線引アモルファス磁歪線の大バルクハウゼン効果と Matteucci 効果

Large Barkhausen Effect and Matteucci Effect in Cold-Drawn Amorphous Magnetostrictive Wires

真部利裕・河村秀樹・毛利佳年雄・ローゲル-マルムヘル*・山崎二郎・小笠原 勇**

九州工業大学, 北九州市戸畑区仙水町 1-1 (☎804)

*アセア研究所, ヴァステロス S-72183, スウェーデン

**ユニチカ中央研究所, 宇治市宇治小桜 23 (☎611)

T. Manabe, H. Kawamura, K. Mohri, R. Malmhäll*, J. Yamasaki and I. Ogasawara**

Kyushu Inst. of Technol.,

1-1, Sensui-cho, Tobata-ku, Kitakyushu, 804

*Asea Res. and Innovation, S-72183 Västerås, Sweden

**R & D Center, UNITIKA Ltd., 23, Ujiozakura, Uji, 611

Reinforced Large Barkhausen effect and the Matteucci effect are realized applying a tension anneal to cold drawn amorphous magnetostrictive wires ($\text{Fe}_{77.5}\text{Si}_{7.5}\text{B}_{15}$ made by Unitika Co.). Sharpness and the amplitude of induced voltage pulses at the pick-up coil of the amorphous wire are proportional to the value of H^*-H_0 , where H^* is the critical field of domain nucleation at the flux reversal, and H_0 is the critical field of domain-wall displacement. The value of H^*-H_0 increased about ten times that of as-prepared wires. The Matteucci voltage was also increased in the tension annealed cold drawn wires. The critical length of the wire which shows the large Barkhausen effect could be reduced to about 20 mm (60mm for as-prepared wires). Therefore, small-sized rotation sensors are realized using the new wires.

1. はじめに

1984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(ユニチカ(株)製)^{1),2)}は,作製されたままの状態(as-prepared)で著しく高感度で安定な大バルクハウゼン効果(以下LB効果と略す)とMatteucci効果を有しており,パルス電圧発生素子あるいは高調波発生素子として回転数センサやセキュリティセンサなどへ応用され,実用化されている^{3),4)}.

本稿では,as-preparedワイヤの両効果をさらに顕著にすることを目的として,120 μm 径から50 μm 径まで線引されたワイヤに張力下アニールを試み,より鋭いパルス電圧発生特性及び広周波数帯域特性を実現した結果を報告する.

この線引・熱処理ワイヤでは,パルス半値幅は,2 Oeの交流磁界に対して16 μsec ,両効果が保持されるワイ

ヤ長の最小値は20 mm(部分的LB効果は15 mmまで),60 Hzで励磁した場合の高調波の最大値は約60 kHzなどの諸特性が得られている.

2. アモルファスワイヤの線引・張力下アニール効果

Fig. 1はas-preparedワイヤ,線引ワイヤ及び線引・張力下アニールワイヤの60 Hz BH特性である.as-preparedアモルファス磁歪ワイヤ($\text{Fe}_{77.5}\text{Si}_{7.5}\text{B}_{15}$, 120 μm 径,ユニチカ(株)製の線引時のダイヤパススケジュールは,120 μm から90 μm までは5 μm ずつの径の減少,90 μm から50 μm までは2~4 μm ずつの径の減少である.この線引により強い不規則内部応力が導入され保持力 H_c は50 μm 径ワイヤで約20~30 Oeに増大し,LB効果は消失する(Fig. 1(b)).すなわち,LB効果を示すas-preparedワイヤでは,(a)に示すように反転磁区形成限界磁界 H^* (磁束反転限界磁界)が磁壁移動限界

Fig. 1 60 Hz BH loops.

