冷間圧延された Mo パーマロイリボン線の 磁 気 的 応 力 感 受 性*

一ノ瀬幸雄** 山下 武夫** 谷口 哲**

菱山 定夫** 小林 勝**

Yukio Ichinose, Takeo Yamashita, Satoshi Taniguchi, Sadao Hishiyama and Masaru Kobayashi: On the Magnetic Stress Sensitivity of Roll-flattened Mo-Permalloy Ribbons. For high sensitive measurement of the magnetic stress sensitivity in very fine magnetic ribbons or wires, the quantity S is newly defined as the relative change with stress of the maximum e.m.f. in ac field. Measurements of S were made on the dependence of the roll-flattened Mo-Permalloy ribbons on the alloy composition and the working process before roll-flattening.

S defined here is closely related to the magnitude of magnetostriction λ_s and the comparison of the change in the anisotropy field with applied stress on the same ribbon indicates that the change in λ_s of about 0.3×10^{-7} can be detected as the change in S of $1\%/kg/mm^2$.

It is also found that the optimum output voltage of the "twistor" made of Mo-Permalloy ribbon is obtained at $S \approx 0$.

(Received September 21, 1967)

I. 緒 言

メモリ素子に用いる磁性線の重要な性質の一つに磁氣的応力感受性がある。すなわち、磁性線をメモリプレーンに構成するとき、外部応力のために性能の劣化、バラツキの増大などがあり、結局、メモリプレーンの総合的特性が悪化する。

電子交換機のメモリ素子として開発された“ツイスタ”⁽¹⁾においても全く同様で、これに用いる Mo パーマロイリボン線の磁氣的応力感受性はツイスタの構造†から考えて製造上とくに重要であると思われる。

かかる観点から、われわれはメモリ素子に用いる磁性線について、その磁氣的応力感受性ならびにそれにおよぼす合金組成および製造条件などの影響を明らかにしようとの目的をもつて研究を行なつた。本報では、とくに磁性線用として新たに開発した磁氣的応力感受性の高感度測定装置について述べ、さらに本装置により冷間圧延して製造した Mo パーマロイリボン線 (以下では、単にリボン線と呼ぶ) の磁氣的応力感受性におよぼす合金組成および製造条件などの影響を調べた結果について報告する。

II. 応 力 感 受 性 の 定 義 お よ び そ の 測 定 法

リボン線の磁氣的応力感受性は、Photo.1 から知れるように処理条件により大巾に異なる。すなわち、圧延のままでは応力感受性は小さいが、熱処理したものでは著しく大きい。ツイスタにおいては、かかる理由から圧延のままあるいは低温焼鈍した程度のリボン線が用いられる。そのため、これらリボン線の応力感受性は高感度で測定する必要がある。

本章では、われわれが以下の研究に用いた応力感受性なる量の定義ならびにその測定法について述べる。

1. 応 力 感 受 性 の 定 義

磁性合金の磁氣的応力感受性を表わす方法には、バルクの材料に対して Bozorth の方法⁽²⁾、また磁性薄膜に対して Wolf らの方法⁽³⁾などがあるが、この両者のいずれも本研究において取扱う極細なリボン線では測定感度および形状からくる制約のために適当でない。そこで、われわれは極細線の応力感受性を高感度で測定する方法として、交流励振の $B-H$ ループにおける微分出力 $v (=d\Phi/dH$ の最大値) の張力 σ (kg/mm^2) による変化量 Δv をとり、リボン線の寸法による誤差を除くために $\sigma=0$ における v_0 を基準にして応力感受性なる量 S をつぎのように定義した、

$$S = \frac{\Delta v}{v_0 \cdot \sigma} \quad (\%/kg/mm^2)$$

ここで、実際には $\sigma=25 kg/mm^2$ を採用した。

** 株式会社日立製作所中央研究所 (Central Research Laboratory, Hitachi Ltd., Kokubunji)

* 1967 年 4 月本会東京大会に発表

(1) ツイスタの動作原理については、A.H.Boeck: Bell System Tech.J., 36(1957), 1319 に、また、応用については、J.T.Ballenger: Western Elect.Eng., 4(1960), 2; P.H.Mayer: Western Elect. Eng., 9(1965), 2 などに詳述されている。

† ツイスタは冷間圧延して製造した Mo パーマロイリボン線を極細な銅線にある一定大きさの張力をかけて巻付け成形したものである。

(2) R.M.Bozorth: Ferromagnetism (D.Van Nostrand, 1951), 613.

