強磁性線のパルス誘発効果に関する研究

正 員 松 下
正 員 阿 部

昭 (神奈川大)
晋 (神奈川大)

1. 緒 言

磁性合金に機械的応力を加えると、一般にその磁気的性質が変化することは古くから知られている。しかるに Fe-Co-V 系のバイカロイ合金を線引きして作った強磁性線について、その線軸を中心にひねりを加えそのまま固定して得られる試料は、次のような特異な現象を示す。すなわち

(1) バイカロイ線はひねり回数の増加に伴いその保磁力を減少し、かつ線軸方向に観測した磁気ヒステリシス特性の角形比を顕著に増大する。

(2) ひねり試料の線軸方向に、磁石または交流による可逆的な外部磁界を作用させると、この試料に直接巻回した検出コイルに S/N の良い急しゅんなパルス起電力が 1 サイクルごとに誘発する。

この場合、(2)項のパルス誘発効果を有するひねり磁性線は、新規な磁電変換デバイスの構成要素となり得る見込みがある。なお、磁性線のパルス発生現象に関連するものとして、例えばワイヤメモリー⁽¹⁾⁽²⁾があるが、これは磁性薄膜の磁化回転がパルスの発生要因となるもので、本現象はこれとは異質のものである。また本研究の内容に一見類似したものに自己核形成磁性線が公にされている⁽³⁾⁽⁴⁾。これは磁性線表面に熱処理などで加工硬化処理を施して比較的高い保磁力を付与させ、低い保磁力をもつ線中央部に対する磁気しゃへいを形成させる。そして十分大きな外部磁界により線軸方向に磁化しておく。次にこの外部磁界を取り除くと、その時点で線中央部の磁化方向が、表面部の帰磁路を形成せんとして自発的に逆転する。このときの磁束

変化がパルス出力を誘起するという現象であって、以下に詳しく述べる本研究の内容とは幾つかの点で基本的に異なっている。

ここでは主として筆者らがバイカロイ線について行った、ひねり加工の度合いと磁気特性との関係および外部磁界との相互作用によって、ひねり磁性線要素から発生する急しゅんなパルスの誘発現象について、実験した結果を報告する。

2. 試料の扱い方および実験方法

実験に供した磁性線は、W. B. Driver 社製の線径 0.25 mm のバイカロイ線に通常の焼きなましを行なったもので、その組成は 40Fe-50Co-10V の強磁性合金である。そして、30 mm の長さそれぞれ切断した各磁性線（以下、素線と呼ぶ）に対して、第 1 図に示すようにその一端を固定する。そして他端から素線の線軸を中心にして円周方向にあらかじめ規定した回数 N のひねりを加え、その状態のまま固定したものをひねり試料とした。

第 2 図はこれらの試料における磁気特性と誘発パルスを検出する回路の概要を示したものである。すなわち、検出コイルは線径 0.1 mm の絶縁線を直径 2 mm のポビンに 200 回巻いたもので、試料はこの中にそう入する（図では試料の両端にプラスチック製の支持固定部と回転部とを装着したときの状況を示している）。

第 1 図 ひねりの加え方

Fig. 1. A method of applying the torsional stress to wire.

Studies on Pulse-Generating Effect of Ferromagnetic Wire.
By Akira Matsushita, Member & Susumu Abe, Member
(Faculty of Engineering, Kanagawa University).
松下 昭: 正員, 神奈川大学工学部電気工学科
阿部 晋: 正員, 神奈川大学工学部電気工学科

第 2 図 観測装置の概要図

Fig. 2. Schematic of observation apparatus.

そして、更にその外側に線径 0.5mm の絶縁線を 110 回巻いて作った直径 12mm の励磁コイルを設け、スイッチ $Sw1$ または $Sw2$ の切替えにより直流または交流が通電できるようにしてある。検出コイルに誘起するパルス V_s はシンクロスコープで観測した。また $I-H$ 特性の観測は検出コイルの出力を積分器を通してシンクロスコープの垂直軸に入れ、励磁コイルと直列に接続した抵抗の両端の電圧を水平軸に接続して行なったものである。従って、このようにして得られる $I-H$ 曲線は磁性線の線軸方向に観測したものになる。

