マルチプル Fe-Si-B 線引アモルファスワイヤの磁化反転

Magnetization Reversal of Multiple Amorphous Wires

副田正裕・山崎二郎

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)

M. Soeda and J. Yamasaki

Kyushu Institute of Technology, Tobata, Kitakyushu 804

Large Barkhausen discontinuity (LBD) occurs in tension-annealed die-drawn Fe-Si-B amorphous wire, but the voltage pulse induced in the sense coil is smaller than that of the as-quenched wire, owing to the reduced volume. Even if multiple die-drawn wires are used to increase the magnitude of the voltage pulse, LBD occurs separately in each wire, resulting in multiple voltage pulses of small magnitude. However, it is possible to make the LBD of the multiple wires occur simultaneously by attaching amorphous ribbons to the wire ends. As a result, the voltage pulse induced in the sense coil by the LBDs of the multiple wires becomes bigger than that of a single wire. The magnitude increases in proportion to the number of wires. Domain observation at the wires-ribbon junction shows that the ribbons are magnetized by the stray field from the wire ends. It is inferred that the wires and the ribbons have magnetostatic coupling through the stray field, thus making the LBDs of the multiple wires occur simultaneously.

Key words: die-drawn amorphous wire, amorphous ribbon, simultaneous large Barkhausen discontinuities, stray field, magnetostatic coupling

1. はじめに

回転液中急冷法により作製されるアモルファスワイヤは、作製されたままの状態(as-quenched)で大バルクハウゼン跳躍(LBD)を起こす¹⁾。As-quenched ワイヤは低磁界で磁化反転を起こし、その際ワイヤ近傍に置いた誘導コイルに安定したパルスが発生するため、セキュリティセンサやロータリーエンコーダのパルス発生素子として応用されている¹⁾。しかし直径 120 μm の as-quenched ワイヤでは、LBD を起こすために必要な臨界長は約 7 cm と長く²⁾、応用面から見るとさらに小型化される方が望ましい。ワイヤの LBD を起こすのに必要な臨界長は、ワイヤの反磁界の大きさに依存するため³⁾、線径が細いワイヤでは臨界長を短くすることができる。アモルファスワイヤは、ダイスを通した線引加工により直径 10 μm 程度まで細線化することが可能である。線引加工されたままのワイヤは、内部の応力分布が as-quenched ワイヤの応力分布から大幅に変化し LBD を起こさなくなるが、これに適切な磁界中熱処理もしくは張力下熱処理を施すことにより LBD を示すようになる⁴⁾。張力下熱処理された直径 50 μm の線引ワイヤでは、臨界長を 2 cm 程度まで短くすることができる。ワイヤが磁化反転する際に誘導コイルに生じるパルス電圧は、反転する磁化の大

きさ、磁壁の移動度に依存する。よって細線化されたワイヤは、体積の減少により磁化反転する磁化が減少するため、誘導コイルに生じるパルス電圧が as-quenched ワイヤに比べ小さいという欠点を持つ。

そこで本研究では、数本束ねた線引アモルファスワイヤの端にアモルファスリボンを組み合わせることによって、それぞれのワイヤの磁化反転を同期させ、ワイヤ単体時よりもパルス電圧を向上させることを試みた。また、この素子の磁化反転機構についても検討を行った。

2. 実験方法

試料のアモルファスワイヤには、張力下熱処理を施された $\text{Fe}_{77.5}\text{Si}_{7.5}\text{B}_{15}$ ワイヤを使用した。ワイヤのサイズは、直径 30 μm 、長さ 4 cm である。ワイヤの本数は、実験内容により 1 ~ 3 本で変化させている。使用したアモルファスリボンは、 $\text{Co}_{74.26}\text{Fe}_{4.74}\text{Si}_{4.2}\text{B}_{16.8}$ の組成をもち、リボン幅方向に飽和磁界を印加して 300°C、15 分間熱処理を施し異方性を付与したものを使用した。リボンのサイズは、長さ 2.5 cm、幅 2 mm、厚さ 25 μm である。これらの材料を Fig. 1 のように、並列に密着させて置いた複数のアモルファスワイヤ端に、ワイヤ軸とアモルファスリボンの長手方向が直角になるように組み合わせ素子を作製した。リボンとワイヤの接触部分は、粘着テープにより固定し密着性を高めている。

磁化曲線の測定は、60 Hz の交流磁界で行った。磁区観察には縦 Kerr 効果光学顕微鏡を使用し、顕微鏡の出力画面に対し下向き磁化の磁区が黒、上向き磁化の磁区が白になるように偏光子を調整している。

3. 結果

Fe-Si-B 線引アモルファスワイヤは、張力下熱処理を施すことにより LBD を起こすようになる。この線引ワイヤの磁化反転は、as-quenched Fe-Si-B アモルファスワイヤと同様な

Fig. 1 Schematic diagram of multiple wires attached to the ribbons.

