

車載トランスミッション用磁歪式トルクセンサー

Magnetostrictive Torque Sensor for In-Vehicle Transmission

中村 晃之*

Teruyuki Nakamura

杉山 雄太*

Yuta Sugiyama

清水 悠輝*

Hiroki Shimizu

トランスミッションシャフトのトルクを非接触で直接測定できる磁歪式トルクセンサーを開発し、現行シャフトの特性を損なわずトルクを高精度に検出することが可能となった。誤差の大部分を占めるヒステリシス誤差および角度依存性誤差の低減検討を行った。シャフトへのショットピーニングおよび表面研磨処理を行うことにより残留オーステナイトを均一に低減させ、 -40°C ~ 150°C で誤差3.5% FS以下を得た。さらに耐油耐熱構造の検討を行い、環境温度 -40°C ~ 150°C 対応のセンサーを試作した。

The authors have developed a noncontact magnetostrictive torque sensor that can directly and precisely measure the torque in a transmission shaft without degrading the strength of the shaft. The authors studied the sensor's hysteresis error and angle dependency error, which account for most of the system error, and achieved a total error of 3.5% full-scale from -40°C to 150°C by optimizing the shot-peening treatment of the shaft and polishing its surface to uniformly reduce the residual austenite in the shaft surface. Authors also developed an oil-proof heat-resistant sensor structure and realized a working temperature range from -40°C to 150°C in an oil environment.

* 日立金属株式会社
電線材料カンパニー
Cable Materials Company,
Hitachi Metals, Ltd.

● Key Word : トルクセンサー, 磁歪, ショットピーニング
● Production Code : なし

● R&D Stage : Prototype

1. 緒言

CO_2 排出規制強化に伴い車のさらなる燃費向上が求められている中、ガソリン車からEV (Electric Vehicle)¹⁾, FCV (Fuel Cell Vehicle)¹⁾ やPHV (Plug in Hybrid Vehicle)¹⁾ への移行が世界的に進められてきている。しかし、主な調査機関による2030年の販売台数におけるEV比率は1.6~26%²⁾と大きく異なっているが、EVが最も普及する場合でもエンジン搭載車は74%も残る予想である。したがって、パワートレインの低燃費化のニーズは今後も継続すると予想されている。

期待される低燃費技術として、トランスミッション (Transmission, 以下TMと称す) の変速制御高度化、電動クラッチの自動制御によるエンジン、タイヤを接続切断するコースティング機能化などがあげられる。これらの制御にはエンジンの出力トルクが必要となるが、現状、実車のエンジン出力トルクを直接計測する実用化されたセンサーはなく、エンジン回転数、燃料噴射量などから推定したトルクで変速制御を行っている。この推定したトルクは精度不十分であり、TMのシャフトのトルクをリアルタイムに直接計測することによる制御高度化の実現が求められている。

トルク検出の方法として磁歪方式をはじめ、各種研究開発がなされている^{3)~6)}。著者らはこれら技術を参考にし、 150°C の高温で使用でき、TMシャフトの特性を極力そのまま実トルクを直接測定できる磁歪式トルクセンサー技術の開発に着手した。

車両の軽量化等の各種取り組みにより燃費向上が進む中で、パワートレインの効率的な運用による燃費向上に対する期待が高く、今後、本トルクセンサーの市場ニーズは大きく拡大すると予測している。

本報告では、センサー感度の向上、ヒステリシス誤差および角度依存性誤差低減検討結果、センサーの試作状況について報告する。

2. 磁歪式トルクセンサーの概要と開発仕様

2.1 磁歪式トルクセンサーの製品形態

図1にトルクセンサー製品形態を示す。本トルクセンサーは、トルク検出にコイル (エナメル線) を用い、周りに耐油耐熱樹脂モールドを施している。これをTMシャフトの周りに取り付け、トルクを計測する。シャフトのトルク量に応じた出力信号はTMの制御回路に送られ制御に用いられる。

