プラズマ溶射磁わい層を利用したトルクセンサ

正員 笹田 一郎 (九州大)

非会員 浦本 紳一 (九州大)

正員 原田 耕介 (九州大)

1. ま え が き

トルクの情報は種々の機械あるいは電気機械系の高度な制御にとり重要である。特にロボットの運動制御、エンジンやモータなどの高度な制御のために、構造が簡単で、瞬時トルク検出可能な非接触形トルクセンサの開発が強く望まれている。これまで、瞬時トルク検出の可能な小形非接触トルクセンサとして、高磁わいアモルファス薄帯と、ソレノイドコイルを用いた方式のものが著者らにより提案されている⁽¹⁾⁽²⁾。しかし、更に小形で装着容易なトルクセンサ実現のためには、磁気ヘッドのような小さくて着脱容易な軸外のコイル系を利用するのが望ましいと考えられる。磁気ヘッド方式のトルクセンサの基本原理は、既に Beth 氏⁽³⁾および Dahle 氏⁽⁴⁾によって明らかにされており、これまで、この原理に基づくトルクセンサの開発が幾つか試みられてきた。しかし、いずれもトルク検出のための応力磁気変換素子として通常の回転軸の逆磁わい効果を利用したものであり、構造は簡単となる反面、その磁気特性の不均一性のために軸の回転に伴って出力が変動する問題があった。例えば、文献(5)によれば、検出感度が約 $\pm 5\%$ ほど変動することが報告されている。また、零点変動も大きく、スチール軸 (JIS 規格 S 45 C) に関する著者らの測定結果⁽⁶⁾をもとに計算すると、軸径 $12\text{ mm}\phi$ 、最大印加トルク $20\text{ N}\cdot\text{m}$ (せん断応力 $\tau=58.9\text{ N/mm}^2$) に対し、約 $\pm 16\%$ /FS の値となる。

著者らは、磁気ヘッド方式トルクセンサにおけるこのような軸の回転に伴う出力変動の問題を根本から解

決し、瞬時トルクの検出できる小形で装着容易なトルクセンサを実現することを目的として、軸周に形成された均一性の高い磁わい層の利用を検討している。これまで、プラズマ溶射法や電気めっき法により軸周に比較的一様に形成された磁わい層を用いて磁気ヘッド方式のトルクセンサを構成し実験を行った結果、瞬時トルク検出の可能なことが明らかとなった⁽⁷⁾⁽⁸⁾。本論文では、上記トルクセンサの原理と構成について述べ、磁気ヘッドと磁わい層間空けき変動およびそれらにおける励磁損失を考慮してトルク検出過程を解析し、励磁周波数と回路パラメータとの関係、および空けき変動と感度変化の関係を明らかにした。また、プラズマ溶射法により軸周に比較的容易に形成される Ni 層を用いて実際にトルクセンサを構成し、その静特性・動特性およびその高精度化について具体的検討を行った結果、最大印加トルク $20\text{ N}\cdot\text{m}$ に対し、非直線誤差約 1.2% /FS、ヒステリシス誤差約 1.5% /FS 出力の回転変動分約 $\pm 1.3\%$ /FS 以下のトルクセンサが構成できることを示した。

2. 磁気ヘッド方式トルクセンサ

〈2・1〉 動作原理と構成 図1に、逆磁わい効果を用いて印加トルク T を非接触に検出するための方法を示す。ここで、軸の周囲には一様に磁わい層が形成されており、一对の U 字形磁気ヘッドは、その磁極対方向が軸方向に対し $\pm 45^\circ$ となるよう軸に非接触に配置してある。トルク検出の基本原理は Beth 氏⁽³⁾および Dahle 氏⁽⁴⁾によって用いられたものと同

図1 非接触トルク検出の原理

Fig. 1 Principle of non-contact torque detection.

Torque Sensors Using Plasma Sprayed Magneto-strictive Layer.
By Ichiro Sasada, Member, Shin-ichi Uramoto, Non-member
& Koosuke Harada, Member (Faculty of Engineering, Kyushu University).

