アモルファス磁性ワイヤにおける垂直励磁 Matteucci 効果の張力依存性

Tensile Stress Dependence of the Perpendicular Matteucci Effect in Amorphous Wire

川島克裕・小笠原 勇・毛利佳年雄*

ユニチカ(株)中央研究所, 京都府宇治市宇治小桜 23 (〒611)

*名古屋大学工学部, 愛知県名古屋市千種区不老町 (〒464-01)

K. Kawashima, I. Ogasawara, and K. Mohri*

R&D Center, Unitika, Ltd., Ujikoza-kura, Uji, Kyoto 611

*Faculty of Engng., Nagoya Univ., Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-01

In order to make a stress-insensitive amorphous wire for use in pen-input data tablets, the stress sensitivity of the vertical Matteucci effect was investigated by annealing the wire. First, the magnetostriction was measured for tension-annealed FeCoSiB amorphous wires, using the magnetization rotation measurement technique. It was found that the magnetostriction of amorphous wires, which was initially slightly negative, became positive with an increase in the annealing temperature and then became negative again in a higher-annealing-temperature region. Next, the stress sensitivity of the vertical Matteucci voltage in the tension-annealed wires was measured for applied tensile stresses of up to 100 kg/mm². The mechanism of the stress sensitivity of the Matteucci voltage is discussed with reference to circumferential *BH* hysteresis loop measurements. Finally, an optimal annealing condition was found in which a high Matteucci voltage was realized without any remarkable change in response to applied tensile stresses.

Key words: amorphous wire, magnetostriction, tablet, annealing, Matteucci effect

1. はじめに

回転液中紡糸法によるアモルファス磁性ワイヤ（以下、a-ワイヤと省略する）は、作製されたままの状態(as-quench)で著しい大バルクハウゼン効果や Matteucci 効果を示す^{1)~3)}。特に、大バルクハウゼン効果を利用すると、ジッタのないパルス電圧発生素子や高調波発生素子が構成され、セキュリティセンサなどに広く実用されている。

一方、磁歪が零近傍の a-ワイヤは大バルクハウゼン効果を示さないが、a-ワイヤの組成が $(\text{Fe}_{0.06}\text{Co}_{0.94})_{72.6}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ ($\lambda_s = -0.1 \times 10^{-6}$) で最も顕著に Matteucci 効果が現れる。a-ワイヤの Matteucci 効果は円周磁束の時間変化によって生じ、円周磁束 ϕ_θ の時間変化 $\partial\phi_\theta/\partial t$ を生じる励磁方法であれば、どんな方法でもワイヤ両端間の交流電圧 (Matteucci 電圧 e_M) を発生させることができる。著者らは a-ワイヤの径方向に交流磁界を印加しても e_M が生じることを見いだした⁴⁾。そして、これを垂直励磁 Matteucci 効果と称している。この垂直励磁 Matteucci 効果では励磁周波数 f に対してパルス状の 2 倍周波数の $e_M(2f)$ が生じるのが特徴である。倍周波信号は励磁周波数の誘導ノイ

ズと容易に分離できるので S/N が高い。筆者らは、この現象を利用したデータタブレット用座標入力面を構成した^{4)~6)}。

垂直励磁 Matteucci 効果を利用した新方式のデータタブレットは、座標入力面にアモルファス磁性ワイヤを X-Y マトリックス状に多数本配列した構造である。このマトリックス面に垂直に交流磁界発生ペンで励磁し、ペン先位置を約 0.2 mm の分離能と 1 秒当たり 150 ドットの速度で検出することができる。この場合、各ワイヤの e_M を検出するときはワイヤに約 5 mA の直流電流を通電して円周磁束の初期分布を一様に行っている。このワイヤマトリックスの作製では、粘着面が表面になるようにフィルムをドラムに巻き付け、ワイヤを一定速度で移動させ回転するドラムに巻き取る方法により平行でかつ直線状にワイヤが並べられたタブレット用シートが作製される。この方式ではドラムの回転ブレやフィルム粘着面の不慮およびワイヤと実装回路基盤のハンダ付けなどでワイヤに導入される応力は不規則になる。この時、場所により倍周波電圧の振幅が異なるという問題点が生じる。そこで、印加張力に対して誘導電圧 e_M が影響されない耐張力性の安定なワイヤが要求されている。

本研究は耐張力性が安定でかつ S/N において高出力電圧を誘起する a-ワイヤの作製を目的とする。本実験では、a-ワイヤが熱処理で変動する磁歪の大きさと誘導電圧 e_M の印加張力依存特性を測定した。さらに、 e_M が磁歪の大きさと符号により変化することについて検討した。

