アモルファス磁歪ワイヤの大バルクハウゼン 効果と Matteucci 効果

Large Barkhausen Effect and Matteucci Effect of Amorphous Magnetostrictive Wires

毛利佳年雄・山崎二郎・木下文宏・山本孝則

九州工業大学, 北九州市戸畑区仙水町 1-1 (〒804)

K. Mohri, J. Yamasaki, F. Kinoshita, and T. Yamamoto

Kyushu Inst. of Tech., 1-1, Sensui-cho, Tobata-ku, Kitakyushu 804

Amorphous magnetostrictive wires manufactured by UNITIKA Co. induce sharp and stable voltage pulses against ac fields of more than 0.1 Oe at the frequencies 0.01 Hz-10 kHz, and are suitable for application to pulse generator elements for rotary encoders and magnetic-type security sensors. In this paper, the sensitive, highly stable large Barkhausen effect and Matteucci effect in these amorphous wires are analyzed using a domain-wall propagation model. Theoretical values are compared with the experimental results for the voltage pulse generation characteristics at the pick-up windings and between both ends of the amorphous wires. Effects of applications of tensile and torsional stresses and annealing on these pulse generations are also investigated. The Matteucci voltage increased about to 20 times and about to 6 times due to twisting and annealing under twisting, respectively.

1. はじめに

磁気双安定素子は、交流磁界に対して鋭いパルス電圧及び著しい高調波電圧を発生し、それぞれ着磁体と組み合わせたロータリーエンコーダや磁気式セキュリティセンサ用素子として重要である。このような素子としては、従来ウィーガン線¹⁾やバイクロイ線などのパーマロイ線や Fe-Co 合金線が開発されてきたが、これらの結晶質合金線はパルス発生位相のジッタが大きいことや、高調波発生素子としては励振振幅が数十 Oe 以上必要であることなどの根本的な問題があり、実用上の課題を残している。

これに対して筆者らは、1981 年に開発された水中超急冷法によるアモルファス磁歪ワイヤ^{2),3)} (ユニチカ (株) 製) が、作製されたまま (as-prepared) の状態で、ジッタのほとんどない著しく安定なパルス発生特性を有すること、及び 0.1 Oe 以上の極めて微弱な交流磁界に対して著しい高調波電圧を発生し、セキュリティセンサ素子として優れていることを見だし、その基礎特性の一部を報告した^{4),5)}。

本稿では、このようなアモルファス磁歪ワイヤのパルス発生特性を大バルクハウゼン効果 (以下 LBH 効果と

略す) とマテウチ効果 (Matteucci 効果)⁶⁾ の観点から解析し、この理論結果を基礎に、パルス発生に関する励磁振幅・周波数特性や応力処理特性、熱処理特性などの諸特性を測定し、検討を加えている。また、ワイヤの磁区観察を初めて試みた結果も示す。

2. アモルファス磁歪ワイヤと LBH 効果

図 1 は、鉄系アモルファスワイヤ (以下 a-ワイヤと略す) $\text{Fe}_{77.5}\text{Si}_{7.5}\text{B}_{15}$ (125 μm 径, $H_0=0.2\text{ Oe}$, $B_{20}=12\text{ kG}$, $B_r=7\text{ kG}$, $T_x=490^\circ\text{C}$) の as-prepared 状態の磁区図形である。磁区観察は、無磁場中で水基磁性流体 (Ferofluidics 社製) の 10% 希釈液を滴下して行った。

a-ワイヤの全面に迷路磁区が観察されるので、ジェット水流中超急冷時に不規則応力が発生しワイヤ表面に垂直な磁気異方性が誘導されていると考えられる。ワイヤを希硫酸でエッチングすると、20~30 μm ほど表層を除去した場合、迷路磁区は観察されなくなり、大バルクハウゼン効果も消失する。したがって、a-ワイヤの応力分布は、表層 20~30 μm に不規則応力が集中し、ワイヤの中心部分 (「内心コア」と称する) に等価的にひねり応力を印加していると推定される。

大バルクハウゼン効果は、この内心コアで生じ、表層

Fig. 1 Maze domain pattern of an amorphous wire.