笹田一郎: 正員, 九州大学工学部電子工学科
浦本紳一: 非会員, 九州大学工学部電子工学科
原田耕介: 正員, 九州大学工学部電子工学科

図 2 トルクセンサの構成
Fig. 2 Schematic diagram of the torque sensor.

じく、 T によって磁わい層内に誘導される主応力により、その透磁率が異方的になるのを利用する。すなわち、 T を印加すると、その方向と磁わい層の飽和磁わい定数 λ_s の符号に依存して磁わい層内に 45° あるいは -45° 方向を磁化容易軸とする一軸磁気異方性が現れ、これにより一対の磁気ヘッドの自己インダクタンスに差が生じ、トルク検出が可能となるものである⁽⁷⁾。

図2に、一対の磁気ヘッドの自己インダクタンスの差を検出するための回路を示している⁽⁷⁾。この回路は磁気ヘッドの自己インダクタンスを L とする L - R ブリッジ、それを励振する励振部、およびブリッジの非平衡電圧から同期整流により直流出力を得る部分とから成っている。励振部および同期整流回路は、デューティ比 0.5 の方形パルス q 、および $\bar{q}$ により駆動される。この回路においては、 L - R ブリッジとコンデンサ C の直列回路は、 q の半サイクルごとにエミッタホロワ Tr_2 と短絡ダイオード D の交互の導通により励振されるため、直流電源電圧を E とすれば、振幅が $E/2$ の方形波電圧源駆動と考えることができる。従って、 LC 共振点近傍の駆動周波数に対して励振電流は基本波のみとなる。また、共振回路のフィルタ作用により、ブリッジ非平衡電圧にはほとんどスイッチングノイズは現れない。

〈2・2〉 トルク検出過程 磁気ヘッドの自己インダクタンスは、磁気ヘッドと磁わい層との結合度により変化し、また磁わい層におけるうず電流損失も結合度の減少と共に単調に減少する。従って、磁気ヘッド方式トルクセンサの特性は、磁わい層と磁気ヘッド間空けきの変化により大幅に変化すると考えられ、トルク検出過程の解析には空けき変動を考慮に入れる必要がある。

図2の回路は共振点近傍の励振周波数で駆動されるため、〈2・1〉節に述べたことから、 L - R ブリッジと励振部に対し、図3の等価回路を得る。等価電源は振幅 $E/2$ の方形波電圧の基本波成分に相当するもので、そ

図 3 L - R ブリッジ回路と励振部の等価回路
Fig. 3 Equivalent circuit for the L - R bridge and the exciting circuit.

の実効値は $\sqrt{2}E/\pi$ である。また、磁気ヘッドは自己インダクタンス L_1 および L_2 と、巻線抵抗 r および磁気ヘッド磁心と磁わい層におけるうず電流損失とヒステリシス損失に対する等価抵抗 R_e により表されている。以下の解析では、図3の等価回路において、磁気ヘッドとブリッジ抵抗 R の直列回路の Q は $Q \gg 1$ であると仮定する。すなわち、 ω を基本波成分の角周波数としたとき、 $\omega L_1 \gg R + R_e + r$ および $\omega L_2 \gg R + R_e + r$ とする。

磁気ヘッドの自己インダクタンス L は、印加トルク T と空けき y の関数であって、一般に

$$L(T, y) = L_0(y) + \Delta L(T, y) \dots \dots \dots (1)$$

の形に表すことができる。ここで、 $L_0(y)$ は $T=0$ に対する自己インダクタンス、 $\Delta L(T, y)$ は印加トルク T による増分である。また R_e は y のみの関数とする。更に、 $L_0(y)$ および $\Delta L(T, y)$ の y に対する依存性を取り扱いやすくするため以下の関数を導入する。

$$\xi(y) = L_0(y)/L_0(y_0) \dots \dots \dots (2)$$

$$\eta(y) = \frac{\Delta L(T, y) - \Delta L(-T, y)}{\Delta L(T, y_0) - \Delta L(-T, y_0)} \cdot \frac{L_0(y_0)}{L_0(y)} \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 y_0 は適当に定められた y の基準点とする。

