Fe-Al合金を用いた磁歪式トルクセンサ

斉藤貴伸*, 矢萩慎一郎*

Magnetostrictive Torque Sensor with Fe-Al Alloys

Takanobu Saitoh and Shin-ichiroh Yahagi

Synopsis

The needs of accurate torque control of motors and engines have accelerated the development of various types of torque sensors. We investigated solenoid type magnetostrictive torque sensor with grooved shafts made of Fe-Al alloys. Sensor output characteristics (sensitivity and hysteresis) were measured by changing Al content and heat treatment (cooling rate) of the shafts.

Maximum sensitivity and zero hysteresis were obtained at around 13wt% Al content when the shafts were oil quenched. With increasing the cooling rate of the shaft, linear sensor output was obtained, and the hysteresis became small on all the samples tested.

The calculation of sensor sensitivity was made assuming the rotation magnetization, which showed agreement with the experimental value.

Relationship between the hysteresis and the magnetic properties (B_r) was observed although the origin of the hysteresis of the sensor output is not clear.

1. 結 言

近年、工作機械、建設機械、ロボット、モータなどの産業用機器、あるいは自動車の制御技術の高精度化に伴い回転軸に印加されるトルクを直接検出したいというニーズが高まってきている。トルクを直接検出するための主な方式としては歪みゲージを貼り付ける方式や位相差を利用する方式などがある。しかしながらこれらの方式はいずれも構造の複雑さ、温度や振動に対する耐久性、耐環境およびコストなどの点から計測器などの比較的使用環境の厳しくない部位にのみ実用化されているのが現状である。一方回転軸の磁歪を利用し

た磁歪式トルクセンサは他の方式に比べ、非接触であること、構造が簡単であり耐久性に優れること、静トルク、動トルクともに計測できることなどの利点がある。

磁歪式トルクセンサではトルクを検出する部分にのみ磁歪特性を有するアモルファス薄帯を貼り付ける方式^{1),2)}やスパッタ法³⁾、メッキ法⁴⁾などによる磁歪層の形成が試みられている。これらの接着・接合方式では接着の方法やあるいは耐久性、温度環境の点で問題が残る。これに比べ回転軸そのものに構造部材としての強度特性とともにセンサ機能の両方の特性を合わせ持たせることができれば従来の技術的問題は解消されることになる。

一方磁歪成分を励磁・検出する方式は回転軸の一部のみを励磁・検出する磁気ヘッド方式²⁾と回転軸全体を貫通コイルで励磁・検出する方式¹⁾と

1990年5月24日受付

*大同特殊鋼㈱研究開発本部

に大別される。回転軸に磁歪材料そのものを用い、磁気ヘッドで励磁・検出する方式では回転軸の磁気的不均一が原因となって出力信号に回転変動が発生し⁹⁾瞬時トルクが計測できないという問題がある。

そこで著者らは近年回転軸そのものを磁歪材料で構成し、貫通コイル方式での励磁・検出によるトルクセンサを開発してきている^{6),7)}が、今回特に低トルク計測用としてFe-Al合金を回転軸として用い、Al成分、熱処理条件変化によるセンサ特性を調査した。Fe-Al合金は高磁歪合金として知られており、逆磁歪効果として応力印加による透磁率の変化が著しいと考えられ、センサの高出力化が期待できる。

2. 実験方法

2.1 センサ試験片の作製

Al量を11.2~14.1wt%までに变化させたFe-Al合金を真空誘導炉で各30kg溶解した。その成分をTable 1に示す。次に1200℃で直径25mmの

丸棒に鍛伸した。試験片はFig. 1に示すように直径20mm、長さ170mmの丸棒に切削加工により幅2mm深さ0.5mmの溝を円周上に45°方向に等間隔に片側8本ずつ計16本形成した。この溝は形状磁気異方性によりトルク印加時の主応力方向のインダクタンスの変化を有効に検出する働きをもつ。試験片加工後、熱処理として真空中または水素雰囲気中で800℃に3h加熱後冷却し、センサ出力特性測定用の試験片とした。冷却速度は100℃/h、500℃/h、1000℃/h、N₂ガス急冷(≒10⁴℃/h)、油冷(≒100℃/s=3.6×10⁵℃/h)と变化させた。

2.2 センサ特性の測定方法

トルクセンサの構成をFig. 2に示す。試験片に加工された一对の凹凸部に対向してそれぞれコイルを44巻きし、外側をPBパーマロイ製のヨークで覆い、これらをステンレス製のケースに収納してトルク検出部とした。

Fig. 1のような矢印の方向にトルクが印加されると軸の表面には45°方向に引張応力+ σ と圧

Table 1. Chemical composition of the specimens (wt %).

