

低炭素鋼シャフトの磁歪式トルクセンサへの適応性

Adaptability of a Low-Carbon Steel Shaft
for a Magnetostrictive-Type Torque Sensor

脇若 弘之・坂野 一成*

信州大学工学部電気電子工学科, 長野市若里 500 (〒380-8553)

*信州大学大学院工学系研究科, 長野市若里 500 (〒380-8553)

H.Wakiwaka and K.Banno*

Faculty of Engineering, Shinshu University, 500 Wakasato, Nagano 380-8553

*Graduate School, Shinshu University, 500 Wakasato, Nagano 380-8553

(1998 年 10 月 13 日受理, 1999 年 1 月 21 日採録)

Many torque sensors are contact types or use specially processed shafts. However, such sensors suffer from various problems such as frictional wear, cost, and installation. This paper describes a sensor that detects the torque of non-special processed shafts by means of the inverse magnetostrictive effect, and shows the effectiveness of demagnetization and the possibility of non-contact measurement in low-carbon steel shafts. The output of the sensor was increased 2.37 times, and the hysteresis of the output was reduced to 1/14 by demagnetization.

Key words: magnetostrictive type torque sensor, demagnetization, gap, torque sensibility, hysteresis

1. まえがき

工作機械やロボット等の産業用機器, 及び自動車等において回転機のシャフトに加わる“力”, つまりトルクの制御を行うことにより, 省エネルギー化, 高機能化が図られている。そのため, シャフトに加わるトルクを直接計測することが望まれており, トルクセンサが数多く研究開発されている。トルクセンサとして, シャフトとセンサが接触またはシャフトに磁歪膜の蒸着, 溝堀等の加工, トーションバー等の専用シャフトを用いているケースがほとんどである¹⁾。しかし, 接触式では, センサとシャフト間の摩擦等に問題があり, シャフトに磁歪膜の蒸着, 溝堀等の加工, 専用のシャフトを用いた場合にはそれぞれ, 膜を張りつけるために耐久性, 溝堀のための機械工作のコスト, トルク測定軸への専用シャフトの取り付け等に問題がある。そのためセンサとシャフトが非接触であり, シャフトに特殊な加工を施さないトルクセンサが求められている。

そこで本論文では, 一般用構造用として広く用いられている低炭素鋼シャフトに加わるトルクをシャフトに特別な加工を施さず, 磁歪の逆効果により, 非接触で測定できるセンサの実用化を検討した。しかし, シャフトに特別な加工を施していないため, シャフト材質と機械加工, 熱処理などに依存し, センサからの出力が低く, ヒステリシスが大きくなる²⁾。また, センサとシャフトのギャップの変化による出力の変化が問題になるため, このようなシャフトに適応するための磁歪式トルクセンサの構造, シャフト消磁の効果を検討した。また, 励磁磁界と直交方向に補助磁界を加え, 磁壁を連続的に動かしヒステリシスを低減する効果についてすでに示されているが³⁾, 本論文ではシャフトを消磁状態にするこ

とによりヒステリシスを減少させた。

本論文では, 磁歪式トルクセンサを構成する上で, 以下の点について報告する。

- (1) シャフト消磁, ギャップ変化による出力の変化を考慮したトルクセンサの構成
- (2) シャフト消磁を併用することの有効性
- (3) センサとシャフトのギャップが出力に与える影響

2. 磁歪式トルクセンサの構成

2.1 磁歪式トルクセンサの構造

Fig. 1 に, 磁歪式トルクセンサの基本構造を示した。Dahle の提案した基本構造を発展させたものであり⁴⁾, シャフトを消磁するコイルを備え, シャフトとは非接触になっている。パイプ状のシャフトの周りに励振・検出コアの固定, 及び一部磁路となる環状ヨーク (1 % ケイ素鋼) とその外周にギャップを介して消磁磁束の流れる環状ヨーク (1 % ケイ素鋼) を配置した。励振コア (1 % ケイ素鋼) はシャフト円周方向に配置し, 検出コア (1 % ケイ素鋼) がシャフト長手方向に配置し, それぞれのシャフト側のコアの先端が正方形の頂点の位置になるよう配置した。それら励振・検出コアで 1 極のセンサを構成し, そのセンサをシャフト回りに, 0, 90, 180, 270° の位置に 4 極配置し, それぞれ対面した 2 極位置のセンサからの出力によりその方向のギャップ変動による影響を除