なお、ひねり試料に対する外部磁界の与え方については次章でそのつど説明する。

3. 実験結果および考察

〈3・1〉 機械的応力と磁気特性 第 3 図は長さ 30mm の素線に対し、 360° を 1 回転 ($N=1$) とするひねりを段階的に 4 回転まで加えたときの $I-H$ 特性の変化を示したものである。ただし、測定磁界は 80 Oe である。図の $N=0$ で示した素線の磁化状態は完全に飽和はしていないが、かなり等方的である。

しかるに、ひねりを加えた試料では、保磁力 H_c の減少と残留磁化 I_r の増大が見られ、その変化は極めて顕著である。そして、ひねり回数 N の増大と共に

V: 任意単位 of I, H : 20 Oe/div第 3 図 ひねり試料の $I-H$ 特性Fig. 3. $I-H$ characteristics of vicalloy wires with torsional stress.

ほぼ一定の値 ($H_c \approx 13$ Oe) になるが、第 II および第 IV 象限における角形性の増大は著しく、一軸異方性を付与したような性状である。

これらの性状と比較するために、第 4 図は 0~3 kg の張力 T のみをそれぞれ加えたときの $I-H$ 特性を示したものである。図に見るように張力に対して I_r の増大は見られるが、 H_c の減少および角形性の増大傾向はひねりの場合ほど顕著ではなく、その様相は全く異なる。そこで、ひねり回数の異なる各試料について、その内部の磁化状態を明らかにするために次のような検討を試みた。すなわち、磁性線にひねりを加えた状態でその表面から塩化第二鉄溶液により順次化学研磨を行なう。そして研磨の過程で測定した線径 D と保磁力 H_c との関係を求めてみた。第 5 図に見るように、ひねりを加えない $N=0$ の素線の保磁力はほぼ 55 Oe であって、内部で若干の増加が見られる程度である。しかるに、わずかなひねりによって保磁力は極端に小さくなると共に、一定のひねり試料について見

V: 任意単位 of I, H : 20 Oe/div第 4 図 引張り試料の $I-H$ 特性Fig. 4. $I-H$ characteristics of vicalloy wires with tensile stress.

第 5 図 磁性線内部の磁気特性

Fig. 5. Magnetic characteristics inside magnetic wire.

れば、一般にその外周部ほど保磁力が小さいという性状が見られる。これらの測定値はひねり試料を治具に装着したままの状態、研摩と測定を繰返して得たものであるから、その値は残った部分の平均的な保磁力である。しかし、いずれにしてもひねり試料の保磁力は、線軸から表面層にかけて連続的または段階的に小さくなっていることは確かである。

(3・2) パルス誘発現象

(1) パルス誘発の手順 第1章(2)項で述べたように、ひねり磁性線は外部磁界との相互作用によってパルス誘発現象をひき起こす。この場合の基本的な手順は第6図に図解したとおりである。すなわち、第1段階としてまず試料全体を配向磁界 H_1 によって一軸方向（例えば線軸右方向）に磁化しておく。このために直流外部磁界 $-H_1$ を印加する。次に第2段階として前記 H_1 とは逆方向（線軸左方向）で、かつ比較的低い保磁力をもつ試料の外周部分のみを磁化する程度のリセット磁界 H_2 を与える。そして第3段階として再び H_1 と同方向で、かつ第2段階の H_2 と同等またはそれ以上の大きさをもつセット磁界 H_3 を作用させる。図では H_2 と H_3 とを交流で交互に継続的に印加する状態を示している。

このような手順で試料に外部磁界を与えると、その過程で検出コイルからパルス状の誘発起電力を観測することができ、セット磁界 H_3 を印加したときのそれは極めて S/N の良い急しゅんなパルスである。

図において、リセット磁界 H_2 およびセット磁界 H_3 の波高値をそれぞれ H_{2m} および H_{3m} で表わした。また観測される誘発パルスは、リセット磁界の印加過程において負方向のパルス $-V_s$ 、セット磁界において正方向のパルス $+V_s$ である。なおパルスの発生は、磁界 H_3 (または H_2) の上昇過程におけるある

第6図 印加磁界と検出パルスのタイムチャート

Fig. 6. Time chart of applied magnetic field and detected pulse.

(a) 50 Hz

(b) 100 Hz

交流磁界 20 Oe/div, 誘発パルス 500 mV/div

第7図 励磁コイルの電流波形と検出コイルのパルス

Fig. 7. Current wave forms of exciting coil and detected pulse.