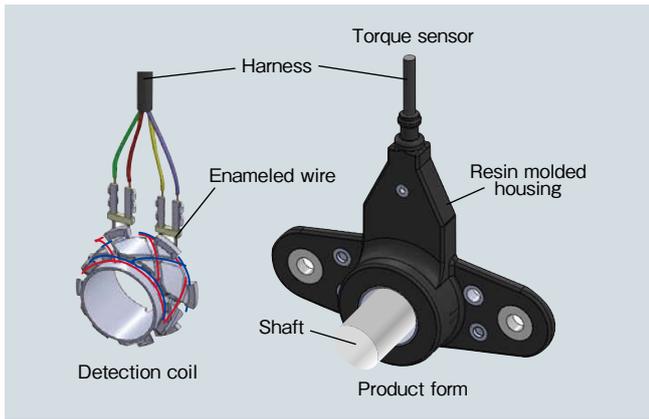


図1 トルクセンサーの製品形態
Fig.1 Torque sensor prototype

2.2 磁歪式トルクセンサーの検出原理

図2にトルクセンサーの測定原理の説明図を示す。

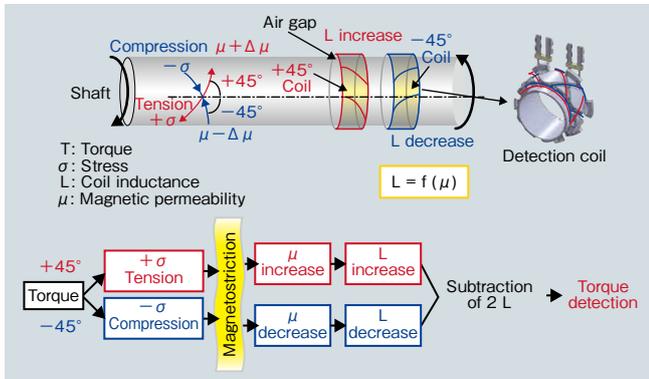


図2 トルクセンサーの測定原理
Fig.2 Principle of torque sensor operation

シャフトにトルク T が印加されるとシャフトは ±45° 方向に引張、圧縮応力 σ が働き、逆磁歪効果により透磁率 μ も ±45° 方向に変化する。逆磁歪効果とは、材料に応力を印加した時、透磁率が変化する物理現象のことをいう。著者らはこの物理現象に着目し、透磁率の変化方向と同じ方向にコイルを形成し、エアギャップを介して配置することで非接触の計測ができると考えた。コイル（エナメル線）は、シャフトと磁性リング（ヨーク）間で挟むように構成される。シャフト、コイル、磁性リング間の磁路を図3に示す。

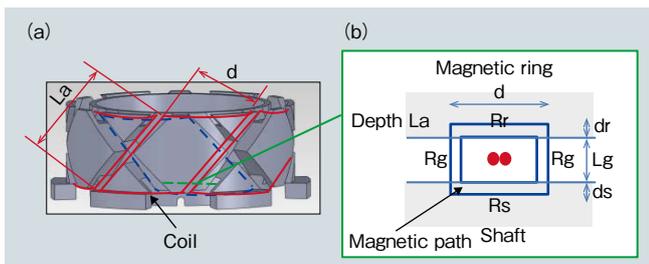


図3 シャフト、コイル、磁性リング間の磁路
(a) コイル巻線イメージ、(b) 磁路断面図
Fig.3 Magnetic path between shaft, coil, and magnetic ring
(a) coil winding (b) sectional view of a magnetic path

このときコイルのインダクタンス L は、シャフト部の透磁率 μ_s の関数式 (1) で表され、透磁率が増加、減少するとコイルのインダクタンス L も増加、減少する。

$$L = \frac{(3N)^2 C}{R_r + R_s + 2R_g} = \frac{(3N)^2 C}{\frac{d}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot L_a \cdot dr} + \frac{(3N)^2 C}{\mu_0 \cdot \mu_s \cdot L_a \cdot ds} + \frac{2Lg}{\mu_0 \cdot L_a \cdot d}} \quad (1)$$

R_r : リング中磁気抵抗 μ_s : シャフトの比透磁率
R_s : シャフト中磁気抵抗 dr : リング中磁束深さ
R_g : ギャップ部磁気抵抗 ds : シャフト中磁束深さ
μ₀ : 真空の透磁率 N : ターン数
μ_r : 磁性リングの比透磁率 C : コイル数
L_a : コイル巻行長さ L_g : エアギャップ長さ