(3)式において $\Delta L(T, y)$ の関数形は、暗に y の関数と T の関数の積で表せるものと仮定されているが、これは $\Delta L(T, y)$ が T に関し線形とみなせる場合は妥当である。

一般性を欠くことなく $L_1(T, y) = L(T, y)$ 、 $L_2(T, y) = L(-T, y)$ とおける。また $Q \gg 1$ の仮定により、励振電流 I とブリッジ非平衡電圧 V_e の位相差 $\phi(\omega)$ は、 T の方向により $\phi(\omega) = \arg(V/I)$ あるいは、 $\phi(\omega) = \arg(V/I) + \pi$ となる。従って、同期整流として全波形を考えれば、出力の絶対値は

$$V_{out} = 4\sqrt{2} E/\pi \cdot |V_u| \cos \phi(\omega) \dots \dots \dots (4)$$

で与えられる。図3の等価回路より $Q \gg 1$ の条件下で、 V_u および $\cos \phi(\omega)$ の近似式を求め、(4)式に代入すると

$$V_{out} \approx \frac{8\sqrt{2} E}{\pi^2 L_0(y_0)} \times \frac{\eta(y) \{ \Delta L(T, y_0) - \Delta L(-T, y_0) \} R}{\left[1 + \left(\xi(y) \frac{\omega}{\omega_{r0}} - \frac{\omega_{r0}}{\omega} \right)^2 Q_0^2 \left(\frac{R}{R_s} \right)^2 \right] R_s} \dots \dots \dots (5)$$

を得る。ここに、 $\omega_{r0} = \sqrt{2/CL_0(y_0)}$ 、 $Q_0 = \omega_{r0} L_0(y_0)/R$ 、 $R_s = R + R_e + r$ である。(5)式から、 y の増加による感度低下の自己補償法や、与えられた回路定数に対し最大感度を得るための回路の駆動周波数条件に関する知見が得られる。すなわち、磁わい層の透磁率が高く、かつうず電流損失が小さい場合は、 y の増加による $\xi(y)$ の減少が大きく、また R_e も小さくなる。従って、この場合、 ω^2 を $\omega_{r0}^2/\xi(y)$ よりわずかに大きめに設定し、(5)式分母第2項が y の増加と共に減少するようにしておけば、 $\eta(y)$ の減少を自己補償することが可能となる⁽⁷⁾⁽⁸⁾。一方、磁わい層の透磁率が低い場合は、磁わい層を貫通する磁束がもともと多くないために、 $\xi(y)$ が y の関数としてあまり変化しないので ($\xi(y) \approx 1$)、上述の感度の自己補償法が適用できない。このような場合は、 y の変化による感度変化の補償はほかの方法によることとし、 $\omega = \omega_{r0}$ と置いて感度が最大となるようにするのが望ましい。このとき、(5)式は次のようになる。

$$V_{out} \approx \frac{8\sqrt{2} E}{\pi^2 L_0(y_0)} \times \frac{\eta(y) \{ \Delta L(T, y_0) - \Delta L(-T, y_0) \} R}{R_s} \dots \dots \dots (6)$$

3. トルクセンサ用材料としてのプラズマ溶射 Ni 層の特性

トルクセンサ用応力磁気変換素子としてのプラズマ溶射 Ni 層の特性を、その測定結果が前章の解析式に直接適用できるよう、実際の構成に近い形で調べた。Ni 溶射試料は、直径 12 mmφ の強磁性軸 (JIS 規格 S45C) の周囲に溶射後、厚さ約 300 μm となるよう研磨加工している。研磨加工された状態での磁気特性を、反磁界効果が生じないように円筒状に作製した試料によって測定した結果は、29.5 kA/m の磁界印加後の保磁力 H_e が約 4.14 kA/m、29.5 kA/m での磁束密度が約 0.42 T であった。