(a) $-V_s$ (b) $+V_s$
V: 200 mV/div, H: 50 μ s/div

第8図 誘発パルス $-V_s$, $+V_s$ の波形

Fig. 8. Wave formes of induced pulses $-V_s$ and $+V_s$.

時点であるから、その誘発時点の磁界の大きさを H_s で表わすことにする。

第7図(a)は長さ 30 mm, $N=2$ 回のひねり試料に、まず $H_1=100$ Oe の配向磁界を作用させ、次に $+H_{2m}=-H_{3m}=20$ Oe の 50 Hz の交流磁界（下段）と誘発パルス（上段）との観測例である。そして(b)図は 100 Hz の交流磁界を作用させた場合の例である。図に見るように $-V_s$ と $+V_s$ の大きさは非対称であり、 $+V_s$ の方が著しく高い。

第8図は 50 Hz の交流磁界を印加したときの $-V_s$ および $+V_s$ を拡大した観測例である。図に見るように $+V_s$ の半値幅は 15~20 μ s である。

また誘発パルスの大きさは、交流磁界の波高値が一定であればその周波数にはあまり依存しないという特異性があり、1~100 Hz ではほとんど同じであった。

誘発パルスの大きさは、交流磁界の波高値を変えたとき次のように変化する。すなわち、第9図は誘発パルスのピーク値と交流磁界の波高値との関係を、ひねり回数 N をパラメータにして整理したものである。ただし、あらかじめ試料に印加した配向磁界は $H_1=100$ Oe であった。図に見るように、 $N=0$ 回の素線で

第 9 図 ひねり試料に対する交流磁界と誘発パルスとの関係

Fig. 9. Relation between induced pulses and AC exciting magnetic field in twisted wire.

は誘発パルスはほとんど現れないが、 $N=2$ 回のひねり試料では $H_{3m}=20\sim30$ Oe 付近のセット磁界で最も高いピーク値のパルスを誘発する。そして、その正方向パルスと負方向パルスとでは著しく非対称であるという特異性を見ることができる。

このような観測過程における、ひねり磁性線 ($N=2$) の I - H 特性とパルスの誘発状況とを同時に観測してみると、第 10 図のような関係にあることがわかった。これは、ひねり試料に対しあらかじめ $H_1=100$ Oe で配向磁化を行なった後、($H_2=-H_3$) の交流磁界を零から順次増大していく。図は (a)~(d) に付記した交流磁界で観測されたものである。この場合、 I - H 曲線の左半分は磁界 H_2 に、右半分は磁界 H_3 に対応しているが、 I - H 特性は交流磁界の大きさが 15 Oe に達した瞬間から現われる。そして、この時点で非対称の正負のパルスを誘発している。しかも、(b)、(c) 図を見て明かなように I - H 曲線の左右の形状は非対称であり、保磁力も非対称の関係にある。そのうえ正方向パルスを誘発するときの I - H 曲線の立上りは極めて急しゅんであるという特異性が見られる。この特異性はひねり試料特有の磁化機構に起因するものである⁽⁵⁾。

なお、これらの観測結果に基づき、第 11 図のようにひねり回数 N を横軸にとり、縦軸に $+V_s$ の最大値およびパルス誘発時点における磁界 H_p をとって整理してみた。そして図中にパルス誘発時において観測した各試料の保磁力 H_c を併記したが、その値は H_p と一定の相関性をもっている。すなわち、 H_p および H_c の値はほぼ同じであり、ひねり回数 $N=3/4$ 付近までは急速に低下するが、それ以上のひねりに対して

第 10 図 $H_2=-H_3$ の交流磁界における I - H 特性と誘発パルス

Fig. 10. I - H characteristics and induced pulse with drive condition $H_2=-H_3$.

第 11 図 ひねり回数と誘発パルスの最大値との関係

Fig. 11. Relation between number of twists and maximum voltage of induced pulses.

