of positive and negative magnetostriction constants.

Key words: magnetostriction constant, stress-magnetization properties, anisotropy field, combination, domain configuration, inner core, outer shell

1. はじめに

アモルファス磁性ワイヤは優れた耐食性や機械特性に加えて、極めて優れた磁気特性を示すため、センサなどの面で広く利用されている¹⁾。ワイヤの応用に当たっては、主としてバルクハウゼンジャンプ現象に基づく磁化反転機構、マテウチ効果、磁気インピーダンス効果²⁾などを利用している。これは、ワイヤの形状に基づく特性を利用したものである。

軟磁性材料に一定磁界を印加した状態で応力を印加すると磁化は変化する。中でも、アモルファス磁性ワイヤは、応力による誘導磁気異方性が非常に簡単な形で現れることが予想できることから、その応力磁化特性が検討されてきた³⁾。わずかに負の磁歪定数を持つ Co 基のアモルファス磁性ワイヤ $[(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}]$ に、一定印加磁界下で張力を印加した場合の磁化変化は、他の材料では見られない特異な磁化変化特性となる。

本研究は、Co 基アモルファス磁性ワイヤを熱処理することにより得られた特異な応力磁化特性を、磁区構造モデル⁴⁾に基づいて、Fe 基アモルファスワイヤの場合と比較し、磁歪の分布につき検討を行ったものである。

2. 試料および実験方法

本研究に用いた試料は、(株)ユニチカ製のアモルファス磁性

ワイヤで、その組成および磁気的定数を Table 1 に示す。以下表記簡単化のため、それらを FeSiB, (CoFe)SiB と略記する。また、張力はロードセルの出力を電氣的に取り出して XY レコーダに描かせた。熱処理は、アルゴン雰囲気中で行い、設定温度で 1 時間保持し炉中冷却とした。また、磁区構造は Kerr 効果法により観察した。

3. 結果および検討

3.1 (CoFe)SiB の未処理および熱処理による応力磁化特性

Fig. 1 に未処理 (as-cast) の (CoFe)SiB ワイヤにおける種々の印加磁界下での応力磁化特性を示す。印加張力値は $\sigma=0$ ~ 1800 MPa の間で変化させている。s 点は、 $\sigma=0$ で直流磁界を印加したときのヒステリシス曲線上の到達磁化点である。この磁界を一定に保った s 点より張力を印加していくと磁化は変化し、 $\sigma=1800$ MPa で t 点に至る。t 点より張力を減少させていくと磁化は変化し、 $\sigma=0$ である e 点に至る。(本実験においては s 点と e 点は一致する。) 磁化は磁化検出用の B コイルおよび空隙補正用のキャンセルコイルを逆直列に接続し、これらのコイルに生ずる起電圧を磁束計 (Type 3254: 横河電機 (株) 製) を用いて積分することで測定した。また張力はロードセル (Type LU-100 KE, Nonlinearity 0.08%, Hysteresis 0.01%, Capacity 50 kgf: 共和電業 (株) 製) で測定した。また外部磁界 H はソレノイドコイルで与えた。

(CoFe)SiB ワイヤは負の磁歪定数を持つため張力印加により

Table 1 Compositions and magnetic constants of amorphous wire samples

Diameter: 128 (μ m), Length: 410 (mm) (as-cast)			
Composition (at%)	Saturation magnetization (T)	Curie point (°C)	Saturation magnetostriction constant
(Co 0.94 Fe 0.06) 72.5 Si 12.5 B 15	0.42	320	-0.1×10^{-6}
Diameter: 134 (μ m), Length: 400 (mm) (as-cast)			
Composition (at%)	Saturation magnetization (T)	Curie point (°C)	Saturation magnetostriction constant
Fe 77.5 Si 7.5 B 15	0.92	426	32×10^{-6}

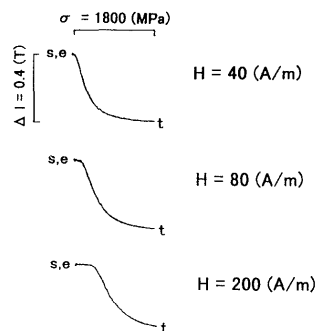


Fig. 1 Stress-magnetization properties of as-cast samples.

