線爆溶射法による磁歪膜の作製と トルクセンサーへの応用

Preparation of Magnetostrictive Layers by Wire Explosion Spraying and its Application to Torque Sensor

山崎二郎・毛利佳年雄・手島 昇*・福田重久**

九州工業大学, 北九州市戸畑区仙水町 1-1 (〒804)

*九州大学工学部, 福岡市東区箱崎 6-10-1 (〒812)

**九州大学応用力学研究所, 春日市春日公園 6-1 (〒816)

J. Yamasaki, K. Mohri, N. Teshima* and S. Fukuda**

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

*Dept. of Electrical Engng., Kyushu Univ., 10-1, Hakozaki 6,
Higashi-ku, Fukuoka 812

**Res. Inst. for Appl. Mechanics, Kyushu Univ., 1, Kasugakoen 6 chome,
Kasuga 816

The wire explosion technique, which is known to give rise to strong adhesion between sprayed layers and substrates, was applied to the preparation of magnetostrictive layers for sensors. It has been shown that the Ni and/or Fe-Ni layers sprayed in the form of chevron on stainless steel shafts exhibit soft magnetic properties after annealing and are applicable to the constitution of torque sensors showing very linear torque-output characteristics with almost zero hysteresis in combination with a two-core type multivibrator bridge circuit.

1. はじめに

高磁歪アモルファスリボンの磁歪の逆効果を利用した非接触式の高感度トルクセンサーが報告されている^{1),2)}。これらにおいては、アモルファスリボンはシャフトの周囲に接着剤を使用してシェブロン状に貼りつけられ、シャフトのトルクによる剪断応力は接着剤を介して高磁歪リボンへ伝達される。このため、トルクセンサーとしての信頼性は使用される接着剤の接着力で大きく左右され、接着剤の選択が重要になる。近年、温度変化が激しいなどの苛酷な環境下で使用できるセンサーへの要求が高まっている。これに答え得るトルクセンサーとしては接着剤の使用は好ましくなく、信頼性の高い、強い付着力を有する高磁歪膜の開発が望まれる。

線状の導体にコンデンサー放電による衝撃大電流を通電することによって、線材を一瞬のうちに溶解、爆発させて線自体を高温微粒子化し、高速度で溶射する線爆溶射法によれば、基板に対する投着効果により高付着力膜が得られる。付着力は最大 26 kg/mm² に達する^{4),5)}。現在、この手法はエンジンシリンダー内壁に、タングステンなどの高融点材による焼きつき防止のためのコーティング層を形成するために使用されているが、磁性膜へ

の応用、検討例はほとんどみられない。本研究では、線爆溶射法による磁歪膜の形成、および、その磁気特性について検討し、トルクセンサーへの応用を試みた。

2. 線爆溶射膜の作製と磁気特性

線爆溶射には通常の高圧実験に使用される充放電装置を使用した。基本回路を Fig. 1 に示す。充電コンデンサー容量: 20 μ F, 最大充電電圧: 30 kV である。線爆溶射による膜の形成過程は著者の一人である福田ら⁵⁾ により詳細に調べられている。これによると、線状導体は放電による衝撃大電流により瞬時に溶解し、沸点近くまで温度が上昇する。その結果、内部では線材が気化し、その爆発ガス (1000 m/sec) により線材外周の溶融部分は数 μ m 径に微粒子化され、爆発ガス中を円筒形雲状で溶射される。このため、付着力の強い膜を能率良く得るには、線材単位体積当たりの投入エネルギーを調節し、ガス化される部分と溶射粒子体になる部分の比率を適当に選ばなければならない。エネルギーが高すぎると線材のほとんどがガス化し溶射膜が得られない。低すぎると爆発が弱いので、溶射膜の付着力は弱く、膜面も粗いものとなる。溶射材である Ni, Fe ワイヤの線: r 径長さ: l を種々変化させながら、最適投入エネルギーの値を求

Fig. 1 Discharging system for wire explosion spraying.

めた結果、 $r=0.6\text{ mm}$ 、 $l=30\text{ mm}$ の線材を 5.8 kJ の放電エネルギー（充電電圧： 24 kV ）で線爆を行うと高付着力膜が得られることがわかった。

線爆法では、金属爆発ガスの到達範囲に基板を置くと溶射粒子は大気に触れることがなく、酸化の少ない溶射膜が得られる。本実験では溶射線材と基板の距離を 12 mm とした。溶射膜にはきわだった酸化、微候はみられなかった。

Fig. 2 にステンレス平面基板に Ni を 6 回線爆溶射した膜：(a)、および、Ni と Fe を交互に 3 回ずつ溶射した膜：(b) の表面と断面の SEM 写真を示す。表面には

サブ μm から数 μm の多数の円形粒子と、いくつかの粒子が爆発の圧力により扁平化し溶着したものと思われる不規則な形をした大きな層状の組織がみられる。表面の凸凹は大きく、相対値で最大 30% ほどのゆらぎがみられ、内部には空孔が点在している。空孔は表面に近いところで多くみられる。Fe-Ni 膜においては、Fe、Ni は交互に溶射されたにもかかわらず、基板に平行なはっきりとした水平層を形成せず、基板面に垂直な方向への層の流れがみられる。これは強い爆発の圧力によるものであろう。表面近くに点在する空孔は、線爆の繰り返しでつぶされ、埋められていき、内部ほど少なくなるものと思われる。基板と溶射膜の間にはほとんど空隙がみられない。両者は高速高温溶射粒子の投錯効果により、界面で数 μm^2 にわたって拡散固溶しているものと考えられ、強い付着力を有しているものと思われる。