2. 実験方法

2.1 熱処理加工

アモルファス磁性ワイヤは一つのダイスにおける減面率を 5% から 15% の範囲で冷間線引きされる。125 μm 径から 50 μm 径の線径を得るには約 20 個のダイスを用いて冷間線引き加工が施される。細線加工したままのワイヤでは線引き加工時に不規則な応力が強く残留するので良好な磁気特性が得られない。そこで、内部応力を緩和する目的でワイヤに張力下熱処理を施した。

Fig. 1 は実験で用いた連続熱処理機台の概要図を示す。初めにワイヤは熱処理炉の前後のフィードローラ間でワイヤに均一で微少な張力で保持される。走行するワイヤは熱処理炉中 0.5 m を一定の雰囲気温度下で通過させる。熱処理炉内は両端 30

Fig. 1 An apparatus for annealing an amorphous wire.

mm まで均一な温度分布を示した。ワイヤが熱処理炉を滞留する時間は 3 秒（ワイヤ走行速度 10 m/min）とした。

熱処理を施したワイヤの磁歪 λ_s には、

$$\lambda_s = \frac{K_u \sin 2(\theta_0 - \theta) - M_s H_m \sin \theta}{\frac{3}{2} \sigma \sin 2\theta}$$

で表され、印加張力 σ で変化する BH 特性の回転磁化領域で得られる値を代入して求めた⁷⁾。この磁歪測定方法では、アモルファス磁性体が非晶質による材質の一様性により一軸異方性および等方磁歪と仮定している。熱処理ワイヤの磁気特性は磁歪の大きさを BH トレーサで、初透磁率をシグナルインピーダンスアナライザ (YHP4192A) を用いて測定した。

2.2 誘導電圧の印加張力依存性

Fig. 2 は外部張力を印加するために電極の一方を自由端とした張力印加実験概要図である。a-ワイヤの両端に電圧検出用の電極と張力印加用の端子が設けられた構成である。電極からのリード線は張力の印加を妨げないようにワイヤ軸方向に設置し、ワイヤを引張ったときの誘導電圧の変化が実測できるようにした。ワイヤ径方向に垂直励磁するための励磁ペンはペン先の表面磁界 H_{ac} が 30G ($f=170$ kHz) であり、励磁ペン磁心は先端径 3 mm、長さ 15 mm のソフトフェライトを用いた。a-ワイヤと励磁ペンの距離は 6 mm とした。

ワイヤには円周磁束の初期条件を設定するために 5 mA 直流電流を通电している。印加した円周方向の直流バイアス磁界は 0.3 Oe である。

3. 結果および考察

Fig. 3 は印加張力 6.5 kg/mm²、滞留時間 3 秒の熱処理条件で処理した時の張力下熱処理温度と磁歪の関係を示す。●印は (Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B₁₅ 組成のワイヤで as-quench および冷間線引加工後の as-drawn で磁歪は -0.1×10^{-6} 値である。熱処理後、磁歪は 250°C から 550°C の熱処理温度範囲で符号の反転が観測された。室温から 300°C 近傍まで磁歪は負であり（第 I 負磁歪領域とする）、300~500°C で磁歪が正となり（正磁歪領域とする）、500°C 以上で磁歪が再び負となる（第 II 負磁歪領域）。505°C で $\lambda_s = -1 \times 10^{-8}$ となりほぼ零磁歪となった。380°C 以下の熱処理ではワイヤの内部応力の緩和が不十分であり、異方性エネルギー K_u は 100~200 J/m³ であった。380°C 以上の熱処理で応力緩和と構造緩和によって構造が安定化し、 K_u は 30~50 J/m³ となり λ の測定値が安定した。図中の○印は組成 (Co_{0.937}Fe_{0.063})_{72.5}Si_{12.5}B₁₅ で熱処理前の磁歪は正で 5×10^{-8} である。この組成は熱処理温度で磁歪が正の間で変化し

Fig. 2 Experimental method of measuring the stress dependency of the vertical Matteucci effect.

Fig. 3 Magnetostriction as a function of the annealing temperature.