ワイヤ長さ方向の磁化は磁歪の逆効果により減少する。しかし、印加磁界が増加するに従い、張力に対し磁化変化の起こらない領域が出現し、その領域が増加している。この現象は、負の磁歪定数をもつアモルファスワイヤに特有な性質である。この現象は以下の理由で出現していると考えられる。張力による異方性エネルギーは

$$E_o = -\frac{3}{2} \lambda \sigma \quad (1)$$

である。ここで λ は負の飽和磁歪定数であり、 σ は印加張力値(MPa)である。したがって、この異方性エネルギーによるワイヤ円周方向の異方性磁界は

$$H_o = \frac{2E_o}{I_s} = -\frac{3\lambda\sigma}{I_s} \quad (2)$$

である。ここで I_s は飽和磁化(T)である。

ワイヤ長さ方向の外部磁界 H が H_o よりも優勢な場合には、磁化ベクトルがワイヤ円周方向へ回転困難となり、磁化変化が妨げられると考えられる。

Fig. 2 は、(2)式に試料の定数を代入して計算される異方性磁界 H_o と試料への印加磁界 H に対して Fig. 1 での H_o の実測値を示したものである。図中破線は $H_o=H$ を示しており、×印は、Fig. 1 において磁化が変化し始める張力に対する異方性磁界 H_o として示している。

比較的小さい印加磁界の範囲で $H_o=H$ が成立しており、この領域は印加張力値による異方性磁界と印加磁界が釣り合っていることを示している。したがって、この領域では、印加張力により磁化がワイヤ円周方向に向けられる異方性磁界よりも外部印加磁界が優勢な範囲で、磁化変化が阻止されていることを示している。しかし、800 A/m 以上の印加磁界では、この釣り合いの関係は崩れている。これはこの範囲で外部印加磁界が張力による異方性磁界よりも優勢になることを示している。すなわち、磁化ベクトルの回転が小さな張力値で起こり始めることを意味している。

as-cast ワイヤにおける残留応力値は、ここでは定量的には明確ではないが、残留応力がワイヤ内部では張力を与え inner core を作り、外側では圧縮力を与え outer shell を構成すると考えられる。ここで検討した印加磁界下での張力による磁化変化は、主として inner core に影響すると考えられる。

Fig. 3 は、220℃ で、1 時間の熱処理において、種々の印加磁界に対する応力磁化特性の変化を示したものである。この試

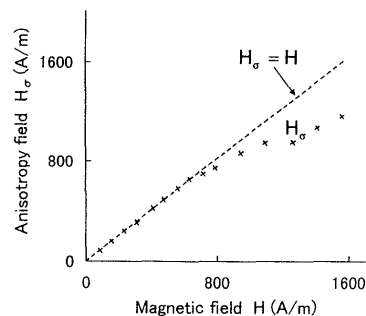


Fig. 2 Variation of the anisotropy field corresponding to the stress-insensitive region vs. the applied magnetic field.

料は一般に熱処理により磁歪が正に変化することが知られているが⁵⁾、この図より、熱処理による磁歪定数の負から正への変化の途中では、張力に対し磁化はいったん増加して減少するという特異な応力磁化特性を示す。また印加磁界を増加していくと、張力に対し磁化の変化しない領域が出現し増加しているが、これは前述の張力による異方性磁界と印加磁界の關係に依存していると考えられる。

Fig. 4 は、種々の熱処理温度に対する応力磁化特性の変化を示したものである。印加磁界は 40 A/m である。190℃、1 時間での熱処理では応力による磁化の増加は見られないが、未処理のときと比較して変曲点が増加しているのが示される。220℃ の熱処理により、磁化はいったん増加して減少する特異な現象が現れ、240℃ の熱処理では変曲点が増加している。そして、260℃ の熱処理により、磁歪定数は完全に正の特性を示している。

次に、 $T_a=220^\circ\text{C}$ の熱処理により現れた特異な応力磁化特性を説明するために、モデルとして応力磁化特性の合成について検討する。

Fig. 5 は正の磁歪定数($\lambda > 0$)を持つ as-cast FeSiB の応力磁化特性と負の磁歪定数($\lambda < 0$)を持つ as-cast (CoFe)SiB の応力磁化特性である。印加磁界は 80 A/m である。FeSiB は、 $\lambda > 0$ のため張力印加により磁化は増加する。これら 2 本を束ねて同時に張力を印加したときの応力磁化特性の結果を Fig. 6 に示す。合成応力磁化特性は、それぞれ 1 本ずつ測定したものの和となるのは当然であるが、両者の合成の結果、磁化は張力によりいったん増加して減少するという特性が得られる。また、印加磁界が増加すると変曲点も増加するという現象は、こ

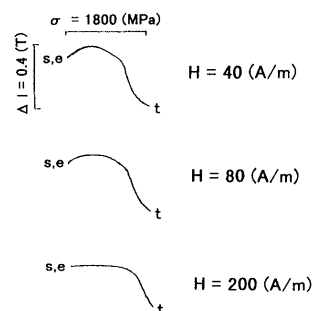


Fig. 3 Stress-magnetization properties of an annealed sample at 220℃.