コアからの応力 σ により内心コアの磁壁エネルギー密度 γ が $\gamma \propto \sqrt{\lambda_s \sigma}$ (λ_s : ワイヤの飽和磁歪定数) によって著しく高くなるので、磁壁のない状態 (正及び負の磁束飽和レベル) が安定な双安定特性を有する。

内心コアにおいて、磁壁がワイヤ軸に沿って伝搬する場合、ワイヤに設けた検出コイルに誘起される電圧パルス高さ e_p は次式で表される⁷⁾。

$$e_p = \pi D_0^2 N N_w M_s B_s \cos \theta_0 (H^* - H_0) / \beta_s \quad (1)$$

ここに、 D_0 : 内心コアの直径、 N : 検出コイルの巻回数、 N_w : 検出コイル部の内心コア内の磁壁枚数、 M_s : 飽和磁化、 B_s : 飽和磁束密度、 θ_0 : 内心コア内の磁化容易方向のワイヤ軸に関する角度、 $\cos \theta_0 = B_z / B_s$ (B_z : 残留磁束密度)、 H^* : 反転磁区形成限界磁界、 H_0 : 磁壁伝搬限界磁界、 β_s : うず電流制動係数である。

e_p は外部磁界 $H (= H_m \sin \omega t)$ には陽に依存しないが、 N_w は $H_m f (\omega = 2\pi f)$ に依存する。

図2は、100 mm 長の as-prepared ワイヤを $H = H_m \sin 2\pi f t$ で一様に励磁した場合の e_p - f 特性であり、検出コイル長 l_c をパラメータとしている。 $l_c = 1$ mm の短コイル (80 ターン) の場合、 e_p の値は f にほとんど独立であり、コイル内では $N_w = 1$ と推定される。点線は (1) 式において $D_0 = 100 \mu\text{m}$, $N = 80$, $N_w = 1$, $M_s = B_s = 0.79 \text{ T}$, $\theta_0 = 56^\circ$, $H^* = 0.08 \text{ Oe}$, $H_0 = 0.03 \text{ Oe}$, $\beta_s = 2.1 \text{ G} \cdot \text{sec} \cdot \text{Oe/m}$ とした場合の e_p の計算値である。 θ_0 は $\theta_0 = \cos^{-1}(B_z/B_s)$, H^* は臨界値の BH ヒステリシスループから測定した。また、 H_0 , $\beta_s (= 2 M_s (H - H_0) / v)$; v は磁壁伝搬速度) は Sixtus-Tonks 形の磁壁伝搬測定実験⁸⁾ から求めた。

$l_c = 5 \text{ mm}$, 50 mm (4000 ターン) では、 f の増加とともに N_w の増加が生じると考えられ、 e_p が増大している。

図3は、60 Hz 正弦波励磁におけるウィーガンドワイヤ (17 mm 長) 及び a-ワイヤ (磁界方向長さ 17 mm の折り曲げ 30 mm 長及び 100 mm 長) のパルス電圧波形を示す。a-ワイヤでは、ジッタのほとんどない鋭い ($H_m =$

Fig. 2 e_p vs. f characteristics with the parameter coil length l_c .

Fig. 3 Voltage pulses of a Wire and amorphous wires.

100 Oe で半値幅が $15 \mu\text{sec}$) パルス電圧が安定に得られる。

3. アモルファス磁歪ワイヤの Matteucci 効果

細形強磁性磁歪試料の長さ方向に交流磁界を印加する場合、磁化ベクトルが長さ方向と直角方向の成分をもてば、試料両端間に電圧を誘起する (Matteucci 効果)。a-ワイヤは表層部から内心コアへ不規則なひねり応力を与えているので、Matteucci 効果が現れる。しかも大バルクハウゼン効果も同時に生じるため、交流磁界に対して試料両端間 (または任意の2点間) に鋭いパルス電圧 e_p' を誘起する。

e_p' は、ワイヤ軸と半径軸を含む平面内で、ワイヤ軸とワイヤ外周部より成る積分路 C をとり、 $\text{rot } \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t$ 及び Stokes の定理を適用すると、次式で表される。

$$e_p' = 2 M_s B_\perp N_w l D_0 (H^* - H_0) / \beta_s \quad (2)$$

ここに、 l はワイヤ長、 $B_\perp$ は C で囲まれた平面に垂直な磁束密度である。

図4は、100 mm 長の as-prepared a-ワイヤの e_p' - f 特性であり、正弦波磁界振幅 H_m をパラメータとしている。この特性は e_p - f 特性と類似しており、 $H_m \leq 1 \text{ Oe}$ の微小磁界励磁では、 $0.1 \leq f < 20 \text{ Hz}$ の低周波範囲で、 e_p' ,