図4に示すように、Lが増大するコイル(+45° 検出コイル)とLが減少するコイル(-45° 検出コイル)をブリッジ接続し、差動電圧をロックインアンプ(LIA: Lock-in amplifier)で増幅することにより、トルクに比例する出力電圧 V_o を検出することができる。インダクタンス L、抵抗 R のアンバランスによって出力 V_o はオフセット電圧を持つ。このオフセット電圧が大きすぎると測定回路内のアンプが飽和してしまうため、検出コイルの各 L、R を一致させ構成する必要がある。

本センサーの特徴は検出コイルを透磁率変化方向と同じ斜め 45° としたことで、シャフト強度を劣化させるような熱処理や切削加工、また磁歪材の貼付け加工などが不要で、シャフト本来の強度を損なわず測定できることである。

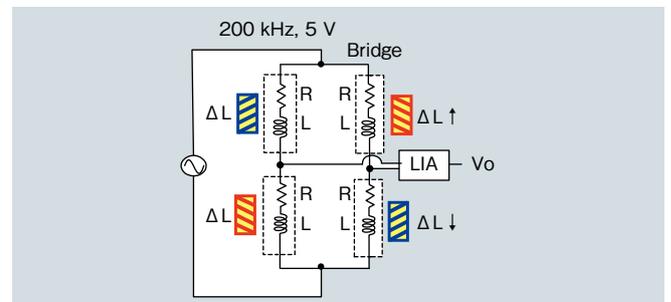


図4 トルクセンサーの検出回路
Fig.4 Detection circuit of torque sensor

2.3 磁歪式トルクセンサーの開発仕様と特徴

表1に開発仕様を示す。

表1 開発仕様

Table 1 Development specifications

Property	Development specifications	
Detection range	± 300 N · m	
Sensor sensitivity	≤ 4 mV/N · m	
Error	3% FS * 1	Hysteresis error, ≤ 1.75% FS
		Angular dependence error, ≤ 1% FS
		Circuit error, ≤ 0.25% FS
Operating temperature	- 40 - 150°C (in oil)	
Responsiveness	≤ 3 ms	

* 1) FS: full scale

センサー感度とヒステリシス誤差は図5に示したトルク出力特性を用いて定義される。センサー感度は、トルク変化Tに対するセンサー出力変化幅 V_s の比率で定義され、ヒステリシス誤差はセンサー出力変化幅 V_s に対するヒステリシスのループの幅 V_h の比率で定義される。

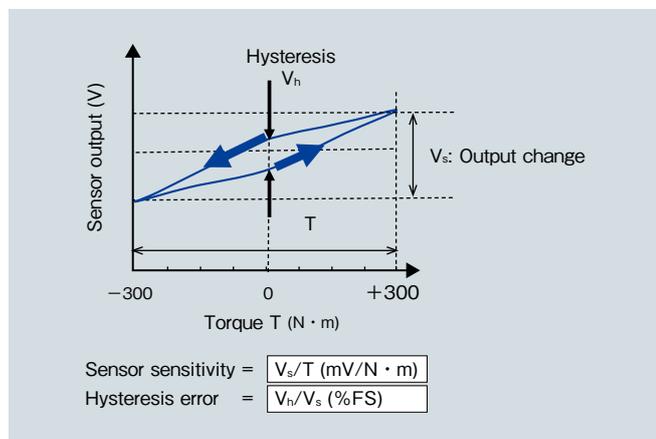


図5 センサー感度とヒステリシス誤差
Fig. 5 Sensor sensitivity and hysteresis error

本トルクセンサーは表1の仕様を満足するため以下の特徴を有する。

- (1) 非接触検知のためシャフト高速回転へ対応可能
- (2) TMで実際に使用されているシャフト(クロム鋼浸炭焼入焼戻)の強度を損なうことなく大トルク検出が可能
- (3) 耐油耐熱樹脂で保護し高温かつ油中での計測が可能

3. 磁歪式トルクセンサーの開発課題

3.1 センサー感度とヒステリシス誤差

図6はTMで実際に使用されているシャフト(クロム鋼浸炭焼入焼戻, 直径 ϕ 18 mm)にセンサーを取り付けて測定した結果である。センサー出力はヒステリシス誤差が5.5% FSと大きく、センサー感度は1.5 mV/N·mと小さい。目標仕様を実現するには、センサー感度の向上とヒステリシス誤差を低減する対策が必要である。