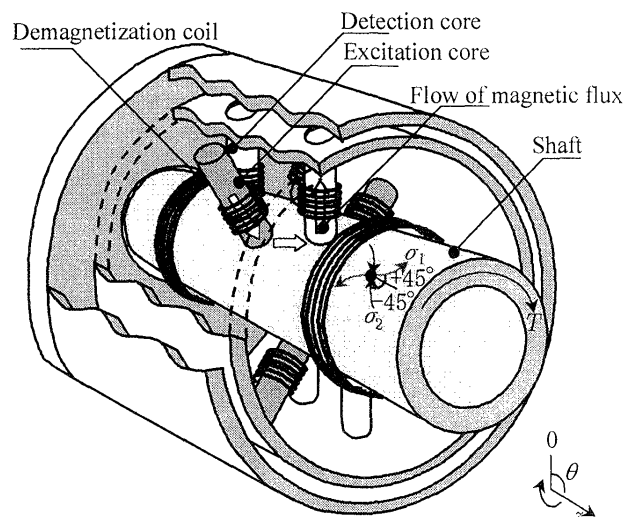


Fig. 1 Structure of torque-detecting part.

去することが可能である。このようにギャップ変動の影響を除去する“ギャップ補償”を考慮した構成とした。消磁コイルは、シャフトを囲む形状とした。励振コイルは、700 回巻×2 個、検出コイルは、600 回巻×2 個、消磁コイルは、300 回巻×2 個とした。

Fig. 2 に、磁歪式トルクセンサの磁路構成を示した。消磁コイルに、電圧を加えることによりシャフトに磁束を発生させる。その磁束は、センサ部の外周を回るように流れ、シャフトの消磁を行う。また、消磁コイルはシャフトを囲む形状のため、シャフトが回転している状態においても、センサ測定位置の消磁を行うことができる。

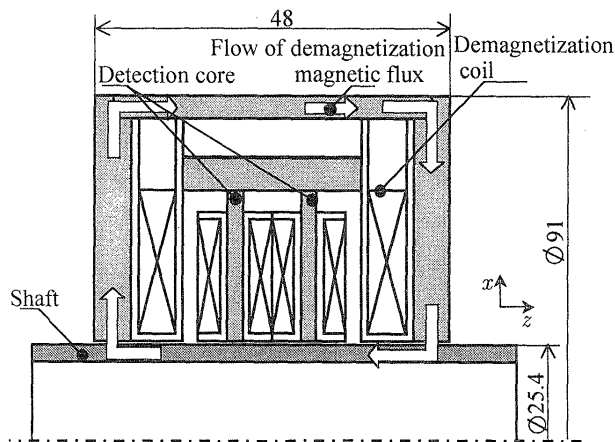


Fig. 2 Cross-section of the torque sensor (unit: mm).

2.2 磁歪式トルクセンサのトルク検出原理

Fig. 1 に示すように、励振コイルに電流を入力し、励振コアに磁束が誘起され、その磁束がシャフトに流れ込む。シャフトにトルクを加えると、シャフト長手方向 $\pm 45^\circ$ 方向に応力が発生し、引張り応力が加わる方向は比透磁率が増加、圧縮応力が加わる方向は比透磁率が減少する。そのため、シャフトに流れ込んだ磁束は、圧縮応力が加わっている方向に磁束が流れにくく、引張り応力が加わっている方向に磁束が流れやすくなり、その比透磁率の差によって、磁束が一方の検出コアに流れ込みやすくなり、そこに巻かれた検出コイルに電圧が誘起される。

Fig. 3 にセンサの信号処理回路を示した。励振コイルに発振器から電流を入力し、シャフトを介して検出コイルに電圧が誘起される。その電圧は増幅 (AMP) され、発振器からの励振コイルに入力した波を基準波とし位相検波回路 (PSD) を通して、出力を得ている。

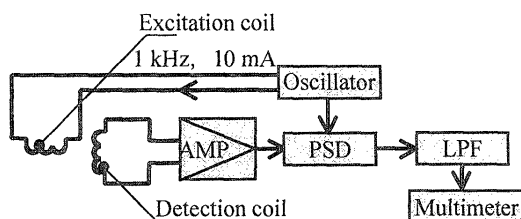


Fig. 3 Signal processor circuit of the sensor.

