

通電熱処理により周方向に異方性を付与したアモルファス薄帯の磁気特性

Magnetic Characteristics of Amorphous Ribbons with Induced Anisotropy in the Circumferential Direction

高城 実・山崎 二郎*

西日本工業大学電気工学科, 福岡県京都郡苅田町大字新津 1633(〒 800-0394)

* 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 (〒 804-8550)

M. Takajo and J. Yamasaki*

Nishinippon Institute of Technology, Kanda, Fukuoka 800-0394

Kyushu Institute of Technology, Tobata, Kitakyushu 804-8550

(1999 年 10 月 28 日受理, 1999 年 12 月 14 日採録)

Domain and magnetic characteristics were investigated for an Fe-Co based amorphous ribbon with nearly zero magnetostriction. To induce anisotropy in the circumferential direction near the ribbon surface and in the longitudinal direction in the interior region of ribbon, the ribbon was annealed in fields applied simultaneously in the circumferential direction by a current through the ribbon and in the longitudinal direction by a solenoid. It was found that the ribbon annealed in this way exhibited the characteristics of large Barkhausen discontinuities (BHD) with a remanence ratio of 0.52 at a threshold field of about 0.5 Oe. Arc-shaped fine domains and a single domain configuration were observed near the ribbon ends and in the central region of the ribbon, respectively. It is expected that the ribbon has a similar domain configuration, consisting of core and shell domains, to that of die-drawn Fe-based wire. It is inferred from the domain observation that the BHD can be attributed to the depinning of the pinned domain near the ribbon end.

Key words: pulse generator element, amorphous ribbon, large Barkhausen discontinuities (BHD), induced magnetostrictive anisotropy, domain structure, Kerr microscope

1. はじめに

回転液中急冷法で作製された負磁歪のCo-Si-Bアモルファスワイヤの磁区構造は円周方向磁化成分を有するシェル磁区(外層部)と軸方向磁化成分を有するコア磁区(内層部)からなる磁気的二重構造を有する¹⁾。また、張力下で熱処理した正磁歪の線引Fe-Si-Bアモルファスワイヤの磁区構造は内層部に巨大なコア磁区、外層部にはバンパー状磁区を有する二重の磁区構造になっている²⁾。これらのワイヤでは、センサ機能に有用な大バルクハウゼン跳躍特性(BHD)を低磁界で示す特徴を持つ。急冷法で作製したas-quenchedのアモルファス薄帯はBHD特性は示さないが、上述したワイヤのような磁区構造を持たせることができれば、BHD素子が作製できる可能性がある。BHD特性を有する薄帯が得られれば、無電源型のパルス発生素子として、ロータリーエンコーダや盗難防止用センサタグ等に応用が期待できる。磁気式の盗難防止用センサタグではセンサ素子が小さくすみ、

比較的安価なためビデオなどのレンタル店など小型店舗に普及している。

ここでは、外層部に周方向磁化成分をもち、内層部には軸方向磁化成分を持つような磁区構造をアモルファス薄帯を用いて実現するために、薄帯長手方向の磁界と通電によって薄帯表面を最大とする周方向磁界を適当な条件で同時に加えながら熱処理することで磁気異方性を薄帯に誘導することを試みた。その結果、地磁気程度の低磁界中で磁化反転を生じ、ジッターが小さく、発生パルス電圧が大きいBHD素子をアモルファス薄帯を用いて実現できることを報告する。また、このセンサ素子の臨界長ならびに磁区観察結果についても言及する。

2. 実験方法

実験に用いたアモルファス薄帯の組成は(Fe_{0.06}Co_{0.94})₇₉Si_{2.1}B_{18.9}で飽和磁歪は零に近い値を有する。薄帯の幅は3mm、厚み25 μm、長さ10cmである。この試料をFig.1に示す外側にコイルを巻いた円型熱処理炉の中で350℃、5min大気中で熱処理を行う。このとき、ソレノイドによる薄帯長手方向の磁界(H_b = 50e)と直流通電(I_r = 1 A)によって試料の周方向に磁界(H_r = 0.420e、H_rは薄帯中心が零で表面が最大。ここでは、薄帯表面の値)を同時に加えながら熱処理を施している。アモルファス薄帯はアルミ製の治具に挟み、石英ガラス管の中に入れて通電した。試料には張力などは印加していない。ここでは、熱処理前後の磁化曲線の測

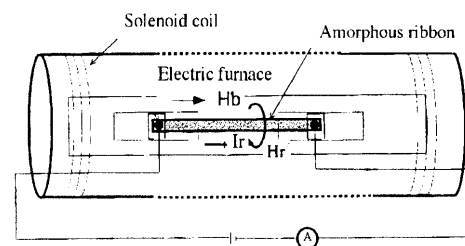


Fig. 1 Arrangement of annealing.