実験に使用した磁気ヘッドは、実際にトルクセンサに用いるものと同じ磁極断面が $2 \times 2 \text{ mm}^2$ 、磁極間隔が 2.8 mm の U 字形フェライト磁気ヘッドで、Ni 層に対し適当な空けきを置いて 45° 方向に配置した。図4に、Ni 層と磁気ヘッド間空けき $y = 0.3 \text{ mm}$ として、Ni 層の応力磁気効果を磁気ヘッドのインピーダンス変化として調べた結果を示す。インピーダンス変化は、トルク印加により Ni 層内の磁気ヘッドの磁極対方向に誘導される応力が張力および圧縮力の各場合について示されている。Ni の磁わい定数は負 (多結晶 Ni では -34 ppm) であるため、インピーダンスは圧縮力の場合に大きくなり、逆に張力の場合に小さくなっている。インピーダンス変化はそれほど大きくないが、 T との間に線形関係がみられる。図5には、 y の基準点 y_0 を $y_0 = 0.1 \text{ mm}$ とし、感度の空けき依存性に関する諸量について調べた結果を示している。この測定において、 $\xi(y)$ と $\eta(y)$ は次の近似式によった。

$$\xi(y) = |Z_0(y)| / |Z_0(y_0)| \dots \dots \dots (7)$$

図4 磁気ヘッドのインピーダンス変化により調べたプラズマ溶射 Ni 層の応力磁気特性
Fig. 4 Head impedance vs. applied torque characteristics of the plasma sprayed Ni layer.

図5 $\xi(y)$, $\eta(y)$ および $(R_e + r)/R$ の変化
Fig. 5 Dependence of $\xi(y)$, $\eta(y)$ and $(R_e + r)/R$ on the air gap y .

$$\eta(y) = \frac{|\Delta Z(T, y)| - |\Delta Z(-T, y)|}{|\Delta Z(T, y_0)| - |\Delta Z(-T, y_0)|} \times \frac{|Z_0(y_0)|}{|Z_0(y)|} \dots\dots\dots (8)$$

各 y に対する R_e は、磁気ヘッドと既知の共振用コンデンサとの直列共振回路の Q の測定から計算により求めた。今回測定した $\xi(y)$, $\eta(y)$ と、さきに軟磁気特性に優れた鉄系アモルファス磁わい薄帯である Metglas # 2605 S-2 (アライド社製) を軸に接着して磁性層としたものについて測定した結果⁽⁷⁾⁽⁹⁾とを比較すると、 $\eta(y)$ は $y=0.1$ mm から 0.9 mm の間で、どちらも 0.3 から 0.4 程度に急速に減少しているのに対し、 $\xi(y)$ は Metglas # 2605 S-2 の場合では約 0.7 程度に減少したのに比べ、今回はほとんど変化が見られない。 y の増加による感度低下率は、ほぼ $\eta(y)$ 程度であると考えられ、この結果からも空けき変動に起因する感度変動の補償の必要性が理解される。

4. トルク検出特性

トルク検出部の構成に用いた軸と磁気ヘッドは、前章の始めに述べたとおりである。トルクの発生装置は、電動機と発電機を回転軸により結合させたもので、トルクの大きさは発電機の負荷で調節する。また、参照用トルク測定器として接触形のストレインゲージ方式トルクメータ (ケイソク社製) を用いた。

〈4・1〉 静特性 空けき $y=0.3$ mm として、静止トルク検出特性を測定した結果を図 6 に示す。非直線誤差は約 1.2%/FS で、ヒステリシス誤差は平均値からの偏差で評価すると約 1.5%/FS であった。また、感度の回転数依存性を調べた結果を図 7 に示す。一定トルク $T=8$ N・m 印加時の出力を静止状態から約 1,800 rpm にわたって調べた結果であるが、これから

図 6 静止トルク検出特性

Fig. 6 Static characteristics of the torque sensor.