センサの出力電圧は、方向による比透磁率の差に比例した関係として表すことができ、式 (1) に、センサからの出力電圧と比透

磁率の関係を示した⁹⁾。また、応力と比透磁率の関係が、弾性範囲内において線形であるとする、出力電圧と引張り・圧縮応力は式 (2) の関係となり、トルクによる出力電圧は、式 (3) となる。

$$V_o = k_\mu (\mu_1 - \mu_2) \quad (\text{V}) \quad (1)$$

$$= k_\sigma (\sigma_1 - \sigma_2) \quad (\text{V}) \quad (2)$$

$$= a_T T \quad (\text{V}) \quad (3)$$

ここに、

k_μ : 出力電圧の比透磁率の差に対する感度 (V),

μ_1, μ_2 : 引張り・圧縮方向の比透磁率,

k_σ : 出力電圧の応力の差に対する感度 (V/Pa),

σ_1, σ_2 : 引張り・圧縮応力 (Pa),

a_T : トルク感度 (V/(N·m)).

3. トルク測定方法

センサは 4 極のうち 0° (シャフト真上) の 1 極のみを用い、入力電流 10 mA、励振周波数 1 kHz の正弦波を励振コイルに常に入力し、シャフト円周方向に常時励振した。Fig. 4 に、シャフトに加えた消磁磁界の概念波形を示した。これは、消磁装置によって、周波数 60 Hz の正弦波の振幅が立上り時間 1 s、減衰時間 6.5 s の線形減衰の三角波状に変調された磁界であり、励振磁界と同時にシャフトに加えている。消磁磁界の最大値は 1.2 kA/m とした。今回用いた測定用のシャフトは、パイプ状であり、直径 25.4 mm、厚さ 2.3 mm、機械構造用炭素鋼鋼管 STKM13B である。Table 1 に、シャフト材質の組成を示した。炭素の含有量は、0.25 % 以内である。Table 2 に、測定条件を示した。

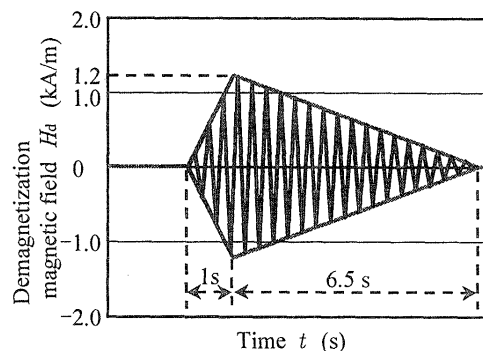


Fig. 4 Concept chart of demagnetization magnetic field.

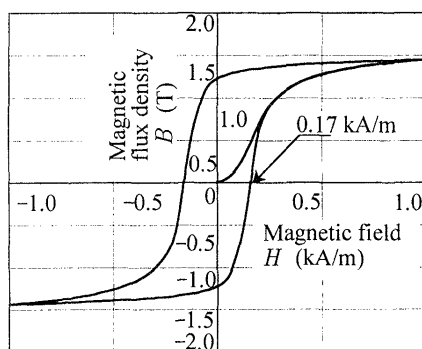
Table 1 Composition of shaft.

Composition	C	Si	Mn	P	S
Content (%)	0~0.25	0~0.35	0.3~0.9	0~0.04	0~0.04

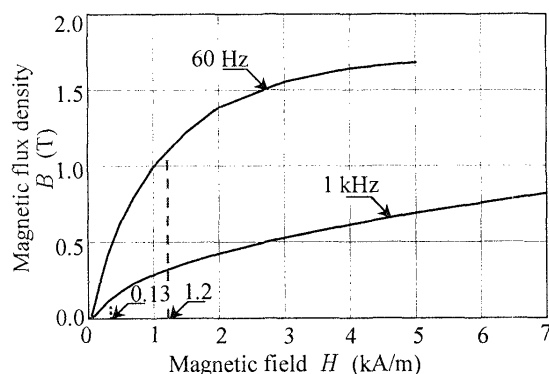
Fig. 5 (a) には、シャフトの直流ヒステリシスループを示した。本シャフトの保磁力は、0.17 kA/m であった。Fig. 5 (b) に、シャフトの 60 Hz、1 kHz の交流常規磁化特性を示した。一般的に交流消磁に必要な磁界は、保磁力の 2 ~ 10 倍である⁶⁾。今回消磁は、商用周波数の 60 Hz を用いて行った。消磁磁界の最大値は、1.2 kA/m とし、保磁力の 7.1 倍であり、十分にシャフトの消磁が行える値とした。また、センサの 1 kHz の励振磁界の最大値は、ギャップ 0 μm において、0.13 kA/m となり、保磁力以内である。

Table 2 Experiment conditions.