定(60Hz)ならびにKerr効果偏光顕微鏡と画像処理装置を用いて磁区観察を行った。顕微鏡用カメラの出力画像に対し下向きの磁化が黒、上向きの磁化が白になるように偏光子を調整した。

3. 結果と考察

はじめに、薄帯長手方向の磁界 H_b が試料の磁化曲線に及ぼす影響を調べた。マイナーループとメジャーロープの印加磁界は上下の目盛にそれぞれ対応させている。Fig.2(a)に示す磁化曲線のように as-quenched の薄帯は大 BHD 特性は示さず、数 Oe で飽和する軟磁気特性を有する。Fig.2(b)には薄帯に通電せず、 $H_b = 5\text{Oe}$ のもとで、 350°C 、5min 熱処理した後の磁化曲線を示す。Fig.2(a),(b)に示す2つの磁化曲線の比較から、 H_b は磁化曲線を少し立たせ、保磁力をわずかに増加させる効果を示す。このことから、 H_b の効果は薄帯の長手方向に一軸異方性を誘導していると考えられる。

一方、 $H_b = 5\text{Oe}$ 、 $H_r = 0.42\text{Oe}$ 、 350°C 、5min の条件下で熱処理したアモルファス薄帯の磁化曲線では、Fig.2(c)に見られるように、飽和に要する磁界が約 20Oe となることから、薄帯長手方向からそれた磁気異方性が熱処理によって誘導されたことを示している。また、マイナーループにおいて大 BHD 特性を示すことがわかる。ここで見られる負から正にわたる大きな磁化変化は2段階熱処理した磁壁ピンニング型 BHD 素子³⁾の場合とは大きく異なり、どちらかという

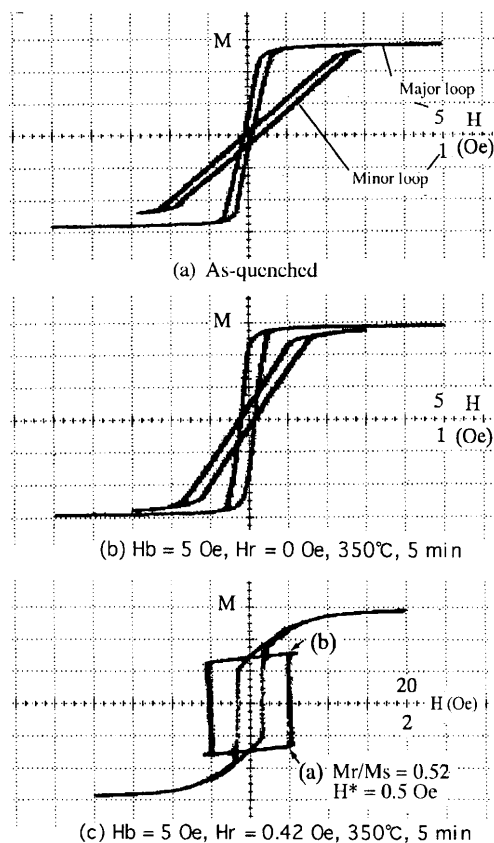


Fig. 2 Magnetization curves of a 10-cm-long amorphous ribbon (a) as-quenched and, (b) for $H_b = 5\text{Oe}$, $H_r = 0$, and (c) for $H_b = 5\text{Oe}$, $H_r = 0.42\text{Oe}$.

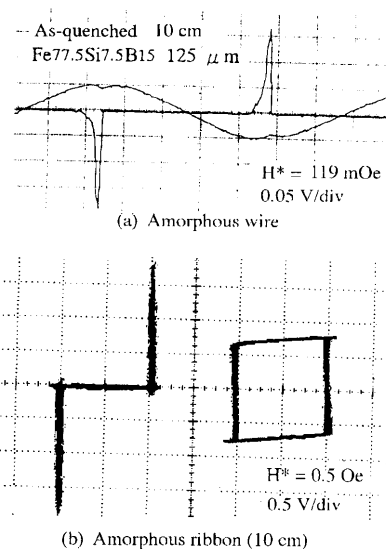


Fig. 3 Induced pulse voltage caused by flux reversal in (a) an as-quenched amorphous Fe-Si-B wire and (b) an amorphous ribbon.