た。520°C より磁歪が小さくなるが、560°C 以降は結晶化と熱延伸のため磁歪の測定が困難となった。■印は (Co_{0.943}Fe_{0.057})_{72.5}Si_{12.5}B₁₅ で磁歪は -0.2×10^{-6} であり、200~500°C の熱処理範囲で磁歪は負で、400°C $\pm 10^\circ$ C においては λ がほぼ -1×10^{-8} となった。

本実験の熱処理方法において 300°C 以下で熱処理した場合には、冷間線引時の残留応力がまだ緩和されず熱処理による磁気特性の改善が少ない。一方、450°C 以上の高温で熱処理すれば十分な応力緩和を受けたので磁気特性が安定した。

Fig. 4 は、Fig. 2 の実験方法を用いて外部張力に対する e_M の特性を測定した結果である。Fig. 4(a), (b), (c) はそれぞれ第 I 負磁歪領域、正磁歪領域、および第 II 負磁歪領域において作製した熱処理ワイヤの対外乱張力の感受性を示す。 e_M の倍周波 (340 kHz) には基本波が誘導ノイズとして重畳するので測定はバンドパスフィルタを用いて行った。実験に用いたバンドパスフィルタは中心周波数が 340 kHz であり、電源側にインピーダンスを高める回路をもつ回路である。250°C と 275°C では張力が 50 kg/mm² までは出力電圧の変動は 17% 以内であった。380~450°C 間の熱処理温度の a-ワイヤにおいて磁歪が正に大きく、対外乱張力の感受性が急峻になった。Fig. 4(c) で 6.5

Fig. 4 External tension dependence of the Matteucci voltage at various annealing temperatures for $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ amorphous wires.

Fig. 5 External tension dependence of the Matteucci voltage at various annealing temperatures for $(\text{Co}_{0.943}\text{Fe}_{0.057})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ amorphous wires.

Fig. 6 Change in e_M as a function of the tensile stress in slightly positive magnetostrictive amorphous wires of various diameters.

kg/mm² 張力下熱処理で 505°C, 3 秒間の加熱急冷処理により磁歪がほぼ零 ($\lambda = -1 \times 10^{-8}$) となり, 倍周波電圧の振幅の張力に対する変化が最小 (40 kg/mm² 以内の張力に対し e_M の変動率は約 10% 以下) となった。

Fig. 4(a) と (b) はそれぞれ磁歪がほぼ同一の値を示し, e_M の対外乱張力依存性も低い印加張力で低い変動率を示した。しかし, 高温熱処理した a-ワイヤで誘導される電圧 e_M 値がおおよそ 10 倍大きい。

Fig. 5 は, $(\text{Co}_{0.943}\text{Fe}_{0.057})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ 組成による e_M の対外乱張力特性を示す。400°C の熱処理温度で磁歪は $\lambda = -1 \times 10^{-8}$ となり, 同ワイヤの外乱張力による e_M の変動率は 30 kg/mm² までで 10% であった。すべての熱処理温度範囲で磁歪が負となり, 低い張力では変動率が小さく, 過張力になると緩やかに e_M 値が減少する傾向となった。双方の組成とも高温側で磁歪が負に大きくなると誘導電圧の電圧変動は単調に減少するのみであった。

ここで, 初期に電圧 e_M (0 kg/mm²) が 1 V 以上を得るには, 440°C 以上で熱処理する必要がある。これは, 熱処理炉に滞留する時間にも比例するが, 440°C 以上から急速に応力緩和が行われたためと思われる。

Fig. 4(c) において, 490°C 近傍で熱処理したワイヤは小さい正磁歪を示しかつ e_M の対外乱張力依存性で広範囲の不感帯域を持つことがわかった。実装に当たり低張力 (0 kg/mm²) から

高張力まで倍周波電圧の変動を抑えることが困難であれば, ある張力下で強制的にワイヤを留める方法が提案される。

Fig. 6 は $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ 組成を 485°C で熱処理したときの各種線径における e_M と対外乱張力の関係を表す。50 μm 径のワイヤでは 20~80 kg/mm² の印加張力で変動率が 5% 以下になった。このことから, 熱処理時の条件で高張力で熱処理し熱セットすれば低い張力からの不感帯域を実現できると予想される。そこで, 熱処理条件を温度 450°C, 滞留時間 3 秒, 印加張力 50 kg/mm² と変更した。

Fig. 7 は上記条件で作製した a-ワイヤの張力に対する倍周波誘導電圧 e_M の関係を示す。50 μm 径ワイヤでは 10~70 kg/mm² の外部張力範囲で変動率 10% 以下を得た。しかしながら, 誘導電圧レベルが小さく実用上有効ではない。これは, 熱処理温度が正磁歪となるので, 高張力下熱処理すると異方性はワイヤ軸方向に高まる。 e_M は円周方向の磁化成分に依存する。この場合, 円周方向磁化成分の減少で e_M が減少した。