Fig. 4 e'_p vs. f characteristics with the parameter H_m .

e_p ともに H_m に無関係に一定値を示し、 $N_w=1$ と考えられる。 e'_p もジッタがほとんどなく、極めて安定である。

4. 応力および熱処理の効果

図5は、100 mm 長 as-prepared a-ワイヤの長さ方向に張力 σ を印加した場合の e_p 及び e'_p の変化を示す。 e_p は、(1) 式において $\cos \theta_0$ が σ とともに増加すること及び H^*-H_0 が増加することにより、 σ とともに増大する。一方、 e'_p は (2) 式において磁化ベクトルが σ 方向にそろう B_1 が σ とともに減少するため、減少する。

図6は、100 mm 長 as-prepared a-ワイヤに n_{tw} (回/cm) のひねり応力を印加した場合の e'_p (実線) 及びひねり応力を印加・除去した場合の e'_p (点線) の変化特性を示す。ひねりにより、as-prepared ワイヤの不規則応力がワイヤ軸と 45° の角度をなす方向へそろえられ、(2) 式の B_1 が増加すること、 H^*-H_0 が増加することにより、 e'_p が約20倍と著しく増加する。点線は、a-

Fig. 5 e_p , e'_p and H^*-H_0 vs. tension characteristics.

ワイヤのわずかな塑性変形により、ひねり応力効果が残留したものと考えられる。

図7は、100 mm 長 as-prepared a-ワイヤ及び $n_{tw}=3$ 回のひねりを加え 400°C . 30 分のアニールを行った場合の e'_p - f 特性である。図6の場合と同様にひねり効果がアニール後残留し、 e'_p は約6倍増大している。図6の場合に比して、ひねり応力下アニールされたa-ワイヤの e_p は極めて安定であり、ジッタは as-prepared ワイヤと同様ほとんど零である。

なお、 e_p はひねりによる増大は生じるが、ひねり除去後及びひねり応力下アニール後は、ひねり効果はほとんど生じなかった。

図8は、同一長 (70 mm) のスーパーマロイリボン (3 mm 幅, $100 \mu\text{m}$ 厚) と a-ワイヤ ($125 \mu\text{m}$ 径) の 60 Hz, 1.8 Oe 正弦波励磁における、 BH ヒステリシスループ、パルス電圧、及び周波数スペクトルである。a-ワイヤの断面積はスーパーマロイリボンのその約 40 分

Fig. 6 e'_p and H^*-H_0 vs. twisting time characteristics.

Fig. 7 e'_p vs. f characteristics of an as-prepared and an annealed under twisting amorphous wires.

Fig. 8 BH hysteresis loops voltages and spectrums of a Superalloy ribbon in (a) and an as-prepared amorphous wire in (b).

の1であるが、パルス高さは、 B_s が高いこと (1.6 T)、と高抵抗率材の著しい大パルクハウゼン効果により、逆に1.3倍になる。

したがって、a-ワイヤのスペクトルは著しい高調波成分を有し、高調波電圧の非接触検出方式による磁気式セキュリティセンサ用の高調波発生素子(トランスポンダ)として優れている。

文 献

- 1) J. R. Wiegand: US Patent No. 3820090, June 25 (1974).
- 2) I. Ohnaka, *et al.*: Proc. 4th Rapidly Quench-

ed Metals Conf., 31 (1981).

- 3) 小笠原他: 昭和 59 年電気学会全国大会 (1984).
- 4) 毛利他: 日本応用磁気学会誌, **8**, No. 2, 233 (1984).
- 5) K. Mohri, *et al.*: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-20**, No. 5, 1409 (1984).
- 6) CH. Matteucci: *Memoire sur le magnetisme developpe par le courant electrique* (C.R. 24, 301), (1847).
- 7) 毛利他: 日本応用磁気学会学術講演会(第8回) 13 pC-11 (1984).
- 8) K. J. Sixtus and L. Tonks: *Phys. Rev.*, **37**, 930 (1931).

1984 年 12 月 14 日受理, 1985 年 1 月 16 日採録