円形断面を有する Fe-Si-B アモルファスワイヤ¹⁾に近い大 BHD 特性となっている。磁化反転に伴って反転する軸方向磁化 M_r は飽和値の 52% で、磁化反転磁界 H^* は 0.5Oe である。

BHD 時に発生するパルス電圧を as-quenched の Fe-Si-B アモルファスワイヤ (直径 $125\mu\text{m}$ 、長さ 10cm) と比較したのが Fig.3(a),(b) である。Fig.3(b) に示すアモルファス薄帯 (体積はワイヤの 6.1 倍) の方が同じ長さのワイヤに比べて約 10 倍大きなパルス電圧を発生することがわかる。

Fig.4(a),(b) はさらにジッターを比較したもので、測定時間は 2 秒間である。Fig.4(a) は幅 1mm 、長さ 5cm の同じ組成のアモルファス薄帯を図の下に示す熱処理条件で 2 段階熱処理を施したもので、Fig.4(b) は薄帯に通電した場合である。両者の比較から、今回新たに得られたアモルファス薄帯の方が、ジッターが大幅に改善されていることがわかる。

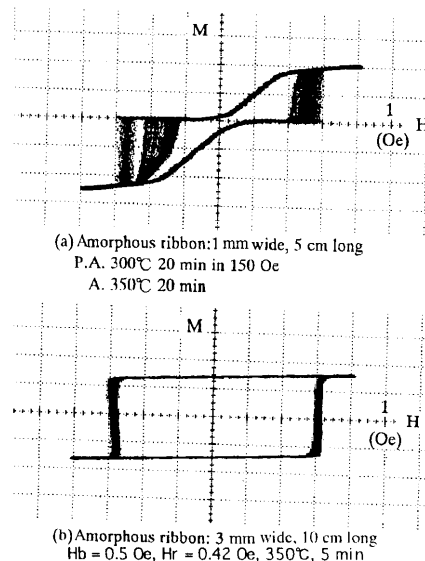


Fig. 4 Comparison of the jitter in two-stage heat treatment of (a) the amorphous ribbon and (b) an amorphous ribbon.

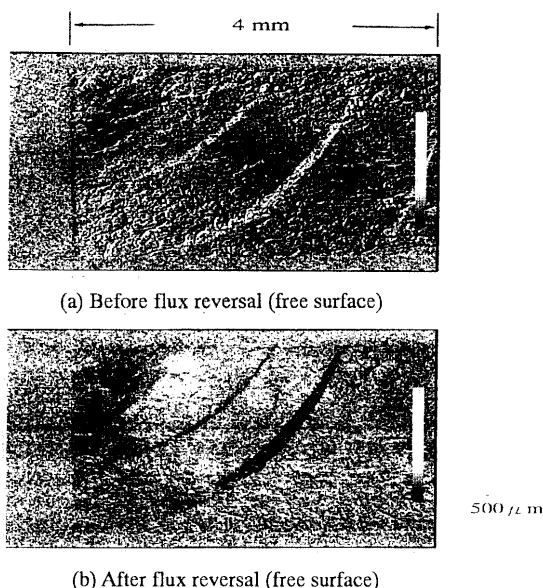


Fig. 5 Change in domain patterns near the ribbon end caused by BHD in Fig. 2(c).

Fig.5は熱処理した薄帯エンド部のBHD前後における磁区パターンの変化を縦Kerr効果偏光顕微鏡で観察した結果を示す。この場合、直線偏光の入射方向は薄帯長手方向と垂直なので、磁区のコントラストは磁化が上下に配向するほど強くなる。ここでは、薄帯幅方向の上下の磁化は白と黒の磁区に反映される。BHD特性を示す薄帯では円弧状の白い磁区(磁区幅 $50 \sim 150 \mu\text{m}$)が薄帯エンド部のみに見られるのが特徴である。薄帯エンド部では反磁界が大きく長手方向磁化が残留しており、通電熱処理によって薄帯の表面を最大とする周方向の磁界が加わることで、磁化が薄帯幅方向から傾くため、円弧状磁区が形成されと考えられる。円弧状磁区は薄帯中央部に進むにつれ円弧状から直