(3) I.W.Wolf et al: J.Appl.Phys., 34(1963), 1205.

2. 測定装置

S の測定装置の概略を Fig.1 に示す。すなわち試料の磁

Photo.1 Variations of B - H loops in roll-flattened Mo-Permalloy ribbons due to tension.

Fig.1 The block diagram of high sensitive recording apparatus for the magnetic stress (tension) sensitivity of a fine magnetic wire or ribbon.

性線は 1kc 交流励磁され(このとき、測定磁場 H_m は磁性線の保磁力 H_c に対して $H_m \gg H_c$ なる条件とする)。検出コイルに誘起された電圧は一旦増巾され、さらに直流変換器を介してレコーダーの Y 軸にいられる。一方、モーターによつて試料の磁性線に加える張力は試料に直結したストレンゲージセルの出力としてレコーダーの X 軸にいられる。このような方法で、レコーダー上に v 対 σ の関係曲線を自動記録できるようになっている。Fig.2 に、本装置により v 対 σ の関係を $1050^\circ\text{C} \times 1 \text{ sec}$ 熱処理した Mo パーマロイ細線(約 $70 \mu\phi$)を用いてレコーダー上に自記した結果の一例を示す。図中、太線は焼鈍した素線(内部歪が非常に小さいと考えられる)に張力を加えて塑性変形したときの v 対 σ の関係曲線(これ 1 次曲線と呼ぶ)であり、また細線で示した曲線群は張力を取り去り再び張力を与えるという操作を繰返し行なつたときの v 対 σ の関係曲線(これを 2 次曲線と呼ぶ)群である。なお、加工伸び率は ϵ でそれぞれ示しておいたが、これは S の測定装置を若干変更し σ 対 ϵ (いわゆる応力-伸び)および v 対 ϵ の関係を同時に記録した結果から求めた値である。また、併記した

H_c は各点で測定した 1kc 励磁における保磁力である。本図から、われわれがさきに定義した磁氣的応力感受性 S とは 2 次曲線におけるはじめの立上りの傾斜を表わすものであることがただちに理解されるであろう。なお、1 次曲線にみられる複雑な挙動についてはあまり明かではない。

III. S の物理的内容

本章では、われわれが定義した S の物理的内容について検討する。

磁性合金が応力あるいは歪に著しく敏感であるということは、磁歪 λ_s を介して歪異方性が誘導されるためであるが、ここに導入した S も λ_s と密接な関係にあることは容易に想像できる。これをより定量的に確かめるために Ni 量をかえた Mo パーマ

Fig.2 An example of the magnetic stress sensitivity (v - σ) curve measured on a full-annealed Mo-Permalloy wire.

ロイの素線およびリボン線の S を調べ、ついで S と本質的に同様と考えられるスイッチングの異方性磁場 H_k の応力感受性を調べ、これと S の関係について定量的考察を行なつた。

1. Ni 量と S の関係

Ni 量を 79~83 wt% に変化した Mo パーマロイ 鋳塊から Table 1 の工程により作製したリボン用素線(径約 $35 \mu\phi$, 加工度約 75%)およびこれを冷間圧延して製造したリボン線(厚さ約 7.5μ , 幅約 120μ の矩形断面形状に近い)について調べた S を Ni 量に対して整理した結果を Fig.3 に示す。これによると、Ni 量による S の変化は素

線およびリボン線で挙動が若干異なるが、 $S \approx 0$ となる Ni 量は両者いずれにおいてもほぼ一致する。ここで Ni 量に

H_d は駆動パルス磁場の大きさである。また、 H_k に関しては理論的に

Table 1 The manufacturing process of Mo-Permalloy ribbon.

Fig. 3 The effect of Ni content on S-values of Mo-Permalloy wire and ribbon.