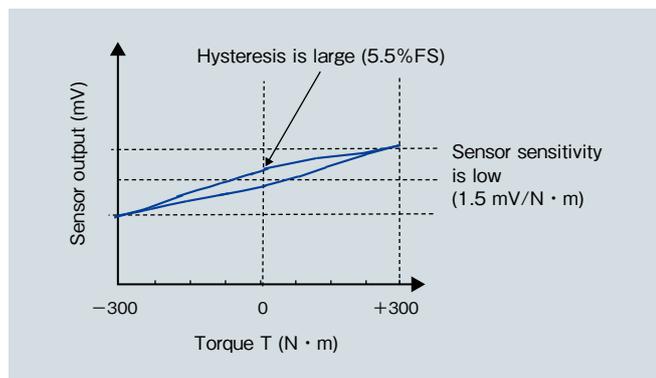


図6 現使用シャフト測定結果(クロム鋼)
Fig. 6 Measurement result for currently used shaft

3.2 角度依存性誤差

図7にシャフトと検出コイルの位置関係を示す。

TMで使用されているシャフトを用いてシャフトを回転させながら測定すると、図8に示すように、センサー出力は周期的に変動する。このセンサー出力の変動を角度依存性誤差と呼ぶこととする。この誤差は6.1% FSもあり、誤差の目標仕様3% FS以下を達成するには角度依存性誤差だけで1% FS以下まで低減できる対策が必要である。

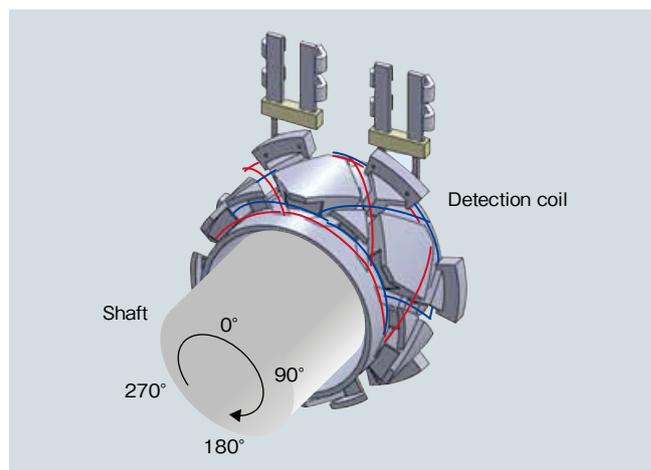


図7 シャフトと検出コイルの位置関係
Fig. 7 Position relationship between shaft and detection coil

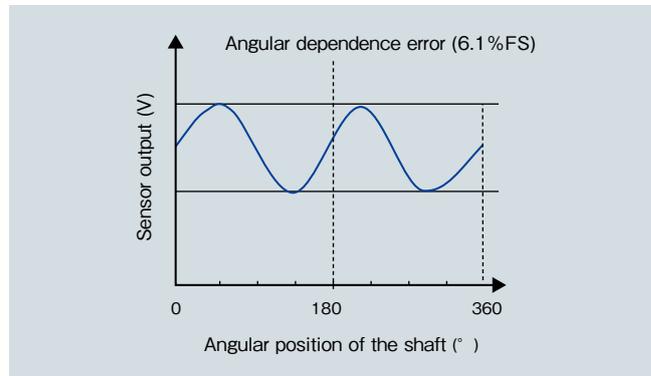


図8 現使用シャフトの角度依存性誤差
Fig. 8 Angular dependence error

3.3 耐油耐熱構造における製造上の課題

図9にセンサーの製作工程を示す。

コイルを巻く樹脂ポビンを耐熱用樹脂ナイロンで成形し、端子挿入後コイルを巻いて、ハーネスおよびコイル線を溶接する。そのあと磁性リングを装着し耐熱用樹脂ナイロンでアウターモールド成形する構造である。

アウターモールドの懸念点として、成形時端子破損、ハーネス断線、取付羽部の反りが考えられる。モールド後に端子破損、ハーネス断線の兆候が残っていると、実振動時に断線してしまう懸念があること、また取付羽部の反りがあるとねじ止めしたとき、反りの反発力で経年