Fig. 8 は $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ 組成のワイヤを熱処理温度 485°C および 515°C, 張力 6.5 kg/mm², 滞留時間 3 秒で作製したワイヤの円周方向および軸方向の BH 特性を表す。正磁歪となる 485°C のワイヤは張力印加による円周方向の磁化を増加し軸方向磁化を減少する。一方, 負磁歪の 505°C ワイヤでは円周方向の保磁力が増した。

Fig. 9 は Fig. 8 のワイヤを用いて微少磁化を測定した BH

Fig. 7 External tension dependence of e_M in wires annealed at higher tensions.

Fig. 8 Change in the BH hysteresis loop of annealed wire with applied tension: (a) circumferential BH loops and (b) longitudinal BH loops.

特性を表す。励磁磁界は変調波 3 Hz、搬送波 1 kHz の振幅変調波を用いた。正磁歪の 485°C ワイヤは張力印加で円周保磁力 $H_{\phi c}$ が減少し、負磁歪の 505°C ワイヤは 50 kg/mm² まで保磁力は変化しなかった。

以上より、 e_M の発生機構を式で表せば、

$$e_M = - \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (1)$$

となる。この式を具体的に表現すると

$$e_M = -S_{\phi} \cdot \frac{dB_{\phi}}{dH_{\phi}} \cdot \frac{dH_{\phi}}{dt} = -S_{\phi} \cdot \mu_{\phi c} \cdot \frac{dH_{\phi}}{dt} \quad (2)$$

ここで、

$$\mu_{\phi c} = \frac{B_{\phi}}{H_{\phi c}} \quad (3)$$

である。磁歪が正のワイヤは張力印加で円周方向の保磁力が低下するので $\mu_{\phi c}$ が増大して e_M を増加し、磁歪が負のワイヤは張力の増加とともに保磁力を増大するので e_M は減少すると考えられる。

Fig. 9 BH hysteresis loops of annealed wire magnetized in an amplitude-modulated 1 kHz magnetic field.

4. まとめ

① (Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B₁₅ 組成で磁歪定数が -0.1×10^{-6} のワイヤを伸線加工後、張力 6.5 kg/mm² で滞留時間 3 秒で熱処理を施したときの磁歪は、300°C 以下の熱処理温度では負であるが 300°C から 500°C 間で正となり 500°C 以上で再び負となった。

② 磁歪が正のワイヤでは張力印加により円周方向の保磁力 $H_{\phi c}$ が減少し e_M が増加する。張力が過大になると異方性が軸方向となって $\mu_{\phi c}$ が低下するために e_M は減少する。磁歪が負のワイヤは張力印加で円周方向の異方性エネルギーが増加するため、 $\mu_{\phi c}$ が低下し e_M は単調に減少すると考えられる。

③ 6.5 kg/mm² 張力下熱処理で 505°C, 3 秒間の加熱急冷処理により磁歪がほぼ零 ($\lambda = -1 \times 10^{-8}$) となり、誘導電圧 e_M の振幅の張力に対する変化が最小 (40 kg/mm² 以内の張力に対し e_M の変動率は約 10% 以下) となった。

文 献

- 1) 毛利佳年雄, 山崎二郎, 木下文宏, 山本孝則: 日本応用磁気学会誌, 9, 157 (1985).
- 2) 木下文宏, ローゲル・マルムヘルム, 真部利裕, 川本 浩, 毛利佳年雄, 山崎二郎: 日本応用磁気学会誌, 10, 253 (1986).
- 3) 高牟礼久宜, 山崎二郎, 毛利佳年雄, 小笠原 勇: 日本応用磁気学会誌, 13, 265 (1989).
- 4) 木村宏聖, 川島克裕, 毛利佳年雄, 水谷政敏, 高御堂 一: 日本応用磁気学会誌, 15, 475 (1991).
- 5) K. Kimura, M. Kanoh, K. Kawashima, K. Mohri, M. Takagi, and L. V. Panina: *IEEE Trans. Magn.*, MAG-27, 4861 (1991).
- 6) 加納光成, 川島克裕, 毛利佳年雄: 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-91-158 (1991).
- 7) Y. Konno and K. Mohri: *IEEE Trans. Magn.*, MAG-25, 3623 (1989).

1994 年 10 月 12 日受理, 1994 年 12 月 6 日採録