Items		Values
Torque sensor	Gap (μm)	0, 62.5, 125, 187.5, 250
	Input current	1 kHz, 10 mA
	Direction of excitation	Circumference
Demagnetization	Peak voltage	60 Hz, 24 V (1.2 kA/m)
	Rise time	1 s
	Fall time	6.5 s (Linear attenuation)
Shaft	Diameter	25.4 mm
	Material	STKM13B
	Shape	Pipe (Thickness 2.3 mm)



(a) Hysteresis loop



(b) Normalized magnetization curve

Fig. 5 Magnetization characteristics of shaft material.

4. 磁歪式トルクセンサの適応性の検討

4.1 特性評価方法

Fig. 6 に、トルクに対する出力電圧の概念図を示した⁷⁾。出力電圧-トルク特性の評価方法として、トルク感度 a_T 、ヒステリシス ε_h を用いた。トルク感度は、式 (4) で表され、出力電圧の最大値と最小値を結ぶ直線の傾きで示し、値が大きいほど良い特性である。また、ヒステリシスは、式 (5) で表され、特性全体の出力

電圧差と出力電圧-トルク特性のヒステリシスによる出力電圧差の最大値の割合で示し、値が低いほど良い特性である。

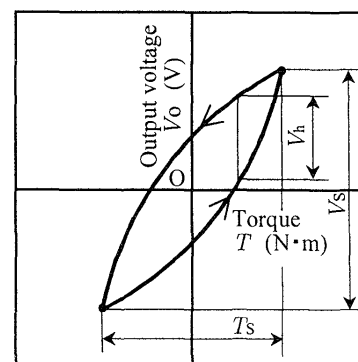


Fig. 6 Concept of the characteristics of the output voltage vs. torque.

$$a_T = \frac{V_s}{T_s} \quad (\text{V}/(\text{N}\cdot\text{m})) \quad (4)$$

$$\varepsilon_h = \frac{V_{h,\text{max}}}{V_s} \times 100 \quad \% \quad (5)$$

ここに、

V_s : 最大出力電圧差 (V),

T_s : 最大印加トルク (= 98 N·m),

V_h : あるトルクにおける出力電圧差 (V),

$V_{h,\text{max}}$: V_h の最大値 (V).

4.2 トルクセンサの出力と消磁の有効性

Fig. 7 に、ギャップ 0 μm における消磁の有無のトルクに対する出力電圧特性を示した。両特性共に、ヒステリシスはトルク変化の一周期に対し反時計回りの特性となった。消磁を行うことにより、ヒステリシスが大幅に減少し、出力電圧の最大値も増加した。消磁を行うことによりトルクが負において、出力電圧が飽和傾向を示しているのは、トルク測定装置におけるシャフト固定部にトルク以外の応力が加わったためである。Table 3 に、消磁の有無におけるトルク感度、ヒステリシスの比較をまとめた。消磁を行うことにより、トルク感度は、237倍に増加し、ヒステリシスは、1/14 倍へと大幅に減少した。そのため、溝堀等の加工の施していないシャフトにおいて、消磁を行うことにより、トルクの測定が可能になることがわかる。

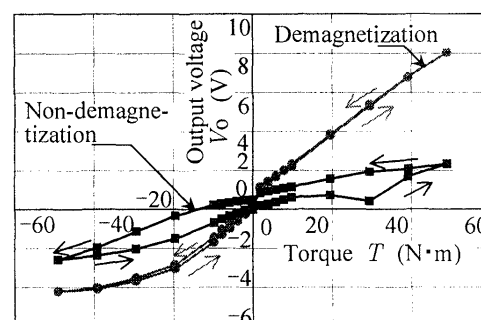


Fig. 7 Characteristics of the output voltage vs. torque (gap between sensor and shaft: $g = 0 \mu\text{m}$).

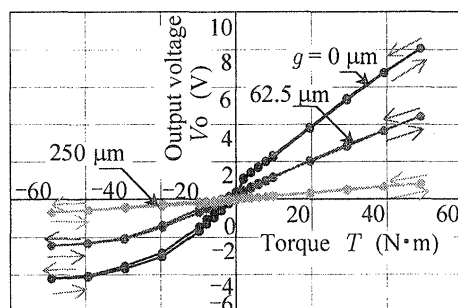
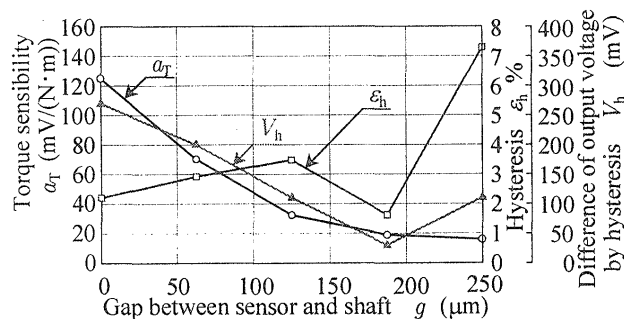
Table 3 Value of the torque sensitivity and hysteresis ($g = 0 \mu\text{m}$).