より素線およびリボン線の S の挙動が異なるのは、内部応力の大きさおよびその分布などの相違による磁区構造の差にもとづくものと考えられる。Wolf ら⁽³⁾ はこれと同様な現象を磁性薄膜の蒸着膜およびメッキ膜において観測している。Fig. 3 と同様な例であるが、つぎには Ni 量を 65~100 wt% (100 wt% は純 Ni, 他は 4 wt% Mo を添加) の広範囲に変化した焼鈍 Mo パーマロイ線 (径約 $70 \mu\phi$) について S を測定し、Ni/Fe 比に換算した Ni 量 (Mo は単に合金を希薄すると考える) に対して整理すると Fig. 4 に示すごとくである。これより、 $S \approx 0$ である Ni 量は Fe-Ni 2 元合金の $\lambda_s \approx 0$ の組成に丁度一致することがわかる⁽⁴⁾。

2. S と λ_s の定量的関係

前節の結果から、 S は λ_s と密接な関係にあることが定性的には理解された。本節では、さらにそれらの定量的関係について検討する。その方法は、理論的に λ_s と直接結びつけることができる H_k の応力感受性を調べ、これと S の対応から定量的関係を導くことにする。

いま、スイッチングが磁化回転により起こると仮定すると、スイッチングの異方性磁場 H_k は理論的に、

$$S_w = t_s (H_d - H_k), \quad \text{ただし } H_d > H_k \quad (1)$$

ここに、 S_w はスイッチング係数、 t_s はスイッチング時間、

(4) R.M. Bozorth et al: Phys. Rev., 89(1953), 624.

Fig. 4 The variation of S-value of full-annealed Mo-Permalloy wire due to Ni content.

$$H_k = -\frac{2K}{I_s}, \quad (I_s \text{ は磁化強さ}) \quad (2)$$

ここに、 K は磁気異方性定数で本実験のリボン線試料では K_1 (結晶), K_w (圧延), K_s (形状) などの異方性を含む。また、これに外部応力を作用する場合には K_σ (歪) が付加され、式(2)は近似的に

$$H_k = -\frac{2}{I_s} (K_1 + K_w + K_s + K_\sigma) \quad (3)$$

とおける。いま、外部応力を変化する場合について考えると、 $(K_1 + K_w + K_s)$ は一定であり、また理論的に $K_\sigma = \frac{3}{2} \lambda_s \sigma$ であるから、

$$\frac{dH_k}{d\sigma} = \frac{3\lambda_s}{I_s} \quad (4)$$

を得る。すなわち、スイッチングにおける H_k の応力感受性は λ_s に関係することが知れる。

このような考えから、以下には S の既知なるリボン線についてその H_k の応力感受性を調べ、 S と $dH_k/d\sigma$ の関係について検討した。

供試したリボン線の合金組成ならびに製造条件、また予め測定した S の値は Table 2 に一括示してある。また、スイッチングの測定はガラス毛细管に巻いたソレノイドを用いて立上時間 $0.05 \mu\text{sec}$, パルス幅 $20 \mu\text{sec}$, 繰返周波数 50kc の駆動パルス条件により行なつた。Fig. 5 にはか

かる方法で観測したスイッチングの出力パルス波形の数例を示した。図中、実線は張力零の場合、点線は張力 50 kg/mm²を加えたとき H_k が S の符号により増減することを示す典型的な例をかかげたものである。この $1/t_s$ 対 H_d の関

Table 2 The process and S-value of Mo-Permalloy ribbon used for experiment.

Ribbon No.	Process of ribbon				S-value of ribbon	Remark
	Ni (%)	R_1 (%)	SHT (°C·sec)	R_2 (%)		
1	81.0	61	800×1	68	-1.50	Immediately after roll-flattening Aged No.2 ribbon at R.T. for 24 hr Aged No.2 ribbon at 200°C for 1.5 hr
2	79.5	99	1050×1	73.5	-0.50	
2'	79.5	99	1050×1	73.5	-0.20	
2''	79.5	99	1050×1	73.5	+0.70	
3	79.5	99	1050×1	73.5	+0.16	
4	79.5	99	1050×1	76.4	+0.19	
5	79.5	99	1050×1	79.2	+0.14	
6	79.5	99	1050×1	81.8	-0.10

Fig.5 Examples of output pulse patterns in flux switching of Mo-Permalloy ribbon under tension σ .

係から $d\sigma$ による H_k の変化量 dH_k を求め整理した結果が Fig.7 であるが、 dH_k は $d\sigma$ にほぼ比例することがわかる。これは式(4)から理論的に予想されることである。

さて、以上にえられた H_k の応力感受性なる量 $\frac{dH_k}{d\sigma}$ をはじめの S に対応して整理した結果は

Fig.6 The effect of tension on the relation between the reciprocal of switching time (t_s) and the strength of pulse field (H_d).