Fig. 3 に試料振動型磁力計により測定した Ni 溶射膜のヒステリシスループを示す。as-deposited の状態（破線）では、膜は相当の応力を蓄えているものと思われ、 130 Oe ほどの高保磁力を有し、飽和に達するには 2 kOe 程度の磁界を要する。この膜を真空中で、 $800^\circ\text{C} \times 1\text{ 時間}$ の焼鈍を行うと、保磁力は $1/10$ に低下し、約 1 kOe の磁界で飽和する軟磁性膜（実線）が得られる。

Fig. 2 SEM views of Ni and Fe-Ni layers sprayed on a flat substrate.

Fig. 3 DC hysteresis loops of Ni layer sprayed on a flat substrate.

3. トルクセンサー

線爆溶射法では、火炎溶射法におけるような溶射材の加熱が必要でないため、基板に対する熱の影響がほとんど問題にならず、可燃物でマスキングを行うとができる。通常のビニル製粘着テープを使用してシェブロン状のマスキングを施した。直径8mmのステンレスシャフトを Fig. 4 (a) に示す。Fig. 1 に模式図を示すように、このシャフトを溶射体と直角に配置し、シャフトを軸のまわりに45°ずつ回転させながら8方向からNi, Feワイヤの溶射を繰り返す。Fig. 4 (b) に示すような、厚みが約70 μmのNi, および、NiとFeを交互に5層ずつサンドイッチ状にした2種類のシェブロン状溶射膜を作製した。

Fig. 4 (b) に示すシェブロン状膜のうち、右半分の溶射膜にシャフト軸方向に60Hzの交流磁界を印加しながら測定したB-Hループ(実線)と、矢印の方向に3 kg·m以上のトルクを印加した時のループの変化(破線)を Fig. 5 に示す。Ni膜には真空中(1×10^{-3} torr)で500°C×3時間、Fe-Ni膜には1000°C×1時間の熱処理を施した。Ni膜は負の、Fe-Ni膜は正の磁気弾性効果を示す。Ni, Feの飽和磁気ひずみ λ_s はいずれも負であることから、Fe-Ni膜はサンドイッチ層が拡散固溶した結果、 $\text{Fe}_{50}\text{Ni}_{50}$ ($\lambda_s = 25 \times 10^{-6}$) に近い組成を有しているものと思われる。Fe-Ni膜の磁気特性はNi膜に比較し、低保磁力で、回転磁化領域が広いことが特長である。

シェブロン状磁歪膜を溶射したシャフトを、Fig. 6 に示す二磁心型磁気マルチバイブレーター²⁾と組み合わせ、トルクセンサーを構成した。トルク印加によるシェブロン膜の磁気特性(インダクタンス)の変化は、ブリッジの不均衡電圧として出力される。Fig. 7 はNi, および、Fe-Niシェブロン膜を磁心としたブリッジの、電源電圧をパラメータとした時の出力電圧-印加トルク特性であ

Fig. 4 Stainless steel shaft masked with adhesive tapes in a form of chevron (a), and with sprayed layer (b).

(a) Ni

(b) Fe-Ni

Fig. 5 Hysteresis loops of chevron shaped magnetostriuctive layers measured under 60Hz sinusoidal fields.

る。いずれの場合も、ほとんどヒステリシスがない。リニアリティに優れた特性が得られる。シェブロン状のアモルファスリボンを使用した場合も良好な特性が得られる²⁾。電源電圧が7.5Vのときの特性で感度を評価し、アモルファスリボンの値と比較すると、Fe-Ni膜で $1/10$ 、Ni膜で $1/20$ 程度に小さい値となる。しかし、この程度の値は、線爆膜の出力電圧-トルク特性のリニアリティが良好であるため、電気的に十分に補うことができる。

Fig. 6 Torque sensors with a two-core multi-vibrator bridge.

4. む す び

以上、高付着力膜を形成する方法として知られる線爆溶射法を用いて磁歪膜を作製し、トルクセンサーへの応用を試みた。線爆溶射膜は焼鈍を施せば軟磁性を示すようになり、二磁心型の磁気マルチバイブレーターと組み合わせることにより、リニアリティに優れたトルクセンサーを構成できることがわかった。なお、本研究では、Fe-Ni 合金膜を得るため、固溶拡散のための高温熱処理を行ったが、これはシャフトの機械的性質に少なからず影響を及ぼすであろう。この難点を避けるためには、線引き法などによる合金線の作製が必要である。

最後に、精力的に実験にご協力いただいた小川政信君（現旭硝子）に感謝します。

文 献

- 1) I. Sasada, A. Hiroike and K. Harada: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-20**, 951 (1984).
- 2) K. Mohri: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-20**, 941 (1984).

(a) Ni

(b) Fe-Ni

Fig. 7 Output voltage vs. torque characteristics.

- 3) K. Mohri, J. Yamasaki, Y. Satoh and M. Harada: *Memoires Kyushu Inst. Tech.*, **14**, 19 (1984).
- 4) 栖原寿郎, 福田重久: 高温学会誌, **3**, 19(1977).
- 5) 栖原寿郎, 福田重久: 材料, **24**, 1003 (1975).

1986年1月6日受理, 1986年2月27日採録