劣化により割れてしまう懸念がある。図 10 にアウターモールド成形するにあたっての対策のイメージを示す。成形カバーによる樹脂圧回避などを対策としてアウターモールドを行った。アウターモールド品の状況を図 11 に示す。左の写真はセンサーの断面の様子であり、詳細にアウターモールドの状況を確認したところ X 線画像によって巻線の断線が確認され、また目視により磁性リングの割れを確認した。

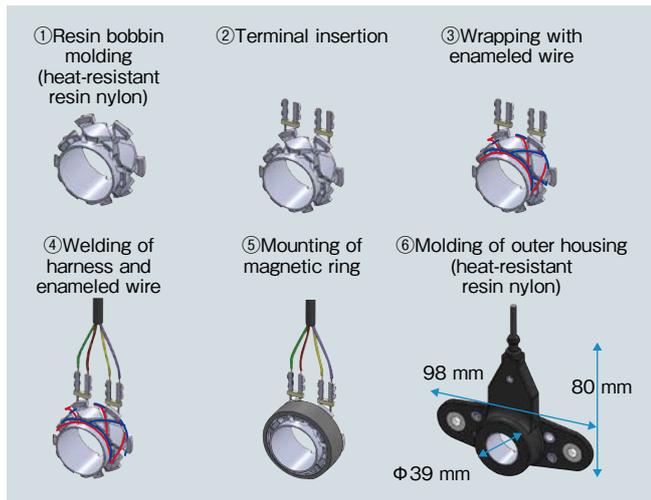


図 9 センサー製作工程
Fig. 9 Production process of the sensor

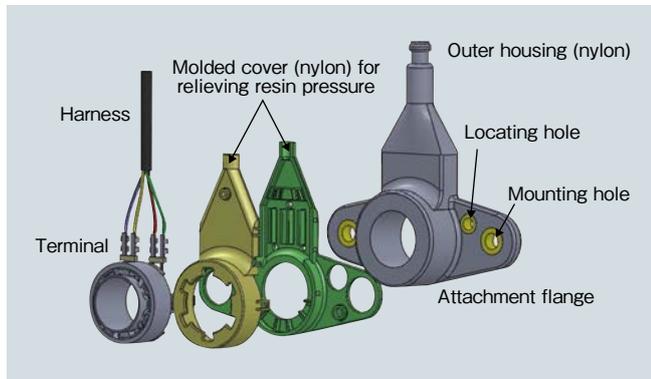


図 10 アウターモールド成形時の対策イメージ
Fig. 10 Countermeasure to prevent inner pressurization during molding of outer housing

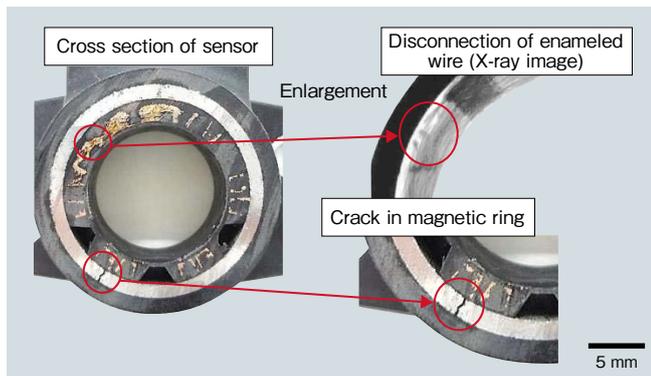


図 11 アウターモールドの状況
Fig. 11 Detail of outer housing

4. センサー感度向上とヒステリシス誤差の低減

本センサーの検出原理を踏まえると、現使用シャフトでセンサー感度が小さい原因についてはシャフト表面の透磁率が小さいためと考えられる。また、ヒステリシスが大きい原因は、シャフト表面に塑性変形しやすい部分があり、トルクの影響が残るためと考えられる。

そこで、まず TM で使用されているシャフト (クロム鋼浸炭焼入焼戻) 表面から 100 μm 深さまで X 線残留応力測定装置で残留オーステナイト量の分析を行った。現使用シャフトの残留オーステナイト量を測定した結果を図 12 の点線で示す。シャフト表面層の残留オーステナイト量は 4 ~ 8% 存在していることが判明した。