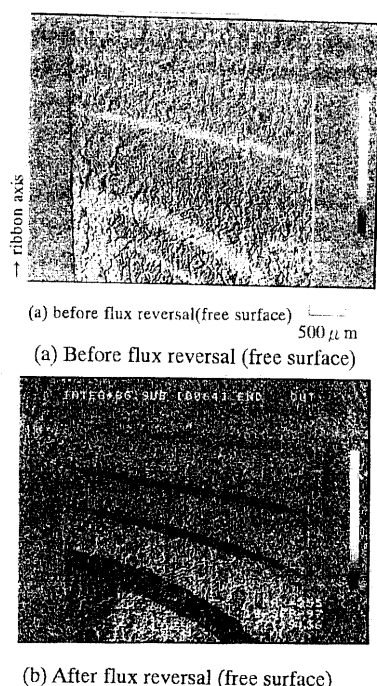


Fig. 6 Change in domain patterns on the free surface of the amorphous ribbon end caused by BHD in Fig. 2(c).

線状に変化するが、エンド部から6 mm程度離れると白い磁区は消失し、黒の単磁区状磁区パターンのみになる。これらの円弧状磁区は磁化反転に伴い、一瞬に白から黒の円弧状磁区に入れ替わる様子がFig.5(a),(b)からわかるが、軸方向磁界を $\pm 2 \text{ Oe}$ 程度変化させても同じ位置にあるので、磁壁がピンニングされ安定化されていると考えられる。

Fig.6はFig.5に示した試料を 90° 回転させて、磁化反転前後での磁化パターンの変化を同様に調べた。直線偏光の入射方向は薄帯長手方向である。エンド部に存在する円弧状磁区は長手方向磁化成分を持つことから、磁化が幅方向から傾きを持つことが判明した。また、円弧状磁区を除いた部分では、Fig.5(a),(b)の場合に比べて磁区コントラストが薄いので、この部分の磁化はほとんど幅方向を向いていることを示している。

Fig.7は薄帯の表裏における磁化の向きを調べたもので、薄帯の表(フリー面)と裏(ロール面)の磁区パターンを磁化反転前後(Fig.2(c)参照)で観察したものである。直線偏光の入射方向は薄帯幅方向である。大BIHDに伴い薄帯表面(フリー面)では、一瞬に白から黒の単磁区パターンに変化する。このような単磁区パターンの変化は前述したように薄帯両エンド部から約1 cm離れた領域で一斉に生じる。ロール面ではFig.7(a),(b)に示すフリー面に比べて表面が荒らいことが確認できる。Fig.7(c),(d)はロール面で観察した磁化反転前後の磁区パターンの変化を示す。この場合、磁化反転に伴い白から黒の単磁区パターンに変化している。フリー面とロール面の磁化の方向は互いに反対であるが、ロール面を磁区観察するために、試料を裏返す必要があるため、磁化反転前ではフリー面と同じ白のコントラストになっている。以上より、薄帯の表裏では磁化が互いに反対方向で、期待したように周方向に異方性が導入されていると考えている。

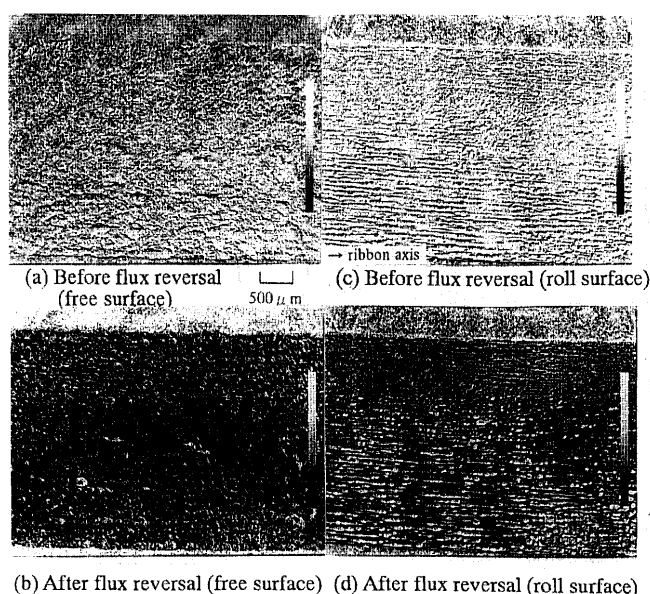


Fig. 7 Change in domain patterns on the free and roll surfaces of the amorphous ribbon caused by BHD in Fig 2(c).

