

磁歪式トルクセンサの開発

水野正志*, 小島勝洋**

Development of Magnetostrictive Torque Sensor

Masashi Mizuno and Katsuhiko Kojima

Synopsis

It is important to measure the torque directly for watching or controlling the torque of rotary driving system. Though various types of torque sensors were developed, most of them were designed and manufactured for experiments and were not suitable for in-line use. A new magnetostrictive torque sensor which has the advantages of compact size, light weight and high durability, then is suitable for in-line use, was developed by using the structural steel shaft. This paper presents the optimization of measuring system of this torque sensor, which was one of the important parts as well as development of the materials for sensor shaft.

1. 緒 言

各種回転駆動系の効率的運転のための制御、監視には直接トルクを測定することが理想的である。そして、回転駆動系の試験的なトルク測定ではなく常時トルク測定が必要な用途では高い測定精度の他に、小型軽量でメンテナンスフリーであることや、温度変化が大きいなどの過酷な環境下での稼働が可能である特長を持ったトルクセンサが要求される。しかし、このような要求を満足するトルクセンサは市販品の中には見当たらず新たな開発が望まれていた。

一般に採用されている主なトルク測定方法としては歪ゲージ式、位相差式、磁歪式がある¹⁾。歪ゲ

ージ式は歪ゲージを被測定軸に貼り付け導線または回転トランスで出力を取り出す方法であるが、ゲージの剝離のため耐久性に問題がある。位相差式は回転軸の振じれ量を二つの歯車とその位置センサにより検出する方式であるが、センサ固定式では動トルクは測定できるものの静トルクの測定はできない。これを改良するためセンサ回転方式が開発されているがセンサ部が複雑になり、メンテナンス性や軽量化の点で問題が残る。これに対して、磁歪式は測定軸の材質や測定系を最適化すれば上記要求を十分満足する可能性がある。

本稿ではこのような背景において磁歪式トルクセンサ用測定軸の材料開発と最適測定系の開発を進めた結果の中で最適測定系の開発について報告する。なお、測定軸の材料開発についてはすでに報告済みである^{2),3)}ので参考文献を参照願いたい。

1991年4月18日受付

*大同特殊鋼株式会社研究開発本部, 工博

**大同特殊鋼株式会社研究開発本部

2. 磁歪式トルクセンサの原理

磁歪式トルクセンサは磁性材料の磁歪現象を利用するものである。磁性材料に応力が加わると透磁率が変化する。正磁歪材料では引張り応力により透磁率が増加し、圧縮応力により減少する。負磁歪材料ではこの逆である。Fig. 1(a)に正磁歪材料の例としてパーマロイ (68% Ni) の引張り応力による磁化曲線 (透磁率) 変化の様子を示す⁴⁾。この透磁率変化を例えばコイルで測定して磁性材料に加えられた応力を測定する。

透磁率変化をコイルで測定するにはコイルインピーダンスの変化を測定する方法 (自己励磁法) と、他のコイルからの誘導電圧の変化を測定する方法 (外部励磁法) がある。またコイルと測定軸の位置関係においては貫通コイル法とプローブコイル法が考えられる。いま、自己励磁法と貫通コイル法の組み合わせを考えると、コイルインピーダンスは次式で表わされる⁵⁾。

$$\bar{Z} = \frac{R + j\omega L}{\omega L_0} = \frac{2}{ka} \left(\frac{\mu}{\mu_0} \right) \left(\frac{b^2}{a^2} \right) \frac{Z(ka)}{X(ka)} + j \left\{ \frac{2}{ka} \left(\frac{\mu}{\mu_0} \right) \left(\frac{b^2}{a^2} \right) \frac{W(ka)}{X(ka)} + \left(1 - \frac{b^2}{a^2} \right) \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $\bar{Z}$ は空芯時のコイルインダクタンス ωL_0 で規格化されたコイルインピーダンス、 μ_0 , μ は真空中および磁性材の透磁率、 a , b は磁性丸棒の半径およびコイル内半径、 $k^2 = \omega\mu\sigma$ で ω は角周波数、 σ は磁性材の導電率であり、また