分析結果から、センサー感度 (1.5 $\text{mV/N}\cdot\text{m}$) が小さい原因についてはシャフト表面に非磁性である残留オーステナイト領域が存在するためと考えられる。また、残留オーステナイトは塑性変形しやすいので、ヒステリシス誤差 (5.5% FS) の大きい原因にもなっていると推定した。したがって、残留オーステナイト量を減少させることで、磁性化と高硬度化が同時に実現でき、感度向上だけでなく、ヒステリシス誤差の低減を図ることが期待できる。

そこでまず一般的に硬度を上げる手法であるショットピーニングが有効であるか検討することとした。ショットピーニングは、粒子をシャフト表面に噴射する方法だが、その際、残留オーステナイト領域を加工誘起によりマルテンサイト変態させ非磁性領域を磁性化する。同時に、塑性変形しやすい残留オーステナイト領域を低減させ表面の高硬度化を実現できる。このことから、ショットピーニングによりセンサー感度向上とヒステリシス誤差の低減を同時に実現できると考え、TM シャフトに適用した。ショットピーニング条件はあらかじめ最適化検討を行い、ショット材 $\phi 0.6 \text{ mm}$ 、ビッカース硬度 HV1,200 のスチールを使用し、噴射圧力 0.55 MPa、噴射時間はシャフト長手方向 1 cm あたり 10 秒とした。図 12 の実線にショットピーニング後のシャフト表面から深さ方向の残留オーステナイト量を示す。ショットピーニング後、残留オーステナイト量が 1% 以下まで減少しており、マルテンサイト変態が誘起されていると思われる。このことから、ショットピーニングにより、マルテンサイト変態が誘起され、非磁性領域の磁性化、表面の高硬度化が進んでいると推測される。

次に、上記条件でショットピーニングしたシャフト材を用いてトルク試験評価を行った結果を図 13 に示す。

ショットピーニング無しの条件ではセンサー感度は 1.5 $\text{mV/N}\cdot\text{m}$ であり目標である 4 $\text{mV/N}\cdot\text{m}$ には未達で

あったが、ショットピーニングによりセンサー感度は6.4 mV/N・mまで向上し目標値を達成することができた。また、ヒステリシス誤差はショットピーニング無しの条件においては5.5% FSであり目標である1.75% FSを超えたが、ショットピーニングによりヒステリシス誤差を1.3% FSまで低減でき、目標値を達成することができた。

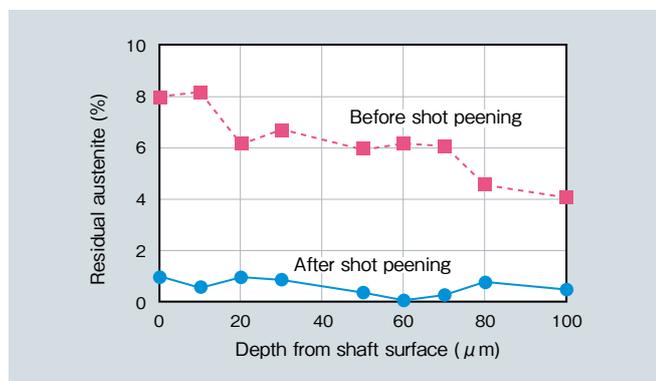


図12 シャフト表面の残留オーステナイトの深さ分布
Fig. 12 Depth profile of residual austenite density under shaft surface