Fig.7 The variation of anisotropy field H_k due to tension σ .

mm² を加えた場合の出力パルス波形である。また、Fig.6 はかかる出力パルス波形から求めた $1/t_s$ 対 H_d の関係で荷

Fig.8 に示すようである。これより S 対 $dH_k/d\sigma$ の関係は本実験範囲内で比例関係が成立ち、その実験式は次式によ

Fig. 8 The relation between S -value and $dH_k/d\sigma$ in Mo-Permalloy ribbon.

り与えられる。

$$S \approx 0.77 \cdot \left(\frac{dH_k}{d\sigma} \right) \quad (5)$$

単位系を合わせ、さきの λ_s を含む式 (4) を適用すれば、

$$S \approx 3.6 \times 10^7 \lambda_s \quad (6)$$

を得る。ここに、 I_s は 640 Gauss (Mo パーマロイ) を用いて計算した。すなわち、本式より S における $1.0 (\%/kg/mm^2)$ の変化は λ_s における 0.28×10^{-7} の変化に相当するものであることがわかる。

なお、以上の実験の中で、本研究の目的ととくに関係はないが続報における研究に対しきわめて重要な意味をもつ実験結果が得られているので、それにつき若干触れておく。それは試料 No. 2~2' のリボン線にみられた一連の時効現象である。すなわち、圧延直後 (No. 2 のリボン線) に測定された S および $\frac{dH_k}{d\sigma}$ はともに < 0 であるが、これを常温一昼夜放置した後 (No. 2' のリボン線) では S および $\frac{dH_k}{d\sigma}$ はともに ≈ 0 となり、さらに $200^\circ\text{C} \times 1.5 \text{ hr}$ 時

効した状態 (No. 2'' のリボン線) では S および $\frac{dH_k}{d\sigma}$ は、 > 0 となり、時効とともに S および $\frac{dH_k}{d\sigma}$ が明らかに

(-) $\rightarrow$ (+) に符号をかえて変化するのが観測された。この事実は、さきの理論的考察からも明らかのように、 λ_s が時効により (-) $\rightarrow$ (+) に符号をかえて増大したことを意味する。ここに、 λ_s の変化量はただかだか 10^{-7} 以下の程度であるが、もし過飽和な原子空孔 (vacancy) の移動あるいは消滅に伴なつておこる短範囲規則格子 (あるいは K-状態)^{(5)~(7)} の生成を考慮すれば、十分 λ_s が時効変化する可能性はあると考えられる。ここで、一般には圧延状態ではより dis-

order (不規則) であり、時効後ではより order (規則) である^{(6)~(7)}。

IV. リボン線の S におよぼす製造条件の影響

応力感受性を表わす量 S は、上述の結果から知れるように著しく構造敏感であるから、リボン線の S はその加工履歴、たとえば熱処理あるいは加工度などの相違によつても変化するであろうと考えられる。以下には、リボン線の S におよぼす製造条件の影響について二、三実験した結果を述べる。

Fig. 9 はリボン用素線 (工程 R_2) の加工度がリボン線の S

Fig. 9 The effect of the degree of reduction in wire (process R_2) on S -value of Mo-Permalloy ribbon.

(Degree of reduction in process R_1 : 95~99%
Treatment in process SHT: $1050^\circ\text{C} \times 1 \text{ sec}$)

Fig. 10 The effect of annealing temperature and degree of reduction in wire (process SHT, R_1 and R_2) on S -value of Mo-Permalloy ribbon.

におよぼす影響を調べた結果であり、また Fig. 10 は最終焼鈍 (工程 SHT) の処理温度がリボン線の S におよぼす影

(5) F. Pfeifer et al: Z. Metallk., **55** (1964), 398.

(6) 長島: 金属学会会報, **3** (1964), 281.

(7) 中村, 片山, 中川, 長島: 電試彙報, **27** (1964), 935.