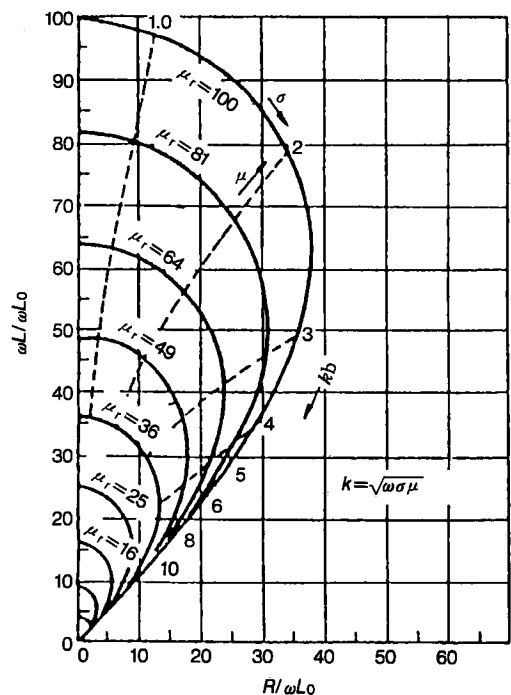
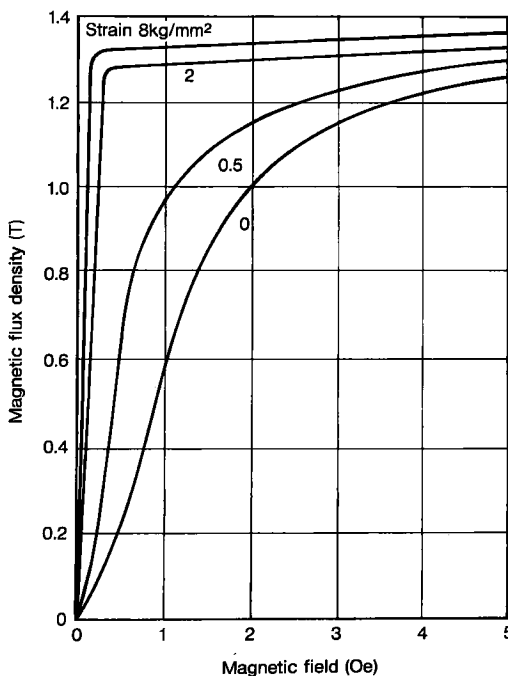
$$W(ka) = \text{ber}(ka)\text{bei}'(ka) - \text{bei}(ka)\text{ber}'(ka)$$

$$Z(ka) = \text{ber}(ka)\text{ber}'(ka) - \text{bei}(ka)\text{bei}'(ka)$$

$$X(ka) = \text{ber}^2(ka) + \text{bei}^2(ka)$$

であり、 $\text{ber}x$, beix はKelvin関数で'はその微分である。

この Z をインピーダンス平面に表わしたのがFig. 1(b)である。磁性材測定軸の比透磁率 $\mu_r (= \mu/\mu_0)$ の変化が $\bar{Z}$ の絶対値と位相の変化に現われるのでコイルのインピーダンス変化を測定すれば



(a) Change of permeability by tensile stress (Permalloy), (b) Change of coil impedance encircling ferro-magnetic round bar

Fig. 1. Principle of magnetostrictive torque sensor.

透磁率変化が測定できる。

この原理を応用してトルクセンサを構成するには、Fig. 2に示すように磁性材のトルク測定軸に互いに逆方向に二つの斜め45°の磁気異方性部を設け、これを貫通コイルで包んでそのインピーダンスの変化を測定できるようにする。図の矢印のようにトルクが印加されると右の磁気異方性部の透磁率は増加し、左の磁気異方性部では減少する。したがって、二つのコイル電圧を差動で取り出せば透磁率変化によるインピーダンスの変化分が検出されトルクが測定できる。

3. 磁歪式トルクセンサの構成

3.1 トルク測定軸

トルク測定軸は磁歪効果を有する磁性材料の丸棒で高トルク用としてCrMo系浸炭鋼、低トルク用としてFe-Al合金の2種類の材料を開発した。この測定軸を2個のベアリングを介してケースに固定し高速回転できるようにする。測定軸の中央部に磁気異方性部を構成するために互いに逆方向の斜め45°の溝を多数本ずつ加工してある。