H_0 より大きいが、(b) では $H^* < H_0 (=H_c)$ となる。

LB 効果をも高めるためには H^*-H_0 を増加させればよい。 H^* は $H^* \propto \sqrt{\lambda_s O'}$ (λ_s : 飽和磁歪定数, O' : 張力) で表されるので⁵⁾、線引時にワイヤ中心部に印加された強い張力と、表面層に印加された強い圧縮力との応力平衡を保持しつつ、線引時に導入された不規則な応力を緩和させて H_0 を減少させることができれば、著しい LB 効果を実現できることになる。そこで筆者らは、この観点から、線引ワイヤに 150 kg/mm^2 の強い張力を印加した状態で 350°C 、30 分のアニールを行った結果図 (c) の LB 効果を実現することができた。試料長は 200 mm である。この張力及び磁界 (200 Oe) の印加は、ワイヤ長さ方向に強い磁気異方性を誘導して、線引ワイヤの応力緩和により、 H_0 の減少に伴って、 H^* も同時に減少することを防止するためである。200 Oe を印加しない場合でも同様な結果が得られるので、張力による誘導磁気異方性や塑性変形効果が重要であると考えられる。図 (c) では、 $H^* \approx 0.8 \text{ Oe}$ 、角形比 (M_r/M_s) ≈ 0.9 であり、(a) の $H^* \approx 0.08 \text{ Oe}$ の約 10 倍に達している。地磁気が約 0.45 Oe であるから H^* は約 2 倍となり、耐外乱特性が改善される。(d) は 0.45 A 、50 msec のパルス電流により $\sigma = 100 \text{ kg/mm}^2$ の張力下フラッシュアニールを行った場合であり、(c) と同程度の LB 効果が現れている。

$$(H^* = 0.74 \text{ Oe}, M_r/M_s = 0.97)$$

フラッシュアニールは、ワイヤ (10 cm 長, 60 Ω) に直列に 10 Ω の抵抗を接続し、パルス発生器を用いて行った。ワイヤ両端は各々 2 個の銅片で圧着した端子とした。

(c'), (d') は、張力なしの熱処理後の BH ループであり、LB 効果が表れていない。

LB 効果による誘起パルス電圧 e_p は、 H^*-H_0 に比例する⁶⁾。 H^* は BH 特性から測定できるが、 H_0 は、Sixtus-Tonks の実験により測定する必要がある。

Fig. 2 は、Fig. 1(c) の場合の 200 mm 長 LB 効果ワイ

ヤの Sixtus-Tonks 実験の測定結果である。
50 μm 、70 μm 各々 2 本のワイヤについて測定した。熱処理条件は 4 本のワイヤすべて同一であるが、磁壁伝播特性には多少のばらつきがある。 H_0 は外挿により H 軸との交点で測定する。as-prepared wire では、 $H^* = 0.08 \text{ Oe}$ 、 $H_0 = 0.03 \text{ Oe}$ であり、 $H^*-H_0 = 0.05 \text{ Oe}$ である。これに対し、線引・張力下アニールワイヤ (70 μm 、50 μm 径) では、 $H^* = 0.6 \sim 0.8 \text{ Oe}$ 、 $H_0 = 0.3 \sim 0.4 \text{ Oe}$ であるので、 $H^*-H_0 = 0.3 \sim 0.4 \text{ Oe}$ となり、as-prepared wire に比して 1 けた程度増加する。

3. パルス発生特性

Fig. 3 は、200 mm 長ワイヤに長さ方向に 60 Hz、2 Oe の正弦波磁界を印加した場合のピックアップコイル (5 mm 長, 180 ターン) に誘起されるパルス電圧 e_p 、及びワイヤ両端間に誘起されるパルス電圧 (Matteucci 電圧) e_p' である。 e_p 、 e_p' の理論式は次式で表される⁶⁾。

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

$$e_p' = 2 B_s \sin \theta_0 M_s N_w L D_0 (H^* - H_0) / \beta_e$$

ここで、 D_0 : 内部コアの直径, N : 検出コイルの単位長当

Fig. 2 Domain wall propagation characteristics due to Sixtus-Tonks experiments.

Fig. 3 Pick-up voltage e_p and Matteucci voltage e_p' with pulse width at the half amplitude: (a) 50 μ sec, (b) 16 μ sec, (c) 90 μ sec, (d) 40 μ sec.