響を調べた結果である。これらの結果によれば、リボン線の S は、 R_2 の加工度とともにほぼ直線的に減少する。一方、SHT に対しては複雑な挙動を示し、SHT が高くなるとともにはじめ S は増大し、約 900°C で最高となり、さらにこれを越えると S は再び減少する。

以上のように、リボン線の S が熱処理あるいは加工度により変化するのは、Mo パーマロイ特有の K-状態^{(6)~(7)}に関係した異常現象の一つであると考えられる。すなわち、加工度を高くするとより不規則状態となり λ_s は小さくなり⁽⁴⁾、したがって S は減少する。一方、はじめ不規則状態のものを温度を上げて焼鈍するときある遷移温度を境にそれ以下ではより規則状態となり、それを越えると再び不規則状態に戻るが、この変化とともに λ_s ははじめは増大し、遷移温度で最大となり、それを越えると再び小さくなる^{(6)~(7)}。したがって S は λ_s と同様な変化をたどる。Fig. 9 および 10 におけるリボン線の S の挙動は、以上のように Mo パーマロイの K-状態に関して説明される。

V. リボン線の S とツイスタ線の uV_1 (スイッチング出力) の関係

本研究で取扱うリボン線の使用目的は、ツイスタとして利用しようとするものである。そこで、ツイスタの性能に対してリボン線の如何なる性質が重要であるかを明らかにすることは実用的立場から大切なことであろう。ツイスタはリボン線を極細な銅線にある張力下で巻付けるので、リボン線の磁氣的応力感受性が極めて重要な因子と考えられる。

かかる観点から、以下にはリボン線の S とツイスタの uV_1 の関係について検討した。その結果は Fig. 11 に示す

Fig. 11 The relation between S -value of Mo-Permalloy ribbon and uV_1 of twistor wire.

ごとくである。すなわち、本図はリボン線の製造条件を種々変えて作製したツイスタの uV_1 をそのリボン線の S に

対応して画いた結果である。これよりツイスタの uV_1 は各工程における製造条件により変化するが、いずれの条件においてもリボン線の $S \approx 0$ 付近で最高値がえられる。 $S < 0$ もしくは > 0 の領域において uV_1 が低下する理由を以下に述べる。さきに観測した張力下のリボン線のスイッチング出力パルス波形 (Fig. 5) を比較すると、 $S > 0$ の場合 (試料 No. 2' および 4) には張力により磁壁移動で代表される波形が優勢となり⁽⁸⁾、 t_s は長く uV_1 は小さくなる。一方、 $S < 0$ の場合 (試料 No. 1 および 2) には張力により磁化回転で代表される波形が優勢となり⁽⁸⁾、 t_s は短くなるが異方性の回転が起こり B_r (残留磁化) が低下するために uV_1 はまた小さくなる。しかし、かかる異方性回転による uV_1 の低下は、磁壁移動によるそれよりも著しくはないと考えられるから、Fig. 11 において uV_1 は $S < 0$ の領域では緩慢に、一方 $S > 0$ の領域では急峻に低下していくものと考えられる。

VI. 結 言

磁性線の磁氣的応力感受性を表わす量 S を新たに定義し、その高感度な測定装置を試作した。本方法により、最終的に冷間圧延して製造した Mo パーマロイリボン線の S におよぼす合金組成および製造条件の影響について検討した。また、実用的立場からリボン線の S とツイスタの uV_1 の関係についてあわせ検討した。えられた結果を要約すれば、つぎのようになる。

(1) 応力感受性 S は磁歪 λ_s と密接な関係にあり、 $\lambda_s \approx 0$ である Ni 量においてまた $S \approx 0$ になる。一方、スイッチングの H_k の応力感受性から求めた λ_s を S に対して整理すると本実験範囲内で

$$S \approx 3.6 \times 10^7 \lambda_s$$

なる比例関係が成立つことがわかった。これより S の 1.0 の変化は λ_s として 10^{-8} の変化に相当するものであることが知られた。

(2) S は著しく構造敏感であり、加工履歴により大巾に変化する。すなわち、 S は素線加工度とともに直線的に減少し、一方、最終焼鈍温度に対しては処理温度とともにはじめは増大し、 900°C で最大となり、これを越えると再び減少するという複雑な挙動を示す。かかる S の加工履歴による変化は、Mo パーマロイ特有の K-状態に関係する異常現象の一つであると推察された。

(3) ツイスタのスイッチング出力は、リボン線の製造条件により変化するが、いずれの条件においてもリボン線の S が ≈ 0 すなわち $\lambda_s \approx 0$ において最高値がえられた。

最後に、本研究は電々公社通信研究所の幹部方々の御支援により行なつたもので、とくに小谷祐三博士からは多大な御協力をいただいた。ここに厚く御礼申し上げる。また日立製作所中央研究所第 2 部前田部長および伊地山主管研究員からは常日頃御鞭撻と御援助をいただいた。これらの方々にここに厚く感謝いたします。

(8) N. Menyuk: J. Appl. Phys., 26(1955), 8, 692.