Item	Non-demagnetization	Demagnetization
Torque sensitivity a_T (mV/(N·m))	52.7	125.1
Hysteresis ε_h %	30.8	2.2

4.3 ギャップの影響

Fig. 8に、ギャップをパラメータとしたトルクセンサの出力電圧特性を示した。センサとシャフト間のギャップ $250 \mu\text{m}$ 時の特性は、ギャップ $0 \mu\text{m}$ と比較して大幅に出力電圧の最大値が減少したものの、トルクに対して線形な出力が可能であった。

Fig. 9に、ギャップに対するトルク感度、ヒステリシス、出力電圧差を示した。トルク感度は、ギャップ増加と共に減少し、ギャップ $250 \mu\text{m}$ において $16.0 \text{ mV}/(\text{N}\cdot\text{m})$ となり、ギャップ $0 \mu\text{m}$ の $1/7.81$ 倍に減少した。また、ギャップ $250 \mu\text{m}$ 付近で飽和傾向を示した。ヒステリシスは、ギャップ $187.5 \mu\text{m}$ において最小値の 1.62% となり、ギャップ $187.5 \mu\text{m}$ 以内においては、約 4% 以内となった。ギャップ $250 \mu\text{m}$ でのヒステリシスは、 7.28% と大きい値となった。ヒステリシス ε_h が、ギャップ $187.5 \mu\text{m}$ で最小になったのは、 V_s 、 V_h が共に小さく、主に実験上の問題に起因すると考えられる。

**Fig. 8** Characteristics of the output voltage vs. torque with demagnetization.**Fig. 9** Characteristics of the torque sensibility and hysteresis vs. the gap with demagnetization.

5. あとがき

低炭素鋼シャフトの磁歪式トルクセンサへの適応性について、トルクセンサの構成、シャフト消磁の有効性の検討、センサとシャフトのギャップが出力に与える影響を明らかにした。

- (1) ギャップ補償が行えるよう 4 極分ある励振・検出コアの構成を示した。また、消磁の磁束は、センサ部の外周を回るように流れ、さらに消磁コイルがシャフトを囲む形状のため、シャフトが回転している状態においても、センサ測定位置の消磁が可能である。
- (2) 消磁を行うことにより、トルク感度は、2.37 倍に増加し、ヒステリシスは、 $1/14$ 倍へと大幅に減少した。シャフトの消磁を行うことによりトルク測定が可能になる。
- (3) ギャップを増加させることによりトルク感度は減少した。ギャップ $250 \mu\text{m}$ においてもトルク検出は可能であり、ヒステリシスはギャップ $187.5 \mu\text{m}$ 以内において、約 4% 以内と良好な特性となったが、ギャップによる出力電圧の変化から、ギャップ補償が必要である。

以上の結果から、磁歪式トルクセンサは、低炭素鋼シャフトにおいて消磁を行うことにより、非接触のトルク測定が可能になることを示した。

文 献

- 1) 笹田 一郎：電気学会論文誌 A, **114-4**, 277 (1994).
- 2) H.Wakiwaka, H.Yamada, M.Hasabusa, K.Kondo, Y.Nagasawa: IECON '91, **3**, 2587 (1991).
- 3) 長野 英文, 笹田 一郎, 原田 耕介：日本応用磁気学会誌, **15**, 2, 485 (1991).
- 4) O.Dahle: ASEA Journal, **33-3**, 23 (1960).
- 5) 脇若 弘之, 中山 達夫, 近藤 和哉, 長沢 義明, 山田 一：電気学会マグネティックス研究会資料, **MAG-93-160**, 83 (1993).
- 6) 山田 一, 宮澤 永次郎, 別所 一夫：基礎 磁気工学, p. 54 (学研社, 東京, 1975).
- 7) 笹田 一郎, 木下 博史：電気学会マグネティックス研究会資料, **MAG-97-132**, 39 (1997).