たりの巻数, N_w : 単位当たりの 180° 磁壁の枚数, M_s : 飽和磁化, B_s : 飽和磁束密度, θ_0 : 内部コア内の磁化ベクトルの軸方向に対する平均的容易方向角度, H^* : 反転磁区形成限界磁界, H_0 : 磁壁移動限界磁界, β_e : うず電流制動係数, l : ワイヤ長である。

e_p は内部コア断面積, H^*-H_0 , $\cos \theta_0$ に比例し, β_e に反比例する。 e_p' は内部コア径, H^*-H_0 に比例し, β_e に反比例する。 50 μ m 線引・張力下アニールワイヤの断面積は, as-prepared 120 μ m 径ワイヤの断面積の約 $1/8$ であるが, e_p の高さはほぼ等しく, e_p' の場合は逆に約 2 倍になる。 これは, H^*-H_0 が as-prepared ワイヤに比して 8 倍であり, β_e も減少することによって考えられる。 e_p' の場合は, as-prepared ワイヤに対する半径比が約 0.4 であるので, H^*-H_0 の増加分の効果が大きく, 逆に高いパルスを生じている。 パルスの半値幅は, as-prepared ワイヤで e_p は 50 μ sec, e_p' は 90 μ sec であるが, 50 μ m ワイヤでは e_p は 16 μ sec, e_p' は 40 μ sec に減少し, より鋭いパルスとなる。

Fig. 4 は, Fig. 3 の場合の e_p 波形及び周波数スペクト

Fig. 4 Pulse voltage e_p and frequency spectrum for 200 mm long wires.

Fig. 5 Wire-length dependence of hysteresis loops for as-prepared and field-tension annealed wires.

ルである。 50 μ m ワイヤではパルスの鋭さに対応して, 高調波成分は 60 kHz まで拡大される。

4. ワイヤ長と大バルクハウゼン効果

LB 効果は, ワイヤ長を減少させた場合に生じる反磁界 H_d によって抑制される。 すなわち, LB 効果による磁束跳躍現象は, $(H^*-H_0) \leq H_d$ となる状態で停止する。

Fig. 5 は, as-prepared ワイヤ及び 50 μ m ワイヤのワイヤ長を変化させた場合の 60 Hz BH 特性である。 as-prepared ワイヤでは H^*-H_0 が小さいので, 60 mm 長で $(H^*-H_0) \leq H_d$ となるが, 50 μ m 径ワイヤでは, H^*-H_0 が大きく, ワイヤ長が 20 mm になるまで反磁界の影響は現れない。 また, 15 mm 長の場合でも部分的に磁束が跳躍し, パルス電圧を誘起する。 さらに, Fig. 1 の場合と同様に BH 特性の角形率が 50 μ m 径ワイヤでは 90% 近くに増加し, as-prepared ワイヤの場合の 50% に比し

Fig. 6 Tension dependence of H^*

て著しい角形率を示す。これは、張力下アニールによりワイヤ長方向に異方性が誘導されたためと考えられる。

Fig. 6 は、線引・張力下アニールを施した $50\mu\text{m}$ 径ワイヤの軸方向に張力 σ を印加した場合の H^* の変化特性を示す。 H^* は σ に比例して増加しており、 $H^* \propto \sqrt{\lambda_s \sigma}$ の関係が成立していると考えられる。 $\sigma \geq 70\text{ kg/mm}^2$ で H^* は約 10 e となり飽和特性を示している。

5. 結 論

線引アモルファス磁歪ワイヤに大張力下アニールまた

はフラッシュアニールを施すことにより、 H^*-H_0 が 1 けた近く、BH 特性角形率は約 2 倍に増加し、より鋭いパルス発生特性が得られた。ワイヤ長に関しては、約 20 mm 長まで良好なパルス発生を示した。以上の結果は、パルス発生素子および高調波発生素子への応用において特性及び寸法の両面で著しく改善されたことを示す。

現在ワイヤ内の応力分布につきモデル化を検討中である。

文 献

- 1) I. Ohnaka, T. Fukusako, T. Ohmichi, T. Masumoto, A. Inoue and M. Hagiwara: Proc. RQ-4 Conf. 31-34 (1984).
- 2) 小笠原, 大岩, 友広: 昭和 59 年電気学会全国大会
- 3) K. Mohri: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-20**, 942 (1984).
- 4) K. Mohri *et al.*: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-20**, No. 5, 1409 (1984).
- 5) 茅誠司: 強磁性, 岩波全書, 146 (1952).
- 6) 毛利他: 電気学会マグネティックス研究会資料 MAG-84-95 (1984), 日本応用磁気学会誌 **9**(2), 157-160 (1985).

1986 年 12 月 22 日受理, 1987 年 2 月 23 日採録