3.2 トルク測定コイル

トルク測定コイルの方式としては、円周方向の平均値を測定するので回転むらの影響が少なくなる利点がある貫通コイルを採用した。コイルはベークライト製のポビンに巻き、ポビンをセットボルトでケースに固定してある。

3.3 トルク変換部

トルク変換部の基本的なブロック図をFig. 3に示す。二つのコイルのインピーダンス差を取り出すためのブリッジ回路、ブリッジ回路に交流電流を供給する発振回路、ブリッジからの信号をトルク信号に変換する差動増幅および同期検波回路、そしてその信号を方向も含めたトルク値に変

換する演算回路から構成されている。

4. 基本的設計

4.1 トルク測定軸の直径

トルク測定軸の最も基本的な設計要素は測定トルクに対応する最適直径の決定である。トルクを精度良く測定するために考慮すべき項目の一つにヒステレシスがある。本開発においてはヒステレシスをフルスケールの1%以下に抑えることを目標としたので、1%のヒステレシスが発生するねじり応力が限界応力となるよう軸直径を決定した。

前記の2種類の材質を用いた直径20mmのトルク測定軸で実測した結果では1%のヒステレシスが生ずるトルクはCrMo系浸炭鋼では30kg・m、FeAl合金では1kg・mであった。測定軸の直径 D 、加えるトルク T 、ねじり応力 τ の間には(2)の式の関係がある⁹⁾。

$$\tau = 16T / \pi D^3 \quad \dots\dots(2)$$

$D=0.02\text{m}$ 、 $T=30\text{kg}\cdot\text{m}$ および $1\text{kg}\cdot\text{m}$ を代入するとCoMo系浸炭鋼とFeAl合金ではそれぞれ $\tau=19.1 \times 10^6 \text{kg/m}^2$ および $\tau=0.64 \times 10^6 \text{kg/m}^2$ となる。したがって、測定トルクと測定軸の関係は(2)式を変形して(3)式となる。

$$\left. \begin{aligned} D &= (16T / 19.1 \times 10^6 \pi)^{1/3} \text{ m (CrMoの場合)} \\ D &= (16T / 0.64 \times 10^6 \pi)^{1/3} \text{ m (FeAlの場合)} \end{aligned} \right\} \dots\dots(3)$$

1例を示せば、CrMo系浸炭鋼を測定軸に使用して10kg・mのトルクを測定する場合には $D=15\text{mm}$ となる。以後本稿では測定軸材質は構造用鋼であり高トルクに対応できるCrMo系浸炭鋼、軸直径は20mm、測定トルク範囲 $\pm 30\text{kg}\cdot\text{m}$ に限定して記述する。

4.2 磁気異方性のための溝加工

磁歪式トルクセンサの感度は軸の材質により最

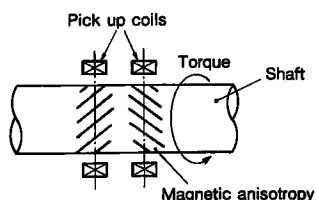


Fig. 2. Basic structure of magnetostrictive torque sensor.

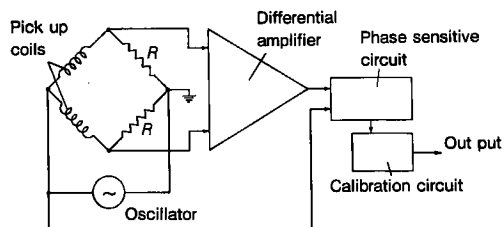


Fig. 3. Torque measurement circuit.