振舞を見せ、ワイヤ内部に存在する軸方向磁化成分を持つコア磁区が磁化反転を起こすことに起因する⁵⁾。またワイヤは、その形状から軸方向の反磁界係数は小さく、磁極はワイヤ端に集中しワイヤ端部から漏れ磁束が出ている。これらのことから、ワイヤ端部にアモルファスリボンを置き、ワイヤ端からの漏れ磁束と磁氣的結合を起こすことにより LBD 特性が変化することが考えられる。そこで1本のワイヤ両端に幅方向に異方性を付与したアモルファスリボン片を置き、リボンの位置を変化させて M - H ループを測定した。ワイヤとリボンの位置は、Fig. 2 に示すようにリボンを基準としてリボン軸と直角方向に D 軸をとり、 D 軸の原点とワイヤ端との距離 D でワイヤとリボンの位置関係を表すことにする。リボン幅は 2 mm である。Fig. 3 は、ワイヤ単体 (a)、ワイヤ端にリボンを付け $D=0.5$ mm (b)、 $D=3.5$ mm (c) の時の M - H ループである。それぞれの M - H ループの縦軸には、ワイヤ単体の飽和磁化の値により規格化し目盛りを付している。ワイヤ端にリボンを置いた場合の M - H ループ (Fig. 3 (b), (c)) の上下の傾きは、この部分の磁化率とリボンのみで測定した M - H ループの磁化率とがほぼ一致することから、リボンの磁化の変化分によるものであることがわかる。ワイヤ端にリボンを置いたループはワイヤ単体のループと比べてジャンプ磁界 H^* が大きく、 $D=3.5$ mm の場合で 2 倍以上となっている。また $D=0.5$ mm の場合のループでは、残留磁化も増えている。

さらにリボンとワイヤの位置を細かく変化させた時の、ジャ

Fig. 2 Schematic diagram showing the relative positions of the die-drawn wire and ribbon.

Fig. 3 Hysteresis loops of single wire (a), with ribbons for $D=0.5$ mm (b) and $D=3.5$ mm (c).

ンプ磁界 H^* と飽和磁化に対する残留磁化比 M_r/M_s を Fig. 4 に示す。なお、グラフの最も左のプロット点はワイヤ単体での値である。 H^* および M_r/M_s のどちらの値も $D < 0$ 、すなわちワイヤがリボンと接触していない領域では変化していない。しかし、ワイヤがリボンと接触している領域 $D > 0$ で H^* 、 M_r/M_s は増加し、 $D=2$ mm 付近でどちらの値も最大となる。また $D > 2$ mm、すなわちワイヤの先端がリボンからはみ出している領域では、ワイヤ端がリボンから離れるほど H^* が下がる傾向にある。このように、ワイヤ端にリボンを置くことにより、ワイヤの磁化反転に影響を及ぼすことができる。

この現象を利用して、3本の線引ワイヤの磁化反転の制御を試みた。Fig. 5 に3本束ねたワイヤ両端にアモルファスリボンを配置しなかった場合 (a) と、 $D=2$ mm の条件でリボンを配置した場合 (b) の M - H ループと誘導コイルに発生するパル

Fig. 4 Variation of the switching field H^* and remanence to the saturation ratio M_r/M_s due to a change in the position of the ribbon.

Fig. 5 Hysteresis loops and voltage pulses induced in the sense coil for a bunch of three wires (a) without ribbons and (b) with ribbons.