図 7 出力の軸回転数依存性

Fig. 7 Dependence of the output of the torque sensor on the rate of revolution of the shaft.

図 8 感度の電源電圧依存性

Fig. 8 Dependence of the sensitivity on the supply voltage.

感度に回転数依存性のないことがわかる。この実験では、低速回転時のトルクの読みがトルク脈動のために困難となるので遮断周波数 0.1 Hz の低域通過フィルタを使用した。図 8 は検出感度と電源電圧 E の関係を調べたものである。Ni 層の保磁力が大きいため電源電圧 E が小さいところでは励磁起磁力が不足し感度はほとんどないが、 $E=10$ V 以上では電源電圧 E の増加と共にほぼ直線的に増加している。

〈4・2〉 瞬時トルク検出特性 電動機と発電機を回転軸により結合させた系が、約 1,800 rpm の定常回転にあるとき、機械共振により軸に生じるトルク脈動 (約 59 Hz) を対象として瞬時トルク検出特性を調べた。図 9 にデータ採取の方法を示している⁽⁸⁾。軸の 1 回転をロータリエンコーダにより 250 等分割した各点ごとにトルクセンサ出力と参照出力をサンプリングし、軸の回転角に対してそれらの出力を表示するようになっている。図 10(a) は、図 9 の装置において発電機の負荷を最小にして取った出力の回転変動分、(b) 図は平均印加トルクが約 4 N・m (せん断応力 $\tau=11.8$ N/mm²) のときの瞬時トルク検出例、および (c) 図は参照出力である。作図 (b), (c) の両出力の平均値が、グラフ上で同じ大きさとなるように合せてある。図 10(a) の回転変動分は最大印加トルクを 20 N・m と

図 9 トルクセンサ実験装置
Fig. 9 Experimental setup.

図 10 瞬時トルク検出特性

Fig. 10 Detection of the torsional vibration on the rotating shaft.

した場合、約 $\pm 4.1\%/FS$ であり、スチール軸のみの場合の約 $\pm 16\%/FS$ に比べ大幅に改善されている。

5. 高精度化の方法

〈5.1〉 空げき変動に伴う感度変化の補償法 磁わい層の透磁率が高く、 y の増加に伴い $\xi(y)$ が減少する場合の感度の自己補償法については既に述べているので⁽⁷⁾⁽⁹⁾、ここでは y による $\xi(y)$ の変化が非常に緩やかな場合に適用可能な方法について述べる。図 5 から明らかなように、空げき y に関する情報は励磁損失等価抵抗 R_e の大きさに現れる。従って、 y の増加は共振回路の Q の増大となり、 $\omega = \omega_{r0}$ の条件下では励磁電流が増加することとなる。

図 11 に y に対する励磁電流変化と感度変化を調べた実験結果を示している。感度を $S(y)$ 、励磁電流を $I(y)$ とし、 y の一次関数で近似すれば、これらは次式により表される。

$$S(y) = S(y_0) (1 - \delta \Delta y) \dots \dots \dots (9)$$

$$I(y) = I(y_0) (1 + \varepsilon \Delta y) \dots \dots \dots (10)$$

図 11 励磁電流と感度の空げき依存性

Fig. 11 Dependence of the exciting current and the sensitivity on the air gap y .

表 1 励磁電流によって制御される可変利得増幅器による感度補償効果 ($y_0 = 0.3$ mm)

Table 1. Compensation of sensitivity by the variable gain amplifier controlled by the value of the exciting current. ($y_0 = 0.3$ mm)

y (mm)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
$S(y)$	1.17	1.10	1.00	0.93	0.84	0.77	0.69
$S'(y)$	0.97	1.00	1.00	1.00	1.01	1.00	0.98

ここに、 y_0 は適当に定められた y の基準点とし、 $\Delta y = y - y_0$ である。(9)、(10)式から、 $S(y)$ は、 $I(y)$ により次式で与えられる可変利得増幅器により補償可能である。

$$G_{var}(y) = 1 / \{1 - \delta/\varepsilon \{I(y)/I(y_0) - 1\}\} \dots \dots \dots (11)$$