も大きく影響を受けるが磁気異方性を付与する溝の形状、寸法、本数によっても影響を受けることが予想される。そこで、溝の各要素と感度の関係を実験により調査した。

Fig. 4は直径20mmの測定軸において幅2mm、深さ1mmの溝の本数と10kg・mのトルクを加えた時の検出感度の関係と、その時の山部の歪み量を測定した結果である。横軸には溝本数から(4)式で算出した山部の占有率 M を示してある。

$$M = (1 - 2\sqrt{2}n / 20\pi) \times 100\% \quad \cdots \cdots (4)$$

ここで n は溝の本数である。

溝本数が多くなるほど、したがって山部の占有率が小さくなるほど感度が高くなっている。これは山部占有率が小さくなるほど測定軸の断面積が小さくなり同図中に示してあるようにトルク印加時の歪み量が大きくなるためと考えられる。しかし、山部占有率が30%以下になるとコイルに対する充填率が小さくなる影響が現われ感度増加率が飽和してくる。

測定軸の断面積を変化させるには溝の深さを変化させる方法も考えられる。Fig. 5は溝の本数を一定(12本)に保ち溝深さを変えた時の検出感度の変化を示している。やはり溝深さが大きくなり断面積が小さくなるにつれて感度が高くなっている。溝深さは充填率に対する影響は小さいので飽和現象がまだ現われていない。

以上の測定実験の結果から溝の形状、寸法、本

数を決定するわけであるが、Fig. 4, 5ともピークが存在せず単調変化であるので必ずしも最適値が存在しない。しかし、山部占有率がある程度小さくなると感度増加率が飽和してくるので、溝加工の効率を考慮して山部占有率として46% (溝本数12本)を選んだ。また、溝幅は2mm、溝深さは直径の小さな軸にも適用できるよう1mmとした。

4.3 検出コイル

トルクセンサを回転駆動軸に組み込む場合、トルクセンサが無い場合と比較してその分だけ軸長が長くなるのでできる限りセンサ長さを小さくしたい。したがって、検出コイルの幅も小さいことが望まれ、多層巻きとならざるを得ない。Fig. 6に

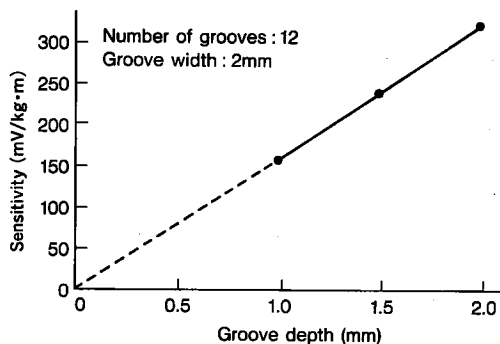


Fig. 5. Relation between groove depth and sensitivity.

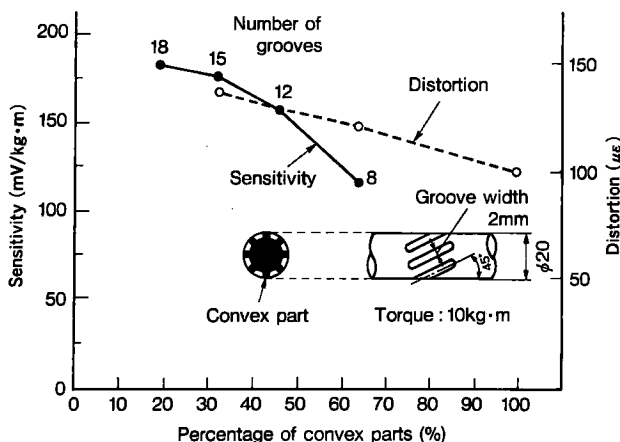


Fig. 4. Relations between percentage of convex parts and sensitivity and distortion of shaft surface.

はコイル幅 5mm でのコイル層数とインピーダンスおよびインピーダンス変化率（フルトルク印加時）の関係を示す。インピーダンスは層数の 2 乗に比例して増加するが、トルク検出のために必要なインピーダンス変化率は層数の増加につれて小さくなる。トルク印加時のインピーダンス変化率は後述の温度特性などを考慮するとできる限り大きい方が望ましいが、コイルインピーダンスが小さ過ぎるとコイル電流が大きくなったり配線抵抗の影響を受け易くなり好ましくない結果も生じる。そのためコイルインピーダンスは数 10Ω 程度は必要であり層数は 4 とした。したがって、フルトルク時のインピーダンス変化はたかだか 0.3% である。