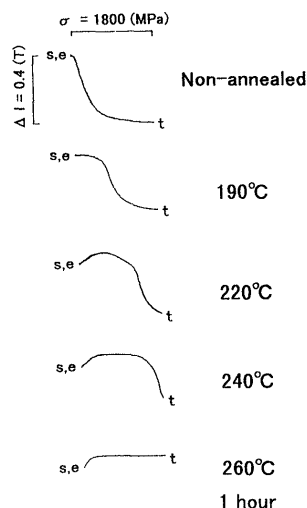


Fig. 4 Stress-magnetization properties of an annealed sample at various temperatures (under an applied field of 40 A/m).

の場合においても得られる。

この結果から、熱処理により、磁化が張力によりいったん増加して減少する現象が現れるとき、その試料は正の磁歪定数を持つ部分と負の磁歪定数を持つ部分の合成と考えることができる。すなわち、(CoFe)SiB ワイヤは熱処理によって $\lambda > 0$ の部分と $\lambda < 0$ の部分が混在した状態と等価と考えることができる。

3.2 熱処理した (CoFe)SiB の磁区構造観察結果

3.1 で述べたように、220°C の熱処理により得られる特異な応力磁化特性は、正と負の磁歪定数を持つ部分の合成と等価と

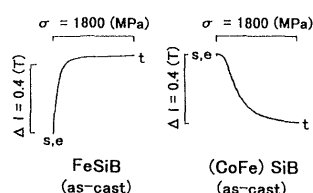


Fig. 5 Stress-magnetization properties of a FeSiB wire and a (CoFe)SiB wire (as-cast, $H=80$ A/m).

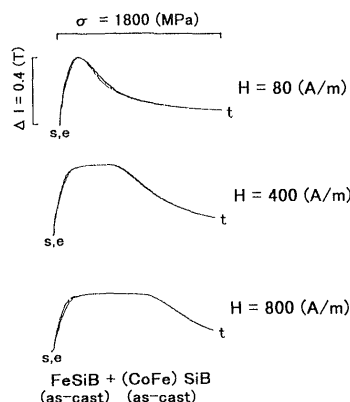


Fig. 6 Combination of stress-magnetization properties vs. the applied magnetic field (as-cast, FeSiB + (CoFe)SiB).

考えることができる。そこで、どの部分に正の磁歪が現れるのかを磁区構造の観察により示す。

Fig. 7 に、(a) 190°C、(b) 220°C、(c) 260°C で熱処理した試料の表面磁区模様観察結果を示す。印加磁界はそれぞれ 69 A/m, 57 A/m, 69 A/m である。190°C の熱処理では応力磁化特性において張力による磁化の増加は見られないが、未処理の試料に見られる規則正しいバンパー磁区とは異なり、磁壁がワイヤ軸方向に傾いて存在する磁区模様となっている。また、応力磁化特性において、磁化が張力によりいったん増加して減少する特異な特性の現れる 220°C の熱処理では、ワイヤ軸方向に磁壁が出現する特異な磁区模様となる。また完全に磁歪定数が正に変化している 260°C の熱処理においては、正の試料に見られるようなメイズ状の磁区が観察された。

Fig. 8 は、230°C で熱処理した試料の表面磁区模様観察結果である。この試料における応力磁化特性は、220°C で熱処理した試料と同様、張力により磁化はいったん増加して減少する特性となる。試料表面においても 220°C の熱処理の場合と同様の磁区模様が観察された。

一定印加磁界下で、125 MPa の張力を印加すると、磁壁は右へ移動し、黒い磁区が増加している。また一定張力値で印加磁界を増加するとさらに磁壁は右へ移動し、黒い磁区が増加している。この 125 MPa の張力値は、応力磁化特性において張力により磁化の増加する範囲の値なので、この結果は応力磁化特性の結果と一致しているといえる。またこの結果、試料表面はメイズ状磁区ではないが、磁歪定数が正の効果が現れているといえる。ここでは張力によって磁壁が移動する原因については明らかではないが、内部構造などの詳細な検討が必要であることを示していると考えられる。

Fig. 9 は、230°C で熱処理した試料をダイヤモンドペーストで 30 μm 研磨したときの研磨面の磁区観察結果である。試料表面と同様にワイヤ軸方向に磁壁が出現するが、ワイヤ長さ方向の磁界を増加すると、磁壁が移動し、さらに研磨面の端に

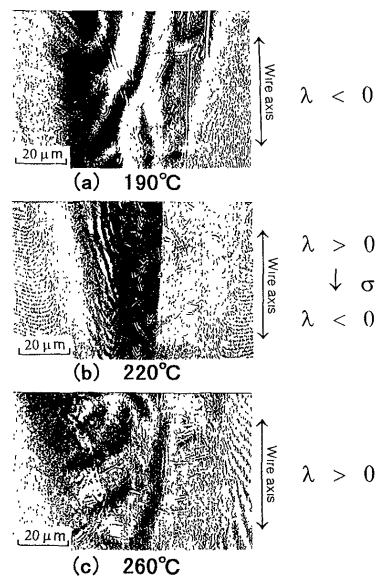


Fig. 7 Domain configurations of an annealed sample at 190°C, 220°C, and 260°C.