はほぼ一定の値を保持する。このことは、ひねり磁性線の 10~20 Oe 程度の保磁力をもつ部分がパルスの誘発に多く寄与しているものと考えられる。

以上の実験に供したひねり試料は、弾性変形を伴った状態で機械的に固定したものであって、その固定を解放した試料からは顕著なパルス誘発現象を見られない。そこで適当回数の右ひねりと左ひねりとを反復的に施すことによって、解放状態でも何らかの弾性変形を内蔵している試料、あるいはひねり応力が復元しない程度の熱処理を施した試料を作成したところ、これらについても上述とほぼ同類のパルス誘発効果が生ずることを確認している。

一方、引張りおよび曲げ応力を与えた試料についても、ひねり試料のような顕著なパルス誘発現象は観測されない。

(2) 配向磁界の影響⁽⁶⁾ パルス誘発現象において、あらかじめ作用させておく配向磁界の効用を追究する実験を行なった。

第 12 図は $N=7/4$ 回のひねり試料について、あらかじめ試料全体を交流で消磁しておき、次に所定の大きさの配向磁界を印加する。そして 20 Oe 一定の交流

第 12 図 配向磁界 H_1 の影響Fig. 12. Influence of orienting field H_1 .

磁界で誘発させた正、負のパルスの最大値をプロットしたものである。図に見るように、 $H_1=0$ のときの誘発起電力は比較的小さく、かつ正負の値がほぼ対称的である。しかるに、 H_1 の増大と共に非対称性を増し、 $H_1 \geq 70$ Oe ではば一定の最大パルス起電力 $+V_s$ を誘発する。

(3) リセット磁界およびセット磁界の影響

パルスの誘発効果に寄与する交流外部磁界、すなわち H_2 と H_3 の適正な印加条件を明らかにするため、それぞれについて次のような検討を行なった。

第 13 図は交流磁界におけるリセット磁界の波高値 H_{2m} を段階的に増加させ、セット磁界 $-H_{3m}$ は 20 Oe で一定であるように組合せた場合の波形と、それらに対応して誘発したパルス $-V_s$ と $+V_s$ の状況を示したものである。第 14 図はこのようにして得られたリセット磁界の波高値 H_{2m} に対する $+V_s$ 、 $-V_s$ およびそれぞれの誘発時点における H_p の値を測定した結果である。ただし、試料は $N=2$ のひねり磁性線で、あらかじめ $H_1=100$ Oe の配向磁化が施してある。図に見るように、リセット磁界 $H_{2m}=20$ Oe のときに最大の $+V_s$ を与え、それ以上になると $-V_s$ の方がそれに依存して増大している。これはあらかじめ加えた配向磁化の効力が、これと逆方向のリセット磁界によって減殺されることを意味している。

そこで、次にリセット磁界を $H_{2m}=20$ Oe で一定とし、セット磁界 $-H_{3m}$ を段階的に増大させたときの状況を観測した。第 15 図に見るように $+V_s$ は H_{3m} の大きさにほぼ対応して増大している。 $-V_s$ は比較的低い値で一定である。そして H_p は正負とも 15 Oe 程度ではば対称である。この駆動方式は安定な誘発パルスを得る方法として好都合である。しかもセット磁界の $H_{3m} \geq 60$ Oe においては、配向磁界 H_1 を印加しなくても同じ誘発パルスが得られる。これはセット

第 13 図 リセット磁界の変化と誘発パルス

Fig. 13. Variation of reset field wave forms and induced pulse.

第 14 図 リセット磁界と誘発パルス

Fig. 14. Relation between reset magnetic field and induced pulse.

第 15 図 セット磁界と誘発パルス

Fig. 15. Relation between set magnetic field and induced pulse.

磁界がある程度以上の大きさであれば、これと同方向の配向磁界の作用を兼ねると考えて差し支えないので、パルスの誘発に必要なとする作用磁界はリセット磁界 ($H_{2m}=20$ Oe) とセット磁界 ($-H_{3m} \geq 60$ Oe) の二つでよいことになる。

さて、リセット磁界を一定にした場合のひねり磁性線 ($N=2$) の $I-H$ 特性とパルスの誘発状況とを同時に観測してみると、第 16 図に見るような現象を生じている。図において横軸の 1 目盛は 20 Oe に相当しており、 $I-H$ 曲線の左側をリセット磁界、右側をセット磁界に対応させてある。(b) 図のセット磁界が 15 Oe に達した時点で $I-H$ 曲線が現われ、同時にパ

第 16 図 $H_2 \neq -H_3$ ($\therefore H_2 = 20 \text{ Oe}$ 一定)の交流磁界における $I-H$ 特性と誘発パルス
Fig. 16. $I-H$ characteristics and induced pulses with drive condition $H_2 \neq -H_3$ ($\therefore H_2 = 20 \text{ Oe}$ constant).