4.4 励磁周波数

Fig. 7 に励磁周波数とコイルのインピーダンス変化率（感度）の関係を示す。40kHz 付近にピークがあり励磁周波数は 40kHz とした。今までの各調査実験においてもまた、以後の調査においても励磁周波数は 40kHz を使用した。

4.5 増幅、検波回路

上記 4.3 項で示したようにフルトルク印加時でもインピーダンス変化率はわずか 0.3% 程度である。その時のインピーダンスは約 50Ω でありインピーダンス変化は約 0.15Ω である。コイル電流を 30mA と仮定するとコイル電圧の変化は 4.5mV である。したがって、フルトルク時出力電圧を $\pm 5V$ に設定すると増幅率は 1100 倍必要となる。

同期検波回路は Fig. 2 に示すようにブリッジ

からの差動信号と発振器の信号を入力してトルクの極性を判定するものである。

5. 検 討 課 題

今までは基本的なトルクセンサの構成方法について述べてきたが、実用化に際しては留意せねばならない問題点がいくつか予想される。その問題点と対策を検討した結果について述べる。

5.1 温 度 特 性

5.1.1 一様な温度変化

検出コイルのインピーダンス変化はフルトルクを印加した場合でもわずか 0.3% であるので周囲温度変化によるインピーダンス変化も測定誤差に大きな影響を与えることが予想される。差動型の検出コイルを採用しているので全体の一様な温度変化の場合には互いに打ち消し合って誤差が小さくなる。しかし、差動型であっても二つのコイルに製作上の誤差があればインピーダンス変化が異なり測定誤差となる。一例として 100 ターンコイルにおいて 1 ターンの製作誤差があった場合、実測では $1\%/100^\circ\text{C}$ のインピーダンス誤差となることが判明した。この値はフルトルク印加時のインピーダンス変化の約 3 倍であり、温度変化の最大値を 100°C 、そのときの誤差をフルトルク出力の 10% 以下に抑えるとするならばコイル製作時の巻数誤差は $1/30$ ターン以下に押える必要がある。

5.1.2 温 度 勾 配

トルク測定軸には一方向からモータや変速機、あるいはエンジンなどからの熱が伝わり測定軸の

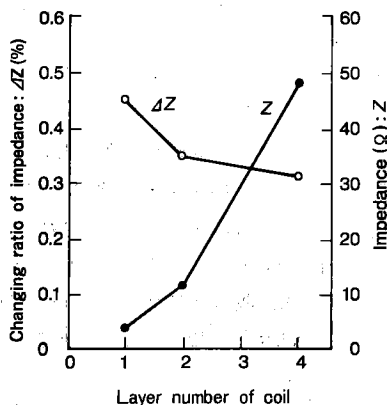


Fig. 6. Relations between layer number and impedance and changing ratio of impedance of pick up coil.

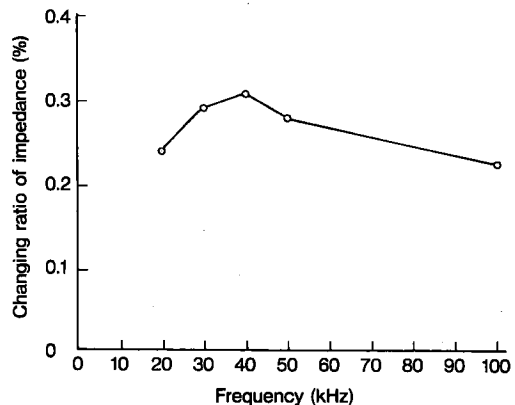


Fig. 7. Relation between exciting frequency and changing ratio of coil impedance.