(11)式の $G_{var}(y)$ により補償された感度 $S'(y) = S(y) \cdot G_{var}(y)$ を各 y に対し示したのが表 1 である。ここでは $y_0 = 0.3$ mm とし、 ε 、 δ は図 11 の結果から最小 2 乗法を用いて求めた。

〈5.2〉 複数のトルクセンサによる不均一性と空げき変動の平均化 何点かの平均をとれば不均一性の影響を軽減することができる。図 12 の構成は、軸の両側に配置した 2 個のトルクセンサの出力の和をとるようにしたものである。このように、トルクセンサを 2 個空間的に π だけ位相差を持たせて配置した場合に

図 12 出力の平均化による高精度化の方法

Fig. 12 Method of realizing a highly accurate torque sensor by averaging technique.

表 2 回転変動分の第 5 次までの調波分析

Table 2. Fourier components for the fluctuation in the output associated with shaft rotation.

次数	1 個のトルクセンサによる	2 個のトルクセンサによる加算
1	1	0.47 (0.24)
2	0.22	0.36 (0.18)
3	0.16	0.18 (0.09)
4	0.078	0.089 (0.044)
5	0.065	0.015 (0.008)

* 1 個のトルクセンサのドリフトの基本波成分で正規化
() 内は更に感度で割っている。

は、原理的に軸の回転に伴う出力変動分中の偶数調波成分については低減効果はないが、基本波を含む奇数調波成分が打ち消される。表 2 にトルクセンサ 1 個時の回転変動分の第 5 次までの調波分析と、この方法により同じようにして得た回転変動分の第 5 次までの調波分析結果を示している。実験結果には原理とのずれが多少見受けられるが、最も大きな基本波成分がかなり減少することがわかる。また、空けき変動による感度変化もこの構成によって補償される。これを (6) 式に基づき、本来空けき変動の影響が最も大きい磁気ヘッドと中心軸を結ぶ方向の変動について示す。 $\eta(y)$ と R_i を、適当な基準点 y_0 の近傍 ($y = y_0 + \Delta y$) で線形化すると、センサ No. 1, センサ No. 2 に対し

$$\eta_1(y) = \eta_0 + k \Delta y \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$\eta_2(y) = \eta_0 - k \Delta y \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$R_{s1} = R_{s0} + h \Delta y \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$R_{s2} = R_{s0} - h \Delta y \quad \dots\dots\dots (15)$$

とおくことができる。ここに、 k, h は定数で図 5 から求められる。 $T = \text{一定}$ としたときの出力 $V_{out} \propto \eta_1(y)/R_{s1} + \eta_2(y)/R_{s2}$ を (12) ~ (15) 式を用いて計算すると、

$$V_{out} \propto 2\eta_0/R_{s0} - 2kh\Delta y^2/R_{s0}^2 \quad \dots\dots\dots (16)$$

図 13 図 11 のトルク検出システムにおける感度およびオフセットの空けき変化特性

Fig. 13 Dependence on the air gap variations of the sensitivity and the offset of the torque sensor system shown in Fig. 11.

図 14 図 11 のトルク検出システムによる瞬時トルク検出特性

Fig. 14 Detection of the torsional vibration on the rotating shaft by the torque sensor system shown in Fig. 11.

図 15 角度情報を用いた回転変動分の除去

Fig. 15 Elimination of the fluctuation in the output associated with shaft rotation using information on the rotational angle of the shaft.