C	Si	Mn	P	S	Al	N	O	Fe
0.001) 0.004	<0.01	<0.02	<0.002	<0.002	Varied (11.2, 11.9) (12.5, 13.0) (13.5, 14.1)	<0.002	0.0006) 0.0011	Bal

Fig. 1. Torque sensor with grooved shaft and sensing coils.

Fig. 2. Schematic diagram of the circuit of the torque sensor.

縮応力 $-\sigma$ のせん断応力が働く、軸が正の磁歪を有している場合には溝の方向と同じ方向に引張応力が働く右側凹凸部の透磁率は増大し、これに伴いコイル2のインダクタンス L_2 は増大する。逆に溝の方向と同じ方向に圧縮応力の働く左側では透磁率が減少してコイル1のインダクタンス L_1 は減少することになる。そこで Fig. 2 に示すように2つのコイル L_1, L_2 に対向する固定抵抗とバランス調整用の可変抵抗とでブリッジ回路を構成しトルク印加による2つのコイルのインダクタンス L_1, L_2 の変化分を差動的に検出、後段での増幅器により信号増幅を行い印加トルク対出力信号の特性を調査した。励磁は周波数 30kHz、電流 30mA とし、最大印加トルクは $\pm 1\text{kgm}$ とした。

2.3 磁気特性の測定

センサ試験片と同一の鍛伸材より試験片を加工し、必要な熱処理後磁気試験に供した。

磁束密度は外径 20mm、内径 15mm、高さ 5mm の磁気リング試験片を用いて $B-H$ 曲線を描かせ、残留磁束密度 B_r 、および外部磁界 $H=25\text{Oe}$ のときの磁束密度 B_{25} を測定し、これを近似的に飽和磁束密度とみなした。一方磁歪は直径 5mm、長さ 100mm の丸棒試験片を用い、外部磁界 $H=500\text{Oe}$ での伸びを差動トランス法で測定し求めた。

3. 結 果

3.1 センサ特性

Fig. 3 に Fe-14.1Al で熱処理の冷却速度を 100°C/h 、 1000°C/h 、油冷と変化した場合のセンサ特性の変化を示す。 100°C/h で徐冷するとセンサ出力は直線とはならず途中で交差する ∞ 字型となる。冷却速度が速くなるに従い出力はほぼ直線となっている。出力感度 (V/kgm) は -1kgm と $+1\text{kgm}$ の間の平均の傾き、ヒステリシスの大きさは0トルクにおけるその幅を 1kgm に対する割合で示し、ヒステリシス (%) として定義した。またセンサ出力の回り方について着目すると、冷却速度の遅い場合には矢印のように反時計回り (トルク減少時の出力がトルク増加時の出力よりも大きい) に回るのに対し、冷却速度が速い油冷の場合には時計回りに回っている。そこで反時計回りに回る場合にはマイナス、時計回りに回る場合にはプラスのヒステリシスとして表わすことに

した。

3.2 センサ特性に及ぼす冷却速度の影響

Fe-14.1Al の場合について感度とヒステリシスを冷却速度について整理したものが Fig. 4 である。冷却速度が速くなるにつれて感度は低下するが、 1000°C/h 以上の速い場合にはほぼ一定になる。一方ヒステリシスは冷却速度が遅い 100°C/h の徐冷では -20% 程度の大きなヒステリシスを示しているが、冷却速度が速くなるに従い小さくな

Fig. 3. Sensor output characteristics (Fe-14.1%Al).

Fig. 4. Cooling rate dependence of sensor output characteristics (Fe-14.1%Al).

りゼロを横切ってプラス側になり油冷の場合 +5%程度となる。

同様に Fe-12.5Al の場合について Fig. 5 に示す。この成分の場合、感度は冷却速度とともにやや増大する。一方ヒステリシスは100°C/hの徐冷では+30%程度のヒステリシスを示すが冷却速度とともに減少し、いったんゼロを切ってマイナス側へ移る。しかし N₂ ガス急冷、油冷ではほぼゼロになっている。

他の成分についても100°C/hのように冷却速度が遅い場合には大きなヒステリシスを示すが、10⁴°C/h以上の冷却速度ではほぼ一定のヒステリシスを示すことが確かめられた。

3.3 センサ特性に及ぼす Al 含有量の影響

Fig. 5. Cooling rate dependence of sensor output characteristics (Fe-12.5Al).

Fig. 6. Al dependence of sensor output characteristics.