長さ方向に温度勾配が生ずる可能性がある。温度勾配が生ずると測定軸材料の透磁率に差が生じて結果として差動構成の二つのコイルのインピーダンスに差が生ずる。このインピーダンスの差は実験結果の一例では二つのコイルの位置での測定軸の温度差1°Cでフルトルク時のインピーダンス変化の55%すなわち0.17%にも達した。上記の様な温度変化の場合の誤差は二つのコイルをかなり厳密に同一特性になるよう製作することにより(量産の場合はこれも問題となるが)ほぼ解決できるが温度勾配についてはなんらかの積極的な対策が必要となる。そこで、測定軸上の限られた(長さ数10mm)範囲の温度勾配はほぼ直線的であると見做して4コイル法による温度勾配補正技術を開発した。

Fig. 8(a)に示すようにトルク検出コイルA, Bの他に温度勾配補正用コイルC, DをA, Bの両側に設置する。AC間, BD間の距離は等しいとする。これらのコイルをFig. 8(b)に示すように接続する。今、基準温度 t_0 でのコイルA, Bのインピーダンスを Z_0 , C, Dのそれを βZ_0 ($1 > \beta > 0$)、コイルインピーダンスの温度係数を α とし、軸上の温度分布はFig. 8(c)のように仮定すると温度 t でのそれぞれのコイルインピーダンスは(5)式で現わされる。

$$\left. \begin{aligned} Z_A &= Z_0 \left\{ 1 + \alpha \left(t_0 + \frac{b-a}{2} \cdot \frac{t}{b} \right) \right\} \\ Z_B &= Z_0 \left\{ 1 + \alpha \left(t_0 + \frac{b+a}{2} \cdot \frac{t}{b} \right) \right\} \\ Z_C &= \beta Z_0 (1 + \alpha t_0) \\ Z_D &= \beta Z_0 (1 + \alpha (t_0 + t)) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

Fig. 8(b)の接続においてバランスのとれた状態では

$$Z_A + Z_D = Z_B + Z_C \dots\dots\dots (6)$$

である。軸上の温度分布すなわち t が変化してもつねに(6)式が成り立つように β を決定すると(6)式に(5)式を代入して

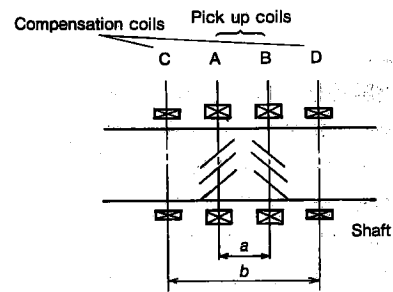
$$\beta = a/b \text{ が得られる。}$$

そこで、4コイルを等間隔配置することにする

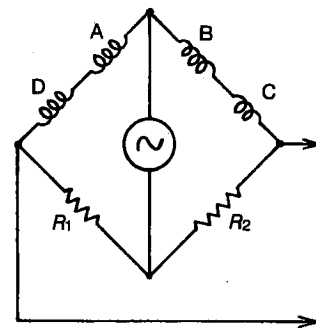
$$\beta = a/b = 1/3 \dots\dots\dots (7)$$

が得られる。すなわち、温度勾配補正コイルのインピーダンスを検出コイルのその1/3に製作すれば測定軸に直線状の温度勾配が発生してもそれにより生ずる誤差を消去できる。

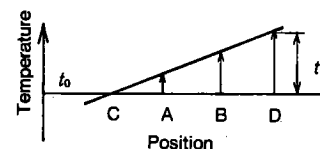
この理論を確認するために温度勾配を発生させ



(a) Coil arrangement



(b) Compensation circuit



(c) Temperature gradient

Fig. 8. Compensation method of temperature gradient error.

た測定軸を用いて β の値を変化させた時の温度勾配誤差を測定した。結果をFig. 9に示す。

この結果によれば、補正コイルが無い場合と比較して $\beta=1/3.8$ の場合、誤差は約1/18 (3/55)に軽減されている。理論と異なり $\beta=1/3.0$ の時最小とならないのはコイル幅やコイル間の相互誘導が影響しているものと考えられる。この4コイル法により軸の温度勾配誤差が大幅に軽減できることが確認できた。

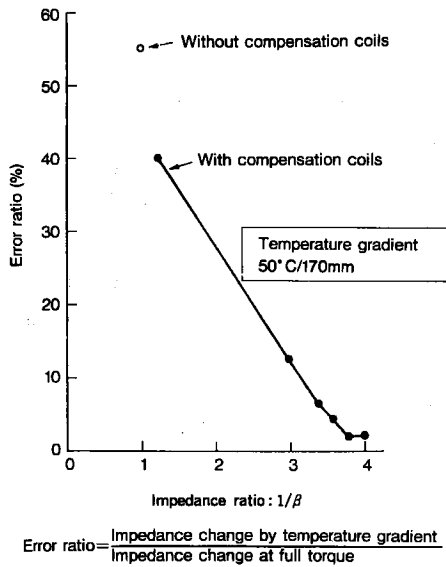


Fig. 9. Effect of compensation coils on temperature gradient error.