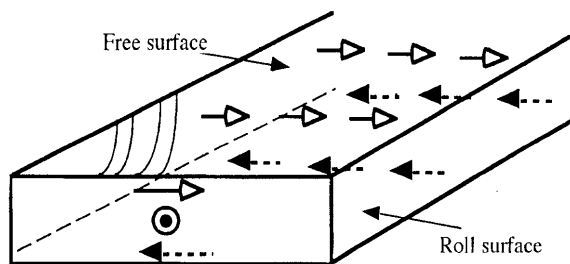


Fig. 8 Expected domain structure model of the amorphous ribbon.

Fig.8はBHD特性を有する薄帯の期待される磁区構造モデルを示した。アモルファスワイヤのように磁気的に二重の構造をしており、薄帯中心の領域では長手方向磁化成分を有し、フリー面とロール面における磁化はそれぞれ実線と点線で示すようにお互いに反対で、周方向に閉磁路構造を形成し、磁化反転に伴いクロジャの向きおよび長手方向の磁化の方向が入れ替わるものと推測される。

つぎに、BHD特性を有する試料の臨界長を調べるために、薄帯の両側から少しずつ切断した後磁化曲線を測定した結果、長さ9 cmまではBHD特性が保たれることがわかった。すなわち、薄帯エンド部に存在する円弧状磁区を削除するとBHD特性は消失する。BHD特性の消失した薄帯を磁区観察するため、BHD特性を示すアモルファス薄帯を両側から3cmずつ切断して残った長さ4 cmの薄帯の磁化曲線とその薄帯エンド部の正の残留磁化状態の磁区パターンをFig.9に示す。直線偏光の入射方向は薄帯幅方向である。試料の長さが短くなると、反磁界の影響でFig.9(a)に示すマイナーループに見られるように、磁化曲線がねてしまうとともにBHD特性は分割され局部的に生じるようになるので、大きなパルス電圧は誘起されない⁴⁾。長さ4 cmの薄帯

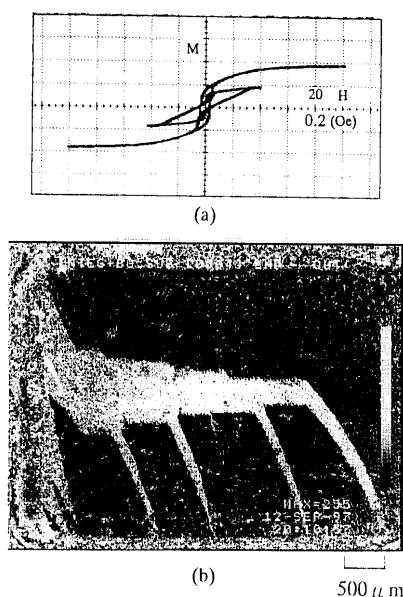


Fig. 9 (a) Magnetization curve and the (b) domain pattern of near the ribbon end for a 4-cm-long amorphous ribbon in the positive remanent magnetization state.

エンド部では円弧状磁区は見られず、幅方向から約 30° 傾いた白い磁区が観察される。白と黒の磁区はヘッドオンの状態となっており、その境界部ではジグザグ磁区が観察されることから伺い知れる。これらの磁区はピンニングされておらず、わずかな軸方向磁界の印加で容易に磁壁移動を生じるため、大BHD特性は示さない。

4. まとめ

- (1)アモルファス薄帯を用いて長手方向に磁界を印加し、直流通電しながら熱処理を施すことで負磁歪のCo-Si-BワイヤのようなBHD特性を示すパルス発生素子が作製できる。
- (2)BHD特性を示す薄帯では外層部では磁化が周方向を向いた単磁区パターンで、内層部では軸方向の磁化を持つ。また、エンド部にはピンニングされた円弧状の磁区が存在するが、円弧状磁区を削除するとBHD特性は消失する。

文献

- (1) M.Takajo, J.Yamasaki and F.B.Humphrey: "Domain Observations of Fe and Co Based Amorphous Wires", *IEEE Trans Magn.*, **29**, 6, 3484(1993)
- (2) M.Soeda, M.Takajo, J.Yamasaki and F.B.Humphrey: "Large Barkhausen Discontinuities of Die-Drawn Fe-Si-B Amorphous Wire", *IEEE Trans Magn.*, **31**, 6, 3877(1995)
- (3) 迫越友裕, 森川真伸, 山崎二郎: 日本応用磁気学会講演概要集, 26aB-3 (1995)
- (4) J.Yamasaki, M.Takajo and F.B.Humphrey: "Mechanism of Re-Entrant Flux Reversal in Fe-Si-B Amorphous Wires", *IEEE Trans Magn.*, **29**, 6, 2545(1993)