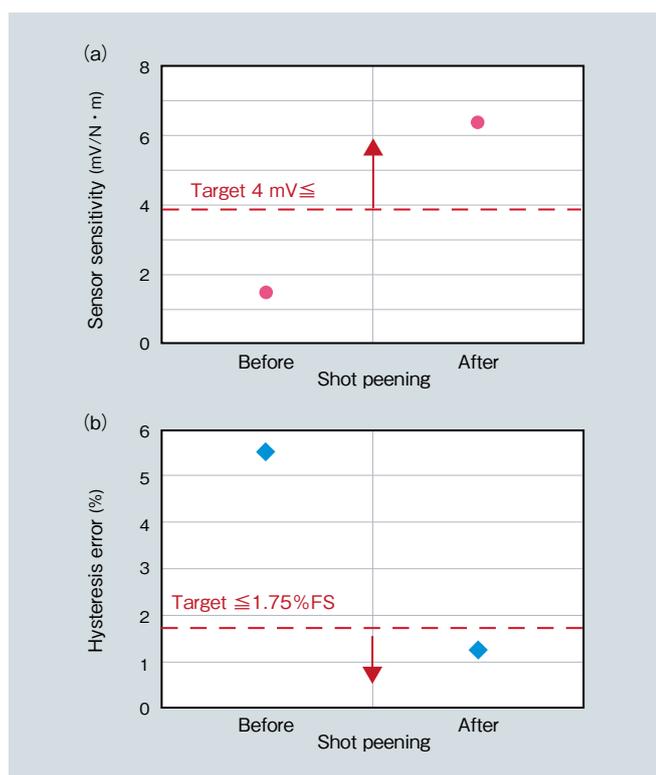


図13 トルク試験評価結果
(a) センサー感度向上 (b) ヒステリシス低減結果
Fig. 13 Improvement of (a) sensor sensitivity and (b) hysteresis error

5. 角度依存性誤差の低減

角度依存性誤差要因として、回転軸の偏心、透磁率のばらつきが考えられるが、測定したところ回転軸の偏心量は5 μm程度であり偏心は小さい。したがって、円周方向の透磁率のばらつきが原因と考えた。局所的な透磁

率を測定することは困難であるので、透磁率への影響が大きいと考えられる残留オーステナイト量の、シャフト円周方向の分析を行った。X線測定装置で測定したシャフト角度位置における残留オーステナイト量を図14の点線で示す。シャフトの角度位置で残留オーステナイト量が0.4~1%までばらついていることがわかった。このことから角度依存性の原因はショットピーニング後の円周方向残留オーステナイトのばらつきであり、ショットピーニングだけでは不十分と考えられる。

対策として、ショットピーニング後に表面研磨を行い、研磨時の応力でマルテンサイト変態を促進させ、円周方向が一樣になるよう表面研磨 (Ra < 0.3, Rz < 3) を実施した。

表面研磨後のシャフト角度位置における残留オーステナイト量を図14の実線で示す。表面研磨により残留オーステナイト量を0.4~0.6%と円周方向のばらつきを改善することができた。

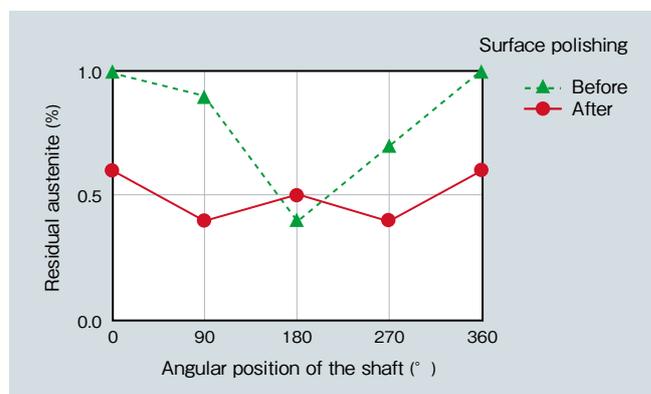


図14 残留オーステナイトばらつき
Fig. 14 Residual austenite at surface before and after surface polishing

この表面研磨前後のシャフトの誤差を図15に示す。表面研磨により角度依存性誤差を1%まで低減し、トータル誤差3.5% FS以下の結果を得た。評価した3本のシャフトで同様の結果を得ている。