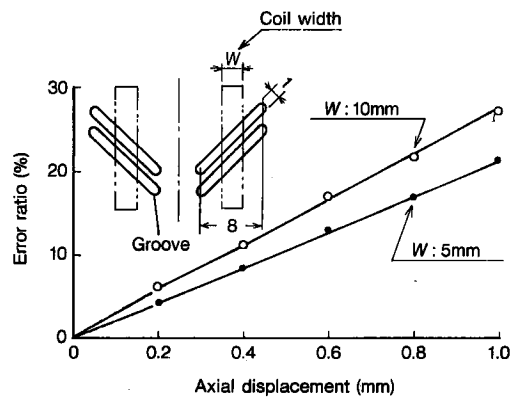
5.2 検出コイルと測定軸の相対位置変動による誤差（機械的要因）

5.2.1 軸方向の位置変動

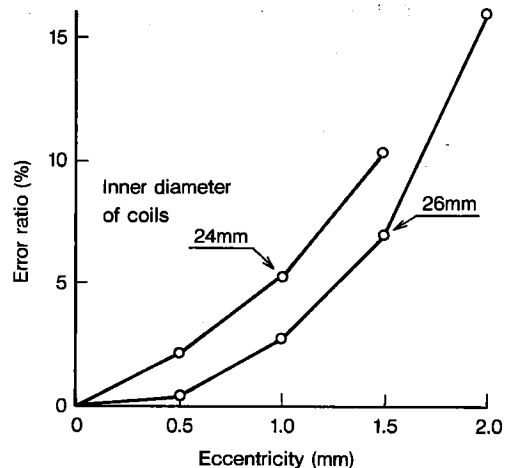
軸方向の位置変動による誤差はコイル幅と溝長さの相対関係によっても変動し相対的にコイル幅が小さい方が誤差は小さくなる。Fig. 10(a)は位置変動に対する誤差を実験的に調査した結果である。コイル幅が5mmの場合は10mmの場合より約20%小さくなっているが、それでも0.2mmの位置変動で4%の誤差を生ずることが判明した。したがって、1%以下の誤差に抑える場合は位置変動は50μm以下に抑える必要がある。位置変動は軸を支持しているベアリングのがたにより起きるが通常のベアリングで50μm以下のがたに抑えることは特に難しいことではないので、軸方向の位置変動は大きな問題とはならない。

5.2.2 径方向の位置変動

Fig. 10(b)に径方向の位置変動に対する誤差の調査結果を示す。コイルの充填率によって誤差の大きさは異なるが、コイル内径24mmの場合には誤差を1%以下に抑えるには偏心量を0.2mm以下に抑える必要がある。これは機械加工および組み立て時に考慮すべき精度であるが製作上全く問題ない数値である。



(a) Error ratio by axial displacement



(b) Error ratio by eccentricity of shaft and pick up coils

Fig. 10. Error by mechanical causes.

6. 試作結果

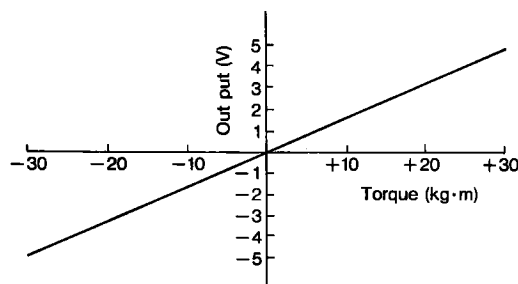
以上に検討した結果を考慮してトルクセンサを試作し、その精度および各種誤差について評価した。