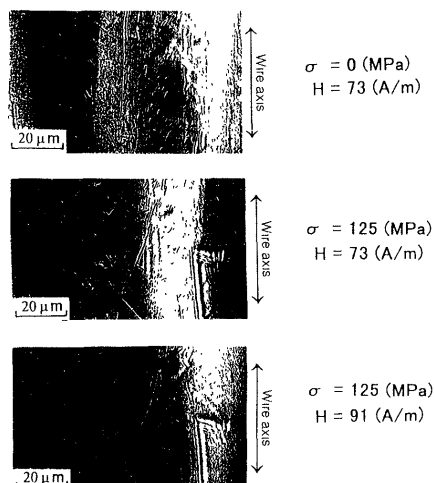


Fig. 8 Changes in the domain configurations due to application of a field and stress to an annealed sample at 230°C.

別の磁区が出現する。これは、inner core と outer shell の 2 層が存在することを示している。

通常磁歪が正の試料は、ワイヤ軸方向に磁化すると、大バルクハウゼンジャンプを生じ、低磁界で急激に磁化され、その後ワイヤ表面の円周方向磁化を持つ outer shell の磁界印加方向に対し 90° 傾いた方向の磁化成分のワイヤ長さ方向への磁化回転により緩やかに磁化される。その 90° 磁化回転の起こる領域の磁界を印加した状態で張力を印加すると、磁歪の逆効果による outer shell のワイヤ長さ方向への磁化回転により飽和に達する。ここで示した 230°C で熱処理した試料においても、応力磁化特性において応力により磁化がいったん増加して減少する特性の現れる磁界値は、ヒステリシス曲線上において inner core の磁壁移動による磁化過程ではなく outer shell の磁化回転による磁化過程での値であるので、磁化が張力によりいったん増加するのは、この outer shell の磁化回転によるものと考えられる。この結果と Fig. 8 の結果より、230°C で熱処理した (CoFe)SiB ワイヤの outer shell はメイズ状磁区とは多少異なるが磁歪がわずかに正の層であり、inner core の磁歪は負と考えられる。

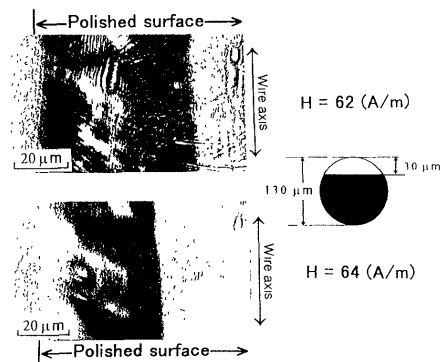


Fig. 9 Changes in the domain configurations due to application of a field to a polished sample at a depth of 30 μm (annealed at 230°C).

4. ま と め

負磁歪アモルファスワイヤの熱処理による特異な応力磁化特性について検討を行った。それらをまとめると、以下のような結果となる。

(CoFe)SiB 試料は熱処理により、一定印加磁界下で張力により磁化がいったん増加して減少するという特異な応力磁化特性が現れる。この現象は、正と負の磁歪定数を持つ領域の混在によると考えられることを磁化特性および磁区観察によって示した。またこのような特性の現れる試料を研磨することにより、試料表面に磁歪が正の層が観察された。このような特異な応力磁化特性が現れるとき、その試料表面は正の磁歪、内側は負の磁歪といった 2 種類の磁歪の 2 層構造となっていると考えられる。このため、応力磁化特性において磁化は張力によりいったん増加し、さらに強い張力では減少していくと理解される。

文 献

- 1) 毛利佳年雄: 日本応用磁気学会誌, **16**, 5 (1992).
- 2) K. Mohri *et al.*: *IEEE Trans. Magn.*, **31**, 2455 (1995).
- 3) J. N. Nderu *et al.*: *IEEE Trans. Magn.*, **31**, 3140 (1995).
- 4) 山崎二郎: 日本応用磁気学会誌, **16**, 14 (1992).
- 5) 高城 実, 山崎二郎, 小笠原 勇, 八木正昭: 日本応用磁気学会誌, **18**, 469 (1994).

1996 年 10 月 15 日受理, 1997 年 1 月 16 日採録