パルスを誘発する。15 Oe 以下のセット磁界では、その直前に印加したリセット磁界の磁化が優勢であるため磁化反転を生じない。しかるに 15 Oe 以上になると、配向磁界によって磁化されていた成分との協同効果により急速かつ、いっせいに磁化反転を起こすのであろう。すなわち、その様相は $I-H$ 曲線の急しゅんな立上り状況からも判断できるように、一種のジャンプ現象である。そして、このときの磁束変化が誘発パルスの発生要因をなしている。第 10 図(d)と比較して明らかにように、リセット磁界を 20 Oe 程度に保っておけば大きなジャンプ現象を持続することができ、これによって 1 サイクルごとに 1 個の大きな $+V$ のパルスを確実に誘発させることができる。

このようなパルス誘発現象は、本文で述べたバイカロイ以外の幾つかの強磁性線、例えば 51 Ni-49Fe のパーマロイ、40 Co-44Fe-6V のトーマンジュール線についても確認しているが、その効果は必ずしも大きくはない。

なお、このような特異現象は、ひねり磁性線内部の磁化機構と外部磁界との相互作用に基づくものであるが、その理論的解析および本効果の応用などについては稿を改めて報告したい。

4. 結 言

バイカロイ (Fe-Co-V 系) 合金を適当な直径に線引きし、これにひねりを加えた状態で線軸方向に可逆的な外部磁界を作用させると、磁性線の磁化挙動に伴う磁束変化の際に極めて急しゅんなパルスを誘発する効果がある。

本論文で述べた主な研究成果を要約すると次のようになる。

(1) バイカロイ線に機械的なひねりを加えると、その磁気特性に著しい変化をもたらす。

(2) 磁性線を化学研磨する過程で $I-H$ 特性を観測するという手段によって、ひねり磁性線内部に連続的または段階的に保磁力の異なる層ができていることを明らかにした。

(3) 三段階の可逆的な外部磁界との相互作用によって、ひねり試料の検出コイルに誘起するパルス電圧は大きさが非対称の正負のパルスである。

(4) 本研究で用いた磁性線試料は $N=2$ 回のひねりを施した場合に、 $+V$ のパルス誘発効果が顕著であった。この誘発時に観測される $I-H$ 特性の立上りに大きなジャンプ現象があること、また正負の保磁力には顕著な非対称性が見られることなどを指摘し、若干の考察を加えた。

(5) パルス誘発効果に寄与するリセット磁界の大きさには試料の磁気特性に適応した制限があるが、セット磁界の大きさは少なくともリセット磁界以上であればよい。殊にリセット磁界を十分大きくしておけば、配向磁界を印加しなくても誘発現象を生じる。

(6) リセットおよびセット磁界を交流で加える場合、1 Hz 以下はもとより 100 Hz 程度まで誘発パルスの大きさはほぼ同じである。

以上に述べたパルス誘発現象は $-40 \sim +260^\circ\text{C}$ に於いて大差がなく、ひねり磁性線の経時変化もほとんどないので、新しい磁電変換デバイスの構成要素として適用できる期待がある。殊に駆動磁界として永久磁石を利用すればデバイスの無電源化が図れるので、広い応用が考えられる⁽⁷⁾。

終りに、本研究に協力された本学大学院生 山本勉、高橋宏次の両君ならびに研究室在籍の諸氏に厚くお礼申しあげる。

(昭和 54 年 5 月 10 日受付, 同 55 年 3 月 8 日再受付)

文 献

- (1) 前田・松下:「織成型磁性薄膜記憶装置」, 応物誌, 34, 605 (昭 40-8)
- (2) Maeda & Matsushita: "Woven Thin-Film Wire Memory", IEEE Trans. Magnetics, MAG-1, 13 (1969)
- (3) P. E. Wigen: "Wiegand Wire; New Material for Magnetic-based Devices", Electronics, 48, p.100 (1975)
- (4) R. ウィガンド・M. ベリンスキー:「自己-核形成磁気線」, 特開, 昭47-8956
- (5) 松下・阿部:「ひねり加工を施した強磁性線のパルス誘発現象について」, 電学論A, 99, 190 (昭 54-4)
- (6) 松下・阿部:「強磁性線のパルス誘発現象とその駆動方法について」, 応用磁気学会, 20aB-10 (昭 53-9)
- (7) 松下・阿部:「複合磁性線のパルス誘発効果とその応用計測について」, 電気学会研資, EM-78-31, MAG-78-53 (昭 53)