ヒステリシスは徐冷した場合に比べ油冷した方が著しく低減できることが確かめられたので、油冷した場合において Al 含有量に伴うセンサ特性の変化を Fig. 6 に示す。感度は13% Al 付近で最も高くなっていることがわかる。ヒステリシスは低 Al 側ではマイナスの値を示しているが、12.5~13.0% Al 付近でゼロとなり高 Al 側ではプラス側へ移る。従って Al 量が13%付近において感度が最も高く、かつヒステリシスが小さくなって検出精度の高いトルクセンサを構成することができる。

4. 考 察

4.1 センサ感度に及ぼす磁氣的要因の解析

センサの出力感度は応力による透磁率の変化 $\Delta\mu$ が大きいほど高いものと考えられ、Bozorth によれば

$$\Delta\mu \propto I_s \cdot \lambda_s / K$$

I_s : 飽和磁化, λ_s : 飽和磁歪, K : 結晶磁気異方性定数となる⁸⁾。つまり I_s, λ_s が大きく、かつ K が小さいほど感度は高くなるものと考えられる。そこでアモルファス薄帯を利用したトルクセンサについて適用されている解析方法⁹⁾を用いてさらに詳細に検討してみる。この解析では磁化が可逆回転磁化のみで変化し、磁壁移動による磁化の変化はないと仮定した。

Fig. 7 にそのモデルを示す。2つのコイルによって磁界 H が印加されたときに磁化 I_s のつり合い方向を θ_1, θ_2 とする。トルク印加によって発生する表面のせん断応力は溝の向きと同じ45°である。磁気異方性 $K_{u1,2}$ は最初に与えられている異方性 K_{u0} に対してトルク印加により磁歪 λ_s を介して $3\lambda_s\sigma$ だけ変化する。従って

$$\begin{cases} K_{u1} = K_{u0} - 3\lambda_s\sigma \\ K_{u2} = K_{u0} + 3\lambda_s\sigma \end{cases}$$

表面のせん断応力 σ と印加トルク T との関係は丸棒の直径 d により $\sigma = \left(\frac{16}{\pi d^3}\right) \cdot T$ で表わされる。

このときそれぞれの磁化エネルギーは

$$E_i = K_{ui} \sin^2\left(\pi/4 - \theta_i\right) - I_s \cdot H \cos\theta_i \quad (i=1,2)$$

で表わされる。ただしここでは溝による反磁界エネルギーは無視している。 I_s のつり合い方向 θ_1, θ_2 はこの磁化エネルギーを最小にする条件

Fig. 7. Calculation of sensor sensitivity using rotation magnetization model.

$\partial E_i / \partial \theta_i = 0$ ($i=1, 2$) で求められる。これを解いて

$$\cos \theta_i = \left[1 - \frac{1}{4} \left\{ \sqrt{2 + \left(\frac{Is \cdot H}{2Ku_i} \right)^2} - \frac{Is \cdot H}{2Ku_i} \right\}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (i=1, 2)$$

となる。このときセンサ出力は

$$\begin{aligned} \text{出力} &\propto \Delta \Phi = \Phi_1 - \Phi_2 \\ &\propto Is [\cos \theta_1 - \cos \theta_2] \end{aligned}$$

で表わされる。

4.2 Fe-Al 合金の磁気特性

前節においてセンサ感度を計算するために必要な材料特性値は Is , λs , Ku_0 である。そこで Is については 2・3 節で述べたように磁気リング試験片で測定した B_{25} を代用し、 λs は実測値を用いた。Fig. 8 に油冷した場合の Al 含有量に伴う B_{25} と λs の変化を示す。 B_{25} は Al 量の増加に伴ってしだいに減少するが、Al 量が約 13.5% でわずかに増加している。これは Fe_3Al 型規則相の規則/不規則変態によるものと推察される。また λs は Al 量の増加と共に単調に減少することがわかる。

4.3 Fe-Al 合金を用いたセンサ感度への適用

Fe-Al 合金を用いたセンサ感度に先の計算を

Fig. 8. Magnetic properties of Fe-Al alloys.

適用した。 Is と λs は油冷および N_2 ガス急冷熱処理材の実測値を用い、 Ku_0 は文献値 Fe_3Al (不規則状態) の結晶磁気異方性定数 $K_1 = 3200 \text{ J/m}^3$ (10) を成分に依らずに一定値として用いた。センサ試験片の直径 d は $d = 20 \text{ mm}$ 、印加トルク T は $T = 1 \text{ kgm}$ として実験と同一条件で計算を行った。油冷および N_2 ガス急冷の熱処理材についてセンサ出力感度の計算値と実測値の比較を Fig. 9 に示す。ややばらつきが大きい、計算値と実測値はほぼ一致している。このばらつきは磁化過程を回転磁化だけで取り扱っていること、そして磁気異方性の値を成分に依らずに一定としたことが原因と考えられる。

4.4 ヒステリシス発生原因の検討

センサ出力曲線の形状や感度、ヒステリシスは冷却速度によって大きく変化することが確かめられた。ヒステリシスはセンサの検出精度を決定するための大きな要因となるのでこのヒステリシスを小さくすることが肝要となる。ヒステリシスの発生に関してはその大きさや回り方がどのような磁氣的要因で決定されているかは未解明な部分が多いが、以下のように考察した。

まず Al 量および冷却速度を変化させて測定した残留磁束密度 Br とヒステリシスの関係を

Fig. 9. Comparison between calculated and experimental sensor sensitivity.