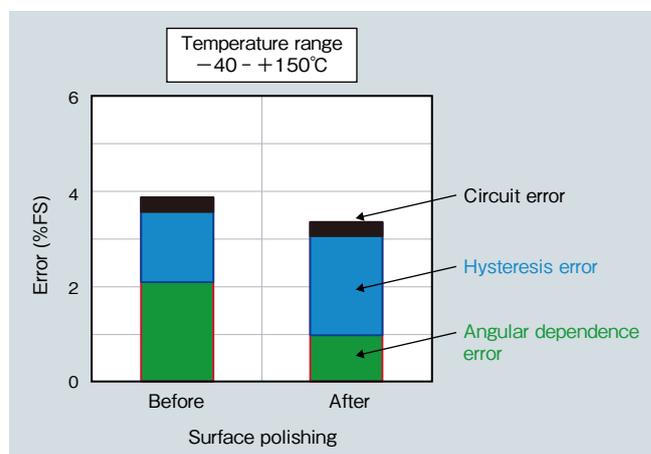


図15 表面研磨後の誤差
Fig. 15 Errors before and after surface polishing

6. 耐油耐熱構造検討

巻線の断線、磁性リングの割れの原因は、巻線がばらけて断線している痕跡があったことから成形時の樹脂圧の影響によるものと考えた。そこで対策として成形樹脂圧の分散を考え、巻線部へのエポキシ樹脂による事前固定を行い、アウターモールド成形を行った。その結果、巻線部に断線がなく、磁性リングに割れがないことが確認できた(図16)。このアウターモールド品についてヒートサイクル試験、 $-40^{\circ}\text{C}\sim 150^{\circ}\text{C}$ 、30サイクルを実施し性能劣化がないことを確認した。

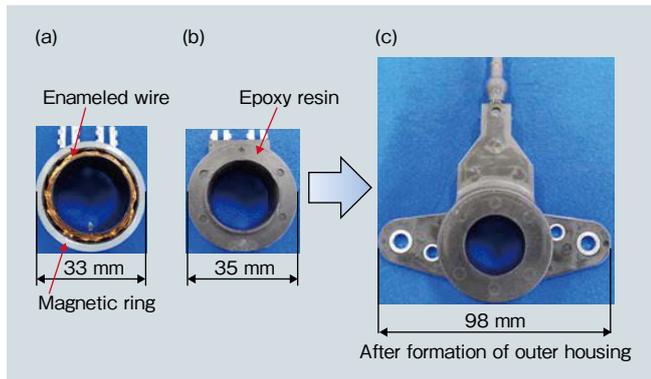


図16 アウターモールドの状況 (a) エポキシ固定前 (b) エポキシ固定後 (c) アウターモールド後

Fig.16 Sensor fabrication steps

(a) before epoxy fixation (b) after epoxy fixation (c) after outer housing formation

7. 結言

シャフトのトルクを非接触で直接測定できる磁歪式トルクセンサーを開発し、以下の結果を得た。

- (1) 非接触でトルクを直接検出するセンサー構造を考案した。
- (2) 表面処理技術であるショットピーニングを取り入れ、現行シャフトの特性を損なわずトルクを検出することが可能となった。
- (3) 総誤差低減のため、ヒステリシス誤差および角度依存性誤差の低減検討を行い、シャフトのショットピーニングおよび研磨処理を行うことにより $-40^{\circ}\text{C}\sim 150^{\circ}\text{C}$ で総誤差3.5% FS以下を得た。
- (4) 耐油耐熱構造検討を行い、環境温度 $-40^{\circ}\text{C}\sim 150^{\circ}\text{C}$ 対応のセンサーを試作した。

今後信頼性向上のための検討を実施し早期に製品化し、パワートレインの低燃費化に貢献していく予定である。

引用文献

- 1) 御堀直嗣:クルマはなぜ走るのか, 日経BP社, (2009), p.282-284, p.308-312, p.317-318.
- 2) 清水直茂:EV化にワナ, エンジン効率60%超, 日経Automotive, (2018.2), p.54-57.
- 3) 西部祐司ほか:自動車エンジン用磁歪式トルクセンサ, 豊田中央研究所R&Dレビュー Vol.31 No.2, (1996.6), p.61-71.
- 4) 真崎義隆ほか:磁気ヘッド型トルクセンサにおける外因性ゼロ点変動の低減法, 日本応用磁気学会誌 Vol.24 No.4-2, (2000), p.743-746.
- 5) 島田宗勝ほか:FeGaAlZrC (Galfenol) 磁歪合金リング式トルクセンサへのたが応力の影響, 日本金属学会誌, 第74巻, 第8号, (2010), p.540-542.
- 6) 水野正志ほか:磁歪式トルクセンサの開発, 電気製鋼, 第62巻, 第3号, (1991.7), p.167-174.



中村 晃之

Teruyuki Nakamura
日立金属株式会社
電線材料カンパニー
電線材料研究所



杉山 雄太

Yuta Sugiyama
日立金属株式会社
電線材料カンパニー



清水 悠輝

Hiroki Shimizu
日立金属株式会社
電線材料カンパニー