となり、 Δy の一次の項が消える。

図 13 に感度と空けき変化 Δy の関係および零点の変動を調べた結果を示す。感度変化はほとんど見られず、また零点の変動も $\pm 1\%/FS$ 以内である。図 14 にこの方法によって瞬時トルクを検出した結果を示す。参照出力とよく重なっていることがわかる。このときの回転変動分は約 $\pm 1.3\%/FS$ 以下であった。

〈5・3〉 角度情報を用いる瞬時トルク検出の高精度化 磁わい層における磁気特性の不均一性の影響をトルクセンサの出力から除去することができれば、瞬時トルク検出の高精度化が可能である。ここでは、トルクセンサ出力から図 10(a) の回転変動分を軸の回転

角に同期して減じ、その効果を調べた。図 15 にその結果を示す。図 10(b) との比較から精度が大幅に改善されているのがわかる。

6. あとがき

磁気ヘッド方式トルクセンサの構成に、軸周に均一に形成された磁わい層を応力磁気変換素子として用いれば、瞬時トルクが検出可能となることを実証した。本論文では、駆動周波数と回路パラメータとの関係、および空けき変動と感度との関係などを明らかにするために、磁気ヘッドと磁わい層間空けき変動、およびそれらにおけるうず電流損およびヒステリシス損からなる励磁損失を考慮に入れ、トルク検出過程の解析を行った。また、空けき変動に伴う感度変化の補償法や、磁わい層に不均一性が多少存在する場合に出力に含まれる回転変動分の除去法について検討した。その結果、複数のセンサ出力の平均化による不均一性と空けき変動の軽減法、および角度情報を用いた回転変動分の除去法が効果的であることを明らかにした。これらの方法によると、現在試作段階にあるプラズマ溶射 Ni 層によってもほぼ満足できる精度で瞬時トルク検出が可能となることを示した。後者の方法は、ロータリーエンコーダを備えたモータのトルク検出には容易に適用可能である。また本方式によるトルクセンサにおいては、励磁周波数が数十 kHz から 100 kHz 程度の高い周波数であるため、トルクから電気信号への変換過程は十分な即応性を有しており、応答速度は平滑回路の時定数により決定される。このため、1 kHz 程

度の応答性を有するトルクセンサが実現可能と考えられる。

プラズマ溶射磁わい層の均一性、および軟磁気特性の向上のために、作製条件、熱処理法につき、今後更に検討する必要がある。また合金材料を含めた磁わい材選定も重要な検討課題である。

最後に、プラズマ溶射法により Ni 層を形成していただいたプラズマ技研工業社長 深沼氏に感謝する。

(昭和 61 年 8 月 1 日受付)

文 献

- (1) K. Harada, I. Sasada, T. Kawajiri & M. Inoue: "A New Torque Transducer Using Stress-Sensitive Amorphous Ribbons", *IEEE Trans. Magnetics*, MAG-18, 1767 (1982)
- (2) I. Sasada, A. Hiroike & K. Harada: "Torque Transducers with Stress-Sensitive Amorphous Ribbons of Chevron-Pattern", *ibid.*, MAG-20, 951 (1984)
- (3) R. A. Beth & W. W. Meeks: "Magnetic Measurement of Torque in a Rotating Shaft", *Rev. Sci. Instrum.*, 25, 603 (1954)
- (4) O. Dahle: "The Ring Torquoductor-A Torque-Gauge, without Slip Ring, for Industrial Measurement and Control", *ASEA J.*, 33, 3, 23 (1960)
- (5) H. Winterhoff & E. A. Heidler: "Berührungslose Drehmomentmessung mit Wirbelstrom-Sensoren", *Technisches Messen*, 50, 12, 461 (1983)
- (6) 笹田・浦本・浦田・原田: 「角度情報を用いた磁気ヘッドトルクセンサの高精度化」, 第 25 回 SICE 学術講演会, JS-52-4 (昭 61)
- (7) 笹田・浦本・原田: 「磁気ヘッドによるトルクセンサ」, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-86-1 (昭 61)
- (8) 笹田・浦本・原田: 「プラズマ溶射磁わい層によるトルクセンサ」, 同上, MAG-86-75 (昭 61)
- (9) 笹田・浦本・原田: 「磁気ヘッドによる非接触トルクセンサ」, 日本応用磁気学会誌, 10, 2, 379 (昭 61)