Fig. 10 に示す。いずれの合金成分についても冷却速度が速くなるに従い Br は低下し、かつヒステリシスが低下していることがわかる。

センサ出力のヒステリシスはトルク被測定軸である Fe-Al 合金のいわゆる $B-H$ 曲線の磁氣的ヒステリシスに帰因しているものと考えられる。磁化容易方向と垂直方向に磁界を印加すると Br の小さいラウンドループ状の $B-H$ 曲線が得られる。溝加工によって形状磁気異方性を付与した本トルクセンサの場合、磁化容易軸方向は溝加工の施されている方向 ($\pm 45^\circ$) である。油冷のように速い冷却速度で冷却され、 Br の低いサンプルでは磁化困難軸は溝方向と垂直方向であると推定される。その方向は試片の対称性から軸の半径方向に異方性が発生しているものと推察される。異方性発生の原因は軸表面と中心部の熱膨張差などによる軸の半径方向の残留応力と考えられる。一方徐冷の場合には残留応力の低下により磁化は等方的となり磁壁移動による不可逆磁化が優勢となって大きなヒステリシスが発生しているものと考えられる。

5. 結 言

Fe-Al 合金をトルク被測定軸として用いた貫通コイル型の磁歪式トルクセンサにおいて、センサ特性(感度、ヒステリシス)に及ぼす Al 含有量 (11.2~14.1%), 熱処理条件(冷却速度)(100

Fig. 10. Relationship between hysteresis and Br .

℃/h~油冷)の影響を調査し、以下の結論を得た。

(1) いずれの成分においても冷却速度が速くなるにつれてセンサ出力曲線は直線性を増しヒステリシスは減少する。油冷した場合が最もヒステリシスが小さくなる。

(2) 油冷した場合、Al 含有量が約13%付近で感度は最大となりかつヒステリシスがゼロとなり、検出精度の高いトルクセンサを構成することができる。

(3) 応力印加による磁化の変化を回転磁化と仮定し、飽和磁化 I_s , 磁歪 λ_s , 磁気異方性定数 K_{u0} を用いてセンサ感度を計算すると計算値と実測値はほぼ一致することがわかった。

(4) ヒステリシスの発生原因については未解明の部分が多いが残留磁束密度 Br が小さいほどヒステリシスは小さいことが確かめられた。冷却速度が速い場合には軸表面と中心部との熱膨張差などによる残留応力が原因となって軸の半径方向に異方性が発生しヒステリシスが低下しているものと考えられる。

最後に本研究を遂行するにあたり全般にわたりご助言をいただいた日産自動車材料研究所の皆様様に感謝いたします。さらに試験片作製や磁気測定など熱心にご協力いただいた大同特殊鋼材料研究開発本部電子材料研究室の山迫義和氏、またセン

サ部，検出回路部を設計，作製していただいた計測制御研究室の皆様にお礼申し上げます。

(文 献)

- 1) 原田，笹田，川尻，井上：電気学会マグネティックス研究資料，MAG-81-71 (1981)
- 2) 笹田，浦本，原田：日本応用磁気学会誌，**10** (1986)，379
- 3) 緒方，池田：第13回日本応用磁気学会学術講演概要集，22aD- 3，(1989)
- 4) 林，池田，宇津井，佐藤，小原：第13回日本応用磁気学会学術講演概要集，22aD- 4，(1989)
- 5) 野々村，西部，竹内，五十嵐：日本応用磁気学会誌，**13** (1989)，431
- 6) H. Aoki, J. Maruyama, M. Shimada, K. Tanizaki, S. Yahagi, and T. Saito: Technical Digest of the 7th Sensor Symposium, (1988), 83
- 7) 谷崎，青木，矢萩，斉藤：日本応用磁気学会誌，**14** (1990)，383
- 8) R. M. Bozorth: Ferromagnetism, (1951), 617, [D. Van Nostrand]
- 9) 小林，佐橋，土門，猪俣，鈴木：日本応用磁気学会誌，**11** (1987)，349
- 10) 高橋，新井，小林，脇山：日本応用磁気学会誌，**11** (1987)，255