ス電圧を示す。線引ワイヤを3本束ねただけの試料で磁化反転を起こさせると、Fig. 5(a)の $M-H$ ループに示すように、3本とも異なるジャンプ磁界 H^* で磁化反転を起こす。線引ワイヤ単体では、Fig. 3(a)のようにジャンプ磁界が約0.4 OeでLBDを生じていることから、Fig. 5(a)の $M-H$ ループはそれぞれのワイヤが0.20 Oe程度の磁界によりバイアスされているような形状となっている。この現象は、以下のようにして説明できる。Fig. 5(a)の $M-H$ ループからわかるように、外部印加磁界が約1 Oe以上では3本のワイヤの磁化は同方向を向いている。この状態から磁界を減少させていくと、まず3本のワイヤの内1本のワイヤが、ワイヤ単体のジャンプ磁界より小さい磁界で磁化反転を起こす。これは残り2本のワイヤから出る浮遊磁界が、1本のワイヤの磁化反転を助ける方向に作用するためだと考えられる。次に、1本だけ磁化反転を起こしたワイヤからの浮遊磁界は、まだ磁化反転を起こしていない2本のワイヤのうちの1本と閉磁路をつくるため、2本目のワイヤのジャンプ磁界はワイヤ単体のジャンプ磁界とほぼ同じとなる。3番目に磁化反転を起こすワイヤには、すでに磁化反転を起こした2本のワイヤの浮遊磁界が磁化反転を起こす方向とは逆にかかるため、ワイヤ単体のジャンプ磁界よりもさらに大きな磁界で磁化反転を起こす。このような3段階のジャンプでは、Fig. 5(a)下図のようにパルス電圧は分離し、大パルス出力は期待できない。一方、3本束ねたワイヤ両端にリボンを置いた試料では、Fig. 5(b)のように3本のワイヤのジャンプ磁界が同期し、大きな磁束変化が得られる。このため、ワイヤ1本の時に比べ誘導コイルに発生するパルス電圧は約3倍になっている。

ここで、ワイヤとリボンがどのように影響し合っているか、これらの接点の磁区を観察することにより調べた。Fig 6(a)は、 $D=0.5$ mmの条件におけるリボンとワイヤ1本の接点を観察した、磁化反転前の磁区写真である。リボンとワイヤの両方に焦点を合わせることとはできないことから、ここではワイヤの磁化反転に伴うリボンの磁区の変化に着目しているため、リボンに焦点を合わせている。また顕微鏡の試料台は対物レンズに対して傾いているため、写真の上下の焦点は十分に合っていないことを付け加えておく。リボン幅方向に異方性を付与したリボンには、幅方向に約100 μm 幅のストライプ状の磁区が形成されている。ワイヤおよびリボンの磁化方向を考慮して模式的に表した図を、磁区写真の右側に示す。いま、ワイヤのコア磁区の磁化は上向きで、これが上向き磁化を持つ白磁区の上に乗っている状態である。この状態から磁界をわずかに下方に印加すると、ワイヤ内部のコア磁区は磁化反転を起こす。磁化反転前 (Fig. 6(a)) を基準とした、磁化反転後のリボンの磁区変化分のみを Fig. 6(b) に示す。つまり Fig. 6(b) の写真は、Fig. 6(a) からどれだけ磁化が変化したかを示している。磁化反転後、矢印で示す4か所で差分像が黒く変化しているのがみられ、ワイヤの磁化反転に伴いリボン全体の磁区が変化しているのではなく、ワイヤ近傍の磁区のみが微小な変化をしていることがわかる。この変化は Fig. 6(b) の右の模式図のように、ワイヤが乗っている白磁区の高側の黒磁区が大きくなっていることを表している。このことから、ワイヤ端からの漏れ磁束

はリボンの黒磁区を通り磁気結合していると考えられる。しかし、ワイヤ端がリボンから大きくはみ出している状態である $D=3.5$ mmの条件では、磁束の流れは異なる。ワイヤの磁化反転後の差分像を Fig. 6(c) に示すが、反転後矢印で示す2か所で白く変化していることがわかる。同様に模式図で表すと、ワイヤが乗っている白磁区が磁化反転とともに大きくなっており、ワイヤ端からの磁束は白磁区を通り反対側のワイヤ端に戻って流れていると推測される。磁区観察の結果、この磁束の流れが黒磁区を通るのか、あるいは白磁区を通るのかの境目は $D=1.5$ mm 前後であった。このことから、ワイヤ端からの浮遊磁界によりリボンは、 $D<1.5$ mm ではワイヤの磁化と同方向に、 $D>1.5$ mm では反対方向に磁化されていることがわかる。Fig. 4の M_r/M_s の値は、 $0<D<1.5$ mmの範囲でワイヤ単体での残留磁化値より大きくなっており、磁区観察結果とほぼ良く一致している。また、磁区観察により見られるワイヤの磁化反転前後におけるリボンの磁化変化量は D の値により異

Fig. 6 Domain pattern of a ribbon at remanence (a), and domain change from (a) caused by the flux jump of the wire (b)-(d), together with schematic diagrams of the domain structure.