6.1 トルク測定精度

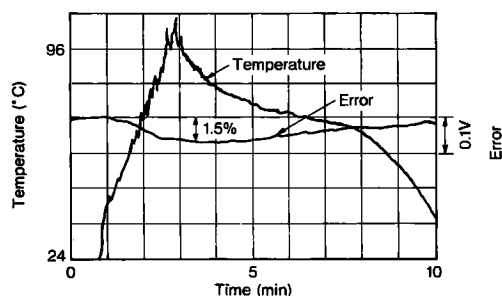
Fig. 11(a)は周囲温度一定でフルトルク(±30 kg·m)を印加した場合の出力である。直線性およびヒステシスとも全く問題のない良好な出力信号が得られた。

6.2 温度特性

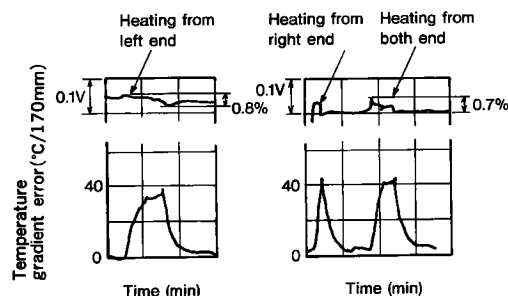
Fig. 11(b), (c)は温度特性を測定した結果である。Fig. 11(b)は一様な温度変化による誤差であ



(a) Result of full torque measurement



(b) Error by change of surrounding temperature



(c) Error by temperature gradient

Fig. 11. Property of proto type torque sensor.

る。周囲温度を常温から106°C以上まで変化させた時(温度差82°C)の誤差はフルトルクの1.5%である。また、Fig. 11(c)は温度勾配による誤差であるが、170mmの軸に約40°Cの温度勾配を発生させた場合の誤差は0.7~0.8%に抑えられている。これらの結果は実用的にほぼ満足できる値と判断した。

6.3 機械的要因による誤差

機械的要因による誤差は図示していないが、軸方向の位置変動による誤差は0.5%、径方向の位置変動による誤差は0.2%であり特に製作にあたっての問題はなかった。

7. 結 言

磁歪式トルクセンサの測定軸材として開発したCrMo系浸炭鋼を用いてトルクセンサを試作した。この結果をまとめると次の通りである。

(1) CrMo系浸炭鋼の許容ねじり応力は $19.1 \times 10^8 \text{ kg/m}^2$ であり、フルスケール30kg・mのトルクセンサには直径20mmの測定軸が適切である。

(2) 磁氣的異方性を付加するための溝は幅2mm、深さ1mmとし、山部占有率は46%とした。

(3) 検出コイルは4層巻きとし、温度特性を改善するために検出コイル2個、温度勾配補正用コイル2個の4コイル構成とした。この場合前者と後者のインピーダンス比は3.8:1が最適であった。

(4) トルク変換部の主回路は差動増幅、位相検波で構成し、コイル励磁周波数は40kHzとした。

(5) 以上の仕様により試作したトルクセンサは測定精度、ヒステレシスとも良好で、囲温度変化(82°C)による誤差1.5%、温度勾配(40°C/170mm)誤差0.8%、機械的要因による誤差0.5%以下でありほぼ満足できる性能が得られた。

磁歪式トルクセンサは構成要素が多く理論解析が複雑であるため本稿では主に実験による解析を試みた結果について記述した。今後は、このトルクセンサを実際の回転機器に応用するための研究開発を進めて行く計画である。

最後に、共同で開発を進めていただきました日産自動車株式会社の方々および測定軸材料の開発を担当していただいた大同特殊鋼株式会社研究開発本部電子材料研究室の皆様に感謝の意を表します。

(文 献)

- 1) 情報調査会センサ技術編集部：センサデータベースハンドブック、(1983)、175
- 2) 斎藤貴伸、矢萩慎一郎：電気製鋼、61(1990)3、169
- 3) 谷崎、青木、矢萩、斎藤：応用磁気学会誌、14(1990)、383
- 4) 日本非破壊検査協会編：非破壊検査便覧、(1978)、906〔日刊工業新聞社〕
- 5) 日本非破壊検査協会編：非破壊検査便覧、(1978)、657〔日刊工業新聞社〕
- 6) 日本機械学会編：機械工学便覧、(1968)、7