なり、ワイヤ端がリボンから離れるほどリボンへ到達する浮遊磁界が弱いため、ジャンプ後のリボンの磁化変化は小さくなる。このように、ワイヤとリボンはワイヤ端からの漏れ磁束により磁気結合している。Fig. 6(d)は磁化反転が同期する3本のワイヤとリボンにおける、これらの接点の磁化変化の差分像である。このとき、 $D=2.5\text{ mm}$ に設定している。リボンの磁区には1本のワイヤで $D=3.5\text{ mm}$ の時(Fig. 6(c))と同じような変化がみられ、磁化反転後ワイヤ下の白磁区が増大している。磁化反転の同期は D がおおよそ 1.5 mm 以上でしか起こらないことと併せて考えると、同期LBDにはワイヤ端から出る漏れ磁束がリボンを通り、反対側のワイヤ端へ戻る必要があるのではないかと考えられる。

4. 考 察

As-quenched Fe-Si-B アモルファスワイヤは、内部には軸方向磁化を持つコア磁区が存在し、ワイヤ端にはコア磁区の磁化成分とは反対方向に、反磁界による逆磁区できている。この逆磁区はシェル磁区と結合しており、逆磁区のピンニングがはずれワイヤ軸に沿って逆磁区が伝播することでLBDが起こる²⁾。張力下熱処理を施した線引 Fe-Si-B アモルファスワイヤは、円周方向磁化を持つシェル磁区と軸方向磁化を持つコア磁区から成っているが、LBDのメカニズムは基本的に as-quenched ワイヤと同じと考えられる⁵⁾。逆磁区をピン留めしているピンニング力を、等価なピンニング磁界 H_p と仮定する。印加磁界 H^* と反磁界 H_d の和が H_p より大きくなったとき、すなわち、

$$H^* = H_p - H_d$$

の時に逆磁区のピンニングがはずれる。ワイヤ端にリボンを置いたとき、ワイヤとリボンはワイヤ端からの漏れ磁束を通じ静磁結合をしていることがわかったが、この結合が反磁界を抑制していると考えられる。このため、ワイヤ端にリボンを置くことにより H_d が下がり、結果として H^* が上がる。Fig. 4 に示したように $D=2\text{ mm}$ 付近で H^* が最大となることから、この位置関係で静磁結合は最大となると考えられる。

Fig. 7 は、(a)図のようにワイヤとリボンにそれぞれ10ターンずつコイルを巻き、素子に交流磁界を印加したときにそれぞれのコイルに発生する誘導電圧である。この二つの電圧の位相差を比較することにより、ワイヤおよびリボンのどちらかが磁化反転をトリガするのかを調べた。この実験では、2本の線引ワイヤを用いている。測定は60 Hzの交流磁界で行い、パルス電圧は約1000倍に増幅している。Fig. 7(b)の波形から、ワイヤとリボンは同時に磁化変化を起こしていることがわかる。これは両者が静磁結合しているためであり、これにより系全体の静磁エネルギーが下がると考えられる。ワイヤとリボンはこの磁気結合により一体化しており、それぞれのワイヤはリボンを介して結合していることがわかる。その結果、ワイヤの磁化反転が同時に起こると考えられる。

Fig. 7 Voltage waveforms induced in the sense coils wound on the ribbon (V_r) and wires (V_w) after flux jump.

5. ま と め

複数の張力下熱処理を施した線引アモルファスワイヤ端にアモルファスリボンを置くことにより、それぞれのワイヤのLBDを同期させることができた。その結果、ワイヤ1本に比べ約本数倍のパルスをワイヤ近傍の誘導コイルに発生することができた。磁区観察の結果、ワイヤ端から出る浮遊磁界はワイヤ端に置いたリボンを磁化しており、ワイヤとリボンは静磁結合していると考えられる。よって、それぞれのワイヤはリボンを介して結合しているため、磁化反転が同時に起こる。現在のところ、ワイヤが4本程度までしか同期ジャンプが得られておらず、さらに多くのワイヤで同期ジャンプが起こるよう検討する必要がある。

文 献

- 1) K. Mohri: *IEEE Trans. Magn.*, **20**, 942 (1984).
- 2) J. Yamasaki, M. Takajo, and F. B. Humphrey: *IEEE Trans. Magn.*, **29**, 2545 (1993).
- 3) J. N. Nderu, Y. Shinokawa, J. Yamasaki, and I. Ogasawara: 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-95-131-141, 47 (1995).
- 4) R. Malmhäll, K. Mohri, F. B. Humphrey, T. Manabe, H. Kawamura, J. Yamasaki, and I. Ogasawara: *IEEE Trans. Magn.*, **23**, 3242 (1987).
- 5) M. Soeda, M. Takajo, J. Yamasaki, and F. B. Humphrey: *IEEE Trans. Magn.*, **31**, 3877 (1995).

1996年10月14日受理, 1997年1月16日採録